

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PPGEC – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDERSON LEVISKI

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RCC E RESÍDUO DE POLIMENTO
DE PLACAS CIMENTÍCIAS EM ARTEFATOS DE CONCRETO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2016

ANDERSON LEVISKI

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RCC E RESÍDUO DE POLIMENTO
DE PLACAS CIMENTÍCIAS EM ARTEFATOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao PPGEC –
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Cerri
Co-orientadores: Prof^a. PhD. Marcia Silva de Araujo
Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

L666u Leviski, Anderson
2016 Utilização de agregados de RCC e resíduo de polimento
 de placas cimentícias em artefatos de concreto / Anderson
 Leviski.-- 2016.
 124 f: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
civil. Área de Concentração: Construção civil, Curitiba,
2016.

Bibliografia: p. 118-124.

1. Resíduos como material de construção. 2. Resíduos
industriais. 3. Partículas (Física, química, etc.).
4. Blocos de concreto. 5. Reaproveitamento (Sobras, refugos,
etc.). 6. Construção civil. 7. Engenharia civil -
Dissertações. I. Cerri, José Alberto, orient. II. Araújo,
Márcia Silva de, coorient. III. Mazer, Wellington, coorient.
IV. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil. V. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº

A Dissertação de Mestrado intitulada UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RCC E RESÍDUO DE POLIMENTO DE PLACAS CIMENTÍCIAS EM ARTEFATOS DE CONCRETO, defendida em sessão pública pelo candidato Anderson Leviski, no dia 20 de dezembro de 2016, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Construção Civil, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Alberto Cerri - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Adauto José Miranda de Lima - UTFPR

Profa. Dra. Adriana Scoton Antonio Chinelatto - UEPG

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 20 de dezembro de 2016.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

DEDICATÓRIA

À minha família, aos loucos, sábios, débeis e sonhadores.
Tudo é possível, basta tentar.

AGRADECIMENTO

Certamente este é um grande momento, no qual finalizo um intenso trabalho de alguns anos.

Alegria é o sentimento, que quero compartilhar, por meio de agradecimentos a tantas pessoas importantes em toda esta trajetória.

Com toda sinceridade e respeito, agradeço ao Professor José Alberto Cerri e à Professora Márcia Silva de Araujo, pela oportunidade, pela paciência e principalmente, pelo conhecimento acadêmico adquirido neste período, conhecimento imensurável.

À minha família dedico este trabalho e agradeço por tudo que conquisei. O que seria da minha vida sem meus pais, alicerces da minha educação e moral. Jamais teria conseguido chegar aqui, se não fosse o apoio e as críticas construtivas da minha esposa, Tina, agradeço pela perseverança ao meu lado. Jamais poderia deixar de lembrar do meu grande companheiro em tantas jornadas na UTFPR e fora dela, meu filho Vitinho, muito obrigado por me ajudar nos ensaios práticos.

Professor Wellington Mazer, muito obrigado pelo conhecimento ministrado e pela co-orientação.

Aos integrantes da banca avaliadora, Prof. Adauto José Miranda de Lima e Prof^a. Adriana Scoton Antonio Chinelatto, muito obrigado pela avaliação e esclarecimentos prestados.

Agradeço à Aline Herman, colega de tantos trabalhos práticos e troca de experiências. Da mesma maneira agradeço ao Gustavo Macioski e ao Felipe Perretto, pelas ajudas laboratoriais.

Fiz meu curso técnico, minha faculdade e agora termino o Mestrado mais uma vez na UTFPR, praticamente minha segunda casa. Obrigado a todos que compõem esta magnífica instituição de ensino. Também rememoro as disciplinas que cursei na UFPR, bons momentos e grande aprendizado com excelentes professores.

RESUMO

LEVISKI, Anderson. Utilização de agregados de RCC e resíduo de polimento de placas cimentícias em artefatos de concreto. 2016. 126 f. Dissertação. (PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016

A Construção Civil é um dos setores que mais consomem matérias-primas e também gera resíduos sólidos urbanos. É importante, que se consuma menos matérias-primas e que sejam aproveitados estes resíduos gerados. Uma das propostas para esta situação seria reciclar estes resíduos e transformá-los em agregados e filers, para então usá-los na produção de concretos. Ainda se encontram muitas barreiras para utilização destes agregados e filers em concretos, com e sem função estrutural e, dentre os principais motivos está a dificuldade de se alcançar resistências similares as dos concretos produzidos com matérias-primas naturais. Devido a este fato, foi proposto um estudo para analisar a influência do empacotamento de partículas nos agregados reciclados e ainda verificar a possibilidade de uso do filer de pó do polimento das placas de concreto para revestimento de piso. Inicialmente foram caracterizados dois lotes de agregados reciclados e apenas o de resíduo de concreto (ARC) foi considerado adequado para o estudo. Foram propostos três planejamentos experimentais compostos por mistura *simplex* com 4 fatores das misturas, contendo além dos agregados, filer e cimento Portland CP-V. Foram realizados estudos sobre as massas unitárias das amostras, para cada um dos planejamentos, considerando toda a faixa granulométrica, e também, amostras sem o material passante pela peneira com abertura de 0,150 mm. A quantidade de água foi determinada pelo consistômetro de Vebe, e a partir deste dado foi calculado o excesso de pasta. Após a obtenção dos corpos de prova, sob vibrocompactação, foi determinado o comportamento da resistência mecânica e da absorção de água. A análise dos resultados mostrou que o melhor empacotamento de partículas dos agregados ocorre na faixa de 42% a 58% de pedrisco. O filer utilizado em grandes quantidades, aumenta significativamente o consumo de água de amassamento e o de excesso de pasta, e por consequência, o aumento da absorção de água e perda de resistência do concreto seco. Entretanto, em quantidades menores que o volume de poros, a inclusão do filer é aceitável, pois não há afastamento das partículas. Conclui-se que, na faixa granulométrica estudada não houve alteração de resistência mecânica, sendo o fator preponderante a concentração de cimento. As resistências à compressão observadas mostram que estes agregados podem ser utilizados na fabricação de artefatos de concreto, como por exemplo, produção de blocos de vedação.

Palavras-chave: RCC, Empacotamento de partículas, Resíduo de polimento, Artefato, Concreto seco

ABSTRACT

LEVISKI, Anderson. Use of CDW aggregates and cementitious slab polishing residue in concrete artifacts. 2016. 126 f. Dissertation. (PPGEC - Graduate Program in Civil Engineering). Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2016

Civil Construction is one of the sectors that consumes the rawest materials and also generates municipal solid waste. It is important that less raw materials are consumed and that waste generated is used. One of the proposals for this situation would be to recycle these wastes and turn them into aggregates and fillers and then use them in the production of concrete. There are still many barriers to the use of these aggregates and fillers in concrete, with and without structural function, and among the main reasons is the difficulty of achieving similar resistance to concrete produced with natural raw materials. Due to this fact, a study was proposed to analyze the influence of the packing of particles in the recycled aggregates and to verify the possibility of using the filler of powder of the polishing of the concrete plates for floor covering. Initially, two batches of recycled aggregates were characterized and only that of concrete residue was considered adequate for the study. Three experimental schedules were proposed, composed of 4 factors of the mixtures, plus the aggregates, filler and Portland cement CP-V. Samples were analyzed for the sample masses, considering the entire grain size range, as well as samples without material passing through the sieve with a 0.150 mm opening. The amount of water was determined by the Vebe consistometer, and from this data, the excess paste was calculated. After the test specimens were obtained, under vibratory compaction, the behavior of the mechanical resistance and the water absorption were determined. The analysis of the results showed that the best packaging of particles of the aggregates occurs in the range of 42% to 58% of hail. The filler used in large quantities significantly increases the consumption of kneading water and excess paste, and consequently, increased water absorption and loss of strength of dry concrete. However, in smaller amounts than the pore volume, the inclusion of the filler is acceptable, since there is no separation of the particles. It was concluded that in the granulometric range studied, there was no change in mechanical strength, being the preponderant factor the concentration of cement. The observed compressive strengths show that these aggregates can be used in the manufacture of concrete artifacts, such as the production of sealing blocks.

Key-words: CDW, Particle packing, polishing waste, Artifact, zero slump concrete

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Tempo Vebe e a consistência do concreto seco.....	39
TABELA 2	Especificações técnicas do CPV ARI.....	53
TABELA 3	Composições dos agregados para o ensaio de volume aparente e massa unitária	54
TABELA 4	Planejamento A: composição de pedrisco, areia, filer e cimento	57
TABELA 5	Planejamento B: composição de pedrisco, areia, filer e cimento	58
TABELA 6	Planejamento C: composição de pedrisco, areia, filer e cimento	58
TABELA 7	Composição dos agregados nos ensaios de volume aparente e massa unitária.....	59
TABELA 8	Peneiras utilizadas para o cálculo do módulo de distribuição.....	60
TABELA 9	Disposição dos ensaios com corpos de prova.....	70
TABELA 10	Resultados do ensaio de granulometria da areia do lote A.....	72
TABELA 11	Ensaio de granulometria do pedrisco do lote A - NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	73
TABELA 12	Caracterização do pedrisco e da areia do lote A.....	75
TABELA 13	Composição do pedrisco do lote A.....	75
TABELA 14	Ensaio de granulometria da areia do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003).	76
TABELA 15	Ensaio de granulometria do pedrisco do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	78
TABELA 16	Caracterização dos agregados do lote B.....	79
TABELA 17	Ensaio de composição do pedrisco do lote B.....	80
TABELA 18	Volume aparente em 4 condições de leitura: A - sem vibração; B- após 5 min. de vibração sem peso; C- após 10 min. de vibração com peso, e D- 50 quedas livres.....	81
TABELA 19	Massa específica e volume de vazios.....	83
TABELA 20	Volume aparente e massa unitária das matérias-primas	84
TABELA 21	Massas unitárias e volume de vazios dos três planejamentos experimentais.....	85
TABELA 22	Distribuição dos tamanhos de partículas.....	90
TABELA 23	Módulos de distribuição dos três planejamentos.....	92

TABELA 24	Resumo dos traços após o ensaio do consistômetro de Vebe...	97
TABELA 25	Valores para o cálculo de excesso de pasta.....	99
TABELA 26	Resumo dos resultados de compressão axial e diametral, para as idades de 7 e 28 dias.....	100
TABELA 27	Resumo dos resultados de massa específica e absorção dos corpos de prova do P.A.	107

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Artefatos de concreto: (a) bloco de concreto, (b) canaleta, (c) grelha, (d) meio fio, (e) pavers, (f) placa, (g) guia de travamento, (h) tubo e (i) piso podotátil.....	31
FIGURA 2	Layout de uma unidade de produção totalmente automatizada: 1- Vibroprensa; 2- Esteira extratora da prensa; 3- Esteira alimentadora da paleteira; 4- Paletizador manual; 5- Escova de limpeza de paletes; 6- Tapete vira paletes; 7- Tapete transversal; 8- Tapete alimentador de paletes; 9- Unidade hidráulica; 10- Tapete de rolos livres; 11- Quadro de comando; 12- Depósito de lubrificação; 13- Esteira alimentadora de concreto; 14- Prateleira de secagem; 15- Central de concreto; 16- <i>Skip</i> elevador de agregados; 17- Sem-fim; 18- Silo de cimento; 19- Cubas de agregados; 20- Esteira de pesagem.....	33
FIGURA 3	Comparação entre ganho de resistência à compressão versus F_a/c , para concretos secos e plásticos.....	34
FIGURA 4	Dispositivo do SHPB (barra de pressão de Split Hopkinson).....	35
FIGURA 5	Experiências dinâmicas quasi-oedométricas realizadas em concreto com diversos teores de água livre: (a) curva de compactação, (b) desvio no compotamento.....	35
FIGURA 6	(a) Prensa com cilindro de confinamento e pistão, (b) extração do corpo de prova com o molde bipartido e, (c) remoção do molde bipartido após 24 h.....	36
FIGURA 7	Consistômetro de Vebe.....	37
FIGURA 8	Método de execução do ensaio de consistência Vebe.....	38
FIGURA 9	Efeito da adição de borracha na trabalhabilidade.....	40
FIGURA 10	Modelo de Andreasen, distribuição granulométrica contínua.....	43
FIGURA 11	Sistema real, intermediário e equivalente, sobre o estudo do excesso de pasta.....	47
FIGURA 12	Demanda de água dependente da concentração de filer de mármore nas misturas.....	48

FIGURA 13	Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e teor de filler de mármore.....	49
FIGURA 14	Lote A, pedrisco à esquerda e areia à direita.....	51
FIGURA 15	Lote B, pedrisco à esquerda e areia à direita.....	51
FIGURA 16	Aspecto visual do resíduo após secagem em estufa.....	53
FIGURA 17	Travamento lateral da proveta (figura a esquerda), detalhe do peso utilizado (figura a direita).....	55
FIGURA 18	Consistômetro de Vebe.....	61
FIGURA 19	Transformação do formato tronco-cônico para cilíndrico.	63
FIGURA 20	Mesa vibratória simulando processo de vibrocompactação dos CPs em laboratório, composta por: 1 - mesa vibratória, 2 - apoio para hastes que simulam a compressão, 3 – conjunto de camisas 4 - hastes no interior da camisa.....	64
FIGURA 21	Molde de corpo de prova de (5 cm x 10) cm (item 5) e adaptador da haste (item 6).....	65
FIGURA 22	Colocação do adaptador no molde em posição vertical.....	65
FIGURA 23	Disposição final do conjunto.....	66
FIGURA 24	Inspeção visual e constatação de falhas nos corpos de prova...	67
FIGURA 25	Detalhe do bloco de aço (10) e do soquete (11), com o molde do lado esquerdo e o adaptador do lado direito.....	68
FIGURA 26	Fissura transversal, oriunda pela falta de “agulhamento” entre camadas.....	68
FIGURA 27	Corpos de prova sem fissuras transversais e bom acabamento aparente.....	69
FIGURA 28	Chapa para regularização da superfície, sobre o molde.....	69
FIGURA 29	Ensaio de granulometria da areia do lote A (NBR NM 248/2003).....	73
FIGURA 30	Ensaio de granulometria do pedrisco do lote A - NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	74
FIGURA 31	Ensaio de granulometria da areia em estudo do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	77
FIGURA 32	Ensaio de granulometria do pedrisco do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003).....	78

FIGURA 33	Relação entre volume aparente e a massa de pedrisco na mistura.....	82
FIGURA 34	Da esquerda para direita, leituras A, B, C e D.....	83
FIGURA 35	Massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras totais.....	86
FIGURA 36	Massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras sem o passante em 0,150mm.....	87
FIGURA 37	Massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras totais e sem o passante em 0,150mm.....	88
FIGURA 38	Volume de vazios dos três planejamentos experimentais, para as amostras totais	88
FIGURA 39	Volume de vazios dos três planejamentos experimentais, para as amostras sem o passante em 0,150mm	89
FIGURA 40	CPFT (%) versus tamanho de abertura de peneira para (a) Planejamento A, (b) Planejamento B e (c) Planejamento C.....	91
FIGURA 41	Módulo de distribuição da amostra 1 do planejamento A.....	93
FIGURA 42	Módulos de distribuição das amostras totais.....	93
FIGURA 43	Módulos de distribuição das amostras sem o passante na peneira 0,150mm	94
FIGURA 44	Gráfico de Pareto da relevância relativa da água de amassamento em relação aos componentes do concreto.....	95
FIGURA 45	Influência do filer, areia e pedrisco na água de amassamento...	96
FIGURA 46	Influência do do cimento, areia e pedrisco na água de amassamento.....	96
FIGURA 47	Influência dos insumos na compressão: (a) axial aos 7 dias (MPa), (b) axial aos 28 dias (MPa), (c) diametral aos 7 dias (MPa) e (e) diametral aos 28 dias (MPa).....	101
FIGURA 48	Ensaio de compressão axial aos 7 dias.....	102
FIGURA 49	Ensaio de compressão axial aos 28 dias.....	103
FIGURA 50	Ensaio de compressão diametral aos 7 dias.....	103
FIGURA 51	Ensaio de compressão diametral aos 28 dias.....	104
FIGURA 52	Ensaio de compressão axial aos 7 dias... ..	104
FIGURA 53	Ensaio de compressão diametral aos 7 dias.....	105

FIGURA 54	Influência dos insumos na massa específica aos 7 dias.....	108
FIGURA 55	Resultados do ensaio de massa específica.....	108
FIGURA 56	Resultados do ensaio de massa específica.....	109
FIGURA 57	Influência dos insumos na absorção de água aos 7 dias.....	109
FIGURA 58	Influência dos insumos na absorção de água aos 28 dias.....	110
FIGURA 59	Resultados do ensaio absorção de água aos 7 dias.....	110
FIGURA 60	Resultados do ensaio absorção de água aos 7 dias.....	111

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	Benefícios esperados com a Lei 12.305/2010: PNRS - Política Nacional de Resíduos sólidos.....	23
QUADRO 2	Mudanças na Resolução CONAMA 307/2002.....	24
QUADRO 3	Ensaio de caracterização dos agregados reciclados.....	28
QUADRO 4	Desempenho mínimo dos agregados reciclados.....	29
QUADRO 5	Ensaio de caracterização dos agregados.....	52
QUADRO 6	Resistência mecânica axial aos 7 dias e aplicação na indústria...	106
QUADRO 7	NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria..	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARC	Agregado de resíduo de concreto
ARM	Agregado de resíduo misto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
MINTER	Ministério do Interior
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma brasileira regulamentadora
NM	Norma Mercosul
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da Construção Civil
SEMA/PR	Secretaria Especial de Meio Ambiente do Paraná
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
Fa/c	Fator água:cimento
Fck	Resistência característica do concreto à compressão
CPFT	Porcentagem acumulada de partículas menores que tamanho D
D	Diâmetro da partícula
DL	Tamanho da maior partícula do sistema
q	Módulo de distribuição
D _S	Tamanho da menor partícula
d _{AB}	Massa específica da mistura dos agregados;
d _A	Massa específica da areia;
A	Porcentagem de areia na mistura;
d _B	Massa específica do agregado graúdo (brita);
B	Porcentagem de brita na mistura.
E _V	Porcentagem de vazios na mistura;
ρ _{AP}	Massa unitária da mistura.
F _{cj}	Resistência de dosagem
a/c	Relação água cimento
MPT	Máxima espessura de pasta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO GERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1 PNRS – PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	22
2.1.2 Alterações na Resolução CONAMA 307/2002.....	24
2.2 O AGREGADO ORIUNDO DE CONCRETO RECICLADO E DE RESÍDUOS DE OBRAS.....	25
2.2.1 Caracterização dos agregados reciclados.....	27
2.2.2 Amostragem.....	30
2.3 ARTEFATOS DE CONCRETO.....	30
2.3.1 Fabricação dos artefatos.....	32
2.4 CONCRETO SECO.....	34
2.5 MENSURAÇÃO DA TRABALHABILIDADE EM CONCRETOS SECOS.....	37
2.5.1 Mensuração da trabalhabilidade pelo consistômetro de Vebe.....	37
2.6 ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS	40
2.6.1 Método de O’Reilly.....	40
2.6.2 Método propostos por Alfred e Andreasen - abordagem contínua.....	42
2.7 ESTUDO TEÓRICO DO VOLUME DE PASTA.....	43
2.8 FILERS UTILIZADOS EM CONCRETO SECO.....	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 MATERIAIS.....	50
3.1.1 Filer.....	50
3.1.2 Agregados.....	51
3.1.3 Cimento.....	52
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	52
3.2.1 Caracterização dos Agregados.....	52
3.2.2 Caracterização do filer.....	53

3.3 DEFINIÇÃO DA FAIXA DE COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS MAIS COMPACTADA.....	53
3.4 ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	57
3.4.1 Planejamentos Experimentais.	57
3.4.2 Estudos de empacotamento de partículas entre os agregados.....	58
3.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA PARA O CONCRETO SECO.....	60
3.5.1 Procedimentos do ensaio de VeBe.....	61
3.6 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	63
3.6.1 Mesa Vibratória.....	64
3.6.2 Procedimento para moldagem dos corpos de prova.....	66
3.6.3 Cura dos corpos de prova.....	70
3.7 ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO	70
3.7.1 Ensaio de resistência mecânica à compressão axial e diametral.....	70
3.7.2 Ensaio de absorção de água e massa específica.....	71
3.8 CÁLCULOS TEÓRICOS DO VOLUME DA PASTA.....	71
4 RESULTADOS	72
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	72
4.1.1 Caracterização dos agregados de RCC – lote A.....	72
4.1.2 Caracterização dos agregados de RCC – lote B.....	76
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO FILER.....	81
4.3 DEFINIÇÃO DA FAIXA DE COMPOSIÇÃO ENTRE AGREGADOS MAIS COMPACTADA.....	81
4.4 ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	84
4.4.1 Método O’Reilly.....	84
4.4.2 Método proposto por Alfred e Andreasen - abordagem contínua	90
4.5 ENSAIO DE VEBE.....	95
4.5.1 Considerações sobre o ensaio de Vebe.....	97
4.6 VOLUME DE PASTA.....	98
4.7 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO.....	100
4.7.1 Aplicação no setor industrial.....	105
4.8 ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	107
4.9 DISCUSSÃO GERAL.....	111

5. CONCLUSÕES.....	115
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

A construção civil gera de 35% a 40 % de todo resíduo produzido na atividade humana e também é responsável pelo consumo de cerca de 40% dos recursos naturais retirados do planeta (SANTOS, 2005).

Na exploração do meio ambiente, assim como nas atividades de beneficiamento, transporte e utilização destes recursos há consumo de energia e de água e, quando estes recursos são descartados, tornam-se resíduos. O descarte pode ser considerado como perda de energia e água investida em todas as etapas produtivas. Por esta razão, tem-se discutido sobre a análise do ciclo de vida dos materiais e também o fator de energia incorporada durante a vida útil.

Outra questão atual e de muita importância na sociedade brasileira é a estiagem de chuvas de modo que o setor produtivo de energia está sendo severamente afetado, pois depende em sua essência do nível de água nas barragens das usinas hidroelétricas.

Segundo a Aneel (2014), em 2008 as usinas hidrelétricas correspondiam a 75,68% do potencial energético instalado no Brasil, ou seja, sem chuvas e com pouco armazenamento de água, deverá ocorrer racionamento no consumo de energia, ou então em caráter emergencial, o país deverá comprar energia livre, ocorrendo uma elevação nos gastos públicos e privados.

Com todos estes fatos ocorrendo, não é cabível desperdiçar energia e muito menos os materiais oriundos da exploração do meio ambiente. Somente o concreto é responsável por mais de 50% de toda energia incorporada nos materiais de construção e a produção de cimento é responsável por elevadas emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa (JALALI e TORGAL, 2011).

O concreto é o material mais utilizado na engenharia e, o consumo anual enquadra-se em uma faixa de 11 bilhões de toneladas (MEHTA, 2008). Dentro de tantos materiais desenvolvidos e existentes no mundo, somente a água é mais consumida que o concreto (GRAZIANO, 2005).

Estes dados mostram que a construção civil é uma indústria poluente e exploratória dos recursos naturais, que o ciclo de vida do concreto é responsável por uma grande demanda no consumo de energia e que a produção de cimento é poluente. Devido a estes fatos, há a necessidade de aproveitar melhor a energia utilizada, e fabricar produtos mais sustentáveis e reaproveitar ao máximo os

resíduos de obra, economizando assim energia e, emitindo menos gases poluentes na atmosfera. Por outro aspecto, indústria da construção civil também incorpora resíduos da própria atividade e de outros setores como indústrias de transformação e agricultura. No co-processamento a indústria cimenteira incorpora no cimento, fillers, cinzas volantes e escória e, na co-geração, resíduos industriais, com alto poder calorífico, compõem junto com os combustíveis convencionais, uma composição responsável pelo aquecimento dos fornos rotativos.

Recentemente há a tentativa de utilização de novos materiais, na substituição dos agregados no concreto. Esta tentativa reduz o impacto ambiental e o custo, sendo alguns exemplos, a reutilização do vidro, plástico e cerâmica (TAVAKOLI *et. al*, 2014).

Uma das formas de aproveitar os insumos empregados em materiais de construção civil é reciclar resíduos na forma de agregados e adições, para aplicá-los na obtenção de concretos secos.

Uma das grandes dificuldades na obtenção de concretos secos, utilizando agregados reciclados e adições oriundas de processos industriais, é conseguir manter a resistência mínima à compressão, imposta pelas normas técnicas vigentes, sem acarretar em um aumento no consumo de cimento para não encarecer o produto.

Tão importante quanto a sustentabilidade ambiental é o desempenho dos concretos preparados com resíduos de obras, pois não haveria vantagem em aproveitar os resíduos e colocar em risco a segurança das pessoas. Assim, a realização de estudos e experimentações se faz necessário para ampliar o conhecimento no assunto, principalmente relacionado a obter a maior resistência mecânica à compressão, sem aumento no consumo de cimento Portland.

Como a indústria da construção civil, embora responsável por grande parte de todo resíduo gerado na atividade humana, é também uma grande incorporadora de resíduos de outros setores. Assim, gerir estes resíduos e aproveitá-los trazem dois resultados imediatos às questões de impacto ambiental. O primeiro é a redução na exploração dos recursos naturais e o segundo, a redução do acúmulo de resíduos.

Para a obtenção de concreto seco, a utilização de agregados reciclados se apresenta como uma opção na substituição dos agregados naturais, desde que atenda todas as características de desempenho e seja, portanto, viável para o investimento das empresas do setor.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é estudar a influência do empacotamento de partículas de agregados reciclados, e do filer de resíduo industrial (pó de polimento de placas de concreto) no comportamento de concretos secos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos necessários para atingir o objetivo geral são:

- ✓ definição das composições por meio de delineamento experimental, utilizando modelos teóricos;
- ✓ determinação dos teores de água nas composições por meio de ensaio no consistômetro Vebe, e cálculo do excesso de pasta;
- ✓ obtenção de corpos de prova em laboratório com procedimento similar ao industrial, ajustando o fator de escala;
- ✓ avaliação do comportamento do concreto seco, tanto em estado fresco quanto em estado endurecido, além da resistência mecânica à compressão em função da composição.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para o desenvolvimento desta dissertação foi realizada uma sequência de estudos, os quais visaram atender as normas vigentes e, atender os conceitos de sustentabilidade e impacto ambiental, de modo que este trabalho foi subdividido em capítulos, além da Introdução.

O capítulo 2 compreende a revisão da literatura sobre temas como: programas e resoluções federais, estaduais e municipais voltados à gestão e incentivo a utilização de RCC. São apresentadas também informações da literatura sobre as características e propriedades dos agregados reciclados, adições, artefatos de concreto, concretos secos e determinação de quantidade de água no concreto pelo consistômetro de Vebe, apresentado o método de empacotamento de partículas proposto por Andreasen, método de determinação da massa unitária entre agregados, e determinação teórica do excesso de pasta.

O capítulo 3 descreve as matérias-primas, os métodos de caracterização dos materiais e os ensaios utilizados no estudo de empacotamento de partículas, além do planejamento experimental usado para determinar as propriedades do concreto em estado fresco e endurecido.

No capítulo 4 serão analisados e discutidos os resultados, sendo que no final deste capítulo é apresentada uma discussão geral, na qual são feitas correlações entre os resultados obtidos e os da literatura.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordados os temas principais deste trabalho.

2.1 PNRS - PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Após 21 anos de tramitação no Congresso Nacional, a Lei Federal 12.305 foi sancionada em agosto de 2010.

No Art. 1º esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público, além dos instrumentos econômicos aplicáveis.

Segundo o Instituto Ethos (2012) até agosto de 2012, oito estados no Brasil já haviam elaborado legislação própria sobre gerenciamento de resíduos e, tal situação aponta que a grande maioria dos estados ainda não estão adaptados ao PNRS.

Tanto os geradores de resíduo, quanto a sociedade e o poder público ainda estão assimilando os conceitos de gestão de resíduos.

É um importante passo, mas ainda falta fiscalização para o cumprimento das leis, falta conhecimento técnico aos administradores públicos e também uma gestão de custos que torne atrativo o ato de reciclar.

A situação que ocorria anteriormente, os benefícios e as mudanças previstas com a implantação desta lei são mostrados no Quadro 1.

É importante salientar que somente com o tempo e a interação da sociedade, iniciativa privada e o estado é que realmente as mudanças benéficas acontecerão.

Os planos de resíduos sólidos deverão conter:

- ✓ diagnóstico da situação dos resíduos sólidos urbanos e metas para redução e reciclagem;
- ✓ planos de finalização dos lixões e busca de soluções consorciadas com outros municípios;
- ✓ identificação dos principais geradores de resíduos, calcular melhor os custos e criar indicadores para medir o desempenho do serviço público nesse campo.

Quadro 1 - Benefícios previstos com a Lei 12.305/2010: PNRS - Política Nacional de Resíduos sólidos. Fonte: (CEMPRE, 2010)

Antes	Depois
Falta de prioridade para os resíduos urbanos	Municípios farão plano de metas sobre resíduos
Coleta seletiva cara e ineficiente	Será obrigatório controlar custos e medir a qualidade do serviço
Exploração por atravessadores e riscos à saúde	Catadores reduzirão riscos à saúde e aumentarão a renda em cooperativas
Informalidade dos catadores	Cooperativas serão contratadas pelos municípios para coleta e reciclagem
Problemas de qualidade e quantidade dos materiais	Aumentará a quantidade e melhora na qualidade da matéria prima coletada
Falta de qualificação e visão de mercado	Trabalhadores serão treinados e capacitados para ampliar a produção
Inexistência de lei nacional para nortear os investimentos das empresas	Marco legal estimulará ações empresariais
Falta de incentivos financeiros	Novos instrumentos financeiros impulsionarão a reciclagem
Desperdício econômico sem a reciclagem	Reciclagem avançará e gerará mais negócios com impacto na geração de renda
Pouca reivindicação junto às autoridades	Cidadão exercerá seus direitos junto aos governantes

Quando há uma legislação bem definida que projete e fiscalize a execução de um plano, a chance deste plano obter sucesso é maior. Para haver a viabilidade da utilização de agregados reciclados, assim como estudos correlatos que viabilizem sua utilização é necessário que haja projetos, incentivos e a fiscalização por parte do poder público. O PNRS pode ser a ferramenta necessária para a ampliação dos projetos e incentivos.

2.1.2 Alterações na Resolução CONAMA 307/2002

No ano de 2012, ocorreram alterações na Resolução CONAMA 307/2002, resolução que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2012), a Resolução 448/2012 altera os Arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA.

O Art. 5º estabelece que o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil é instrumento para a implementação da gestão dos RCC e deve ser elaborado pelos Municípios e pelo Distrito Federal, em consonância com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (nova redação dada pela Resolução 448/12).

As mudanças em relação aos prazos estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Mudanças na Resolução CONAMA 307/2002. Fonte: (ANGULO, 2012)

Mudanças	Situação anterior	Situação atual
Grandes geradores de resíduos	Conclusão do plano de gerenciamento de RCC até janeiro de 2005	Conclusão do plano de gerenciamento de RCC até junho de 2013
Municípios	Conclusão do plano integrado de gerenciamento de RCC até janeiro de 2004	Conclusão do plano integrado de gerenciamento de RCC até janeiro de 2013 e implantação até junho de 2013

No Art. 6º deverão constar do Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil: (nova redação dada pela Resolução 448/12)

- I. as diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, em conformidade com os critérios técnicos do sistema de limpeza urbana local e para os Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil a serem elaborados pelos

grandes geradores, possibilitando o exercício das responsabilidades de todos os geradores (nova redação dada pela Resolução 448/12);

II. o cadastramento de áreas, públicas ou privadas, aptas para recebimento, triagem e armazenamento temporário de pequenos volumes, em conformidade com o porte da área urbana municipal, possibilitando a destinação posterior dos resíduos oriundos de pequenos geradores às áreas de beneficiamento;

III. o incentivo à reinserção dos resíduos reutilizáveis ou reciclados no ciclo produtivo.

De acordo com o Art. 10. os resíduos da construção civil, após triagem, deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados à aterro de resíduos classe A de preservação de material para usos futuros (nova redação dada pela Resolução 448/12).

2.2 O AGREGADO ORIUNDO DE CONCRETO RECICLADO E DE RESÍDUOS DE OBRAS

Após a entrada em vigor da Resolução CONAMA 307/2002, foi publicada a NBR 15.116 (ABNT, 2004) norma que estabelece os requisitos para emprego dos agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. Segundo esta norma os agregados reciclados são classificados em:

- agregado de resíduo de concreto (ARC) - é o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na fração graúda, com mínimo de 90% em massa de fragmentos de rochas e pasta à base de cimento Portland. A composição deve ser determinada conforme o anexo A da referida Norma e atender aos requisitos das aplicações específicas;
- agregado de resíduo misto (ARM) - é o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na fração graúda, com menos de 90% em massa de fragmentos de rochas e pasta à base de cimento Portland. Igual ao ARC, a composição também deve ser determinada conforme o anexo A da referida Norma e atender aos requisitos das aplicações específicas.

O agregado oriundo de concreto apresenta aderido na superfície, pasta de cimento endurecido, argamassa, gipsita e outras substâncias em menor quantidade.

Todavia, mesmo coberto com pasta de cimento, o agregado graúdo, tem sido utilizado e obtido resultados satisfatórios se comparado aos concretos produzidos com agregados naturais. Os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam cerca de 2/3 da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, além de boa trabalhabilidade e durabilidade (EFFTING, 2013).

Segundo Buttler *et al.* (2005), os agregados reciclados obtidos a partir de demolições e relacionados a obras civis são bastante heterogêneos, o que dificulta a separação e classificação. Esta heterogeneidade também gera preconceito, sendo que muitos construtores preferem consumir materiais não reciclados.

De modo geral, os agregados reciclados de RCC são mais porosos, menos resistentes à esforços de compressão e, absorvem mais água que o agregado natural. Porém, controlando a variabilidade de seus constituintes é possível produzir concretos com desempenho mecânico e durabilidade aceitáveis (CABRAL, 2007).

A taxa de absorção de água nos agregados reciclados pode representar uma grande preocupação na produção de concretos, pois devido a sua porosidade, pode absorver a água utilizada no amassamento e, portanto, influenciar na trabalhabilidade e resistência à compressão. Assim, é importante prever esta situação e realizar uma pré-umidificação antes da confecção dos concretos (LEITE, 2001).

Os agregados reciclados são estudados há diversas décadas, sendo que no ano de 1995 na Dinamarca, a *Danish Concrete Association* já classificava os agregados reciclados em dois grupos, de acordo com a massa específica (GLAVIND; HAUGAARD, 1998):

- grupo 1 - ARC com massa específica superior a 2.200 kg/m³ podem ser utilizados para concreto armado ou não, com resistências de até 40 MPa e,
- grupo 2 - ARM com massa específica superior a 1.800 kg/m³, podem ser usados em concreto armado ou não com resistências de até 20 MPa.

O RCC oriundo de sistemas de britagem inadequados resulta em agregados com composição heterogênea e propriedades físicas variáveis, mas executando uma correta operação de reciclagem, podem-se produzir agregados recicláveis tão adequados quanto os naturais e, assim, concretos com capacidades mecânicas similares (CHAVES *et al.*, 2006).

Em alguns países estes resíduos de obra são utilizados nas atividades da pavimentação. Segundo Cavalcanti (2003), o entulho oriundo dos canteiros de obras brasileiras é composto basicamente por 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação como tijolos e blocos e 6% de outros materiais como concreto, rocha, metais, plástico, papel, solo, etc.

Segundo Cabral (2007) *apud* Bakoss e Ravindrarajah (1999) são 3 métodos de classificação e limpeza dos agregados reciclados, sendo eles a separação magnética, a separação a seco e a separação à úmido.

Os separadores magnéticos removem as barras de aço e outros metais que por ventura estejam misturados no material a ser reciclado.

Na separação à seco, as pequenas partículas de reduzida massa específica são removidas com a ajuda de jatos de ar que são disparados contra o material a ser reciclado.

Por fim, na separação à úmido os contaminantes de baixa densidade, tais como madeira e plásticos, são removidos por meio do uso de jatos de água em tanques de flutuação.

2.2.1 Caracterização dos agregados reciclados

Na caracterização técnica dos agregados reciclados há a necessidade de execução de diversos ensaios. Um lote de agregado reciclado somente deve ser aceito quando cumprir todas as prescrições normativas.

Praticamente todos os ensaios exigidos para caracterização de agregados reciclados são os mesmos exigidos para ensaios de agregados naturais, seja para execução de concreto ou então reforço de solo.

Determinação da composição granulométrica conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), determinação das massas específica e específica aparente do agregado miúdo conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009), determinação do teor de materiais pulverulentos no agregado miúdo conforme NBR NM 46 (ABNT, 2003), determinação da massa unitária em estado solto do agregado graúdo conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006), determinação das massas específica e específica aparente, além da absorção de água em agregados graúdos conforme NBR NM 53 (ABNT, 2009).

No Quadro 3, são mostradas as exigências da NBR 15.116 (ABNT, 2004).

Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos agregados reciclados
 Fonte: (NBR 15.116, 2004)

Propriedades		Método de ensaio	Frequência de ensaios	
			Concreto sem função estrutural	Camada de pavimento
Composição Granulométrica		ABNT NBR 7181	Não se aplica	A cada lote
		ABNT NBR NM 248	A cada lote	Não se aplica
Teor de material passante na peneira 75 µm		ABNT NBR NM 46	A cada lote	Não se aplica
Absorção de água	Agregado graúdo	ABNT NBR NM 53	A cada lote	Não se aplica
	Agregado miúdo	ABNT NBR NM 30		
Torrões de argila e materiais friáveis		ABNT NBR 7218	A cada lote	Não se aplica
Índice de forma (agregado graúdo)		ABNT NBR 7809	Não se aplica	A cada lote
Índice de suporte Califórnia e expansividade		ABNT NBR 9895	Não se aplica	A cada lote
Composição do agregado graúdo		Anexo A	A cada lote	
Percentual de materiais não minerais no agregado miúdo		Anexo B	A cada lote	
Teor de cloretos		ABNT NBR 9917	Uma vez por mês ou 6.000,0 m ³ (1)	Não se aplica
Teor de sulfatos		ABNT NBR 9917	Uma vez por mês ou 6.000,0 m ³ (1)	
1 O primeiro que ocorrer				

Alguns dos desempenhos mínimos exigidos nestes ensaios são descritos no Quadro 4.

Quadro 4 - Desempenho mínimo dos agregados reciclados
Fonte: (NBR 15.116, 2004)

Propriedades		Agregado reciclado Classe A				Normas e ensaios	
		ARC		ARM			
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥ 90	-	< 90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)		≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais (¹)	2				Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila	2				ABNT NBR	
	Teor total máximo de contaminantes	3				-	
Teor de material passante na peneira 75 µm (%)		≤ 10	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 46	
(¹) Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos							

Cabe salientar que os ensaios a serem realizados dependem do tipo de agregado e o local em que será empregado, portanto é necessário que se execute esta análise.

2.2.2 Amostragem

Na realização dos ensaios e aplicações em obra é necessário que a amostra retirada seja condizente com o lote, principalmente levando em consideração os inúmeros rejeitos presentes no RCC.

É importante que todos os procedimentos sigam os requisitos mínimos da NBR NM 26 (ABNT, 2009), norma que define técnicas de redução do lote à ser estudado, desde a sua extração e redução até o armazenamento e transporte das amostras representativas de agregados para concreto, destinadas a ensaios de laboratório.

Os agregados convencionais apresentam uma condição mais homogênea, já os reciclados são mais heterogêneos, o que implica em uma possibilidade maior de erro amostral, no caso de coleta pouco criteriosa. Esta fase é de extrema importância para a realização de estudos em agregados reciclados.

2.3 ARTEFATOS DE CONCRETO

Os artefatos de concreto são elementos fabricados com diversos tamanhos e formas, podendo ter ou não função estrutural na obra.

De acordo com as especificações de controle de produção contidas na NBR 9.062 (ABNT, 2006) podem ser enquadrados como produtos pré-moldados ou pré-fabricados.

Esta diferenciação normativa depende principalmente da capacidade de controle, rastreabilidade e qualidade da empresa.

Por exemplo, uma empresa que produz tubos e não controla data de produção, traço do concreto, variação da umidade, etc., seria considerada como uma empresa de pré-moldados, mas se controlasse todos itens mencionados seria considerada uma empresa de pré-fabricados.

Artefatos de concreto e argamassa podem ser definidos como (KLOSS, 1996):

Elementos pré-fabricados confeccionados com concreto simples, armado e protendido, e com argamassa de cimento simples ou armada, colocadas ou montadas na construção após o seu endurecimento, possuindo formas e

padrões definidos. São empregados isoladamente, resistindo a esforços considerados. Geralmente os artefatos de concreto e argamassa são vendidos nas lojas de materiais de construção ou diretamente nas indústrias que produzem estes produtos.

Na Figura 1 são mostrados alguns artefatos comumente produzidos na indústria.



Figura 1 – Artefatos de concreto: (a) bloco de concreto, (b) canaleta, (c) grelha, (d) meio fio, (e) pavers, (f) placa, (g) guia de travamento, (h) tubo e (i) piso podotátil.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com sua função na obra e cargas incidentes, podem ser de concreto simples ou concreto armado e cada tipo de artefato tem uma resistência mecânica específica.

2.3.1 Fabricação dos artefatos

Os artefatos podem ser fabricados de três maneiras: peças concretadas e imediatamente desformadas (concreto de consistência plástica), peças concretadas e desformadas no outro dia (concreto de consistência rígida) e peças vibrocompactadas (concreto de consistência seca), sendo que a fabricação por vibrocompactação garante maior produtividade e qualidade. Placas, grelhas, tijolos, meio fios, blocos e peças pré-moldadas em geral, são alguns exemplos de artefatos (BITTENCOURT, 2012).

Os concretos convencionais utilizados na produção de pré-fabricados apresentam um Fa/c variando de 0,50 a 0,65, já os concretos secos dependendo do maquinário utilizado, podem ser produzidos com Fa/c entre 0,20 e 0,40. O baixo Fa/c é viável para acelerar a produção, pois os elementos podem ser desmoldados diretamente após a fabricação (LING, 2006).

A utilização de concreto seco é comum na indústria de pré-moldados, sendo que a remoção dos vazios e compactação são obtidos por máquinas automatizadas (REZENDE *et al.*, 2015). Quanto maior a força de compactação do maquinário utilizado, maior será a resistência à compressão do concreto (PRATAMA *et. al*, 2014).

Devido à necessidade de rápida desforma e alta produtividade, o cimento mais utilizado é o CP V-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), a cura pode ser realizada por métodos convencionais de molhagem com mangueira, cobrimento com lona, aspersão e saturação da umidade, e, o método de adensamento mais utilizado é por vibrocompactação (FERNANDES, 2013).

É recomendado que a dimensão máxima dos agregados graúdos não sejam maiores que 1/4 da menor dimensão da peça produzida, fator que ajuda no acabamento superficial e evita danos nas vibro-prensas (PIROLA, 2011).

Na Figura 2 é possível observar uma fábrica automatizada para a produção de artefatos de concreto.

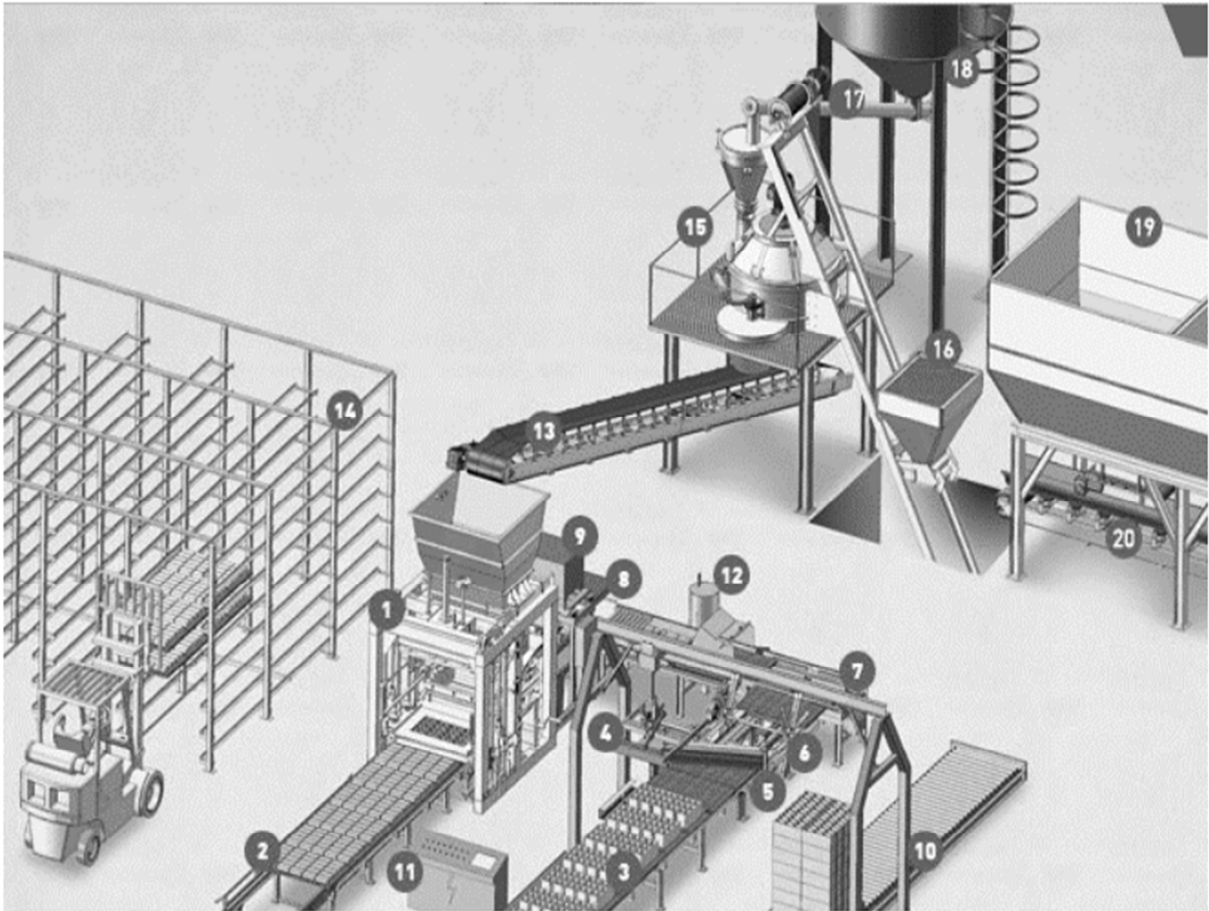


Figura 2 – Layout de uma unidade de produção totalmente automatizada: 1- Vibroprensa; 2- Esteira extratora da prensa; 3- Esteira alimentadora da paleta; 4- Paletizador manual; 5- Escova de limpeza de paletes; 6- Tapete vira paletes; 7- Tapete transversal; 8- Tapete alimentador de paletes; 9- Unidade hidráulica; 10- Tapete de rolos livres; 11- Quadro de comando; 12- Depósito de lubrificação; 13- Esteira alimentadora de concreto; 14- Prateleira de secagem; 15- Central de concreto; 16- Skip elevador de agregados; 17- Sem-fim; 18- Silo de cimento; 19- Cubas de agregados; 20- Esteira de pesagem. Fonte: Figueiredo (2016)

O concreto é produzido pelo grupo composto pelos números 15, 16, 17, 18, 19 e 20. O silo de cimento e dos agregados armazenam os materiais, até ser acionada ordem para que eles sejam misturados na central de concreto. Após a mistura, o concreto é transportado até a vibrocompressora (1), onde ocorre a vibrocompactação e a conformação do produto. Na sequência ocorre a desmoldagem e os artefatos são transportados em paletes, por meio da esteira extratora da prensa (2), estes são transportados até às câmaras de cura (14). O transporte até a câmara de cura pode ser automática ou manual. (FIGUEIREDO, 2016).

2.4 CONCRETO SECO

O concreto seco, atualmente, representa 20% da produção mundial de concreto (REZENDE *et al.*, 2015), porém reproduzir em laboratório energia de prensagem similar à praticada em vibroprensas é um fator que inibe o estudo dos concretos secos (SILVA *et al.*, 2015).

Na fabricação de artefatos, o concreto de consistência seca é o mais utilizado e este tipo de concreto apresenta um comportamento oposto ao dos concretos plásticos, pois quanto mais água se incorporada às misturas, maior será a resistência mecânica, situação mostrada na Figura 3. Este quesito ajuda também na lubrificação entre os grãos, facilitando o adensamento na vibrocompactação dos artefatos e diminui os vazios das peças fabricadas. A umidade incorporada às misturas gira em torno de 6% a 8% (PIROLA, 2011).

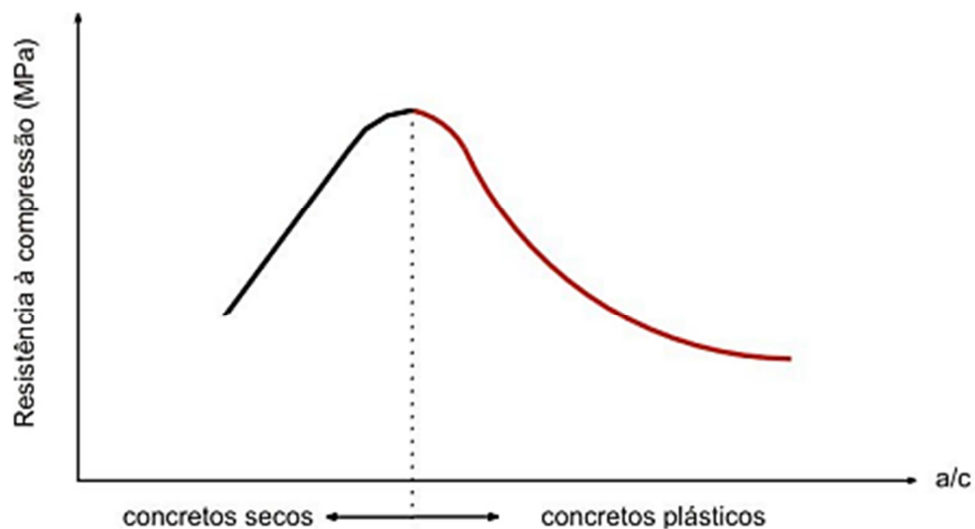


Figura 3 – Comparação entre ganho de resistência à compressão versus F_a/c , para concretos secos e plásticos. Fonte: Pirola (2011)

Nota-se que para o estudo do concreto seco, quanto a qual agregado utilizar, tipo de cimento, dosagem de água, trabalhabilidade, grau de umidade, teor de água livre e capilar, proporcionamento e estudo dos traços, etc., há uma dependência da energia de compactação, e da compatibilização entre os ensaios laboratoriais e o praticado na indústria.

Foi realizado um estudo por Forquin *et al.* (2015) com objetivo de diagnosticar a influência do teor de água e tamanho dos agregados, em concretos

confinados submetidos à alta pressão. A importância deste tipo de estudo é ressaltada por Silva *et. al.*, (2015), como um procedimento necessário para se avaliar o comportamento da mistura e sua deformação. Para a realização deste experimento foram confeccionados dois tipos de concretos, chamados de R30A7 e MB50, com variações na dimensão máxima dos agregados e nos níveis de saturação de água livre, foram submetidos à um ensaio de alta compactação, conforme mostra o dispositivo da Figura 4.



Figura 4 - Dispositivo do SHPB (barra de pressão de Split Hopkinson)
Fonte: Forquin *et. al.* (2015)

Após a realização deste ensaio foram então elaborados os gráficos da Figura 5.

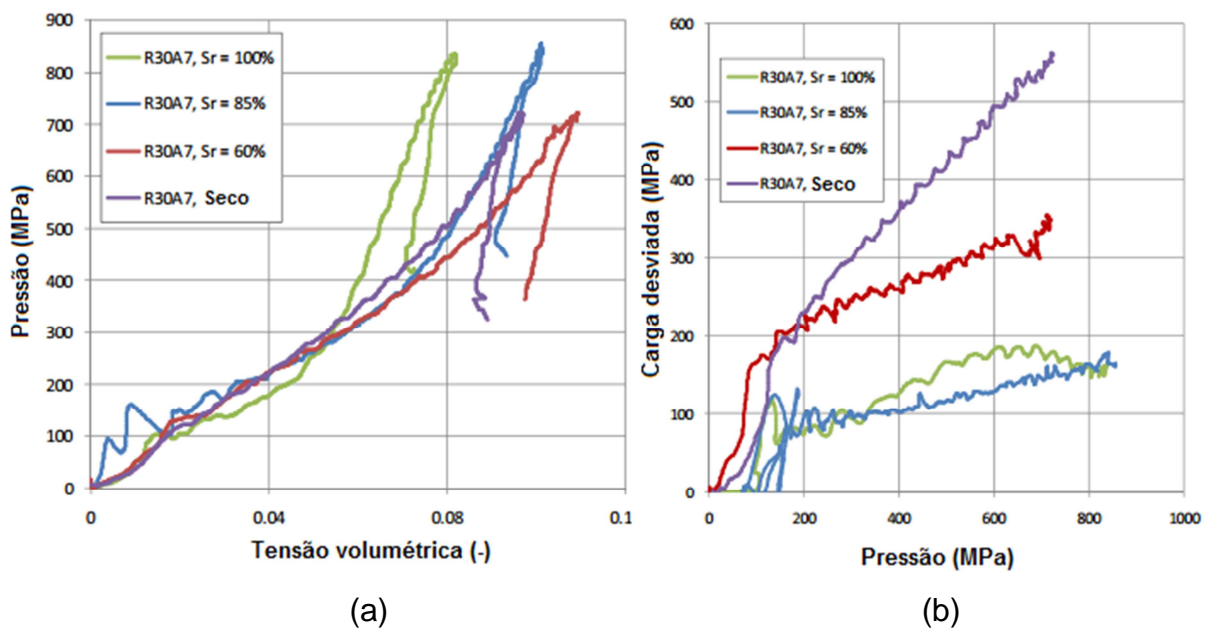


Figura 5 - Experiências dinâmicas quasi-oedométricas realizadas em concreto com diversos teores de água livre: (a) curva de compactação, (b) desvio no comportamento. Fonte: Forquin *et. al.* (2015)

Os resultados das amostras de concreto R30A7 considerando quatro razões de saturação (concreto seco, 60%, 80%, 100%) apontam que o desvio na resistência do concreto úmido não excede 200 MPa mesmo sob a pressão hidrostática máxima de 800 MPa. Por outro lado, o concreto seco apresenta um aumento contínuo de resistência com pressão hidrostática até 550 MPa. Além disso, a resposta hidrostática do concreto saturado é muito mais rígida do que a do concreto com graus de saturação mais baixos. Observa-se que tanto as respostas dinâmicas como as desviadas do concreto R30A7 são muito semelhantes às do microconcreto MB50 independentemente do teor de água (seco ou saturado). Verificou-se que em concretos submetidos à alta compactação o tamanho do grão tem pouca influência enquanto que o teor de água tem um forte efeito na curva de compactação (FORQUIN *et. al.* (2015).

A fim de estudar o comportamento dos concretos secos na compactação Silva *et. al.*, (2015), realizaram ensaios na condição confinada, conforme Figura 6.

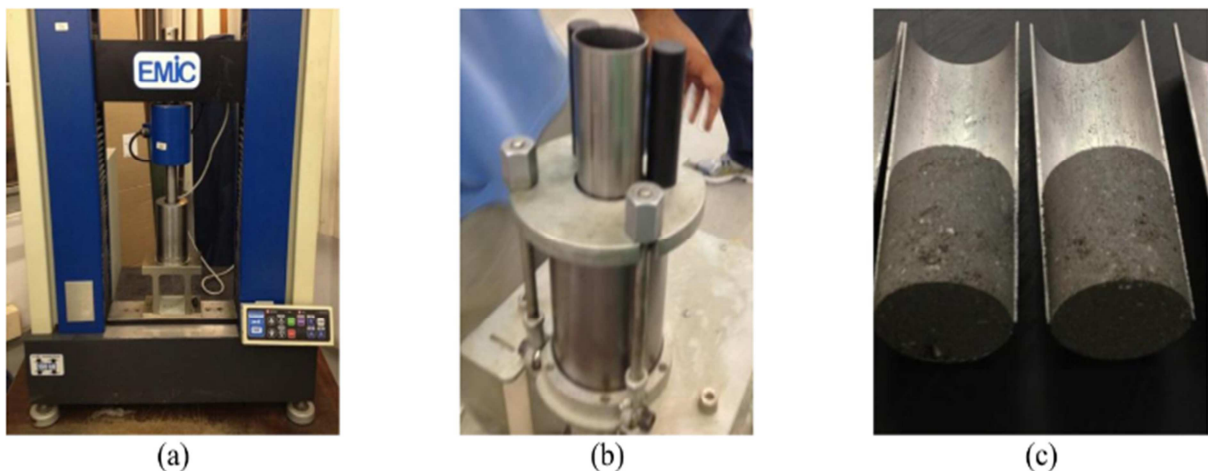


Figura 6 – (a) Prensa com cilindro de confinamento e pistão, (b) extração do corpo de prova com o molde bipartido e, (c) remoção do molde bipartido após 24 h
Fonte: Silva *et. al.*, (2015)

Com os traços experimentais já elaborados, “o concreto seco foi comprimido com limite de carga de até 90 KN, com um pistão específico de 48 mm e velocidade de 1 mm/s. Essa condição garante máxima compactação e está próxima da praticada pelas vibroprensas hidráulicas” (SILVA *et. al.*, (2015).

Ainda não se tem métodos normatizados para proporcionamento e dosagem em concretos secos, sendo que cada autor ou empresa definem seus critérios. Pode-se afirmar que as dosagens são elaboradas tendo como principal objetivo a

resistência à compressão do concreto seco e esta depende da compatibilização entre a trabalhabilidade do concreto e a vibrocompactação

2.5 MENSURAÇÃO DA TRABALHABILIDADE EM CONCRETOS SECOS

Os concretos de consistência seca, amplamente utilizados na produção de artefatos de concreto, devem ter a trabalhabilidade compatível com os equipamentos utilizados na vibrocompactação. Para mensurar esta trabalhabilidade alguns ensaios podem ser realizados, tais como o ensaio de compactação intensivo (*IC-Tester*), ensaio de martelo de Kango, ensaio de compactação proctor e o ensaio de Vebe (BARTOS et. al, 2002). Para a continuidade do trabalho será abordado somente o ensaio de Vebe, método aplicado à pesquisa.

2.5.1 Mensuração da trabalhabilidade pelo consistômetro de Vebe

O ensaio de Vebe é um método padrão para medir a trabalhabilidade de concretos de consistência mais seca (PARK *et al.*, 2007; CHI e HUANG, 2013). No entanto, este método recebe críticas devido a falta de dados e devido a subjetividade (HAZAREE *et al.*, 2013). A trabalhabilidade do concreto depende de diversas outras variáveis, que quando aplicadas ao concreto seco, tornam o ensaio de Vebe, pouco criterioso. As Figuras 7 e 8, respectivamente, mostram o equipamento e o método de execução do ensaio.

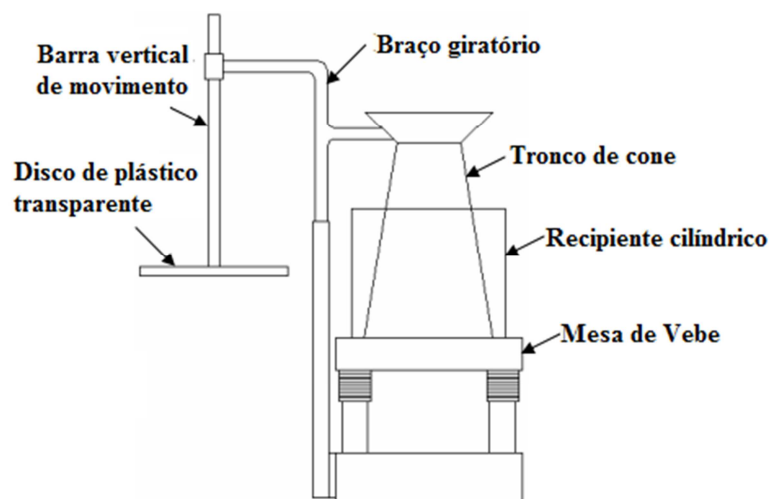


Figura 7 – Consistômetro de Vebe. Fonte: Koehler e Fowler (2003)

Segundo Salvador Filho (2007):

O consistômetro Vebe é um equipamento constituído de um “Cone de Abrams” comum, colocado dentro de um recipiente cilíndrico e apoiado sobre uma pequena mesa vibratória. A partir da determinação do tempo necessário para converter um tronco-cone de concreto num cilindro mediante vibração, determina-se a consistência de misturas de concreto a serem vibradas para qualquer consistência, mesmo misturas muito secas.

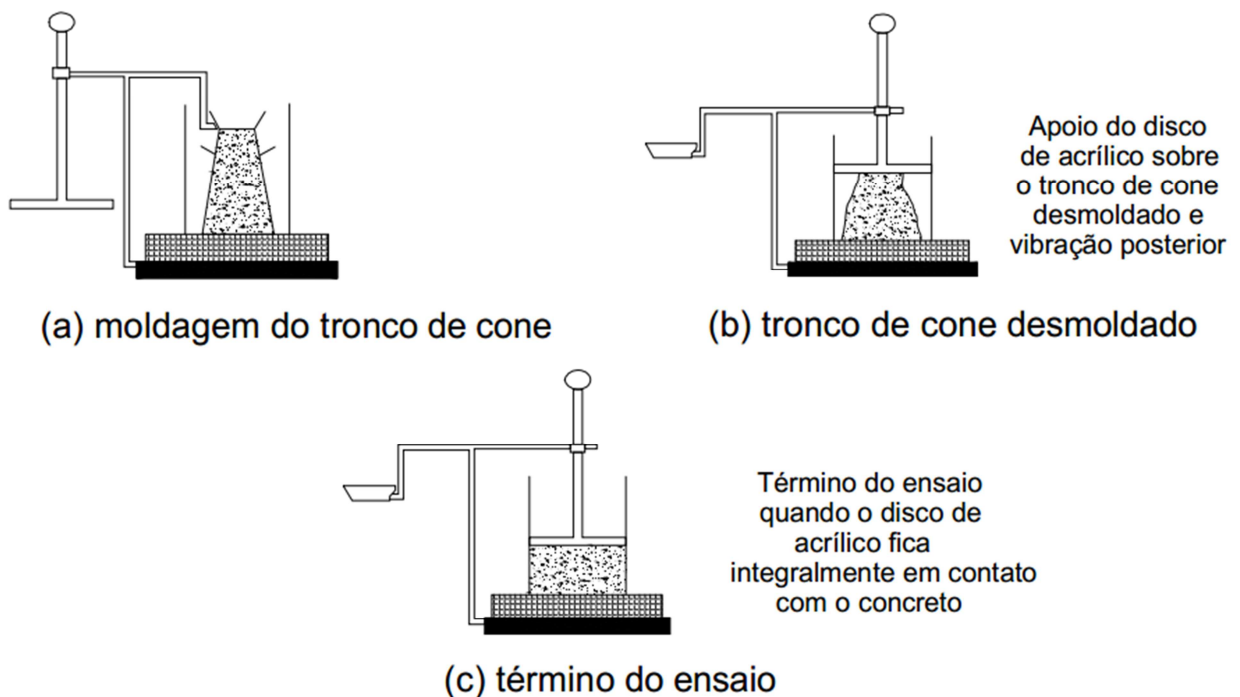


Figura 8 - Método de execução do ensaio de consistência Vebe
Fonte: Medeiros (2012)

A Norma DNIT 064/2004 - ME: “Pavimento rígido - Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro Vebe” é a norma brasileira que dispõe sobre as técnicas de execução deste ensaio.

Segundo esta norma, mede-se a consistência de um concreto seco, quando em um intervalo de tempo determinado sob ação de vibração padronizada e, sob a carga também padronizada na superfície superior de um tronco de cone de concreto fresco, altera a forma para um tronco de cilindro.

A Tabela 1 mostra uma comparação entre os ensaios realizados pelo método convencional de abatimento pelo tronco de cone, e o ensaio realizado pelo Vebe.

Tabela 1 - Tempo Vebe e a consistência do concreto seco
 Fonte: *American Concrete Institute, 2002 (ACI 211.3R-02)*

Descrição da consistência	Slump, (mm)	Slump, pol (“)	Vebe, (seg)
Extremamente seca	-	-	32 a 18
Muito rígida	-	-	18 a 10
Rígida	0 a 25	0 a 1	10 a 5
Plástico rígida	25 a 75	1 a 3	5 a 3
Plástica	75 a 125	3 a 5	3 a 0
Muito plástica	125 a 190	5 a 7-1/2	-

Este método ainda é pouco utilizado para a mensuração da consistência do concreto seco, na indústria brasileira. Os profissionais utilizam conhecimentos empíricos, mas é importante que se aplique equipamentos e métodos que tragam um confiabilidade maior.

· O consistometro de Vebe é compacto e adequado para uso em fábricas de pré-moldados e também em laboratório, e os resultados dos ensaios são obtidos diretamente, sem qualquer processamento adicional. Caso o tempo VeBe for inferior a 5 ou superior a 30 segundos, o concreto tem uma trabalhabilidade para a qual o ensaio não é adequado (BARTOS et. al, 2002).

Quando ocorrer a necessidade de se trabalhar com concretos que exijam tempo Vebe maior que 30 segundos, Juvas (1994) expôs um ensaio de Vebe modificado, no qual se coloca uma sobrecarga de 20 kg à haste acima do disco de plástico transparente, sendo que o restante do equipamento e procedimento não se modificam.

Em um estudo realizado por Meddah et. al (2014), foi avaliada a influência de adição de partículas de borracha (100% passante na peneira 3/8”, com massa específica de 1,27 g/cm³, praticamente a metade dos outros agregados utilizados e absorção de água de 0,5%), na trabalhabilidade de um concreto seco, utilizando o consistômetro de Vebe.

Após a adição de 30% deste material houve uma redução de 5,8% na massa específica do concreto seco, mas melhorou a trabalhabilidade e conseqüente diminuição do tempo Vebe, conforme Figura 9.

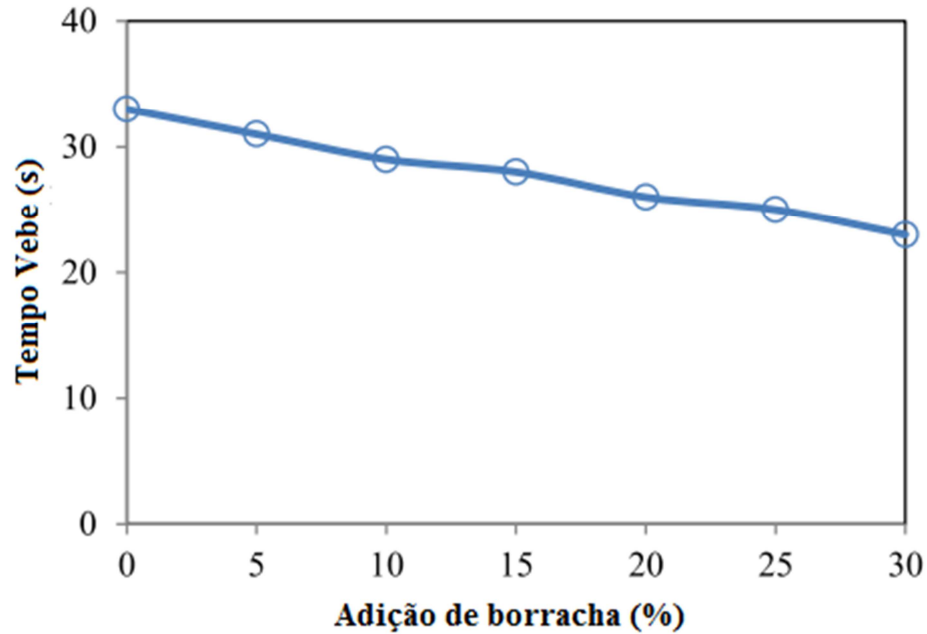


Figura 9 – Efeito da adição de borracha na trabalhabilidade
Fonte: Meddah *et. al* (2014)

Como as partículas de borracha apresentavam um teor de absorção de água menor que a dos agregados utilizados, aumentou a quantidade de água livre na mistura e conseqüentemente o processo de vibrocompactação tornou-se otimizado (MEDDAH *et. al*,2014).

2.6 ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS

Neste tópico serão revisados dois métodos de empacotamento de partículas empregados no trabalho. Os métodos de O'Reilly e de Andreasen foram utilizados para determinação da faixa de composição de maior empacotamento e também para determinação das massas específicas das misturas entre agregados e o volume de vazios.

2.6.1 Método de O'Reilly

O Método proposto por O'Reilly primeiramente determina a melhor proporção entre os agregados e posteriormente, por meio de tabelas, determina os outros constituintes do concreto. As etapas deste método são as seguintes (TUTIKIAN *et al*, 2011):

- determinação da melhor composição entre agregados, de maneira experimental, dois a dois, do maior para o menor, sendo o fator de forma mais importante que a granulometria;
- determinação da porcentagem de vazios na mistura entre agregados e a superfície específica mínima da mistura de agregados. Estes valores são encontrados por meio de misturas de dois componentes, por exemplo, 30% de pedrisco e 70% de areia e assim sucessivamente, sendo mais comum o intervalo de 10%;
- cálculo da massa unitária compactada (ρ_{ap}), por meio da NBR NM 45 (ABNT, 2006), para cada uma das misturas;
- cálculo da massa específica de cada um dos componentes, por meio da NBR NM 53 (ABNT, 2009) para os agregados graúdos e, da NBR NM 52 (ABNT, 2009) para os agregados miúdos;
- cálculo da massa específica da mistura dos agregados (d_{AB}), de cada uma das proporções realizadas conforme Equação 1;

$$d_{AB} = \frac{(d_A \cdot xA) + (d_B \cdot xB)}{100} \quad (1),$$

em que:

- ✓ d_{AB} = massa específica da mistura dos agregados;
- ✓ d_A = massa específica da areia;
- ✓ A = porcentagem de areia na mistura;
- ✓ d_B = massa específica do agregado graúdo (brita);
- ✓ B = porcentagem de brita na mistura.

- cálculo o volume de vazios de cada mistura, conforme Equação 2;

$$E_v = \frac{d_{AB} - \rho_{AB}}{d_{AB}} * 100 \quad (2),$$

em que:

- ✓ E_v = porcentagem de volume de vazio na mistura;
- ✓ d_{AB} = massa específica da mistura;
- ✓ ρ_{AP} = massa unitária da mistura.

- cálculo do consumo de água, cimento, aditivo e filler de acordo com a experiência do autor, ou seja, nesta parte o método se torna empírico.

2.6.2 Método propostos por Alfred e Andreasen - abordagem contínua

Os modelos de empacotamento de Alfred e Andreasen são os mais conhecidos pois, proporcionam distribuições de tamanho de partículas favorecendo a obtenção de compactos densos e eliminam os macroporos, aumentando a resistência mecânica à compressão dos materiais (ORTEGA *et al.*, 1997).

Este modelo demonstrou que em distribuições reais de partículas todos os tamanhos (diâmetros) podem estar presentes, de forma que uma teoria para o empacotamento de partículas deve ser desenvolvida considerando as distribuições como contínuas, e podem ser relacionadas a uma série de potências resultando na seguinte Equação 3 (ORTEGA *et al.*, 1997):

$$CPFT = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q \times 100 \quad (3),$$

em que:

- ✓ CPFT (%) = porcentagem acumulada de partículas menores que o tamanho D;
- ✓ D = diâmetro da partícula;
- ✓ DL = tamanho da maior partícula do sistema;
- ✓ q = módulo de distribuição de empacotamento

Dinger e Funk (1994) reconheceram que o empacotamento de partículas podem ser afetado pela inexistência de partículas muito pequenas, por isso, foi desenvolvido o sistema de Alfred, no qual foi estipulado um valor mínimo de tamanho de partícula, expresso pela Equação 4 (ORTEGA *et al.*, 1997).

$$CPFT = \left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q}\right) \times 100 \quad (4),$$

em que:

- ✓ D_S = tamanho da menor partícula do sistema

O modelo de Alfred se diferencia do de Andreasen, justamente por considerar um tamanho mínimo de partículas pois, caso o D_s fosse igual a zero, o sistema de Alfred se reduziria ao de Andreasen.

A Figura 10 mostra o empacotamento ideal, segundo modelo de Andreasen.

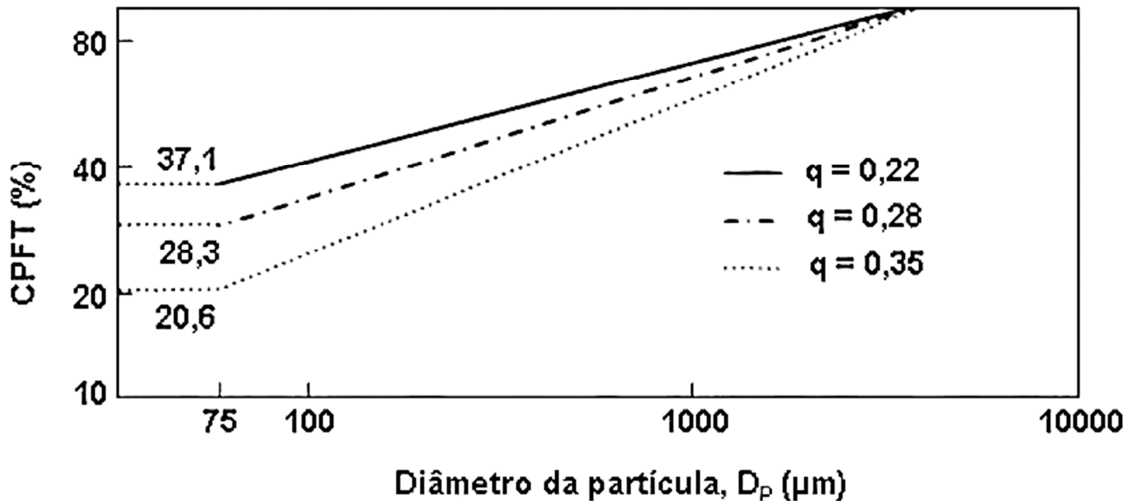


Figura 10 - Modelo de Andreasen, distribuição granulométrica continua
Fonte: (Oliveira *et al.*, 2000)

Segundo as análises de Andreasen, para a maximização do empacotamento o coeficiente (q), chamado de módulo de distribuição, deve estar entre 0,33 ($1/3$) e 0,50 ($1/2$) (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Segundo Oliveira (2013) e Silva (2011), o maior empacotamento teórico possível é com $q = 0,37$.

2.7 ESTUDO TEÓRICO DO VOLUME DE PASTA

A distância entre as partículas de agregados pode ser medida pelo fator de espessura máxima de pasta (MPT). Este espaço entre as partículas tem grande influência na viscosidade e fluidez do compósito. Melhorando o empacotamento em concretos, com a redução de vazios, ocorre a redução do volume da matriz e conseqüentemente minimiza o escoamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

É de grande importância conhecer o volume ocupado por cada componente dentro do concreto, a fim de estimar teoricamente e programar ensaios práticos para confirmação dos resultados.

A Equação (5) que dispõe sobre a execução do cálculo de MPT, foi adaptada da equação do IPS (distância de separação interpartículas), sendo que esta é

utilizada para suspensões, com a implementação das macropartículas que o concreto possui.

O MPT dos grãos usados na mistura, segundo Oliveira *et al.* (2000) pode dirigir o comportamento de fluidez do concreto.

$$MPT [\mu m] = \frac{2}{VSA} \cdot \left[\frac{1}{VS} - \left(\frac{1}{1-PFr} \right) \right] \cdot 10^4 \quad (5),$$

em que:

- ✓ VSA = superfície específica volumétrica;
- ✓ VS = fração volumétrica de sólidos (somente da porção de grossos do concreto);
- ✓ PFr = é a fração esperada de poros na mistura.

Para calcular o VSA, conforme equação (6), deve-se realizar a somatória proporcional das participações das frações volumétricas (x_i) dos valores de SSA (superfície específica), conforme equação (7), de cada insumo (i) sendo multiplicada pela própria ρ_i (massa específica em g/cm³).

$$VSA \left[\frac{m^2}{cm^3} \right] = \sum_i^n x_i \cdot \rho_i \cdot SSA_i \quad (6),$$

$$SSA \left[\frac{m^2}{g} \right] = \frac{10^{-12}}{\text{massa de } 1 \text{ m}^3} \sum_i^n SA_{\text{classe } i} \cdot NP_{\text{classe } i} \quad (7),$$

em que:

- ✓ SA_{classe i} = superfície específica
- ✓ NP_{classe i} = Número de partículas

Deve-se salientar que, para calcular o SSA é necessário executar a somatória da parcela contributiva de cada classe (i) de peneira, conforme Equação (8).

$$GMS_{\text{classe } i} [\mu m] = \sqrt{(D_{\text{superior}} \cdot D_{\text{inferior}})} \quad (8),$$

em que,

- ✓ GMS_{classe i} = tamanho médio geométrico

- ✓ D_{superior} = tamanho da abertura da peneira superior
- ✓ D_{inferior} = tamanho da abertura da peneira inferior

Segundo Hunger e Brouwers (2009) admite-se que as partículas sejam de geometria esférica e densidade estável entre classes, para a obtenção da SSA, por meio de distribuição granulométrica. Então, a partir do valor do GMS da Equação (8), calcula-se a SA por meio da Equação (9) e o V_p (volume da partícula na classe i), conforme Equação (10).

A partir do valor de V_p calcula-se o valor do NP (número de partículas) de cada classe por meio da Equação (11).

$$SA_{\text{classe } i} [\mu\text{m}^2] = \pi \cdot GMS^2 \quad (9)$$

$$V_p [\mu\text{m}^3] = \frac{\pi \cdot GMS^3}{6} \quad (10)$$

$$NP_{\text{classe } i} [\text{partículas em } 1\text{m}^3] = \left(\frac{\text{fração volumétrica retida na classe } i}{V_p \text{ classe } i} \right) \cdot 10^{18} \quad (11)$$

O volume de sólidos (V_S) é obtido pela divisão da fração com diâmetro superior a 0,150 mm, também chamada de fração de grossos, pelo volume total de concreto no estado fresco, após adensamento.

Para o PFr foram utilizadas relações de Dinger (2001), assim como o volume aparente máximo (V_a) e o PF (fator de empacotamento), demonstrados nas Equações (12) e (13).

$$V_a = \frac{1}{PF} \quad (12)$$

$$PFr = 1 - PF \quad (13)$$

em que:

- ✓ V_a : volume aparente máximo é o maior valor calculado entre as classes de peneiras por meio da Equação (14)

$$V_{a n} = \sum_{j=1}^{n-1} x_j + a_n x_n \quad (14),$$

em que,

- ✓ n : corresponde à peneira a ser calculada;
- ✓ $V_{a n}$: é o volume aparente calculado para a enésima classe (peneira);
- ✓ x_j e x_n : são as frações volumétricas das classes “j” e “n”, respectivamente e,
- ✓ a_n : é o volume aparente de uma monodispersão da enésima classe, definido pela equação (15);

$$a_n = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{CSR}\right)^{0,37}} \quad (15),$$

em que,

- ✓ CSR: é a classe de peneiras utilizada. Segundo Dinger (2001), para um CSR de $\sqrt{2}$, o a_n é igual a 8,3090.

Também é possível calcular o volume de excesso de pasta. Um concreto quando está em estado trabalhável apresenta um determinado volume de pasta, que quando comparado ao volume de vazios entre os agregados em estado compactado, é maior. A superfície específica dos agregados e a consistência da pasta são os principais condicionantes para o excesso de pasta. (KISMI *et al*, 2012).

A Figura 11 apresenta o sistema real, intermediário e equivalente, sobre o estudo do excesso de pasta (HOORNAHAD e KOENDERS, 2014). Na Figura 11 (a), são mostrados o volume de uma amostra real de concreto e também o volume total de pasta em relação ao volume específico dos agregados. Na Figura 11 (b) é mostrado o volume aparente dos agregados e o volume de excesso de pasta, isso ocorre quando o volume de pasta é maior que os vazios entre os agregados em estado compactado. A Figura 11 (c) apresenta o δ_{pex} (pasta em excesso).

Primeiramente é preciso conhecer o valor de V_a (volume específico dos agregados) e do V_b (volume aparente dos agregados), valores que podem ser levantados em ensaios de laboratório. Conforme Equação (16) calcula-se o volume de vazios na pasta (V_{pv}) que são os vazios entre os agregados em estado compactado subtraindo-se o V_b do V_a .

$$V_{pv} = V_b - V_a \quad (16),$$

Em que:

V_b = volume aparente dos agregados

V_a = volume específico dos agregados

Para o cálculo do V_{pex} (valor de pasta em excesso) é necessário conhecer o V_p (volume total de pasta), volume total de pasta utilizada na confecção de um concreto e subtraí-la do V_{pv} , conforme Equação (17).

$$V_{pex} = V_p - V_{pv} \quad (17)$$

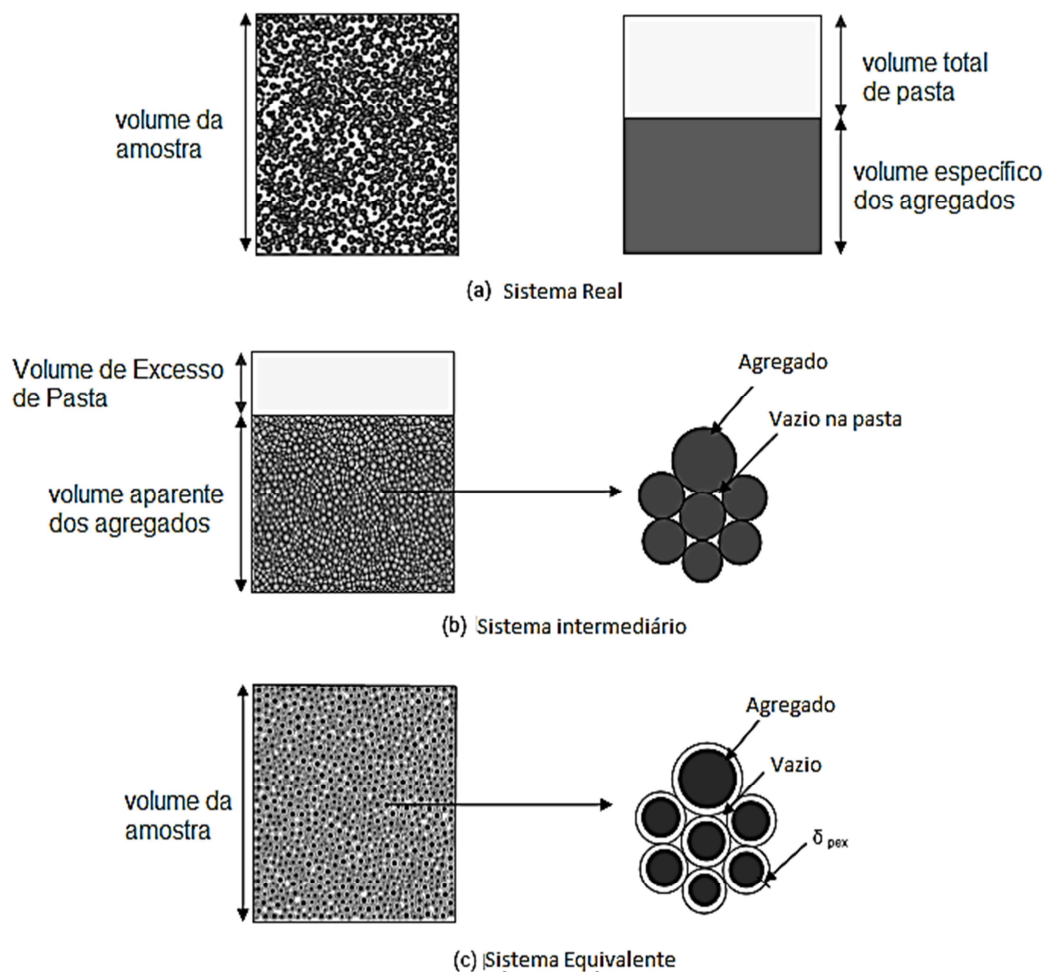


Figura 11 - Sistema real, intermediário e equivalente, sobre o estudo do excesso de pasta. Fonte: (Hornahad e Koenders, 2014)

2.8 FILERS UTILIZADOS EM CONCRETO SECO

No concreto seco, a coesão entre partículas tende a ser baixa, principalmente devido ao baixo teor de água. O aumento de materiais finos na mistura se apresenta

como uma boa solução para esta situação e na maioria dos casos somente é acrescentada uma maior quantidade de cimento (MARCHIONI, 2012).

Podem-se classificar as adições minerais como inertes (promovem uma maior compactidade) ou reativas (auxiliam na formação de fases de caráter aglomerante). As reativas podem ser pozolânicas ou cimentantes, sendo que o material pozolânico reage quimicamente com o Ca(OH)_2 , produto da reação de hidratação do cimento Portland. Também há as adições pozolânicas ultrafinas como a sílica ativa e o metacaulim, que produzem concretos com mais resistência e durabilidade (BORJA *et al.*, 2013).

Mota (2014), utilizou cinzas de algobora em diversas proporções (5%,10%, 20%, 30% e 40% em relação à massa de cimento) na elaboração de traços para concreto seco. Segundo seus estudos, adições de até 20% tornaram a mistura mais trabalhável, não ocorrendo dificuldades na desforma dos corpos de prova e melhoraram o acabamento externo dos mesmos. Na avaliação do concreto em estado endurecido, descreveu que ocorreu perda de resistência mecânica dos corpos de prova em todas as proporções, sendo que o melhor desempenho ocorreu com adições de 20% do filer.

Gencil *et. al.*, (2012) em um estudo relacionado à fabricação de concreto seco para pavers, realizaram a substituição entre 10% a 40% dos agregados graúdos e miúdos, por teores de filer de mármore. Os resultados mostraram que o aumento de filer nas misturas acarretava em uma maior demanda de água, em outras palavras, o Fa/c aumenta devido à maior superfície específica do filer estudado (Figura 12).

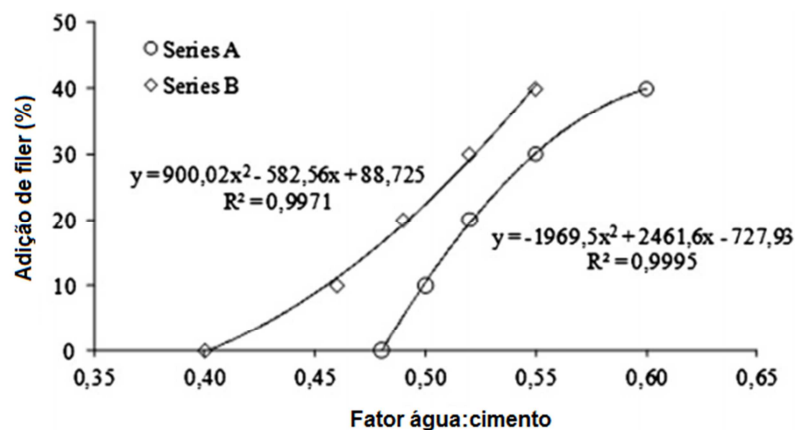


Figura 12: Demanda de água dependente da concentração de filer de mármore nas misturas. Fonte: Gencil *et. al.*, (2012)

A massa específica dos blocos, a resistência à compressão (Figura 13) e abrasão diminuiram à medida que se aumentava os teores de filer, fator que segundo os autores é decorrente da maior demanda de água. Mesmo com estas constatações concluíram que a incorporação de resíduos de mármore fornece blocos de pavimentação de concreto de qualidade suficiente (GENCEL *et. al.*, 2012).

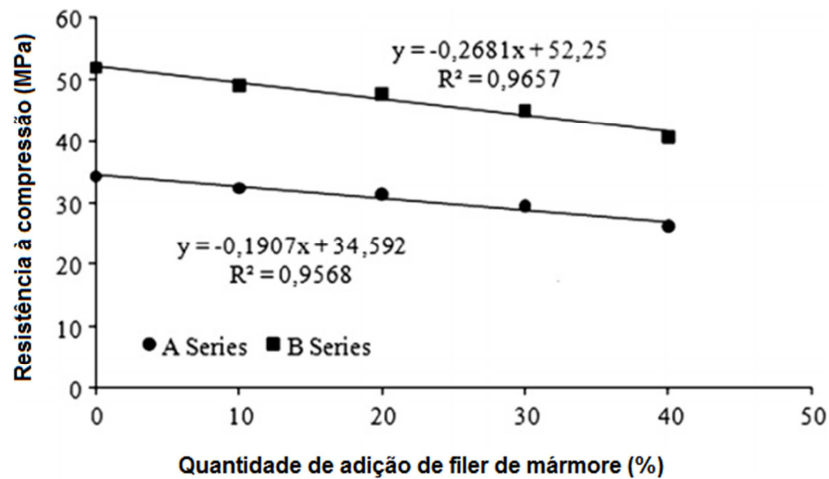


Figura 13: Relação entre resistência à compressão aos 28 dias e teor de filer de mármore. Fonte: Gencel *et. al.*, (2012)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O Capítulo 3 aborda os métodos experimentais executados nesta pesquisa. A seguir são apresentadas resumidamente as principais etapas do trabalho.

- caracterização das matérias-primas para escolha de um lote de agregados reciclados de RCC;
- identificação da faixa de composição de agregados com maior compactação, por meio do estudo do efeito do tempo e da forma de vibração na medida de volume aparente;
- elaboração de três planejamentos experimentais, e escolha de um para prosseguir com o trabalho. Foram determinados a massa unitária e o volume de vazio das misturas, os módulos de distribuição de empacotamento total (T), inferior (I) e superior (S);
- determinação da quantidade de água de amassamento do concreto seco, com a utilização do consistômetro de Vebe;
- determinação do volume da pasta, já englobando a presença do filer e cimento;
- caracterizações físicas e mecânicas do concreto no estado endurecido;.

3.1 MATERIAIS

Neste item será realizada uma abordagem sobre as características técnicas dos materiais utilizados na pesquisa.

3.1.1 Filer

Foi utilizado como filer na composição do concreto seco, um resíduo oriundo do processo de polimento de placas de concreto para revestimento de piso. Este filer é composto por cimento, areia, calcário e água. No processo de produção das placas de concreto, após a cura das lajotas ocorre o polimento da superfície. Para aumentar a vida útil do abrasivo e melhorar a qualidade da superfície polida, as placas ficam constantemente sob a aplicação de água durante o processo.

O resíduo gerado e misturado com água é bombeado até um filtro-prensa para reduzir o volume de água (a qual retorna ao processo de polimento), e então, é lançado em uma caçamba para descarte por empresa contratada. O resíduo gerado se encontra em estado pastoso, sendo que parte da amostra tem visível saturação em água e outra parte somente aspecto de agregação.

3.1.2 Agregados

Os dois lotes de agregados utilizados neste trabalho foram adquiridos da USIPAR (Usina de Recicláveis Sólidos Paraná), a qual encontra-se localizada na Região Metropolitana de Curitiba. Inicialmente os lotes de agregados denominados de A e B foram caracterizados, sendo que o A pode ser visto na Figura 14 e o B na Figura 15.



Figura 14 - Lote A, pedrisco à esquerda e areia à direita. Fonte: Autoria própria

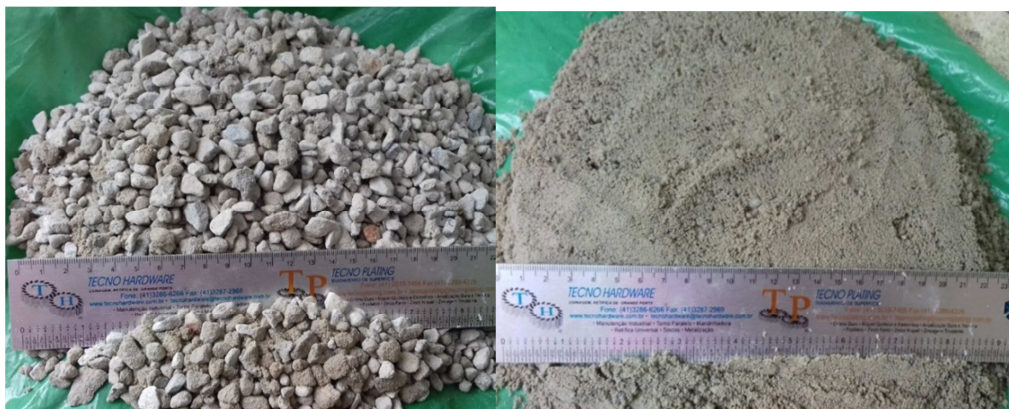


Figura 15 - Lote B, pedrisco à esquerda e areia à direita. Fonte: Autoria própria

Segundo a USIPAR, o Lote A era composto por resíduos de diversos tipos de obras, já o Lote B era composto por resíduos de caminhão-betoneira.

3.1.3 Cimento

Foi utilizado o cimento CPV-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), da empresa Itambé. As especificações técnicas são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações técnicas do CPV ARI. Fonte: Cimento Itambé

Resistência média à Compressão (MPa)				Massa específica média (g/cm ³)	Tempo de início de pega (horas)	MgO (%)	Perda ao fogo (%)	Resíduo insolúvel (%)
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias					
22,4	38,0	44,0	52,2	3,09	≥ 1	≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 1,0

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 Caracterização dos Agregados

O Quadro 5 apresenta os ensaios realizados nos agregados segundo as respectivas normas.

Quadro 5 - Ensaio de caracterização dos agregados. Fonte: Autoria própria

Ensaio	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Composição Granulométrica	ABNT NBR NM 248 / 2003	
Teor de material passante na peneira 75 µm	ABNT NBR NM 46 / 2003	
Composição do agregado graúdo	NÃO SE APLICA	ABNT NBR 15116 / 2004
Massa unitária compactada	ABNT NBR NM 45/2006	
Massa unitária em estado solto		
Massa específica do agregado seco	ABNT NBR NM 52 / 2009 DNER-ME 194 / DNIT 1998	ABNT NBR NM 53 / 2009
Massa específica na condição saturado superfície seca	ABNT NBR NM 52 / 2009	
Massa específica aparente		
Absorção de água	ABNT NBR NM 30 / 2001	

3.2.2 Caracterização do filer

Amostras deste resíduo foram coletadas na caçamba da empresa e, no laboratório foi seca em estufa a 105° C por 24 horas. Após a secagem completa, o resíduo na forma de torrões, de acordo com a Figura 16, foi desagregado e homogeneizado.

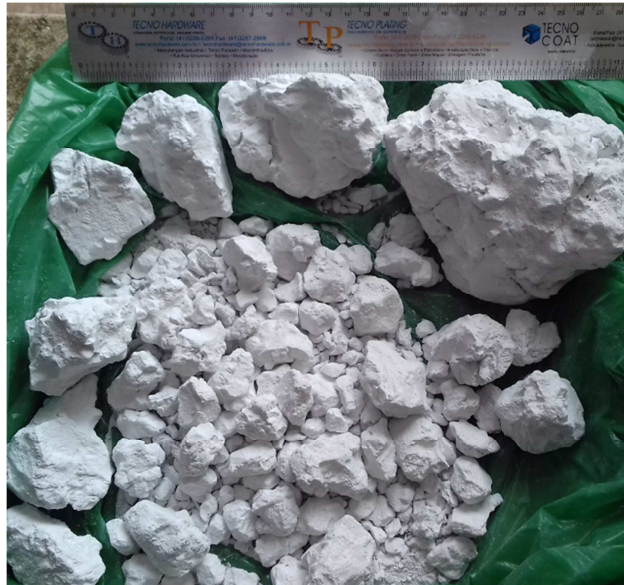


Figura 16 - Aspecto visual do resíduo após secagem em estufa
Fonte: Autoria própria

Para a desagregação do filer foi usado um almofariz, que se demonstrou eficiente, porém pouco produtivo para a obtenção de grande quantidade de material desagregado. Após este processo de desagregação foi executado o peneiramento do resíduo em peneira com abertura de 0,150 mm, sendo aproveitado o material passante. Na sequência, por meio da ME 084 (DNER, 1995) foi determinada a massa específica.

3.3 DEFINIÇÃO DA FAIXA DE COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS MAIS COMPACTADA

Para escolha da faixa granulométrica de maior empacotamento, foi realizada a determinação do volume aparente das misturas de 0 a 100% de cada um dos agregados (pedrisco e areia) de RCC, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Composições dos agregados para o ensaio de volume aparente e massa unitária. Fonte: Autoria própria

Amostra	Pedrisco RCC (kg)	Areia RCC (kg)
1	1,00	0,00
2	0,00	1,00
3	0,50	0,50
4	0,75	0,25
5	0,25	0,75
6	0,50	0,50
7	0,50	0,50
8	0,62	0,38
9	0,88	0,12
10	0,94	0,06

Neste estudo foi analisado o efeito do tempo de vibração e do uso de peso para compactação na medida de volume aparente. Com os resultados alcançados também foi calculado o volume de vazios das amostras com base no Método de O'Reilly, descrito por Tutikian *et al.* (2011), no qual são calculados a massa específica das composições, a partir da massa específica dos agregados apresentado na Equações 1, e o volume de vazios, Equação 2.

Para a realização da medida de volume aparente, usado no cálculo da massa unitária, foi necessário a utilização dos seguintes materiais e equipamentos. Ressalta-se que este método de ensaio foi desenvolvido pelo autor.

- proveta com capacidade de 1.000 ml, sendo que a parte inferior foi forrada de modo a absorver a pequenos impactos e vibrações;
- amostra de 1,0 Kg de material;
- borrachas para suporte lateral e na parte superior da proveta;
- peso de 1,0 kg, com formato circular, para colocar dentro da proveta;
- balança com precisão de 1,0 g;
- conjunto vibrador mecânico para peneiras;
- cronômetro.

Para a realização dos experimentos, os agregados foram secos em estufa a 105° C por 24 horas.

Primeiramente foi realizada a pesagem dos agregados, na sequência foi executada a mistura e homogeneização manualmente dentro de um saco plástico e então, a mistura foi adicionada à proveta com suporte emborrachado.

Após transferência de 100% do material, foi realizada a primeira leitura (A) do volume e o valor anotado. Após a realização desta leitura, a proveta foi acondicionada no vibrador mecânico de peneiras e fixada com o suporte emborrachado para travar a proveta junto às hastes laterais, conforme a Figura 17.



Figura 17 - Travamento lateral da proveta (figura a esquerda), detalhe do peso utilizado (figura a direita). Fonte: Autoria própria

Na sequência o equipamento foi ligado na vibração máxima por cinco minutos. Então foi realizada a segunda leitura (B).

Após os materiais finos terem escoado por entre os mais grossos, foi colocado um bloco de 1,0 kg dentro da proveta na parte superior da mistura. Foi colocada uma borracha no topo da proveta e a mesma foi presa com o suporte superior do conjunto vibratório.

Assim, a proveta ficou presa e pressionada com objetivo de simular os efeitos de vibrocompactação e concentrar toda a vibração e peso do bloco sobre a amostra. Após dez minutos de vibração, a terceira leitura (C) foi realizada.

Cabe salientar que as proporções entre pedrisco e areia eram homogeneizadas, e depois lançadas na proveta. Ao ser realizada a primeira leitura, as misturas apresentavam aspecto homogêneo, na realização da segunda e terceira leituras se observava segregação entre as misturas.

Devido à esta constatação foi mudado o método de execução deste ensaio. Ressalta-se que este novo método foi adaptado de ensaios laboratoriais do setor químico e não é normalizado na área da construção civil. Procurou-se definir um método em que não ocorresse segregação e houvesse uma compactação adequada para a continuidade dos estudos. Assim foi realizada mais uma leitura. Após realização de alguns experimentos concluiu-se que a técnica adotada seria a que apresentasse maior compactação sem ocorrer segregação, então ficou estabelecido como novo procedimento experimental:

- a eliminação da vibração e do peso;
- a colocação de borracha maciça na parte inferior externa da proveta;
- a aplicação de 50 quedas livres da proveta, a uma distância de 2,5 cm de altura.

Este método foi definido e padronizado para os procedimentos experimentais do estudo de empacotamento de partículas que se seguiu.

Assim de forma resumida foram feitas 4 leituras de volume aparente:

- leitura A – sem vibração;
- leitura B – com vibração máxima por 5 minutos;
- leitura C – com vibração máxima por 10 minutos com um peso de 1 kg (simulação de vibrocompactação);
- leitura D – sem vibração ou vibrocompactação, após 50 quedas livres da proveta por uma distância de 2,5 cm.

A precisão nas leituras dependia muito do rasamento da superfície à ser lida, principalmente nas composições com maior quantidade de pedrisco.

A escolha dos tempos para vibração e vibrocompactação, para as leituras B e C, tiveram como principais critérios:

- até 10 minutos de vibração ocorriam variações significativas no volume aparente;
- de 11 minutos até 30 minutos, as variações são inexpressivas;
- quando foi colocado o bloco de 1,0 kg, para realizar a segunda leitura, os materiais finos sobem e ocupam os espaços laterais entre o peso e a proveta, dificultando a leitura do experimento.

Cabe salientar que para cada leitura, foram realizadas três repetições e então adotado o valor médio entre as mesmas.

3.4 ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Após o estudo preliminar de compactação dos agregados, foi adotado o modo de leitura D para a determinação do volume aparente, e foi calculado o módulo de distribuição para os três planejamentos experimentais.

3.4.1 Planejamentos Experimentais

O planejamento experimental escolhido foi de modelagem de mistura simplex com 4 fatores: cimento, areia, pedrisco e filer. Para a faixa de composição de areia e pedrisco estudado, foram criados 3 planejamentos, nos quais a concentração de cimento variou de 5 a 20% em massa e o filer de 0 a 15%. Trabalhou-se com estas concentrações de cimento e filer, pois representam o melhor e o pior caso em termos de consumo destes materiais.

A diferença entre os planejamentos está nas concentrações máximas e mínimas de areia e pedrisco, assim como pode ser visto na Tabela 4. No planejamento A (PA), tanto a areia quanto o pedrisco variaram de 40 a 55%. No planejamento B (PB), apresentado na Tabela 5, a quantidade de areia variou de 25 a 40% e a de pedrisco de 55 a 70%. No o planejamento C (PC), apresentado na Tabela 6, a variação de areia foi de 10 a 25% e a de pedrisco foi de 70 a 85%.

Tabela 4 - Planejamento A: composição de pedrisco, areia, filer e cimento
Fonte: Autoria própria

Amostra	Cimento (%)	Areia RCC (%)	Pedrisco RCC (%)	Filer(%)
1	5,00	40,00	55,00	0,00
2	5,00	55,00	40,00	0,00
3	5,00	40,00	40,00	15,00
4	20,00	40,00	40,00	0,00
5	5,00	47,50	47,50	0,00
6	5,00	40,00	47,50	7,50
7	12,50	40,00	47,50	0,00
8	5,00	47,50	40,00	7,50
9	12,50	47,50	40,00	0,00
10	12,50	40,00	40,00	7,50
11	8,75	43,75	43,75	3,75

Tabela 5 - Planejamento B: composição de pedrisco, areia, filer e cimento. Fonte: Autoria própria

Amostra	Cimento (%)	Areia RCC (%)	Pedrisco RCC (%)	Filer(%)
1	5,00	25,00	70,00	0,00
2	5,00	40,00	55,00	0,00
3	5,00	25,00	55,00	15,00
4	20,00	25,00	55,00	0,00
5	5,00	32,50	62,50	0,00
6	5,00	25,00	62,50	7,50
7	12,50	25,00	62,50	0,00
8	5,00	32,50	55,00	7,50
9	12,50	32,50	55,00	0,00
10	12,50	25,00	55,00	7,50
11	8,75	28,75	58,75	3,75

Tabela 6 - Planejamento C: composição de pedrisco, areia, filer e cimento. Fonte: Autoria própria

Amostra	Cimento (%)	Areia RCC (%)	Pedrisco RCC (%)	Filer(%)
1	5,00	10,00	85,00	0,00
2	5,00	25,00	70,00	0,00
3	5,00	10,00	70,00	15,00
4	20,00	10,00	70,00	0,00
5	5,00	17,50	77,50	0,00
6	5,00	10,00	77,50	7,50
7	12,50	10,00	77,50	0,00
8	5,00	17,50	70,00	7,50
9	12,50	17,50	70,00	0,00
10	12,50	10,00	70,00	7,50
11	8,75	13,75	73,75	3,75

3.4.2 Estudos de empacotamento de partículas entre os agregados

Após a definição dos planejamentos experimentais foi calculada a proporção entre agregados, de cada amostra pertencente ao seu planejamento, apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição dos agregados nos ensaios de volume aparente e massa unitária. Fonte: Autoria própria

Amostra	Planejamento A		Planejamento B		Planejamento C	
	Pedrisco RCC (kg)	Areia RCC (kg)	Pedrisco RCC (kg)	Areia RCC (kg)	Pedrisco RCC (kg)	Areia RCC (kg)
1	0,58	0,42	0,74	0,26	0,89	0,11
2	0,42	0,58	0,58	0,42	0,74	0,26
3	0,50	0,50	0,69	0,31	0,88	0,13
4	0,50	0,50	0,69	0,31	0,88	0,13
5	0,50	0,50	0,66	0,34	0,82	0,18
6	0,54	0,46	0,71	0,29	0,89	0,11
7	0,54	0,46	0,71	0,29	0,89	0,11
8	0,46	0,54	0,63	0,37	0,80	0,20
9	0,46	0,54	0,63	0,37	0,80	0,20
10	0,50	0,50	0,69	0,31	0,88	0,13
11	0,50	0,50	0,67	0,33	0,84	0,16

Foi executado o ensaio de volume aparente, com intuito de determinar o comportamento do empacotamento entre as misturas. Para este ensaio foram feitas duas composições, uma na qual as amostras continham a totalidade dos agregados, e outra, na qual as partículas passantes pela peneira 0,150 mm foram retiradas. Consideraram-se estas duas composições com intuito de estudar a influência do material passante pela peneira 0,150 mm no empacotamento, pois nos agregados reciclados a presença desta fração fina é muito mais significativa que nos agregados convencionais.

Também foram calculados os módulos de distribuição de empacotamento total (T), inferior (I) e superior (S), para as amostras com a totalidade dos agregados e sem o passante pela peneira 0,150 mm. Segundo os modelos teóricos propostos por Alfred e Andreasen o melhor empacotamento possível é encontrado quando o módulo de distribuição é 0,37. Para o cálculo deste coeficiente foram seguidos os seguintes passos:

- separação de amostras dos dois agregados (areia e pedrisco), conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na sequência foi executado o peneiramento, sendo que as aberturas das peneiras utilizadas são descritas na Tabela 8;

- a massa do volume retido em cada peneira foi medido para cada agregado separadamente;
- os valores encontrados foram tabulados de acordo com o tamanho de abertura das peneiras, então foi calculada a percentagem acumulada retida em cada peneira (CPFT (%));
- na sequência, cada uma das amostras das composições A, B e C tiveram a CPFT (%) calculada como a somatória proporcional das frações mássicas dos valores de CPFT(%) de cada agregados para cada peneira;
- finalmente foi montado o gráfico log-log de CPFT (%) versus tamanho de abertura de peneira.

A Tabela 8 apresenta a série de peneiras com razão igual a $\sqrt{2}$ utilizadas para o cálculo da CPFT (%) e determinação do módulo de distribuição.

Tabela 8 - Peneiras utilizadas para o cálculo do módulo de distribuição
Fonte: Autoria própria

Peneiras (abertura em mm)	
12,5	1,2
9,7	0,85
9,5	0,6
6,8	0,425
6,3	0,3
4,8	0,212
3,35	0,15
2,4	0,106
2	0,075
1,7	

A partir dos estudos de empacotamento de partículas dos 3 planejamentos experimentais A, B e C, a composição A foi escolhida para continuar o trabalho.

3.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA PARA O CONCRETO SECO

Ao contrário dos métodos de dosagem para concretos convencionais, o concreto seco não possui um método padronizado. Neste caso, o procedimento de dosagem é baseado em métodos empíricos. Na realização deste trabalho, para determinação da quantidade de água a ser adicionada no concreto seco, foi utilizado

como método de referência o consistômetro de Vebe. A imagem deste equipamento pode ser visualizada na Figura 18.



Figura 18 - Consistômetro de Vebe. Fonte: Autoria própria

O principal objetivo neste ensaio é determinar a quantidade máxima de água, que deve ser adicionada ao concreto seco, mantendo o *slump* zero. Para garantir que seja encontrado o teor ideal de água, foi utilizado como parâmetro o tempo necessário para que um tronco de cone de concreto fresco seja transformado em um tronco de cilindro, sob ação de vibração padronizada.

3.5.1 Procedimentos do ensaio de VeBe

Para o ensaio da determinação de água no consistômetro de Vebe, foram adotados os seguintes procedimentos:

- a quantidade de material utilizado foi de 20,0 kg, suficiente para realizar o ensaio e posteriormente, moldar os corpos de prova (5x10) cm para o ensaios de resistência mecânica à compressão axial;
- o tempo de vibração no Vebe, seria de 20 a 30 segundos (PETRUCCI, 1978);
- foi determinado que seria utilizada a vibração máxima do equipamento. Adotou-se esta vibração por ser similar à da mesa vibratória de laboratório que será utilizada, na etapa de moldagem dos corpos de prova;

- a ordem de realização das composições de 1 a 11 foi aleatória, visando uma maior imparcialidade do operador.
- os agregados utilizados, assim como o filer, foram secos em estufa à 105° C por 24 horas.
- o cimento utilizado foi do tipo CPV- ARI.
- após a escolha aleatória da composição, os insumos tiveram as massas medidas. Na sequência, somente os agregados foram colocados na betoneira juntamente com uma quantidade de água, que corresponde a 90% da sua capacidade de absorção, procedimento de pré-umidificação. Os agregados foram homogeneizados em água manualmente com colher de pedreiro, e então, permaneceram em descanso por 10 minutos na betoneira. Tal procedimento se deve ao fato de que os agregados de RCC absorvem uma parcela da água de amassamento. Portanto, foi necessário adicionar água suficiente para que atingissem o ponto de saturação superfície seca e aguardar 10 minutos antes de adicionar os outros insumos (Leite, 2001), este procedimento também foi adotado por Hermann (2016).
- na sequência, foi adicionado o cimento e o filer, caso a composição as contemplasse, e realizada nova homogeneização manual. Então foi adicionada uma quantidade de água, correspondente a uma tentativa inicial de f_a/c 0,45 e então, a betoneira foi ligada, sendo que o tempo de mistura foi de 2 minutos;
- após misturado, o concreto foi colocado no tronco de cone do Vebe, e procedeu-se da mesma forma que no ensaio de *slump test*. Retirou-se o cone de metal, apoiou-se o disco de acrílico transparente sobre o topo do tronco de cone, e então foi acionada a vibração da mesa. Caso o concreto altere a forma de tronco de cone para tronco de cilindro em um tempo menor que 20 segundos, seria uma evidência que o teor de água adicionada tinha sido excessivo. A amostra deveria então ser descartada e nova amostra com menor teor de água deveria ser novamente ensaiada.
- caso o concreto ao final de 30 segundos, ainda não tivesse se transformado em um tronco de cilindro, seria uma evidência de um teor de água era insuficiente, bastando adicionar mais uma alíquota e proceder novamente o ensaio, não havendo necessidade de descarte da amostra;

- quando o teor de água adicionado fosse tal que, a transformação do tronco de cone em tronco de cilindro ocorresse no intervalo de 20 a 30 segundos, este valor seria adotado para compor o fator água:cimento do concreto, como o teor adequado, conforme Figura 19.



Figura 19 – Transformação do formato tronco-cônico para cilíndrico
Fonte: Autoria própria

Cabe salientar que após a escolha do planejamento experimental, para a realização dos ensaios no Vebe e moldagem dos corpos de prova, as amostras 1 a 10 eram ensaiadas apenas uma vez e para a amostra 11 foram realizadas 3 repetições, a fim de verificar a linearidade dos resultados obtidos.

3.6 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após a definição do teor de água e do fator água:cimento, o concreto ensaiado no Vebe foi moldado em corpos de prova cilíndrico de (5x10) cm, com intuito de estipular a resistência à compressão, absorção de água e massa específica. Salienta-se que o tempo máximo para realização do ensaio no Vebe até a moldagem do último corpo de prova, foi de 2 horas, devido ao início de pega do CP V ARI. As técnicas para moldagem, adensamento entre camadas e compactação em corpos de prova, envolvendo concreto seco, ainda não apresentam uma definição normativa. Portanto fica a critério do pesquisador a proposição de métodos que

consigam correlacionar os resultados dos corpos de prova, com os elementos de concreto correspondentes.

3.6.1 Mesa Vibratória

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada uma mesa vibratória adaptada para simular o processo de vibrocompactação dos CPs em laboratório, com o auxílio diversas ferramentas, apresentadas nas Figuras 20, 21, 22 e 23.

Cada um dos componentes tem uma função específica no processo:

1. mesa vibratória, com função de adensar o concreto, Figura 20 item 1;
2. apoio para hastes que simulam a compressão. Este apoio é composto por dois pés, sendo cada composto por um tripé, que ficam apoiados ao chão, não tendo contato direto com a mesa vibratória, Figura 20 item 2;
3. conjunto de camisas das hastes para compactação do concreto dos CPs. Este conjunto é composto por 5 hastes, que podem ser usadas todas ao mesmo tempo, Figura 20 item 3;
4. haste para compressão no interior da camisa. A operação é executada manualmente, tendo cada haste 10,0 kg de massa. Cada haste é presa por uma borboleta, que ao ser desrosqueada é colocada na face superior dos moldes, Figura 20 item 4;

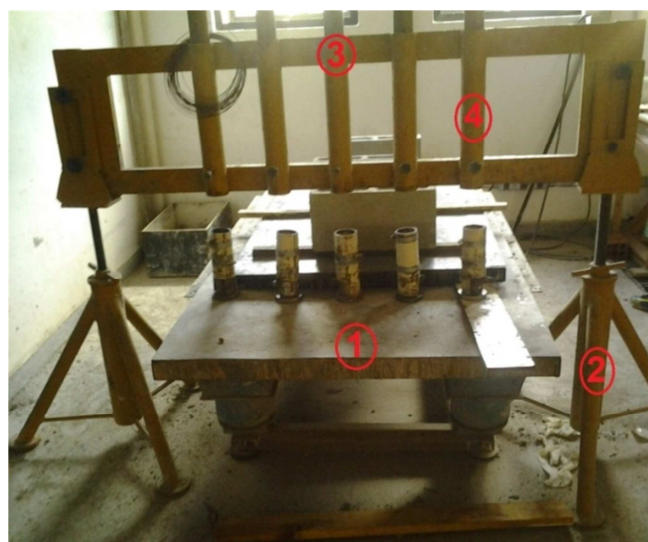


Figura 20 - Mesa vibratória simulando processo de vibrocompactação dos CPs em laboratório, composta por: 1 - mesa vibratória, 2 - apoio para hastes que simulam a compressão, 3 – conjunto de camisas 4 - hastes no interior da camisa

Fonte: Autoria própria

5. o molde de corpo de prova (5 x 10) cm, Figura 21 item 5, deve ficar embaixo da haste, pois ao ser enchido de concreto há a necessidade de deixar uma camada extra com cerca de 5 cm, visto que ao ser compactado e vibrado, o concreto ocupa os vazios do molde e diminuiu o volume inicial;
6. o adaptador da haste, Figura 21 item 6, é usado para que o concreto extra não caia na mesa e, portanto não ocorra a compactação necessária do CP, foi necessário colocar um adaptador que encaixe tanto no corpo de prova, quanto na haste;



Figura 21 - Molde de corpo de prova de (5 cm x 10) cm (item 5) e adaptador da haste (item 6). Fonte: Autoria própria

7. colocação do adaptador no molde do corpo de prova, Figura 22 item 7. É importante que ambos estejam limpos para um encaixe eficaz;
8. nesta etapa é importante a verticalidade do encaixe como na Figura 22 item 8;

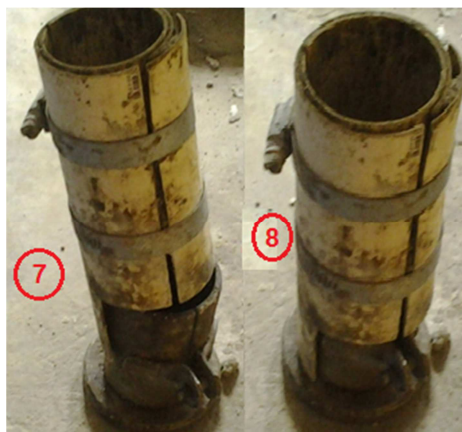


Figura 22 - Colocação do adaptador no molde em posição vertical
Fonte: Autoria própria

9. montagem do conjunto de hastes e corpos de prova, Figura 23. Nesta etapa se posiciona cada molde já preenchido com concreto, por meio do adaptador, a uma haste que fica na camisa;



Figura 23 - Disposição final do conjunto. Fonte: Autoria própria

Para finalizar esta etapa, após a montagem de todo sistema, é ligada a mesa vibratória por um período de 1 minuto, quando ocorre a vibro compactação dos CPs.

3.6.2 Procedimento para moldagem dos corpos de prova

Alguns cuidados devem ser tomados no decorrer de todas as etapas, principalmente com a parte de segurança no trabalho, pois ao se desrosquear a borboleta, a haste pode cair com força, e ocasionar um acidente, portanto deve-se desrosquear a borboleta e segurar a haste na parte superior.

Outro cuidado importante é limpar e lubrificar constantemente a haste e o adaptador, pois após a vibração dos CPs para se içar a haste há um gasto de energia muito grande, pois ela adere ao adaptador que também se adere ao molde.

O tempo de vibração influencia diretamente na compactação do concreto, bem como a energia da vibração, a compressão promovida pelo peso da haste e também a regularização do topo do CP. Para se definir qual seria o tempo e o método de vibrocompactação, foram realizados alguns experimentos auxiliares, com objetivo de se alcançar a maior massa específica possível.

Em uma primeira tentativa, o corpo de prova foi preenchido até a altura média do adaptador e então, conforme a Figura 23, a mesa vibratória foi ligada por 30 segundos. Após a vibração, o topo do molde foi rasado e mantido ao ar por 24 horas, até a desforma.

Ao desmoldar o corpo de prova, foi visualizado que a parte inferior apresentou deficiência no preenchimento e péssima compactação. Tal situação influenciaria diretamente nos resultados dos ensaios mecânicos, absorção de água e também na massa específica.

A Figura 24 mostra o aspecto visual do primeiro lote de corpos de prova produzidos. Cabe salientar que ao realizar a desforma dos CPs, devido as falhas de concretagem, alguns deles quebravam na parte inferior.



Figura 24 - Inspeção visual e constatação de falhas nos corpos de prova
Fonte: Autoria própria

Foram então realizadas novas tentativas, com novos métodos e tempos de vibração, sendo levado em consideração, a massa específica do corpo de prova, para adoção da condição mais adequada de processo. O melhor procedimento foi o seguinte:

- o molde foi completamente preenchido por concreto e então compactado manualmente com 15 golpes de soquete, item 11 da Figura 25, sobre um bloco de aço de mesmo diâmetro que o molde, item 10 da Figura 25. Desta forma, a energia do impacto dos golpes de soquete foi distribuída pela área do bloco de aço e, por sua vez, transferida ao concreto;



Figura 25 - Detalhe do bloco de aço (10) e do soquete (11), com o molde do lado esquerdo e o adaptador do lado direito. Fonte: Autoria própria

- na sequência à compactação foi realizado um desbaste da superfície desta primeira camada, pois ficou constatado por ensaios anteriores, que simplesmente compactar a primeira camada e sobrepor outra a primeira, acarretava uma fissura transversal, ao longo de todo o corpo de prova, conforme a Figura 26;



Figura 26 - Fissura transversal, oriunda pela falta de “agulhamento” entre camadas
Fonte: Autoria própria

- como solução foi executado o “agulhamento” entre camadas, por meio de uma barra de ferro, tipo CA 50 e após este procedimento, o número de fissuras diminuiu consideravelmente, conforme Figura 27;



Figura 27 – Corpos de prova sem fissuras transversais e bom acabamento aparente
Fonte: Autoria própria

- posteriormente colocou-se o adaptador, item 6 da Figura 21, sobre o molde para lançar o concreto até uma altura aproximada de 5 cm acima do molde;
- esta operação foi realizada em 5 moldes e então os mesmos foram colocados cada um embaixo de uma haste, sendo feita a montagem do conjunto de haste Figura 23. A mesa vibratória foi ligada por 60 segundos;
- após a finalização da vibrocompactação e o içamento das hastes, o adaptador era retirado e a superfície do corpo de prova regularizada (rasada);
- para esta regularização foi utilizada uma placa, que aparece na Figura 28 como item 12, colocada sobre o molde e então foram aplicados golpes com o soquete e depois foi realizado movimentos circulares que permitiram o melhor acabamento da superfície;
- para finalizar esta etapa, os corpos de prova eram estocados por 24 horas, após este período eram desformados e transportados para câmara úmida.



Figura 28 - Chapa para regularização da superfície, sobre o molde
Fonte: Autoria própria

O bom acabamento superficial nos CPs garantiu uma maior confiabilidade, nos resultados, dos diversos ensaios que se sucederam.

3.6.3 Cura dos *corpos* de prova

Após a desforma dos moldes, todos os corpos de prova foram colocados em câmara úmida, sob temperatura ambiente e imersos em água saturada em cal. E permaneceram nestas condições até o dia da realização dos ensaios.

3.7 ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO

A disposição dos ensaios, quantidade de corpos de prova que foram moldados e ensaiados, e, idades são descritas na Tabela 9.

Tabela 9 - Disposição dos ensaios com corpos de prova
Fonte: Autoria própria

Idade do ensaio	Ensaio de resistência à compressão axial	Ensaio de resistência à compressão diametral	Ensaio de absorção de água e massa específica
7 dias	6 CPs	6 CPs	6 CPs
28 dias	6 CPs	6 CPs	6 CPs

Para cada uma das composições foram moldados 36 corpos de prova.

3.7.1 Ensaio de resistência mecânica à compressão axial e diametral

No dia da realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, cerca de 2 horas antes da execução dos mesmos. Os ensaios foram realizados no laboratório da UTFPR, Campus Ecoville, foi utilizada uma prensa hidráulica de acionamento elétrico, com velocidade de 0,5 MPa por segundo, o equipamento estava calibrado e de acordo com as normas pertinentes.

Para o ensaio de compressão axial, não houve a execução de capeamento ou retifica nos corpos de prova, mas foi utilizado pratos com neoprene, garantindo confiabilidade aos resultados obtidos. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

O ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, foi realizado de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011).

3.7.2 Ensaio de absorção de água e massa específica

No dia da realização dos ensaios de massa específica e absorção de água, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e já na sequência ocorria a execução dos mesmos. Foram realizados no laboratório da UTFPR, Campus Ecoville, cujos equipamentos estavam calibrados e de acordo com as normas pertinentes. As técnicas de ensaio foram embasadas na NBR 9778 (ABNT, 2005).

3,8 CÁLCULOS TEÓRICOS DO VOLUME DA PASTA

Para o planejamento experimental escolhido foram realizados estudos sobre o volume de excesso de pasta e também volume de vazios na pasta, conforme revisão bibliográfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão mostrados e discutidos os resultados obtidos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios dos dois lotes de agregados.

4.1.1 Caracterização dos agregados de RCC - lote A

A Tabela 10 demonstra o resultado da distribuição granulométrica da areia.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de granulometria da areia do lote A
Fonte: Autoria própria

PENEIRAS		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	MÉDIA
ASTM	mm	RETIDA (g)	RETIDA (g)	RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	% ACUM.
3/8	9,5	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/4	6,3	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	4,76	3	4	3	1,0	1,2	1,1	1,1
8	2,38	24	27	25	8,0	8,8	8,4	9,5
16	1,19	49	55	52	16,3	18,4	17,3	26,9
30	0,59	60	66	63	19,8	21,8	20,8	47,7
50	0,297	78	77	77	25,8	25,6	25,7	73,6
100	0,149	52	46	49	17,4	15,1	16,2	89,8
200	0,075	5	7	6	1,7	2,3	2,0	91,9
FUNDO	FUNDO	30	19	24	9,8	6,3	8,1	100
TOTAL		300	300	300	100	100	100	248
Dimensão máxima característica			4,75 mm					
Módulo de finura			2,480					

Esta areia apresenta uma dimensão máxima característica de 4,75 mm e um módulo de finura de 2,48, valores que contemplam uma característica comum entre os agregados miúdos. A Figura 29 apresenta os resultados de distribuição granulométrica da areia com relação aos limites de qualidade superiores e inferiores, previstos na NBR NM 248 (ABNT, 2003).

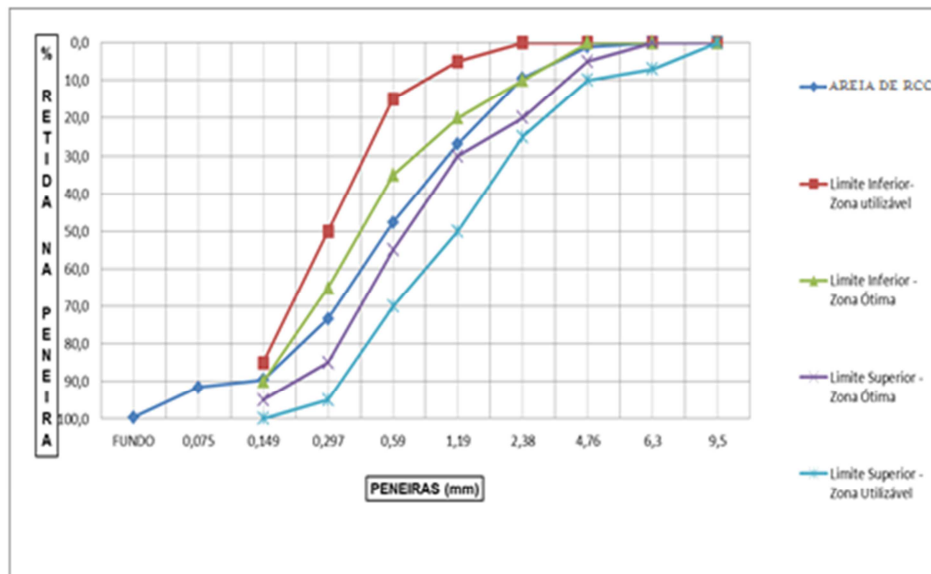


Figura 29 - Ensaio de granulometria da areia do lote A (NBR NM 248/2003)
Fonte: Autoria própria

A areia do lote A apresentou uma distribuição granulométrica entre o limite inferior e superior da faixa ótima, o que teoricamente poderia acarretar em um bom empacotamento e uma maior densidade nas composições estudadas. É mostrado na Tabela 11 o resultado da composição granulométrica do pedrisco do lote A.

Tabela 11 - Ensaio de granulometria do pedrisco do lote A - NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Autoria própria

PENEIRAS		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	MÉDIA
ASTM	mm	RETIDA (g)	RETIDA (g)	RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	% ACUM.
1/2	12,5	0	0	0	0	0	0	0
3/8	9,5	25	34	30	2,5	3,4	3	3
1/4	6,3	153	202	177	15,3	20,2	17,7	20,7
4	4,76	131	166	148	13,1	16,6	14,8	35,5
8	2,38	330	302	316	33	30,2	31,6	67,1
16	1,19	94	67	80	9,4	6,7	8	75,1
30	0,59	59	34	47	5,9	3,4	4,7	79,8
50	0,3	110	100	105	11	10	10,5	90,3
100	0,15	55	40	48	5,5	4	4,8	95,1
200	0,075	12	22	17	1,2	2,2	1,7	96,8
FUNDO	FUNDO	31	33	32	3,1	3,3	3,2	100
TOTAL		1000	1000	1000	100	100	100	443
Dimensão máxima característica			9,5 mm					
Módulo de finura			4,43					

O pedrisco do lote A, apresenta uma dimensão máxima característica de 9,5 mm e um módulo de finura de 4,43.

Este pedrisco tem características muito próximas à da faixa granulométrica de agregados miúdos, ou seja, na utilização deste insumo para produção de concretos, falta uma parcela essencial de porção graúda na mistura. Cabe-se salientar que quanto maior a fração miúda em um agregado, maior será a demanda no consumo de água no concreto e conseqüentemente precisará de maior consumo de cimento para manter o Fa/c de modo a atingir valores de resistências à compressão mais elevados.

Cerca de 65% da amostra é passante na peneira 4,75 mm, quando a própria NBR NM 248 (ABNT, 2003), indica para esta peneira uma faixa entre 80% e 100% de retenção.

É mostrada na Figura 30 a distribuição granulométrica do pedrisco.

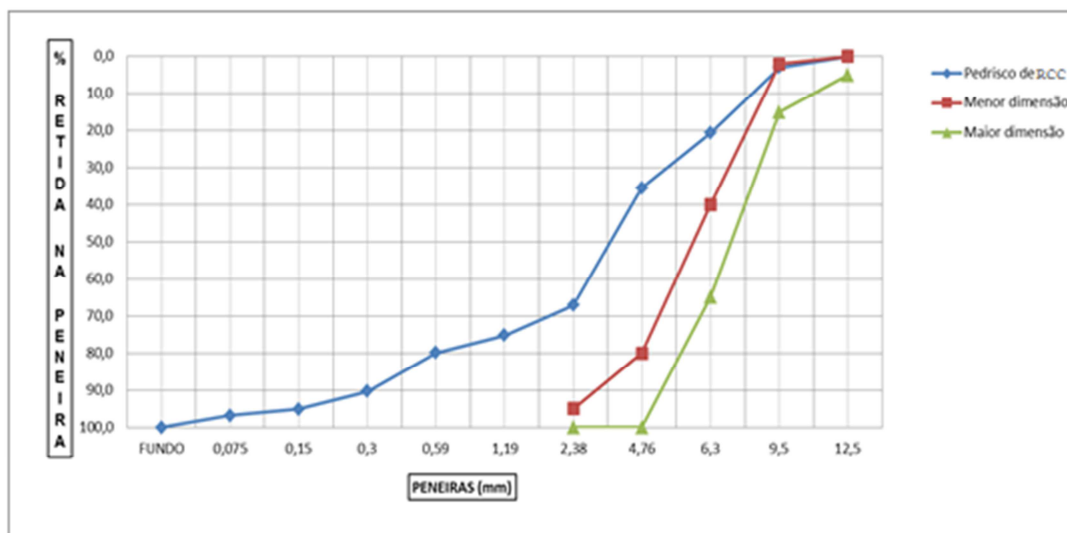


Figura 30 - Ensaio de granulometria do pedrisco do lote A - NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Autoria própria

O pedrisco do lote A apresenta uma curva granulométrica em que as partículas consideradas graúdas se encontram fora da faixa indicada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) de menor e maior dimensão. A dimensão retida na peneira de 9,5 mm apresenta uma pequena porcentagem de partículas, o que fica mais evidente a partir do retido na peneira 6,3 mm, na qual somente cerca de 20% dos agregados ficam retidos, quando o próprio indicativo da NBR NM 248 (ABNT, 2003), informa que a menor dimensão está na faixa de 40% de retenção.

Na Tabela 12 são mostrados os resultados de caracterização do pedrisco e da areia, do lote A.

Tabela 12 – Caracterização do pedrisco e da areia do lote A. Fonte: Autoria própria

Ensaio realizado	Resultados	
	Areia	Pedrisco
Massa unitária compactada	1,28 g/cm ³	1,18 g/cm ³
Massa unitária em estado solto	1,23 g/cm ³	1.148,27 g/cm ³
Massa específica do agregado seco	Não realizado	2,53 g/cm ³
Massa específica aparente	Não realizado	1,95 g/cm ³
Determinação de pulverulentos	5,3%	Não realizado
Absorção de água	Não realizado	10,63%

Após a realização dos ensaios nos dois agregados do lote A, alguns aspectos merecem atenção. O pedrisco apresentou um alto índice de absorção de água (aspecto negativo) e a areia um baixo índice de pulverulentos, igual a 5,3% (aspecto positivo).

Na Tabela 13 é mostrado o resultado do ensaio da composição do pedrisco do lote A.

Tabela 13 - Composição do pedrisco do lote A. Fonte: Autoria própria

Especificação do grupo	Quantidade (%)
G1 e G2	84,5
G3	15,0
G4	0,5
G1 + G2 < 90% - ARM	

Os grupos são divididos de acordo com a origem do material:

- grupo 1 = fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume;
- grupo 2 = fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume;
- grupo 3 = fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume;

- grupo 4 = fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica como madeira, plástico, betume e materiais carbonizados e de contaminantes como vidros, vidrados cerâmicos e gesso.

O resultado da composição visual do pedrisco apresentou 15 % de fração vermelha, o que caracteriza o lote A como ARM, além disso há uma falta de partículas graúdas na faixa granulométrica maior que 4,8 mm. Assim estas duas características do material podem influenciar diretamente nas resistências mecânicas dos concretos.

Em função da característica negativa do pedrisco, foram paralisados os ensaios e por isso algumas caracterizações não foram realizadas.

4.1.2 Caracterização dos agregados de RCC - lote B

O resultado da distribuição granulométrica do lote B da areia é mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 – Ensaio de granulometria da areia do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Autoria própria

PENEIRAS		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	MÉDIA
ASTM	mm	RETIDA (g)	RETIDA (g)	RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	% ACUM.
3/8	9,5	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/4	6,3	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	4,76	5	5	5	1,6	1,7	1,7	1,7
8	2,38	43	38	41	14,3	12,7	13,5	15,2
16	1,19	46	43	44	15,3	14,2	14,7	30,0
30	0,59	41	41	41	13,8	13,5	13,6	43,7
50	0,297	58	64	61	19,3	21,1	20,2	63,9
100	0,149	43	44	43	14,2	14,6	14,4	78,4
200	0,075	18	17	18	5,8	5,8	5,8	84,2
FUNDO	FUNDO	47	48	47	15,4	15,9	15,7	100
TOTAL		300	300	300	100	100	100	232
Dimensão máxima característica			4,75 mm					
Módulo de finura			2,319					

A areia do lote B apresenta uma dimensão máxima característica de 4,75 mm e um módulo de finura de 2,3. Estes valores podem ser considerados comuns para agregados miúdos de RCC.

De acordo com uma tendência natural dos agregados reciclados, apresenta cerca de 15 % de partículas passantes pela peneira 0,075 mm, ou seja, uma quantidade considerável de material pulverulento.

Há grande quantidade de material passante pela peneira 0,59 mm, totalizando 60% de todas partículas.

A curva granulométrica da areia em estudo é mostrada na Figura 31.

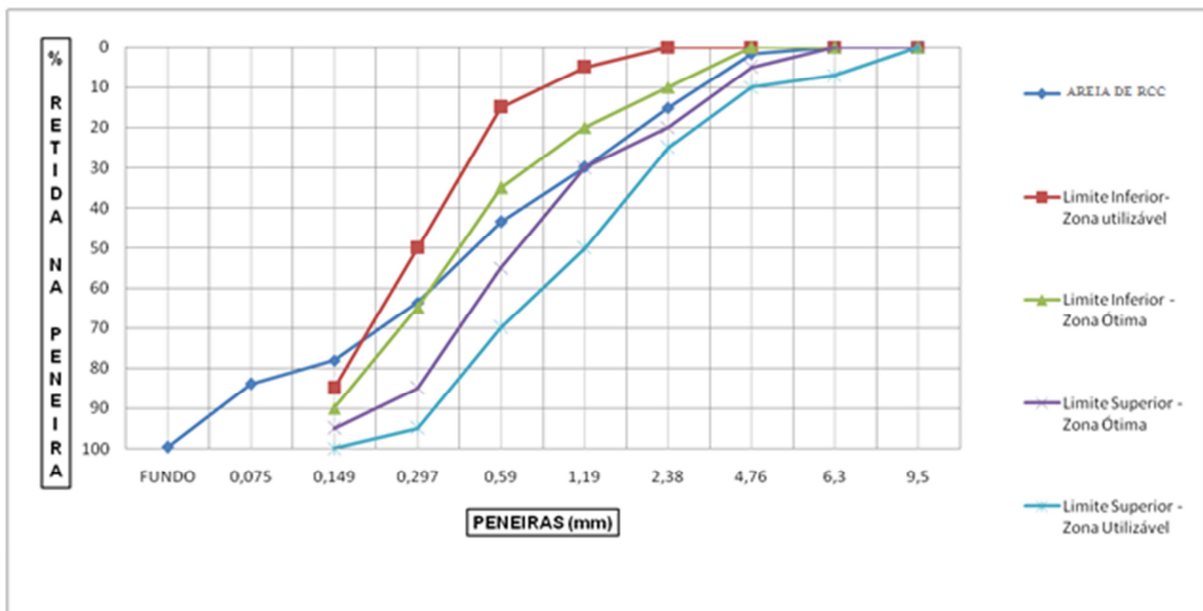


Figura 31 - Ensaio de granulometria da areia em estudo do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Autoria própria

A areia do lote B encontra-se entre o limite superior e inferior da zona ótima até a peneira com abertura de 0,30 mm e apresenta uma oscilação entre o limite inferior da zona ótima e o limite inferior da zona utilizável na peneira de abertura 0,150 mm.

O pedrisco do lote B apresenta como dimensão máxima característica 9,5 mm e módulo de finura de 5,1, conforme mostrado na Tabela 15. O lote de pedrisco apresenta quase 50% das partículas retidas na peneira 6,3 mm, situação que evidencia uma maior quantidade de grãos, quando comparado ao pedrisco do lote A.

Tabela 15 – Ensaio de granulometria do pedrisco do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Autoria própria

PENEIRAS		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	MÉDIA
ASTM	mm	RETIDA (g)	RETIDA (g)	RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	% ACUM.
½	12,5	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/8	9,5	46	38	42	4,6	3,8	4,2	4,2
¼	6,3	479	435	457	47,9	43,5	45,7	49,9
4	4,76	249	213	231	24,9	21,3	23,1	73,0
8	2,38	96	124	110	9,6	12,4	11,0	84,0
16	1,19	9	15	12	0,9	1,5	1,2	85,1
30	0,59	8	13	11	0,8	1,3	1,1	86,2
50	0,3	15	27	21	1,5	2,7	2,1	88,2
100	0,15	19	32	26	1,9	3,2	2,6	90,8
200	0,075	15	22	19	1,5	2,2	1,9	92,6
FUNDO	FUNDO	66	82	74	6,6	8,2	7,4	100,0
TOTAL		1000	1000	1000	100	100	100	511
Dimensão máxima característica			9,5 mm					
Módulo de finura			5,114					

Na Figura 32 é apresentada a curva granulométrica deste agregado.

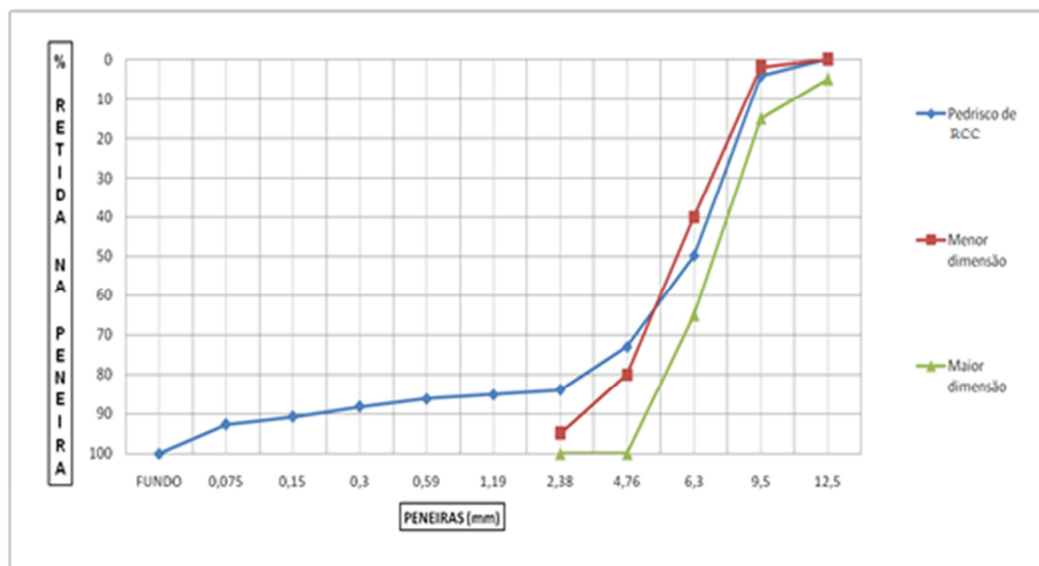


Figura 32 – Ensaio de granulometria do pedrisco do lote B - NBR NM 248 (ABNT, 2003). Fonte: Autoria própria

Nota-se que o pedrisco até a peneira de abertura de 6,3 mm se enquadra dentro da faixa granulométrica de maior e menor dimensão segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Até a peneira de abertura de 4,75 mm cerca de 73% das partículas ficaram retidas, demonstrando que 27% deste material é considerado fração miúda, excedendo em cerca de 7% a tolerância da menor dimensão da norma.

Outro aspecto a ser observado é o limite normativo para a fração acumulada na peneira com abertura de 2,38 mm, o pedrisco em estudo apresenta 16% de fração passante por esta peneira, quando os indicativos de norma apontam para uma faixa de menor dimensão cerca de 5% de fração passante. Isto evidencia uma das características marcantes em agregados reciclados, a grande quantidade de materiais finos.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados de caracterização do pedrisco e da areia.

Tabela 16 - Caracterização dos agregados do lote B. Fonte: Autoria própria

Ensaio realizado	Resultados	
	Areia	Pedrisco
Massa unitária compactada	1,34 g/cm ³	1,34 g/cm ³
Massa unitária em estado solto	1,29 g/cm ³	1,28 g/cm ³
Massa específica do agregado seco	2,34 g/cm ³	2,72 g/cm ³
Massa específica aparente	1,87 g/cm ³	2,36 g/cm ³
Massa específica pelo Frasco de Chapman	2,49 g/cm ³	N/A
Determinação de pulverulentos	14,7%	4,11%
Absorção de água	10,85%	5,7%

Cabe-se salientar que a determinação da massa específica pelo Frasco de Chapman não se aplica a agregados graúdos. Para os ensaios de absorção de água e materiais pulverulentos o pedrisco atende as especificações mínimas de Norma. Por ser um agregado reciclado o índice de absorção de 5,7% está abaixo do comum para este tipo de material e, portanto, é uma característica positiva.

A quantidade de materiais pulverulentos se enquadra em uma faixa muito próxima dos agregados convencionais.

Foi constatado que o pedrisco apresenta uma massa específica de 2,72 g/cm³, valor que se encontra muito próximo aos valores dos agregados convencionais.

A areia apresenta uma quantidade considerável de material pulverulento, mas se enquadra no limite da tolerância da NBR 15.116 (ABNT, 2004), com 15%. A absorção de água está muito próxima do limite de 12% atribuído pela mesma norma, sendo que a amostra resultou em cerca de 11% de absorção.

Para o ensaio de massa específica, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009) foi constatada grande dificuldade em encontrar o ponto ideal, no qual a amostra se encontra na condição saturada superfície seca, fator crucial para obtenção do valor da massa específica. Para comprovar o valor obtido por meio desta NBR, foi utilizada a ME 194 (DNER, 1998), como parâmetro para comparar os resultados.

Em relação a massa específica dos agregados, segundo Glavind e Haugaard (1998), os agregados reciclados podem ser utilizados em produção de concretos com até 40 MPa. Na Tabela 17 é mostrado o resultado do ensaio de composição do pedrisco do lote B.

Tabela 17 – Ensaio de composição do pedrisco do lote B. Fonte: Autoria própria

Especificação do grupo	% Referente
G1 e G2 (fração cinza)	98,0%
G3 (fração vermelha)	0,2%
G4	1,8%
G1 + G2 > 90% - ARC	

A composição de 98% de fração cinza, no pedrisco, demonstra que o material é ARC, outro fator importante é que cerca de 73% da amostra ficou retida na peneira 4,75 mm. Já o pedrisco do lote A apresentou 35,5% de retenção, ou seja, o pedrisco do lote B tem mais fração graúda que o do lote A.

Esta situação é de extrema importância, visto que é necessário a presença de fração graúda para a produção de concretos secos, acarretando na possibilidade de menor consumo de água, maior ganho de resistência e maior massa específica.

Após a obtenção e análise de todos estes dados optou-se por utilizar, para a continuidade dos estudos, os agregados do lote B.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO FILER

O filer utilizado foi caracterizado quanto à massa específica pelo método descrito pela ME 084 (DNER, 1995). O valor obtido foi de 2,525 g/cm³.

Também foi constatada dificuldade de desagregação das partículas, visto que a amostra ensaiada veio empedrada.

Esta desagregação foi realizada no almofariz e também no moinho de bolas. Nos dois equipamentos o tempo gasto para desagregar as partículas e peneirá-las na peneira 0,150 mm foi elevado, para desagregar e peneirar 1,0 kg de amostra.

4.3 DEFINIÇÃO DA FAIXA DE COMPOSIÇÃO ENTRE AGREGADOS MAIS COMPACTADA

Para a definição da faixa granulométrica a ser estudada foram realizadas medidas de volume aparente e o cálculo da massa unitária e volume de vazios, sendo executado procedimento de vibração, vibrocompactação e quedas livres nas composições. Foi então realizada a medida de volume aparente, após 3 procedimentos de compactação para as 10 composições, cada uma com 1 kg de material, os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Volume aparente em 4 condições de leitura: A - sem vibração; B- após 5 min. de vibração sem peso; C- após 10 min. de vibração com peso, e D- 50 quedas livres. Fonte: Autoria própria

Amostra	Pedrisco RCC (kg)	Areia RCC (kg)	Leitura A (cm ³)	Leitura B (cm ³)	Leitura C (cm ³)	Leitura D (cm ³)
1	1,00	0,00	715,5	622,5	610,0	666,7
2	0,00	1,00	755,0	650,0	630,0	652,5
3	0,50	0,50	650,0	587,5	565,0	607,5
4	0,75	0,25	645,0	577,5	555,0	615,0
5	0,25	0,75	682,5	610,0	592,5	625,0
6	0,50	0,50	637,5	572,5	557,5	615,0
7	0,50	0,50	642,5	577,5	557,5	595,0
8	0,62	0,38	660,0	580,0	570,0	587,5
9	0,88	0,12	730,0	640,0	620,0	655,0
10	0,94	0,06	750,0	660,0	640,0	670,0

Ao se comparar os volumes aparentes das amostras 1 e 2, 4 e 5 nota-se a presença de uma tendência, na qual ocorre aumento da densidade com o aumento da quantidade de pedrisco nas composições até 0,75, havendo aumento do volume aparente na sequência. Observa-se que o perfil das curvas no gráfico da Figura 33 é o mesmo, independentemente da ocorrência de vibração ou compactação, no ensaio de volume aparente. Fica ainda demonstrada a eficiência do processo de vibração por 5 min, que levou a uma significativa diminuição do volume aparente com relação a leitura sem compactação. Entretanto a vibração extra por 10 minutos com peso diminui o volume aparente em menos de 5%.

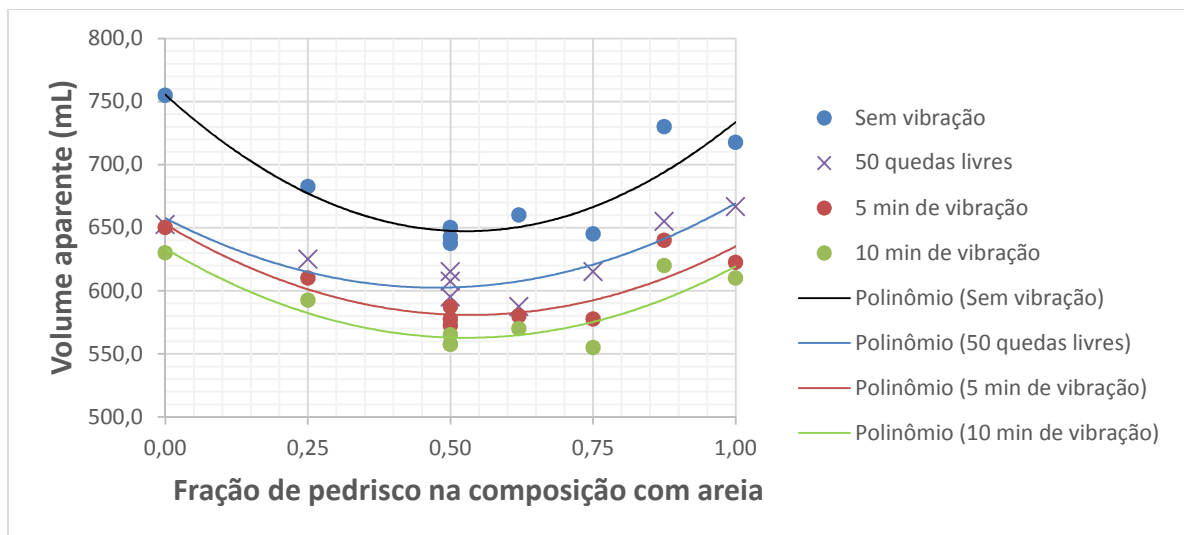


Figura 33 - Relação entre volume aparente e a massa de pedrisco na mistura
Fonte: Autoria própria

Foi constatado também que os pontos em que ocorrem o menor volume aparente, ou seja, nos quais obtém-se a maior massa unitária assim como o menor volume de vazios, estão entre 50% e 75% da fração de pedrisco na mistura entre agregados.

Para a continuidade dos estudos de empacotamento e realização do trabalho, estendeu-se a área de estudo entre 40% e 90% da fração de pedrisco, a fim de observar e correlacionar também os pontos de menor densidade, com intuito de verificar se ocorrerá ou não, mudanças significativas nos resultados da pesquisa.

Foram realizados estudos sobre o volume de vazios na mistura entre agregados. Primeiramente foi calculada a massa específica da mistura, na

sequência foi calculado o volume de vazios para as quatro leituras realizadas, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Massa específica e volume de vazios. Fonte: Autoria própria

Amostra	Massa específica (g/cm ³)	Volume de vazios (%)			
		Leitura A	Leitura B	Leitura C	Leitura D
1	2,72	48,67	40,83	39,62	44,75
2	2,49	46,70	38,09	36,12	38,33
3	2,59	40,71	34,41	31,79	36,56
4	2,65	41,57	34,75	32,10	38,72
5	2,54	42,29	35,40	33,52	36,98
6	2,59	39,55	32,69	30,88	37,34
7	2,59	40,02	33,27	30,88	35,23
8	2,62	42,26	34,29	33,14	35,13
9	2,68	48,96	41,78	39,91	43,12
10	2,70	50,61	43,87	42,12	44,71

Cabe salientar que as proporções entre pedrisco e areia eram homogeneizadas, e depois lançadas na proveta. As leituras A e D apresentavam aspecto homogêneo, já as leituras B e C apresentavam segregação nas amostras.

Apesar de menores volumes de vazios, a segregação ocorrida nas leituras B e C, foi fator decisivo para se optar pela leitura D, que apresentava menor volume de vazios que a leitura A e não apresentou segregação. Na Figura 34 são mostradas as quatro leituras para a amostra 6.

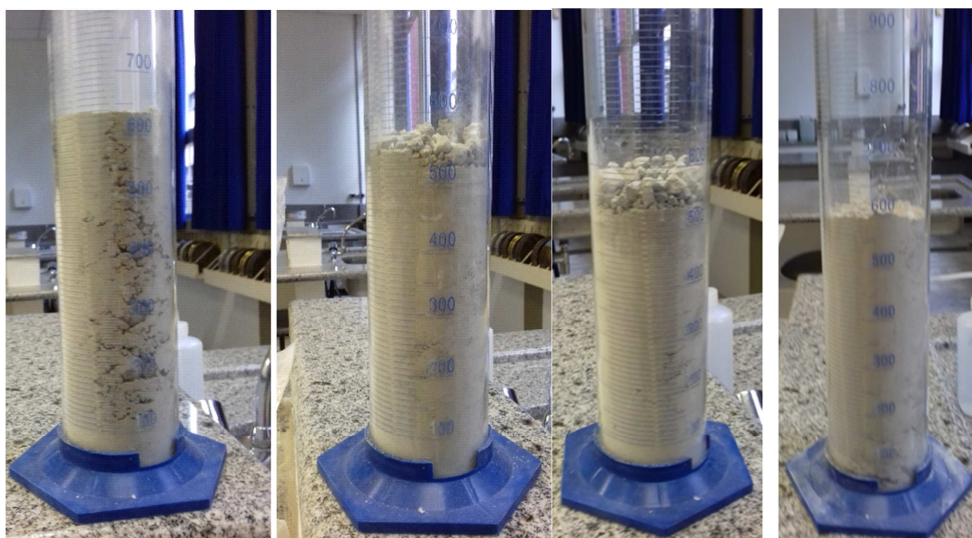


Figura 34- Da esquerda para direita, leituras A, B, C e D. Fonte: Autoria própria.

A determinação de massa unitária pela proveta é uma maneira de avaliar diferentes composições com um equipamento menor e mais prático. Os resultados obtidos seguem uma mesma tendência de volume de vazios e massa unitária, fator que traz confiabilidade ao ensaio, independentemente se há golpes, vibração, ou vibro-compactação. Há a possibilidade de ensaiar em escala menor, aquilo que é praticado pela indústria, podendo alterar a força de compactação, e/ou vibração, correlacionando o ensaio ao maquinário utilizado na fábrica.

4.4 ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

4.4.1 Método O'Reilly

Primeiramente foi realizado o ensaio de volume aparente na proveta e calculada a massa unitária para as matérias-primas: os agregados, o filer e o cimento, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Volume aparente e massa unitária das matérias-primas
Fonte: Autoria própria

Material	Massa de ensaio (kg)	Volume aparente (cm³)	Massa unitária (g/cm³)
Cimento	1,00	850,00	1,18
Filer	1,00	1300,00	0,77
Areia	1,00	660,00	1,52
Pedrisco	1,00	700,00	1,43

O método da proveta quando comparado com o método da NBR NM 45 (ABNT, 2006), resultou em valores menores de massa unitária para os dois agregados, sendo que o resultado da areia apresentou uma diferença de 13% e o do pedrisco 6,5%. O método da proveta é similar ao procedimento da NBR NM 45 (ABNT, 2006), com diferenças na quantidade da amostra ensaiada, tipo de recipiente no qual ocorre o ensaio e método de adensamento.

Foi realizado mesmo procedimento para as amostras dos planos experimentais A, B e C, assim como cálculo do volume de vazios, contendo as amostras totais dos agregados, e também, aquelas nas quais foram excluídas as partículas passantes

pela peneira 0,150 mm, conforme Tabela 21. Observa-se que algumas amostras não estão presentes, são aquelas que apresentaram mais de duas repetições.

Tabela 21 – Massas unitárias e volume de vazios dos três planejamentos experimentais. Fonte: Autoria própria

Planejamento e Amostra	Areia (kg)	Pedrisco (kg)	Massa unitária (g/cm ³)		Volume de vazios (%)	
			Amostra Total	Amostra sem o passante na peneira 0,150 mm	Amostra Total	Amostra sem o passante na peneira 0,150 mm
P A 1	0,42	0,58	1,61	1,50	38,40	42,59
P A 2	0,58	0,42	1,61	1,51	37,52	41,32
P A 3, 4 e 5	0,50	0,50	1,56	1,43	39,90	45,18
P A 6	0,46	0,54	1,56	1,44	40,12	44,71
P A 7	0,46	0,54	1,59	1,44	39,17	44,86
P A 8	0,54	0,46	1,61	1,46	37,74	43,65
P A 9	0,54	0,46	1,61	1,49	37,74	42,63
P A 10 e 11	0,50	0,50	1,56	1,46	39,90	43,79
P B 1	0,26	0,74	1,61	1,48	39,34	44,19
P B 2	0,42	0,58	1,56	1,56	40,52	40,27
P B 3	0,31	0,69	1,60	1,44	39,47	45,36
P B 4	0,31	0,69	1,60	1,42	39,47	46,20
P B 5	0,34	0,66	1,58	1,49	39,94	43,43
P B 6	0,29	0,71	1,54	1,38	42,06	47,94
P B 7	0,29	0,71	1,56	1,44	41,02	45,56
P B 8	0,37	0,63	1,56	1,43	40,58	45,53
P B 9	0,37	0,63	1,56	1,42	40,58	45,85
P B 10	0,31	0,69	1,57	1,42	40,65	46,12
P B 11	0,33	0,67	1,65	1,45	37,45	45,10
P C 1	0,11	0,89	1,46	1,42	45,68	47,14
P C 2	0,26	0,74	1,61	1,48	39,34	44,20
P C 3	0,13	0,88	1,45	1,34	45,85	49,94
P C 4 e 10	0,13	0,88	1,45	1,37	45,85	49,01
P C 5	0,18	0,82	1,58	1,44	40,74	46,01
P C 6	0,11	0,89	1,46	1,42	45,76	47,04
P C 7	0,11	0,89	1,54	1,39	42,91	48,32
P C 8	0,20	0,80	1,54	1,41	42,48	47,22
P C 9	0,20	0,80	1,46	1,36	45,36	49,20
P C 11	0,16	0,84	1,54	1,45	42,68	45,81

As massas unitárias dos três planejamentos experimentais são apresentadas na Figura 35.

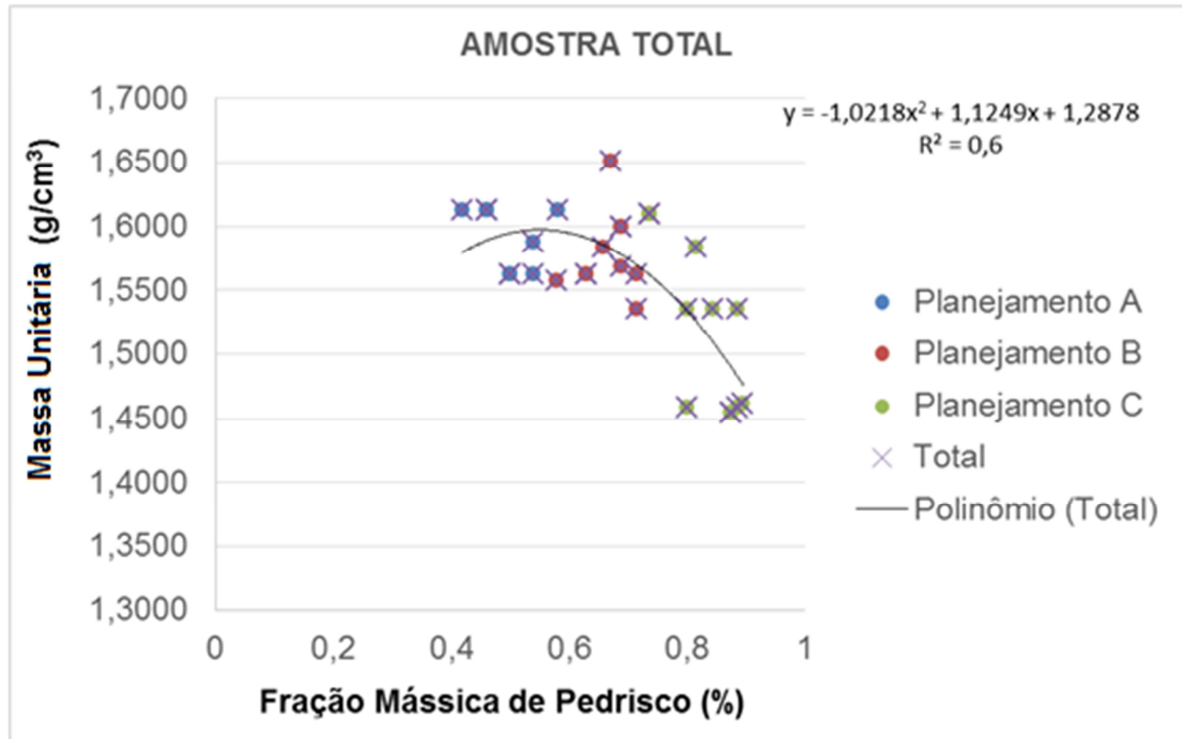


Figura 35 - Massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras totais. Fonte: Autoria própria

No Planejamento C, observa-se uma tendência de redução da massa unitária, no qual se concentram os maiores teores de pedrisco. O P.B. 11 (67% de pedrisco) apresenta isoladamente do seu grupo maior massa unitária, 1,65 g/cm³.

Ocorre uma grande variação da massa unitária dentro do mesmo grupo, um exemplo disso são as composições P.A 1 (58% de pedrisco), P.A 2 (42% de pedrisco), P.A 8 e P.A 9 (46% de pedrisco), P.B. 1 e P.C 2 (74% de pedrisco), que apresentaram a mesma densidade de 1,61 g/cm³, mesmo pertencendo a faixas distintas de composições.

Foi elaborada uma linha de tendência e ficou constatada uma dispersão nos resultados. A que mais chamam atenção é o P.B. 11, pela maior densidade alcançada.

Este resultado pode ter sido afetado por alguma técnica de operação e execução dos ensaios. Outra situação que pode ter interferido nos resultados é a

leitura na proveta em frações com maior quantidade de pedrisco, pois nem sempre a superfície se apresentava em boa condição de leitura.

As massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras sem o passante em 0,150 mm são apresentadas na Figura 36.

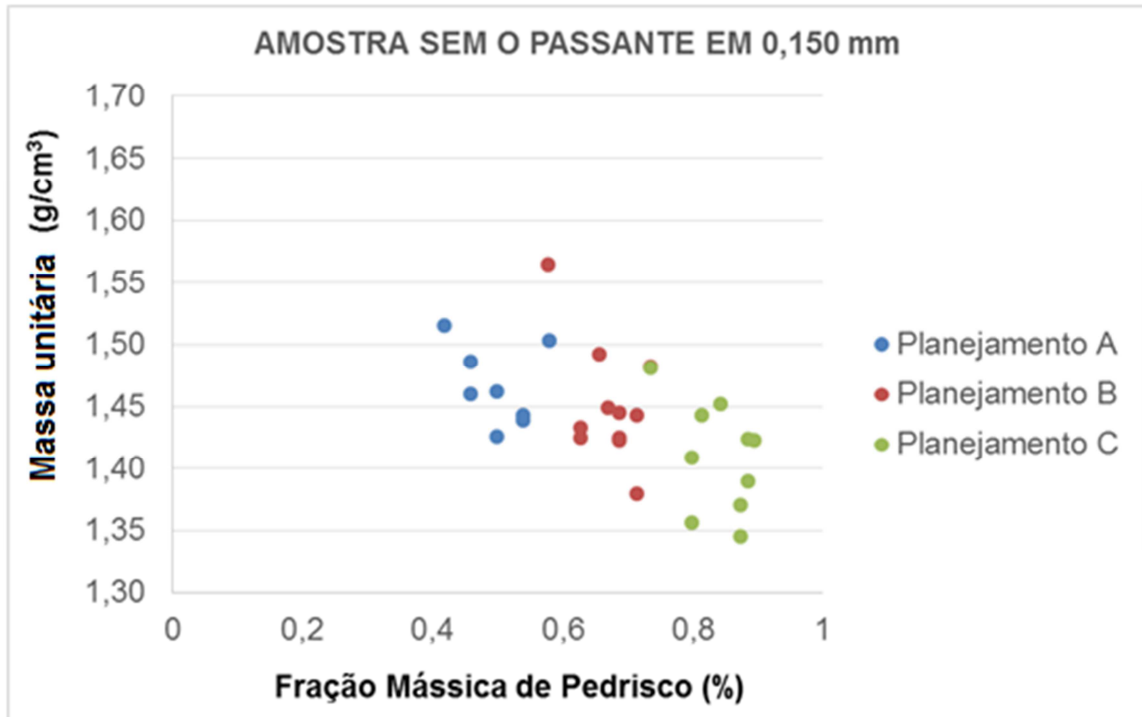


Figura 36 - Massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras sem o passante em 0,150mm. Fonte: Autoria própria

Nas amostras sem o passante em 0,150 mm, fica mais evidente o comportamento ocorrido com o planejamento C das amostras totais. Com o aumento da fração de pedrisco nas composições e com a retirada do material fino, ocorreu a redução da massa unitária.

O P.B 2 (58% de pedrisco) é a composição com maior massa unitária, 1,56 g/cm³, entretanto aparece deslocado do seu grupo, já P.A 2 (42% de pedrisco) apresenta 1,51 g/cm³ e P.A 1 (58% de pedrisco) apresenta 1,50 g/cm³. Analisando estes dados nota-se que a massa unitária das composições entre 42% e 58%, são similares, não ocorrendo grandes variações.

As massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras totais e sem o passante em 0,150 mm são mostradas na Figura 37.

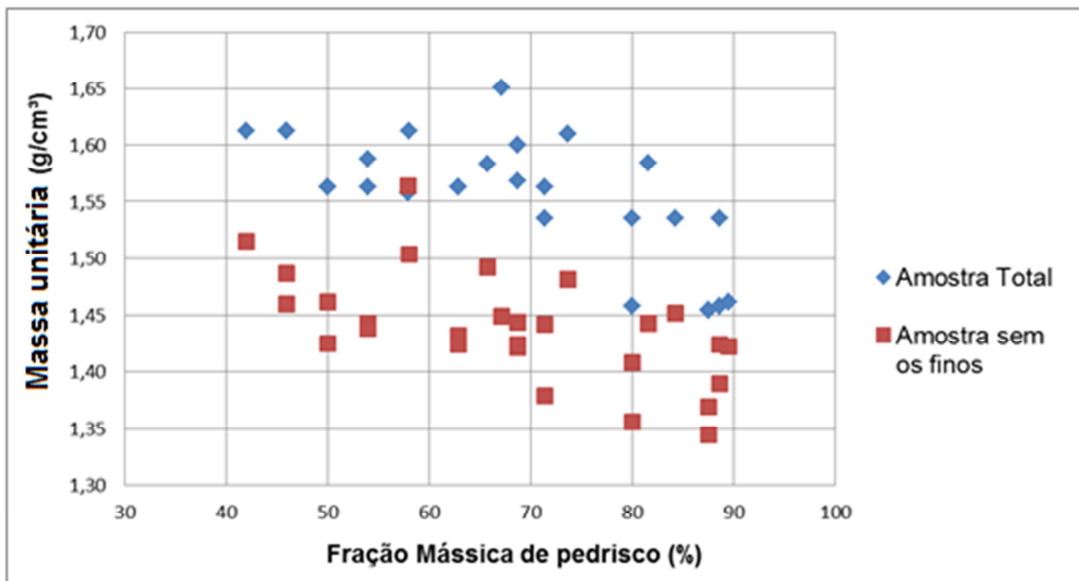


Figura 37 - Massas unitárias dos três planejamentos experimentais, para as amostras totais e sem o passante em 0,150mm. Fonte: Autoria própria

Constata-se que as massas unitárias das amostras sem os finos (diâmetro menor que 0,150 mm), reduziram devido ao aumento da porosidade. Nas duas situações P.A 2 (42% de pedrisco) e P.A 1 (58% de pedrisco), estão entre as 3 composições com maior massa unitária. Os volumes de vazios das amostras totais são mostrados na Figura 38.

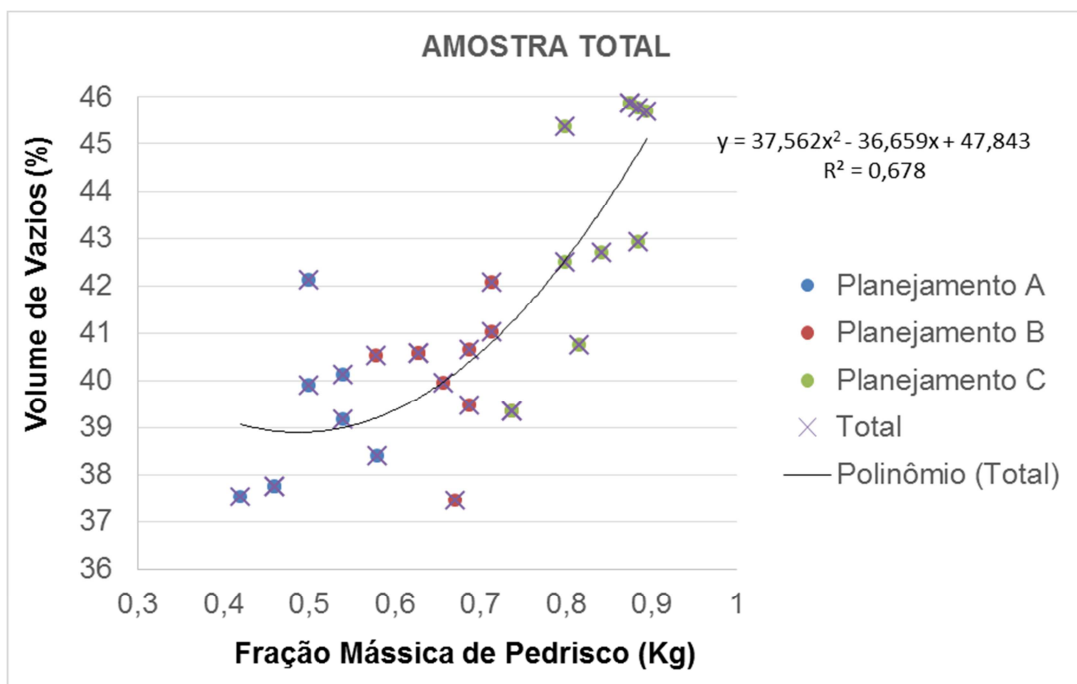


Figura 38 – Volume de vazios dos três planejamentos experimentais, para as amostras totais. Fonte: Autoria própria

Quanto mais se adiciona pedrisco nas composições, menor será a quantidade de areia e maior será o volume de vazios. Tal situação aponta a tendência já estabelecida sobre as massas unitárias.

As composições com menor volume de vazios são o P.A 2 (42% de pedrisco), P.A 8 e P.A 9 (63% de pedrisco) e P.B 11 (67% de pedrisco), já os planejamentos que apresentavam teores de pedrisco acima de 80%, são as composições com maior volume de vazios. Os volumes de vazios das amostras sem o passante em 0,150 mm são mostrados no gráfico da Figura 39.

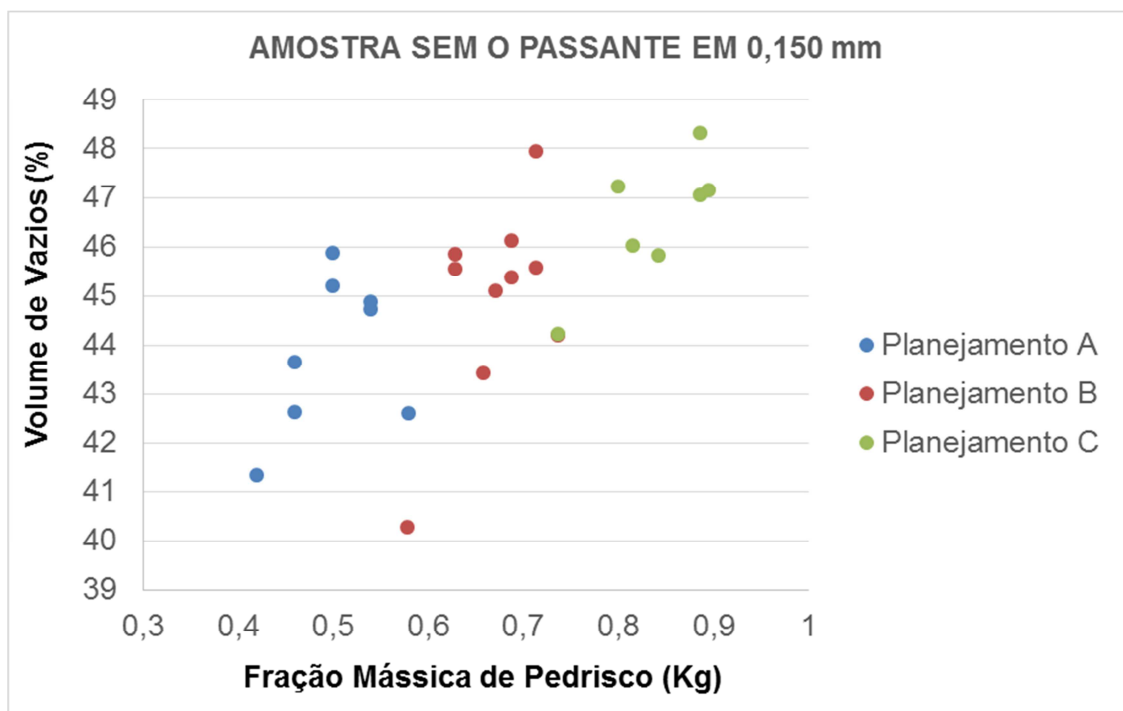


Figura 39 – Volume de vazios dos três planejamentos experimentais, para as amostras sem o passante em 0,150mm. Fonte: Autoria própria.

Duas composições apresentam menores volumes de vazios, o P.B 2 (58% de pedrisco) e o P.A. 2 (42% de pedrisco). Os maiores vazios estão presentes nos planejamentos com mais de 80% de pedrisco.

De maneira geral pode-se concluir, para as amostras totais e parciais, que os maiores volumes de vazios e menores massas unitárias estão concentradas na faixa acima de 80% de pedrisco, e que os menores vazios e maiores massas unitárias se concentram na faixa entre 42% e 67%, sendo que nas composições com 42% e 58% esta tendência é mais evidente. Assim, a opção de utilizar o P.C. foi excluída.

4.4.2 Método proposto por Alfred e Andreasen - abordagem contínua

As distribuições do tamanho de partículas dos agregados por série de peneiras razão de $\sqrt{2}$ são apresentados na Tabela 22. As amostras dos dois agregados (areia e pedrisco) foram separadas conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), na sequência foi executado o peneiramento e, as frações retidas foram pesadas.

Tabela 22 – Distribuição dos tamanhos de partículas. Fonte: Autoria própria

Peneiras (mm)	Areia	Pedrisco
	Massa (g)	Massa (g)
	0,00	0,00
Calculado 12,5		
9,7		
9,5	2,00	26,50
Calculado 6,8		
6,3	4,00	439,10
4,8	4,00	271,70
3,35	24,40	130,70
2,4	19,30	8,20
2	10,40	3,50
Calculado 1,7		
1,2	24,60	6,10
0,85	19,10	3,60
0,6	22,50	5,00
0,425	28,55	7,10
0,3	30,00	9,90
Calculado 0,212		
0,15	41,30	19,70
Calculado 0,106		
0,075	20,40	15,90
Fundo	49,10	52,60

Na realização do peneiramento das amostras, a distribuição de partículas em algumas peneiras foi calculada teoricamente, caso das peneiras 9,7 mm, 6,8 mm, 1,7 mm, 0,212 mm e 0,106 mm.

Com base nos resultados de distribuição granulométrica dos agregados foram calculadas as distribuições de cada composição das amostras totais dos

planejamentos A, B e C, levando em consideração a proporção em massa de cada agregado. As curvas podem ser vistas na Figura 40.

Segundo Alfred e Andreasen, o maior empacotamento teórico possível ocorre quando o módulo de distribuição apresenta o valor de 0,37 (ORTEGA *et al.*, 1997). Assim foi elaborada uma curva teórica de distribuição dos tamanhos de partículas com base na Equação 3, para fim de comparação.

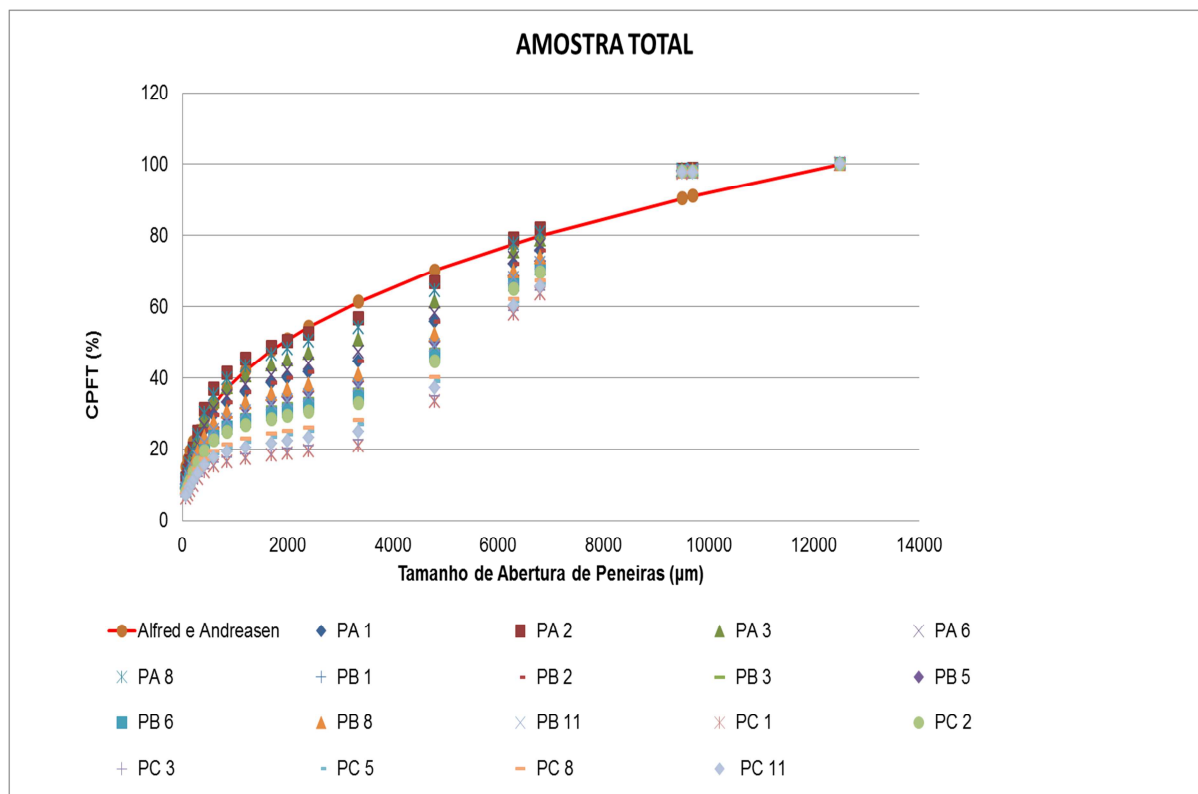


Figura 40 – CPFT (%) versus tamanho de abertura de peneira para (a) Planejamento A, (b) Planejamento B e (c) Planejamento C. Fonte: Autoria própria

Ao se comparar os resultados de distribuição dos três planejamentos experimentais utilizando o modelo teórico de Alfred e Andreasen, observa-se que as composições mais próximas desta curva são P.A.2 (42% de pedrisco), P.A.8 (46% de pedrisco) e P.A.3 (50% de pedrisco), resultando nos melhores empacotamentos estudados.

Fica evidente também, que o aumento de pedrisco nas composições acarreta redução no empacotamento. Desta forma, o planejamento A é o mais adequado para dar continuidade ao trabalho.

Os resultados dos valores dos módulos de distribuição de empacotamento dos três planejamentos experimentais são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 - Módulos de distribuição de empacotamento dos três planejamentos
Fonte: Autoria própria

Planejamento e Amostra	Pedrisco (kg)	Areia (kg)	Valores dos módulos de distribuição						
			Amostra Total			Amostra sem o passante na peneira 0,150 mm			
			I	S	T	I	S	T	
P. A	1	0,58	0,42	0,46	0,58	0,44	0,44	0,58	0,43
P. A	2	0,42	0,58	0,52	0,41	0,41	0,50	0,41	0,39
P. A	3, 4 e 5	0,50	0,50	0,51	0,47	0,42	0,49	0,47	0,40
P. A	6	0,54	0,46	0,50	0,51	0,43	0,48	0,51	0,42
P. A	7	0,54	0,46	0,50	0,51	0,43	0,48	0,51	0,42
P. A	8	0,46	0,54	0,51	0,43	0,41	0,41	0,51	0,39
P. A	9	0,46	0,54	0,51	0,43	0,41	0,41	0,51	0,39
P. A	10 e 11	0,50	0,50	0,51	0,47	0,42	0,49	0,47	0,40
P. B	1	0,74	0,26	0,39	0,93	0,47	0,37	0,85	0,48
P. B	2	0,58	0,42	0,44	0,62	0,44	0,41	0,62	0,43
P. B	3	0,69	0,31	0,40	0,85	0,46	0,37	0,85	0,46
P. B	4	0,69	0,31	0,40	0,85	0,46	0,37	0,85	0,46
P. B	5	0,66	0,34	0,41	0,80	0,45	0,38	0,80	0,45
P. B	6	0,71	0,29	0,40	0,89	0,46	0,36	0,89	0,47
P. B	7	0,71	0,29	0,40	0,89	0,46	0,36	0,89	0,47
P. B	8	0,63	0,37	0,42	0,75	0,45	0,38	0,79	0,44
P. B	9	0,63	0,37	0,42	0,75	0,45	0,38	0,79	0,44
P. B	10	0,69	0,31	0,40	0,85	0,46	0,37	0,85	0,46
P. B	11	0,67	0,33	0,41	0,82	0,45	0,37	0,82	0,45
P. C	1	0,89	0,11	0,33	1,30	0,51	0,33	1,30	0,51
P. C	2	0,74	0,26	0,39	0,93	0,47	0,37	0,85	0,48
P. C	3	0,88	0,13	0,34	1,24	0,51	0,34	1,24	0,51
P. C	4 e 10	0,88	0,13	0,34	1,24	0,51	0,34	1,24	0,51
P. C	5	0,82	0,18	0,36	1,10	0,49	0,36	1,09	0,49
P. C	6	0,89	0,11	0,33	1,30	0,51	0,33	1,30	0,51
P. C	7	0,89	0,11	0,33	1,30	0,51	0,33	1,30	0,51
P. C	8	0,80	0,20	0,37	1,06	0,49	0,37	1,06	0,49
P. C	9	0,80	0,20	0,37	1,06	0,49	0,37	1,06	0,49
P. C	11	0,84	0,16	0,35	1,16	0,50	0,35	1,16	0,50

Foram calculados os módulos de distribuição, para todas as amostras dos três planejamentos experimentais, e então elaborados gráficos de log CPFT (%) versus tamanho de abertura de peneira (μm). De modo a exemplificar o procedimento adotado, são mostrados, na Figura 41, os intervalos usados para o cálculo do módulo de distribuição (coeficiente angular da reta) inferior em vermelho, o superior em verde e com todos os dados da amostra 1 do planejamento A.

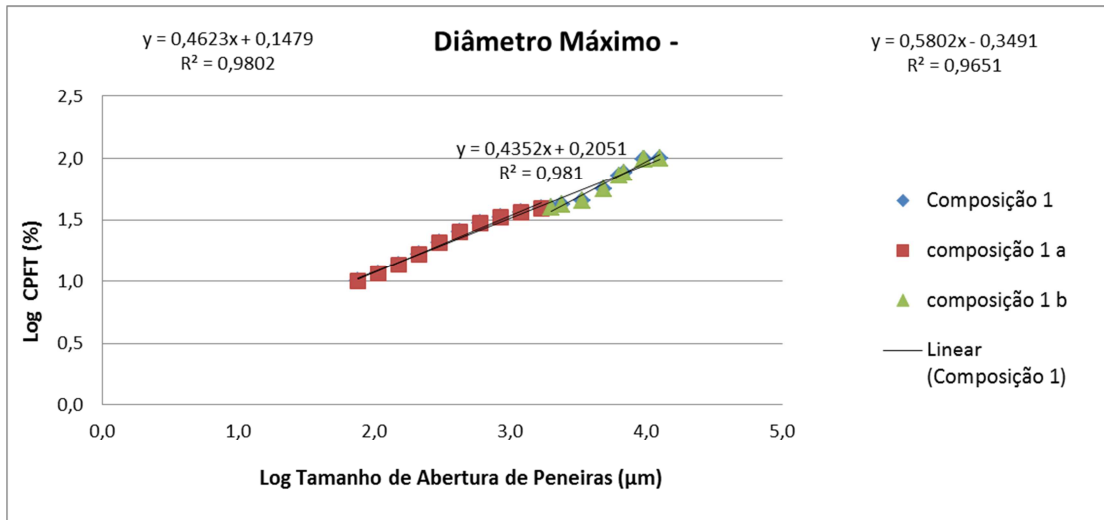


Figura 41 - Módulo de distribuição da amostra 1 do planejamento A
Fonte: Autoria própria

Na composição 1 o módulo de distribuição considerando o total de pontos (T) é 0,4352; considerando a fração de finos na composição 1a o módulo de distribuição inferior (I) é 0,4623 e considerando a fração de grossos na composição 1b o módulo superior (S) é 0,5802. Considerando o melhor empacotamento teórico possível de 0,37 nota-se um ajuste da parte total e dos finos, mas ao mesmo tempo a fração de grossos se afasta do melhor modelo de empacotamento.

O comportamento dos módulos de distribuição total, superior e inferior, para as amostras totais é mostrado na Figura 42.

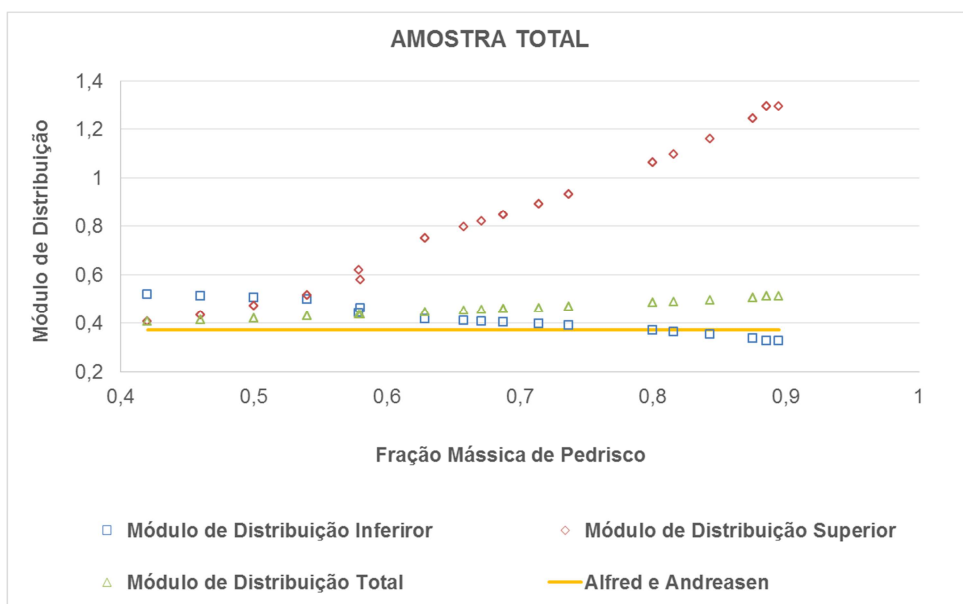


Figura 42 - Módulos de distribuição das amostras totais. Fonte: Autoria própria

Ao se agrupar os módulos de distribuição em função da fração mássica de pedrisco, constata-se que quanto maior a fração de grossos, maiores os módulos de distribuição superior, ou seja, tal como foi constatado experimentalmente, quanto menos eficiente é o empacotamento, maior a quantidade de poros. Ao ser adicionado maior quantidade da fração de finos, o módulo de distribuição inferior também aumenta gradativamente, acarretando na diminuição do empacotamento nesta faixa. Analisando as curvas de distribuição percebe-se que a faixa de distribuição granulométrica do planejamento A é aquela na qual os valores dos módulos de distribuição superior e inferior se aproximam, e ambos se aproximam do valor de 0,37.

Então, entre a composição P.A. 2 (42% de pedrisco) e as composições P.A. 6 e P.A. 7 (54% de pedrisco) há uma intersecção entre as curvas dos módulos superior e inferior, o que indica o preenchimento desta faixa granulométrica pela areia. Assim se fosse analisado somente o módulo de distribuição total, pode-se concluir que o P.A. 2 apresenta o melhor empacotamento. O comportamento dos módulos de distribuição total, superior e inferior, para as amostras sem o material passante pela peneira 0,150 mm é mostrado na Figura 43.

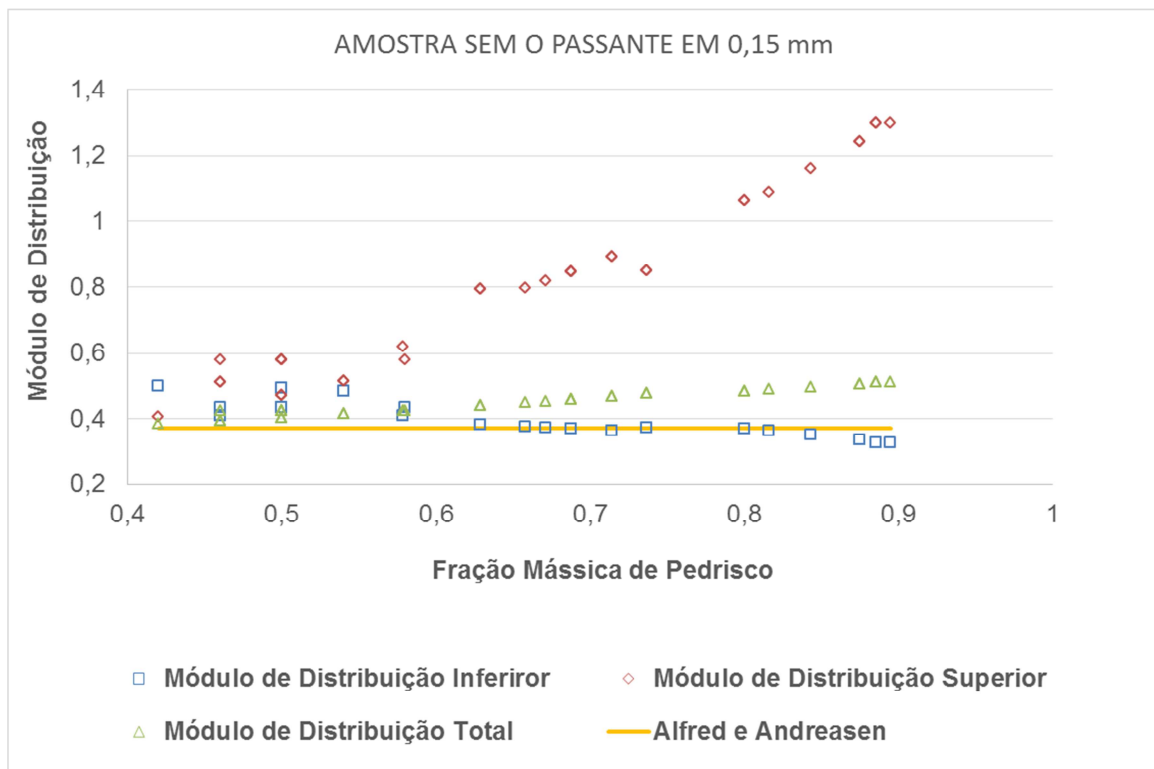


Figura 43- Módulos de distribuição das amostras sem o passante na peneira 0,150 mm. Fonte: Autoria própria

O comportamento do planejamento experimental sem o passante na peneira 0,150 mm, mostra-se similar aos planejamentos com amostras totais, conforme já debatido anteriormente. O P.A. 2 (42% de pedrisco), P.A. 8 e P.A. 9 (46% de pedrisco), são os planejamentos com melhor módulo de distribuição total, sendo iguais a 0,39.

Baseado nas discussões feitas no estudo de empacotamento de partículas, optou-se pelo planejamento A para confecção dos corpos de prova. Entretanto antes é necessário definir a quantidade de água pelo ensaio de VeBe.

4.5 ENSAIO DE VEBE

A quantidade de água para moldagem dos corpos de prova foi determinada para os traços do Planejamento A, após a execução do ensaio de determinação da água de amassamento para concretos secos, por meio do Vebe.

Constatou-se, com base nos resultados da Figura 44, que todos os insumos provocam um maior consumo de água, na seguinte ordem decrescente de contribuição: filer, cimento, areia e pedrisco.

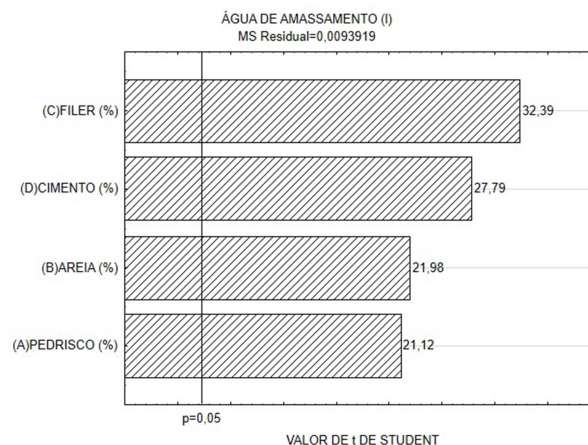


Figura 44 – Gráfico de Pareto da relevância relativa da água de amassamento em relação aos componentes do concreto. Fonte: Autoria própria

Em relação a água de amassamento utilizada no concreto seco, as composições que apresentaram filer precisaram de uma maior quantidade de água.

O cimento é o segundo insumo que causa mais influência neste quesito, seguidos pela areia e pedrisco. A influência dos agregados independe da proporção entre os mesmos e a quantidade de água de amassamento é similar.

Assim são mostradas nas curvas de nível das superfícies de resposta quando o cimento é mantido constante em 12,5%, Figura 45 e, quando o filer é mantido constante em 7,5%, Figura 46.

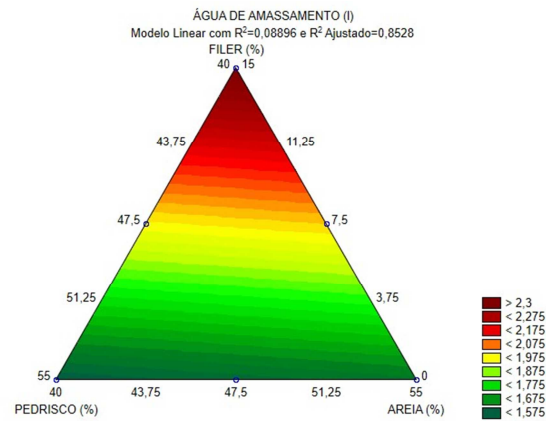


Figura 45 – Influência do filer, areia e pedrisco na água de amassamento
Fonte: Autoria própria

O filer tem a maior influência na quantidade de água necessária para homogeneizar o concreto. Conseqüentemente, quanto mais água necessária para confecção do concreto, menor será a resistência à compressão.

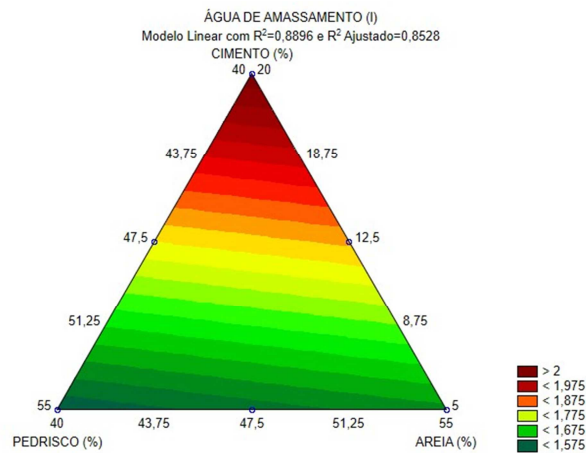


Figura 46 – Influência do cimento, areia e pedrisco na água de amassamento
Fonte: Autoria própria

Mantendo-se o filer constante o cimento é o maior responsável pelo consumo de água de amassamento e o pedrisco apresenta a menor influência entre todos os insumos. Após a realização do ensaio no consistômetro de VeBe, determinou-se a quantidade de água de amassamento e também fixou-se o fator água:cimento das amostras do P.A, tal como apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Resumo dos traços após o ensaio do consistômetro de Vebe
 Fonte: Autoria própria

Amostra	Relação cimento: agregados + filer	Cimento	Areia RCC	Pedrisco RCC	Filer	Fator a/c
P.A. 1	1:19	1,00	8,00	11,00	0,00	1,71
P.A. 2	1:19	1,00	11,00	8,00	0,00	1,84
P.A. 3	1:19	1,00	8,00	8,00	3,00	2,52
P.A. 4	1:4	1,00	2,00	2,00	0,00	0,58
P.A. 5	1:19	1,00	9,50	9,50	0,00	1,74
P.A. 6	1:19	1,00	8,00	9,50	1,50	2,22
P.A. 7	1:7	1,00	3,20	3,80	0,00	0,77
P.A. 8	1:19	1,00	9,50	8,00	1,50	2,22
P.A. 9	1:7	1,00	3,80	3,20	0,00	0,76
P.A. 10	1:7	1,00	3,20	3,20	0,60	0,91
P.A. 11	1:10,43	1,00	5,00	5,00	0,43	1,12

Notou-se uma variação considerável entre os fatores água:cimento estabelecidos. A relação entre o número de partes de cada insumo, certamente é a grande razão para isso. Por exemplo, a amostra 8 apresenta uma relação de 1:19, resultando em um Fa/c de 2,22 já a amostra 4 que apresenta uma relação 1:4 resultou em um Fa/c de 0,58.

As amostras 1 e 2 apresentam uma relação cimento agregado de 1:19, todavia na amostra 2, que apresenta uma maior quantidade de agregado miúdo e portanto uma maior quantidade de finos na mistura, ocorreu um maior consumo de água, justificando o maior Fa/c.

Na amostra 3, na qual três partes dos agregados foram substituídas por três partes do filer, o consumo de água aumentou consideravelmente, chegando a quase 50%, se comparada com a amostra 1. Tal situação fica mais evidente quando se comparam as amostras 5 e 6, ao se substituir 1,5 partes da areia pela mesma quantidade do filer, o Fa/c saltou de 1,74 para 2,22.

4.5.1 Considerações sobre o ensaio de Vebe

A utilização do consistômetro de Vebe para a determinação de água de amassamento, em concretos secos compostos por agregados de RCC, ainda não é

comum. Observou-se, pelos ensaios realizados, que as composições ensaiadas apresentavam aspecto úmido, situação decorrente do alto consumo de água, mas mesmo assim continuavam com *slump* 0.

Realizar o ensaio de *slump test* em um concreto com Fa/c de 2,52 (amostra 3), e o abatimento continuar sendo zero certamente não é uma situação comum. Tal comportamento indicia uma quantidade de água maior, do que a praticada e utilizada na Indústria de artefatos de concreto.

Ao se comparar, empiricamente, o ponto de umidade obtido com o ensaio de Vebe, ao ponto estipulado na indústria, detecta-se excesso de umidade. Os métodos utilizados no setor industrial, apesar de empíricos, como por exemplo, apertar o concreto já amassado com a mão, para verificar se este está no ponto ideal, apontam que a composições ensaiadas no Vebe já haviam passado desse ponto visual.

Em todas as amostras ensaiadas, a quantidade de água utilizada para dar trabalhabilidade à mistura acarretou em teores de umidade maiores que 8%, situação que justificaria o uso de aditivos. Este teor de umidade é elevado e descaracteriza o concreto como seco, mesmo apresentando *slump* 0.

A utilização de um aditivo defloculante ou dispersante associado ao filer poderia melhorar o empacotamento e/ou fluidez do concreto e assim diminuir as altas quantidades de água. Outra situação que poderia diminuir os altos consumos de água seria utilizar um Vebe modificado, situação em que coloca um peso de 20 Kg sobre o disco de plástico transparente, para otimizar a compactação.

4.6 VOLUME DE PASTA

Para as composições do Planejamento A foi calculada a Espessura Máxima de Pasta (MPT), a partir dos valores de: superfície específica volumétrica (VSA); fração esperada de poros na mistura (PFR); e, fração volumétrica de sólidos somente da porção de grossos (>150 mm) do concreto (VS), que são apresentados na Tabela 25.

Assim como o Volume de Excesso de Pasta (V_{exp}), calculado com base em: volume específico dos agregados (V_a); volume aparente dos agregados (V_b); volume total de pasta (V_p), e, valor de vazios na pasta (V_{pv}).

Tabela 25 – Valores para o cálculo de excesso de pasta. Fonte: Autoria própria

Amostra	VSA (m ² /cm ³)	PFr	VS	MPT (μm)	Vb (cm ³)	Va (cm ³)	Vp (cm ³)	Vpv (cm ³)	Vexp (cm ³)
P.A. 1	0,0058	0,51	0,67	-1,93E+02	501	352	138	148	-10
P.A. 2	0,0072	0,40	0,65	-4,02E+01	483	355	150	127	23
P.A. 3	0,0065	0,44	0,51	5,03E+01	423	342	218	82	137
P.A. 4	0,0065	0,44	0,54	2,72E+01	427	345	203	82	120
P.A. 5	0,0065	0,44	0,67	-8,61E+01	522	355	143	167	-24
P.A. 6	0,0061	0,48	0,58	-6,90E+01	467	345	183	122	61
P.A. 7	0,0061	0,48	0,61	-9,09E+01	474	350	168	125	43
P.A. 8	0,0069	0,41	0,58	9,56E+00	456	348	186	108	79
P.A. 9	0,0069	0,41	0,60	-1,11E+01	454	353	171	101	70
P.A. 10	0,0065	0,44	0,53	3,05E+01	418	346	206	72	134
P.A. 11	0,0065	0,44	0,60	-3,16E+01	462	350	175	112	63

Para conhecer o comportamento das misturas, um dado de grande relevância é o volume de vazios entre os agregados, espaço que idealmente seria ocupado pela pasta. Este dado é importante para saber se a quantidade de pasta que está presente na mistura ocupa somente o espaço entre os vazios, ou está aumentando a distância de separação entre os agregados.

Os valores negativos encontrados para MPT e Vexp significam que falta pasta nos poros deixados entre as partículas. Os valores positivos de MPT foram os maiores encontrados para Vexp. Há uma grande coerência entre as duas formas de cálculo de excesso de pasta.

Ao se comparar a fração esperada de poros das composições, nota-se que o P.A. 2 (42% de pedrisco e 58% de areia) é a amostra que apresenta o menor PFr (0,40) dentre todas composições estudadas, sendo também a de menor volume de vazios 41,32 %, com volume teórico para preenchimento com pasta de 127 cm³.

É preciso salientar que PFr é calculado com base na distribuição granulométrica dos agregados, enquanto o volume de vazios é calculado com base no volume aparente das composições. Dentre as amostras, a menos empacotada é a composição P.A.1 (58% de pedrisco e 42% de areia) espelho da P.A.2, é a que apresenta maior PFr (51%), porém, em termos de volume de vazios a maior é a P.A.3 (45,18%).

O volume teórico para preenchimento com pasta em P.A.1 é de 148 cm³ e para P.A.6 é de 122 cm³. As amostras P.A. 3, P.A. 4, P.A. 5, P.A. 10, P.A. 11, P.A. 6 e P.A. 7, P.A. 8 e a P.A. 9 apresentam a mesma relação pedrisco:areia, ou seja, o mesmo valor de PFr e volume de vazio com valores muito próximos.

Porém, composições com diferentes frações volumétricas de sólidos, devido as adições de cimento e filer, além da fração de finos dos agregados sofreram alterações.

O maior valor de MPT e de V_{exp} foi encontrado para a amostra P.A 3, que apresenta o maior teor de filer, o que resultou em um aumento da distância de separação entre as partículas. Apenas pequenas concentrações de filer podem ser incorporadas aos poros resultantes do máximo empacotamento de partículas na faixa estudada, tal como acontece na composição P.A. 11 com fração de poros de 44%.

4.7 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

Após a determinação da quantidade de água de amassamento para este concreto seco do planejamento A e a realização dos estudos sobre o excesso de pasta, foram executados e avaliados os resultados de resistência à compressão axial e diametral, conforme Tabela 26.

Tabela 26 – Resumo dos resultados de compressão axial e diametral, para as idades de 7 e 28 dias. Fonte: Autoria própria

Nº da amostra	Relação cimento: agregados + filer	7 Dias		28 Dias	
		Compressão Axial (MPa)	Compressão Diametral (MPa)	Compressão Axial (MPa)	Compressão Diametral (MPa)
P.A. 1	1:19	2,16	0,36	2,92	0,52
P.A. 2	1:19	1,81	0,32	2,51	0,47
P.A. 3	1:19	2,00	0,31	2,24	0,11
P.A. 4	1:4	15,75	1,98	16,41	1,81
P.A. 5	1:19	1,82	0,35	2,13	0,46
P.A. 6	1:19	1,73	0,27	2,37	0,39
P.A. 7	1:7	9,63	1,27	13,25	1,44
P.A. 8	1:19	1,94	0,28	2,33	0,45
P.A. 9	1:7	10,07	1,27	13,06	1,39
P.A. 10	1:7	8,68	1,08	10,91	1,46
P.A. 11	1:10,43	4,70	0,72	6,05	0,96

Esses resultados foram analisados quanto a importância relativa dos insumos, como pode ser visto no gráfico de Pareto da Figura 47, sendo a maior influência pela

resistência mecânicas à compressão do cimento. Cabe salientar que para cada resultado alcançado foram moldados 6 corpos de prova e então realizada a média.

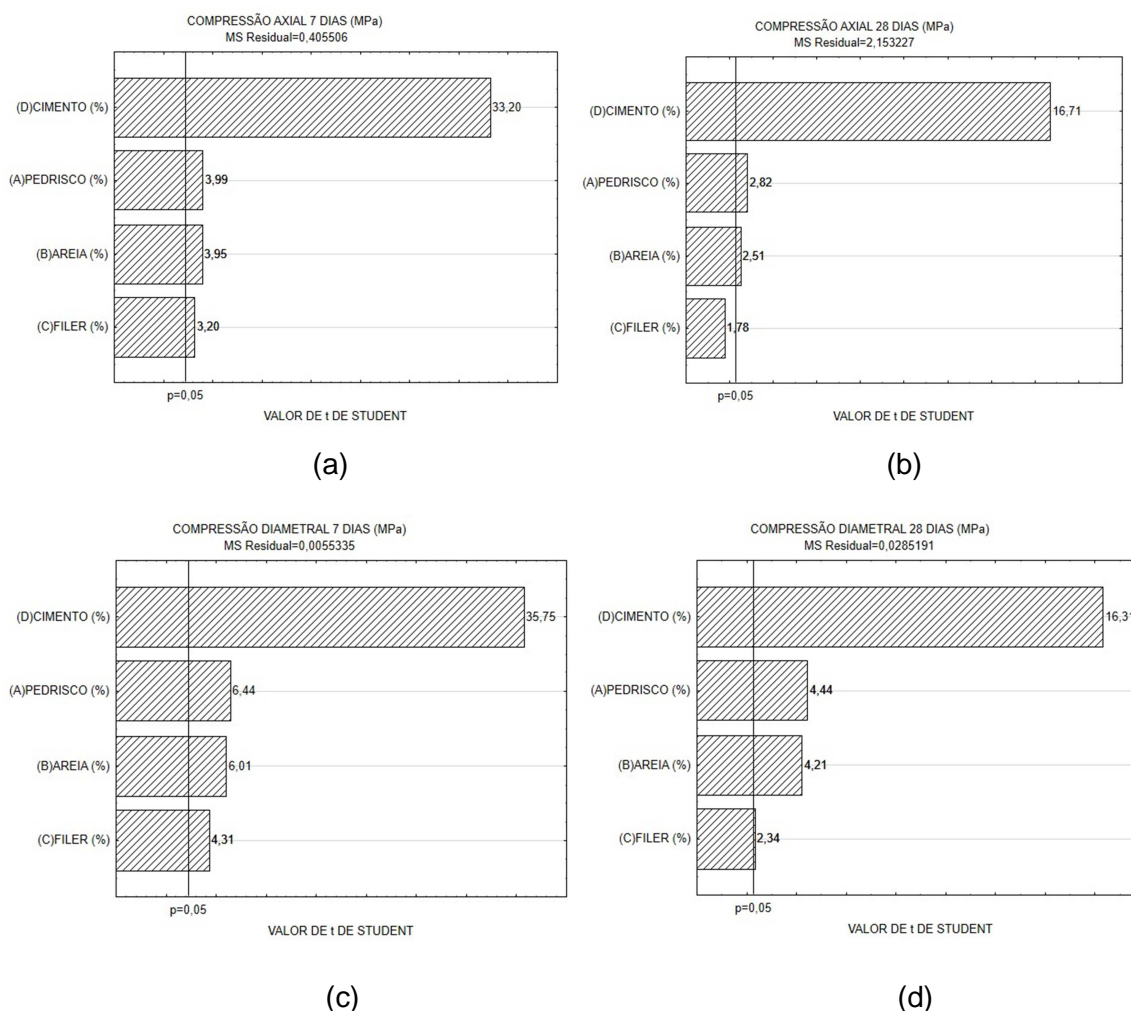


Figura 47 - Influência dos insumos na compressão: (a) axial aos 7 dias (MPa), (b) axial aos 28 dias (MPa), (c) diametral aos 7 dias (MPa) e (e) diametral aos 28 dias (MPa). Fonte: Autoria própria

O pedrisco e a areia apresentam pouca influência, sendo praticamente iguais e muito abaixo do cimento. Este comportamento complementa o diagnóstico inicial em relação ao empacotamento de partículas entre os agregados, mostrando que independentemente do empacotamento existente as massas unitárias eram muito próximas. Portanto, não influenciam em ganho ou perda de resistência para o concreto seco, obtido com agregados reciclados.

O filer é o insumo que menos influencia nas resistências à compressão deste concreto seco, e, portanto, a sua utilização, com parcimônia pode contribuir no empacotamento e reduzir o consumo de cimento.

O cimento utilizado (CPV- ARI), garante um elevado ganho de resistência nas idades iniciais do concreto (7 dias), situação que fica evidenciada ao se analisar as maiores resistências até esta idade.

Os únicos casos em que ocorreu perda de resistência foram para as amostras 3 e 4, no ensaio de compressão diametral. Concluiu-se que para o ensaio da amostra 3, os desvios padrão foram de 0,027 MPa e 0,006 MPa, para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente. Tal indício indica que não houve falha durante a moldagem dos corpos de prova, visto que para a idade de 28 dias, este foi o menor desvio padrão constado. Uma possibilidade foi a do filer deixar de ter influência na resistência, Figura 47 (b) e (d), visto que a amostra 3 apresenta a maior quantidade de filer, e portanto de água, dentre todas as amostras para 28 dias.

No caso da amostra 4, verificou-se que dois dos seis corpos de prova rompidos na idade de 28 dias, apresentaram resistências baixas, 1,08 MPa e 1,50 MPa e, caso fossem descartados a média ficaria em 2,06 MPa. Acredita-se que deve ter ocorrido alguma falha na moldagem dos corpos de prova.

A amostra 4 foi a que apresentou maior resistência à compressão axial, pois teve o maior consumo de cimento.

Comparando e analisando os resultados por meio de curvas de nível das superfícies de resposta nas Figuras 48 até 51, verifica-se que a resistência aumenta de acordo com o consumo de cimento.

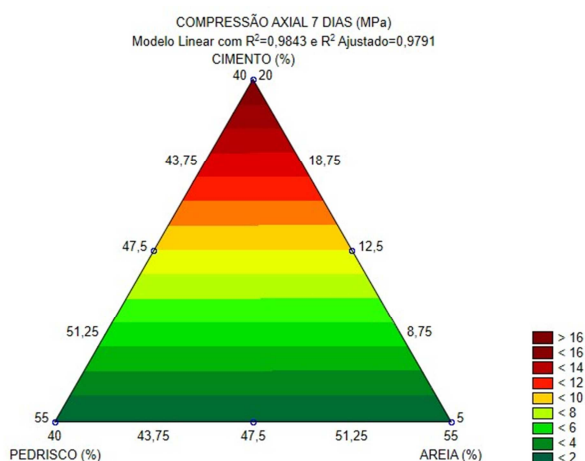


Figura 48 - Ensaio de compressão axial aos 7 dias. Fonte: Autoria própria

O pedrisco e a areia não influenciam com grandes reduções ou aumentos de resistência, reafirmando o que já havia sido constatado nos ensaios de massa

unitária e empacotamento de partículas. Ressalta-se desta análise que os agregados têm praticamente a mesma influência no ganho de resistência.

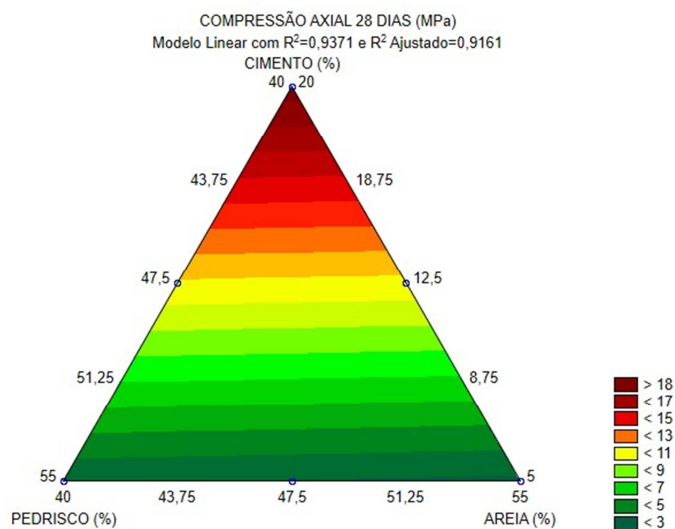


Figura 49 - Ensaio de compressão axial aos 28 dias. Fonte: Autoria própria

Apresentando a mesma tendência dos 7 dias, os agregados têm pouca influência nos resultados de compressão axial aos 28 dias.

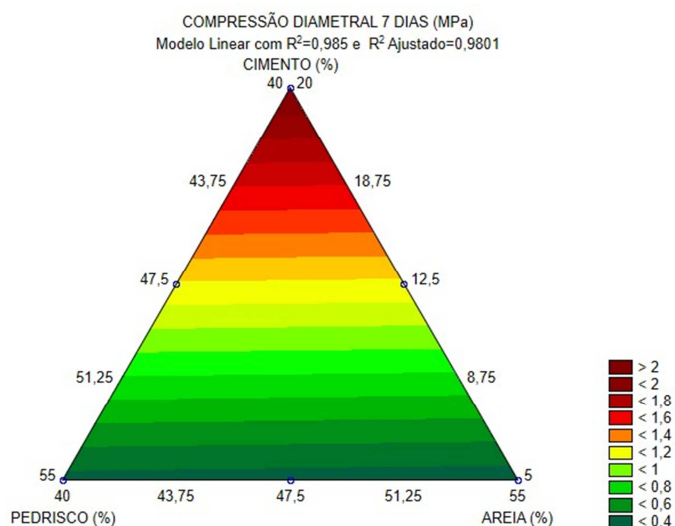


Figura 50 - Ensaio de compressão diametral aos 7 dias. Fonte: Autoria própria

Os resultados de compressão diametral aos 7 dias apresentam a mesma direção dos resultados anteriores, sendo o cimento o grande responsável pelo aumento das resistências e os agregados apresentando pouca influência.

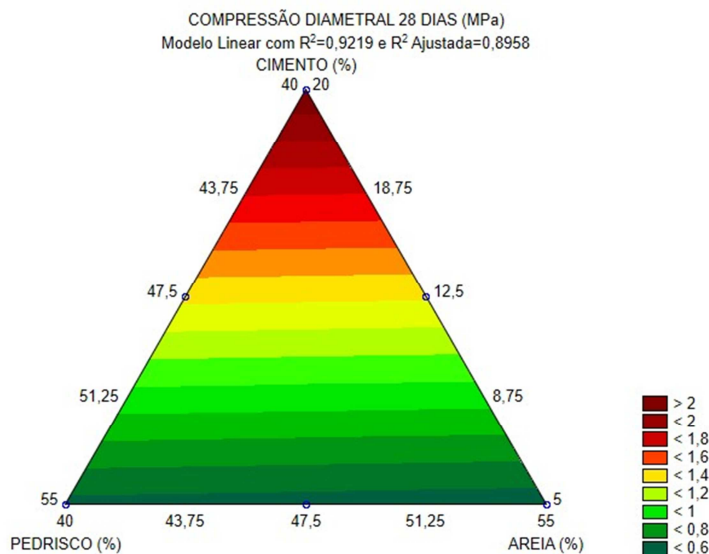


Figura 51 - Ensaio de compressão diametral aos 28 dias. Fonte: Autoria própria

Mantendo-se o filer constante e analisando a participação dos agregados e cimento, as curvas de nível das superfícies de resposta, mostram que somente o cimento influencia em ganhos de resistência à compressão axial e diametral, tanto aos 7 quanto aos 28 dias.

Nas curvas de nível das superfícies de resposta apresentadas nas Figuras 52 e 53, a quantidade de cimento foi fixada em 12,5%.

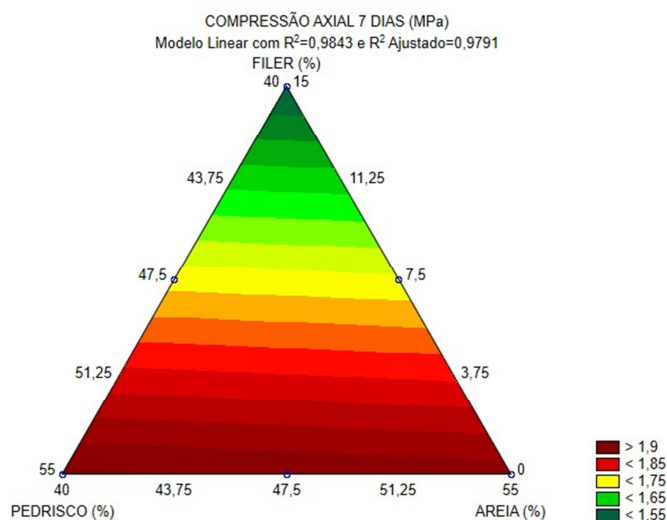


Figura 52 - Ensaio de compressão axial aos 7 dias. Fonte: Autoria própria

Em relação aos resultados de resistência à compressão axial aos 7 dias, o filer é o insumo que menos influencia no ganho de resistência, visto que, quanto

mais filer se usa nas misturas, maior o consumo de água de amassamento, maior o fator água:cimento e menor a resistência.

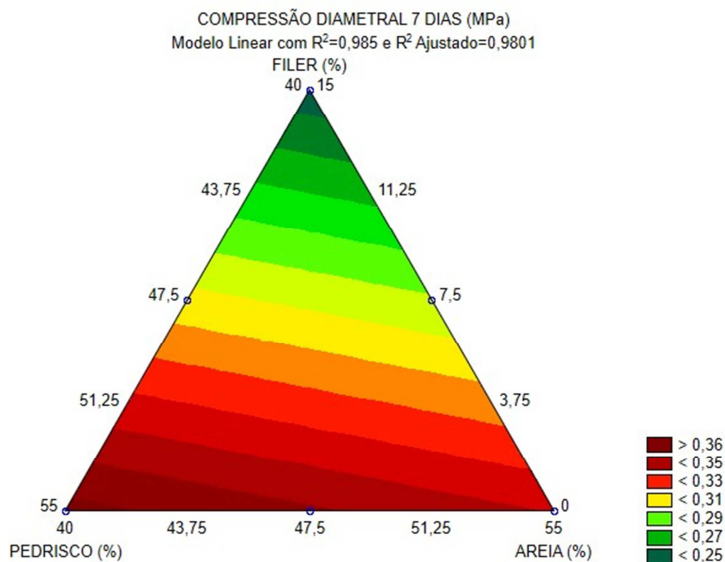


Figura 53 - Ensaio de compressão diametral aos 7 dias. Fonte: Autoria própria

Em relação a compressão diametral aos 7 dias o pedrisco é o maior responsável pelo ganho de resistências à compressão, sendo o filer o insumo que menos influencia neste quesito.

Conclui-se que, na faixa granulométrica estudada não houve alteração de resistência mecânica, sendo o fator preponderante a concentração de cimento.

4.7.1 Aplicação no setor industrial

Dentre os diversos objetivos na produção industrial de artefatos, certamente o desempenho mecânico à compressão é o preponderante.

As resistências à compressão diagnosticadas mostram que estes agregados podem ser utilizados na produção de concretos secos da indústria de artefatos de concreto. O Quadro 6 dispõe sobre as resistências alcançadas e para quais artefatos poderiam ser aplicadas.

Outro resultado que pode ser destacado é a possibilidade de trabalhar entre as faixas de 42% a 58% de pedrisco, sem o risco de comprometer as resistências à compressão, e, a empresa pode optar em estabelecer a dosagem entre areia e pedrisco de modo que resulte no menor custo

Caso seja necessário produzir artefatos de concreto que apresentem melhor acabamento superficial, pode optar-se em trabalhar na faixa com maior quantidade de areia RCC.

Quadro 6 – Resistência mecânica axial aos 7 dias e aplicação na indústria
Fonte: Autoria própria

Nº da amostra	Relação cimento: agregados + filler	Consumo de cimento (kg/m ³)	7 Dias Compressão Axial (MPa)	Aplicações
4	1:4	350,0	15,75	Blocos de concreto classe A.
7	1:7	222,0	9,63	Blocos de concreto classe A.
9	1:7	219,0	10,07	Blocos de concreto classe A.
10	1:7	210,0	8,68	Blocos de concreto classe A.
11	1:10,43	150,0	4,70	Blocos de concreto classes B e C.

Muitos dos artefatos que são produzidos na Indústria não têm referências normativas, ficando ao fabricante a tomada de decisão quanto às resistências dos concretos. Diversos produtos pesquisados se enquadram dentro das resistências alcançadas, tais como, canaleta inteira, meia canaleta, calhas, etc., mas são artefatos sem normalização específica. Cabe-se salientar que o Quadro 6 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 7 dias, idade na qual os artefatos já são comercializados. Na análise dos resultados devem-se levar em consideração as relações cimento:agregados, o consumo de cimento por metro cubico de concreto, e a resistência à compressão axial.

O quadro 7 mostra as exigências da NBR 6136 (ABNT, 2016) - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria.

Quadro 7 – NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria
Fonte: (ABNT, 2016)

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (Mpa)
Com função estrutural	A	$F_{bk} \geq 8,0$
	B	$4,0 \leq F_{bk} < 8,0$
Com ou sem função estrutural	C	$F_{bk} \geq 3,0$

4.8 ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Na Tabela 27 constam os valores médios de massa específica e absorção de água para os corpos de prova do planejamento A após 7 e 28 dias.

Tabela 27 - Resumo dos resultados de massa específica e absorção dos corpos de prova do P.A. Fonte: Autoria própria

Nº da amostra	7 dias			28 dias		
	Massa específica - Condição saturado superfície seca (g/cm ³)	Pesagem CPs- Condição seco em estufa (g/cm ³)	Absorção (%)	Massa específica - Condição saturado superfície seca (g/cm ³)	Massa específica- Condição seco em estufa (g/cm ³)	Absorção (%)
P.A. 1	2,20	1,93	14,41	2,22	1,93	14,57
P.A. 2	2,19	1,90	15,24	2,20	1,91	15,49
P.A. 3	2,13	1,78	19,56	2,15	1,81	18,98
P.A. 4	2,22	1,95	13,78	2,24	1,95	14,72
P.A. 5	2,21	1,92	14,79	2,19	1,90	15,68
P.A. 6	2,17	1,85	17,13	2,20	1,90	16,24
P.A. 7	2,22	1,94	14,24	2,23	1,96	13,64
P.A. 8	2,16	1,82	18,20	2,17	1,85	17,19
P.A. 9	2,20	1,92	14,66	2,20	1,93	13,96
P.A. 10	2,18	1,87	17,08	2,20	1,90	15,58
P.A. 11	2,18	1,88	16,08	2,18	1,88	16,28

Ao analisar os valores da Tabela 27 constata-se que os menores valores de massa específica e os maiores valores de absorção de água ocorreram nas amostras 3, 6, 8, 10 e 11, ou seja, nas amostras em que foram utilizados o filer. As amostras 4 e 7 apresentaram a maior massa específica tanto aos 7 dias, quanto aos 28 dias, e são as que têm as maiores proporções de cimento dentre as amostras analisadas.

O gráfico de Pareto, na Figura 54, mostra a influência dos insumos na massa específica aos 7 dias.

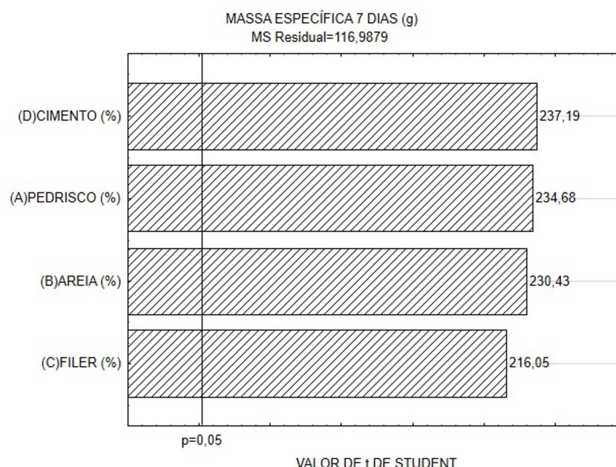


Figura 54 – Influência dos insumos na massa específica aos 7 dias
Fonte: Autoria própria

O filer é o insumo que tem menos influência no ganho de massa específica, sendo que os outros três materiais apresentam uma influência similar.

As curvas de nível das superfícies de resposta das Figuras 55 e 56 mostram o comportamento dos insumos para as composições que apresentavam 7,5% de filer e 12,5% de cimento, respectivamente.

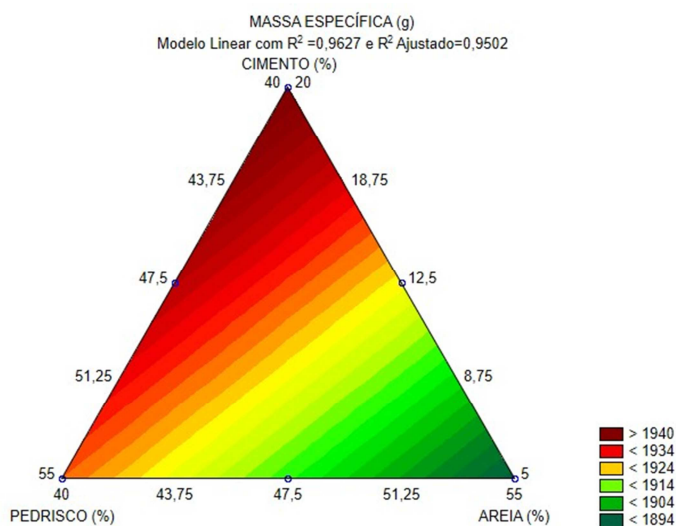


Figura 55 - Resultados do ensaio de massa específica. Fonte: Autoria própria

A massa específica aumenta à medida que são incorporadas maiores quantidades de cimento e diminuem a medida que se incorpora maiores quantidades de filer.

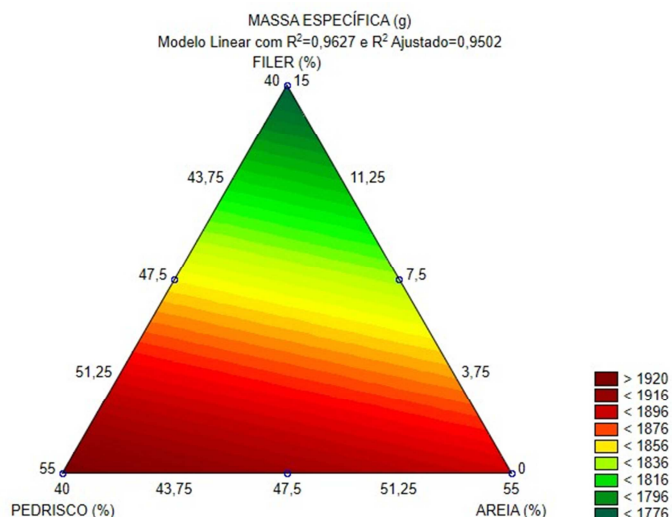


Figura 56 - Resultados do ensaio de massa específica. Fonte: Autoria própria

A massa específica do concreto seco em estudo, depende do empacotamento do sistema, quanto mais filer é colocado mais água é necessária e, portanto, maior a absorção de água. Os agregados apresentam um comportamento similar, sendo que o pedrisco tem uma influência menor na redução da massa específica.

Os gráficos de Pareto nas Figuras 57 e 58 mostram a importância relativa dos insumos na absorção de água do concreto seco, a qual é recíproca da massa específica, tanto nas idades de 7 quanto aos 28 dias. Os concretos secos com adição de filer apresentaram uma maior absorção de água, indicando que este material, induz a um aumento da porosidade. Cabe salientar que a influência do cimento, da areia e do pedrisco são similares, neste quesito.

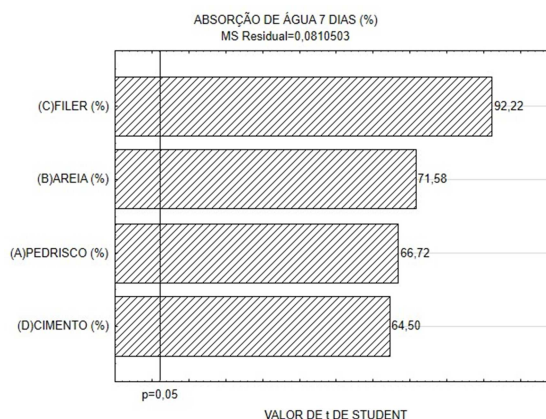


Figura 57 - Influência dos insumos na absorção de água aos 7 dias
Fonte: Autoria própria

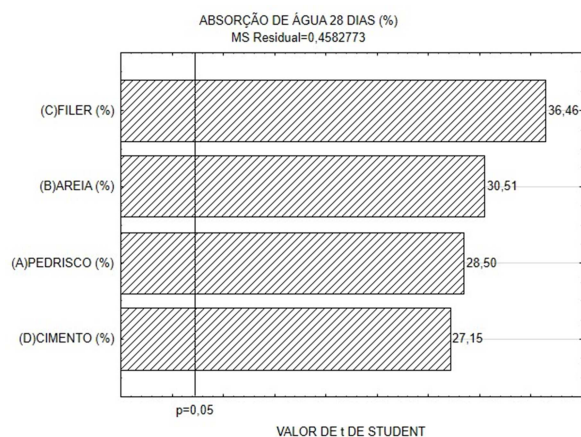


Figura 58 - Influência dos insumos na absorção de água aos 28 dias
Fonte: Autoria própria

A areia é o agregado que mais influenciou o concreto, nos valores de absorção de água. Um dos principais motivos é devido aos quase 15% de materiais pulverulentos presentes na mesma, situação que acarreta uma maior demanda de água de amassamento e, portanto, quando essa água é eliminada do concreto, ficam os poros. As curvas de nível da superfície de resposta para as composições que apresentam 12,5% de cimento CPV-ARI estão na Figura. 59 e destaca a influência do filer entre os insumos. Para essas composições o pedrisco é o insumo que menos tem influencia na absorção de água aos 7 dias. Comparado aos outros materiais constituintes deste concreto seco, é o material que apresenta menos finos em sua composição.

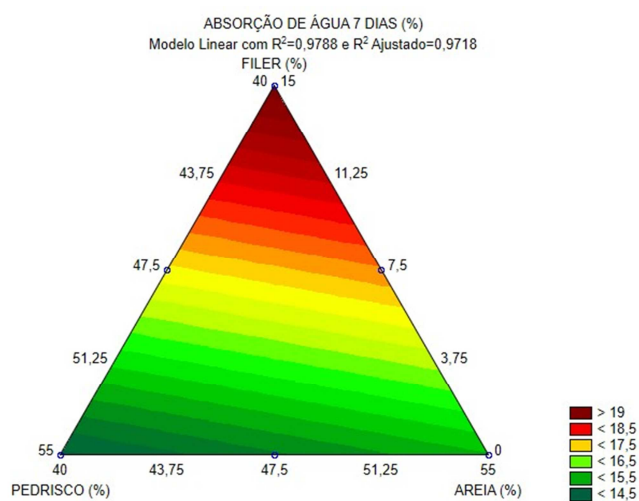


Figura 59 - Resultados do ensaio absorção de água aos 7 dias
Fonte: Autoria própria

Para as composições com 7,5% de filer, Figura 60, o cimento é o insumo que menos influencia na quantidade de água absorvida após a execução do concreto seco.

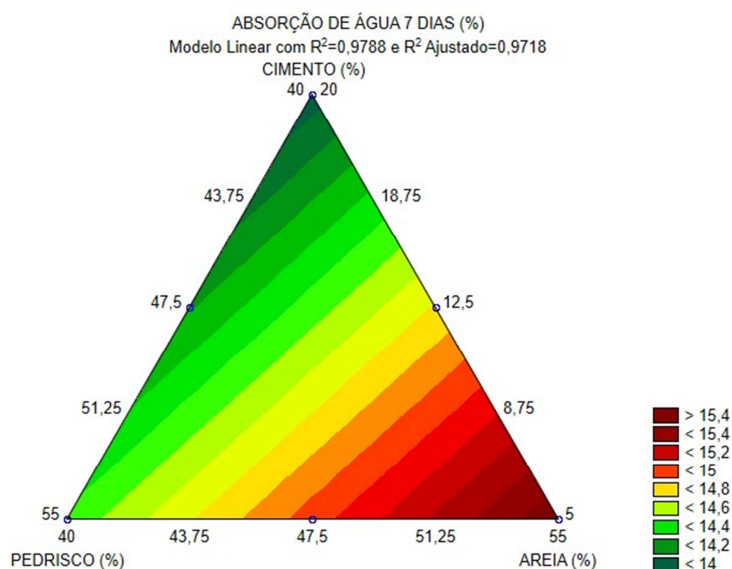


Figura 60 - Resultados do ensaio absorção de água aos 7 dias
Fonte: Autoria própria

Em relação aos finos dos agregados a areia é o material que mais apresenta finos, com 22% em massa do material com tamanho de partícula menor que 0,150 mm, como já havia sido estipulado no ensaio de caracterização, contra 9% do pedrisco.

4.9 DISCUSSÃO GERAL

Entre os dois lotes de agregados estudados inicialmente, optou-se por utilizar o lote B, visto que o pedrisco deste lote apresentava maior quantidade de fração graúda, maior massa unitária, menor absorção de água e sua composição era classificada de ARC (agregado de resíduo de concreto), todas características comparativamente superiores ao do lote A. Como ainda seria utilizado agregado miúdo e mais um filer na continuidade dos estudos, considerou-se que o excesso de miúdos e a falta de graúdos, comprometeria o empacotamento.

O filer consistiu de um resíduo oriundo de processo industrial com massa específica de $2,52 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária de $0,77 \text{ g/cm}^3$.

Após a realização dos ensaios de volume aparente e massa unitária na proveta, nas amostras totais e sem o passante pela peneira 0,150 mm, dos três planejamentos experimentais, constatou-se uma diferença de 0,09 g/cm³ entre os melhores resultados e também entre os piores resultados, das duas condições. Isto prova que retirar o material mais fino, representa uma diferença próxima de 6,0% na massa unitária. Aplicando esta situação a uma indústria, com foco no quesito massa unitária, não haveria necessidade de retirar o material passante pela peneira 0,150 mm, pois isto acarretaria em um aumento no volume aparente das amostras e, portanto, poderia acarretar em um empacotamento menos eficaz.

Também foi constatado no ensaio da proveta, que os maiores volumes de vazios e menores massas unitárias estão concentradas na faixa acima de 80% de pedrisco, e que os menores vazios e maiores massas unitárias se concentram na faixa entre 42% e 67%, sendo que nas composições com 42% e 58% esta tendência é mais evidente. Assim, a opção de utilizar o P.C. foi excluída.

Ao se comparar os resultados de distribuição dos três planejamentos experimentais utilizando o modelo teórico de Alfred e Andreasen, observa-se que as composições mais próximas desta curva são P.A. 2 (42% de pedrisco), P.A. 8 (46% de pedrisco) e P.A. 3 (50% de pedrisco), resultando nos melhores empacotamentos estudados. Fica evidente também que o aumento de pedrisco nas composições acarreta redução no empacotamento.

Entre a composição P.A. 2 (42% de pedrisco) e as composições P.A 6 e P.A 7 (54% de pedrisco) há um encontro entre as curvas dos módulos superior e inferior, o que indica o preenchimento desta faixa granulométrica pela areia. Assim, se fosse analisado somente o módulo de distribuição total, pode-se concluir que o P.A. 2 apresenta o melhor empacotamento.

O comportamento do planejamento experimental sem o passante na peneira 0,150 mm, mostra-se similar aos planejamentos com amostras totais. O P.A. 2 (42% de pedrisco), P.A. 8 e P.A. 9 (46% de pedrisco), são os planejamentos com melhor módulo de distribuição total, sendo iguais a 0,39.

Baseado nas discussões feitas no estudo de empacotamento de partículas, optou-se pelo planejamento A para confecção dos corpos de prova.

No ensaio de determinação de água pelo consistômetro de Vebe, que foi realizado somente no planejamento A, constatou-se um alto consumo de água para

concretos de consistência seca (*slump* zero), sendo que o maior consumo foi para o P.A. 3 com um Fa/c de 2,52 e o menor consumo para o P.A. 4 com um Fa/c de 0,58.

Em todas as amostras ensaiadas, a quantidade de água utilizada para dar trabalhabilidade à mistura acarretou em teores de umidade maiores que 8%, situação que justificaria o uso de aditivos ou então a utilização de um Vebe modificado. Este teor de umidade é elevado e descaracteriza o concreto como seco, mesmo apresentando *slump* 0.

Quanto ao estudo teórico de volume de excesso de pasta percebe-se que o maior valor de MPT e de V_{exp} foi encontrado para a amostra P.A. 3, que apresenta o maior teor de filer, que levou a um aumento da distância entre partículas. Apenas pequenas concentrações de filer podem ser incorporadas aos poros deixados pelo máximo empacotamento de partículas na faixa estudada, tal como acontece na composição P.A. 11 com fração de poros igual a 60.

O P.A. 4 amostra com relação cimento:agregado de 1:4, apresentou a maior resistência mecânica à compressão axial, 15,75 MPa aos 7 dias e 16,41 MPa aos 28 dias. Contudo, para as amostras com relação cimento:agregado de 1:19, apresentaram as menores resistências à compressão.

Utilizando gráficos com curvas de nível da superfície de resposta constatou-se que o cimento é o grande responsável pelo aumento das resistências à compressão axial e diametral nos corpos de prova, sendo que o pedrisco é o segundo insumo que mais influenciou, a areia o terceiro e o filer o quarto. Conforme os dados, o empacotamento entre os agregados não teve grande interferência no aumento ou perda de resistência, sendo que quando se utiliza o filer, a tendência é diminuí-la, pois as composições que apresentaram este filer consumiram maior quantidade de água de amassamento.

Ao analisar a massa específica do concreto seco, utilizando gráficos com curvas de nível da superfície de resposta, o cimento é o insumo que mais influencia no aumento da massa específica, sendo o filer o insumo que causa maior perda da mesma.

O filer utilizado nesta pesquisa influenciou negativamente todas as características do concreto seco, sendo o maior responsável pelo consumo da água de amassamento, perda de resistência, perda de massa específica e maior absorção de água.

Isto explica os resultados em que os concretos feitos com filer apresentaram as menores massas específicas e também as maiores absorções de água. Em relação aos agregados, o pedrisco apresenta uma influência maior no ganho de massa específica.

Após a tabulação e discussão sobre os resultados de resistência mecânica à compressão axial e diametral, massa específica e absorção de água, a montagem dos gráficos de superfície de resposta e de Pareto, além da correlação destes com os resultados de empacotamento de partículas e volume teórico de pasta, traçou-se um perfil para o comportamento deste concreto seco, com utilização de agregados de RCC e resíduo industrial.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se por meio desta pesquisa:

- Sobre os ensaios de massa unitária na proveta:
 - na realização dos ensaios de massa unitária na proveta, as amostras em que foram retirados os finos não apresentaram melhora no empacotamento;
 - as menores massas unitárias estão concentradas na faixa acima de 80% de pedrisco;
 - as maiores massas unitárias entre os agregados se concentram na faixa entre 42% e 58%;
- Sobre o estudo dos módulos de distribuição baseado nos modelos de Alfred e Andreasen:
 - as composições que apresentam os melhores empacotamentos estão concentradas no planejamento A;
 - o aumento de pedrisco nas composições acarreta redução no empacotamento;
 - analisando somente o módulo de distribuição total, o P.A. 2 apresentou o melhor empacotamento;
 - o comportamento dos planejamentos experimentais sem o passante na peneira 0,150 mm, mostrou-se similar ao dos planejamentos com amostras totais;
- Baseado nas discussões feitas no estudo de empacotamento de partículas, optou-se pelo planejamento A para determinação de água de amassamento e confecção dos corpos de prova;
- Sobre a determinação de água pelo consistômetro de Vebe:
 - constatou-se um alto consumo de água para todas as amostras, acarretando em teores de umidade maiores que 8%;
 - mesmo apresentando *slump* zero, os concretos não são considerados concreto seco;
- Quanto ao estudo teórico de volume de pasta:

- o maior valor de MPT e de V_{exp} foi encontrado para a amostra P.A. 3, que apresenta o maior teor de filer, que levou a um aumento da distância entre partículas;
- apenas pequenas concentrações de filer podem ser incorporadas aos poros deixados pelo máximo empacotamento de partículas;
- Sobre as resistências à compressão:
 - o cimento é o grande responsável pelo aumento das resistências à compressão axial e diametral nos corpos de prova;
 - o pedrisco é o segundo insumo que mais influenciou, seguido da areia;
 - o empacotamento entre os agregados não teve grande interferência no aumento ou perda de resistência;
 - quando se utiliza o filer, a tendência é diminuí-la;
- Sobre a massa específica do concreto:
 - o cimento é o insumo que mais influencia no aumento da massa específica;
 - o filer é o insumo que causa maior perda da mesma;
- Aplicação na indústria:
 - as resistências à compressão diagnosticadas mostram que os agregados e concretos estudados podem ser utilizados na produção de concretos da indústria de artefatos, tais como, blocos de concreto tipo A, B e C, canaleta inteira, meia canaleta, calhas, etc.
 - a possibilidade de trabalhar entre as faixas de 42% a 58% dos agregados, garante à empresa a possibilidade de escolher o agregado mais barato, sem o risco de comprometer as resistências à compressão, e, caso seja necessário produzir artefatos de concreto que apresentem melhor acabamento superficial, pode optar-se em trabalhar na faixa com maior quantidade de areia RCC.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros:

- ao utilizar o Vebe para mensurar a trabalhabilidade em concretos secos, compostos de agregados reciclados, usar aditivo dispersante e/ou defloculante para reduzir a quantidade de água;
- modificar o consistômetro de Vebe, conforme descrito por Juvas (1994), uma carga concentrada de 20,0 kg no disco transparente;
- nos ensaios de massa unitária pela proveta, aplicar o mesmo método, mas em recipientes de tamanhos diferentes e realizar comparações estatísticas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15.116 - **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004. 12 p.

_____.NBR NM 26 - **Agregados – Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009. 10 p

_____.NBR NM 30 - **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001. 10 p.

_____.NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.8 p.

_____.NBR NM 46 - **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

_____.NBR NM 52 - **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009. 16 p.

_____.NBR NM 53 - **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009. 18 p.

_____.NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

_____. NBR 5739 - **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

_____. NBR 6136 - **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria**. Rio de Janeiro, 2014. 10 p.

_____. NBR 7222 - **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

_____.NBR 9.062– **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 9778 - **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005. Versão Corrigida 2:2009. 4 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete**. ACI 211.3R, Farmington *Hills*, 2002.

Disponível em: <http://www.icie.ir/files/filebox/211.3r_02.pdf>. Acesso em: 20/09/2016

ANEEL – **Periódico sobre fontes renováveis, energias hidráulicas.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 12/11/2015

ANGULO, S.C. - **Resíduos: atualizada Resolução do Conama.** 2012. Disponível em: <<http://www.angulo.com.br/rcc/imprensa/construmail-residuos-2011-2012.pdf>>. Acesso em: 07/09/2014

BAKOSS, S.L; RAVINDRARAJAH, R.S. - **Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities.** ScopingReport.Sydney, 1999. 72 p. Centre for Built Infrastructure Research.University of Technology, Sydney.

BARTOS, P.J.M., SONEBI, M., TAMIMI, A.K. **Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests.** Cachan Cedex, France: RILEM, 2002.

BITTENCORT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e areia de fundição.** 2012, 125 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Inovação) - Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012

BORJA, E.V; AGUIAR, S.P; ANJOS, M.A. S; FARIAS, E.C; MORAIS, M.L.V.N; SOUZA, N.S.L. - **Análise física de concretos autoadensáveis no estado fresco com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim.** IX Congresso de iniciação científica da UFRN.

BUTTLER, A.M.; CORREA, M.R.S.; RAMALHO, M.A. - **Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto.** São Paulo. Revista Concreto, n.37,2005 p.24-27.

CABRAL, A.E.B. - **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCC.** Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-21102007-164548/pt-br.php>>. Acesso em: 25/04/2016

CAVALCANTI, D.K.C. - **Políticas para reciclagem de resíduos da construção civil.** Disponível em: <<http://www.geocities/politicasparareciclagemderesiduosdaconstruocivil.htm>>. Acesso em: 25/04/2016

CEMPRE. - **Política Nacional de Resíduos Sólidos: agora é lei novos desafios para poder público, empresas, catadores e população.** São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/download/pnrs_002.pdf>. Acesso em: 25/04/2016

CHAVES, A.; ÂNGULO, S.; ALMEIDA, S.; LIMA, F.; JOHN, V. - **Tecnologia mineral e suas aplicações na reciclagem de resíduos de construção e demolições.** CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2006

CIMENTO ITAMBÉ. **Resumo das especificações da ABNT.**

Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/itambe-2016/_assets/pdf/especificacoes_abnt.pdf>. Acesso em: 25/11/2016

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n° 307, de 05 de julho de 2002: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17/07 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA n° 448, de 18 de janeiro de 2012: Altera os arts. 2o, 4o, 5o, 6o, 8o, 9o, 10, 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19/01/2012.

DINGER, D.; FUNK, J. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions - Applied to Ceramic Manufacturing.** Kluwer Academic Publishers, Boston, EUA (1994).

DINGER, D.R. **Particle Calculations for Ceramists.** Dinger Ceramic Consulting Services, 2001. 116 p. Disponível em: <<https://www.amazon.com/Particle-Calculations-Ceramists-Dennis-Dinger/dp/0971569606>>. Acesso em: 25/08/2016

EFFTING, C. - **Apostila de caracterização de agregados.** Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carneane/materiais/APOSTILA__E_SAIOS__TECNOLOGICOS_AGREGADOS_2013_1__4_.pdf>. Acesso em: 25/04/2016

FERNANDES, I. D. **Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade.** 4. Ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2013. 200 p.

FIGUEIREDO, S. D. R. **Estudos de caracterização e da composição de betões leves vibrocomprimidos usados em artefactos de betão.** Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

FORQUIN, P., PIOTROWSKA, E., GARY,G. **Dynamic testing of concrete under high confined pressure. Influence of saturation ratio and aggregate size.** EPJ Web of Conferences Volume 94, DYMAT 2015 - 11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, 2015.

GLAVIND,M; HAUGAARD,M. **Future aspects for the use of recycled concrete aggregate in Denmark.** (Eds) Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 401-407. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/scuorca.27268.0035>>. Acesso em: 01/09/2016

GRAZIANO, F.P. - **Projeto e execução de estruturas de concreto armado.** São Paulo, Editora O Nome da Rosa/2005

HAZAREE, C. V.; CEYLAN, H.; TAYLOR, P.; GOPALAKRISHNAN, K.; WANG, K.; BEKTAS, F. **Use of Chemical Admixtures in Roller-Compacted Concrete for Pavements**. InTrans Project Reports. Paper 57, 2013. Disponível em: <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1066&context=intrans_reports>. Acesso em: 05/09/2016

HERMANN, A. **Empacotamento de agregados reciclados para concretos vibrocompactados**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UTFPR, 2016.

GENCEL, O., OZEL, C., KOKSAL, F., ERDOGMUS, E., MARTÍNEZ-BARRERA, G., BROSTOW, W. **Properties of concrete paving blocks made with waste marble**. J. Clean. Prod. 21, 62e70., 2012b.

HOORNAHAD, H.; KOENDERS, E.A.B. **A performance-based method for granular-paste mix design**. *9th International Masonry Conference 2014 in Guimarães*. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a67ac45e-69d6-4bdd-85a9-63749aca0517/?collection=research>>. Acesso em: 25/11/2016

HUANG, M. C. R. **Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete**. Cem. Concr. Compos. 45, 148–156, 2014

HUNGER, M.; BROUWERS, H. J. H.. **Flow analysis of water-powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor**. *Cement and Concrete Composites*, n. 31, 2009; p.39-59.

INSTITUTO ETHOS. - **Política Nacional e Resíduos Sólidos: desafios e oportunidades para as empresas**. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www3.ethos.org.br/wp-content/uploads/2012/08/Publica%C3%A7%C3%A3o-Residuos-Solidos_Desafios-e-Oportunidades_Web_30Ago12.pdf>. Acesso em: 07/09/2014

JALALI, S; TORGAL, F. - **Energia incorporada em materiais de construção versus energia operacional**. Revista Internacional Construlink, Nº 27 – JUN. 2011, VOL. 9. Portugal.

JUVAS, K. **Very dry precasting concrete**. Special concretes: workability and mixing, Paisley, Scotland, RILEM, 1994.

KISMI M.; SAINT-ARROMAN J.C.; MOUNANGA P. **Minimizing water dosage of superplasticized mortars and concretes for a given consistency**. Constr Build Mater.28 (2012) 747–758.

KLOSS, C. L. **Materiais para construção civil**. 2.ed., rev. e ampl. Curitiba, PR: Ed. CEFET-PR, 1996.

KOEHLER, E.P., FOWLER, D.W. **Summary of Concrete Workability Test Methods**, (ICAR Report 105.1). Austin, TX: International Center for Aggregates Research, 2003.

LING, T. C. **Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks**. Construction and Building Materials 28, 2011, pp. 164-175. ASTM C33/03, Standard Specification for Concrete Aggregate, Annual Books of ASTM Standards, USA, 2006.

LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. – **PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm#art55> Acesso em: 07/09/2014.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS.

MARCHIONI, M.L. - **Desenvolvimento de técnicas para caracterização do concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP. São Paulo, 2012.

MEDDAH, A., BEDDAR, M., BALI, A. **Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement**. J. Clean. Prod. 72, 187e192, 2014.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Rio de Janeiro, 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PUC - Rio de Janeiro, 2012. p. 201. Disponível em: <http://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0710938_2012_pretextual.pdf>. Acesso em: 02/09/2016

MEHTA, P.K. - **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, São Paulo/2008.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (prosopis juliflora) moldado sob pressão**. Universidade Federal de Pernambuco Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2014.

NORMA DNER-ME 194/98 – **Determinação da massa específica em agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman**. Rio de Janeiro, 1998. 4p.

NORMA DNIT 064. - **Pavimento rígido – determinação da consistência do concreto pelo consistômetro Vebe – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2004. 5 p.

NORMA DNER 084 – **Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro , 1995. 3p.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das Propriedades Reológicas de Materiais Cimentícios Associando o Conceito de Empacotamento de Partícula.** 2013. 142p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, UNESP. Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, I. R.; PILEGGI, R.G.; STUDART, A.; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas: Princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

ORTEGA, F.S; PILEGGI, R.G; SEPÚLVEDA, P; PANDOLFELLI, V.C. - **Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem.** Departamento de Engenharia de Materiais, DEMa-UFSCAR. São Carlos.

PARK, C., YOON, J.W., KIM, W.Y., WON, J.P. **Mechanical and Durability Performance of Roller-Compacted Concrete with Fly Ash for Dam Applications.** International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.1, No.1, pp. 57-61, 2007. Disponível em: <http://ocean.kisti.re.kr/downfile/volume/kci/E1CJBL/2007/v1n1/E1CJBL_2007_v1n1_57.pdf>. Acesso em: 01/09/2016

PETRUCCI, E. **Concreto de cimento Portland.** Editora Globo, 1978.

PIROLA, F. C. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50 MPa.** 2011. 164f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PRATAMA, M. M. A., WIDOANINDYAWATI, V. **Studi eksperimental pengaruh tegangan tekan selama proses produksi terhadap kuat tekan dry concrete.** Undergraduate Thesis, Diponegoro University, Semarang, Indonesia, 2014.

REZENDE, M.L.S., NASCIMENTO, J.W.B., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C. **Primary Kaolin Waste as Pozzolanic Material in Dry Concrete: Mechanical Properties and Resistance to Attack by Sulphates.** In: Scrivener K., Favier A. (eds) *Calcined Clays for Sustainable Concrete.* RILEM Bookseries, vol 10. Springer, Dordrecht, 2015

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Blocos de Concreto Para Alvenaria em Construções Industrializadas.** São Carlos, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde.../2007DO_JoseAmerico.pdf>. Acesso e: 15/09/2016

SANTOS, J.R. - **Betão com agregados grossos reciclados de betão.** São Paulo, SP. Revista Concreto, ISSN 1806-9673, IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, p.10-14.

SILVA, P. R. **Influência de adições minerais e aditivo impermeabilizante interno no desempenho de telhas protendidas pré-fabricadas em concreto.** Curitiba, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Parana. 182 p.

SILVA, R. B.; ÂNGULO, S. C.; PILEGGI, R. G.; SILVA, C. O. **Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade.** Ambiente Construído, v. 15, n. 4, p. 335-349, 2015.

TAVAKOLI, D., HEIDARI, A., PILEHROOD, S.H. **Properties of concrete made with waste clay brick as sand incorporating nano SiO₂.** Indian Journal of Science and Technology. 2014 Jan; 7(12): 1899–1905.

TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G.C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho.** Ibracon, 2011. Disponível em: < <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc53.pdf>>. Acesso em: 27/02/2016.

TUTIKIAN, B.F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland.** Ibracon, 2011. Disponível em: < <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>>. Acesso em 27/02/2016.