



DOSAGEM CIENTÍFICA DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO
AGREGADO MIÚDO DE RESÍDUO DE CONCRETO

Gabriella Puente de Andrade

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

Março de 2018

DOSAGEM CIENTÍFICA DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO
AGREGADO MIÚDO DE RESÍDUO DE CONCRETO

Gabriella Puente de Andrade

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.



Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, D. Sc.



Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D.Sc.



Dr. Marco Pepe, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Andrade, Gabriella Puente de

Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado miúdo de resíduo de concreto / Gabriella Puente de Andrade. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIX, 138 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 130-138.

1. RCD 2. Agregado miúdo reciclado de concreto 3. Dosagem científica 4. MEC 5. Durabilidade I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico à minha irmã, Bell

“E viu que a força é um detalhe, pra quem vive resistência”

Carol Dall Farras

AGRADECIMENTOS

Este estudo é fruto de uma trajetória de trabalho intenso, que não teria sido concretizado sem o apoio daqueles que trouxe na saudade e daqueles que cruzaram meu caminho ao longo destes dois últimos anos. Sendo assim, o sentimento de gratidão, torna-se maior que qualquer outro.

À Deus, que sempre me permitiu sentir Sua presença nos momentos de aflição e me carregou em Seus braços em todas as conquistas que tive até aqui, dedico minha mais profunda gratidão.

Ao meu orientador, Romildo, pela oportunidade, pela confiança, por me acompanhar pacientemente nesta jornada e me proporcionar tamanho crescimento.

Ao meu pai por ser meu maior exemplo de força de vontade, dedicação e pelos melhores conselhos que eu poderia ter. À minha mãe, digna de toda minha admiração, agradeço por me apoiar em quaisquer circunstâncias e por não deixar nada me abalar. Painho e mainha, obrigada por todo amor e carinho, sem vocês essa realização nunca seria possível.

Aos meus avós, Vera, Vilma e Elias, por serem tão presentes, pelos abraços apertados que me faziam esquecer que estava longe de casa, por me animarem nos momentos difíceis e comemorarem junto a mim todas as vitórias até aqui. À minha tia Zilda, pela preocupação a todo instante e aos meus tios, dinda, primas e Ceíça por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem.

À Adryano, por me alegrar e me consolar em todos os momentos, por ser atencioso, compreensivo e me mostrar que sou capaz de alcançar tudo aquilo que meu coração deseja. Agradeço também à Áurea, Asarias, Lucinha, Ayrlla, Ayrlon, Ayron e Adrícylla por sempre torcerem por mim e à Valentina pelo carinho e pelos melhores sorrisos.

Agradeço imensamente à melhor xará que já tive, Gabi (Poli), por compartilhar os melhores e piores momentos e por me acompanhar de mãos dadas nesta caminhada. Obrigada por sempre tomar decisões ruins, me incentivar a fazer o mesmo e depois me garantir que “vai ser ótimo”, você me ensinou a ter a perspectiva mais otimista possível das situações e vou levar isso comigo por toda vida. Eu não poderia ter desejado uma pessoa melhor para caminhar comigo, por isso agradeço por todas as escolhas que fizemos

até aqui, pois só me deixaram mais juntinho de você. Obrigada por dividir suas alegrias e tristezas, pela parceria e por acreditar em mim mais que eu mesma.

Às duas amigas que fiz no início dessa jornada, Ana e Halina, por todo suporte e pelas palavras de conforto e incentivo.

Ao Yassin, por me encorajar, por todos ensinamentos e infinita paciência comigo. À Vanessa, pelos aperreios compartilhados, pelo carinho e pela companhia. À Nath e Matias que em meio de tantas tribulações, estavam sempre me motivando. À Naty por me aturar do seu lado e deixar meu dia a dia mais leve. Ao Lucas por ser meu companheiro fiel na hora de espairer. À Yasmim, por estar comigo sempre que preciso. Agradeço também à Dani, Tamara e Ani pela disposição em ajudar e me fazerem seguir em frente nos momentos de dificuldade. À Carol e Mayara, por me receberam de braços abertos no grupo de RCD. Aos queridos amigos Iolanda, Raphael, Pedro, Rayane, Bruno, Renata, Alfredo, Giuseppe, Gabriel, Mônica, Amanda, Liuski, Vivian, Carol e Jéssica, que contribuíram de alguma forma para meu crescimento e alegraram meus dias.

À toda equipe NUMATS, especialmente Luzi, Dada, Alê, Alex, Marcelo, Anderson, Márcio, Hidekel, Claudinha e Dalva, por sempre estarem disposto a ajudar e apoio constante.

Ao meu afilhado, Lucas (meu maior presente de 2017), Rafel, Cella e Rodrigo, pelo carinho e por estarem comigo em todas as minhas conquistas. À Rachel, Babi, Manu, Alice, Camila, Lari, pelas orações, pela amizade e por acalmarem meu coração nos momentos de ansiedade. Ao meu amigo Zé, que, mesmo distante, se fez presente a todo momento. Aos incontáveis amigos que deixei em Recife, mas que sempre estiveram preocupados e foram fundamentais para que eu pudesse concluir esta etapa da minha vida.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E, por último, porém não menos importante, gostaria de agradecer à minha irmã, Bell. Ela que é minha maior inspiração, meu maior orgulho e quem me mostrou que o título de mestre não seria meu, e sim, de todos àqueles que represento, todos que não veem alguém igual a eles chegando até aqui. Todos nós que na pouca representatividade vemos um fio de esperança para alcançar nossos sonhos. Bell, obrigada por sempre me motivar e por fazer a voz de Rincon ecoar na minha cabeça todas as vezes que pensei em desistir: “Os preto é chave, abram os portões”.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DOSAGEM CIENTÍFICA DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO
AGREGADO MIÚDO DE RESÍDUO DE CONCRETO

Gabriella Puente de Andrade

Março/2018

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Estudos estão sendo realizados em todo o mundo visando o reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição (RCD). Tem recebido especial atenção dos pesquisadores a fração graúda dos agregados reciclados de concreto (ARC). Ocorre que ao se processar os resíduos de concreto para obtenção dos agregados graúdos, gera-se, dependendo da origem do resíduo, grande quantidade de agregado miúdo (AMRC). Como são escassos os estudos sobre o uso das AMRCs em concretos estruturais, o presente trabalho visa a dosagem científica de concretos de classes de resistência C30 e C60 contendo diferentes teores (0, 25% e 50%) de areia reciclada obtidas de concretos de diferentes origens. As fontes de resíduos de concreto para produção dos ARCs foram: (i) resíduo de concreto produzido em laboratório (*LAB*) e (ii) resíduo de concreto obtido de demolição (*D*). Para a dosagem dos concretos utilizou-se o Modelo de Empacotamento Compressível de partículas (MEC) que foi adaptado para que se levasse em consideração as diferentes capacidades de absorção de água dos AMRCs utilizados. Como os AMRCs possuem diferentes quantidade de pasta aderida na sua composição, determinou-se o volume de pasta através da imersão dos agregados em ácido e correlacionou-se esse volume com a densidade e absorção da água das partículas. Os concretos produzidos com AMRC, apresentaram propriedades mecânicas praticamente iguais aos concretos de referência. Absorção total e por capilaridade foram superiores para os concretos contendo Areia D (de maior absorção de água). A retração por secagem e a penetrabilidade de íons cloretos foram maiores para os concretos reciclados, sendo mais expressivo o acréscimo quanto maior o teor de AMRC nas misturas (principalmente da Areia D). O MEC mostrou-se adequado para a dosagem dos concretos contendo as diferentes AMRCs.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MIX DESIGN OF STRUCTURAL CONCRETE CONTAINING FINE RECYCLED
CONCRETE AGGREGATE

Gabriella Puente de Andrade

March/2018

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

Studies are being carried out around the world aiming at the reuse of construction and demolition waste (CDW). Special attention has been given by the researchers to the coarse fraction of recycled concrete aggregates (RCA). However, when the concrete residues are processed to obtain the coarse aggregates, a large amount of fine aggregate (FRCA) is generated depending on the origin of the residue. As the studies on the use of FRCAs in structural concrete are scarce, the present work aims the mix design of concrete of resistance classes C30 and C60 containing different levels (0, 25% and 50%) of recycled sand obtained from concretes of different origins. The sources of concrete residues for the production of RCAs were: (i) laboratory-produced concrete residue (LAB) and (ii) concrete residue obtained from demolition (D). For the mix design of the concretes the Compressible Particle Packing Model (CPM) was used and adapted to take into account the different water absorption capacities of the FRCAs used. As the FRCAs have different amount of attached paste in their composition, the paste volume was determined by immersion of the aggregates in acid and correlated that volume with the density and water absorption of the particles. The concretes produced with FRCA showed mechanical properties practically equal to the reference concretes. Total and capillary absorption were higher for concretes containing Sand D (higher water absorption). Drying shrinkage and chloride ions penetration were higher for recycled concrete, and the higher the AMRC content in the mixtures (mainly from Sand D), the more expressive the increase. The CPM showed to be quite adequate for the mix design of concrete containing different FRCAs.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Estrutura da Dissertação.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Impactos ambientais.....	7
2.2 Resíduo de Construção e Demolição (RCD).....	9
2.2.1 Definição, origem e classificação.....	9
2.2.2 Composição.....	11
2.2.3 Beneficiamento do resíduo.....	14
2.2.4 Propriedades do agregado reciclado.....	16
2.2.4.1 Absorção de água.....	16
2.2.4.2 Granulometria.....	18
2.2.4.3 Massa Específica.....	19
2.2.4.4 Pasta Aderida.....	20
2.2.5 Legislação no Brasil referente aos Resíduos de Construção e Demolição.....	21
2.2.5.1 Lei n° 12.305/10 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).....	21
2.2.5.2 Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).....	22
2.2.6 Normas e Especificações.....	23
2.3 Concretos Com Agregados Reciclados.....	25
2.3.1 Agregado Miúdo Reciclado em Concretos.....	27
2.3.2 Durabilidade e variação dimensional de concretos reciclados.....	29
2.3.2.1 Penetração acelerada de íons cloretos.....	29
2.3.2.2 Retração por secagem.....	30
2.4 Dosagem científica pelo Modelo de Empacotamento Compressível.....	31
2.4.1 Modelo de empacotamento virtual.....	32
2.4.1.1 Mistura binária.....	32
2.4.1.1.1 Mistura binária sem interação.....	32
2.4.1.1.2 Mistura binária com interação parcial.....	35
2.4.1.1.3 Mistura binária com interação total.....	36

2.4.2 Modelo de empacotamento real	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Programa Experimental	38
3.2 Produção do agregado reciclado	40
3.2.1 Propriedades dos concretos de origem	40
3.2.2 Beneficiamento do resíduo.....	40
3.2.3 Peneiramento da fração fina.....	42
3.2.4 Homogeneização do agregado reciclado.....	44
3.3 Métodos de ensaios	45
3.3.1 Composição granulométrica.....	45
3.3.2 Massa específica e absorção total.....	45
3.3.3 Compacidade.....	48
3.3.3.1 Agregados.....	48
3.3.4 Compatibilidade e ponto de saturação	51
3.3.5 Composição química do cimento	51
3.3.6 Resistência à compressão do cimento Portland.....	52
3.3.7 Pasta Aderida.....	52
3.3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	53
3.3.9 Calibração dos parâmetros “p” e “q”	53
3.3.10 Elevação adiabática de temperatura	56
3.3.11 Abatimento de tronco de cone.....	57
3.3.12 Resistência à compressão axial	57
3.3.13 Resistência à tração por compressão diametral.....	59
3.3.14 Absorção total, massa específica e índice de vazios	60
3.3.15 Absorção total de água por capilaridade	61
3.3.16 Retração por secagem.....	63
3.3.17 Penetração acelerada de íons cloreto.....	65
3.4 Caracterização dos Materiais	67
3.4.1 Cimento	67
3.4.2 Superplastificante	68
3.4.3 Água	69
3.4.4 Agregados.....	69
4 DOSAGEM CIENTÍFICA, PRODUÇÃO E CURA DOS CONCRETOS	78
4.1 Estudo da compensação da água de absorção do agregado miúdo reciclado no concreto.....	78

4.2 Dosagem com <i>Betonlab Pro 3</i>	83
4.3 Produção dos concretos	93
4.4 Metodologia de avaliação estatística dos resultados.....	95
5 ANÁLISE DE RESULTADOS	96
5.1 Abatimento de tronco de cone	96
5.2 Resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade	98
5.3 Resistência à tração por compressão diametral	109
5.4 Absorção total e massa específica.....	111
5.5 Absorção por capilaridade	113
5.6 Retração por secagem	118
5.7 Penetração acelerada de íons cloretos.....	125
6 CONCLUSÕES	127
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Hierarquia da disposição de resíduos de construção e demolição (PENG <i>et al.</i> , 1997).....	8
Figura 2.2 - Relação entre absorção de água e quantidade de argamassa aderida ao grão de concreto [HANSEN, 1992].....	20
Figura 2.3 – Evolução da compactidade virtual de uma mistura binária de esferas sem interação [FORMAGINI, 2005]	34
Figura 3.1 – Programa Experimental.....	39
Figura 3.2– Processo de beneficiamento [AMARIO (2018), adaptado]	41
Figura 3.3 – Frações granulométricas resultantes do processo de beneficiamento: (a) fração maior que 19mm; (b) Brita 1; (c) Brita 0; (d) Fração fina.....	42
Figura 3.4 – Peneirador mecânico e peneiras	43
Figura 3.5 – Material dividido em frações após um peneiramento: (a) Resíduo LAB; (b) Resíduo D;.....	43
Figura 3.6 – Homogeneização da areia reciclada: (a) Início do processo de homogeneização; (b)Distribuição do material na pilha.....	44
Figura 3.7 – Ensaio de absorção e massa específica do agregado miúdo: (a) Secagem do material; (b) Compactação da areia; (c) Areia saturada de superfície seca.....	47
Figura 3.8 - Posição do pistão no ensaio de compactidade experimental dos agregados: (a) posição do pistão antes vibração; (b) posição do pistão após a vibração;.....	49
Figura 3.9 – Ensaio de compactidade experimental dos agregados: (a) cilindro com material após vibração; (b) leitura da posição do pistão a partir do catetômetro;.....	49
Figura 3.10 – Ensaio de demanda d'água: (a) estado pendular; (b) estado funicular; (c) estado capilar;.....	50
Figura 3.11 – Ensaio de compatibilidade de ponto de saturação: (a) colocação da pasta no funil de Marsh; (b) processo de escoamento da pasta na proveta de 1000 ml;	51
Figura 3.12 – Ensaio para determinação do volume de pasta aderida: (a) agregado miúdo submerso em ácido clorídrico; (b) lavagem do agregado miúdo;	53
Figura 3.13 – Ensaio de elevação adiabática: (a) calorímetros adiabáticos; (b) recipiente com o concreto a ser ensaiado;.....	56
Figura 3.14 – Ensaio de abatimento de tronco de cone	57

Figura 3.15 – Ensaio resistência à compressão axial na prensa <i>Shimadzu</i> , modelo <i>UH-F250Kn</i>	58
Figura 3.16 – Ensaio resistência à tração por compressão diametral	60
Figura 3.17 – Ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica: (a) corpos de prova imersos em água; (b) processo de fervura;	61
Figura 3.18 – Ensaio de absorção total de água por capilaridade: (a) corpos de prova selados com filme plástico; (b) corpos de prova durante o ensaio de absorção por capilaridade;.....	62
Figura 3.19 – Curva típica de absorção total de água por capilaridade x raiz quadrada do tempo (BALTHAR, 2010).....	63
Figura 3.20 – Ensaio retração por secagem: (a) leitura do comprimento no relógio comparador; (b) pesagem do corpo de prova;	64
Figura 3.21 – Sistema para preparação da amostra do ensaio de penetração acelerada de íons cloreto	65
Figura 3.22 – Ensaio de penetração acelerada de íons cloreto: (a) amostra posicionada entre as células; (b) equipamento utilizado no ensaio de penetração acelerada de íons cloreto;	66
Figura 3.23– Cimento Portland CPV.....	67
Figura 3.24– Curva Granulométrica do Cimento Portland CPV.....	68
Figura 3.25 – Superplastificante Glenium 51	68
Figura 3.26– Ponto de saturação do superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI	69
Figura 3.27– Materiais utilizados: (a) Brita 0 Natural; (b) Areia Natural; (c) Areia LAB; (d) Areia D.....	70
Figura 3.28 – Resultado final do processo de beneficiamento	71
Figura 3.29– Curvas granulométricas dos agregados utilizados	72
Figura 3.30 – Ensaio de absorção em função do tempo: (a) curva completa da absorção total durante 24 horas de ensaio; (b) percentual de água absorvida pelos agregados nos 30 primeiros minutos de ensaio;	74
Figura 3.31 – Correlação entre: (a) absorção total dos agregados miúdos e o percentual de pasta aderida ao grão; (b) absorção total dos agregados miúdos e massa específica; 75	
Figura 3.32 – Imagens dos agregados miúdos geradas pelo microscópio eletrônico de varredura: (a) Areia Natural; (b) Areia LAB; (c) Areia D;	76

Figura 3.33 – Imagem ampliada da Areia LAB geradas pelo microscópio eletrônico de varredura.....	77
Figura 3.34 – Imagem ampliada da Areia D geradas pelo microscópio eletrônico de varredura.....	77
Figura 4.1– Elevação adiabática de temperatura no estudo da compensação de água de absorção dos agregados reciclados	81
Figura 4.2 – Resistência à compressão teórica aos 28 dias versus consumo de cimento para todas as dosagens	91
Figura 4.3 – Etapas da produção dos concretos: (a) lançamento dos agregados no misturador; (b) aspecto dos agregados com adição da metade da água; (c) mistura após homogeneização com o cimento; (d) mistura após oito minutos.	94
Figura 4.4 – Moldagem dos corpos de prova de concreto: (a) após colocação da primeira camada; (b) colocação da segunda camada de concreto para segunda etapa de vibração.	94
Figura 5.1 – Correlação entre o abatimento de tronco de cone obtido e o percentual de agregados reciclados em cada mistura.....	97
Figura 5.2 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C30 com 25% de substituição	98
Figura 5.3 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C30 com 50% de substituição	99
Figura 5.4 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C60 com 25% de substituição	99
Figura 5.5 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C60 com 50% de substituição	100
Figura 5.6 – Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C30 com 25% de substituição	102
Figura 5.7 – Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C30 com 50% de substituição	102
Figura 5.8– Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C60 com 25% de substituição	103
Figura 5.9 – Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C60 com 50% de substituição	103
Figura 5.10 - Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C30 com 25% de substituição	105

Figura 5.11 – Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C30 com 50% de substituição	105
Figura 5.12 – Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C60 com 25% de substituição	106
Figura 5.13 – Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C60 com 50% de substituição	106
Figura 5.14 – Correlação entre as resistências à compressão teórica do software <i>Betonlab Pro 3</i> e as obtidas experimentalmente	109
Figura 5.15 – Relação entre f_t e f_c para todos os concretos produzidos	110
Figura 5.16 - Relação entre absorção total e percentual de agregado reciclado na mistura	113
Figura 5.17- Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C30.....	115
Figura 5.18 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C60.....	116
Figura 5.19 – Relação entre absorvidade e pasta total	118
Figura 5.20– Retração por secagem dos concretos de classe C30.....	119
Figura 5.21 – Retração por secagem dos concretos de classe C60.....	120
Figura 5.22 – Perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C30.....	121
Figura 5.23 – Perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C60.....	122
Figura 5.24 – Correlação entre a retração por secagem e a perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C30	123
Figura 5.25 – Correlação entre a retração por secagem e a perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C60	123
Figura 5.26 – Carga elétrica das misturas submetidas ao ensaio de penetração acelerada de íons cloretos	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Unidade de tratamento nos municípios	8
Tabela 2.2 - Composição dos RCD em algumas cidades brasileiras [SCREMIN, 2007].....	12
Tabela 2.3- Composição Média dos Resíduos da Construção Civil [SILVA FILHO, 2005 <i>apud</i> IPEA, 2012]	13
Tabela 2.4 Resultados para índice de absorção de água de agregados reciclados e naturais [GIRARDI, 2016 (adaptado)].....	16
Tabela 2.5- Granulometria dos resíduos de construção coletados na cidade de São Paulo (CASTRO, 1996).....	19
Tabela 2.6 - Resumos das normas e especificações para utilização de agregados reciclados em concretos	23
Tabela 2.7 - Normas técnicas relativas aos resíduos sólidos.....	25
Tabela 2.8 - Índices K para diferentes protocolos de empacotamento [DE LARRARD, 1999].....	37
Tabela 3.1– Resultados do processo de beneficiamento do resíduo	41
Tabela 3.2 – Traços utilizados na calibração dos parâmetros “p” e “q”	54
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas para calibração de “p” e “q”	54
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas para calibração de “p” e “q”	55
Tabela 3.5- Índice qualitativo de penetrabilidade de íons cloreto	66
Tabela 3.6 – Propriedades do cimento Portland CPV-ARI.....	67
Tabela 3.7 – Características do Glenium 51 de acordo com o fabricante	69
Tabela 3.8 – Características dos agregados	72
Tabela 4.1 – Descrição das misturas do estudo de compensação da água de absorção ..	79
Tabela 4.2 – Traços do estudo de compensação da água de absorção	80
Tabela 4.3 – Quantidade de água utilizada em cada traço do estudo de compensação da água de absorção.....	80

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial das misturas do estudo de compensação da água de absorção	82
Tabela 4.5 – Parâmetros estabelecidos para dosagem do concreto reciclado	84
Tabela 4.6 – Descrição dos traços da classe C30 utilizados na pesquisa	85
Tabela 4.7 – Descrição dos traços da classe C60 utilizados na pesquisa	86
Tabela 4.8 – Dosagens otimizadas pelo <i>Betonlab Pro 3</i> para classe C30.....	87
Tabela 4.9 – Propriedade das misturas dosadas pelo <i>Betonlab Pro 3</i> para classe C30...88	
Tabela 4.10 – Dosagens otimizadas pelo <i>Betonlab Pro 3</i> para classe C60.....	89
Tabela 4.11 – Dosagens otimizadas pelo <i>Betonlab Pro 3</i> para classe C60.....	90
Tabela 4.12 – Pasta total em cada mistura dosada	92
Tabela 5.1 – Resultados de abatimento do tronco de cone.....	96
Tabela 5.2 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão em 1 dia dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	100
Tabela 5.3 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 7 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	104
Tabela 5.4 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	107
Tabela 5.5 – Valores médios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	109
Tabela 5.6 – Valores médios absorção total de água por imersão e massa específica dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	111
Tabela 5.7 – Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	114
Tabela 5.8 – Valores dos pontos de transição (P_T) e dos estágios de absorvidade (S1 e S2) dos concretos produzidos.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

E_c	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto
a_{12}	Coefficiente de efeito de afastamento
b_{21}	Coefficiente de efeito de parede
d_i	Diâmetro médio da classe i
f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração do concreto por compressão diametral
y_i	Fração volumétrica da classe i
β_i	Compacidade virtual da classe i
$\gamma^{(i)}$	Compacidade virtual da mistura onde a classe i é a dominante
ϕ_i	Volume de sólidos ocupado pela classe i em um volume unitário da
μ	Viscosidade plástica
τ_0	Tensão inicial de escoamento
e	Índice de vazios
γ	Compacidade virtual da mistura
a/c	Fator água cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregado de resíduo de concreto
ARM	Agregado de resíduo misto
ATT	Áreas de transbordo e triagem
C	Compacidade real da mistura
CCC	Cúbico de corpo centrado
CCR	Concreto compactado ao rolo
CFC	Cúbico de face centrada
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CS	Cúbico simples
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K	Coefficiente de empacotamento
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
p	Parâmetro relacionado à interface pasta-agregado
q	Parâmetro relacionado à resistência intrínseca do agregado
RCD	Resíduo de construção e demolição

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A construção civil é uma atividade milenar que, com o crescente aumento da demanda por obras de infraestrutura e edificações, contribui de forma significativa para a ocorrência de impactos ambientais devido ao elevado consumo de recursos naturais e energia. Segundo Melim (2010), os efeitos ambientais das atividades construtivas decorrem não só do ato de construir, mas também da operação das estruturas construídas (incluindo a manutenção) até à sua demolição, acarretando impactos com efeitos prolongados a diversos níveis.

A indústria da construção civil é responsável pela geração de uma grande quantidade de entulhos durante todo ciclo de vida das construções e, de acordo com Levy (1997), os primeiros registros de utilização desses resíduos datam do período do Império Romano com a reutilização de resíduos minerais da construção civil na produção de novas construções. De acordo com Wedler *et al.* (1946) apud Levy (2006), só a partir de 1928, começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o efeito da granulometria dos agregados, oriundos de alvenaria britada e de concreto, na produção de concretos. Porém, a primeira aplicação significativa de entulho reciclado, só foi registrada após o final da Segunda Guerra Mundial, na reconstrução das cidades Europeias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e o escombros ou entulho resultante, foi britado para produção de agregados visando atender à demanda na época (WEDLER; HUMMEL, 1946 apud LEVY, 2006)

No Brasil as atividades de reciclagem de materiais de construção e demolição, segundo Leite (2001), tiveram seu início registrado na Cidade de São Paulo em 1991, no entanto, apesar da instalação de uma usina de boa produção, o emprego deste material ficou impossibilitado por falta de Normas Técnicas. De acordo com Nunes (2004), dos 5.507 municípios brasileiros, apenas 2% tem algum tipo de tratamento de RCD. No momento, segundo o panorama apresentado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - Abrelpe (2016), com os dados do ano de 2014, foi constatado que no Brasil os municípios coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de

RCD, o que implica no aumento de 4,1% em relação a 2013. Além disso, sabe-se que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos.

A Resolução CONAMA n. 307/2002 estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, por parte dos geradores, impondo a correta destinação e beneficiamento dos RCD, os quais não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de "bota fora", em encostas, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. Segundo Malta (2013), sob uma ótica social, o reaproveitamento desse material reflete-se em uma ótima oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesa, com disposição e manejo de resíduo, em uma fonte de faturamento, com capacitação de pessoal de baixa renda para aproveitamento do material e fabricação de produtos de maior valor agregado.

Após a etapa de beneficiamento do RCD, é gerado um percentual de areia reciclada que pode corresponder até mais de 50% do total de agregados gerados, dependendo da origem do material. Assim, utilização de agregado miúdo reciclado vem ganhando cada vez mais importância, uma vez que essa fração fina é gerada em grande quantidade quando os agregados graúdos reciclados são produzidos. Além disso, existem problemas relacionadas à escassez de areias naturais para produção de concreto, o que tornam ainda mais importante o estudo de alternativas para substituir parcialmente este tipo de agregado natural.

A NBR 15116 (2004), que trata de agregados reciclados mistos e de concreto, pode ser considerada uma norma conservadora quando comparada às normas de outros países, pois apenas contempla a utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural, ainda assim ela possui requisitos de absorção, contaminantes e finos para os agregados miúdos. Além disso a NBR 7211 (1983) classifica como areia apenas os agregados miúdos que passam na peneira de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 0,150 mm, ou seja, faz-se necessário o peneiramento do AMRC para retirada dos finos, dificultando assim, a utilização deste agregado reciclado em grande escala.

Na maioria dos países que possuem normas de agregados de concreto reciclados, elas são referentes à agregados reciclados com dimensão mínima do grão igual a 4 mm, a areia reciclada não possui normas que regulamentem as condições específicas (granulometria,

módulo de finura e impurezas) e nem propriedades químicas, físicas e mecânicas. Apesar da inexistência de uma norma que trate exclusivamente da areia reciclada, alguns institutos, como o American Concrete Institute (ACI), fazem menção ao agregado miúdo em suas normas ou diretrizes para agregado reciclado, estipulando percentuais máximos de utilização.

Os agregados reciclados possuem um alto grau de heterogeneidade e grande parte dos métodos utilizados para dosagem de ARCs, tanto graúdo quanto miúdo, consistem na substituição em volume, como o método do IPT aplicado por Ângulo (2005), Cabral (2007) e Leite (2001). Os dois primeiros realizaram a compensação da imersão dos agregados durante 10 minutos, já Leite (2001), através da pré-umidificação do material, também por um período de 10 minutos. Os agregados reciclados utilizados por Casuccio *et al* (2008) foram mantidos imersos por um período de 24 horas e, em seguida, colocados ao ar por 1 hora, para compensação de água na mistura. A partir da literatura, nota-se que as dosagens são realizadas de diversas formas, sem que exista um método específico que considere as propriedades dos diferentes tipos de agregados reciclados.

Em seu trabalho, Amario (2015) afirmou que o grande problema na dosagem de concretos contendo agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) era a inexistência de um método que levasse em consideração as diferentes propriedades destes agregados, já que, geralmente, utilizava-se métodos convencionais para a dosagem de concretos com agregados naturais e, a partir daí substituía-se volumetricamente parte do agregado natural pelo reciclado compensando-se a absorção de água do agregado reciclado. Visando preencher essa lacuna do conhecimento, a autora adaptou o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) para dosagem de concretos de resistência normal e de alto desempenho contendo agregados graúdos reciclados de concreto. O (MEC) usado pela autora propõe uma dosagem mais precisa, onde os concretos são dosados em função não apenas das propriedades dos agregados utilizados mas do protocolo de empacotamento utilizado.

Observando-se a literatura para o caso da dosagem de concretos contendo areias recicladas, nota-se a existência de mesma lacuna de conhecimento observada por Amario (2015) para agregados graúdos. Assim, no presente estudo pretende-se estender o MEC para agregados miúdos reciclados realizando as adaptações necessárias para compensação da água de absorção do agregado nas misturas.

Esta pesquisa tem, portanto, o intuito de colaborar com a geração de conhecimento acerca do uso de resíduos de construção e demolição em concreto, particularmente do agregado miúdo de resíduo de concreto, propondo um método de dosagem mais preciso e determinando as suas propriedades no estado fresco e endurecido e seu comportamento ao longo do tempo. Para avaliar o uso da areia reciclada e a eficiência do método de dosagem científica foram moldados concretos de duas classes de resistência (C30 e C60) utilizando-se duas areias recicladas obtidas de concretos de origens distintas, um resíduo produzido no laboratório e outro de demolição. Além disso, afim de avaliar a influência dos finos de RCD juntamente com a areia na produção de concretos reciclados, foi produzido um concreto contendo areia mais finos.

1.2 Objetivos

A presente estudo tem como objetivo geral a dosagem científica de concretos estruturais de classes de resistência C30 e C60 contendo diferentes teores de AMRC obtidos de concretos de diferentes origens: (i) resíduo de concreto produzido em laboratório (*LAB*) e (ii) resíduo de concreto obtido de demolição (*D*).

Os seguintes objetivos específicos foram traçados afim de atingir o objetivo principal:

- A completa caracterização experimental da areia reciclada, a partir da determinação da sua quantidade de pasta aderida, capacidade de absorção de água em função do tempo, da densidade, da compacidade e dos parâmetros p e q , que são necessários para dosagem científica dos concretos.
- Correlacionar o volume de pasta aderida dos AMRCs com a densidade e absorção da água das partículas, que são propriedades normatizadas e que podem ser utilizadas como indicadores de qualidade das areias.
- Adaptar o Modelo de Empacotamento Compressível de partículas (MEC) para que o método considere as diferentes capacidades de absorção de água dos AMRCs utilizados.
- Avaliar a influência do teor (25 e 50%) e tipo de areia reciclada, nas duas classes (C30 e C60), na resistência à compressão axial e tração por compressão diametral,

na massa específica, absorção de água por imersão e por capilaridade, na retração por secagem e penetração acelerada de íons cloreto.

- Produzir um concreto com 25% de substituição da areia natural pela Areia LAB (sem peneiramento dos finos) e avaliar a influência dos finos menores que 0,150 mm contidos nos AMRCs através dos ensaios citados acima realizados para os demais concretos.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por seis capítulos.

- **Capítulo 1: Introdução** - Apresentação da motivação, contendo um breve histórico da utilização de RCD em construções e ressaltando a importância da reciclagem e do estudo da durabilidade de concretos contendo agregado miúdo reciclado. Neste capítulo também são estabelecidos os objetivos da pesquisa.
- **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica** - Este capítulo compreende a revisão da literatura dos temas que serão estudados neste trabalho, como os resíduos de construção e demolição e sua origem, composição, impactos ambientais gerados pela sua disposição irregular, formas de beneficiamento do mesmo, normas e especificações. Neste capítulo está contido também o embasamento teórico para dosagem científica através do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) e o levantamento bibliográfico com ênfase na retração por secagem, retração autógena e ataque por cloretos.
- **Capítulo 3: Materiais e Métodos** – Descreve os materiais utilizados na pesquisa e o programa experimental que foi desenvolvido. Este capítulo relata o processo de produção e beneficiamento do RCD utilizado no estudo, a caracterização do cimento, agregados naturais, agregado reciclado e do superplastificante e os traços pobres e ricos moldados para dosagem. Além de conter a descrição de todos os ensaios e procedimentos adotados na pesquisa.
- **Capítulo 4: Dosagem** – Neste capítulo é apresentado o processo de dosagem dos concretos, que se inicia com o estudo da compensação da água de absorção do agregado miúdo reciclado a partir de ensaios de elevação adiabática de temperatura, resistência à compressão aos 7 dias de idade e abatimento de tronco

de cone para definição desta compensação a ser utilizada na dosagem. Em seguida é mostrado como é feita a otimização, no software *Betonlab Pro 3*, a partir das características desejadas e a escolha dos traços a serem produzidos, apresentando etapas de produção, moldagem e cura dos corpos de prova dos concretos. Ao final deste capítulo é apresentada a metodologia de análise estatística utilizada para avaliação dos resultados experimentais.

- **Capítulo 5: Análise de Resultados** – Apresenta os resultados de todos os ensaios realizados na pesquisa, bem como a discussão e a análise destes resultados
- **Capítulo 6: Conclusões** – Aponta as conclusões do estudo e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Impactos ambientais

É possível perceber que o crescimento da construção civil (de 2006 a 2013) foi acompanhado, naturalmente, pelo aumento no consumo de agregados e, apesar da notável recessão vivida atualmente, a extração de recursos naturais pela indústria da construção ainda é elevada, o que mantém a necessidade de racionalizar o uso e buscar materiais alternativos, com vistas a diminuir os custos e o impacto ambiental desse extrativismo (GIRARDI, 2016).

Os agregados representam cerca de 70% da composição do concreto e a extração desses agregados resultam na escassez de matéria-prima natural, além da degradação do meio ambiente. Em paralelo, a indústria da construção civil é também responsável pelo impacto ambiental causado pela geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e o volume de RCD gerado vem crescendo a cada ano. No entanto, ainda existe uma carência em relação ao gerenciamento de tais resíduos.

Segundo Amario (2015), na maioria dos municípios, o RCD é disposto de forma inadequada, eles são lançados em bota-foras clandestinos, nas margens de rios e córregos, em terrenos baldios, nas encostas, em passeios e outras áreas públicas e em áreas protegidas por lei. As consequências dessa destinação irregular são impactos ambientais e sociais, tais como poluição visual, assoreamento e entupimento de cursos d'água, associados às constantes enchentes, além de promover o desenvolvimento de vetores nocivos à saúde pública.

Para deposição dos resíduos são dispendidos elevados custos, principalmente em virtude dos equipamentos utilizados. Além disso, essa prática não promove a sustentabilidade, uma vez que não incentiva a redução, reutilização ou reciclagem desses resíduos.

A publicação do “Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos”, divulgada em 2016, com base nos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS de 2014, é referente à unidades de processamento dos resíduos sólidos situadas em 4843

municípios. Na Tabela 2.1 pode ser observada a tipologia da unidade de tratamento utilizada por esses municípios para deposição dos resíduos sólidos, incluindo resíduos de construção.

Tabela 2.1 - Unidade de tratamento nos municípios

Tipo de Unidade	Quantidade de Municípios
Área de transporte e triagem de Resíduos da Construção Civil	1,2%
Área de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil	0,8%
Unidade de triagem (galpao ou usina)	19,8%
Aterros, Lixão, Vala e Unidades de transbordo, manejo, compostagem e incineração	78,2%

Apenas 21,8% dos municípios brasileiros destinam os seus resíduos sólidos a unidades de triagem ou reciclagem e somente 2% possui unidades específicas para Resíduos da Construção Civil (RCC). A maioria dos municípios deposita seus resíduos em unidades de aterro, onde não são promovidos serviços de reciclagem, reutilização e nem sequer triagem deste material, causando um impacto ambiental extremamente negativo.

A Figura 2.1 apresenta uma avaliação hierárquica da disposição dos resíduos em relação ao nível de impacto ambiental causado.

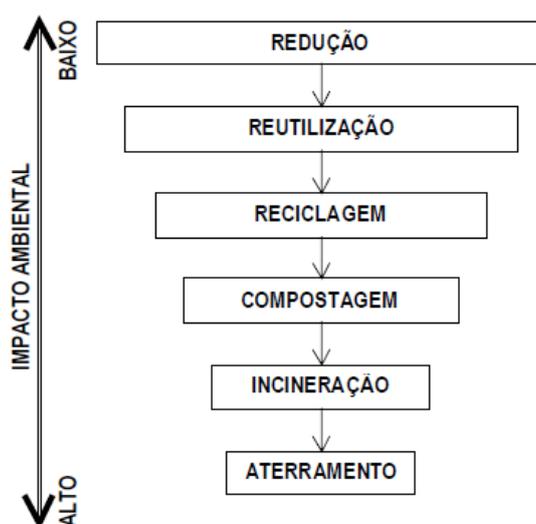


Figura 2.1 - Hierarquia da disposição de resíduos de construção e demolição (PENG *et al.*, 1997)

Peng *et al.* (1997) apud Leite (2001), explica que dentro do modelo hierárquico apresentado, a **redução** da geração de resíduos se mostra como a alternativa mais eficaz para diminuição do impacto ambiental. Esta seria também a melhor alternativa do ponto de vista econômico. A simples movimentação de materiais de uma aplicação para outra, ou seja, a **reutilização**, também se apresenta como bom recurso na diminuição do impacto, pois esta decisão utiliza o mínimo de processamento e energia. Depois, vem a **reciclagem** dos resíduos, ou seja, a transformação destes em novos produtos.

2.2 Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

2.2.1 Definição, origem e classificação

Nos termos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), são considerados resíduos de construção civil os resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis, os quais são de responsabilidade do gerador dos mesmos (ABRELPE, 2014).

Além das definições adotadas pela PNRS, a Resolução CONAMA nº 307/2002 também define como sendo agregados reciclados aqueles materiais granulares oriundos do processo de beneficiamento dos resíduos que, por sua vez, possuem aspectos e características técnicas para serem aplicados em obras de edificação, de infraestrutura ou outras obras de engenharia.

A Resolução CONAMA nº 307/2002, no Artigo 3º, alterada pela Resolução CONAMA nº 348/2004 (Artigo 3º, inciso IV), assume uma classificação para resíduos da construção civil. Esta mesma classificação é adotada pela NBR 15114 (2004), norma referente a Resíduos Sólidos da Construção Civil, e pode ser vista a seguir:

- **Classe A** - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

- **Classe B** - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- **Classe C** - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- **Classe D** - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A NBR 15116 (2004) propõe classificar os agregados reciclados de RCD em dois grupos:

- **ARC** - Agregado de resíduo de concreto: Agregado composto por, no mínimo, 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.
- **ARM** - Agregado de resíduo misto: Agregado composto por menos de 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.

O comitê RILEM 121-DRG (1994) classifica os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição nos tipos descritos a seguir:

- **Tipo I**: Agregados oriundos de resíduos de materiais cerâmicos, como tijolos, telhas e blocos.
- **Tipo II**: Agregados oriundos de resíduos de concreto.
- **Tipo III**: Agregados oriundos da mistura de pelo menos 80% de agregados naturais com materiais dos outros dois grupos, sendo que a quantidade de material do Tipo I deve ser inferior a 10%.

Outra classificação é proposta por Lima (1999), que classifica de acordo com o tipo de componente predominante no resíduo. O autor dispõe de seis classes de resíduos de construção e demolição, descritas a seguir:

- **Classe 1:** Resíduo de concreto sem impurezas – material composto de concreto estrutural, simples ou armado, com teores limitados de alvenaria, argamassa e impurezas;
- **Classe 2:** Resíduo de alvenaria sem impurezas – material composto de argamassas, alvenaria e concreto, com presença de outros inertes como areias, pedras britadas, entre outros, com teores limitados de impurezas;
- **Classe 3:** Resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas – material composto de argamassa, concreto e alvenaria com baixo teor de materiais cerâmicos, podendo conter outros materiais inertes como areia e pedra britada, entre outros, com teores limitados de impurezas;
- **Classe 4:** Resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação – material composto basicamente pelos mesmos materiais do resíduo classe 2, porém admite a presença de determinada porcentagem em volume de terra ou terra misturada à vegetação. Admite maior teor de impurezas;
- **Classe 5:** Resíduo composto por terra e vegetação – material composto basicamente por terra e vegetação, com teores acima do admitido no resíduo de classe 4. Admite presença de argamassa, alvenarias e concretos, e outros materiais inertes, além de maior teor de impurezas que os anteriores;
- **Classe 6:** Resíduo com predominância de material asfáltico – material composto basicamente de material asfáltico, limitando-se a presença de outras impurezas como argamassas, alvenarias, terra, vegetação, gesso, vidros e outros.

Segundo Leite (2001), apesar das diferentes classificações para os resíduos de construção e demolição, ainda existe a necessidade de classificações mais restritivas, para que seja possível produzir materiais mais homogêneos e de maior qualidade.

2.2.2 Composição

A fonte que origina o resíduo é fundamental para que se saiba sua composição. Os resíduos são naturalmente heterogêneos, pois no setor da construção civil são desenvolvidas diversas atividades no canteiro de obras que originam os mesmos. Além disso, uma construção, seja ela residencial, comercial, industrial ou de infraestrutura, é composta por diversos componentes de origem e propriedades diferentes e quando demolida, se torna evidente na composição do resíduo gerado pela demolição. Zordan

(2000) enfatiza que o entulho é, talvez, o mais heterogêneo dentre os resíduos industriais, ele é constituído de restos de praticamente todos os materiais de construção (argamassa, areia, cerâmicas, concretos, madeira, metais, papéis, plásticos, pedras, tijolos, tintas, etc.) e sua composição química está vinculada à composição de cada um de seus constituintes.

Em sua pesquisa, Scremin (2007) faz um levantamento de pesquisas realizadas em alguns municípios brasileiros em relação a composição dos RCD em percentagem (%) de massa, o resultado está apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição dos RCD em algumas cidades brasileiras [SCREMIN, 2007]

Classificação	Material	Origem					
		Aracaju ¹	Salvador ²	São Carlos ³	Maringá ⁴	Blumenau ^{5*}	Fpolis ⁶
A	Concreto e argamassas	36,23	53	27	53,99	18,42	43,27
	Cerâmica	14,42	14	40	10,08	60,67	21,01
	Agregado graúdo/miúdo	0,35	-	-	19,04	-	-
	Pedra/Rocha	2,48	-	10	0,28	0,82	0,02
	Solo e areia	19,96	22	9	8,37	5,25	2,42
	Telhas Cer./fibro cimento	-	5	2	0,24	0,49	-
B	Madei	1,28	-	7	1,49	9,25	1,21
	Metais	0,06	-	2	4,58	0,2	0,01
	Papel/papelão	0,74	-	-	-	-	-
	Plástico	0,34	4	1	-	-	-
	Vidro	0,04	-	1	-	-	-
C	Gesso	3,39	-	1	-	-	-
	Outros classe C	19,85	-	-	-	-	-
D	Lat. Tintas e outros	0,04	-	-	-	-	-
	Outros classe D	0,82	-	-	-	-	0,22
-	Outros	-	2	-	1,93	4,9	31,84
Total	-	100	100	100	100	100	100

* % do volume

¹ Daltro Filho, 2005

² Carneiro, 2001

³ Marques Neto, 2005

⁴ Sapata, 2002

⁵ Sarda, 2003

⁶ Xavier. 2001

Sáez *et al.* (2014) afirma que a dificuldade de manuseio de RCD nos canteiros de obras não é uma novidade e continua sendo um problema ambiental. Contudo, entender a composição quali-quantitativa destes resíduos é essencial para otimização do gerenciamento dos mesmos.

Analisando os resultados obtidos em diversas pesquisas, pode-se observar que em todas as localidades, a parcela de RCD que se enquadra na Classe A da Resolução 307 do CONAMA, correspondente aos resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado, é próximo ou superior a 70% da massa total de resíduos gerados. Isso mostra o grande potencial para a reciclagem da parcela mineral dos RCD, o que poderia diminuir consideravelmente o consumo de matérias primas naturais e os problemas decorrentes para sua disposição final (SCREMIN, 2007).

O Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil realizado pelo Instituto de Pesquisa Aplicada em 2012, apresenta a composição média dos materiais de resíduos da construção civil de obras no Brasil mostrada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3- Composição Média dos Resíduos da Construção Civil [SILVA FILHO, 2005 *apud* IPEA, 2012]

Componente	Porcentagem
Argamassa	63%
Concreto e blocos	29%
Outros	7%
Orgânicos	1%
Total	100%

Em uma breve análise dos dados acima, é possível observar que 92% eram resíduos de argamassa, concreto e blocos, ou seja, uma elevada parcela de resíduos com potencial para serem reciclados.

De acordo com Leite (2001), no Brasil o número de demolições ainda é muito pequeno, e assim a predominância é por resíduos de construção, no entanto, quando se menciona a composição do resíduo de construção, deve ser dada atenção à existência de impurezas ou contaminantes. Este tipo de material pode provocar efeitos negativos, tanto nas propriedades mecânicas do concreto reciclado, quanto na sua durabilidade.

2.2.3 Beneficiamento do resíduo

Com a enorme quantidade de resíduos gerados diariamente, os problemas causados pela disposição inadequada dos mesmos e, conseqüente, impacto ambiental negativo, além da crescente demanda de matéria-prima, a reciclagem se mostra como melhor opção para destinação destes resíduos. Assim, estes precisam ser submetidos à algum tipo de beneficiamento para que possam ser utilizados como agregados reciclados.

O objetivo primário da gestão ambiental dos resíduos sólidos, dentre eles os da construção civil, é reduzir a geração, e o secundário é buscar a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos. A gestão dos resíduos da construção civil na origem (nas obras), é, propriamente, uma meta de gerenciamento ambiental e para alcançar os objetivos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos é necessário que seja promovida a segregação destes materiais.

O melhor aproveitamento dos resíduos tem como início a disposição adequada do material nas caçambas estacionárias (ou caçambas), no que se convencionou chamar de segregação dos resíduos na origem. Todavia, pelos mais variados motivos – culturais, econômicos, organizacionais, etc – em grande parte das vezes, os geradores acabam não realizando a segregação dos resíduos na origem (obra), misturando os materiais das mais variadas classes, por vezes até mesmo comprometendo a vida útil de um material reciclável (como ocorre no caso de contato com materiais perigosos, tais como tintas e solventes). Em grandes obras, se observa uma resistência cultural de obreiros e engenheiros em promover a separação dos resíduos, e, por mais paradoxal que possa parecer, algumas empreiteiras ainda resistem em adotar práticas ambientalmente corretas, talvez por não terem se apercebido das vantagens econômicas (e ambientais) que a segregação na origem apresenta (POZZOBON, 2013).

A imensa maioria dos gerados ao realizar o descarte misturam os resíduos causando prejuízos ao meio ambiente e, por muitas vezes, impossibilitando o reaproveitamento do material descartado. A realidade, portanto, demonstra a necessidade de existirem locais que operem a atividade de segregação dos resíduos como etapa preparatória ao beneficiamento destes materiais.

Os locais responsáveis pelo tratamento adequado destes resíduos, apropriados para operar as atividades de transbordo, triagem e beneficiamento, são conhecidos como centrais de

beneficiamento de resíduos. Nestes locais os materiais são selecionados para posterior processamento e transformação em novos materiais.

Para utilização dos resíduos de construção e demolição como matéria-prima para fabricação de novos produtos é necessário realizar seu beneficiamento, pois os mesmos encontram-se normalmente em grandes dimensões (SOUZA, 2016).

O beneficiamento dos resíduos de construção e demolição envolvem desde a sua coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até a sua estocagem para posterior utilização. Alguns estudos concluíram que o beneficiamento do resíduo de construção e demolição não difere muito do tratamento dado à produção de agregados naturais, e muitos dos equipamentos utilizados para esses se adequam perfeitamente aos primeiros (LEITE, 2001).

É importante salientar que o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil fornece as diretrizes técnicas e procedimentos para o Programa Municipal de Gerenciamento de RCC e este, por sua vez, informa 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 (MATTOS, 2013). Segundo Marques (2009) apenas cerca de 1% dos 5.564 municípios estabeleceram seus Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.

O beneficiamento se inicia nas áreas de triagem (dentro da própria obra ou em Áreas de Transbordo e Triagem - ATT's) onde ocorre a separação dos resíduos de acordo com os materiais que o compõe (madeira, metais, polímeros e cerâmicos) (SOUZA, 2006).

Pepe (2015) explica que a etapa de separação depende estritamente do tipo de demolição e caso um processo de demolição geral seja adotado não é necessária a separação inicial dos materiais e, conseqüentemente, a separação é realizada para reciclar o entulho produzido de acordo com os seguintes critérios: inspeção visual, divisão por cores e utilizar máquinas específicas para separar os vários fluxos de resíduos. O autor ainda relata que se for adotada a demolição seletiva, os diferentes materiais são demolidos separadamente e conseqüentemente, madeira, metal, plástico, elementos não estruturais e elementos estruturais são originalmente separados.

Após a separação, o processamento dos resíduos de construção e demolição é semelhante ao utilizado para agregados naturais. As etapas desse processo são basicamente formadas por cominuição (fragmentação realizada através de britagem ou moagem), separação por granulometria (separa os grãos por tamanhos utilizando peneiradores ou classificadores) e concentração (etapa onde aumenta-se o teor de mineral útil e são removidos contaminantes e outros minerais). Por último, no caso dos graúdos, pode ser realizada a moagem autógena, desenvolvida por Pepe (2015), que visa a remoção das camadas de argamassa aderida da superfície do agregado reciclado.

2.2.4 Propriedades do agregado reciclado

2.2.4.1 Absorção de água

Devido a porosidade dos agregados reciclados, a absorção é uma das propriedades que mais diferem dos agregados naturais, pois os resíduos são naturalmente mais absorventes por serem compostos de materiais cerâmicos e conterem argamassa/pasta aderida aos grãos.

Segundo Amario (2015), a absorção total de agregados reciclados após 24 horas de ensaio pode variar significativamente, dependendo da composição do agregado e de sua granulometria, assim, os agregados reciclados de cerâmica apresentam taxas de absorção maiores que os reciclados de concreto, por serem mais porosos.

A Tabela 2.4 apresenta os resultados obtidos por diversos autores, para o índice de absorção dos agregados naturais e reciclados. Em todos os resultados, observa-se que os agregados reciclados tendem a absorver mais água que os agregados naturais. É possível constatar que os agregados compostos por materiais cerâmicos, completamente ou parcialmente, são os que possuem maiores teores de absorção de água.

Tabela 2. 4 Resultados para índice de absorção de água de agregados reciclados e naturais [GIRARDI, 2016 (adaptado)]

Tipo de Agregado	Absorção (%)	Diâmetro do agregado	Fonte
Areia de quartzo	3	Areia <4 mm	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Concreto	10	Areia <4 mm	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Concreto	8	9,5 mm > Brita 0 >4 mm	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Areia de quartzo	0,79	Areia <4 mm	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (argamassa, cerâmico)	9,00	Areia <4 mm	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Brita granítica	3,39	9,5 mm > Brita 0 >4 mm	Pepe <i>at al.</i> (2014)
Concreto	11,94	9,5 mm > Brita 0 >4 mm	Pepe <i>at al.</i> (2014)
Argamassa	5,00	0,150 mm <Areia <1,2 mm	Miranda (2005)
Bloco de Concreto	5,50	0,150 mm <Areia <1,2 mm	Miranda (2005)
Misto (argamassa, cerâmico, concreto)	7,00	0,150 mm <Areia <1,2 mm	Miranda (2005)
Areia de quartzo	0,45	0,150 mm <Areia <4,75 mm	Amario (2015)
Brita granítica	1,20	9,5 mm > Brita 0 >4 mm	Amario (2015)
Concreto	7,31	9,5 mm > Brita 0 >4 mm	Amario (2015)

Alguns autores como Jochem (2012) e Miranda (2005) recomendam que, o agregado seja colocado em contato com o cimento somente após estar saturado, devido à absorção de água dos agregados reciclados, para evitar que o agregado retire água da pasta, necessária para a hidratação do cimento e ganho de resistência. Já no trabalho desenvolvido por Werle (2010), é determinado um possível percentual limite de pré-molhagem de 50%, pois após este percentual há uma redução da resistência à compressão dos concretos.

Devido à sua maior superfície específica, o agregado miúdo reciclado, geralmente, possui uma absorção ainda maior que o agregado graúdo reciclado.

2.2.4.2 Granulometria

Lima (1999) afirma que a composição granulométrica dos agregados reciclados varia de acordo com o tipo de resíduo que é processado, com a forma de beneficiamento, os equipamentos utilizados no seu processamento e a granulometria do resíduo inicialmente, sendo assim, espera-se que agregados de diferentes origens possuam diferentes curvas granulométricas.

A granulometria do agregado é fundamental para o estudo da dosagem pois esta influencia diretamente a trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco. Levy (2001) acredita que a utilização da curva granulométrica como parâmetro para seleção de um agregado a ser utilizado na produção de concreto, não pode ser adotado como critério absoluto e, sim, como critério orientativo para prever a trabalhabilidade do concreto a ser produzido com determinado agregado.

Em sua análise dos resíduos de construção gerados pelo município de São Paulo, Castro (1996), determinou a granulometria dos resíduos coletados e constatou que a maior parte do resíduo é composta por grãos menores que 5 mm, como pode ser visto na Tabela 2.5. Ou seja, mais de 80% do material está compreendido na fração granulométrica da areia ($>4,75$ mm e $< 150\mu\text{m}$) e de finos de RCD ($<150\mu\text{m}$).

Tabela 2.5- Granulometria dos resíduos de construção coletados na cidade de São Paulo (CASTRO, 1996)

Granulometria	Participação (%)
Maior que 15 mm	6,13
Entre 15 mm e 10 mm	3,37
Entre 10 mm 25 mm	9,08
Menor que 5 mm	81,43
Total	100,00

2.2.4.3 *Massa Específica*

Os resultados obtidos por Carrijo (2005) mostraram que a massa específica dos agregados graúdos reciclados é menor em relação aos naturais. Naturalmente, os agregados miúdos obedecem à mesma lógica, onde a areia reciclada possui massa específica menor que a areia natural, pois os resíduos de construção e demolição são compostos por materiais mais porosos.

Assim como no caso da absorção, a maior porosidade dos agregados reciclados de cerâmica implica em valores de massa específica menores que os apresentados por agregados reciclados de concreto. Em comparação com os agregados naturais, geralmente tanto os reciclados de concreto quanto os reciclados de alvenaria apresentam valores de massa específica menores (AMARIO, 2015)

Segundo Santos (2016), a redução da massa específica ocorre em função das características dos componentes dos agregados reciclados, uma vez que são menos densos que os agregados naturais. Já para a massa unitária, além da redução da própria densidade do material, a alta porosidade, característica dos agregados reciclados, e a forma mais irregular das partículas dos agregados, que aumentam os vazios entre grãos, também contribuem para essa redução.

Observa-se que os resultados de massa específica e massa unitária encontrados na bibliografia são muito variáveis, mesmo para materiais com composição parecida. Essas diferenças ocorrem em função do tipo de britador utilizado, da granulometria e das diferentes porosidades dos componentes do RCD. Outro fator que influencia nesses

valores é o método de ensaio empregado, uma vez que as normas comumente utilizadas são para materiais naturais e os materiais reciclados são mais porosos e frágeis (LOVATO, 2007).

2.2.4.4 Pasta Aderida

Normalmente o agregado reciclado de concreto apresenta duas fases: agregado natural e pasta ou argamassa aderida. A argamassa aderida (areia, produtos hidratados e cimento não hidratado) pode ser observada em agregados graúdos reciclados de concreto, enquanto a pasta aderida (produtos hidratados e cimento não hidratado) é encontrada em grãos de areia reciclada. Esta característica dos agregados reciclados é a principal diferença em relação aos agregados naturais pois afeta todas as outras propriedades do agregado como porosidade, absorção, densidade e textura.

Dependendo da quantidade de argamassa aderida ao grão de agregados reciclados de concreto, a absorção de água varia numa relação diretamente proporcional. O que confirma o que foi constatado na Figura 2.2, nela pode-se observar a relação entre absorção e quantidade de argamassa aderida em volume (HANSEN, 1992).

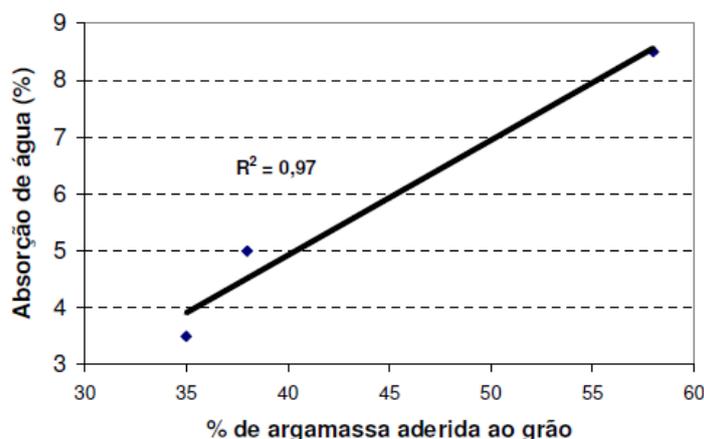


Figura 2.2 - Relação entre absorção de água e quantidade de argamassa aderida ao grão de concreto [HANSEN, 1992]

Considerando-se a relação água/cimento do concreto original e a dimensão da partícula gerada, a porcentagem de pasta aderida ao grão também varia e, conseqüentemente, a absorção de água (ÂNGULO, 2000).

A quantidade de argamassa aderida presente nos ARCs depende de fatores como as características do concreto de origem, tamanho dos grãos e tipo de beneficiamento.

Entretanto essa quantidade não é facilmente determinada, pois ainda não há uma metodologia padrão para estimar esse valor (SILVA, 2017). No entanto, vários métodos para determinação da argamassa aderida em agregados graúdos reciclados de concreto podem ser citados, como: tratamento térmico, ciclos de congelamento-descongelamento, análise de imagens e dissolução em ácido.

Sendo o agregado miúdo reciclado de concreto o objeto de estudo deste trabalho, é interessante que possam ser avaliados métodos para quantificar esta pasta aderida. Dos métodos citados para quantificar argamassa aderida, a dissolução em ácido é a mais recomendada no caso da pasta aderida em grãos de areia, devido a sua fácil execução e viabilidade. Além disso, esse é um dos procedimentos mais utilizados na literatura para separar a argamassa ou pasta do agregado natural. O processo é, basicamente, realizado a partir da imersão do agregado em ácido, onde ao final do processo apenas o agregado original permanece íntegro.

O ácido nítrico foi utilizado por Butler (2012) em agregados graúdos reciclados de concreto e um percentual de 20,4% foi encontrado para argamassa aderida, enquanto Movassaghi (2006), que utilizou o mesmo ácido, obteve taxa em torno de 38%. Braymand *et al.* (2017), por sua vez, utilizou ácido clorídrico e realizou o ensaio em diferentes faixas granulométricas e para grão menores que 5 mm, a quantidade de pasta aderida foi igual a 38,4%.

2.2.5 Legislação no Brasil referente aos Resíduos de Construção e Demolição

2.2.5.1 Lei nº 12.305/10 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

A Lei nº 12.305/10, que institui a PNRS, tem como objetivo estabelecer ações e metas que permitam o avanço necessário ao País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. Esta lei prevê a redução e prevenção de geração de resíduos, propondo práticas de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos e princípios para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos.

O art. 7º desta lei estabelece os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, estes são alguns deles:

- I. Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- II. Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- III. Redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
- IV. Incentivo à indústria da reciclagem;
- V. Gestão integrada de resíduos sólidos;
- VI. Integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- VII. Estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto, rotulagem ambiental e ao consumo sustentável;
- VIII. Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;

O Ministério do Meio Ambiente reitera que esta lei cria metas importantes que irão contribuir para a eliminação dos lixões, além de pôr o Brasil em patamar de igualdade aos principais países desenvolvidos no que concerne ao marco legal e inovar com a inclusão de catadores materiais recicláveis e reutilizáveis.

2.2.5.2 Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)

O CONAMA, no uso das competências que lhe foram conferidas por lei e considerando a política urbana de pleno desenvolvimento da função social da cidade e da propriedade urbana, conforme disposto na Lei nº 10.257, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. A resolução que trata mais especificamente dos resíduos de construção e demolição, é a resolução nº 307/02. A resolução nº 275/01 incentiva a reciclagem dos resíduos em geral.

A resolução nº 307/02 classifica os resíduos da construção civil, visa a gestão dos resíduos a partir do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, além de estabelecer prazos para o enquadramento de municípios e de geradores de resíduos de construção e demolição no plano de gerenciamento. Esta resolução responsabiliza os geradores pelo gerenciamento destes resíduos, o art. 4º decreta que os geradores deverão

ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final.

Código de cores para os diferentes tipos de resíduos é estabelecido pela resolução nº 275/01, que promove a educação ambiental e considera a necessidade de reduzir o crescente impacto ambiental associado à extração, geração, beneficiamento, transporte, tratamento e destinação final de matérias-primas, que provoca o aumento de lixões e aterros sanitários.

2.2.6 Normas e Especificações

A RILEM possui uma recomendação para agregados reciclados que data de 1994 e permite o uso de agregado reciclado graúdo de concreto, de alvenaria e uma mistura de agregado reciclado com agregado natural (no mínimo 80% de agregado natural), definindo características e propriedades para os agregados que podem ser utilizados.

Por possuírem características que muitas vezes diferem bastante dos agregados naturais, os agregados reciclados possuem normas ou especificações de utilização em diversos países, que desenvolveram diretrizes a fim de garantir o seu uso de forma mais precisa e segura. No entanto, a maioria dos países apenas estabelecem orientações apenas para agregados graúdos ou para miúdos com baixos percentuais de substituição, com exceção do Brasil que permite até 100%.

Um resumo destas propostas de especificação para o agregado reciclado é apresentado na Tabela 2.6. Observa-se que, na lista de países citados, apenas a Alemanha permite uma substituição de mais de 25% do agregado miúdo em concretos de aplicação estrutural.

Tabela 2. 6 - Resumos das normas e especificações para utilização de agregados reciclados em concretos

País	Norma ou Especificação	Fração do Agregado	Máximo teor de agregado reciclado	Máxima resistência à compressão (28 dias)	Aplicação
Alemanha	DafSt (1998)	Graúdo	35%	25 MPa	Estrutural
		Miúdo	25%	35 MPa	Estrutural
Austrália	CCAA (2008)	Graúdo	100%	25 MPa	Não Estrutural
			30%	40 MPa	

			30%	Não especificado	Estrutural
Bélgica	CRIC (2004)	Graúdo	100%	-	Estrutural
Brasil	NBR 15116 (2004)	Graúdo	100%	15 MPa	Não Estrutural
		Miúdo			
Coreia	KS F 2573 (1999)	Graúdo	30%	27 MPa	Não especificado
		Miúdo	30%	21 MPa	
Dinamarca	ADC (1995)	Miúdo	20%	40 MPa	Estrutural
Espanha	EHE – 08 (2008)	Graúdo	20%	-	Estrutural
		Miúdo	20%	-	Estrutural
Estados Unidos	ACI E-701(2007)	Graúdo	100%	Não especificado	Não especificado
		Miúdo	20%		
Hong Kong	HKBD (2004)	Graúdo	100%	20 MPa	Não Estrutural
			20%	30 MPa	Estrutural
Holanda	CUR (1986)	Graúdo	20%	Não especificado	Estrutural
		Miúdo			
Inglaterra	BS 8500-2 (2002)	Graúdo	20%	40 MPa	Não especificado
	BRE Digest 433 (1998)	Graúdo	20%	-	Estrutural
		Miúdo	10%	50 MPa	Estrutural
Itália	NTC (2008)	Graúdo	100%	10 MPa	Não Estrutural
			30%	37 MPa	Estrutural
			60%	25 MPa	
Japão	BSCJ (1977)	Graúdo	100%	30MPa	Estrutural
Portugal	E471 (2006)	Graúdo	25%	50 MPa	Estrutural
		Graúdo	100%	-	Não Estrutural
Suécia	SS 137003 (2015)	Graúdo	20%	40 MPa	Não especificado
Suíça	SIA (2006)	Graúdo	100%	37 MPa	Estrutural
		Miúdo	20%		
Internacional	RILEM (1994)	Graúdo	100%	60 MPa	Estrutural

De forma geral, as normas e especificações para o uso de agregados reciclados na construção civil podem servir como base, mas revelam-se restritivas e limitantes, portanto, publicações de novas recomendações normativas especificam para os resíduos de construção e demolição tornam-se necessárias (RANGEL, 2015).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 2004 publicou normas específicas para resíduos da construção civil e seu devido gerenciamento. Na Tabela 2.7 estão apresentadas estas normas.

Tabela 2.7 - Normas técnicas relativas aos resíduos sólidos

Norma	Nome
NBR 10.004:2004	Resíduos sólidos (classificação)
NBR 15.112:2004	Resíduos da Construção Civil e resíduos volumosos - áreas de transbordo e triagem- Diretrizes para projetos, implantação e operação.
NBR 15.113:2004	Resíduos da Construção Civil e resíduos inertes - aterros - Diretrizes para projetos, implantação e operação.
NBR 15.114:2004	Resíduos da Construção Civil - áreas para reciclagem - Diretrizes para projetos, implantação e operação.
NBR 15.115:2004	Agregados reciclados de Resíduos da Construção Civil - execução de camada de pavimentação - Procedimentos.
NBR 15.116:2004	Agregados reciclados de Resíduos da Construção Civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.

2.3 Concretos Com Agregados Reciclados

A influência dos agregados reciclados em concretos pode ser avaliada em propriedades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido. A aplicação dos agregados é definida pelo desempenho destes nessas duas fases (LOVATO, 2007).

Os concretos confeccionados com agregados oriundos de resíduos de construção e demolição apresentam maior absorção de água e índice de vazios quando comparados com os concretos convencionais. Essa característica ocorre em função do aumento da relação a/c, redução da massa específica, permeabilidade e composição dos agregados reciclados (EVANGELISTA; BRITO, 2010; LOVATO, 2007; CARRIJO, 2005).

Com relação à influência do agregado reciclado no concreto fresco, estes concretos apresentam uma perda de trabalhabilidade consequente da elevada absorção de água desse material (LEITE, 2001; ANGULO, 2005; LEVY, 1997; LOVATO, 2007; RODRIGUES, 2014). Quanto maior o teor de ARC no concreto, maior será a sua capacidade de absorção de água. Este comportamento é determinado pela constituição do material, ou seja, a microestrutura porosa do ARC é responsável pelo aumento na capacidade de absorção de água do novo concreto (WERLE, 2010).

A massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e de sua porosidade, bem como de sua textura, forma e tamanho das partículas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Observa-se diminuição desse parâmetro com o aumento do teor de substituição do agregado reciclado, pois a massa específica do agregado reciclado é inferior ao valor obtido para o agregado natural (AMARIO, 2015; RODRIGUES, 2014; LIMBACHIYA *et al.*, 2000). E, devido à este menor valor de massa específica, Carrijo (2005) sugere que os concretos sejam dosados em volume ao invés de serem dosados pelo método tradicional, em massa.

Segundo Lovato (2007), o agregado reciclado pode exercer influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto endurecido. As propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas à capacidade do concreto em resistir os esforços a que for solicitado, já as propriedades de durabilidade ao seu tempo de vida útil.

Em seu trabalho, Barros (2016) atingiu resistências maiores que o concreto de referência, com 100% de substituição de agregado miúdo de RCC. Já Lovato (2007) variou os teores de agregados graúdo e miúdo reciclados, concluindo que todos os traços com agregados reciclados apresentaram valores de resistências inferiores ao concreto convencional e que agregado graúdo reciclado exerce maior influência sobre a resistência à compressão que o agregado miúdo reciclado. Rangel (2015) obteve constância de valores, em relação à

referência, nos ensaios de resistência à compressão, para diferentes teores de RCD (25% e 50%), em concretos dosados pelo MEC.

Araújo (2016) afirma que, com adequada seleção dos resíduos que darão origem ao agregado reciclado, é possível a substituição de 100% do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de construção e demolição sem prejuízo das resistências à compressão e à tração do concreto, apesar das normas brasileiras ainda não permitirem essa substituição para concretos com fins estruturais.

Essa discrepância de resultados nas pesquisas pode ser atribuída a diferentes RCDs de origem e heterogeneidade dos agregados reciclados. Além disso, grande parte dos métodos utilizados consistem na substituição em massa do agregado natural pelo reciclado, muitas vezes sem considerar as propriedades intrínsecas dos agregados, como sua alta absorção.

2.3.1 Agregado Miúdo Reciclado em Concretos

A areia de britagem, ou areia artificial é dotada de uma grande quantidade de material pulverulento, de acordo com a NBR 7211: 2009 seu uso é admitido uma vez que define agregado miúdo como areia natural quartzosa ou areia artificial resultante da britagem de rochas estáveis, de diâmetro máximo igual ou inferior a 4,75mm, o que, dentro de certos limites, confere uma maior trabalhabilidade ao preencher os vazios da pasta de cimento e água. Por outro lado, quando em grandes quantidades se torna prejudicial à qualidade do concreto. Isto ocorre, quando o material pulverulento forma uma película envolvendo cada grão, impedindo a aderência da pasta de cimento aos agregados e aumentando assim, a necessidade de água para se manter uma mesma trabalhabilidade. Como forma de minimizar ou até mesmo eliminar essa desvantagem a areia pode ser submetida a um processo de lavagem, o que a tornaria adequada para utilização nas abordagens convencionais (CABRAL, 2007).

Na literatura alguns estudos feitos com diferentes teores de agregado miúdo reciclado podem ser encontrados, principalmente estudos relativos ao comportamento mecânico e trabalhabilidade destes concretos.

Rodrigues (2014) percebeu durante a dosagem do concreto reciclado a perda de trabalhabilidade e de coesão ao utilizar a mesma relação a/c do concreto de referência,

havendo, assim, a necessidade do incremento de água à medida que se acrescentou agregado miúdo reciclado, de origem mista com predominância de resíduo de concreto, à mistura. Devido ao teor de finos neste tipo de agregado, a sua absorção costuma ser mais elevada quando comparada ao agregado graúdo reciclado, por isso se faz necessário um estudo minucioso da absorção desse material antes da dosagem.

Evangelista e Brito (2007) concluíram que a resistência à compressão de concretos com agregado reciclado miúdo de concreto não são afetadas até um teor de 30% de substituição do agregado natural, enquanto a absorção de água por imersão aumenta proporcionalmente com o aumento do teor de agregado reciclado na mistura.

Khatib (2005) realizou substituições de 25% e 100% de agregado miúdo reciclado de concreto e constatou uma redução de 15% e 30%, respectivamente, na resistência à compressão. Pedrozo (2014), que optou por teores de substituição de 25 %, 50 % e 75 % de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado misto, pôde concluir que os resultados de resistência do concreto com substituição de 50 % e 75 % não se mostraram satisfatórios.

Embora os agregados miúdos reciclados provenientes de RCC sejam mais heterogêneos que o agregado miúdo natural e tenham maior absorção, propriedades características importantes para a utilização em dosagens de concreto, em sua pesquisa Barros (2016) apresentou um concreto produzido 100% com agregado miúdo reciclado misto que possuía resistência à compressão axial, 33,3%, e uma resistência à compressão diametral, 18,1%, maiores que o concreto convencional. Assim como Sganderla (2015), que obteve resultados satisfatórios para resistência à compressão com substituição de 20% de agregado miúdo reciclado misto, superior à resistência obtida no concreto utilizado como referência.

Em seu trabalho, Leite (2001) associa os melhores resultados ao baixo percentual de agregado reciclado substituído. Por outro lado, muitos estudos alçaram resultado positivos com altos teores de substituição, os autores justificam este fenômeno de diversas formas: empacotamento da areia, método de dosagem utilizado, origem do agregado e beneficiamento adequado.

2.3.2 Durabilidade e variação dimensional de concretos reciclados

A vida útil de concretos reciclados diminui com o aumento dos teores de agregados reciclados na mistura (OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002; BRAVO, 2015). Em termos de durabilidade do concreto reciclado espera-se, naturalmente, uma vida útil menor quando comparado ao concreto convencional. Pois a porosidade do ARC pode tornar o concreto mais vulnerável ao surgimento de manifestações patológicas.

Por razões de durabilidade, a substituição total dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos de concreto pode apresentar dificuldades consideráveis. Contudo, para menores teores de substituição, como 30%, a utilização de agregado miúdo em concretos estruturais é viável, contrariamente à noção generalizada (mesmo em normas) de que esse material é inapropriado para este fim (EVANGELISTA E BRITO, 2010).

2.3.2.1 Penetração acelerada de íons cloreto

A corrosão de armaduras causada por íons cloreto é um dos maiores problemas enfrentados, responsável pelo envelhecimento precoce da estrutura, principalmente aquelas próximas ao mar e sujeitas ao efeito da brisa marinha, rica em íon cloreto e umidade ideal para corrosão.

Os íons cloreto podem ser encontrados na natureza dissolvidos em água. Quando sólidos, podem depositar-se na superfície do concreto. Em dissolução aquosa, por intermédio de chuvas ou umidade e através da rede de poros, os agentes agressivos penetram no concreto atingindo as regiões mais internas do concreto armado (TROIAN, 2010).

Para que os materiais alternativos sejam utilizados há uma necessidade de conhecer o seu comportamento diante de condições que afetem as propriedades do concreto. A durabilidade do concreto, com agregados naturais ou reciclados, é resultado da facilidade ou dificuldade que os fluídos têm para se transportarem dentro do concreto, identificando a sua permeabilidade. A movimentação desses elementos vai depender da estrutura da pasta do cimento hidratada (NEVILLE, 1997).

De acordo com Olorunsogo e Padayachee (2002), a condutividade de cloretos para concretos confeccionados com agregados reciclados aumentou em 73,2%, aos 28 dias, quando comparado ao índice de referência. Os autores afirmam que a redução no desempenho quanto à durabilidade demonstrada pelos concretos reciclados ocorre por

conta das fissuras criadas nos agregados durante o processo de reciclagem, as quais se tornam um fácil caminho para a passagem de fluidos e agentes agressivos, além da presença de uma estrutura por si mais porosa.

Enquanto isso Sim e Park (2011) afirmam que o agregado reciclado de concreto em aplicações estruturais é capaz de resistir suficientemente à penetração de íons cloreto quando comparado ao concreto convencional. Troian (2010) afirma que se o concreto confeccionado com os agregados reciclados tiver uma argamassa de baixa permeabilidade, esta impedirá a passagem dos agentes deletérios, impedindo-os de alcançarem os agregados, justificando a baixa penetrabilidade de alguns concretos reciclados.

A durabilidade de concretos contendo agregado reciclado é algo bastante complexo, devido à porosidade deste material e à origem do ARC, que exerce grande influência no desempenho do concreto diante situações em que o mesmo possa estar sujeito à agressividade.

2.3.2.2 Retração por secagem

A retração por secagem do concreto é um fenômeno inevitável, desde que o concreto esteja exposto a um ambiente de umidade abaixo da condição de saturação. Como este é o tipo de ambiente onde a grande maioria das estruturas de concreto está inserida, a retração por secagem é uma das principais causas da fissuração, assumindo assim fundamental importância, pois compromete a durabilidade do concreto, principalmente quando este for armado. Como a retração por secagem é um fenômeno que está intimamente ligado à perda de água da massa de concreto, é notório que quanto mais água essa massa tiver, maior será a possibilidade de se ter grandes retrações (CABRAL *et al.* 2010).

A principal preocupação quando se trata da areia reciclados, diz respeito a sua absorção, pois este tipo de agregado apresenta taxas de absorção consideravelmente mais altas que os naturais, o que interfere diretamente na trabalhabilidade e na retração do concreto. Segundo a Building Contractors Society of Japan (1978), concretos feitos com agregado gráudo reciclado e areia natural apresentam uma retração 20 a 50% maior do que o concreto produzido apenas com agregados naturais, enquanto que os concretos contendo agregado gráudo e miúdo reciclados a retração pode ser cerca de 70 a 100% maior que o

concreto de agregados naturais. Além disso, os estudos relativos à durabilidade dos concretos contendo areia reciclada ainda são bastante reduzidos e mais estudos são necessários para o melhor entendimento desses materiais quando submetidos a condições agressivas.

No estudo do agregado miúdo é fundamental que seja analisada a retração por secagem, pois esta fração granulométrica costuma demandar mais água em sua dosagem, devido ao seu alto índice de absorção, quando comparada à areia natural.

Kou e Poon (2002) afirmam que é coerente que o concreto produzido com agregados reciclados possua uma maior retração, uma vez que os agregados reciclados possuem um menor módulo de deformação que os naturais, sendo, portanto, mais deformáveis, além de, em função da alta absorção de água por parte destes, exigirem um elevado teor de água para se obter uma boa mistura. Enquanto isso, Cartuxo *et al.* (2015) concluíram que concretos com substituição de 100% do agregado miúdo natural pelo reciclado resulta em um aumento na retração por secagem de 28% e 57%, aos 7 e 91 dias, respectivamente. Em sua pesquisa, Ravindrarajah *et al.* afirmam que a retração por secagem do concreto contendo agregado miúdo reciclado, aos 90 dias, é cerca de duas vezes a do concreto composto por agregado natural.

2.4 Dosagem científica pelo Modelo de Empacotamento Compressível

Desenvolvido por De Larrard, junto ao *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC, Paris), o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) é um aprimoramento dos diversos modelos de empacotamento elaborados pela equipe. Este modelo se baseia em uma teoria que esclarece o empacotamento de misturas secas para todos os componentes utilizados na dosagem de concretos.

No primeiro módulo deste modelo, é calculado o maior empacotamento possível para uma determinada mistura, conhecido como empacotamento virtual. No segundo módulo, que é; no segundo, é obtido experimentalmente o empacotamento real, baseado na compacidade dos grãos, e são estabelecidas correlações entre a compacidade virtual e a compacidade real, através do coeficiente de empacotamento (K)

Alguns autores (AMARIO, 2015; PEPE, 2015; RANGEL, 2015) comprovaram a eficiência do modelo na dosagem de concretos com agregado de concreto reciclado, utilizado como

agregado graúdo nas misturas. O MEC foi capaz de atender à predição de resistência à compressão desejada para cada classe dosada nos trabalhos desses autores.

Nos tópicos a seguir é realizado um resumo baseado na literatura, onde, primeiramente, será mostrada a teoria que fundamenta o cálculo da compacidade de uma mistura granular nos dois módulos citados (empacotamento virtual e real). Em seguida, são considerados os casos das misturas polidispersas contendo m materiais distribuídos em n classes, onde aplicam-se os dois módulos. E, por fim, são abordados os parâmetros de efeito de parede e efeito da inclusão de fibras como fator de perturbação no empacotamento de misturas granulares.

2.4.1 Modelo de empacotamento virtual

Um dos conceitos fundamentais para compreensão do modelo de empacotamento virtual é o de compacidade virtual de empacotamento (β), que é a máxima compacidade que uma mistura granular monodispersa pode atingir empilhando os grãos um a um, sem alterar sua forma original.

2.4.1.1 Mistura binária

Uma mistura binária é dita sem interação quando o diâmetro de uma classe é muito maior que o diâmetro dos grãos da outra classe ($d_1 \gg d_2$). Quando os diâmetros das classes são relativamente próximos, a mistura é dita com interação e dois efeitos podem surgir. Esses efeitos, conhecidos como efeito de afastamento e efeito de parede, tendem a diminuir o empacotamento da mistura (AMARIO, 2015).

2.4.1.1.1 Mistura binária sem interação

Em misturas compostas por duas classes de grãos de dimensões diferentes, mais conhecidas como misturas binárias, os grãos da classe de menor dimensão apenas ocupam parte dos vazios produzidos pelo empacotamento dos grãos da classe de maior dimensão.

Em uma mistura polidispersa (constituída por grãos de diversos tamanhos), o empacotamento máximo de uma mistura é obtido quando os grãos de diâmetros menores preenchem por completo os espaços vazios entre os grãos de diâmetros maiores. Já para a mistura com grãos pequenos dominantes, estes grãos ocupam a porosidade formada pelos grãos maiores.

Assim, para uma mistura binária composta por duas classes granulares, cujos diâmetros são respectivamente d_1 e d_2 , onde $d_1 > d_2$, os volumes ocupados pelas classes 1 e 2 em um unitário são Φ_1 e Φ_2 , respectivamente, as frações volumétricas ocupadas por cada classe da mistura, y_1 e y_2 , respectivamente, podem ser calculadas a partir da Equação 2.1.

$$y_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_1 - \Phi_2} \quad (2.2)$$

Por definição, a soma y_1 e y_2 é igual a 1, logo, a compacidade virtual de uma mistura binária, denotada por γ , é dada por:

$$\gamma = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (2.3)$$

No caso das misturas binárias sem interação deve ser feita a distinção entre duas situações:

a) Grãos graúdos dominantes:

Os grãos preenchem o volume disponível como se nenhum grão fino estivesse presente. A contribuição da classe 1 é então constante e igual a β_1 e a contribuição da classe 2 é igual a β_2 , que varia entre zero e um valor a partir do qual a classe 1 deixa de ser dominante. Assim, a compacidade virtual da mistura pode ser dada por $\gamma = \gamma^{(1)} = \beta_1 + \phi_2$, onde o sobrescrito (1) indica que a classe 1 é a dominante. Logo, sabendo que $y_2 = \phi_2 / (\phi_1 + \phi_2)$ e que $\gamma^{(1)} = \phi_1 + \phi_2$, pode-se deduzir que:

$$\gamma = \gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (2.4)$$

b) Grãos miúdos dominantes

Esta situação representa o momento a partir do qual qualquer grão menor que seja adicionado a mistura provoca um afastamento dos grãos maiores. Sendo assim, o volume parcial da classe 2 é $\phi_2 = \beta_2(1 - \phi_1)$, pois os grãos da classe 2 ocupam completamente o espaço deixado pelos grãos maiores. Então sabendo-se que $y_1 = \phi_1 / (\phi_1 + \phi_2)$ e que $\gamma^{(2)} = \phi_1 + \phi_2$, deduz-se que:

$$\gamma = \gamma^{(2)} = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2)y_1} \quad (2.5)$$

Segundo De Larrard (1999), pode-se representar graficamente a compacidade virtual de uma mistura binária (Figura 2.5), em que $\gamma^{(1)}$ é compacidade virtual máxima da mistura binária para a classe 1 dominante e $\gamma^{(2)}$ é a compacidade virtual máxima da mistura binária para a classe 2 dominante. Observando-se a Figura 2.3 é possível verificar que a interseção entre as curvas produzidas por $\gamma^{(1)}$ e $\gamma^{(2)}$ é o momento em que a classe 2 preenche todos os vazios da classe 1. A compacidade virtual máxima da mistura é dada para $\gamma^{(1)} = \gamma^{(2)}$ e a compacidade virtual da mistura binária é função das compacidades virtuais para classe 1 e classe 2 dominantes.

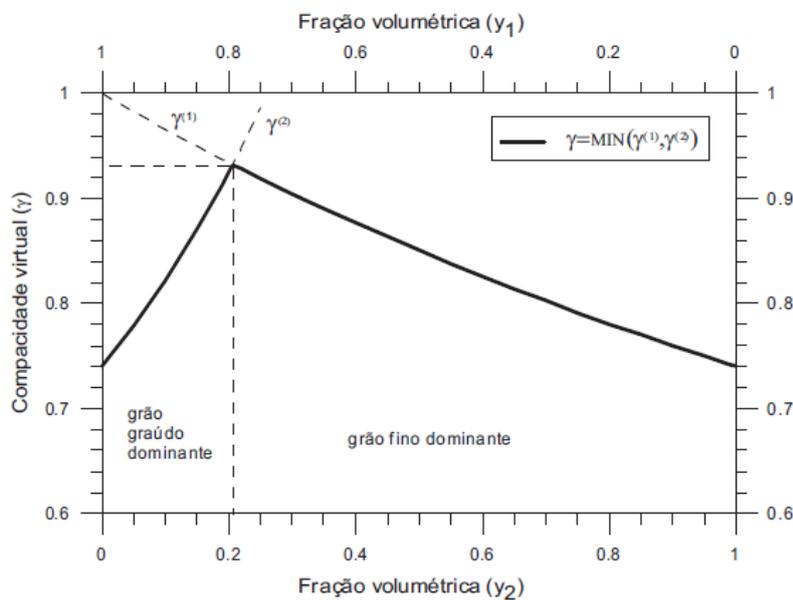


Figura 2.3 – Evolução da compacidade virtual de uma mistura binária de esferas sem interação [FORMAGINI, 2005]

A Figura 2.3 também indica o ponto onde existe a mudança de dominância entre as classes 1 e 2, onde a mistura binária atinge compacidade virtual máxima para a fração volumétrica e $y_2 = 0,205$. Assim, considerando-se todo o domínio de $0 \leq y_2 \leq 1$, sendo γ a compacidade virtual da mistura, pode-se, por meio dos resultados mostrados na Figura 2.5, escrever a Equação 2.6:

$$\gamma = \min(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) \quad (2.6)$$

2.4.1.1.2 Mistura binária com interação parcial

Quando o diâmetro dos grãos da classe 1 (d_1) não é muito maior que o da classe 2 (d_2), tem-se a interação parcial entre duas classes e dois efeitos físicos podem ocorrer na mistura binária: efeito de afastamento e efeito de parede. O efeito da adição dos grãos da classe 2 numa mistura em que os grãos da classe 1 são dominantes quando o grão da classe de menor diâmetro é adicionado à esta mistura, desloca os grãos maiores para ser acomodado, causando o fenômeno é chamado de efeito de afastamento (a_{12}) dos grãos. Assim, o efeito de afastamento (a_{12}), que varia entre 0 e 1, dos grãos da classe 1 na presença dos grãos da classe 2 pode ser determinado a partir da Equação 2.7.

$$a_{12} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^{1.02}} \quad (2.7)$$

Onde:

a_{12} – coeficiente do efeito de afastamento.

Quando a classe 1 é dominante a compacidade virtual, considerando o efeito de afastamento, pode ser determinada a partir da Equação 2.8.

$$\gamma = \gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - \left(1 - a_{12} \frac{\beta_1}{\beta_2}\right) y_2} \quad (2.8)$$

Em uma mistura granular em que a classe 2 é dominante e adiciona-se um grão da classe 1, este grão causará o aparecimento de uma porosidade ao redor de sua superfície. Este fenômeno é conhecido como efeito de parede (b_{21}), que varia de 0 a 1, e pode ser determinado através da Equação 2.9.

$$b_{21} = 1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^{1.5} \quad (2.9)$$

Onde:

b_{21} – coeficiente do efeito de parede.

Quando a classe 2 é dominante, considerando o efeito de parede, a compacidade virtual, pode ser determinada a partir da Equação 2.10.

$$\gamma = \gamma^{(2)} = \frac{\beta_1}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2(1 - \frac{1}{\beta_1})]y_1} \quad (2.10)$$

Da mesma forma que na mistura sem interação, a compacidade virtual da mistura binária é função das compacidades virtuais para classe 1 e classe 2 dominantes, a Equação 2.11 apresenta esta relação.

$$\gamma = \inf(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) \quad (2.11)$$

2.4.1.1.3 Mistura binária com interação total

Quando $d_1=d_2$ a mistura binária é dita com interação total e para este caso as compacidades virtuais $\gamma^{(1)}$ e $\gamma^{(2)}$ são iguais e não se alteram conforme as frações das classes são variadas.

2.4.2 Modelo de empacotamento real

O empacotamento real (ϕ) de uma mistura granular depende, além da distribuição granulométrica e da heurística das partículas, do tipo de protocolo experimental de empacotamento utilizado (AMARIO, 2015). O índice de compactação (K), que pode ser determinado a partir da Equação 2.12, relaciona o modelo de empacotamento virtual e o modelo de empacotamento real e este índice depende do protocolo de empacotamento utilizado, como é mostrado na Tabela 2.8.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{c} - \frac{1}{\gamma^{(i)}}} \quad (2.12)$$

Onde:

C - compacidade real da mistura granular seca.

Tabela 2.8 - Índices K para diferentes protocolos de empacotamento [DE LARRARD, 1999]

Protocolo de empacotamento	Índice de empacotamento K
Lançamento simples	4,1
Lançamento + golpes com bastão	4,5
Vibração	4,75
Demanda d'água	6,7
Vibração + compactação	9
CCR	12
Empacotamento Virtual	∞

A compacidade real da mistura é definida como o volume sólido em um volume unitário. A porosidade da mistura (π) ou volume de vazios é determinada através da Equação 2.13.

$$\pi = 1 - C \quad (2.13)$$

No instante em que água é inserida na mistura granular, a compacidade da mistura passa a ser denominada compacidade molhada (ϕ) e esta compacidade é igual a:

$$\begin{aligned} \phi &= C \text{ para } w \leq \pi \\ \phi &= 1 - w \text{ para } w > \pi \end{aligned} \quad (2.14)$$

Onde:

w – teor de água na mistura

À medida que os vazios entre os grãos são preenchidos pela água, a compacidade molhada passa a ser igual à compacidade da mistura granular seca. Quando a água preenche todos os vazios da mistura granular $w = \pi$ e $w = w_{\text{mínimo}}$. A partir deste momento, para inserir mais água na mistura é necessária a saída de grãos para fornecer espaço para a água. Assim, a compacidade molhada traduz a parte sólida da mistura a partir da inserção da gota de água além da porosidade inicial entre os grãos (BALTHAR, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa Experimental

A Figura 3.1 ilustra as etapas do plano experimental desenvolvido neste trabalho. A primeira parte consistiu no processo de beneficiamento dos materiais, que foi realizado por uma equipe de pesquisa do Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LabEST), da COPPE/UFRJ. Em seguida, a fração a ser utilizada foi peneirada e homogeneizada, ao passo que os outros componentes do concreto foram separados para o estudo.

A fase de caracterização engloba todos os materiais: brita 0 natural, areia natural, areia reciclada, cimento e superplastificante. Tanto para o cimento quanto para os agregados foram determinadas a curva granulométrica, massa específica e a compactidade. Unicamente para o cimento foram determinadas a composição química e a resistência à compressão. Ainda para os agregados foram definidas a absorção total e a absorção no tempo. Para o superplastificante foi realizado o ensaio de compatibilidade e ponto de saturação.

Concluída a etapa de caracterização, foi feito um estudo acerca da absorção do agregado reciclado, a partir de ensaios de abatimento de tronco de cone, elevação adiabática e resistência à compressão. Com os resultados deste estudo de absorção, foi possível dar início à dosagem científica utilizando o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) com auxílio do programa *Betonlan Pro 3*. E, a partir destas dosagens, foram produzidos os concretos a serem analisados. Esta análise se deu a partir de ensaios no estado fresco, com o ensaio de abatimento de tronco de cone, no estado endurecido através de ensaios de resistência à compressão axial e diametral, absorção capilar e total, índice de vazios e massa específica. E, por fim, os concretos foram analisados em termos de durabilidade e variação dimensional, como ensaio de penetração acelerada de íons cloreto e retração por secagem, respectivamente.

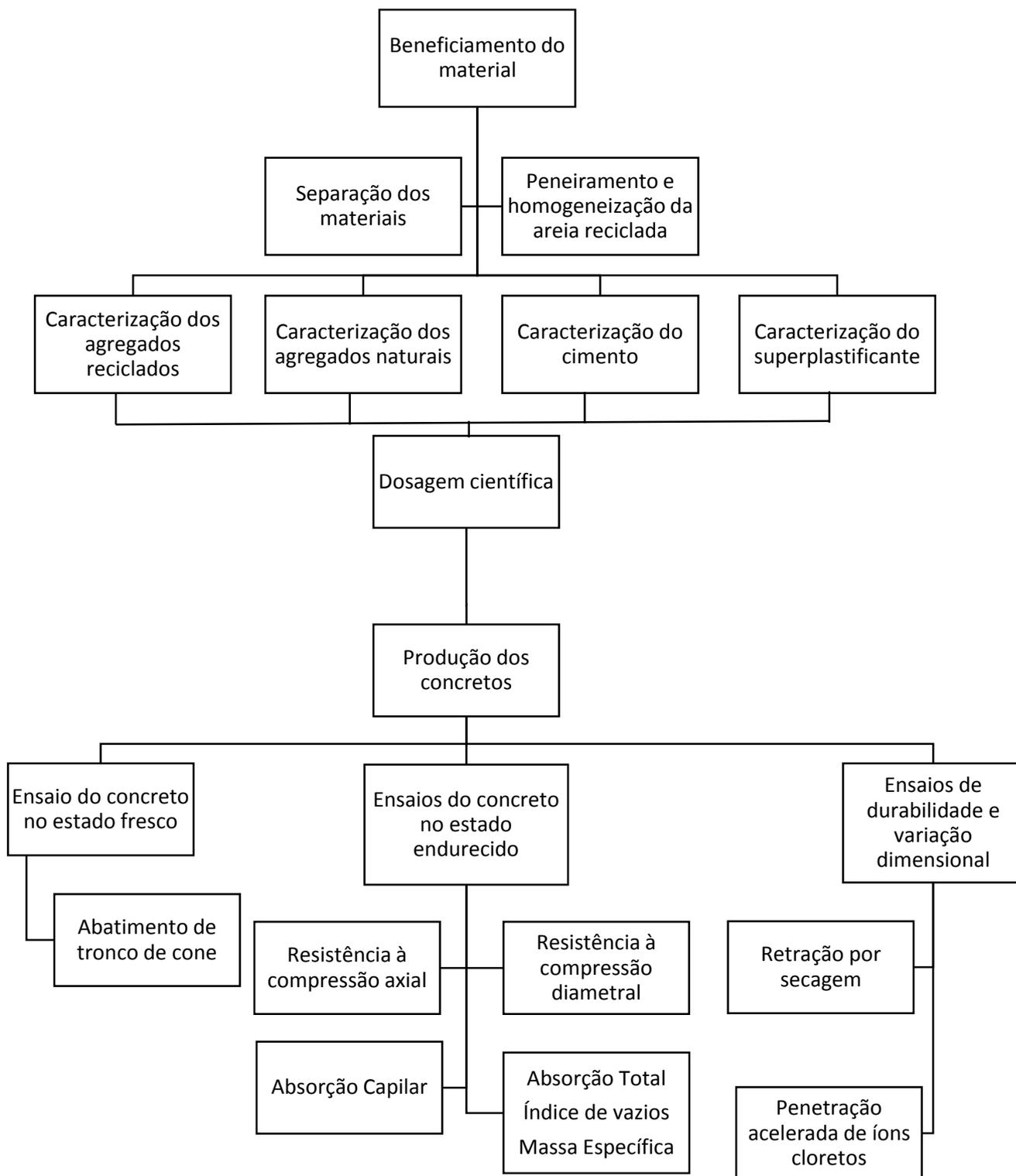


Figura 3.1 – Programa Experimental

3.2 Produção do agregado reciclado

Este estudo utilizou dois tipos de agregado reciclado, o primeiro deles, o resíduo LAB (RCD LAB), foi produzido no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LabEST), da COPPE/UFRJ. O segundo, o resíduo D (RCD D), é proveniente de um resíduo fornecido por uma usina de reciclagem, localizada em São Paulo. Ambos resíduos são objetos de estudo de pesquisas desenvolvidas no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ e foram processados por Amario *et al.* (2018).

3.2.1 Propriedades dos concretos de origem

O resíduo produzido no laboratório foi oriundo da demolição de corpos de prova moldados no ano de 2016, com o único objetivo de gerar agregados reciclados. Os materiais utilizados para a produção deste concreto foram brita 0 natural, areia natural, cimento CPV-ARI, água e superplastificante Glenium 51. Este concreto de origem objetivava uma resistência média à compressão de 30 MPa aos 28 dias de idade. Neste trabalho este resíduo será referido como “RCD LAB”.

O resíduo proveniente de uma usina de reciclagem de resíduos localizada no estado de São Paulo (Foccus), foi gerado a partir da reciclagem de resíduos de concreto de demolição. Por ser uma mistura de vários resíduos de concretos, este material possui nenhuma especificação ou dado técnico. A pesquisa irá se referir a este resíduo como “RCD D”.

3.2.2 Beneficiamento do resíduo

O beneficiamento foi realizado em quatro etapas: britagem, secagem, peneiramento e homogeneização. A britagem do concreto foi realizada com o britador de mandíbulas móvel QUEIXADA 200 e após esta etapa o material passou pelo processo de secagem, onde ele foi espalhado em finas camadas e exposto ao sol. O britador possui três saídas, duas para o material fino e outra para o material grosso. O material grosso foi peneirado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) da UFRJ e resultou em agregados graúdos e finos com granulometria menor que 4,75 mm. As partes de material fino gerado no britador e os finos produzidos no processo de peneiramento do material grosso, foram peneirados em um peneirador mecânico para separação dos grãos menores que 0,150 mm.

Após esta etapa, a separação foi realizada nas frações granulométricas mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1– Resultados do processo de beneficiamento do resíduo

Fração granulométrica	RCD LAB		RCD D	
	Massa (kg)	%	Massa (kg)	%
> 19mm	341	4,92	648	9,51
Brita 1	2350	33,93	3955	58,06
Brita 0	798	11,52	554	8,13
Areia*	2904	41,93	1252	18,38
<150µm*	266	3,84	131	1,92
Perdas	268	3,87	272	4,00
Total	6927	100,00	6818	100,00

*Estes materiais em conjunto formam a “fração fina” do resíduo e foram separados em areia e finos em uma segunda etapa de peneiramento

A Figura 3.2 apresenta um esquema do processo de beneficiamento utilizado para produzir o material da pesquisa.



Figura 3.2– Processo de beneficiamento [AMARIO (2018), adaptado]

As Figura 3.3-a a Figura 3.3-d ilustram os materiais resultantes do processo de beneficiamento antes do peneiramento da fração fina.

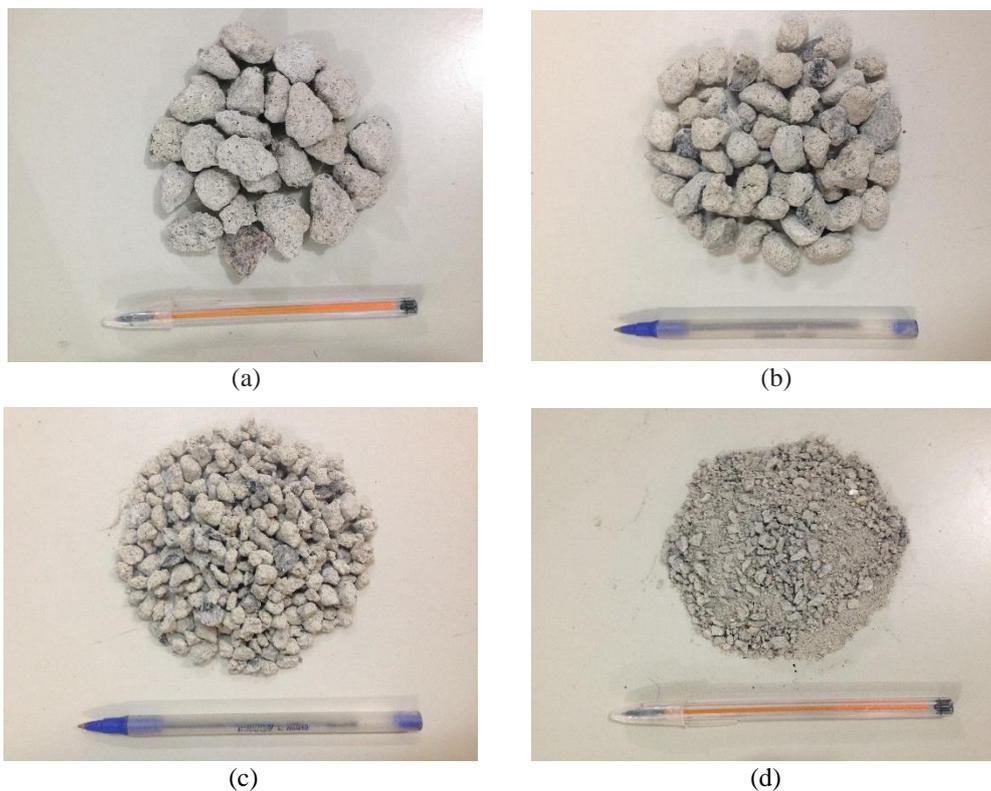


Figura 3.3 – Frações granulométricas resultantes do processo de beneficiamento: (a) fração maior que 19mm; (b) Brita 1; (c) Brita 0; (d) Fração fina

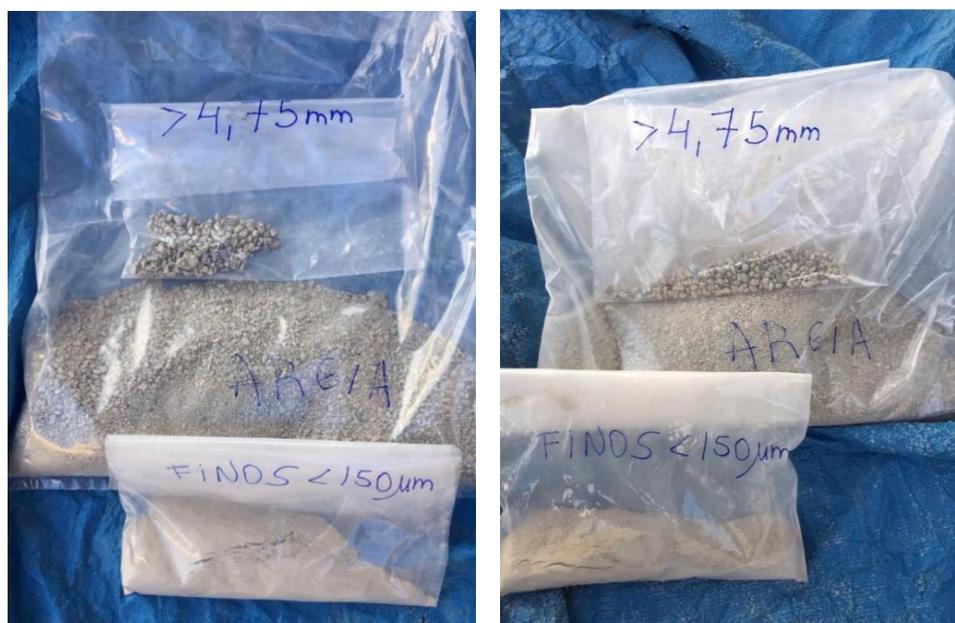
3.2.3 Peneiramento da fração fina

A NBR 7211 (2005) determina os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo como sendo 4,75 mm e 150 μm . Sendo assim, para obtenção desta granulometria, foi necessário o peneiramento da fração fina obtida no processo de beneficiamento. Esta etapa foi realizada com o objetivo de realizar esta separação, então, o material foi posto em um peneirador mecânico (Figura 3.4), onde foram utilizadas as peneiras de 4,75 mm e 150 μm , e ativado por 10 minutos.



Figura 3.4 – Peneirador mecânico e peneiras

Com término do peneiramento, foram realizadas as pesagens dos materiais retidos em cada peneira e no fundo. Foi possível observar que, tanto para o material LAB quanto para o D, a maior parte do agregado era passante na peneira de 4,75 mm e ficava retido na peneira de 150 μm , sendo classificado como agregado miúdo. As Figura 3.5-a e 3.5-b apresentam a quantidade de material pertencente a cada uma das frações granulométricas após um peneiramento.



(a)

(b)

Figura 3.5 – Material dividido em frações após um peneiramento: (a) Resíduo LAB; (b) Resíduo D; Para garantir a representatividade do material utilizado na pesquisa, foram peneirados aproximadamente 850 kg de cada resíduo, coletados aleatoriamente dentre os agregados

considerados fração fina (não necessariamente menores que 4,75 mm) e os classificados como menor que 4,75 mm. O agregado miúdo, que tem como concreto de origem os corpos de prova moldados no LabEst, ao longo do trabalho, será referido como Areia LAB. Já o proveniente do resíduo de demolição, por sua vez, será nomeado como Areia D.

Nessa pesquisa também foi utilizado o resíduo LAB sem retirada dos finos, ou seja, a fração menor que 4,75 mm que não poderia ser considerada areia por possuir grãos menores que 0,150 mm. Este resíduo proveniente do material LAB, será denominado de LAB_F.

3.2.4 Homogeneização do agregado reciclado

A homogeneização do AMRC foi realizada através do método de pilha alongada. Como o material havia sido armazenado em uma sacola de polipropileno de alta resistência (Big Bag), a pilha foi realizada com auxílio da talha elétrica que ergueu o material e o espalhou por toda extensão da pilha (Figura 3.6-a e 3.6-b), dispondo em camadas e alternando o sentido de lançamento até o esvaziamento da sacola. Após a distribuição, o material situado nas pontas da pilha de homogeneização foi retirado e redistribuído ao longo da mesma. Em seguida as areias foram acondicionadas novamente no Big Bag para serem utilizadas ao longo do estudo.



(a)



(b)

Figura 3.6 – Homogeneização da areia reciclada: (a) Início do processo de homogeneização; (b) Distribuição do material na pilha

3.3 Métodos de ensaios

3.3.1 Composição granulométrica

3.3.1.1 Cimento

A granulometria do cimento foi determinada com o equipamento analisador de partículas a laser Malvern Mastersizer. Para tanto, teve-se como base os procedimentos adotados por Cordeiro (2006). Este equipamento se baseia na técnica de espalhamento de luz, ou seja, consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados aos diâmetros das partículas.

3.3.1.2 Agregados e Finos

A granulometria dos agregados foi feita de acordo com a norma NM 248 (2003). Foram coletadas 3 amostras de cada agregado (areia natural, areia reciclada e brita 0 natural) contendo a massa mínima definida pela norma de acordo com a dimensão máxima do agregado.

Estas amostras foram secas em estufas até a estabilização da massa, para os agregados naturais foi utilizada a estufa de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, enquanto que para o reciclado e resíduos $55\pm 5^{\circ}\text{C}$.

As peneiras de série normal e intermediária foram dispostas formando uma pilha com abertura da malha em ordem crescente da base para o topo, a última parte sendo o fundo. A amostra foi despejada na série e o equipamento TYLER RO-TAP 8” foi utilizado para promover a vibração das amostras por 15 minutos.

O material retido em cada peneira após o tempo de vibração foi pesado e em seguida determinados os percentuais médios de material passante e acumulado em cada peneira e, baseado nesses percentuais e na série de peneira, foram plotadas as curvas granulométricas de cada agregado e dos resíduos.

3.3.2 Massa específica e absorção total

3.3.2.1 Cimento

A massa específica do cimento CPV foi obtida através do picnômetro a gás hélio ACCUPYC 1340 e para realização deste ensaio foram colhidas duas amostras do material. O equipamento faz cinco ciclos de medições e determina o valor da massa específica em

cada um dos ciclos, acompanhado do desvio padrão. A massa específica do cimento é a média dos cinco ciclos obtidos pelo equipamento.

3.3.2.2 Agregado Graúdo

Para determinação da massa específica e absorção total destes agregados foram utilizadas as especificações da NBR NM 53 (2009). As amostras foram previamente secas em uma estufa de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24h e em seguida submersas em água por 24h. Após este período, foi retirado o excesso de água das amostras com o auxílio de um pano absorvente e estas foram secas superficialmente e pesadas para determinação da massa do agregado saturado de superfície seca. Em seguida, o material foi imerso em água e sua pesagem foi realizada em uma balança hidrostática para determinação da massa em água do agregado.

A absorção total é dada pela Equação (3.1):

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

A : absorção de água do material, (%);

m : massa ao ar do material seco em estufa, (g);

m_s : massa ao ar do material saturado com superfície seca, (g);

A massa específica pode ser encontrada a partir da Equação (3.2):

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (3.2)$$

Onde:

d : massa específica do material seco, (g/cm^3);

m : massa ao ar do material seco em estufa, (g);

m_a : massa do material imerso em água, através de leitura hidrostática, (g).

3.3.2.3 Agregado miúdo

No caso dos agregados miúdos (naturais e reciclados) a absorção foi determinada de acordo com as prescrições da NBR NM 30 (2001) e para a massa específica utilizou-se a NBR NM 52 (2009).

Após as amostras de agregado miúdo natural e reciclado serem secas em estufas de 105 ± 5 °C e 55 ± 5 °C, respectivamente, por 24h, estas ficaram submersas em um recipiente com água por 24h. Posteriormente, foram estendidas sobre uma superfície plana e submetidas a uma leve corrente de ar, sendo constantemente revolvidas (Figura 3.7-a) e sua superfície compactada no molde tronco-cônico (Figura 3.7-b), até que atingissem o estado saturado de superfície seca. Este estado é caracterizado pelo desmonoramento do agregado com a retirada do molde tronco-cônico (Figura 3.7-c).

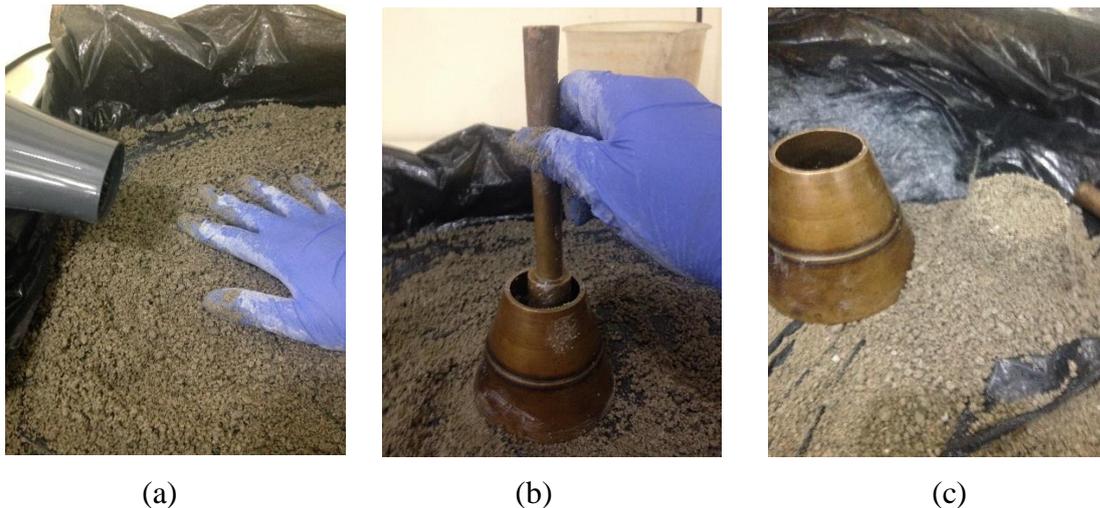


Figura 3.7 – Ensaio de absorção e massa específica do agregado miúdo: (a) Secagem do material; (b) Compactação da areia; (c) Areia saturada de superfície seca

Com final deste processo, a amostra é pesada após ser colocada em um frasco de vidro calibrado, com volume de 500 ± 5 cm³, e coberta com água até a marca de 500 ml. Cerca de 1h depois completa-se o frasco com água até a marca de 500 ml e a massa é determinada novamente. Por fim, a amostra é seca em estufas de 105 ± 5 °C e 55 ± 5 °, para natural e reciclado, respectivamente, até constância de massa.

Este mesmo ensaio de absorção foi reproduzido com um cone de menor escala e amostras de 50g, para que pudesse ser realizada a curva de absorção no tempo do agregado reciclado, visto que sua absorção é significativamente maior que a do agregado miúdo natural. Para esta curva foram utilizadas diversas amostras que foram mantidas submersas por diferentes intervalos de tempo (1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 240, 300, 360) e em seguida submetidas à mesma corrente de ar e compactadas no tronco cônico de menor escala até atingir o estado saturado de superfície seca.

A NBR NM 30 (2001) fornece a Equação (3.3) para o cálculo da absorção total:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde:

A : absorção de água do material, (%);

m : massa ao ar do material seco em estufa, (g);

m_s : massa ao ar do material saturado com superfície seca, (g);

Enquanto que o cálculo da massa específica é dado pela NBR NM 52 (2009) a partir da Equação (3.4)

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (3.4)$$

Onde:

d_1 : massa específica do material seco, (g/cm³);

m : massa ao ar do material seco em estufa, (g);

V : volume do frasco de vidro, (cm³);

V_a : volume de água adicionada ao frasco, (cm³);

3.3.3 Compacidade

3.3.3.1 Agregados

A compacidade dos agregados foi definida no ensaio de compactação mecânica e vibração utiliza-se um volume padrão de material em um cilindro metálico (Figura 3.8-a e 3.8-b), de dimensões iguais a 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura, fixado em uma mesa vibratória e aplica-se uma pressão através de um pistão maciço de peso equivalente a 200N. Com o auxílio de um equipamento denominado catetômetro (Figura 3.9-a e b) faz-se registro da altura do pistão e em seguida o material a ser compactado é inserido no cilindro (7,5 kg para o agregado graúdo e 3,0 kg para os agregados miúdos). Uma mesa vibratória com potência de 3 CV e faixa de velocidade de vibração de 3900 – 4800 vibrações/min (65 – 80 Hz), é acionada durante 3 minutos a uma frequência de 68 Hz.

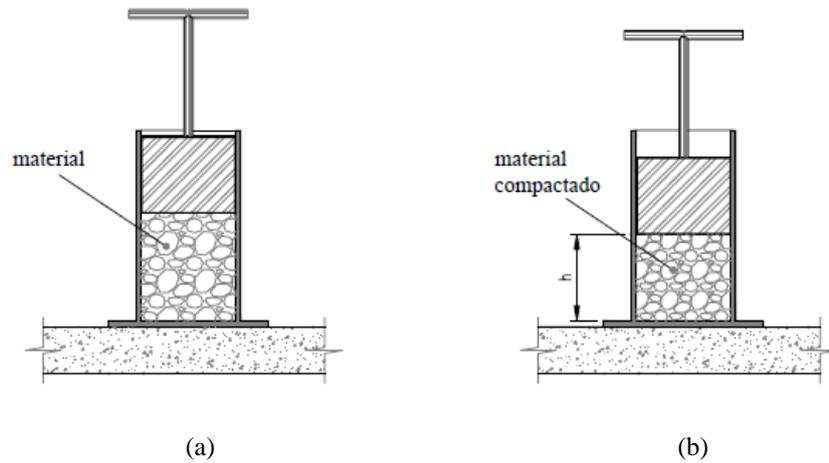


Figura 3.8 - Posição do pistão no ensaio de compactação experimental dos agregados: (a) posição do pistão antes vibração; (b) posição do pistão após a vibração;



Figura 3.9 – Ensaio de compactação experimental dos agregados: (a) cilindro com material após vibração; (b) leitura da posição do pistão a partir do catetômetro;

A equação que fornece o valor da compactidade real (experimental) da mistura para o protocolo descrito é dada por:

$$C = \frac{4M_s}{\pi.D_c^2.h.\delta} \quad (3.5)$$

Onde:

C é a compactidade experimental do material;

M_s é a massa do material seco, (g);

D_c é o diâmetro interno do cilindro, (mm);

h é a altura final da camada do material compactado, (mm);

δ é a densidade do material, (g/cm³);

3.3.3.2 Cimento

Para obter a compacidade experimental do cimento CPV ARI foi utilizado o método da demanda d'água, com base nos procedimentos sugeridos por De Larrard (1999). O procedimento consiste em colocar 350 gramas de cimento no misturador planetário com cerca de 60 gramas de água e a quantidade de superplastificante determinada no ensaio de ponto de saturação e o misturador é acionado em velocidade baixa por 1 minuto. Em seguida, a água é adicionada progressivamente, a cada adição o misturador é mantido por 1 minuto em velocidade alta, para que possam ser observados os diferentes estados do material: pendular, funicular e capilar (Figura 3.10-a a Figura 3.10-c). Este último estado caracteriza o empacotamento máximo de partículas e a partir deste instante a adição de qualquer quantidade de água provocará a redução da compacidade e aumento da fluidez.

Este mesmo ensaio é realizado em pastas contendo superplastificante e a quantidade deste aditivo é determinada a partir do ensaio de compatibilidade e ponto de saturação.

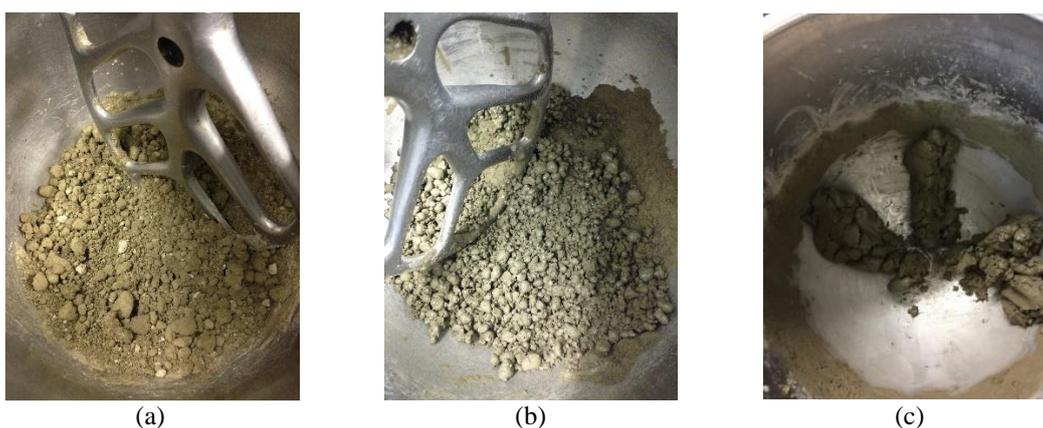


Figura 3.10 – Ensaio de demanda d'água: (a) estado pendular; (b) estado funicular; (c) estado capilar;

Sabendo o valor da demanda d'água, é possível calcular a compacidade experimental do cimento utilizando a Equação 3.6.

$$C = \frac{1}{1 + \delta \cdot \frac{m_a}{m}} \quad (3.6)$$

Onde:

C é a compacidade experimental;

δ é a massa específica do material, (g/cm^3);

m_a é a massa de água, (g);

m é a massa de material, (g).

3.3.4 Compatibilidade e ponto de saturação

O ensaio que avalia o ponto de saturação do superplastificante e a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento é realizado com o escoamento de pastas de cimento através do funil de Marsh (DE LARRARD, 1999).

Para a realização do ensaio foram produzidas pastas com relação água/cimento de 0,35 para diversos teores de superplastificante variando entre 0% e 1% de sólidos em relação à massa de cimento. O ensaio é realizado para cada teor após 10 e 30 minutos do início da mistura e é medido o tempo necessário para o escoamento de 1000 ml de pasta, como pode ser visto nas Figuras 3.11-a e b.

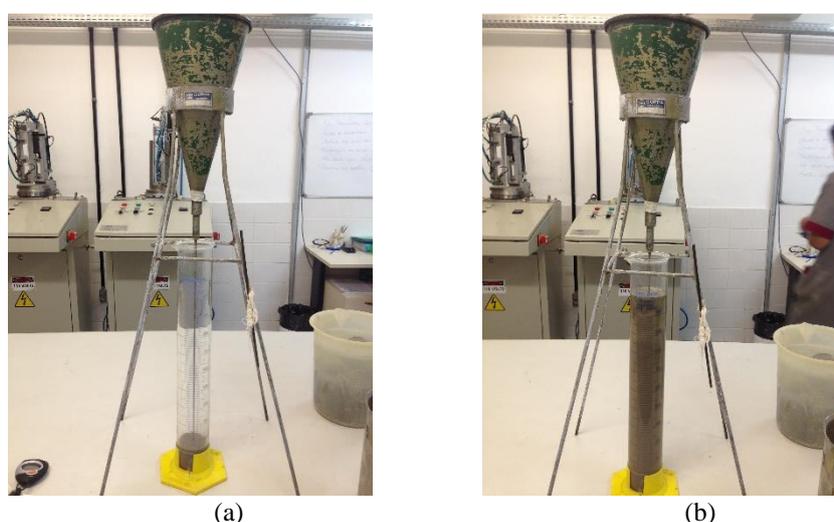


Figura 3.11 – Ensaio de compatibilidade de ponto de saturação: (a) colocação da pasta no funil de Marsh; (b) processo de escoamento da pasta na proveta de 1000 ml;

O ensaio de cone de Marsh indica o ponto de saturação do dispersante em relação ao cimento, que corresponde à dosagem de superplastificante máxima com a que o cimento consegue absorver todas as moléculas de aditivo. Ou seja, acima dessa dosagem, o aumento de aditivo não influencia mais de forma significativa na dispersão, pois o cimento não o absorve (CORDEIRO, 2006).

3.3.5 Composição química do cimento

O ensaio de composição química do cimento CPV, foi realizado a partir de uma análise por espectrometria de fluorescência de raios X, no equipamento Shimadzu, modelo EDX-720 e os resultados são apresentados na forma de percentual de óxidos. Além disso foi obtida a perda ao fogo de acordo com os procedimentos descritos na NBR 5743 (1989). O ensaio consiste em colocar uma amostra de cimento em um cadinho de porcelana e

calcinar em forno mufla à temperatura de $950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, por 20 minutos

3.3.6 Resistência à compressão do cimento Portland

A determinação da resistência à compressão do cimento faz-se necessária para utilização do MEC na dosagem dos concretos. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, de acordo com a NBR 7215 (1997), em prensa servo-controlada *Shimadzu, modelo UH-F1000kN*.

Foi produzida uma argamassa composta por cimento e areia normalizada, em quatro frações distintas, em uma relação 1:3 em massa e com fator água/cimento igual a 0,48. Para este ensaio de resistência à compressão, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, para cada idade de ensaio (1, 7 e 28 dias). Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e mantidos em uma solução de água com cal, até a realização do ensaio.

Para o dia de cada ensaio, os corpos de prova a serem submetidos ao carregamento foram antes regularizados e paralelizados com o auxílio de um torno mecânico, com objetivo de evitar a concentração de tensões nas faces. O carregamento foi aplicado de forma contínua, sua velocidade foi de 0,3 mm/min.

3.3.7 Pasta Aderida

Uma vez que não existe um método padrão para medição do volume de pasta aderida, este ensaio foi baseado na literatura a partir do trabalho desenvolvido por Braymand *et al* .(2017) e adaptado para agregados miúdos. Primeiramente, as amostras foram secas a 60°C até a constância de massa, depois foram imersas em uma solução de ácido clorídrico com concentração de 30% durante 24 horas (Figura 3.12-a). Em seguida, as amostras foram colocadas em uma peneira de $150\ \mu\text{m}$ e lavada por uma corrente de água (Figura 3.12-b) para remover as partículas anteriormente aderidas ao grão natural. As amostras foram secas em um forno a uma temperatura de 60°C até a constância de massa para obter a massa do agregado original. Este experimento também foi conduzido para o agregado miúdo natural, afim de garantir que este não seria danificado. A quantidade de pasta aderida foi determinada em percentual, a partir da diferença entre a massa inicial e a massa final do agregado.

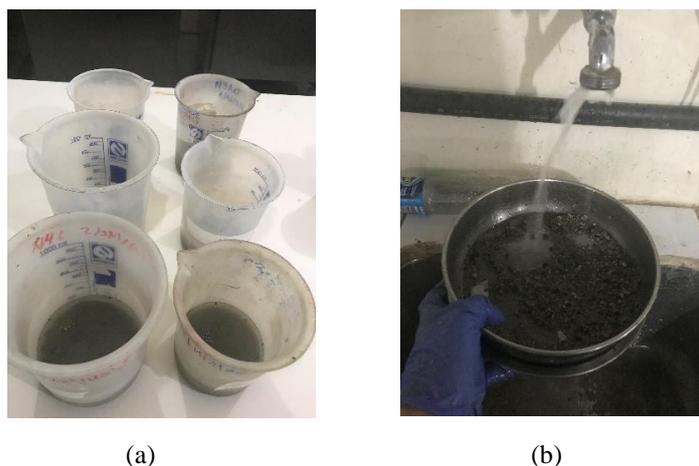


Figura 3.12 – Ensaio para determinação do volume de pasta aderida: (a) agregado miúdo submerso em ácido clorídrico; (b) lavagem do agregado miúdo;

3.3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foram realizadas análises qualitativas em um microscópio eletrônico de varredura da Hitachi, modelo TM 3000. As imagens feitas com auxílio deste instrumento foram utilizadas para avaliar a rugosidade da superfície dos agregados miúdos e, conseqüentemente, o volume de pasta aderida dos diferentes tipos de agregados miúdos.

3.3.9 Calibração dos parâmetros “p” e “q”

Em seguida, foi analisada a influência dos parâmetros “p” e “q” dos agregados, determinados a partir de traços pobres e ricos com a moldagem de argamassas para calibração da areia natural e reciclada e do concreto para calibração do agregado graúdo. Através dos ensaios de resistência à compressão axial em 3 idades (1, 7 e 28 dias), estes parâmetros são estipulados e utilizados para calibrar o software *Betonlab Pro 3*.

Esses parâmetros representam a influência dos agregados na resistência à compressão do concreto, através da sua aderência à pasta de cimento (expresso por “p”) e da sua resistência intrínseca (expresso por “q”). A calibração deles é fundamental para realizar a dosagem do concreto através do software *Betonlab Pro 3*.

A calibração é realizada considerando o grão de maior dimensão na mistura, assim, para encontrar o “p” e “q” de cada agregado foram feitas argamassas (naturais e recicladas) e concretos. Estes parâmetros são obtidos experimentalmente através dos valores da resistência à compressão de dois traços: um traço rico, de alta resistência, e outro traço

pobre, de baixa resistência. Em posse dos valores de resistência à compressão, os parâmetros “p” e “q” são determinados através do próprio programa. Os traços ricos (TR) e pobres (TP) utilizados são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Traços utilizados na calibração dos parâmetros “p” e “q”

Misturas		Materiais (kg/m ³)					
		Brita Natural	Areia Reciclada	Areia Natural	Cimento	SP	Água
Argamassa Natural	TP	-	-	1558,00	342,00	3,42	248,41
Argamassa Natural	TR	-	-	1359,00	600,00	6,00	247,34
Argamassa LAB	TP	-	1558,00	-	342,00	3,42	289,66
Argamassa LAB	TR	-	1359,00	-	600,00	6,61	286,63
Argamassa D	TP	-	1558,00	-	342,00	3,42	321,19
Argamassa D	TR	-	1359,00	-	600,00	6,61	318,16
Concreto Natural	TP	1020,87	-	815,59	254,64	0,56	191,9
Concreto Natural	TR	1021,21	-	596,7	503,74	3,21	201,95

Para cada traço foram produzidos 4 corpos de prova, no caso das argamassas de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, já para os concretos foram de 7,5 cm de diâmetro por 15 cm de altura. A resistência à compressão dos corpos de prova foi feita em 3 idades (1, 7 e 28 dias), os resultados deste ensaio estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas para calibração de “p” e “q”

Misturas		Idades		
		1 dia	7 dias	28 dias
Argamassa Natural	TP	4,11	9,11	11,40
	TR	33,38	39,51	61,78
Argamassa LAB	TP	6,70	12,01	16,03
	TR	40,77	55,28	65,76
Argamassa D	TP	5,59	10,43	13,92
	TR	34,60	43,25	63,31
Concreto Natural	TP	7,52	21,19	24,48
	TR	26,97	43,34	58,93

Em posse destes resultados de resistência, é possível determinar os parâmetros “p” e “q” para todos os agregados utilizados neste estudo, com auxílio do software *Betonlab Pro 3*, que é responsável pela calibração destes parâmetros. Os valores obtidos para “p” e “q” são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas para calibração de “p” e “q”

Agregados	Parâmetros	
	“p”	“q”
Areia Natural	1,1256	0,00164
Areia LAB	2,3509	0,02741
Areia D	1,1902	0,02249
Brita 0	1,4048	0,00884

A Brita é o agregado de maior resistência, seguida pela areia natural e areias recicladas, pois quanto mais próximo de zero o valor de “q” estiver, maior será a resistência do agregado. Em relação ao parâmetro “p”, este indica que os agregados reciclados possuem melhor aderência, possivelmente devido à maior porosidade e rugosidade destes agregados em relação aos naturais, sendo a Areia LAB a que possui melhor aderência.

A Equação 3.7 apresenta outra forma de determinar os parâmetros “p” e “q” e a partir dela, pode-se observar que quanto menor o valor que “q” maior a resistência do agregado e quando maior o valor do parâmetro “p”, maior a aderência do agregado.

$$p = \frac{1}{f_{cm} \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14f_{c_g}} \right)} \quad (3.7)$$

$$q = \frac{p}{2,14f_{c_g}}$$

Onde,

f_{cm} é a resistência da matriz, em MPa;

f_c é a resistência do concreto, em MPa;

f_{c_g} é a resistência à compressão do agregado, em MPa;

p é o parâmetro que trata da interface pasta-agregado, adimensional;

q é o parâmetro relacionado à resistência intrínseca do agregado, em MPa-1.

3.3.10 Elevação adiabática de temperatura

Os calorímetros adiabáticos apresentados na Figura 3.13-a, foram utilizados para a realização do ensaio de elevação adiabática de temperatura. O mecanismo do calorímetro consiste em um recipiente (Figura 3.13-b) onde o concreto é colocado e, posteriormente, este recipiente é parafusado de maneira que não haja entrada de água no mesmo. Assim, ele é inserido em um banho que, a partir de uma resistência elétrica, acompanha a temperatura do concreto conforme ela aumenta com as reações de hidratação, fazendo com que a temperatura do banho e do concreto permaneçam iguais durante todo o ensaio de calorimetria. Os calorímetros garantem a homogeneidade de temperatura com auxílio de agitadores que estão inseridos no sistema. Uma curva é gerada no software do calorímetro a partir da evolução de temperatura no ensaio, quando esta curva passa a ser estável, o ensaio é concluído e os dados de elevação adiabática podem ser analisados.



(a)



(b)

Figura 3.13 – Ensaio de elevação adiabática: (a) calorímetros adiabáticos; (b) recipiente com o concreto a ser ensaiado;

3.3.11 Abatimento de tronco de cone

Esta propriedade do concreto no estado fresco tem o intuito de avaliar a trabalhabilidade da mistura. Este ensaio é realizado antes da moldagem seguindo as diretrizes da NBR NM 67 (1998) e seu resultado é comparado ao gerado pelo software *Betonlab Pro 3* utilizado na dosagem. Para medição do abatimento, o concreto é compactado em três camadas com 25 golpes distribuídos uniformemente em cada uma delas, o molde é retirado na direção vertical e o abatimento é medido com auxílio de uma régua (Figura 3.14)



Figura 3.14 – Ensaio de abatimento de tronco de cone

3.3.12 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para 4 corpos de prova de 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Esta etapa do trabalho ocorreu no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LabEST), da COPPE/UFRJ e teve como principal foco analisar as propriedades mecânicas dos concretos. Todos os corpos de prova foram ensaiados na prensa *Shimadzu*, modelo *UH-F250Kn* (Figura 3.15), de acordo com as determinações da NBR 5739 (2007).



Figura 3.15 – Ensaio resistência à compressão axial na prensa *Shimadzu*, modelo *UH-F250Kn*

Os concretos e argamassas produzidos para calibração dos parâmetros “p” e “q” do software *Betonlab Pro 3* foram ensaiados em 3 idades (1, 7 e 28 dias), com velocidade de carregamento 0,3 mm/min. Os concretos produzidos para o estudo de compensação de água de absorção dos agregados miúdos reciclados utilizaram esta mesma velocidade de carregamento, porém foram ensaiados apenas aos 7 dias de idade.

Os ensaios de resistência à compressão para os concretos obtidos a partir da dosagem otimizada pelo programa, foram realizados para 4 corpos de prova de cada classe e percentual, em idades previamente definidas (1, 7 e 28), com velocidade de carregamento de 0,1 mm/min. A utilização de transdutores elétricos (LVDT) conectados à região central dos corpos de prova, possibilitou a medição dos deslocamentos longitudinais nos mesmos e obtenção do comportamento tensão *versus* deformação, a partir desta curva é possível calcular o módulo de elasticidade com uso da Equação (3.8), de acordo com a NBR 8522 (2003).

Os sinais de força e deslocamento foram registrados pelo sistema de aquisição de dados “ADS 2000”, de 16 bits, da marca Lynx, com o auxílio do software AQdados.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.8)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade, (GPa);

σ_2 é a tensão de compressão correspondente a 40% da carga última, (MPa);

σ_1 é a tensão de compressão correspondente à deformação axial, ε_1 , de $5 \cdot 10^{-5}$, (MPa);

ε_2 é a deformação axial produzida pela σ_2 , ($\mu\varepsilon$);

ε_1 é a deformação axial igual a $5 \cdot 10^{-5}$, ($\mu\varepsilon$).

3.3.13 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi proposto pelo pesquisador Fernando. L. B. Carneiro em 1943 e é conhecido devido à sua fácil execução quando comparado ao ensaio de tração direta. O ensaio consiste na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico (estado plano de deformação). Assim, este ensaio foi realizado seguindo as diretrizes da NBR 7222 (2011).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o ensaio de compressão diametral, quando comparado com o ensaio de tração direta, superestima a resistência à tração do concreto de 10% a 15%.

Para este ensaio os corpos de prova foram divididos em 2, obtendo dimensões aproximadas de 75 mm de diâmetro e 75 mm de altura. Na tração por compressão diametral, ele é submetido à um carregamento de compressão ao longo de duas diretrizes situadas em um mesmo plano diametral. Estes corpos de prova são posicionados na prensa entre duas chapas de madeira de comprimento igual à geratriz do cilindro.

Os ensaios foram realizados em 4 corpos de prova de cada mistura aos 28 dias de idade, em prensa servo-controlada *Shimadzu, modelo UH-F1000kN*, com velocidade de carregamento de 0,1 mm/min. O posicionamento do corpo de prova pode ser visto na Figura 3.16 que apresenta a execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Figura 3.16 – Ensaio resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação (3.9).

$$\sigma_t = \frac{2.F_r}{D.L.\pi} \quad (3.9)$$

Onde,

σ_t é a resistência à tração por compressão diametral;

F_r é a carga de ruptura;

D é o diâmetro do corpo-de-prova;

L é a espessura do corpo-de-prova.

3.3.14 Absorção total e massa específica

Para realização do ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica, primeiramente, os corpos de prova, com 28 dias de idade, foram secos em estufa mantida em temperatura constante e igual a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ até atingirem constância de massa. Em seguida, estes foram pesados e imersos em um recipiente contendo água (Figura 3.14-a), durante 72 horas e eram realizadas determinações de massa decorridas 24 h, 48 h e 72 h de imersão. Por fim, as amostras foram colocadas um recipiente cheio d'água e progressivamente levado à ebulição (Figura 3.17-b). Este ensaio foi realizado seguindo os procedimentos descritos na NBR 9778 (2005) e foram ensaiados 4 corpos de prova cilíndricos (75 mm de diâmetro e 150 mm de altura) para cada mistura.



(a)



(b)

Figura 3.17 – Ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica: (a) corpos de prova imersos em água; (b) processo de fervura;

A absorção total, o índice de vazios e a massa específica podem ser calculados pelas Equações (3.10), (3.11) e (3.12).

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.10)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.11)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.12)$$

Onde,

A é a absorção total de água, (%);

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água com superfície seca (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

I_v é o índice de vazios, em porcentagem;

m_i é a massa da amostra saturada e imersa em água (g);

ρ_s é a massa específica seca (g/cm³).

3.3.15 Absorção total de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado seguindo as prescrições da NBR 9779 (2012), assim, foram utilizados 4 corpos de prova de dimensões 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura, para cada mistura, com idade de 28 dias. Após serem secos em estufa à temperatura de 60°C±5°C, os corpos de prova tiveram a face lateral selada com filme

plástico (Figura 3.18-a) e fita impermeável de alumínio para evitar a evaporação de água pela face e para garantir o fluxo unidirecional. Em seguida, foram posicionados sobre suportes em um recipiente onde o nível de água é mantido constante e igual a 5 mm acima da base da amostra (Figura 3.18-b). Foram realizadas leituras até 28 dias após o início do ensaio e a absorção capilar foi monitorada pelo ganho de massa no tempo.



(a)



(b)

Figura 3.18 – Ensaio de absorção total de água por capilaridade: (a) corpos de prova selados com filme plástico; (b) corpos de prova durante o ensaio de absorção por capilaridade;

A absorção total de água por capilaridade pode ser obtida a partir da Equação (3.13)

$$A_c = \frac{M - M_s}{S} \quad (3.13)$$

Onde,

A_c é a absorção de água por capilaridade, (g/cm²);

M é massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, (g);

M_s é a massa do corpo de prova seco em estufa, (g);

S é a área da seção transversal, (cm²).

A absorção em função do tempo ocorre em dois estágios. No primeiro deles, conhecido como estágio de absorção, o ganho de massa de água com o tempo é linear, com declividade S_1 , e o fluxo de água ocorre nos poros maiores. Já no segundo estágio, denominado de estágio de saturação o ganho de massa com o tempo é não linear, com declividade S_2 , e o fluxo de água ocorre nos poros menores. Estes estágios são

representados pelas inclinações das duas retas apresentadas na Figura 3.19 e o ponto de mudança na declividade da curva entre os dois estágios é denominado “ponto de transição (P_T)”.

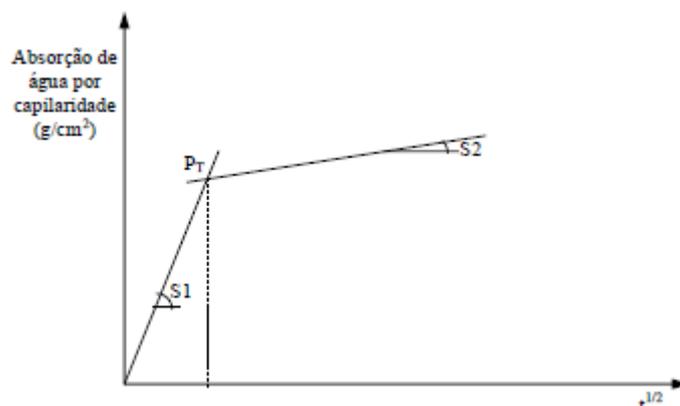


Figura 3.19 – Curva típica de absorção total de água por capilaridade x raiz quadrada do tempo (BALTHAR, 2010)

3.3.16 Retração por secagem

Este ensaio teve como objetivo principal avaliar as variações, dimensionais e de massa das misturas, motivadas pela eliminação da água contida em seu interior. Assim, para cada mistura, foram moldados três corpos de prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm com dois pinos posicionados nas faces quadradas, um de cada lado. A distância entre os pinos foi medida e os concretos colocados na fôrma e desmoldados após 24 horas. Estes, foram mantidos em cura úmida durante 28 dias e, posteriormente, levados à um ambiente com temperatura e umidade relativa controladas ($T=21\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $UR=60\%\pm 5\%$) e as amostras foram armazenadas e monitoradas nesse ambiente durante um período de 90 dias.

As leituras de comprimento foram realizadas em um aparato constituído por uma base metálica acoplada a um relógio comparador digital na parte superior com precisão de 0,001 mm e encaixe para posicionar a amostra verticalmente, como mostra a Figura 3.20-a. Antes da realização das leituras de comprimento, o relógio comparador era zerado com o auxílio de uma barra de invar de 250 mm de comprimento, utilizada como referência. As medidas de massa foram feitas em uma balança analítica (Figura 3.20-b).



(a)



(b)

Figura 3.20 – Ensaio retração por secagem: (a) leitura do comprimento no relógio comparador; (b) pesagem do corpo de prova;

Os cálculos das variações de comprimento dos corpos de prova foram realizados com base na ASTM C1012 (2013) através da Equação 3.14.

$$\Delta L_t = \frac{L_{sss,t} + L_{sss,i}}{L_{inv}} \times 100 \quad (3.14)$$

Onde,

ΔL_t : variação de comprimento no tempo t;

$L_{sss,t}$: comprimento do corpo de prova na condição saturada superfície seca determinada no tempo t;

$L_{sss,i}$: comprimento do corpo de prova na condição saturada superfície seca inicial;

L_{inv} : comprimento nominal da barra invar de 250 mm.

A perda de massa é dada com uma relação entre as diferenças de massas e a massa inicial da amostra, dada pela Equação 3.15.

$$W = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (3.15)$$

Onde

W é a perda de massa;

m_i é a massa inicial da amostra após 28 dias de cura em água, (g);

m_f é a massa da amostra, com leituras sucessivas no tempo, (g).

3.3.17 Penetração acelerada de íons cloreto

Para execução do ensaio de penetração acelerada por íons cloreto, foram produzidos três cilindros de concreto de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura para cada mistura e o ensaio foi realizado de acordo com a ASTM C1.202 (2010).

Após 28 de cura úmida, as laterais das amostras foram seladas com resina epóxi (*SikaDur 32*®) e, depois de secas, colocadas em um dessecador onde se fez vácuo sob pressão de 50 mmHg por 3 horas. Em seguida, a torneira conectada ao dessecador foi ligada e ele foi preenchido até que as amostras ficassem totalmente imersas em água. Fez-se vácuo novamente por mais uma hora e as amostras permaneceram do dessecador por mais 18 horas até serem retiradas, afim de garantir a saturação completa dos poros, esta etapa do ensaio está ilustrada na Figura 3.21.



Figura 3.21 – Sistema para preparação da amostra do ensaio de penetração acelerada de íons cloreto

Logo após a retirada do cilindro do dessecador, ele é posicionado entre duas células de acrílico (Figura 3.22-a), estas células são preenchidas com soluções distintas. Assim, uma das faces da amostra fica em contato com cloreto de sódio (3%, em massa) e a outra com hidróxido de sódio (0,3 N) e os terminais de cada célula foram ligados a um circuito elétrico de forma que a face imersa em NaCl estaria ligada ao terminal negativo e a face

imersa em NaOH ao terminal positivo. O corpo de prova foi submetido a uma diferença de potencial de 60 V por um período de 6 horas, ao longo da qual mediu-se a corrente elétrica passante em intervalos regulares de 30 minutos, o equipamento pode ser visto na Figura 3.22-b.

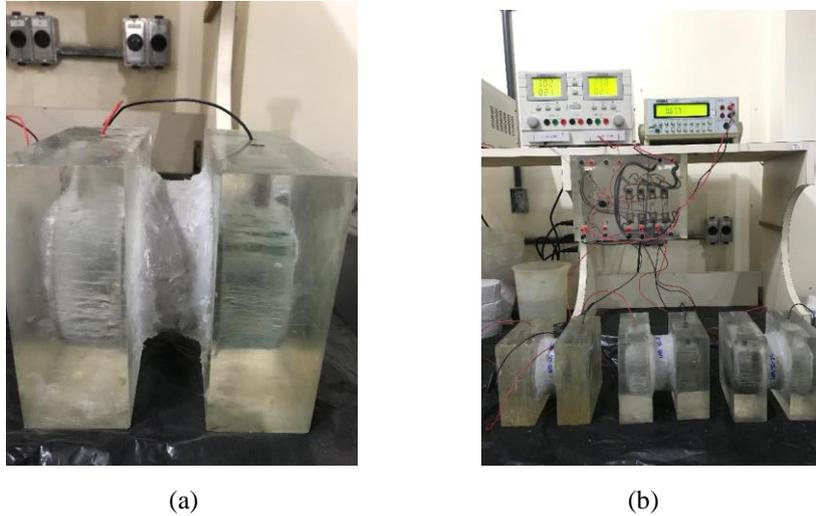


Figura 3.22 – Ensaio de penetração acelerada de íons cloreto: (a) amostra posicionada entre as células; (b) equipamento utilizado no ensaio de penetração acelerada de íons cloreto;

O objetivo deste equipamento é determinar a carga elétrica passante em cada amostra, assim, calcula-se a corrente elétrica (Lei de Ohm) e, conseqüentemente esta carga através da Equação (3.16).

$$Q = k_c \cdot (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + \dots + 2 \cdot I_{300} + 2 \cdot I_{330} + I_{360}) \quad (3.16)$$

Onde:

Q: carga elétrica, (C);

k_c : constante igual a 900 C/A;

I_n : corrente elétrica em n min após a aplicação da tensão, (A).

Um índice qualitativo de penetrabilidade dos íons cloreto pode ser observado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5- Índice qualitativo de penetrabilidade de íons cloreto

Carga passante (Coulomb)	Penetrabilidade de íons cloreto
>4.000	Alta
2.000 – 4.000	Moderada
1.000 – 2.000	Baixa
100 – 1.000	Muito baixa
<100	Negligenciável

3.4 Caracterização dos Materiais

3.4.1 Cimento

O cimento selecionado para o estudo foi o de alta resistência inicial, CPV-ARI (Figura 3.23), fornecido pela LafargeHolcim. A massa específica obtida para esse cimento foi de $3,17\text{g/cm}^3$ e sua composição química está apresentada na Tabela 3.6. Em seguida apresenta-se sua curva granulométrica na Figura 3.24.



Figura 3.23– Cimento Portland CPV

Tabela 3.6 – Propriedades do cimento Portland CPV-ARI

Propriedades físicas e mecânicas		CPV-ARI	Composição Química	
Massa específica (g/cm³)		3,17	CaO	65,63%
Compacidade		0,59	SiO ₂	15,37%
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	27,7 (± 4,2)	Al ₂ O ₃	5,78%
	7 dias	42,5 (± 1,4)	SO ₃	3,95%
	28 dias	48,9 (± 2,7)	Fe ₂ O ₃	3,23%
			K ₂ O	1,01%
			SrO	0,42%
			TiO ₂	0,27%
			MnO	0,15%
			CuO	0,01%
			ZnO	0,01%
			LOI*	4,17%
			*Perda ao fogo	
Propriedades granulométricas		CPV - ARI		
D₉₀ (µm)		38,9		
D₅₀ (µm)		14,8		
D₁₀ (µm)		3,4		

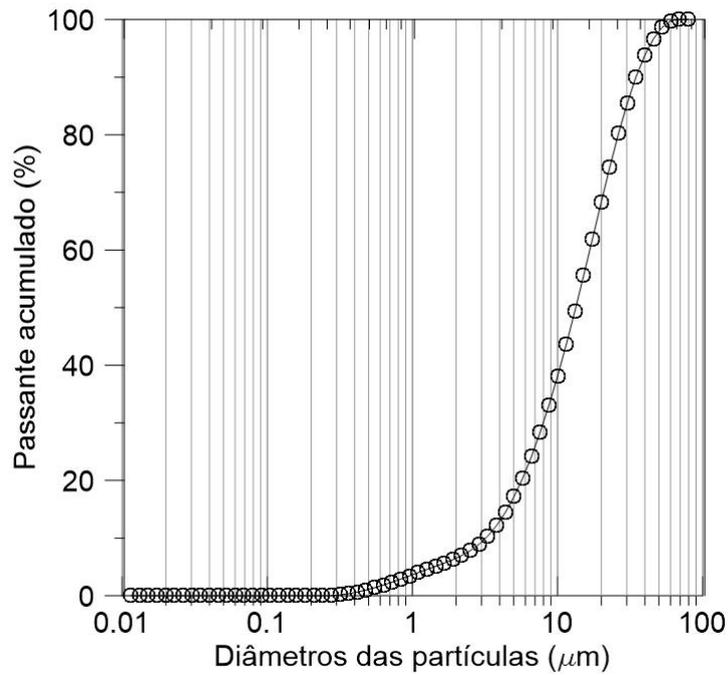


Figura 3.24– Curva Granulométrica do Cimento Portland CPV

4.4.2 Superplastificante

O aditivo químico utilizado nesta pesquisa foi o superplastificante Glenium 51 (Figura 3.25), produzido pela empresa BASF. O seu uso aumenta a trabalhabilidade do concreto, sem alterar o tempo de pega, e, conseqüentemente, reduz a quantidade de água utilizada na mistura. Suas especificações são fornecidas pela ficha técnica disponibilizada pelo fabricante e estão inseridas na Tabela 3.7. E o resultado de compatibilidade está apresentado na Figura 3.26, indicando 0,4 como o ponto de saturação.



Figura 3.25 – Superplastificante Glenium 51

Tabela 3.7 – Características do Glenium 51 de acordo com o fabricante

Dados Técnicos	Características
Tipo	Éter policarboxílico
Aparência	Líquido branco turvo
Ph	5,0 – 7,0
Densidade (g/cm ³)	1,067 – 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 – 31,5

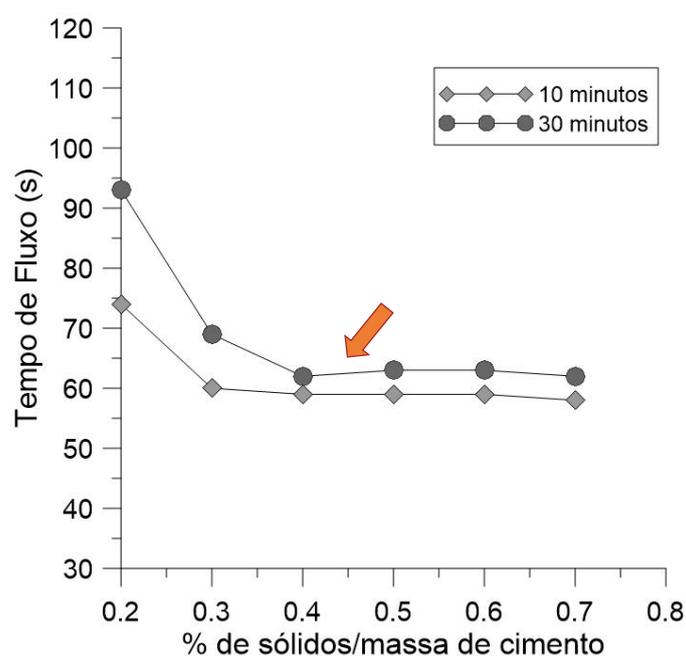


Figura 3.26– Ponto de saturação do superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI

3.4.3 Água

A água utilizada para a produção das argamassas e concretos deste trabalho, é proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro

3.3.4 Agregados

A brita 0 natural (fração de 4,75 a 9,5 mm) utilizada neste trabalho é de origem granítica e proveniente da Pedreira BritaBrás no Rio de Janeiro. Enquanto o agregado miúdo natural é uma areia quartzosa, proveniente do Rio Guandu, situado no Rio de Janeiro.

Os agregados miúdos reciclados utilizados neste estudo possuem duas origens, um foi produzido no laboratório (Areia LAB) e a outra é proveniente de resíduos de demolição (Areia D). Estes agregados estão apresentados nas Figura 3.27-a a Figura 3.27-d. Além disso, foi utilizada a areia produzida no laboratório sem que fosse feita a separação na peneira de 0,150 mm (LAB_F), para esta, foram assumidas as mesmas propriedades da Areia LAB.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.27– Materiais utilizados: (a) Brita 0 Natural; (b) Areia Natural; (c) Areia LAB; (d) Areia D

Os resultados da última etapa de peneiramento, responsável pela separação entre areia e finos menores que 0,150 mm, são apresentados na Figura 3.28.

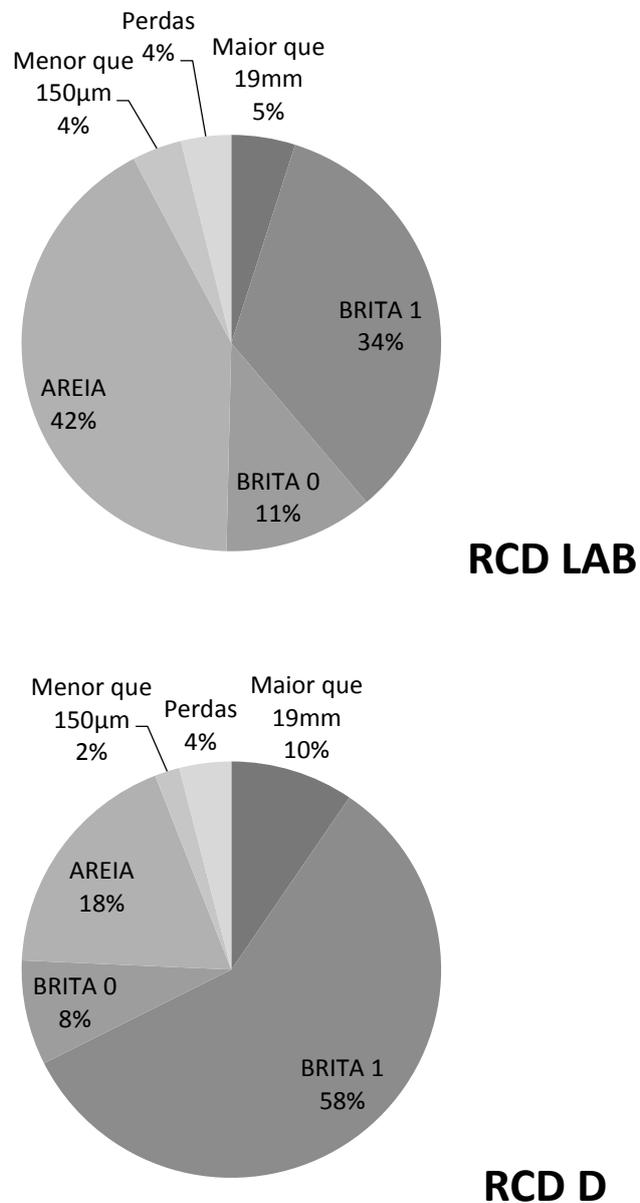


Figura 3.28 – Resultado final do processo de beneficiamento

A Figura 3.28 deixa claro que mesmo que o processo de beneficiamento seja o mesmo para o processamento do material, há outros fatores que influenciam nas frações granulométricas geradas, como o material de origem, por exemplo. O RCD LAB gerou mais que o dobro de agregado miúdo quando comparado ao RCD D, que por sua vez, gerou uma grande quantidade de brita 1. Ainda assim, a areia representa o segundo

agregado mais gerado pelo RCD D. Estes resultados validam a relevância deste estudo, uma vez que os agregados graúdos de concreto são o maior foco do beneficiamento atualmente, enquanto os agregados miúdos permanecem sem destinação.

As propriedades obtidas estão descritas na Tabela 3.8 e os resultados dos ensaios de granulometria na Figura 3.29.

Tabela 3.8 – Características dos agregados

Propriedades	Agregado miúdo			Agregado Graúdo
	Areia Natural	Areia LAB LAB_F	Areia D	Brita Natural
Massa específica g/cm ³	2,58	2,43	2,45	2,61
Absorção Total (%)	0,57	4,4	6,9	1,16
Compacidade	Classe 1	0,672	0,523	0,544
	Classe 2	0,616	0,535	0,548
	Classe 3	0,625	0,602	0,560
Pasta Aderida (%)	-	32,8	24,4	-

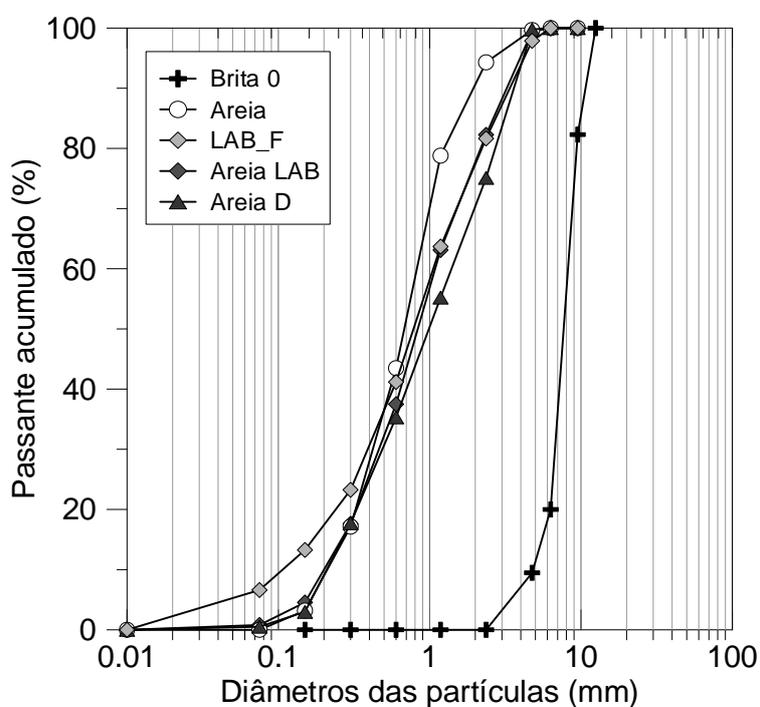


Figura 3.29– Curvas granulométricas dos agregados utilizados

Como era esperado, os resultados de absorção total das areias recicladas são consideravelmente mais elevados que a da areia natural, sendo a Areia D ainda mais absorvente que a LAB. Então, enquanto os agregados naturais tendem a absorver pouca quantidade de água, os agregados finos reciclados absorvem grandes quantidades, especialmente devido à quantidade de pasta de cimento aderida a esses agregados.

Os valores de massa específica encontrados para as areias recicladas são menores quando comparado ao valor do agregado miúdo natural. Apesar da menor massa específica, geralmente, ser associada à uma maior absorção, não acontece isso com estes materiais, já que a Areia D possui maior absorção que a Areia LAB e maior massa específica. Sendo o ensaio de absorção, um ensaio que avalia porosidade aberta (porosidade acessível à água), o agregado pode possuir porosidade fechada, onde a água não tem acesso aos poros e os mesmos não possuem peso, esta última, tende a diminuir o valor da massa específica. Diante disto, os resultados de absorção e massa específica podem indicar que os vazios contidos na Areia LAB, possivelmente, possuem uma penetrabilidade menor que os vazios da Areia D. Assim, ainda que a massa específica da Areia LAB seja menor, por conter mais poros, estes podem não apresentar conexão uns com os outros, diminuindo a penetrabilidade de água no interior do grão. Os grãos que possuem maior compacidade, são os da areia natural e a classe 3 é a que proporciona maior empacotamento para todos os agregados, com exceção da areia natural, que tem sua maior compacidade na classe 1.

A distribuição granulométrica mostra que o agregado miúdo natural tem quantidades maiores de partículas menores, quando comparadas aos agregados reciclados. A Areia D possui grãos mais grossos que a Areia LAB, e esta característica assim como as demais, são resultado tanto das propriedades dos concretos de origem quanto do processo de beneficiamento. A LAB_F, naturalmente, possui quantidade significativa de finos, pois esta não foi submetida ao peneiramento para retirada dos mesmos.

De modo geral, a composição granulométrica dos agregados reciclados costuma ser um pouco mais grossa que dos agregados naturais, isso tanto para agregados graúdos quanto para miúdos (AMARIO, 2015).

A absorção de água no tempo para os agregados miúdos reciclados estudados é mostrada na Figura 3.30, nota-se que quase 80% da água é absorvida nos primeiros 5 minutos tanto

para Areia LAB quanto para Areia D. Após 10 minutos, atinge-se 90% da absorção total e cresce ligeiramente até atingir 100% da absorção obtida no ensaio de absorção total.

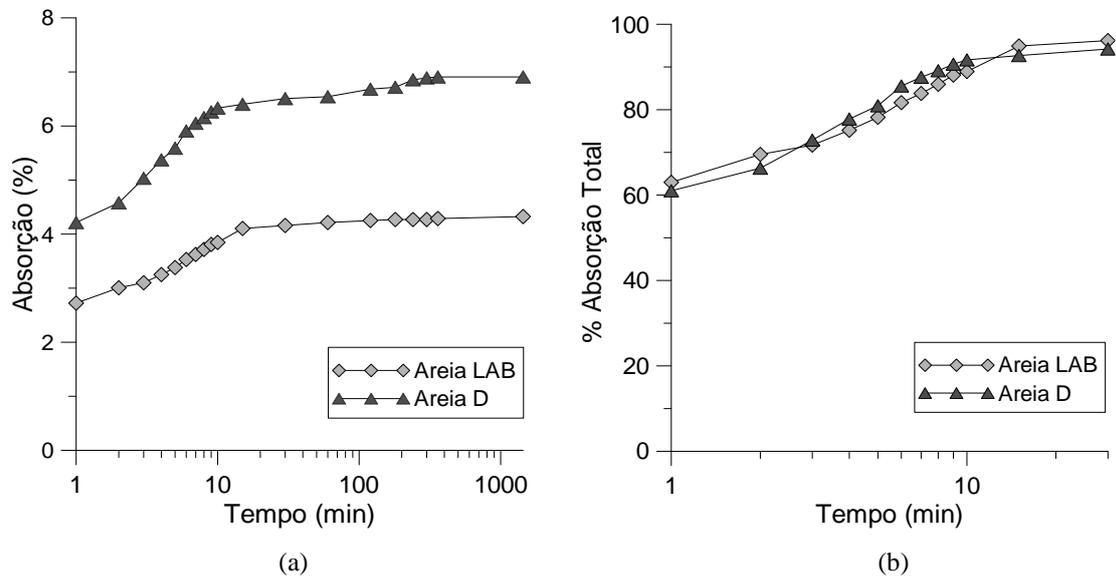


Figura 3.30 – Ensaio de absorção em função do tempo: (a) curva completa da absorção total durante 24 horas de ensaio; (b) percentual de água absorvida pelos agregados nos 30 primeiros minutos de ensaio;

O percentual de pasta aderida medida para os agregados miúdos, mostrado na Tabela 3.8, pelo método ácido, está diretamente relacionado à absorção total (Figura 3.28-a). Os agregados reciclados, que, naturalmente, possuem pasta aderida ao grão, tem maior absorção que agregados naturais e essas evidências demonstram que a presença da pasta tende a aumentar a porosidade dos agregados. Por outro lado, o valor de absorção para Areia D (6,9%) é maior que o da Areia LAB (4,4%) e a quantidade de pasta aderida é menor para a Areia D (24,4%) quando comparada a Areia LAB (32,8%). Sendo assim, como elas não são da mesma origem, isto pode indicar que o resíduo que originou o agregado D é mais poroso e, provavelmente, derivou-se de um lote de concreto de qualidade inferior em termos de resistência à compressão, já que com menor porcentagem de pasta aderida, este agregado ainda absorve mais que a Areia LAB. Uma série de valores apresentados para absorção e pasta aderida estão apresentados na Figura 3.31-a, afim de estabelecer uma linha de tendência. Da mesma forma, a Figura 3.31-b mostra a correlação entre a massa específica e a absorção de agregados miúdos reciclados.

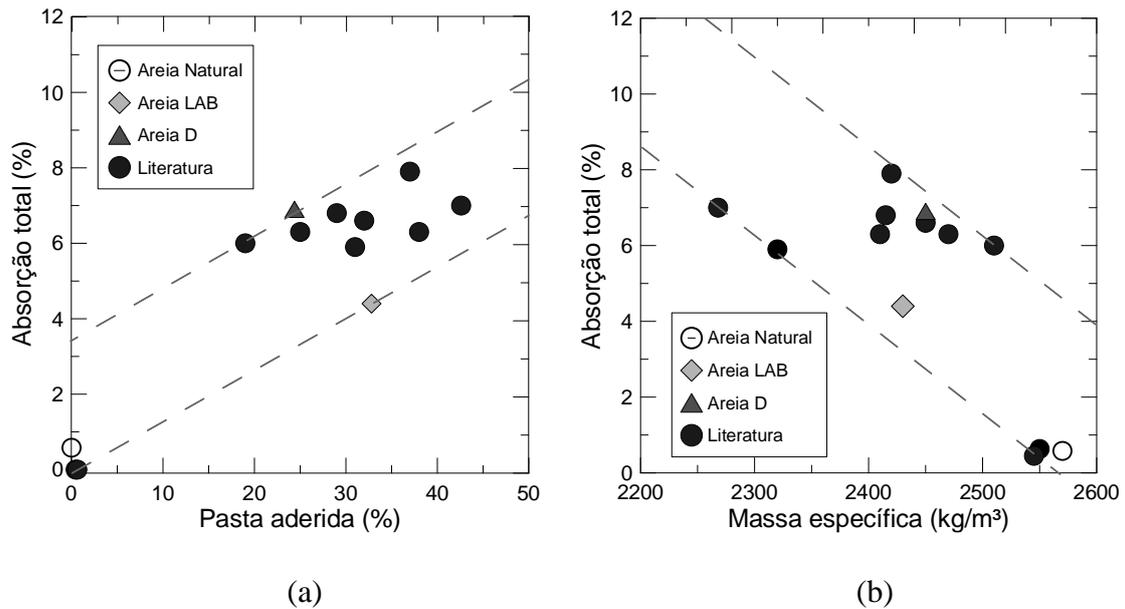


Figura 3.31 – Correlação entre: (a) absorção total dos agregados miúdos e o percentual de pasta aderida ao grão; (b) absorção total dos agregados miúdos e massa específica;

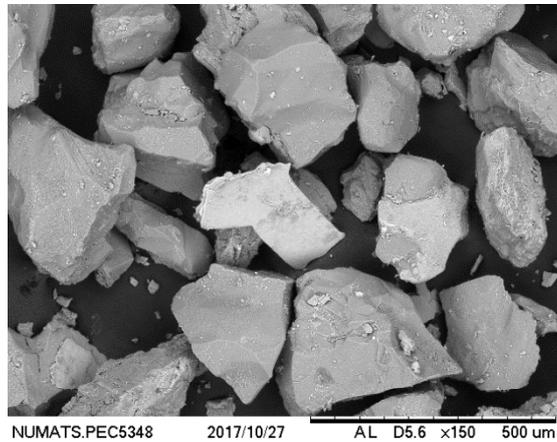
Julião, 2016
 Evangelista e Brito, 2010
 Fan *et al.*, 2016
 Zhao *et al.*, 2013
 Florea e Brouwers, 2013

Percebe-se que com o aumento da pasta aderida, normalmente, tem-se o aumento da absorção devido a quantidade de vazios da areia reciclada. Enquanto isso, a massa específica, geralmente, aumenta com a diminuição da absorção dos agregados miúdos de concreto, pois com uma maior quantidade de poros no grão, a tendência é que mais água seja absorvida, ao passo que o grão deverá ser mais leve, possuindo menor massa específica. No entanto, como foi mencionado anteriormente, deve-se considerar a conectividade destes poros no interior do grão, pois poros menos conectados entre si diminuem a absorção e a massa específica.

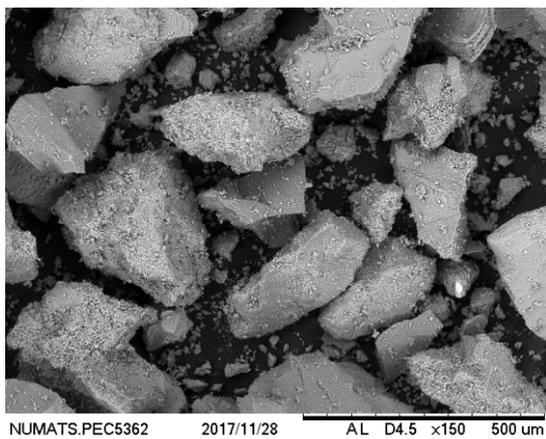
Estas correlações podem ser utilizadas como indicadores de qualidades das areias, pois quanto maior a absorção, possivelmente, mais inferior em termos de resistência, é o concreto de origem da mesma. E, conseqüentemente, pior é a qualidade do AMRC.

Finalmente, ao analisar as imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (Figura. 3.32-a a Figura 3.32-c) é possível notar que a distribuição e a forma do grão da Areia LAB são mais semelhantes aos grãos da Areia Natural, quando comparados ao outro agregados miúdo reciclado. A Areia D possui partículas de tamanhos bastante variados, confirmando os dados na curva granulométrica. Como também pode ser

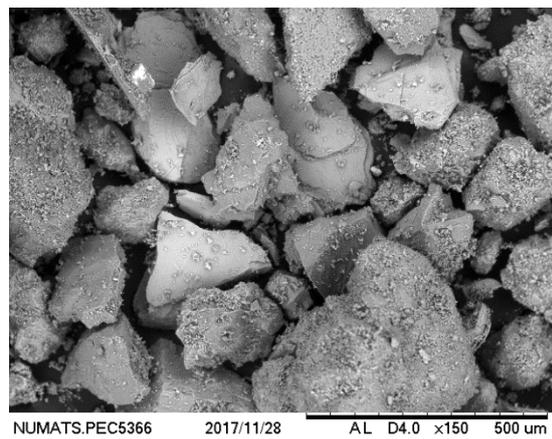
observado, a Areia D apresenta alguns grãos de quartzo praticamente sem pasta aderida, o que pode confirmar o ensaio de pasta aderida, onde esta areia possui menor quantidade de material residual aderido ao grão que a Areia LAB.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.32 – Imagens dos agregados miúdos geradas pelo microscópio eletrônico de varredura: (a) Areia Natural; (b) Areia LAB; (c) Areia D;

A Figura 3.33 apresenta os diferentes tipos de grãos que podem ser encontrados nas areias recicladas, na imagem da Areia LAB nota-se o grão de quartzo, grãos cobertos por pasta e grãos constituído puramente de pasta de cimento. A Figura 3.34 mostra a Areia D onde é possível perceber pequenos grãos de pasta e grãos om pasta aderida. A indicação 1 representa um grão coberto por pasta e a indicação 2, um grão de pasta.

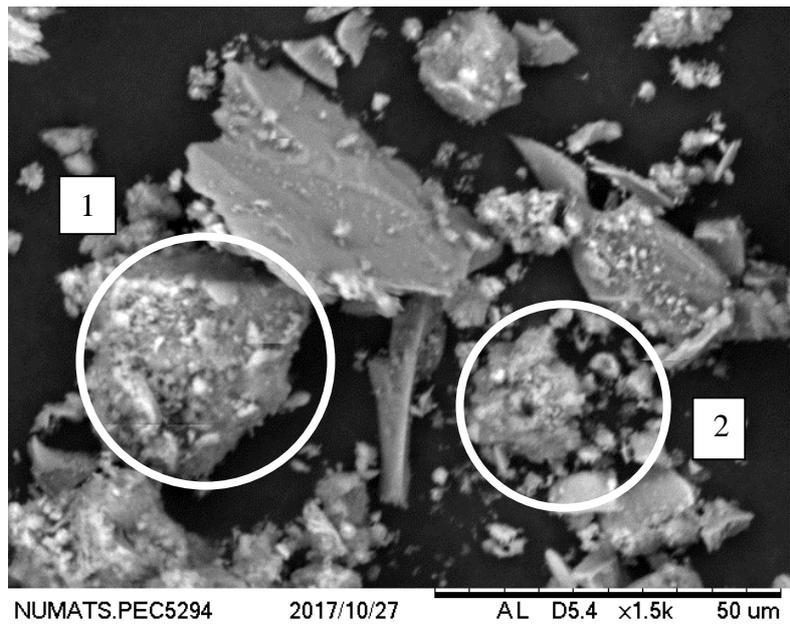


Figura 3.33 – Imagem ampliada da Areia LAB geradas pelo microscópio eletrônico de varredura

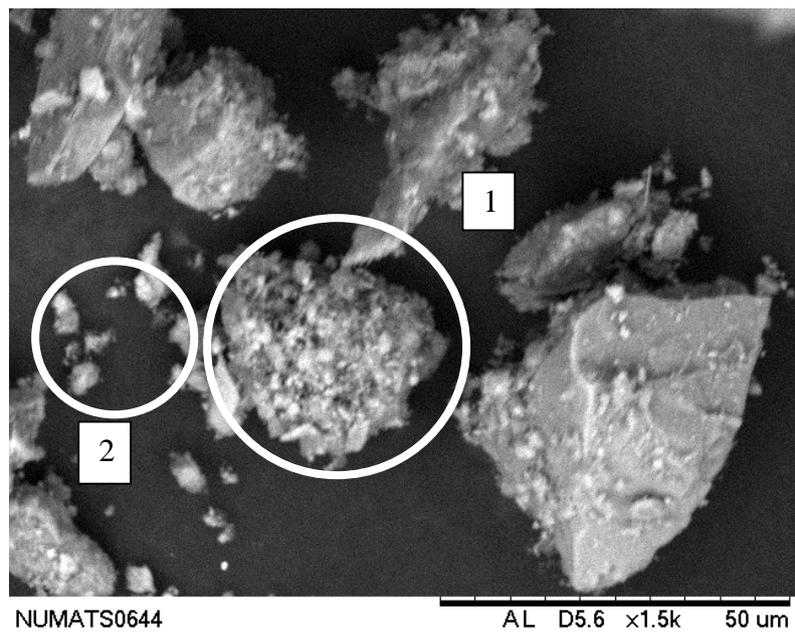


Figura 3.34 – Imagem ampliada da Areia D geradas pelo microscópio eletrônico de varredura

CAPÍTULO 4

4 DOSAGEM CIENTÍFICA, PRODUÇÃO E CURA DOS CONCRETOS

A dosagem realizou-se implementando os conceitos do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) desenvolvido por De Larrard, junto ao Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, Paris), e se baseia em uma teoria que esclarece o empacotamento de misturas secas para todos os componentes utilizados na dosagem de concretos. Para aplicação do MEC, foi utilizado o software *Betonlab Pro 3* que permite a inserção de dados relativos as propriedades dos componentes do concreto e a partir destes dados, otimiza os traços de acordo com o que o usuário deseja obter. No caso deste estudo, o programa foi utilizado para dosar duas classes de resistência (30 e 60 MPa) para cada uma das duas areias reciclada estudadas e, para cada classe, três percentuais de substituição (0%, 25% e 50%).

A primeira etapa da dosagem desta dosagem se deu a partir de ensaios de elevação adiabática, resistência à compressão axial e abatimento de tronco de cone, que tiveram como objetivo o estudo da compensação de água de absorção a ser adotada nas misturas contendo agregados reciclados. Em seguida, o resultado deste estudo de compensação foi utilizado para dosar os concretos produzidos neste trabalho.

4.1 Estudo da compensação da água de absorção do agregado miúdo reciclado no concreto

Primeiramente, para melhor compreensão do presente estudo, faz-se necessário a definição dos seguintes termos:

- Água livre: parcela da água, disponível na mistura, responsável pelas reações de hidratação e pela trabalhabilidade do concreto;
- Água de absorção: é a água que será absorvida pelos componentes do concreto (agregados graúdos e miúdos) durante a mistura, esta água não é contabilizada no cálculo do volume de concreto, pois ao final da mistura, terá absorvida pelos agregados;
- Água total: é definida como a água total que de fato é adicionada na mistura, pois é a soma da água livre com a água de absorção;

Este estudo é fundamental na dosagem de concretos reciclados, pois agregados reciclados de concreto tendem a absorver uma quantidade significativa de água, no entanto, durante a mistura, parte dos poros destes agregados são colmatados e o grão não absorve o correspondente à água de absorção, deixando mais água livre na mistura. Isto pode trazer consequências tanto nas propriedades no estado fresco, quanto nas propriedades no estado endurecido do concreto.

A Areia LAB foi escolhida para realização deste ensaio pois é uma areia controlada, de origem conhecida, produzida no próprio laboratório. E o resultado do estudo foi aplicado para as misturas contento tanto a Areia LAB quando a Areia D.

Sendo assim, baseado no estudo feito por Amario (2015) para concretos com agregado graúdo reciclado, foram produzidos quatro concretos (Tabela 4.1) que diferiram apenas na quantidade de água total da mistura. Os traços estão apresentados na Tabela 4.2, com o valor da água total utilizada na mistura e para todos os traços, exceto o de referência, foi utilizado 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado. Para todos os traços foram adicionados 180 litros/m³ de água livre e a água de absorção variou de acordo com a mistura (Tabela 4.3).

Tabela 4.1 – Descrição das misturas do estudo de compensação da água de absorção

Misturas	Descrição
Referência	Traço com agregados naturais, a água livre e a água de absorção dos agregados naturais foram adicionadas a mistura
60% Abs	A água livre, água de absorção da brita 0 natural e a quantidade de água correspondente à 60% da absorção total da areia reciclada são adicionadas no misturador
80% Abs	A água livre, água de absorção da brita 0 natural e a quantidade de água correspondente à 80% da absorção total da areia reciclada é adicionada no misturador
100% Abs	A água livre, água de absorção da brita 0 natural e a quantidade de água correspondente à 100% da absorção total da areia reciclada é adicionada no misturador

Tabela 4.2 – Traços do estudo de compensação da água de absorção

Misturas	Materiais (kg/m ³)					Água livre
	Cimento	Areia natural	Areia reciclada	Brita 0	Superplastificante	
Referência	400	880	-	900	1,84	180
60% Abs	400	-	840	900	1,84	180
80% Abs	400	-	840	900	1,84	180
100% Abs	400	-	840	900	1,84	180

Tabela 4.3 – Quantidade de água utilizada em cada traço do estudo de compensação da água de absorção

	Quantidade de água			
	Referência	60% Abs	80% Abs	100% Abs
Água livre	180,0	180,0	180,0	180,0
Água de Absorção				
Brita 0	10,4	10,4	10,4	10,4
Areia	5,0	20,2	26,9	33,6
Água total adicionada	195,5	210,6	217,3	224,0

O processo de hidratação é basicamente influenciado pela composição e consumo de cimento, relação água/cimento e a temperatura inicial de ensaio. Neste estudo, as misturas propostas possuem a mesma temperatura inicial no calorímetro e mesmo consumo de cimento. Assim, pode-se concluir que o que de fato influenciará a hidratação do concreto, representada pelas curvas de elevação adiabática de temperatura, é a quantidade de água total em cada uma destas misturas.

A Figura 4.1 apresenta os resultados de elevação adiabática de temperatura para as quatro misturas. A temperatura inicial dos ensaios foi de $23,0 \pm 1,0$ °C e o ensaio foi conduzido até que a temperatura fosse constante.

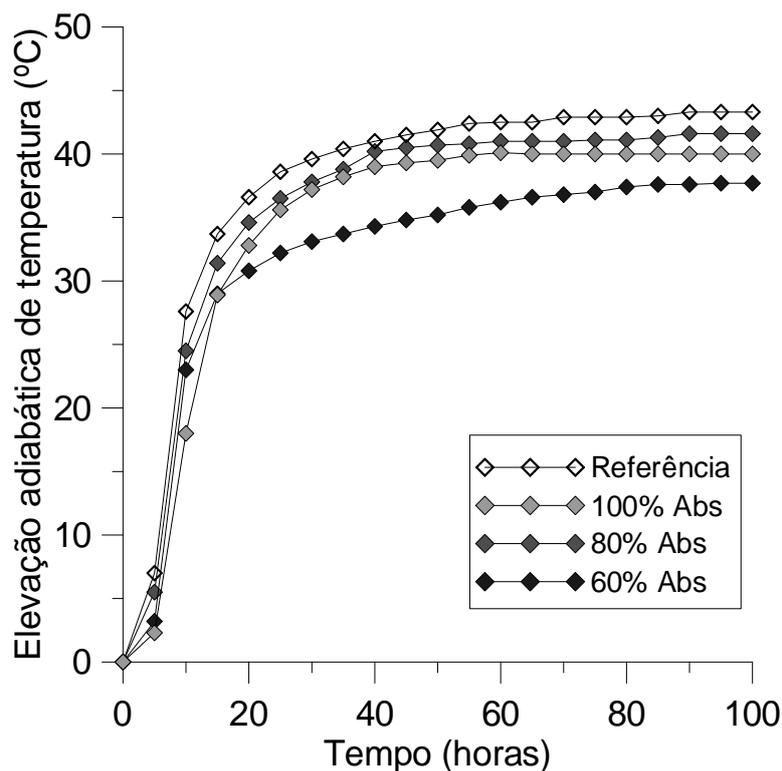


Figura 4.1– Elevação adiabática de temperatura no estudo da compensação de água de absorção dos agregados reciclados

A partir das curvas, é possível observar que, para todas as misturas, nas primeiras 20 horas a elevação de temperatura ocorreu rapidamente e após 80 horas de ensaio todas as misturas encontravam-se estáveis. Este aumento de temperatura intenso nas primeiras idades devido à liberação de calor, pode ser explicado pelo uso de um cimento de alta resistência inicial que tem seu processo de hidratação mais intenso no início da cura.

A quantidade de água total na mistura afetou diretamente o comportamento das curvas de elevação adiabática de temperatura e todos os concretos produzidos com agregado miúdo reciclado tiveram uma elevação adiabática menor em relação a mistura de referência produzida apenas com agregados naturais. Isto indica que a quantidade de água livre na mistura é maior do que a que de fato foi prevista, pois na presença dos outros materiais granulares, o agregado reciclado absorve uma quantidade de água menor do que a quantidade calculada a partir do ensaio de absorção. Segundo Amario (2015), parte da água denominada “água de absorção” é, na verdade, a “água livre” e as misturas com esses agregados reciclados passam a ter uma relação água/cimento maior do que a calculada inicialmente, afetando diretamente as demais propriedades avaliadas dos concretos.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone realizado nas misturas e os resultados de resistência à compressão axial aos 7 dias de idade.

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial das misturas do estudo de compensação da água de absorção

Misturas	Abatimento (mm)	Resistência (7 dias) (MPa)
Referência	65,0	42,9
60% Abs	30,0	47,9
80% Abs	60,0	43,3
100% Abs	165,0	40,4

A mistura 60% Abs apresenta uma cinética de hidratação mais lenta, como pode ser vista na curva de elevação adiabática, quando comparada às outras misturas. Este concreto possui o maior valor de resistência à compressão, o que indica uma redução na relação água/cimento e conseqüentemente, uma redução considerável na trabalhabilidade de terminada a partir do ensaio de abatimento.

O concreto produzido com 100% da água de absorção dos agregados reciclados, possui curva de elevação adiabática próxima a do concreto de referência, porém sua cinética de hidratação ainda é mais lenta que a da mistura convencional. Sua resistência à compressão é inferior e abatimento significativamente mais elevado que as demais misturas, o que leva a crer que a quantidade de água adicionada para absorção foi maior do que a quantidade que de fato foi absorvida.

Por fim, a mistura 80% Abs possui propriedades semelhantes ao concreto de referência, com curva de elevação adiabática, resistência à compressão aos 7 dias e abatimento do tronco de cone mais próximos da mistura Referência. Assim, a partir deste estudo, foi determinado que apenas 80% da água de absorção do agregado miúdo reciclado seria adicionado à mistura. Para isto, no software *Betonlab Pro 3*, é inserido na entrada de dados de absorção um valor correspondente à 80% da absorção total do agregado reciclado.

4.2 Dosagem com *Betonlab Pro 3*

O software *Betonlab Pro 3* foi utilizado para otimização dos traços de concreto e pela previsão das propriedades destes concretos baseado em um banco de dados produzido a partir das propriedades dos materiais a serem utilizados na pesquisa. Partindo dos princípios do MEC, a otimização foi realizada, visando compacidade máxima granular das misturas, para duas classes de resistência uma de 30 MPa (C30) e outra de 60 MPa (C60), tanto para Areia LAB quanto para a Areia D.

Além disso, neste trabalho, optou-se por selecionar um dos resíduos na fração menor que 4,75 mm, o LAB_F, para que fosse analisado seu comportamento em concreto. Assim, seria avaliado o potencial do uso do agregado miúdo de concreto tanto na fração normatizada quanto na fração sem prévia retirada dos finos (grãos menores que 150 µm), pois a similaridade dos efeitos destas frações no concreto reciclado poderia otimizar o processo de beneficiamento e tornar o uso deste ARC bem mais viável. Para produção deste concreto, preferiu-se o RCD LAB, por ter sido gerado sob condições conhecidas e controladas, e a classe escolhida foi a C30 por ser mais utilizada na indústria da construção civil. Adotaram-se as mesmas propriedades obtidas para Areia LAB, para utilização do LAB_F, com exceção da granulometria.

Para utilização do programa, foi necessário estabelecer algumas propriedades para otimização do traço, como mostra a Tabela 4.5. As quantidades de brita 0, areia e cimento foram estipuladas a partir de intervalos pré-determinados. No caso da brita 0, por exemplo, os valores foram escolhidos com o intuito de obter uma mistura bem argamassada e coesa, assim foram produzidos concretos com as simulações realizadas pelo programa, para que fosse possível definir o melhor intervalo em que se obteria as características desejadas. Já no caso da areia reciclada, os intervalos foram determinados de acordo com os percentuais de substituição propostos na pesquisa (25% e 50%). Estes percentuais foram fixados em intervalos (calculados em relação ao total de agregados), a fim de permitir que o programa dosasse da melhor maneira possível, sem se restringir a um único valor de substituição. A soma dos percentuais de agregado é igual a 100%, assim, automaticamente, o programa otimiza e fornece os valores em percentual e em kg/m³ de brita 0 natural, areia natural e agregado miúdo reciclado.

No que diz respeito ao cimento, estipulou-se que para as misturas da classe C30 a quantidade de cimento não deveria ultrapassar 330 kg/m³ e para as misturas da classe C60, este valor não deveria ser superior a 535 kg/m³. Estas restrições foram realizadas com o objetivo de evitar o alto consumo de cimento nos concretos.

Alguns estudos como o de Amario (2015), Rangel (2015), Velasco (2008) e Polisseni *et al.* (2017), mostraram que a faixa de abatimento determinada no software pelo usuário não era atingida experimentalmente. Sendo assim, optou-se por deixar este parâmetro livre, sem impor qualquer tipo de valor no *Betonlab Pro 3* e o abatimento de tronco de cone foi verificado experimentalmente para cada mistura dosada pelo programa, e este deveria ser igual a 100±20 mm para qualquer um dos concretos, este valor foi escolhido baseado na trabalhabilidade de concretos bombeáveis. Em casos onde o abatimento não obedeceu ao intervalo determinado, a mistura era dosada novamente pelo programa e tinha seu abatimento testado experimentalmente para a nova dosagem.

O teor de superplastificante a ser utilizado, inicialmente, foi determinado como sendo o ponto de saturação, ou seja, 0,4%. No entanto, os primeiros concretos produzidos apresentaram reologia não satisfatória. Assim, o teor foi fixado em 0,12% para os concretos de classe C30 e 0,10% para os de classe C60.

Tabela 4.5 – Parâmetros estabelecidos para dosagem do concreto reciclado

Parâmetros		Valores pré-determinados
Resistência à compressão (MPa)		30 e 60
Brita 0 Natural/Agregados		48% ≤ Brita ≤ 50%
Cimento	Classe C30	Cimento ≤ 330 kg/m ³
	Classe C60	Cimento ≤ 535 kg/m ³
Areia reciclada/Areia total	25% de substituição	23% ≤ Areia ≤ 27%
	50% de substituição	48% ≤ Areia ≤ 52%
Teor de superplastificante (%)	Classe C30	0,10
	Classe C60	0,12
Abatimento de tronco de cone experimental		100±20 mm
Propriedade otimizada	Compacidade máxima da mistura granular	

Para ambas as classes de resistência e para cada tipo de areia reciclada, foram realizadas simulações no programa, otimizando diferentes traços. Primeiramente o programa era deixado “livre” para dosar, ou seja, não eram inseridos valores pré-determinados para nenhum parâmetro. Nestas simulações, variava-se apenas o teor de agregado reciclado na mistura, assim a Tabela 4.6 e Tabela 4.7 apresentam a descrição de cada um dos traços produzidos nesta pesquisa.

Tabela 4.6 – Descrição dos traços da classe C30 utilizados na pesquisa

Traços	Descrição dos traços da classe C30
REF C30	Este é o traço de referência da classe C30. O programa era forçado a zerar a quantidade de areia reciclada e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 30 MPa.
LAB_F C30-25	O programa era forçado a colocar entre 23 e 27% do LAB_F na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 30 MPa.
LAB C30-25	O programa era forçado a colocar entre 23 e 27% da Areia LAB na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 30 MPa.
LAB C30-50	O programa era forçado a colocar entre 48 e 52% do Areia LAB na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 30 MPa.
D C30-25	O programa era forçado a colocar entre 23 e 27% da Areia D na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 30 MPa.

D C30-50 O programa era forçado a colocar entre 48 e 52% do Areia D na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 30 MPa.

Tabela 4.7 – Descrição dos traços da classe C60 utilizados na pesquisa

Traços	Descrição dos traços da classe C60
REF C60	Este é o traço de referência da classe C60. O programa era forçado a zerar a quantidade de areia reciclada e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 60 MPa.
LAB C60-25	O programa era forçado a colocar entre 23 e 27% da Areia LAB na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 60 MPa.
LAB C60-50	O programa era forçado a colocar entre 48 e 52% do Areia LAB na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 60 MPa.
D C60-25	O programa era forçado a colocar entre 23 e 27% da Areia D na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 60 MPa.
D C60-50	O programa era forçado a colocar entre 48 e 52% do Areia D na mistura e ficava livre para escolher a melhor composição de materiais de acordo com os parâmetros estabelecidos. A resistência aos 28 dias deveria ser igual a 60 MPa.

Na Tabela 4.8 são apresentadas as dosagens otimizadas pelo *Betonlab Pro 3* para classe C30 e selecionadas para serem produzidas neste trabalho. A seleção destes traços, diante das diversas simulações realizadas no programa, obedeceu-se aos critérios de melhor compacidade granular, consumo de cimento e similaridade entre os diferentes tipos de traço, para que os concretos pudessem ser comparáveis.

O percentual de areia reciclada é calculado pelo programa em relação à quantidade total de agregados.

Tabela 4.8 – Dosagens otimizadas pelo *Betonlab Pro 3* para classe C30

MATERIAIS	C30					
	REF	LAB_F	LAB		D	
	C30	C30-25	C30-25	C30-50	C30-25	C30-50
Brita 0	843,5	842,5	842,1	846,9	853,5	843,1
Areia Nat	906,8	691,5	696,4	490,2	705,8	488
Areia RCD	0	203,6	197,3	396,9	201,1	397,2
Cimento	329,3	324,4	324,5	312,3	318,5	329,6
Água	219,1	222,7	223,3	223,4	220,6	235,6
SP	1,25	1,05	1,24	1,19	1,21	1,25
SP (%)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
aef/c	0,62	0,62	0,63	0,63	0,62	0,61

Estes traços foram escolhidos devido à similaridade nas quantidades dos componentes que não são uma variável nesta pesquisa, como a brita 0 e o cimento. É possível observar que a variação é pequena para todos os parâmetros, o que possibilita uma comparação mais coerente das propriedades das misturas.

A Tabela 4.9, apresenta algumas propriedades das misturas da classe C30, fornecidas pelo programa.

Tabela 4.9 – Propriedade das misturas dosadas pelo *Betonlab Pro 3* para classe C30

Propriedades das misturas	C30					
	REF	LAB_F	LAB		D	
	C30	C30-25	C30-25	C30-50	C30-25	C30-50
Brita 0/AG (%)	48	48	48	48	48	48
Areia Natural/AG (%)	52	39,7	40	28	40	28
Areia Reciclada/AG (%)	0	12,3	12	24	12	24
Água livre (l/m³)	202,1	202,4	203,5	197,6	196,4	202
Ar incorporado (%)	1,5	2,0	1,9	2,5	1,9	2,0
Massa específica (kg/m³)	2300	2286	2285	2271	2354	2295
Abatimento (cm)	18,2	9,5	11,3	0	12,1	12,5
f_{c28} (MPa)	30	30	30	30	30	30
Compacidade dos grãos	0,7573	0,7736	0,7557	0,739	0,7657	0,7563

O programa considerou 48% de brita 0 uma quantidade ótima, visto que no traço onde o programa era deixado “livre”, sem ser forçado a colocar agregado miúdo reciclado na mistura, este foi o percentual dado na otimização. Sendo assim, o programa buscou sempre compor os outros traços para que seus percentuais fossem iguais ao da mistura tida como “ótima”, a referência.

Em relação ao percentual de areia reciclada nas misturas de concreto reciclado, tanto a Areia LAB quanto a Areia D possuem valores iguais em percentual para as respectivas substituições, 25% e 50%. Com 12% de areia reciclada, em relação ao total de agregados, para as misturas com “25%” de substituição, que corresponde à 24% (dentro do intervalo estabelecido entre 23 e 27%) de substituição em relação ao total de agregado miúdo. Enquanto que para os concretos com “50%” de substituição, este valor foi igual a 24%, que equivale a 48% de substituição em relação à areia total na mistura. O LAB_F foi o

púnico a possuir 12,3% de areia reciclada, que representa 24,6% de substituição em relação a areia da mistura.

A quantidade de água livre possui pouca variação entre as misturas, o que é fundamental, já que esta é a água que será utilizada no processo de hidratação e não para absorção dos agregados. Assim, os menores valores de água livre, são para as misturas com menor quantidade de cimento.

O abatimento fornecido pelo software variou bastante, porém isto já era esperado diante do que foi mencionado no trabalho a respeito desta propriedade que, geralmente, não possui compatibilidade com os dados experimentais.

A compacidade dos grãos é similar para as misturas, no entanto a menor compacidade pertence à mistura contendo 50% da Areia LAB e a maior compacidade à mistura LAB_F C30-25. A compacidade pode melhorar diversas propriedades do concreto, como resistência à compressão.

A Tabela 4.10 apresenta os traços dosados pelo software para as misturas da classe C60. Os critérios para escolha dos traços diante das possibilidades geradas pelo programa, foram os mesmos utilizados para escolha da classe C30.

Tabela 4.10 – Dosagens otimizadas pelo *Betonlab Pro 3* para classe C60

MATERIAIS	C60				
	REF	LAB		D	
	C60	C60-25	C60-50	C60-25	C60-50
Brita 0	784,3	780,6	782	788,2	786,9
Areia Nat	843,1	645,5	452,7	651,8	455,5
Areia RCD	0	182,9	366,5	185,7	370,7
Cimento	533	521,6	525	519,7	535
Água	197,5	208,2	207,5	207,1	207,9
SP	1,69	1,58	1,67	1,65	1,7
SP (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
aef/c	0,34	0,36	0,35	0,36	0,33

Nas misturas da classe de maior resistência, naturalmente, nota-se o aumento considerável do consumo de cimento e a alta redução na relação água/cimento em relação à classe C30. Como também a diminuição nas quantidades de brita 0, pois altos teores de brita podem afetar a resistência do concreto.

A relação água/cimento é semelhante para todos os traços, no entanto é igual para as misturas LAB C30-25 e D C30-25, isto pode indicar que, provavelmente, o comportamento destes concretos será similar.

A partir dos traços das misturas da classe C60, percebe-se também a similaridade e baixa variação entre as quantidades dos componentes do concreto e diante disto, as misturas tornam-se comparáveis entre si.

A Tabela 4.11 apresenta as propriedades de cada um destes traços selecionados para produção dos concretos de 60 MPa.

Tabela 4.11 – Dosagens otimizadas pelo *Betonlab Pro 3* para classe C60

Propriedades das misturas	C60				
	REF	LAB		D	
	C60	C60-25	C60-50	C60-25	C60-50
Brita 0/AG (%)	48	48	48	48	48
Areia Natural/AG (%)	52	40	28	40	28
Areia Reciclada/AG (%)	0	12	24	12	24
Água livre (l/m³)	184,7	190,1	184,1	185,1	176,9
Ar incorporado (%)	1,3	1,8	2,3	1,9	2,3
Massa específica (kg/m³)	2360	2345	2336	2354	2,358
Abatimento (cm)	14,1		0	9,5	0
f_{c28} (MPa)	30	30	30	30	30
Compacidade dos grãos	0,7736	0,7557	0,7399	0,7657	0,7563

O mesmo percentual de brita 0 considerado ótimo para as misturas da menor classe de resistência, foi considerado ótimo para as misturas da classe C60. Assim como os percentuais de Areia LAB e Areia D nos traços dosados, tanto para “25%” quanto “50%” de substituição, que permaneceram os mesmos em relação aos concretos da classe C30.

As quantidades de água livre dos traços escolhidos foram similares, no entanto para a mistura D C60-50 ela foi menor devido a relação água/cimento, também menor. Isto aconteceu, possivelmente, porque uma menor relação a/c seria necessária para aumento da resistência, compensando a qualidade do agregado.

A Figura 4.1 apresenta a relação entre a resistência à compressão teórica aos 28 dias e o consumo de cimento para todas as dosagens geradas pelo *Betonlab Pro 3* e mostradas na Tabela 4.8 e Tabela 4.10.

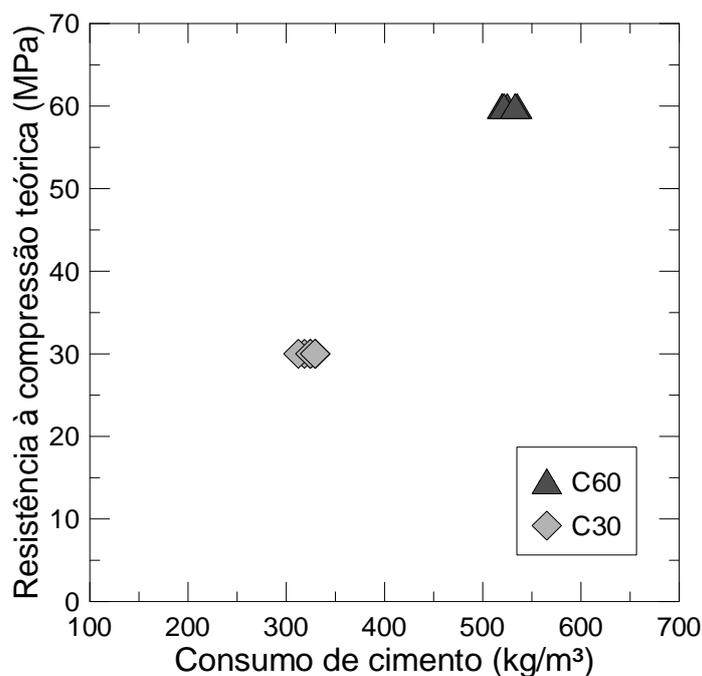


Figura 4.2 – Resistência à compressão teórica aos 28 dias versus consumo de cimento para todas as dosagens

Como pode ser observado nas tabelas anteriores e confirmado pelo Figura 4.2, todas as misturas apresentam consumo de cimento bastante similar para cada uma das classes estudadas.

O consumo de cimento para os concretos C30 teve uma variação igual a 17,3 kg/m³. Na Tabela 4.8 é possível observar que, para a classe C30, a inclusão de agregado reciclado na mistura diminuiu o consumo de cimento, provavelmente devido à interface pasta-agregado, indicada pelo parâmetro “p”, que é melhor para a areia reciclada. No entanto, este comportamento é diferente quando se compara a Areia LAB com a Areia D, pois, para esta primeira, o aumento do teor de agregado reciclado acarreta em uma diminuição do consumo de cimento. Enquanto que para a Areia D, o aumento do teor desta areia implica em um aumento do consumo de cimento, sugerindo que este agregado possui menor qualidade quando comparado com a Areia LAB.

Em relação às misturas da classe C60, a Tabela 4.10 evidencia o que antes havia sido constatado para os concretos de menor classe, a diminuição no consumo de cimento com a substituição do agregado natural pelo reciclado, com exceção da mistura com substituição de “50%” da Areia D que possui consumo de cimento ligeiramente superior à mistura de referência. Nos concretos reciclados, a Tabela 4.10 mostra que o aumento do teor de substituição em ambas areias recicladas, aumenta o consumo de cimento. A variação do consumo de cimento para a classe C60 é de 15,3 kg/m³.

A Tabela 4.12 apresenta a quantidade total de pasta em cada mistura, identificada como a quantidade de pasta aderida aos agregados reciclados da mistura somada à pasta efetiva do concreto, pois o percentual de pasta facilita a compreensão de diversos resultados, como absorção capilar.

Tabela 4.12 – Pasta total em cada mistura dosada

Classe	Mistura	Pasta (%)
C30	REF C30	30,7
	LAB_F C30-25	33,3
	LAB C30-25	33,4
	D C30-25	31,8
	LAB C30-50	35,1
	D C30-50	35,6
C60	REF C60	35,4
	LAB C60-25	38,1
	D C60-25	36,9
	LAB C60-50	40,1
	D C60-50	38,4

Como pode ser observado, os concretos contendo Areia D possuem uma quantidade inferior de pasta em relação aos concretos que possuem a Areia LAB e quanto maior o percentual de substituição, maior o percentual de pasta na mistura.

4.3 Produção dos concretos

Os concretos foram produzidos com auxílio de um misturador do tipo betoneira em uma sala climatizada a $21\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. O procedimento adotado para colocação dos materiais no misturador e o tempo de cada fase do processo, seguiu as etapas sugeridas por Amario (2015).

Estas etapas e os tempos definidos para as mesmas, são apresentadas a seguir:

- a) Umedecimento do misturador com água, retirando o excesso com um pano úmido;
- b) Lançamento dos agregados graúdo e miúdo, incluindo o agregado miúdo reciclado nas misturas que os contém, estes são misturados por um minuto, para garantir uma boa homogeneização (Figura 4.3-a);
- c) Adição de 50% da água total da mistura aos agregados, misturando-se por mais um minuto (Figura 4.3-b);
- d) Em seguida, o cimento foi adicionado, acionando-se o misturador por mais um minuto (Figura 4.3-c);
- e) Por fim, o restante da água total e todo o superplastificante são adicionados e homogeneizados por mais oito minutos, que é tempo necessário para a ação completa do superplastificante Glenium 51 (Figura 4.3-d);

Cada concreto produzido possui um tempo total de mistura, a partir do momento em que a água era adicionada, de 10 minutos. O ensaio de abatimento do tronco de cone era realizado assim que a betoneira era desligada no término da mistura.

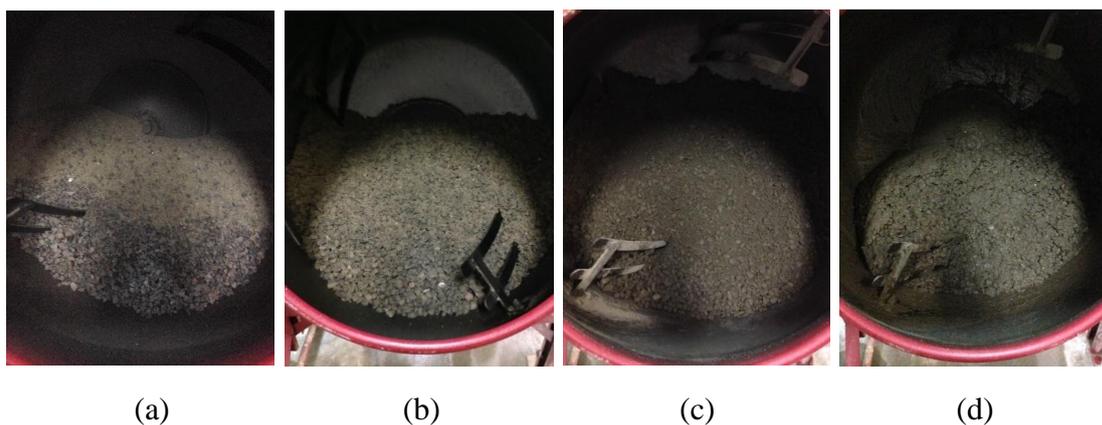


Figura 4.3 – Etapas da produção dos concretos: (a) lançamento dos agregados no misturador; (b) aspecto dos agregados com adição da metade da água; (c) mistura após homogeneização com o cimento; (d) mistura após oito minutos.

Ao final do procedimento da mistura, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova, onde o concreto foi colocado nos moldes (Figura 4.4-a Figura 4.4-b) em duas camadas e adensado mecanicamente com auxílio de uma mesa vibratória (68 Hz). A preparação dos moldes consistia em pinceladas de óleo para facilitar a desmoldagem e o tempo de vibração do concreto foi de 30 segundos por camada.

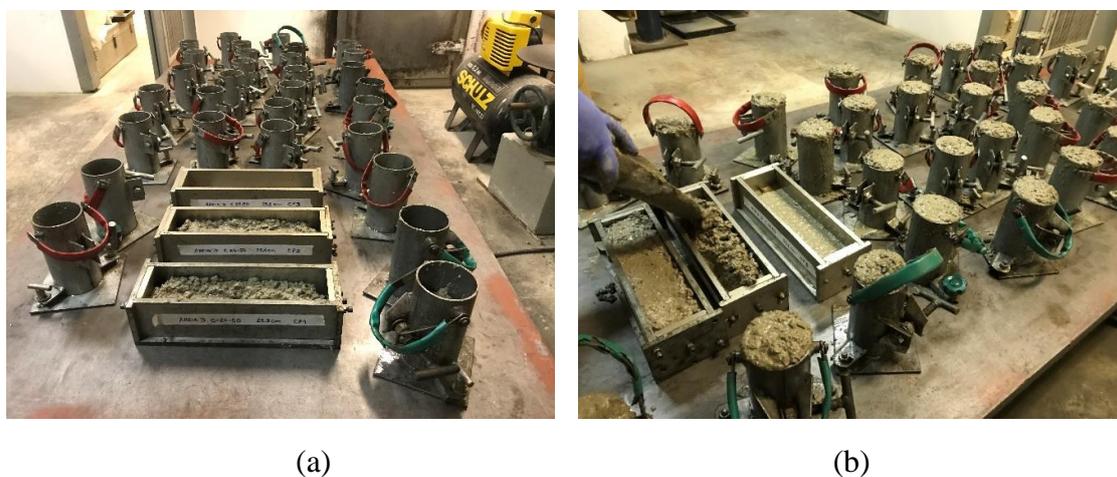


Figura 4.4 – Moldagem dos corpos de prova de concreto: (a) após colocação da primeira camada; (b) colocação da segunda camada de concreto para segunda etapa de vibração.

Após um período de 24h, no qual os corpos de prova estavam protegidos da perda de umidade, estes foram desmoldados e postos em uma câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde permaneceram até as idades de ensaios.

4.4 Metodologia de avaliação estatística dos resultados

Para validação dos resultados experimentais obtidos, técnicas estatísticas foram implementadas para as propriedades avaliadas com repetição de ensaios iguais (3 ou mais determinações).

Através da análise de variância (ANOVA), com auxílio do software *PAST 2.7*, foi possível a comparação entre os diferentes tratamentos ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), pelo teste de comparação de médias de Tukey. Este teste permite avaliar qualquer discrepância entre duas médias de tratamentos e é baseada na Diferença Mínima Significativa (DMS), onde a estatística do teste é dada de acordo com a Equação 4.1:

$$\Delta = \sqrt{\frac{q \sqrt{QMRes}}{r}} \quad (4.1)$$

Onde,

Δ é a Diferença Mínima Significativa (DMS);

q é a amplitude total studentizada;

$QMRes$ é o quadrado médio do resíduo;

r é o número de repetições.

CAPÍTULO 5

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Abatimento de tronco de cone

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de abatimento de tronco de cone e algumas propriedades das misturas dosadas.

Tabela 5.1 – Resultados de abatimento do tronco de cone

Misturas		Abatimento (mm)	Água livre (l/m ³)	a/c efetivo	% ARC		
C30	REF	C30	85,0	202,1	0,62	0	
	LAB_F	C30-25	80,0	202,4	0,62	24,6	
	LAB	C30-25	80,0	203,5	0,63	24	
		C30-50	85,0	197,6	0,63	48	
	D	C30-25	80,0	196,4	0,62	24	
		C30-50	85,0	202,0	0,61	48	
C60	REF	C60	95,0	184,7	0,35	0	
	LAB	C60-25	120,0	190,1	0,36	24	
		C60-50	115,0	184,1	0,35	48	
		D	C60-25	120,0	185,1	0,36	24
			C60-50	80,0	176,9	0,33	48

Tanto os abatimentos obtidos para a classe C30 quanto os da classe C60 obedeceram ao limite estabelecido de 100 ± 20 mm, assim, os abatimentos foram considerados similares entre si e os concretos puderam ser comparados em termos de trabalhabilidade.

Nenhuma das misturas obteve abatimento igual ao previsto pelo *Betonlab Pro 3*. Alguns autores como Amario (2015), Rangel (2015), Velasco (2008), também compararam seus resultados com os obtidos pelo software e o abatimento real apresentaram valores ora superiores, ora inferiores aos calculados pelo programa. Polisseni *et al.* (2017) acreditam que o abatimento experimental não corresponde ao previsto pelo software utilizado por que esta ferramenta não apresenta possibilidades de inserção de dados para o ajuste da reologia. Velasco (2008) relaciona isto à falta de parâmetros de entrada que caracterizem

a eficiência do superplastificante e sua capacidade de incrementar a trabalhabilidade dos concretos. Diante do exposto, não há sentido em comparar o abatimento fornecido pelo *Betonlab Pro 3* e o abatimento real obtido experimentalmente.

Os abatimentos experimentais apresentados para a classe C30 possuem uma variação menor do que os resultados da classe C60, assim como a quantidade de água livre, que exerce grande influência na trabalhabilidade da mistura.

A Figura 5.1 apresenta a correlação entre o abatimento e o percentual de agregados reciclados na mistura, respectivamente.

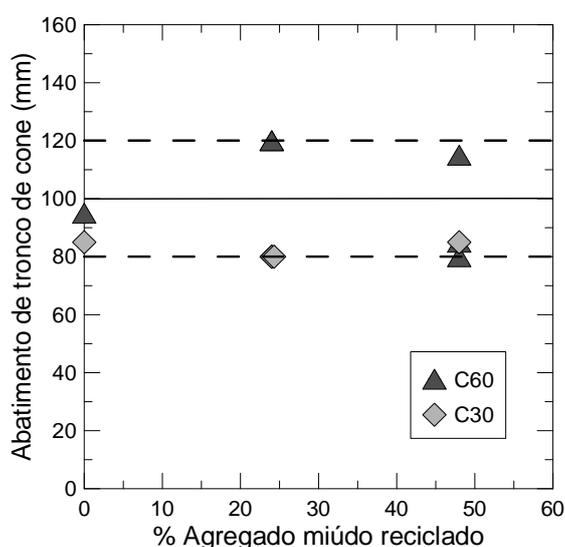


Figura 5.1 – Correlação entre o abatimento de tronco de cone obtido e o percentual de agregados reciclados em cada mistura.

Como pode ser visto, o valor do abatimento não segue uma tendência para nenhuma das classes nas propriedades avaliadas, diferentemente do trabalho desenvolvido por Amario (2015) com agregados graúdos reciclados de concreto, onde existe uma tendência que é mantida, mostrando que a quantidade de agregado reciclado utilizada afeta diretamente na trabalhabilidade do concreto, independente da classe de resistência. Contudo, todos os concretos obtiveram abatimentos dentro do limite estabelecido de 100 ± 20 mm.

No entanto, é possível observar que, no geral, para os concretos de classe C60 o abatimento foi superior aos da classe C30 e o percentual de Areia LAB na mistura, não exerceu influência na trabalhabilidade do concreto, enquanto o concreto com 50% de Areia D obteve abatimento inferior aos demais, o que pode ser justificado pela quantidade menor de água livre na mistura.

Segundo Leite (2001) o agregado reciclado possui características físicas tão distintas, como forma mais irregular e textura mais rugosa que os agregados naturais, diante da disparidade nos grãos dos agregados reciclados, é plausível que sua trabalhabilidade não obedeça à certa uma tendência. Tenório (2007) realizou o ensaio de abatimento de tronco de cone duas vezes em seus concretos e concluiu que, apesar dos concretos reciclados terem se apresentado trabalháveis e moldáveis, na réplica praticamente não houve tendência dos abatimentos se repetirem ou serem sempre menores ou sempre maiores que na 1ª moldagem. E, assim como Carrijo (2005) e Leite (2001), constatou que a medição do abatimento do tronco de cone não é um método apropriado para medir a consistência de concretos reciclados.

5.2 Resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade

As Figura 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam as curvas típicas de tensão versus deformação para 1 dia de idade de cada concreto avaliado, as duas primeiras são referentes à classe C30 e as outras duas à classe C60. Na Tabela 5.2 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade. O ganho de resistência significativo para esta idade, deve-se ao uso de um cimento de alta resistência inicial.

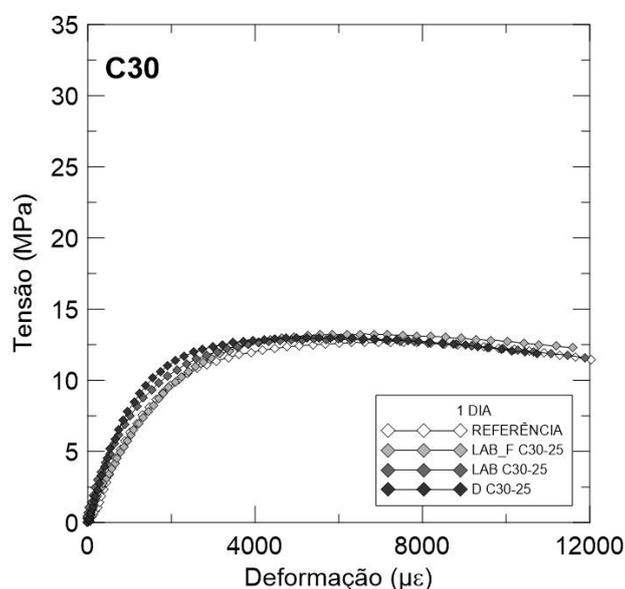


Figura 5.2 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C30 com 25% de substituição

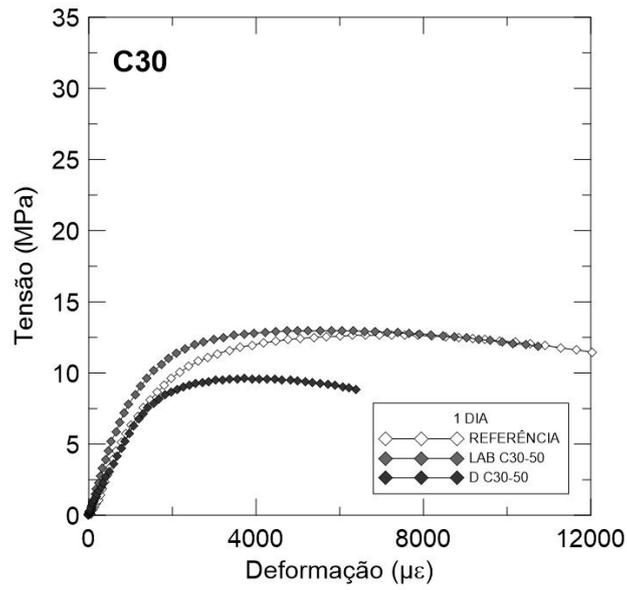


Figura 5.3 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C30 com 50% de substituição

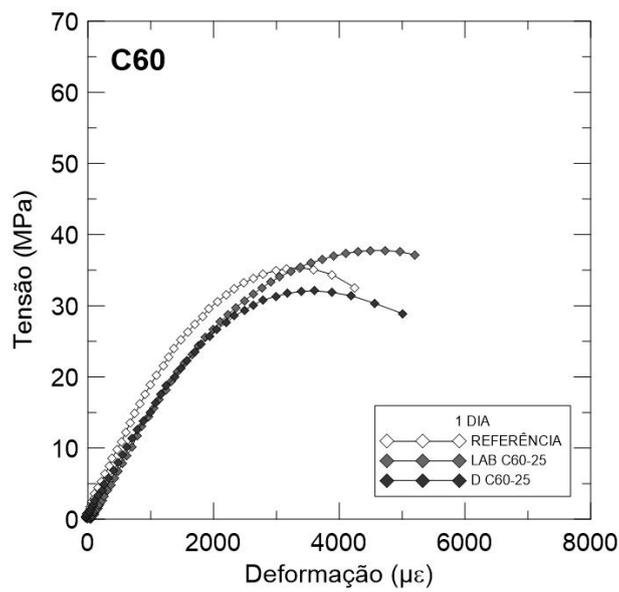


Figura 5.4 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C60 com 25% de substituição

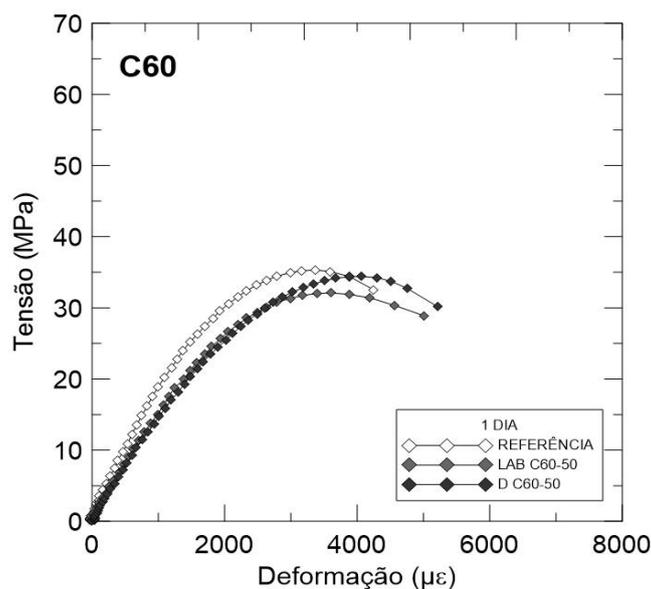


Figura 5.5 – Curvas tensão versus deformação para 1 dia dos concretos da classe C60 com 50% de substituição

Tabela 5.2 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão em 1 dia dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Classe	Mistura	1 DIA		
		Resistência à Compressão (MPa)	Deformação de Pico ($\mu\epsilon$)	Módulo de Elasticidade (GPa)
C30	REF C30	12,68 ($\pm 3,72$)	6815,76 ($\pm 3,00$)	9,73 ($\pm 1,04$)
	LAB_F C30-25	13,26 ($\pm 4,59$)	6646,80 ($\pm 5,13$)	8,98 ($\pm 2,21$)
	LAB C30-25	12,90 ($\pm 3,65$)	5837,52 ($\pm 4,67$)	9,68 ($\pm 4,10$)
	D C30-25	12,97 ($\pm 1,72$)	5498,84 ($\pm 3,90$)	10,21 ($\pm 6,76$)
	LAB C30-50	14,06 ($\pm 2,78$)	6487,18 ($\pm 5,99$)	10,13 ($\pm 3,82$)
	D C30-50	10,02 ($\pm 3,54$)	3760,90 ($\pm 5,18$)	10,39 ($\pm 6,08$)
C60	REF C60	36,72 ($\pm 2,43$)	3274,26 ($\pm 4,61$)	16,34 ($\pm 5,25$)
	LAB C60-25	37,78 ($\pm 3,64$)	4585,21 ($\pm 6,15$)	15,04 ($\pm 6,19$)
	D C60-25	30,09 ($\pm 3,65$)	3596,64 ($\pm 6,52$)	15,86 ($\pm 5,05$)
	LAB C60-50	36,05 ($\pm 4,63$)	5234,43 ($\pm 6,43$)	14,93 ($\pm 3,67$)
	D C60-50	34,41 ($\pm 3,25$)	4049,69 ($\pm 4,12$)	14,64 ($\pm 6,64$)

Os concretos da classe C30 com 25% de substituição do agregado miúdo apresentaram resistência à compressão e módulo de elasticidade similares e a partir da análise estatística realizada, foi possível constatar que de fato não se apresentaram diferenças significativas

nestes parâmetros. Na Figura 5.3 nota-se que as quatro misturas apresentaram comportamento semelhante tanto no ramo ascendente como no ramo descendente. As misturas dessa mesma classe com 50% de substituição, tiveram comportamentos distintos, o LAB C30-50, por exemplo, teve um aumento de 8,25% na resistência, enquanto o D C30-50 teve uma redução de 22,74%. As deformações de pico oscilaram bastante, sendo a maior deformação de pico do concreto de REF C30, 6815,76 $\mu\epsilon$, e a menor do concreto D C30-50, 3760,90 $\mu\epsilon$. Os concretos LAB C30-50, D C30-50 e a referência possuem módulos de elasticidade estatisticamente iguais. Em geral, as misturas com menor teor de agregado miúdo reciclado são mais similares quando comparadas àquelas que possuem maior teor de substituição.

Para as misturas da classe C60, em termos de resistência à compressão axial, 25% de substituição implica em resistências estatisticamente iguais para a referência e LAB C60-25, apenas com a mistura D C60-25 com resistência inferior a estas duas. Os módulos de elasticidade não apresentam diferenças significativas para essas três misturas. Para teores de 50%, o concreto produzido com a Areia D, o D C60-50, também obteve resistência inferior em relação ao LAB C60-50 e ao concreto convencional. O aumento do teor de areia reciclada, para os concretos de maior classe, aumenta a resistência em 12,55% com o uso da Areia D e não apresentaram diferenças significativas, de acordo com a análise estatística, com o uso da Areia LAB. A deformação referente à tensão máxima (deformação de pico) apresenta variação significativa entre as misturas, variando entre 3274,26 $\mu\epsilon$, para REF C60, e 5234,43 $\mu\epsilon$, para o concreto LAB C60-50. O módulo de elasticidade é estatisticamente igual para todas as misturas, exceto a de referência.

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 ilustram as curvas de tensão versus deformação para as misturas, de acordo com a classe e teor de agregado, aos 7 dias de idade. Logo, na Tabela 5.3 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade para esta idade.

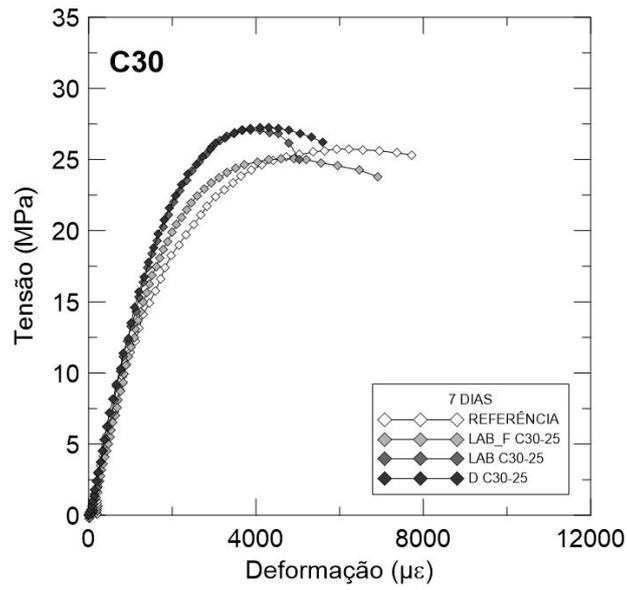


Figura 5.6 – Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C30 com 25% de substituição

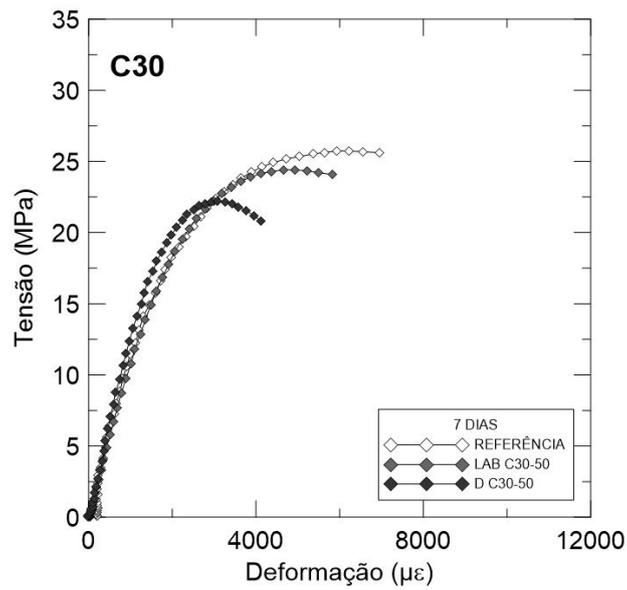


Figura 5.7 – Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C30 com 50% de substituição

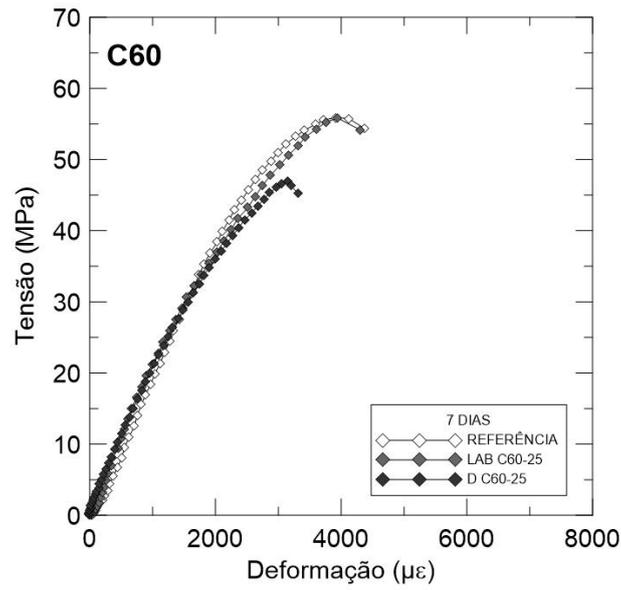


Figura 5.8– Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C60 com 25% de substituição

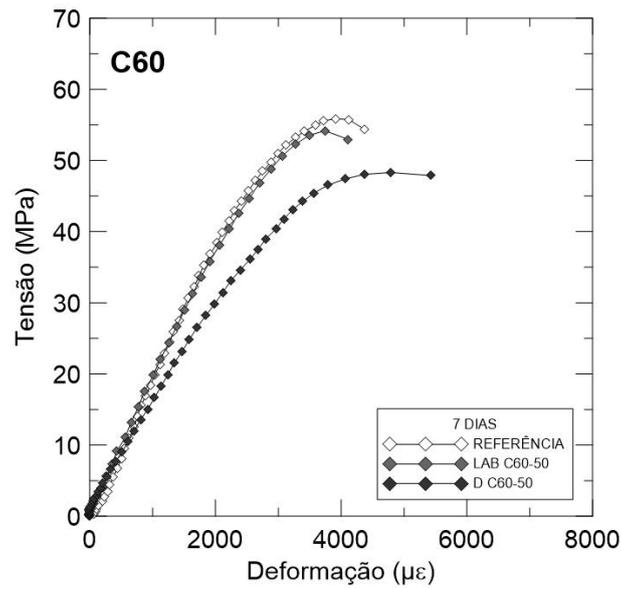


Figura 5.9 – Curvas tensão versus deformação para 7 dias dos concretos da classe C60 com 50% de substituição

Tabela 5.3 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 7 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

7 DIAS				
Classe	Mistura	Resistência à Compressão (MPa)	Deformação de Pico ($\mu\epsilon$)	Módulo de Elasticidade (GPa)
C30	REF C30	25,76($\pm 2,66$)	5887,73 ($\pm 5,33$)	18,53($\pm 4,25$)
	LAB_F C30-25	26,76 ($\pm 0,37$)	4893,88 ($\pm 5,99$)	18,06 ($\pm 2,89$)
	LAB C30-25	27,09 ($\pm 1,33$)	4002,55($\pm 5,46$)	18,84($\pm 1,39$)
	D C30-25	27,25 ($\pm 2,88$)	4009,11 ($\pm 3,97$)	18,95 ($\pm 3,04$)
	LAB C30-50	23,70 ($\pm 2,33$)	4473,98 ($\pm 3,51$)	17,96 ($\pm 5,23$)
	D C30-50	22,19 ($\pm 6,45$)	3036,96 ($\pm 5,49$)	18,14 ($\pm 4,75$)
C60	REF C60	55,94 ($\pm 5,68$)	3988,72($\pm 3,57$)	29,23($\pm 4,05$)
	LAB C60-25	55,84 ($\pm 2,23$)	4128,63 ($\pm 3,55$)	29,56($\pm 4,21$)
	D C60-25	46,93 ($\pm 6,12$)	3159,65 ($\pm 2,78$)	29,68($\pm 5,87$)
	LAB C60-50	54,18($\pm 1,05$)	3396,92 ($\pm 1,52$)	29,87($\pm 2,68$)
	D C60-50	48,36 ($\pm 5,35$)	4678,42 ($\pm 2,05$)	29,86($\pm 6,01$)

Aos 7 dias, os concretos da classe C30 com 25% de substituição, as misturas possuem resistências estatisticamente iguais e o módulo de elasticidade não apresenta diferenças significativas entre as misturas, enquanto a deformação de pico possui grande variação, variando entre 4002,55 $\mu\epsilon$ para o concreto D C30-25 e 5887,73 $\mu\epsilon$ para o concreto REF C30. Analisando os concretos, da mesma classe, com 50% de substituição, tanto o concreto LAB C30-50 quanto o D C30-50 apresentam resistência inferior à mistura de referência e módulos de elasticidade estatisticamente iguais. Em relação às deformações, elas variaram bastante e foram consideradas diferentes entre si. Assim, para avaliando esta idade, a Areia LAB e a Areia D apresentaram melhor comportamento com 25% de substituição, em termos de resistência.

Os concretos da classe C60 produzidos com a Areia LAB, tanto com 25% de substituição quanto com 50%, tiveram suas resistências consideradas estatisticamente iguais à referência. Por outro lado, as misturas contendo Areia D possuem resistências dos significativamente inferiores em relação ao concreto REF C60, como pode ser visto claramente na Figura 5.8 e 5.9. Os módulos encontrados para todos os concretos não

apresentaram diferenças entre seus valores, enquanto as deformações obtiveram grande variação.

As Figuras 5.10 a Figura 5.13 mostram as curvas resultantes dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias de idade. A Tabela 5.4 apresenta os resultados médios de resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade para esta idade.

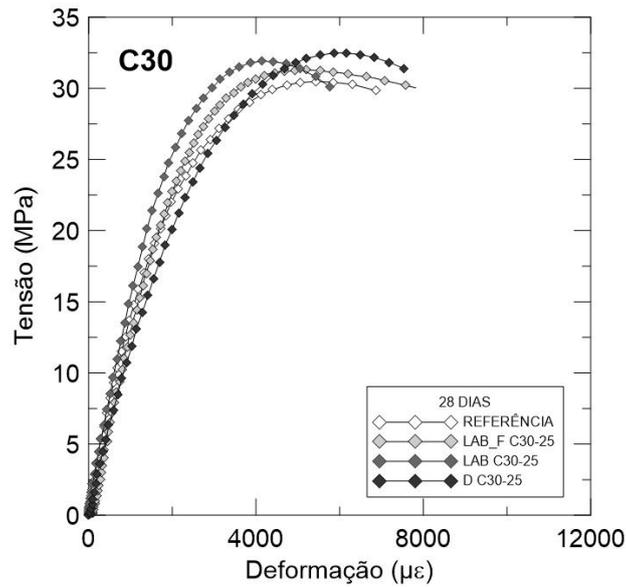


Figura 5.10 - Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C30 com 25% de substituição

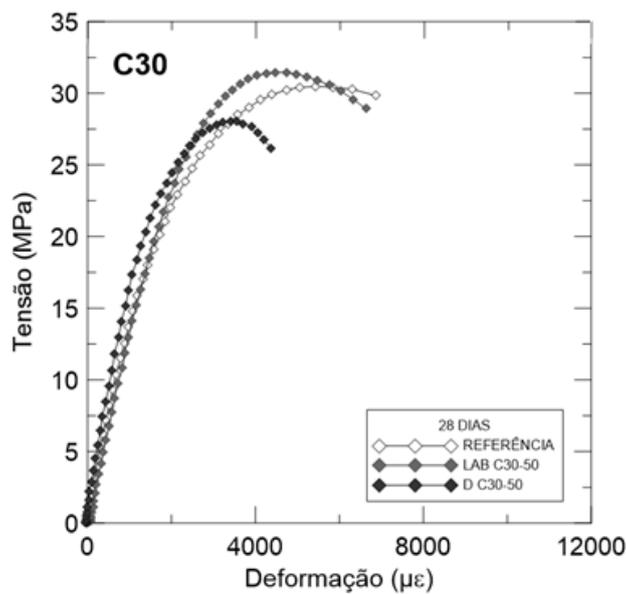


Figura 5.11 – Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C30 com 50% de substituição

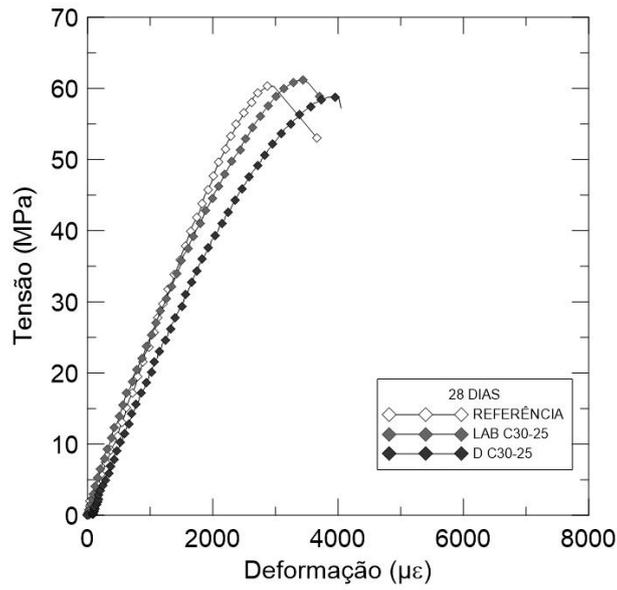


Figura 5.12 – Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C60 com 25% de substituição

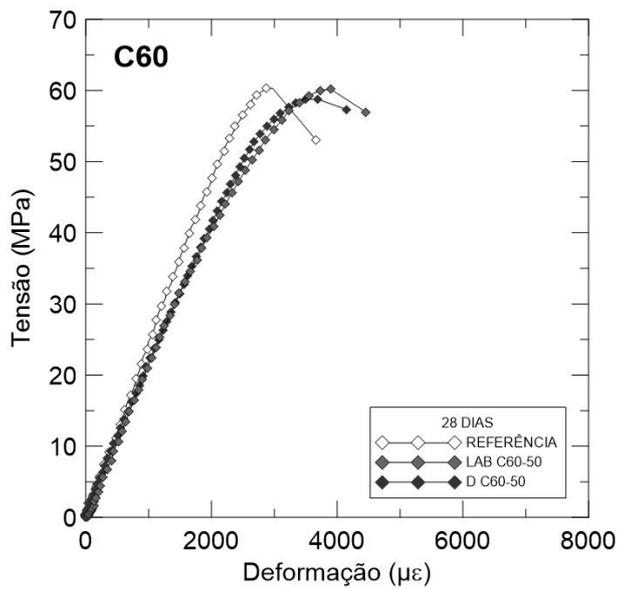


Figura 5.13 – Curvas tensão versus deformação para 28 dias dos concretos da classe C60 com 50% de substituição

Tabela 5.4 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

		28 DIAS		
Classe	Mistura	Resistência à Compressão (MPa)	Deformação de Pico ($\mu\epsilon$)	Módulo de Elasticidade (GPa)
C30	REF C30	30,49 ($\pm 4,76$)	5472,79 ($\pm 5,14$)	22,69 ($\pm 1,19$)
	LAB_F C30-25	31,34 ($\pm 3,19$)	5176,37 ($\pm 5,13$)	22,00 ($\pm 2,61$)
	LAB C30-25	31,96 ($\pm 3,30$)	4177,85 ($\pm 2,87$)	22,94 ($\pm 5,84$)
	D C30-25	32,09 ($\pm 6,12$)	5126,23 ($\pm 3,09$)	22,72 ($\pm 2,67$)
	LAB C30-50	31,48 ($\pm 2,62$)	4385,68 ($\pm 6,06$)	22,15 ($\pm 1,18$)
	D C30-50	28,07 ($\pm 2,51$)	3498,18 ($\pm 2,66$)	23,26 ($\pm 1,69$)
C60	REF C60	60,40 ($\pm 2,46$)	2940,14 ($\pm 3,57$)	31,18 ($\pm 4,05$)
	LAB C60-25	61,24 ($\pm 4,81$)	3405,31 ($\pm 4,71$)	33,37 ($\pm 4,40$)
	D C60-25	58,83 ($\pm 2,59$)	3931,36 ($\pm 5,03$)	30,69 ($\pm 4,15$)
	LAB C60-50	60,23 ($\pm 3,44$)	3904,26 ($\pm 5,69$)	31,05 ($\pm 3,78$)
	D C60-50	58,84 ($\pm 4,26$)	3573,16 ($\pm 1,15$)	31,63 ($\pm 2,19$)

Aos 28 dias de idade, as misturas da classe C30 apresentam valores resistência à compressão axial estatisticamente iguais, com exceção da mistura D C30-50 que obteve resistência inferior aos demais, 28,07 MPa. Os módulos não apresentaram diferenças significativas, diferentemente das deformações de pico, que variaram entre 3498,18 $\mu\epsilon$ e 5472,79 $\mu\epsilon$, correspondente aos concretos D C30-25 e de referência, respectivamente.

Os concretos produzidos para classe C60 obtiveram resistências similares ao concreto REF C60 e deformações de pico similares entre sim, porém significativamente diferentes do concreto convencional. Os módulos foram considerados estatisticamente iguais, com exceção do módulo da mistura LAB C60-25, que foi ligeiramente superior que os demais.

No geral, os resultados foram bem próximos, para cada classe, o que indica que, apesar da maior absorção dos AMRCs, os concretos reciclados são capazes de atingir valores de resistência à compressão iguais ao concreto convencional. Possivelmente, a elevada aderência dos agregados reciclados aumenta a resistência da interface pasta-agregado, fazendo com que estes concretos reciclados, mesmo sendo mais porosos, atinjam as resistências desejadas.

Alguns autores (Evangelista e Brito, 2007; Malta, 2012; Fan *et al.*, 2016) também não encontraram diferenças significativas entre as resistências de concretos de diferentes teores de agregados reciclados.

Em seu trabalho, Ravindrarajah *et al.* (1987) produziu concretos de classe C30 com areia reciclada que atingiram resistência de 29,4 MPa aos 28 dias de idade e módulos de elasticidade igual a 20,9 GPa e 24,7 GPa para 7 e 28 dias, respectivamente. Estes valores de módulo são próximos dos resultados encontrados para os concretos produzidos nesta pesquisa, que foram de aproximadamente 18 GPa aos 7 dias de idade e 22 GPa aos 28 dias.

Em seu estudo, Evangelista e Brito (2007) caracterizaram concretos contendo areia reciclada e, para os concretos da classe C60, obtiveram um módulo de elasticidade igual a 34,2 GPa aos 28 dias, valor semelhante aos resultados obtidos neste trabalho.

Khatib (2005) trabalhou com a classe C25 e encontrou valores superiores em relação aos módulos da classe C30 deste estudo. Para os concretos com 25% de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de concreto, o autor obteve 30,0, 38,5 e 44,7 GPa, para 1, 7 e 28 dias, respectivamente, já para os concretos com 50% de substituição ele obteve 29,2, 37,0, e 42,5 GPa para 1, 7 e 28 dias, respectivamente. Amario (2015) afirma que isto ocorrer pelas diferenças nas propriedades dos agregados utilizados nos estudos. E, de fato, a origem dos agregados possui influência significativa nas propriedades do concreto produzido a partir deles, por isso é recomendável uma dosagem que considere as propriedades intrínsecas destes materiais reciclados.

Um dos objetivos deste trabalho foi utilizar o MEC para obter uma dosagem precisa, assim, a eficiência deste método de dosagem e da ferramenta computacional seria atingida se todos os concretos alcançassem a resistência prevista, neste caso 30 MPa ou 60 MPa. Assim, a Figura 5.14 apresenta a correlação entre as resistências à compressão obtidas experimentalmente aos 28 dias de idade e as resistências teóricas previstas pelo programa *Betonlab Pro 3*. É possível observar que o comportamento da curva é linear, indicando que o software foi capaz de estimar com precisão a resistência à compressão de concretos dosados a partir do modelo de empacotamento compressível. Amario (2015) e Rangel (2015), comprovaram em seus trabalhos esta mesma eficiência, atingindo a resistência

prevista pelo programa em todos os concretos produzidos com diferentes teores de agregado reciclado.

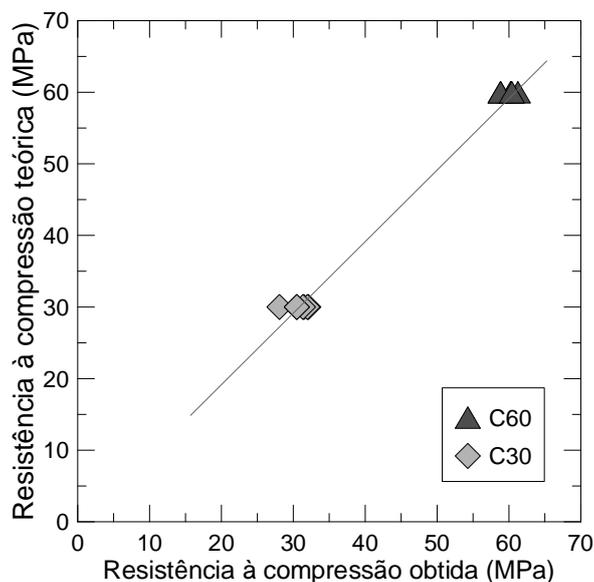


Figura 5.14 – Correlação entre as resistências à compressão teórica do software *Betonlab Pro 3* e as obtidas experimentalmente

5.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 5.5, com seus respectivos coeficientes de variação.

Tabela 5.5 – Valores médios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Classe	Mistura	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
C30	REF C30	2,64 (±6,99)
	LAB_F C30-25	2,49 (±6,32)
	LAB C30-25	2,80 (±8,64)
	D C30-25	3,13 (±7,14)
	LAB C30-50	2,96 (±5,35)
	D C30-50	2,27 (±8,33)
C60	REF C60	4,85 (±7,55)
	LAB C60-25	4,74 (±3,26)
	D C60-25	3,86 (±5,98)
	LAB C60-50	4,14 (±8,56)
	D C60-50	3,92 (±7,22)

Para os concretos de classe C30, segundo a análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral, apenas o D C30-50 indicou uma diferença significativa em relação aos demais. Assim, o D C30-50 foi considerado o concreto menos resistente da classe, atingindo 2,27 MPa de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias. O estudo realizado por Deshpande *et al.* encontrou valores próximos a 2,5 MPa para esta mesma classe, enquanto o concreto produzido por Ravindrarajah *et al.* (1987), com 50% de areia reciclada, resultou em 2,13 MPa de resistência à tração por compressão diametral.

Nos concretos produzidos para a classe C60, os valores de resistência à tração por compressão diametral foram considerados estatisticamente iguais para as misturas de REF C60 e LAB C60-25, assim como os concretos LAB C60-50, D C60-25 e D C60-50 também não podem ser considerados diferentes significativamente. Porém, ao compararem-se estes dois grupos nota-se que o grupo REF C60/LAB C60-25 possuem maior resistência à tração por compressão diametral que o outro grupo, LAB C60-50/D C60-25/D C60-50. Concretos da classe C60 também foram avaliados por Evangelista e Brito (2007) que encontraram valores próximos a 3,65 MPa.

A Figura 5.15 apresenta a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial aos 28 dias de idade dos concretos produzidos.

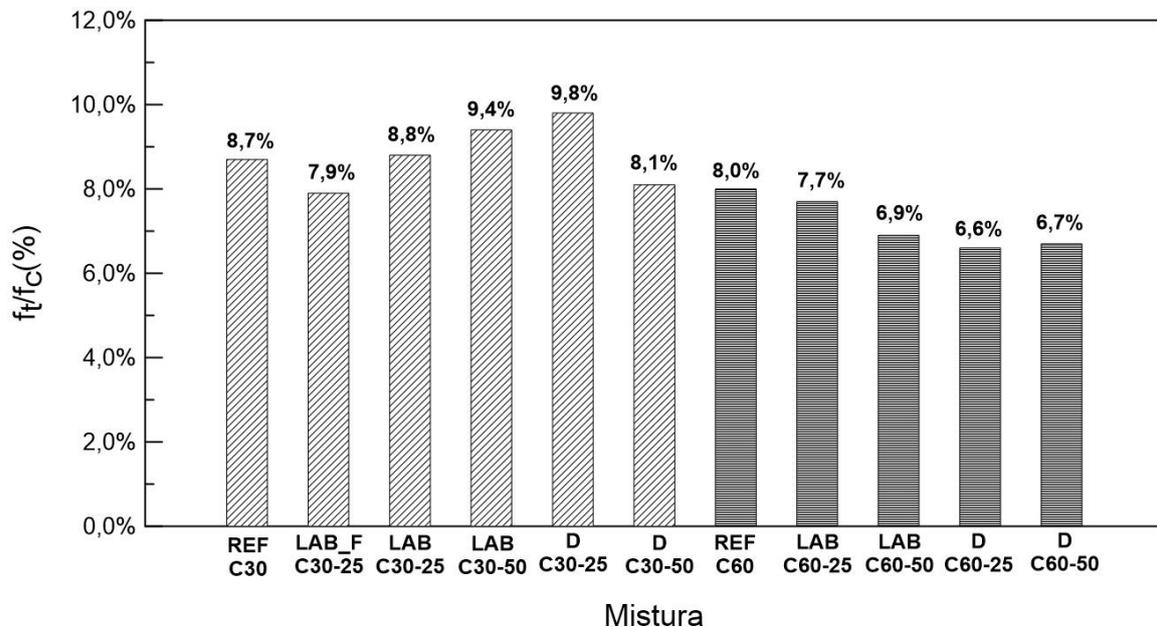


Figura 5.15 – Relação entre f_t e f_c para todos os concretos produzidos

É possível observar que os concretos da classe C30, no geral, possuem valores superiores para a relação f_t/f_c , em torno de 8,8%, quando comparados à classe C60, que por sua vez possui valores em torno de 7,0% para esta relação. Amario (2015) obteve valores próximos a 8,3% e 6,8%, para a classe C45 e classe C65, respectivamente, no seu estudo de concretos reciclados contendo agregados graúdos de concreto.

Estes resultados são esperados, visto que a relação entre as resistências à compressão e à tração não são diretamente proporcionais, segundo Amario (2015) conforme a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma taxa decrescente.

5.4 Absorção total e massa específica

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção total de água por imersão, índice de vazios e massa específica para os concretos produzidos e seus respectivos coeficientes de variação, são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores médios absorção total de água por imersão e massa específica dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Classe	Mistura	Absorção total (%)	Massa específica (kg/m ³)
C30	REF C30	2,90 (±2,47)	2172,51 (±1,19)
	LAB_F C30-25	4,67 (±3,05)	2111,00 (±0,57)
	LAB C30-25	5,92 (±6,99)	2106,10 (±2,99)
	LAB C30-50	6,33 (±3,03)	2069,51 (±1,43)
	D C30-25	6,00 (±2,22)	2092,35 (±6,51)
	D C30-50	7,29 (±4,95)	2067,12 (±1,59)
C60	REF C60	2,39 (±1,79)	2302,17 (±0,52)
	LAB C60-25	3,22 (±1,69)	2270,54 (±0,26)
	LAB C60-50	3,46 (±2,72)	2238,80 (±1,05)
	D C60-25	3,66 (±3,93)	2276,49 (±2,12)
	D C60-50	4,24 (±0,89)	2206,79 (±0,84)

Em relação ao ensaio de absorção total, observa-se que, apesar das resistências dos concretos serem praticamente iguais para cada uma das classes, a porosidade aberta do concreto exerce grande influência na capacidade de absorção destes concretos reciclados. Assim, para os concretos que possuem Areia D, que é o AMRC de maior absorção, a absorção total é superior em relação aos concretos contendo Areia LAB.

A análise estatística realizada apontou que os concretos da classe C30 possuem um grupo de valores iguais, o do LAB C30-25, LAB C30-50 e D C30-25, e eles são diferente do D C30-50, do LAB_F C 30-25 e também da referência. A massa específica dos concretos desta classe não apresentou diferença significativa entre os concretos LAB_F C30-25, LAB C30-25 e D C30-25, que por sua vez possuem massa específica maior que os concretos com 50% de substituição, estes possuem valores estatisticamente iguais. Yaprak *et al.* (2011) obtiveram valores de absorção variando entre 1,67 e 1,92%, variando de acordo com o teor de agregados miúdos de concreto na mistura, este valor é consideravelmente inferior aos resultados encontrados nas misturas de mesma classe (C30) nesta pesquisa, segundo os autores, a grande variação nos valores encontrados na literatura devem-se, possivelmente, às diferentes origens do agregado reciclado.

Para a classe C60, a absorção total das misturas LAB C60-25, LAB C60-50 e D C60-25 são estatisticamente iguais e possuem valor superior ao REF C60 e inferior ao D C60-50. No que diz respeito à massa específica da classe C60, somente as misturas LAB C60-25 e D 60-25 são iguais entre si.

Observa-se também que, em uma análise geral, os concretos que contém Areia LAB possuem absorção menor que os que possuem a Areia D. Fan *et al.* (2016) concluíram em seu trabalho que um dos fatores que influencia fortemente a absorção do concreto, a absorção da própria areia reciclada, que no caso é menor para a Areia LAB. Além disso, os autores obtiveram valores em torno de 13% para absorção de concretos de alto desempenho com agregado miúdo reciclado, este valor é superior a todos encontrados neste estudo, o que confirma a influência do tipo de agregado reciclado utilizado nas misturas.

A Figura 5.16-a apresenta a relação entre a absorção total e o percentual de agregados na mistura. Assim, para ambas as classes, é possível afirmar que quanto maior o teor de utilização de agregados miúdos reciclados, maiores serão os valores de absorção total de

água. Este comportamento pode ser previsto e observado a partir dos resultados obtidos para absorção de cada AMRC, ou seja, quanto maior a quantidade de agregados reciclados contidos no concreto e quanto maior sua absorção, maiores serão os valores de absorção total dos concretos produzidos com estes AMRCs. Segundo Amario (2015) para a massa específica, este desempenho ocorre de forma inversamente proporcional, como mostra a Figura 5.16-b, pois a massa específica do agregado reciclado é inferior ao valor obtido para o agregado natural, então quanto maior o teor de utilização de agregados reciclados, menores serão os valores de massa específica.

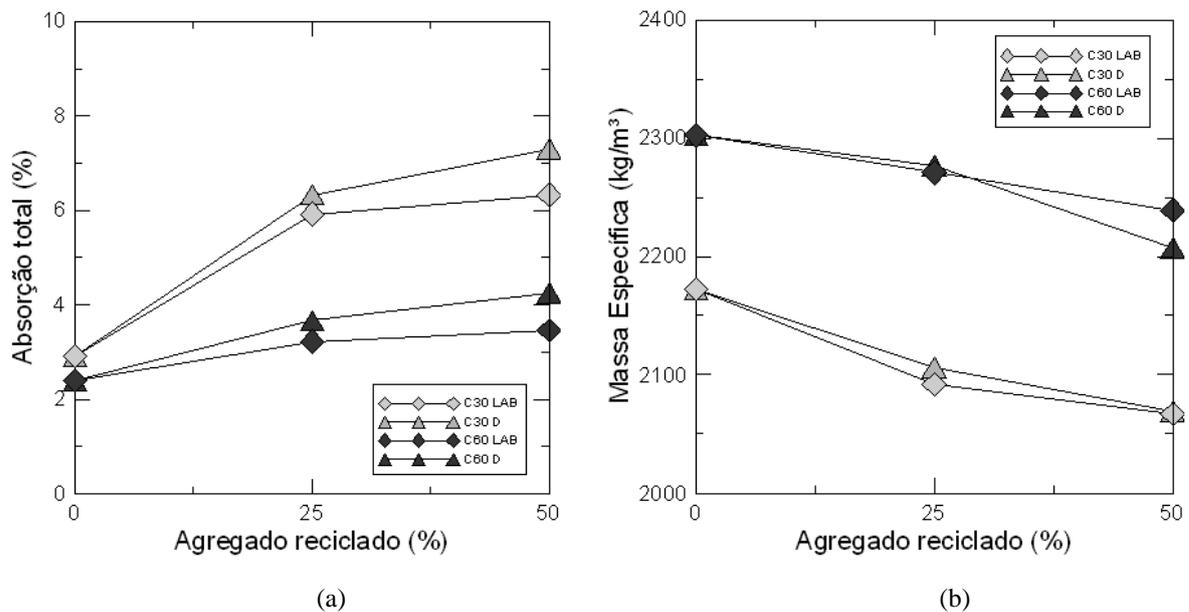


Figura 5.16 - Relações entre as propriedades dos AMRCs e percentual de agregado reciclado na mistura: (a) absorção total x % de AMRC; (b) massa específica x % de AMRC

5.5 Absorção por capilaridade

Os resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade obtidos após 72 horas e 672 horas, correspondente a 28 dias, de ensaio estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Classe	Mistura	Absorção capilar (g/cm ²)	
		72 horas	672 horas
C30	REF C30	0,56 (±5,41)	1,05 (±2,54)
	LAB_F C30-25	0,69 (±2,63)	1,08 (±6,75)
	LAB C30-25	0,73 (±7,25)	1,12 (±8,31)
	LAB C30-50	0,93 (±2,90)	1,52 (±4,14)
	D C30-25	0,82 (±1,79)	1,24 (±2,59)
	D C30-50	1,04 (±5,98)	1,76 (±3,44)
C60	REF C60	0,14 (±6,61)	0,23 (±3,25)
	LAB C60-25	0,16 (±2,77)	0,29 (±0,32)
	LAB C60-50	0,21 (±2,9)	0,34 (±0,28)
	D C60-25	0,18 (±1,22)	0,33 (±4,93)
	D C60-50	0,25 (±4,53)	0,43 (±7,60)

A partir da análise estatística pode-se dizer que os únicos valores de absorção capilar, após 72 horas de ensaio, na classe C30, iguais são os das misturas LAB_F C30-25 e LAB C30-25, enquanto a mistura REF C30 possui a menor a absorção e D C30-50 a maior. Após 28 dias de ensaio (672 horas) os concretos REF C30, LAB_F C30-25 e LAB C30-25 apresentaram resultados estatisticamente iguais, os demais são diferentes, sendo, novamente, a mistura D C30-50 a de maior absorção, 1,76 g/cm². O fato desta mistura possuir absorção capilar superior as outras, assim como absorção total e índice de vazios, está diretamente ligada ao seu valor de resistência à compressão, que é inferior ao das outras misturas desta mesma classe. Brito *et al.* (2016) encontraram resultados de aproximadamente 0,8 g/cm² para os concretos desta classe após 72 horas de ensaio de absorção por capilaridade.

Nos concretos de alto desempenho, após 72h de ensaio de absorção por capilaridade, os concretos com 25% de substituição possuem valores similares ao de referência, sem diferenças significativas, assim como as misturas com 50% de substituição, que são similares entre si. Para 672 horas de ensaio as únicas misturas que são estatisticamente iguais, são a LAB C60-50 e a D C60-50, ao passo que a REF C60 possui menor absorção, 0,23 g/cm². Evangelista e Brito (2007) estudaram concretos, contendo areia reciclada, desta mesma classe e obtiveram valores de absorção capilar para 60 horas em torno de 0,18 g/cm², valor semelhante ao obtido neste estudo.

A Figuras 5.17 e Figura 5.18 apresentam os ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade, das classes estudadas (C30 e C60).

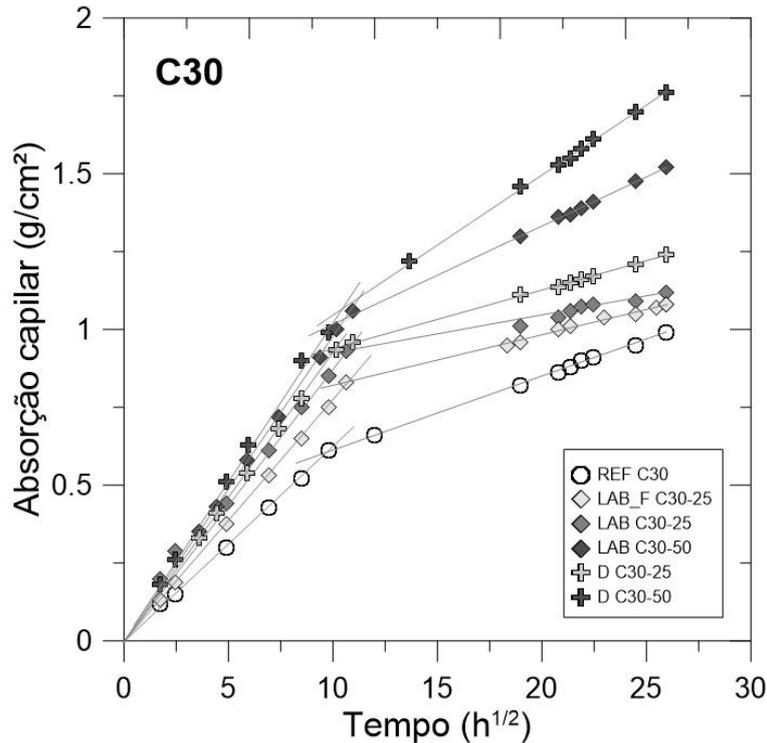


Figura 5.17- Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C30

Observa-se que a absorvidade é maior para o concreto de menor resistência, o D C30-50, tanto no estágio de saturação quanto no de absorção. A referência apresenta os menores valores de absorvidade, em ambos os trechos. As curvas dos concretos LAB C30-25 e D C30-25 são bem próximas no estágio de absorção, enquanto que no estágio de saturação o LAB C30-25 está mais próximo do LAB_F C30-25.

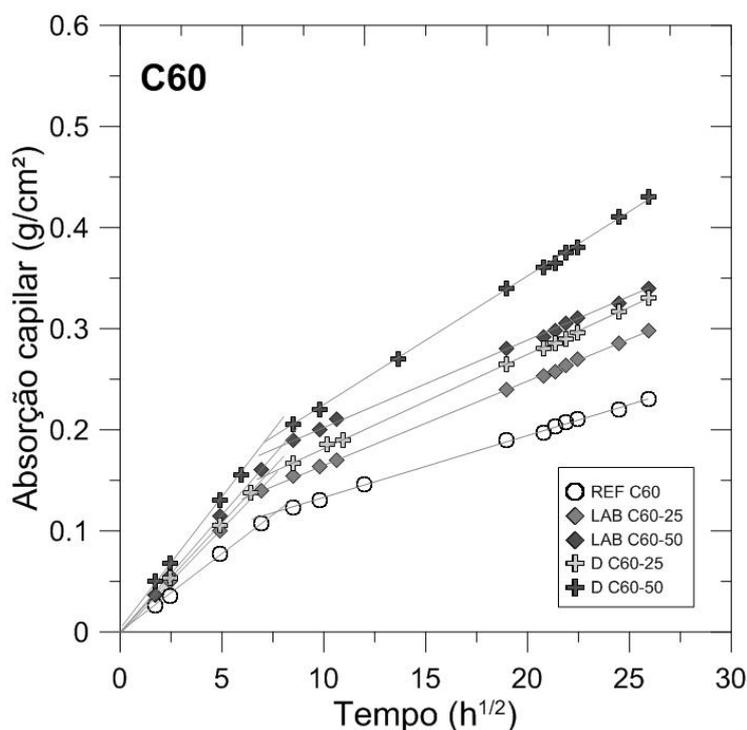


Figura 5.18 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C60

A absorvidade nas misturas de alto desempenho foi maior para os concretos reciclados, sendo significativamente maior para a mistura D C60-25 no estágio de saturação. Pode-se observar que as curvas do LAB C60-25, LAB C60-50 e D C60-25 são próximas, porém não permitem que todos os valores de absorção por capilaridade possuam o mesmo ajuste linear. Além disso, assim como na classe C30, é possível perceber que o aumento do teor de agregado reciclado na mistura aumenta a absorvidade. As misturas contendo a Areia D, possivelmente, absorvem mais em ambos os estágios devido a taxa de absorção da própria areia.

As absorvidades de cada mistura foram calculadas a partir do coeficiente angular das curvas de ajuste linear, estes valores de absorvidades são mostrados na Tabela 5.8. Foram determinados os pontos de transição (PT) e as absorvidades tanto no estágio de absorção (S1) quanto no estágio de saturação (S2).

Tabela 5.8 – Valores dos pontos de transição (P_T) e dos estágios de absorvidade (S1 e S2) dos concretos produzidos

Classe	Mistura	Ponto de transição (P_T)		Absortividade ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$)	
		g/cm^2	$\text{h}^{1/2}$	S1	S2
C30	REF C30	0,61	9,79	0,062	0,024
	LAB_F C30-25	0,83	10,52	0,079	0,016
	LAB C30-25	0,93	10,64	0,087	0,012
	LAB C30-50	1,06	10,95	0,097	0,031
	D C30-25	0,93	10,15	0,092	0,020
	D C30-50	0,97	9,43	0,103	0,048
C60	REF C60	0,12	7,59	0,016	0,006
	LAB C60-25	0,14	7,15	0,019	0,008
	LAB C60-50	0,17	7,67	0,022	0,009
	D C60-25	0,15	7,22	0,020	0,009
	D C60-50	0,19	7,34	0,025	0,018

A absorvidade no estágio de absorção cresce consideravelmente com a inclusão de agregado reciclado na mistura. O valor deste crescimento chega a ser 65,1% e 50,5% com substituição de 50% da Areia D, para a classe C30 e C60, respectivamente. Evangelista e Brito (2010) obtiveram resultados entre 34,4% e 70,3% de aumento na absorvidade, dependendo do teor de substituição. Os autores afirmam que esta variação está linearmente relacionada à quantidade de areia reciclada na mistura, assim o aumento da absorção cresce devido à criação de mais capilares longos, que é consequência da porosidade dos concretos reciclados. Ainda, estes pesquisadores, sugerem que alguns procedimentos adicionais poderiam ser usados para reduzir o efeito negativo do agregado reciclado em concretos, como a adição de materiais cimentícios suplementares, como sílica, cinzas volantes ou escórias de alto forno, como substituição do cimento Portland comum, uma vez que estes são conhecido por melhorar o desempenho.

Em ambas as classes, as misturas contendo areia reciclada obtiveram maior absorção capilar no estágio de absorção e estes resultados podem estar associados a uma maior quantidade de pasta nos concretos reciclados, que conduzem mais rapidamente a água no

estágio de absorção. A Figura 5.19 apresenta uma relação entre S1 e a quantidade total de pasta no concreto, com os teores de substituição utilizados nas misturas (0%, 25% e 50%).

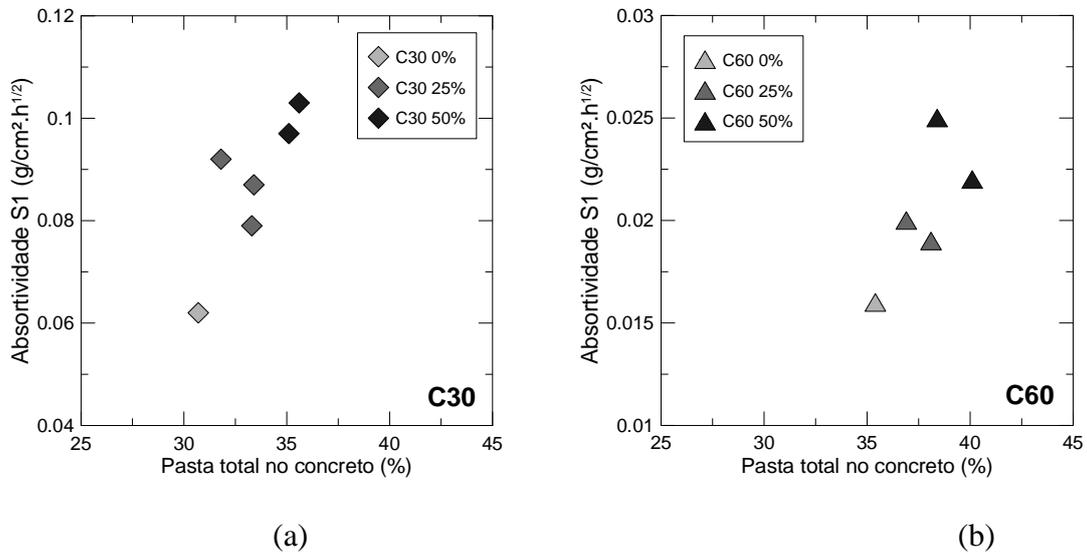


Figura 5.19 – Relação entre absorvidade e pasta total

Como pode ser observado, tanto na classe C30 quanto na C60, o aumento do teor de agregado reciclado, aumenta o teor de pasta e a absorvidade do concreto no estágio de absorção. Indicando que esta pasta estaria diretamente relacionada à velocidade com que o concreto absorve a água nesta etapa da absorção por capilaridade. Assim, verifica-se que apesar da resistência à compressão ser similar entre os concretos, a porosidade exerce grande influência na absorvidade e é pode reduzir a vida útil do concreto.

5.6 Retração por secagem

A Figura 5.20 e a Figura 5.21 apresentam os resultados de retração por secagem ao longo dos 90 dias de ensaio para as classes C30 e C60, respectivamente.

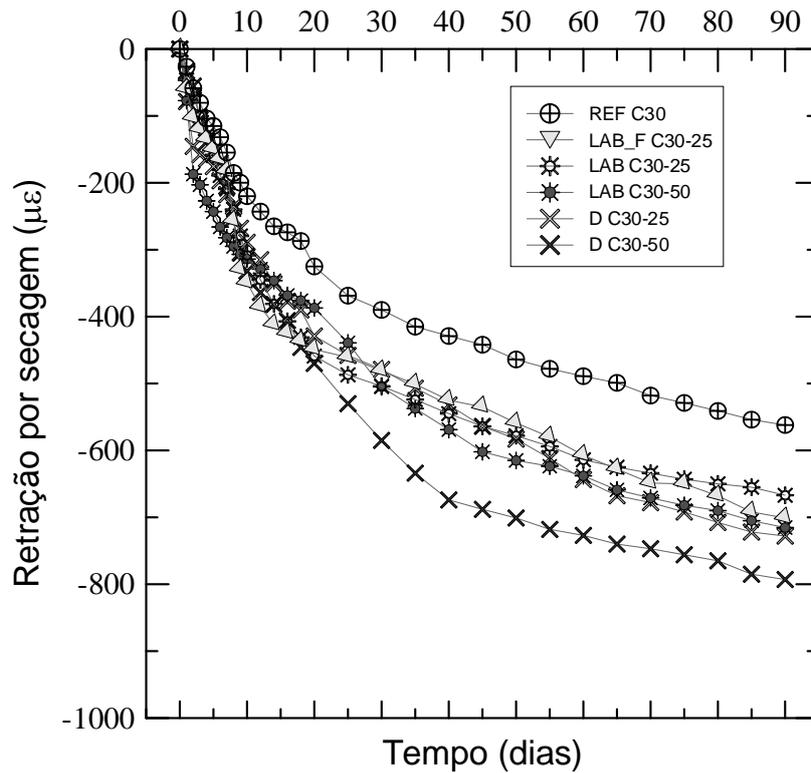


Figura 5.20– Retração por secagem dos concretos de classe C30

A retração por secagem dos concretos reciclados são significativamente superiores à retração do concreto convencional (REF C30), o aumento nesta propriedade varia entre 18,7 e 41,1%, sendo estes valores correspondentes às retrações dos concretos LAB C30-25 e D C30-50, respectivamente. Os concretos LAB_F C30-25, LAB C30-50 e D C30-25 possuem curvas de retração similares e crescimento desta retração em relação ao concreto REF C30 está em torno de 27%. Em seu trabalho, Ravindrarajah *et al.* (1987) confirmaram o crescimento considerável na retração por secagem para a classe C30, os autores obtiveram um aumento de cerca de 55% na retração, Ravindrarajah e Tam (1987) obtiveram crescimento em torno de 40%.

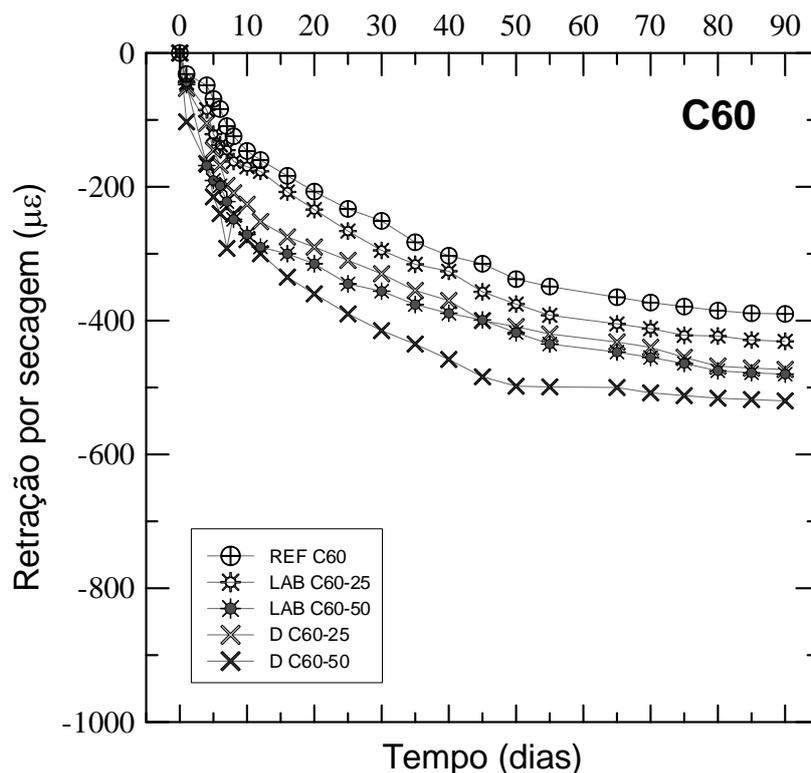


Figura 5.21 – Retração por secagem dos concretos de classe C60

A classe C60 possui resultados menores para retração, se comparado à classe inferior, e o aumento da retração varia entre 10,5 e 33,33%. As curvas das misturas LAB C60-50 e D60-25 são praticamente coincidentes e o crescimento da retração é em torno de 22% para estas misturas. O concreto D60-50, assim como para a classe C30, possui o maior aumento na retração, isto se deve à absorção mais elevada deste concreto e também pode estar ligado à origem desta areia. E, como esperado, os concretos desta classe possuem uma tendência de estabilizar a retração mais rápido, em relação aos concretos C30.

Silva *et al.* (2015) observaram retração de até 80% em concretos reciclados e concluíram que a incorporação de altos teores de agregado miúdo reciclado causa aumento na retração do concreto e a mesma parece ter um crescimento linear conforme o nível de substituição. Além disso os autores afirmam que, embora diversos pesquisadores observarem retração significativa nos concretos produzidos com estes finos e afirmarem que estes causam retrações maiores que os agregados graúdos de concreto, concretos contendo agregados miúdos reciclados podem ter a retração controlada simplesmente utilizando um processo de compensação de água, como o método utilizado neste trabalho.

Na Figura 5.22 estão apresentados os resultados de perda de massa dos concretos produzidos para a classe C30 e na Figura 5.23 para a classe C60.

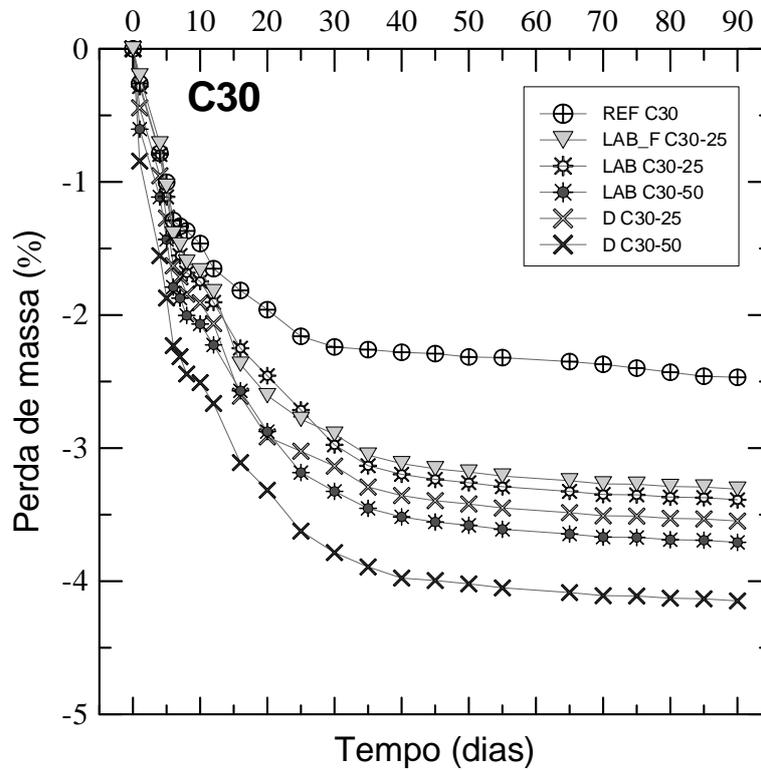


Figura 5.22 – Perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C30

Nota-se que a perda de massa é consideravelmente maior nos primeiros 30 dias de ensaio. A maior perda de massa é do concreto que obteve a maior retração por secagem, o D C30-50. As misturas LAB_F C30-25 e LAB C30-25 são similares e possuem uma perda de massa cerca de 35% maior que o concreto de referência. Ao final do ensaio todos os concretos haviam praticamente estabilizado suas massas.

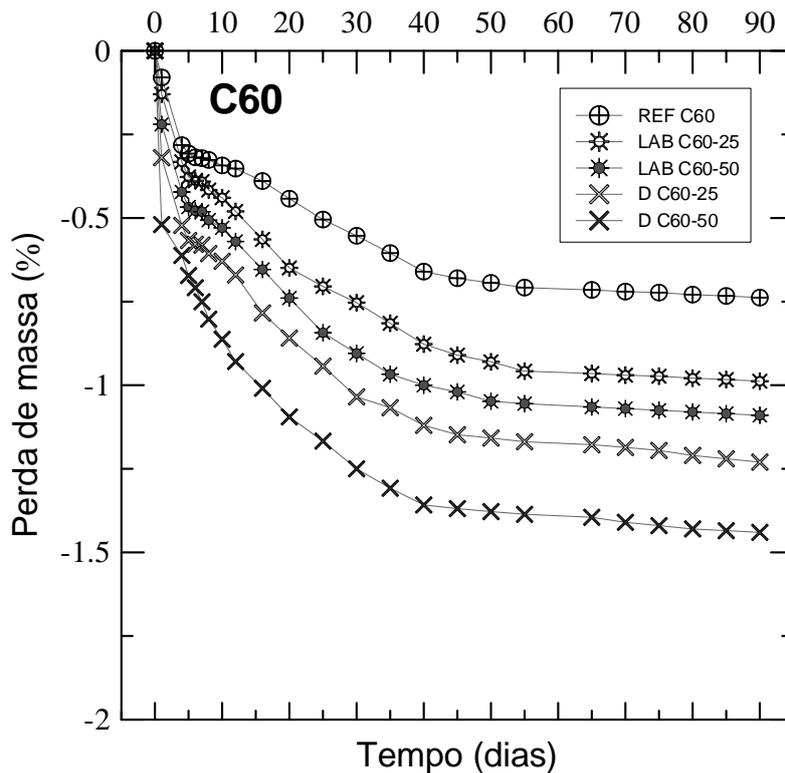


Figura 5.23 – Perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C60

Os concretos C60 possuem perda de massa menor que os concretos C30, o que era esperado, visto que estes concretos possuem menor quantidade de água livre, devido à relação a/c. Naturalmente, o concreto que obteve maior perda de massa foi o da mistura D C60-50, que possui menor retração, este concreto perdeu 95% a mais da massa perdida pelo concreto REF C60.

Segundo Silva *et al.* (2015), o uso de ARC de alta qualidade pode produzir concreto com retração equivalente à do concreto de referência da mesma classe e isto pode ser alcançado utilizando estágios de beneficiamento adicionais no procedimento de reciclagem do material, como métodos que reduzem a quantidade de pasta e argamassa aderida, pois estas umas das maiores responsáveis pelo aumento da retração em concretos reciclados.

A Figura 5.24 correlaciona a retração por secagem com a perda de massa dos concretos de classe C30, enquanto a Figura 5.25 faz a mesma correlação para os concretos C60.

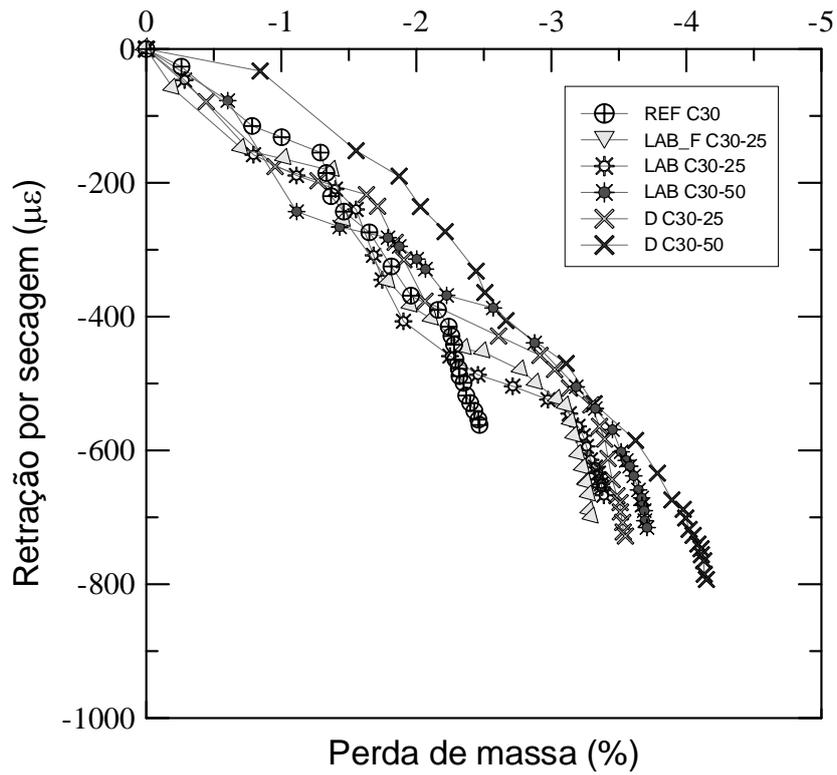


Figura 5.24 – Correlação entre a retração por secagem e a perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C30

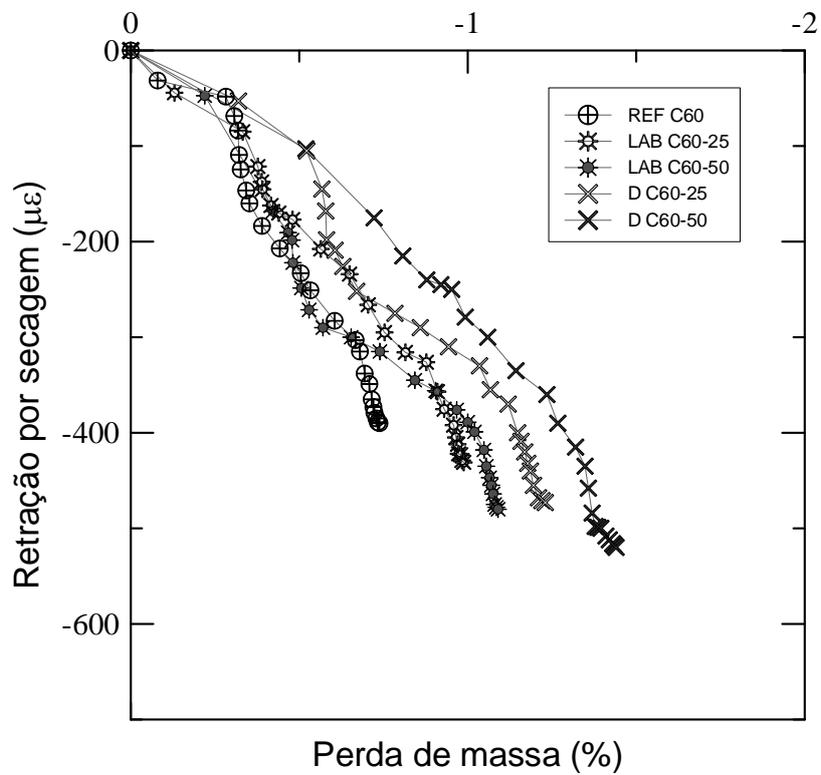


Figura 5.25 – Correlação entre a retração por secagem e a perda de massa, em percentual, dos concretos de classe C60

A perda de massa, naturalmente, aumenta com a crescente retração por secagem. No entanto, este crescimento não possui linearidade e as curvas apresentam diversos pontos de descontinuidade para todas as misturas. Na classe C30, quando a perda de massa é igual a 2%, por exemplo, a retração é cerca de 200 $\mu\epsilon$ para o concreto que possui maior absorção (D C30-50), enquanto que para o de referência a retração é maior que 300 $\mu\epsilon$. Isto deve-se ao fato da água que sai da referência provocar tensão nos capilares e, conseqüentemente, retração, diferentemente da água que sai do concreto com areia reciclada nas primeiras idades. Os concretos reciclados possuem uma quantidade maior de água não combinada, colocada para garantir a reologia, e esta água sai do sistema sem provocar grandes variações dimensionais. Ao observar a classe C60, para a perda de 0,5% de massa, por exemplo, pode-se encontrar o mesmo contexto verificado na classe C30, onde os concretos D C60-25 e D C60-50 possuem retração menor que o concreto de referência para a mesma perda de massa. Ao final dos 90 dias de ensaio, verifica-se que, para ambas as classes, os concretos reciclados apresentam maior retração e maior perda de massa, principalmente no concreto com 50% de substituição da Areia D.

Santos *et al.* (2017) explicam que há uma tendência a entrar em equilíbrio diante da exposição à umidade do ambiente, no entanto em atmosferas secas a superfície exposta perde água por evaporação. Além disso, os autores afirmam que de fato a primeira parcela de perda de água corresponde àquela água retida nos maiores poros capilares do concreto endurecido e que não causam variação de volume significativa, no entanto, com a continuidade da secagem, acontece a perda de água dos pequenos poros capilares e posteriormente do gel dos poros. E atribui o comportamento não linear com pontos de descontinuidade à interação entre mecanismos de evaporação da água do gel que muda a energia superficial da fase sólida e causa maior retração.

Tanto a perda de massa quanto a retração ocorrida nos concretos reciclados, é atribuída à porosidade e, conseqüentemente, maior absorção destes concretos. Ainda que eles possuam valores de resistência à compressão semelhantes, sua retração é significativamente superior em relação ao concreto de referência. Isto indica que a resistência do concreto está diretamente ligada à maior aderência dos grãos de AMRC, enquanto a porosidade exerce mais influência que a aderência na retração dos concretos.

5.7 Penetração acelerada de íons cloretos

A Figura 5.26 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de penetração acelerada de íons cloreto e o nível de penetrabilidade de íons cloretos à direita do gráfico. É válido lembrar que para valores maiores que 4000 C, a penetrabilidade é considerada alta, para valores entre 2000 C e 4000 C, moderada, para cargas entre 1000 C e 2000 C, baixa, concretos com cargas elétricas entre 100 C e 1000 C possuem muito baixa penetrabilidade, e, por fim, para cargas menores que 100 C a penetrabilidade é considerada negligenciável.

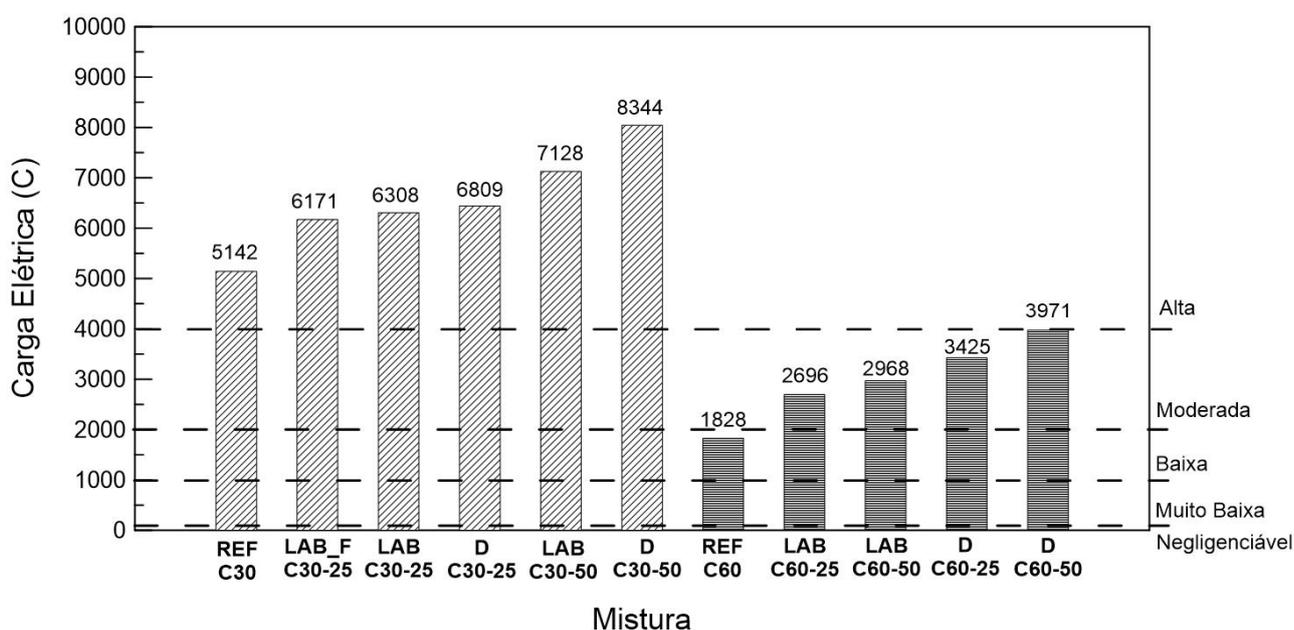


Figura 5.26 – Carga elétrica das misturas submetidas ao ensaio de penetração acelerada de íons cloretos

Em uma visão geral, os concretos da classe C30 possuem carga elétrica significativamente maior que os concretos de alto desempenho, isto se deve a baixa relação a/c da classe C60, que, conseqüentemente, reduz o índice de vazios, dificultando a penetração dos íons. Na classe C30, a mistura D C30-50, com 8344 Coulombs, possui o maior valor de carga, em torno de 62% maior que o REF C30, e é inclusive a maior carga elétrica dentre todas as misturas. Na classe C60 a maior carga também pertence a mistura com 50% de substituição da Areia D, sendo igual a 3971 Coulombs. Sim e Park (2011) estudaram concretos de alto desempenho e obtiveram cerca de 2300 Coulombs de carga para misturas contendo 60% de areia reciclada. Enquanto Shayan e Xu (2003) mediram aproximadamente 1000 Coulombs para concretos de alto desempenho com 50% de

agregado miúdo de concreto, este valor é consideravelmente inferior aos encontrados nesta pesquisa, indicando a alta variabilidade dos agregados reciclados.

Todos os concretos pertencentes a menor classe, possuem alta penetrabilidade, não sendo indicados para uso em lugares sujeitos a alta penetração destes íons, o que já era esperado devido à sua relação a/c que não permite sua utilização em ambientes agressivos. Já os concretos da classe C60, inclusive os reciclados, possuem penetrabilidade moderada, com exceção da referência, que possui penetrabilidade baixa. Para diminuir esta penetrabilidade, Shayan e Xu (2003) recomendam a utilização de pozolanas, como sílica ou cinzas volantes, em substituição parcial do cimento, pois estes materiais possuem alta resistência à passagem da carga elétrica (baixos valores de carga passada), logo possuem alta resistência à penetração de íons cloretos.

Assim como na retração e na absorvidade, na penetrabilidade de íons cloreto a porosidade do AMRC exerce mais influência que a aderência do agregado, diferentemente das propriedades mecânicas. Com maior absorção, há o aumento da carga passante pelos concretos reciclados que, devido à porosidade aberta, são capazes absorver uma maior quantidade de solução iônica.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- A origem do agregado influencia diretamente em suas propriedades e as correlações entre absorção e pasta aderida e entre absorção e massa específica, podem ser utilizadas como indicadores de qualidade dos AMRCs. A Areia D, possivelmente, provém de um concreto de menor qualidade em termos de resistência, em relação à Areia LAB, pois mesmo com menor teor de pasta aderida, a Areia D apresenta maior absorção e os concretos contendo esta areia se mostram ligeiramente inferiores.
- A adaptação do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) para AMRCs mostrou-se bastante eficiente com a compensação ideal da água de absorção dos agregados sendo igual a 80% para dosagem de concretos reciclados. Além disso o *Betonlab Pro 3* foi considerado uma ferramenta eficiente para aplicação do MEC e otimização dos traços.
- O abatimento de tronco de cone obtido para os concretos, foram similares entre si de acordo com as classes e todos os resultados obedeceram aos limites impostos de 100 ± 20 mm, ou seja, todos obtiveram trabalhabilidade similar.
- É possível a utilização de agregado miúdo reciclado de concreto em diferentes teores na produção de concretos de resistência normal e de alta resistência sem prejuízo no desempenho mecânicos devido à aderência dos agregados, que aumenta a resistência da interface pasta-AMRC.
- A absorção total é maior para os concretos reciclados e aumenta com o teor de substituição do agregado miúdo. Além disso, a absorção é maior para os concretos que contém a areia que possui maior absorção (Areia D). Enquanto que a massa específica diminui com a inclusão de agregados reciclados na mistura, já que agregados reciclados possuem massa específica inferior à dos agregados naturais. A absorção é menor e a massa específica maior, para os concretos de classe C60, pois estes possuem menos poros que os de classe C30.
- Para os valores de absorção de água capilaridade, quanto menor a classe de resistência dos concretos, maior é a absorção. Os concretos de classe C30 apresentaram maior absorção tanto no estágio de absorção (S1) quanto a no estágio de saturação (S2).

- A retração por secagem dos concretos C30 contendo areia reciclada é consideravelmente maior que a dos concretos de alto desempenho. As curvas da classe C60 possuem menor variação entre si e para as duas classes estudadas, os concretos produzidos com a Areia D apresentaram maiores valores de retração, atribuídos à elevada absorção deste agregado. E, conseqüentemente, este mesmo agregado, levou os concretos à maior perda de massa.
- Todos os concretos de classe C30, inclusive a referência, possuem alta penetrabilidade. Já os concretos reciclados de classe C60 foram todos classificados como de penetrabilidade moderada, com exceção da referência, que possui baixa penetrabilidade.
- As propriedades de durabilidade dos concretos contendo AMRCs são regidas pela porosidade aberta do concreto, enquanto o comportamento mecânico é influenciado fortemente pela interface do grão. Assim, para utilização dos agregados miúdos de concreto é recomendada uma maior atenção no que se diz respeito à durabilidade, para que haja manutenção destes concretos.
- Por fim, diante de todos os resultados obtidos para o agregado LAB_F, é possível afirmar que o uso de finos na areia, não influencia nenhuma das propriedades estudadas no concreto, podendo assim ser utilizado na produção de concretos com aproximadamente 25% de substituição e sem separação dos finos, otimizando o processo de beneficiamento para o uso de AMRC.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com intuito de complementar o estudo aqui realizado, propõe-se analisar a influência do agregado miúdo reciclado na retração autógena de concretos. Pois é fundamental avaliar se a areia reciclada possui potencial para restringir a retração de forma mais eficaz que o agregado miúdo natural.

Além disso, podem ser realizados estudos acerca do ciclo de vida deste tipo de agregado, considerando desde a etapa de beneficiamento até a produção dos concretos reciclados, avaliando a real sustentabilidade e determinando qual o percentual de redução (ou aumento) nos impactos ambientais pela utilização destes concretos alternativos.

Seria interessante analisar o comportamento estrutural de elementos pré-fabricados de concreto produzidos com agregados reciclados de concreto nas escalas finos ($>150\mu\text{m}$), miúdos e graúdos. Avaliando o comportamento físico, mecânico e durabilidade sob intempéries do concreto e dos elementos estruturais. A fim de investigar o potencial de uso, em pré-fabricados, de todos os elementos gerados no processo de beneficiamento do RCD simultaneamente, para que não haja nenhum tipo de descarte do resíduo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. “**Panorama dos resíduos sólidos no Brasil-2014**”. 2014. Disponível em: <www.abrelpe.org.br>. Acesso em: 18 de Janeiro de 2017.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. 2016. Disponível em: <www.abrelpe.org.br>.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **E-701: Aggregates for concrete** – ACI Education Bulletin E1-07. Materials for Concrete Construction. Michigan, 2016.

AMARIO, M. **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC)**. Rio de Janeiro, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 242p.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 155p.

ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico de Concretos**. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 167p.

ARAÚJO, L.D.; FELIX, L. P.; SILVA, L.C.; SANTOS, T.M.; Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista eletrônica de engenharia civil**. v. 11, 2016, n. 1, 16-34.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**”, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12819**: Concreto e argamassa – Determinação da elevação adiabática de temperatura – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASTM. **C596-09e1**: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2009.

BARROS, E. X. R.; FUCALE, S. O uso de resíduos da construção civil como agregados na produção de concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**. v. 2, 2016, n.1, p. 252-258.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002**. Diário Oficial da República Federal do Brasil.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em 15 de Janeiro de 2017

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 275 de 25 de abril de 2001**. Diário Oficial da República Federal do Brasil.

BRAVO, M.; BRITO, J.; PONTES, J. EVANGELISTA, L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**. v. 77, 2015, p. 357–369.

BRAYMAND, S.; ROUX, S; FARES, H; DÉODONNE, K.; FEUGEAS, F. Separation and Quantification of Attached Mortar in Recycled Concrete Aggregates. **Waste and Biomass Valorization**. v. 8, 2017, p. 1393–1407.

BRITO, J.; FERREIRA, J.; PACHECO, J.; SOARES, D.; GUERREIRO, M. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**. v. 6 , 2016, p. 1–16.

BUTLER, L. **Evaluation of Recycled Concrete Aggregate Performance in Structural Concrete**. Ontario, 2012. Tese de Doutorado, University of Waterloo, Canadá.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade**

da composição do RCD. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2007, 250p.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da USP.

CEMENT CONCRETE AGGREGATES. **Use of Recycled Aggregates in Construction.** Australia, 2008.

CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº307 de 5 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção. Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil. Brasília, 17 jul. de 2002. Disponível em: <www.mma.gov.br/conama>. Acesso em: 2 fevereiro 2017.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** Rio de Janeiro, 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006. 485 p.

CORINALDESI, V. AND MORICONI, G. Behaviour of Cementitious Mortars Containing Different Kinds of Recycled Aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, 2003 289-294.

DAfStb. **Guideline of the German Committee for Reinforced Concrete.** Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, Germany, 1998.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach.** Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999.

DESHPANDE, N.K.; KULKARNI, S.S.; PACHPANDE, H. STRENGTH. Characteristics Of Concrete With Recycled Aggregates And Artificial Sand. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**. vol. 2, 2012, p.038-042.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**. v. 29, 2007, p. 397-401.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**. v. 32, 2010, p. 9–14.

FAN, C.; HUANG, R.; HWANG, H.; CHAO, S. J. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. **Construction and Building Materials** .v. 112, 2016, p. 708–715.

Florea, M.V.A.; Brouwers, H.J.H. Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use. **Cement and Concrete Research**. v. 52, 2013, p. 11–21.

HANSEN, T.C. **RILEM Report 6 - Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. London, E& FN SPON na imprint of Chapman & Hall. 1992. 305p.

HKBD, 2004, **Code of practice for demolition of buildings**. Hong Kong Buildings Department, China.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de rd: características físicas e propriedades da microestrutura**. 2012. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

KHATIB, J.M.; Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**. v. 35, 2005, p.763–9.

KOU, S. C.; POON, C. S., Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**. v. 31, 2009, p. 622–627.

KOU, S.C.; POON, C.S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 35, 2012, p. 69–76.

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

LEVY, S. “Produzindo concretos ecologica e politicamente corretos”. **Exacta**, São Paulo, vol. 4, 2006, n. 2, pp. 375-384.

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Carlos, 1999. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1999, 240p.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength Concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions.** v. 33, 2000, p 574-580.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição.** 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Salvador, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo. PINI, 2008.

MELIM, J.M.M. **Gestão de resíduos de construção e demolição em obras de reabilitação.** 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – FEUP, Porto, Portugal, 2010.

MIRANDA, L.F.R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil.** 2005. 473 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

NEGRI, R. **Proposta de Metodologia para Ajuste de Dosagem de Concretos Desenvolvidos com a Incorporação de Resíduos Sólidos de Construção Classe A.** 144 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharias de Materiais) -Universidade do

Estado de Santa Catarina – UDESC, Centro de ciências tecnológicas – CCT, Joinville, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed . São Paulo: PINI,1997. 828p.

NTC, 2008, **Norme Tecniche per le Costruzioni**. Italian Ministry of Infrastructures and Transportation, Italia.

NUNES, K. R.A. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição**. COPPE/UFRJ. Tese de Doutorado Programa de Engenharia de Produção, 2004.

OLORUNSOGO, F.T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**. v 32, 2002, p. 179–185.

PEPE, M.,2015, **A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications**. Tese de doutorado, Università degli Studi di Salerno,Dipartimento di Ingegneria Civile, Salerno, Italia.

POLISSENI, C. G.; ANDRADE, G. P.; TOLEDO FILHO, R. D. Dosagem científica de concreto com agregado de resíduo de concreto. **V Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC)**, 2017, 606-620, Fortaleza, Brasil.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**. v. 16, 2002, p. 281-289.

PEDROZO, G.D. **Avaliação do uso de agregado miúdo obtido através da Reciclagem De Entulhos em Concreto de Cimento Portland**. 2014. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, Ijuí, 2014.

POZZOBON, M. P. **Resíduos da construção civil**. 2013. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Direito Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

RAVINDRARAJAH, R. S.; LOO, Y. H.; TAM, C. T., Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. **Magazine of Concrete Research**. vol. 39, 1987, pg 214–20.

RAVINDRARAJAH R.S.; Tam CT. Recycled concrete as fine aggregate in concrete. **Cement Composites Lightweight Concrete**. v.9, 1987, p. 235–41.

RILEM TC 121-DRG, 1994, “Specifications for Concrete with Recycled Aggregates”. **Materials and Structures**, v.27 (Nov.), pp. 557-559.

RODRIGUES, C. R. DE SÁ; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**. v. 14, 2014, n. 1, p. 99-111.

SÁEZ, P.V., MERINO, M.R., PORRAS-AMORES, C., GONZÁLEZA, A.S. Assessing the accumulation of construction waste generation during residential building construction works. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 93, 2014, p 67- 74.

SGANDERLA, M. S. (Re) **Aproveitamento dos Resíduos Classe A da Construção Civil na Substituição Parcial do Agregado Miúdo do Concreto**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí, 2015. SANTOS, D.O.J.; FONTES, C.M.A.; LIMA, P.R.L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. v. 22, 2017.

SHAYAN, A., XU, A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. *Mat. J. ACI*. v. 100 (5), 2003, p. 371–380.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R.K. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**. v. 77, 2015, p. 327–339.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management** . v.31, 2011, p. 2352–2360.

TAVARES, L.R.C.; **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho codiferentes adições**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal De Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.

TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise.** Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto.** Dissertação (mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Leopoldo, 2010.

YAPRAK, H.; HUSEYIN, Y. A.; DEMIR, I.; SIMSEK, O.; DURMUS, G. Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. **International Journal of the Physical Sciences.** v. 6, 2011, p. 2455-2461.

ZHAO, Z.; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; XU, W. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials.** 2013.