

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

MICHEL GUSTAVO CARDOSO CUNHA

**VIABILIDADE DO USO DE RCD PROVENIENTE DA GERAÇÃO DOS
CONCRETOS CONVENCIONAL E DE ALTA RESISTÊNCIA ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DO JIGUE COMO AGENTE DO BENEFICIAMENTO**

Porto Alegre

2017

MICHEL GUSTAVO CARDOSO CUNHA

**VIABILIDADE DO USO DE RCD PROVENIENTE DA GERAÇÃO DOS
CONCRETOS CONVENCIONAL E DE ALTA RESISTÊNCIA ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DO JIGUE COMO AGENTE DO BENEFICIAMENTO**

**Dissertação submetida ao
Programa de Pós Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica
e de Materiais da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito à obtenção do
título de Mestre em Engenharia na
modalidade acadêmica.**

Orientadora: Prof^a Dr^a Rejane Maria Candiota Tubino

Coorientadora: Prof^a Dr^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin

**Área de concentração:
Engenharia Civil, Ambiental e Metalurgia Extrativa**

**Porto Alegre
2017**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Profa. Dra. Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Profa. Dra. Carla Schwengber Ten Caten

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

CIP – Catalogação na Publicação

Cunha, Michel Gustavo Cardoso
Viabilidade do uso de RCD proveniente da geração dos concretos
Convencional e Alta Resistência através da utilização do jigue como agente do
beneficiamento / Michel Gustavo Cardoso Cunha. – 2017.
129 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, RS-BR, 2017.

Orientadora: Profª Drª Rejane Maria Candiota Tubino.
Coorientadora: Profª Drª Denise Carpena Coitinho Dal Molin

1. Resíduos de Construção e Demolição. 2. Política Nacional de
Resíduos Sólidos. 3. Composição Gravimétrica. I. Tubino, Rejane Maria
Candiota, orient. II. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, coorient. III. Título.

MICHEL GUSTAVO CARDOSO CUNHA
VIABILIDADE DO USO DE RCD PROVENIENTE DA GERAÇÃO DOS
CONCRETOS CONVENCIONAL E DE ALTA RESISTÊNCIA ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DO JIGUE COMO AGENTE DO BENEFICIAMENTO

Esta dissertação foi analisada e julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na modalidade acadêmica, e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a. Dr^a. Rejane Maria Candiota Tubino
Profa. Orientadora

Prof^a. Dr^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Profa. Coorientadora

Aprovado em: 08/11/2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Aguida Gomes de Abreu

Prof^a. Dr^a. Ângela Borges Masuero - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof^o. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dedico este trabalho aos meus familiares, que sempre estarão presentes em meu coração e em minhas boas lembranças.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) pela oportunidade de aprendizado.

À orientadora pelas horas dedicadas ao longo do mestrado e especialmente ao desenvolvimento deste trabalho, a coorientadora pelo conhecimento transmitido e aos colegas pelo apoio.

A minha Mãe por acreditar que posso ser melhor e a minha esposa por inúmeras vezes me dar coragem.

Aos familiares pelo apoio incondicional durante toda a minha jornada acadêmica.

Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário.

Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.

Bill Gates

RESUMO

O presente trabalho avaliou a viabilidade do uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) provenientes da geração de dois traços de concretos distintos. Um Concreto Convencional-CC (traço em massa:1:2,94:3,56; a/c:0,61) utilizando cimento CP IV 32 e outro concreto de Alta Resistência-CAR (traço em massa:1:1,11:2; a/c: 0,22; com adição, aditivo e pó xadrez vermelho) utilizando cimento CP V-ARI. Após 28 dias de cura, 3 corpos de prova de cada traço foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão axial apresentando em média para CC 21,02 MPa e para CAR 95,09 MPa. Os materiais de ambos os traços foram cominuídos através de um britador de mandíbula ajustado para granulometria menor que 19,1 mm e retido em 4,75 mm. Com isso, foram realizados ensaios de granulometria de cada traço, e misturados em volumes iguais para o beneficiamento do material. Os primeiros ensaios foram realizados no jigue a ar, porém os resultados apresentados foram insatisfatórios. Para o jigue à água ocorreu uma separação visível de 3 estágios (Topo, Meio e Fundo). Utilizando somente as camadas de topo e fundo, os agregados reciclados de concreto (ARC) foram utilizados para confecção de novos concretos. Os resultados apontaram que a aplicação do jigue à água possibilitou um beneficiamento do material para uso como agregado graúdo. Os ensaios de resistência à compressão, os concretos produzidos com a camada de fundo do agregado reciclado superaram os produzidos com agregado natural. Nos ensaios de módulo de elasticidade, os concretos com o agregado natural exibiram resultados melhores do que os reciclados do topo, porém para os concretos produzidos com os agregados do fundo, os módulos se igualaram aos dos concretos com agregado natural. No ensaio de absorção, o concreto reciclado mostrou uma absorção maior que o concreto natural. Para a carbonatação os concretos com agregados reciclados tiveram melhores resultados. As avaliações dos efeitos foram concludentes para o uso do jigue no beneficiamento do agregado reciclado de concreto (ARC).

Palavras chave: Resíduos de Construção e Demolição (RCD); Concreto Convencional (CC) e Concreto de Alta Resistência (CAR); Jigue a ar e Jigue à água; Agregado Reciclado de Concreto (ARC).

ABSTRACT

The present work evaluates the feasibility of using Construction and Demolition Waste (CDW) generated by two different concrete mixes, one being a conventional concrete-CC (mix:mass: 1:2, 94:3, 56, w/c: 0,61) using CP IV 32, and another being a high strength concrete - CAR (mix:mass: 1:1, 11:2, w/c: 0.22), with the addition of additive and red pigment) using cement CP V-ARI. After 28 days of curing, three test specimens of each concrete were submitted to the resistance test, presenting 21.02 MPa on average for CC and 95.09 Mpa for CAR. The materials of both mixes were comminuted by jaw crusher, and sieved to a particle size range of -19.1 mm + 4.75 mm. With this, granulometry, tests of each concrete were performed and the concretes were mixed in equal volumes for the application of the material processing. The first tests were performed by air jig, but the results were found to be unsatisfactory. A visible separation of 3 stages (Top, Middle and Bottom) was achieved by use of water jig. Using only the top and bottom layers, Recycled Concrete Aggregates (RCA) was added for the creation of new concrete. The results indicate that the application of the water jig made it possible to improve the material for use as a large aggregate. For the compressive strength tests, the concretes produced with the bottom layer of the recycled aggregate surpassed those produced with natural aggregate. In the modulus of elasticity tests, concretes with the natural aggregate presented better results than those recycled from the top. For the concretes produced with the bottom aggregates, the modules matched that of the concrete with natural aggregate. In the absorption test the recycled concrete showed a higher absorption than the natural concrete. For carbonation the recycled had better results. An evaluation of the results concludes in favor of the use of water jig for the recycling of concrete aggregates (RCA).

Keywords: Construction and Demolition Waste (CDW); Conventional Concrete (CC) and High Strength Concrete (CAR); Jig to the air and Jig to the water; Recycled Concrete Aggregate (RCA).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.....	27
Figura 2 - Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria	33
Figura 3 - Diagrama de funcionamento de um jigue.....	35
Figura 4 - Relação entre velocidade e tempo dos materiais durante a jigagem.....	37
Figura 5 - Localização do centro de massa em um sistema binário.....	39
Figura 6 - Reação dos diferentes tipos de partículas em relação a sua forma, densidade e tamanho	41
Figura 7 - Efeito da dispersão das partículas na jigagem descontínua e a representação dos leitos calculados segundo a teoria de Mayer (1964) e o modelo de dispersão	42
Figura 8 - Influência do tamanho de partícula na velocidade de penetração de esferas e cubos de aço em um leito de partículas esféricas de vidro.....	43
Figura 9 - Movimento das partículas e meio ao deslocamento do fluido em um jigue de pistão.....	44
Figura 10 - O processo da jigagem para interpretar o comportamento das partículas.....	46
Figura 11 - Fluxograma geral das etapas, processos e ensaios	48
Figura 12 - Fluxograma da 1º etapa.....	49
Figura 13 - Diâmetro das partículas de sílica ativa.....	52
Figura 14 - Fluxograma da 2º fase	56
Figura 15 - Representatividade do diâmetro das partículas	58
Figura 16 - Beneficiamento do Jigue, gerando as três camadas	61
Figura 17 - Vista de cima do material beneficiado, identificado como Topo.....	62
Figura 18 – Vista do material após o beneficiamento do jigue, camada de Fundo	63
Figura 19 - Identificação dos corpos de prova.....	65
Figura 20 – Cura dos corpos de prova de concreto	66
Figura 21 - Equipamento usado para o ensaio de resistência à compressão	67
Figura 22 (a) - Concreto Convencional (CC) (b) - Concreto de Alta Resistência (CAR)	67
Figura 23 - Britador de mandíbulas.....	68
Figura 24 - Pesagem dos 6 corpos de prova de concreto que compõem um lote.....	69
Figura 25 - Material identificado com massa (kg) antes e depois da Cominuição.....	69
Figura 26 – Aspecto visual do agregado proveniente do concreto convencional (CC) ...	70
Figura 27 – Aspecto visual do agregado proveniente concreto de Alta Resistência (CAR)	70
Figura 28 (a) - Jigue a ar (b) - Jigue a água.....	72
Figura 29 - Agregado reciclados em processo de secagem superficial	77
Figura 30 – Corpos de prova armazenados na câmara úmida	78
Figura 31 – Corpos de prova pintados e identificados	79
Figura 32 – Corpo de prova rompido para medir o avanço da umidade	79
Figura 33 - Reação da fenolftaleína na superfície do concreto	80
Figura 34 - Imagem da captação no programa	81

Figura 35 - Resistência à compressão e dispersão dos corpos de prova do Concreto Convencional.....	84
Figura 36 - Resistência à compressão e dispersão dos corpos de prova do Concreto de Alta Resistência.....	85
Figura 37 - Parâmetros de dosagem do Concreto Convencional e de Alta Resistência	86
Figura 38 - Granulometria dos dois tipos de concretos	87
Figura 39 - Valores cumulativos da análise granulométrica +19,1mm para -9,5mm.....	89
Figura 40 - Valores cumulativos da análise granulométrica +19,1mm para -4,75mm.....	90
Figura 41 - Ensaio quantitativo para o Jigue a água	91
Figura 42 - Percentual acumulado em cada malha para o ARC após jigagem	94
Figura 43 - Camada do Fundo do Concreto de Alta resistência (CAR).....	96
Figura 44 - Camada do Fundo do Concreto Convencional (CC).....	97
Figura 45 - Camada do Topo do Concreto de Alta resistência (CAR).....	97
Figura 46 - Camada do Topo do Concreto Convencional (CC).....	98
Figura 47 - Curva de dosagem para os concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho)	101
Figura 48 - Curva de dosagem para os concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados - ARC e agregados naturais - AN (testemunho)	102
Figura 49 - Módulo de Elasticidade dos concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho)	103
Figura 50 - Módulo de Elasticidade dos concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho)	104
Figura 51 - Absorção dos concretos confeccionados da camada do topo para os concretos produzidos com agregados naturais e concretos produzidos com reciclados.....	105
Figura 52 – Absorção dos concretos da camada do fundo para os concretos produzidos com agregados naturais e concretos produzidos com reciclados.....	106
Figura 53 - Distância percorrida na vertical pela umidade nos concretos elaborados da camada de topo.....	107
Figura 54 - A distância percorrida na vertical pela umidade nos concretos elaborados da camada de fundo.....	108
Figura 55 - Ensaio de carbonatação da camada de topo para os traços pobre, intermediário e rico	109
Figura 56 - Ensaio de carbonatação da camada de fundo para os traços pobre, intermediário e rico	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do cimento CP IV utilizado	50
Tabela 2 - Características químicas do cimento Portland CP V ARI empregado	51
Tabela 3 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI	51
Tabela 4 - Composição granulométrica resumida da sílica ativa	52
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia	54
Tabela 6 - Ensaio de granulometria do agregado graúdo	54
Tabela 7 - Análise química das matérias-primas do cimento CP IV	57
Tabela 8 – Granulometria a laser	58
Tabela 9 - Distribuição granulométrica e módulo de finura do agregado miúdo	59
Tabela 10 – Caracterização física do agregado graúdo	60
Tabela 11 - Materiais utilizados para o traço	64
Tabela 12 - Parâmetros utilizados no Jigue à ar	72
Tabela 13 - Parâmetros utilizados no Jigue a água	72
Tabela 14 - Tipos de traços aplicados	74
Tabela 15 - Distribuição Granulométrica do material de Topo	75
Tabela 16 - Distribuição Granulométrica do material de Fundo	76
Tabela 17(a) – Nomenclatura da camada Topo (b) - Nomenclatura da camada Fundo ..	77
Tabela 18 - Medida dos diâmetros dos corpos de prova (CC)	83
Tabela 19 - Medida dos diâmetros dos corpos de prova (CAR)	83
Tabela 20 - Ensaio de resistência à compressão do Concreto Convencional	83
Tabela 21 - Ensaio de resistência à compressão do Concreto de Alta Resistência	85
Tabela 22 - Acumulado do primeiro conjunto de malhas	88
Tabela 23 - Acumulado do segundo conjunto de malhas	89
Tabela 24 - Valores para massa específica, aparente e absorção de água	92
Tabela 25 - Granulometria retida na camada do Topo	93
Tabela 26 - Granulometria retida na camada do Fundo	93
Tabela 27 - Valores dos Índices de forma para os concretos	94
Tabela 28 - Valores da massa unitária, massa unitária SSS e índice de vazios	99

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
AN	Agregado natural
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
ARC	Agregado reciclado de concreto
ATT	Áreas de transbordo e triagem
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPs	Corpos de Prova
EPUSP	Escola Politécnica de São Paulo
FAN	Fundo Agregado Natural
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LAMTAC	Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído
M3	Traço Rico
M5	Traço Intermediário
M7	Traço Pobre
MPa	Mega Pascal
NORIE	Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduo da Construção Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SSS	Superfície seca em estado de saturação
TAN	Topo Agregado Natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVO GERAL	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	ENTULHO	20
2.1.1	Resíduo de Construção e Demolição (RCD) pelo mundo	21
2.1.2	Resíduo de Construção e Demolição (RCD) no Brasil	21
2.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	22
2.2.1	Cimento	22
2.2.1.1	Cimento Portland pozolânico - CP IV-32	23
2.2.1.2	Cimento Portland de alta resistência inicial - CP V-ARI	23
2.2.2	Sílica ativa	24
2.2.3	Aditivo Superplastificante	24
2.2.4	Agregados	25
2.2.5	Pigmentação	25
2.3	DOSAGEM	25
2.3.1	Método de dosagem EPUSP / IPT	26
2.4	ENSAIOS	29
2.4.1	Resistência à compressão	29
2.4.2	Módulo de elasticidade	30
2.4.3	Índice de forma	30
2.4.4	Massa específica, massa específica aparente e absorção	31
2.5	COMINUIÇÃO	31
2.6	GRANULOMETRIA	32
2.7	BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO	32
2.7.1	Crítérios para a seleção do equipamento	33
2.7.2	Jigagem	34
2.7.2.1	Teoria da hidrodinâmica da jigagem	35
2.7.2.1.1	<i>Sedimentação retardada diferencial</i>	36
2.7.2.1.2	<i>Aceleração diferencial</i>	36
2.7.2.1.3	<i>Consolidação intersticial</i>	38
2.7.2.2	Teoria da Energia Potencial	38
2.7.2.3	Modelo de dispersão	42
2.7.2.4	Ciclo de jigagem	44
2.8	ENSAIO DE ABSORÇÃO	46
2.9	CARBONATAÇÃO	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48

3.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA 1º ETAPA	49
3.1.1	Aglomerantes	50
3.1.1.1	Cimento Portland CP-IV 32	50
3.1.1.2	Cimento Portland CPV-ARI	50
3.1.1.3	Sílica ativa	51
3.1.2	Aditivo superplastificante	52
3.1.3	Água	53
3.1.4	Pigmentação	53
3.1.5	Agregados naturais	53
3.1.5.1	Agregado miúdo	53
3.1.5.2	Agregado graúdo	54
3.2	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA 2º ETAPA	55
3.2.1	Aglomerantes	56
3.2.1.1	Determinação de Área Superficial – Método BET	57
3.2.1.2	Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X	57
3.2.1.3	Distribuição granulométrica	58
3.2.2	Agregados naturais	59
3.2.2.1	Agregado miúdo	59
3.2.2.2	Agregado graúdo	59
3.2.2.3	Índice de forma do agregado graúdo	60
3.2.3	Água	60
3.2.4	Agregados reciclados	60
3.2.4.1	Agregado reciclado da camada do Topo	61
3.2.4.2	Agregado reciclado da camada do Fundo	62
3.3	MÉTODOS	63
3.3.1	1º etapa – Produção dos agregados reciclados de concreto Convencional (CC) e de Alta Resistência (CAR)	63
3.3.1.1	Definição da resistência à compressão e proporcionamento dos concretos de origem dos ARC	64
3.3.1.2	Produção dos concretos de origem dos ARC	65
3.3.1.3	Ensaio de resistência à compressão axial	66
3.3.1.4	Cominuição dos corpos de prova de concreto para produção dos ARC	68
3.3.1.5	Granulometria do ARC	70
a)	1ºconjunto de malhas: +19,1 mm, +15,9 mm, +12,7 mm, +9,5 mm e - 9,5 mm	71
b)	2ºconjunto de malhas: +19,1 mm, +12,7 mm, +9,5 mm, +6,35 mm, +4,75 mm e - 4,75 mm	71
3.3.1.6	Beneficiamento do ARC através do Jigue	71
3.3.1.6.1	<i>Análises de quantificação do material beneficiado em cada estágio</i>	73
3.3.1.6.2	<i>Determinação de massas específica real, massa específica aparente e absorção de água</i>	73

3.3.1.6.3	Granulometria por camada Topo e Fundo	73
3.3.1.6.4	Índice de forma	73
3.3.1.6.5	Microscópio digital	74
3.3.1.6.6	Determinação da massa unitária, massa unitária SSS e o volume de vazios 74	
3.3.2	2º etapa - Elaboração dos concretos com ARC e testemunho (com agregados naturais)	74
3.3.2.1	Preparação dos agregados reciclados	75
3.3.2.2	Nomenclatura dos Traços.....	77
3.3.2.3	Ensaio com os concretos de origem ARC e AN.....	78
3.3.2.3.1	Absorção de água.....	78
3.3.2.3.2	Carbonatação.....	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1	1º ETAPA – RESULTADOS DA ELABORAÇÃO DOS CONCRETOS DE ORIGEM DOS ARC.....	82
4.1.1	Resistência à compressão.....	82
4.1.2	Cominuição	86
4.1.3	Granulometria	87
4.1.3.1	1º conjunto de malhas: +19,1mm, +15,9mm, +12,7mm, +9,5mm e -9,5mm	87
4.1.3.2	2º conjunto de malhas: +19,1mm,+12,7mm, +9,5mm, +6,35mm, +4,75mm e -4,75mm	89
4.2	BENEFICIAMENTO DO MATERIAL ATRAVÉS DO JIGUE	90
4.2.1	Ensaio quantitativo no Jigue à água.....	91
4.2.2	Massas específica, massa específica aparente e absorção de água.....	92
4.2.3	Granulometria do ARC por camada de Topo e Fundo	92
4.2.4	Índice de forma do agregado graúdo reciclado	94
4.2.5	Microscopia digital	95
4.2.6	Determinação da massa unitária, massa unitária SSS e do volume de vazios...98	
4.3	2º ETAPA – ELABORAÇÃO DOS CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO E AGREGADO NATURAL (CONCRETO TESTEMUNHO)	99
4.3.1	Curvas de Dosagem das camadas Topo e Fundo dos agregados reciclados e natural	99
4.3.2	Módulo de Elasticidade das camadas Topo e Fundo	103
4.3.3	Absorção de água.....	104
4.3.4	Carbonatação.....	108
5	CONCLUSÕES	112
6	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
	REFERÊNCIAS.....	116
	ANEXOS	123

1 INTRODUÇÃO

O resíduo de construção e demolição (RCD) representa no Brasil cerca de 40% a 70% do resíduo sólido gerado em médias e grandes cidades, segundo levantamentos realizados entre 2014/2015 da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (Abrecon, 2017). Boa parte deste material acaba recebendo uma disposição irregular, gerando problemas estéticos, ambientais e econômicos.

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais em comparação a qualquer outro, sendo responsável por 50% do total do consumo destes recursos. O setor é responsável ainda por 40% do consumo total de energia e produz 50% do total de resíduos (OIKONOMOU, 2005).

No Brasil foram consumidos, em 2014, mais de 740 milhões de toneladas de agregados naturais, segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC, 2017). Em países europeus, por exemplo, a produção deste material corresponde a três bilhões de toneladas, o que resultou na imposição de taxas para seu uso em alguns destes países (MARINKOVIC et al., 2010).

A construção civil também é uma grande geradora de resíduos. No Brasil não há dados precisos quanto à geração de resíduos da construção civil, porém estima-se que a geração de RCD seja em torno de 150 kg/m² de resíduo por área construída (PINTO, 1999), sendo também sugerido o valor de geração da ordem de 500 kg/hab*ano (ANGULO E FIGUEIREDO, 2011). Já na cidade de Porto Alegre, estima-se que geração chegue a 350 toneladas de entulho por dia (VIEIRA, 2003).

A variabilidade do RCD é muito complexa devido a alguns fatores como: a região, a qualificação da mão-de-obra, a composição do material, se o concreto dosado é feito e regido por controle tecnológico, gerando um tipo de resíduo diferente de um concreto feito em obra sem inspeção nenhuma, entre outras (CALDERONI, 2012).

A evolução da legislação ambiental brasileira evidencia a necessidade da assimilação de conceitos de minimização da geração, reutilização e reciclagem de resíduos, conforme a Política Nacional do Meio Ambiente –

PNMA (BRASIL, 1981), Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010) e o Plano Estadual de Resíduos Sólidos – PERS/RS (RIO GRANDE DO SUL, 2015), visando aprimorar a gestão dos resíduos, entre os quais, os RCDs.

A gestão dos RCDs, por exemplo, baseia-se na Resolução CONAMA 307 (CONAMA, 2002) e na Política Nacional de Resíduos Sólidos, conforme Lei nº 12.305, 2 de agosto 2010 (BRASIL, 2010), que exige a destinação ambientalmente adequada, assim como, a elaboração dos planos de gerenciamento de resíduos.

A busca da reciclagem de RCD na própria construção civil já vem sendo estudada por alguns autores como Leite (2001), Lovato et al (2012), dentre outros, resultando em benefícios como a correta destinação dos resíduos, minimização dos seus potenciais impactos com a redução da extração do minério, além do benefício econômico. Ainda é considerada baixa a aplicação de resíduo na construção civil. Segundo alguns profissionais da área, isto é resultado da falta de experiência no uso e preconceito por achar que o produto é de baixa qualidade (REMBISKI, 2012).

Outro motivo da dificuldade de uso do RCD é a variabilidade que os mesmos apresentam, gerando agregados com diferentes resistências e porosidades, o que pode influenciar na durabilidade do concreto confeccionado com estes agregados. Para minimizar esta variabilidade, é possível utilizar técnicas de mineração através da jigagem.

O princípio de operação de jigues consiste em pulsar um leito de partículas mediante uma corrente de água ou ar, a fim de estratificar partículas de densidades distintas. Esta estratificação de partículas durante o processo de ciclos de jigagem resulta na conjugação de diversos fenômenos físicos (SAMPAIO E TAVARES, 2005). Com a estratificação, acredita-se ser viável obter agregados de RCD de melhor qualidade, passíveis de substituir os agregados naturais sem perda de desempenho do concreto produzido.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo dados de Fernandez (2012), o país gera cerca de 31 milhões de toneladas de resíduo de construção por ano, sendo que somente cerca de 20% deste material é reciclado. Deste material, boa parte é utilizado como forma de agregado graúdo, porém o maior desafio é a variabilidade de sua composição bem como a presença de impurezas e contaminantes que acabam por influenciar suas propriedades físicas e mecânicas. O grande desafio do uso de agregados reciclados para fabricação de concretos é a garantia da qualidade de suas propriedades. Diante desta lacuna, houve o interesse pela busca de novas técnicas de separação de agregados reciclados de construção. Dentre os vários processos de beneficiamento de minérios tem-se o equipamento jig que acaba por separar em camadas, materiais de semelhantes propriedades, como tamanho, forma, densidade entre outras. O uso do jig para o beneficiamento de agregados reciclados de construção e demolição vem ao encontro da necessidade de separação dos agregados em função de sua qualidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

Verificar a eficiência do processo de jigagem (equipamento da mineração) para qualificar os agregados provenientes de resíduos de construção e demolição, gerados a partir de dois tipos de concretos, e a sua viabilidade de utilização em concretos estruturais.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar o efeito da jigagem nas características dos agregados reciclados após segregação (massa específica, absorção, composição e forma das partículas, granulometria, entre outras);
- b) Verificar a eficiência do jig para segregar concretos de diferentes resistências;

- c) Verificar a influência da utilização dos agregados após separação por densidade na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, absorção e profundidade de carbonatação dos concretos com eles produzidos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. O Capítulo 1. Introdução apresenta as considerações iniciais sobre o trabalho, justificativa da escolha tema, objetivos geral e específicos. No Capítulo 2. Revisão da literatura são apresentadas pesquisas relacionadas ao tema e assuntos considerados relevantes para contextualização, desenvolvimento e a execução do trabalho. O Capítulo 3. Materiais e métodos apresenta a metodologia aplicada neste trabalho. No Capítulo 4. Resultados e discussões são apresentados os resultados, e os mesmos são discutidos e relacionados aos resultados da literatura. As Conclusões e as Propostas para trabalhos futuros compõem o quinto e sexto capítulos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O desenvolvimento sustentável surgiu através do avanço do progresso em meio à transformação da natureza, da quebra do conceito de que os recursos naturais fossem considerados ilimitados, e visto também como uma forma contraditória ao desenvolvimento, segundo Carneiro, Brum e Cassa (2001).

No segmento de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) o Brasil é considerado principiante em comparação com países da Europa, onde há escassez de recursos naturais, segundo Abrecon (2017). Dados revelam que a União Européia possui uma taxa média de 47% da reciclagem do material, e para a próxima década a meta é chegar a 70%, segundo Pacheco-Torgal et al. (2013). Os autores acentuam ainda o estudo de técnicas mecânicas, químicas ou térmicas, e também a combinação entre elas, para o beneficiamento dos resíduos de construção civil.

2.1 ENTULHO

O entulho é comumente conhecido, entre os profissionais da área, como caliça, pedregulhos, areia, tudo que sirva para aterrar, nivelar depressão de terreno ou vala. Pode conter restos de tijolos, argamassa, materiais inúteis resultantes da demolição.

O termo técnico para entulho é conhecido como Resíduo da Construção e Demolição (RCD) ou Resíduo da Construção Civil (RCC), que seria todo resíduo gerado no processo construtivo, de reforma, escavação ou demolição, conforme a ABRECON (2017). Por ser um material inerte, não requer cuidados específicos de controle, como os materiais perigosos, por essa razão em algumas regiões faltam dados próprios para mensurar a sua produção.

Pacheco-Torgal et al. (2013) evidenciam que existem três classificações de RCD encontrados para a reciclagem, sendo obtidas, através de uma seleção de materiais e a sua fragmentação em equipamentos adequados. São eles:

- Grupo I: Materiais compostos de cimento, cal, areia e brita, gerando concretos, argamassa e blocos de concreto.

- Grupo II: Materiais cerâmicos como telhas, manilhas, tijolos, azulejos.
- Grupo III: Materiais não recicláveis que seriam solo, gesso, metal, madeira, papel, plástico, matéria orgânica, vidro e isopor. Desses materiais, alguns são passíveis de serem selecionados e encaminhados para outros usos. Assim, embalagens de papel e papelão, madeira e mesmo vidro e metal podem ser recolhidos para reutilização ou reciclagem.

2.1.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD) pelo mundo

A reciclagem do RCD é algo inevitável a ser feito, os danos ambientais pela extração de recursos naturais vão além do desmatamento, consumo de energia, e escassez do material.

Pacheco-Torgal et al. (2013) salientam que nos Estados Unidos são estimados cerca de 140 milhões de toneladas de geração de RCD e na Europa estima-se a geração próxima de 970 milhões de toneladas por ano. Os autores acrescentam que haverá cada vez mais geração de emprego neste setor, pois a tendência é que se use 100% da reciclagem do material nos próximos anos.

Um relatório recente de análise estratégica do mercado europeu revela que os materiais e produtos químicos, reciclados na indústria da construção, geraram uma receita de 744,1 milhões de euros em 2010, e a estimativa era que atingiria cerca de 1,3 mil milhões de euros em 2016 (FROST E SULLIVAN, 2011).

Nos últimos anos as pesquisas se concentraram em três pilares: geração, redução e reciclagem, guiados pelo princípio dos '3Rs' (LU e YUAN, 2011). Para que ocorra o desperdício zero, será necessário uma liderança da indústria, novas políticas, programas educacionais, mudança de atitude e redução no desperdício de consumo (LEHMANN, 2011).

2.1.2 Resíduo de Construção e Demolição (RCD) no Brasil

Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2017), o Brasil é iniciante no processo de reciclagem. Atualmente há cerca de 310 usinas de reciclagem em todo país, inúmeras ATTs (Áreas de Transbordo e Triagem) e Aterros de

Inertes. A notícia desenvolvida pela entidade (20 de fevereiro de 2017) relata que alguns aspectos culturais e a falta de estrutura comercial atrapalham o consumo do material.

Hoje as usinas mais recebem resíduos, do que vendem, tornando-se depósitos de inertes, ainda que o custo do material e frete seja menor que o agregado natural vendido pela pedreira. Além disso, obtém-se outros benefícios, como sustentabilidade, logística reversa e impacto ambiental.

Existem regulamentações como o CONAMA 307/2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil; a lei 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos; e normas específicas complementam a tratativa dos resíduos da construção civil.

A composição do RCD também é variável em função da região geográfica, da época do ano, do tipo de obra, dentre outros fatores. No Brasil, estima-se que, em média, 65% do material descartado é de origem mineral, 13% são madeira, 8% são plásticos e 14% são outros materiais. As construtoras são responsáveis pela geração de 20 a 25% desse entulho, sendo que o restante provém de reformas e de obras de autoconstrução (FERNANDEZ, 2012).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Helene e Terzian (1992) já conceituavam a importância da caracterização dos materiais por terem grande influência no processo de dosagem, sendo fundamental conhecer as características dos mesmos. Para isso, os elementos são submetidos ao conjunto de regras ou métodos com o objetivo de uniformizar e garantir o seu modo de funcionamento e segurança.

2.2.1 Cimento

A produção do cimento se dá com extração de calcário nas minas de mineração, passando depois por uma avaliação de sua composição química para identificar a qualidade presente dos teores de cálcio, silício, ferro e alumínio, conforme Neville (2016).

A próxima etapa consiste no moinho de farinha, onde o calcário é misturado com argila (rica em sílica, ferro e alumínio) e aditivos específicos, formado por grãos muito finos chamados de farinha ou cru.

A seguir essa farinha percorre para o forno rotativo, onde alcançará temperaturas de 1450°C, fazendo a produção do clínquer. Logo é resfriado para uma temperatura de 200°C e acrescentado as outras matérias-primas: gesso, calcário e pozolanas ou escória. Dependendo da porcentagem de cada produto, obtém-se uma especificação de cimento (NEVILLE, 2016).

Com isso, a mistura percorre para o moinho, onde todos os elementos são moídos até atingirem a granulometria ideal, resultando em cimento de alta qualidade.

Os dois tipos de cimentos usados na elaboração deste estudo serão descritos a seguir.

2.2.1.1 Cimento Portland pozolânico - CP IV-32

O cimento Portland pozolânico possui um baixo calor de hidratação, recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. Sua resistência à compressão aos 28 dias alcança valor maior ou igual a 32 MPa. O alto teor de pozolanas, entre 15% e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.2.1.2 Cimento Portland de alta resistência inicial - CP V-ARI

O cimento Portland de alta resistência inicial tem alta reatividade em baixas idades devido ao seu alto grau de moagem e teor mais elevado de C₃S (alita). O clínquer é o mesmo utilizado na fabricação de um convencional, porém permanece no moinho por um tempo mais prolongado. Aos 7 dias alcança a resistência maior ou igual a 24 MPa e continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais (NEVILLE, 2016).

É utilizado em produção industrial de artefatos, onde se exige de forma rápida o concreto pretendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada. Devido ao alto calor de hidratação, não é indicado para concreto massa. Contém adição de até 5% de fíler calcário. A ausência de pozolanas não o recomenda para concretos com agregados reativos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.2.2 Sílica ativa

A sílica ativa é das adições minerais mais importantes quando se quer deixar o concreto mais resistente e durável. É utilizada para alcançar resistências superiores a 100MPa e também proteger o aço da corrosão. A finalidade de uma substância muito pequena no concreto é de permitir que os vazios sejam preenchidos, deixando-o mais denso e resistente.

A utilização de Sílica ativa em concretos apresenta vantagens como: baixa permeabilidade, porosidade, absorção, menor retração, maior durabilidade e aumenta a coesão, segundo Guimarães (2014).

Sua aplicação no concreto possui um efeito químico, na qual as partículas de SiO_2 são altamente reativas em contato com o hidróxido de cálcio, transformando-o em silicato de cálcio hidratado que subdivide os poros capilares, diminuindo a permeabilidade do concreto. Também está presente na zona de transição através do aumento da aderência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.2.3 Aditivo Superplastificante

Superplastificantes são aditivos químicos que podem ser usados em concretos ou argamassas, ao revestir os grãos de cimento provocam por meio de cargas elétricas repulsão entre os grãos. Esta repulsão promove uma fluidez entre os grãos, com menor quantidade de água, aumentando a trabalhabilidade antes da cura (ZHANG e KONG, 2015).

A resistência final é inversamente proporcional à adição de quantidade de água (relação água/cimento). Há vários aditivos com capacidades distintas aplicados em concretos. Nos últimos anos os policarboxilatos (chamados

também de aditivos de 3º geração) são os mais utilizados (ZHANG e KONG, 2015).

2.2.4 Agregados

Para os agregados miúdos e graúdos a característica de maior influência na dosagem é a granulometria, pois age na compacidade e resistência dos concretos (HELENE E TERZIAN, 1992).

Seguidos por módulo de finura aplicado em agregados miúdos, onde está relacionado com a área superficial do agregado, alterando a água de molhagem para certa consistência. E dimensão máxima para agregado graúdo, ligado à trabalhabilidade, espaçamento e no processo de transporte do concreto (HELENE E TERZIAN, 1992).

Os autores ainda citam outros fatores comuns entre os agregados como: massa unitária, que verifica a massa de certo volume de agregados e os vazios existentes entre os grãos; massa específica, que é a relação entre a massa e o volume.

2.2.5 Pigmentação

São pigmentos inorgânicos à base de óxido de ferro utilizados para fabricar e colorir pisos, argamassas, blocos, telhas, cal, argamassas de rejuntas, concretos, pisos intertravados, pré-fabricados, entre outros.

Conforme Piovesan (2009), estudos mostram que a adição de pigmentos se dá de forma benéfica, aumentando a resistência. Pode-se dizer, então, que a adição de pigmento apresenta comportamento semelhante às adições sem atividade pozolânica (fílers), onde a finura do material promove o preenchimento dos poros existentes, diminuindo os espaços vazios disponíveis para a água e assim, elevando a resistência à compressão.

2.3 DOSAGEM

É um conjunto de procedimentos para estabelecer o proporcionamento do concreto. Sua resistência não só depende da qualidade dos seus

elementos, como também da sua dosagem. Este procedimento é conhecido como traço do concreto, utilizado para a obtenção da melhor proporção entre os materiais, segundo Helene e Terzian (1992).

O traço é a relação entre a quantidade de cimento e os agregados miúdos (areia) e graúdos (brita), através do volume ou massa, não importando a unidade de medida, metros cúbicos, toneladas, litros, baldes entre outros; contanto que seja a mesma para todos os elementos (LEITE, 2001).

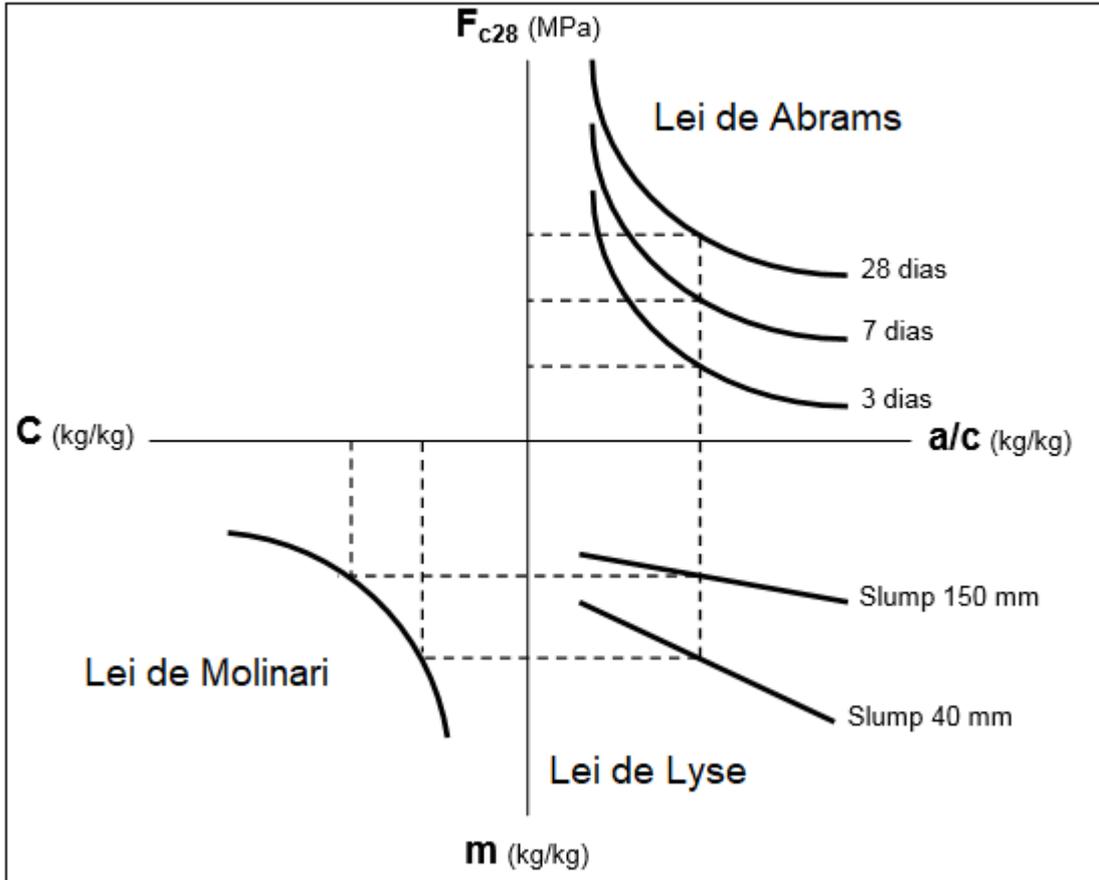
2.3.1 Método de dosagem EPUSP / IPT

O método denominado EPUSP/IPT, foi estabelecido pela Escola Politécnica da USP através do método desenvolvido no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. É apresentado no Manual de Dosagem e Controle do Concreto por Helene e Terzian (1992). Primeiramente deve-se decidir as características ou tipos de materiais que serão utilizados, como a granulometria máxima para o agregado graúdo, tipo de brita, a consistência desejada através do teste de abatimento de cone de tronco, com isso, dar início aos estudos experimentais.

São necessários três pontos para montar o diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão (Lei de Abrams), relação a/c (Lei de Lyse), traço e consumo de cimento (Lei de Molinari), conforme a Figura 1. O começo do estudo experimental parte da avaliação preliminar de parâmetros para um traço intermediário de 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) para definição do teor ideal de argamassa e, baseado nas informações dessa mistura, confeccionando mais duas, sendo uma rica (1:3,5) e outra mais pobre (1:6,5), segundo Helene e Terzian (1992).

A técnica parte da união de três quadrantes, onde são apresentadas as leis de comportamento, por meio de suas correlações. O quadrante da resistência à compressão do concreto expressa aos 28 dias (f_{ck}), a relação água/cimento verificando se não há excesso ou falta de água através do abatimento, e o quanto de unidade de cimento para obter as proporções dos agregados expressa por kg/m^3 (HELENE E TERZIAN, 1992).

Figura 1 - Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland



Fonte: Helene e Terzian (1992)

Lei de Abrams: expressa na equação 1 a resistência do concreto é função da relação a/c .

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (1)$$

Onde:

f_{cj} = resistência à compressão axial em MPa, à idade j (dias);

a/c = relação água/cimento, em massa (kg/kg);

K_i = depende exclusivamente dos materiais empregados (constante).

Lei de Lyse: a consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, é função da relação agregados secos/cimento (m), da relação água/cimento (a/c) e é independente do traço seco (1:a:b), conforme a equação 2.

$$m = k3 + k4 . a/c \quad (2)$$

Onde:

m = relação agregados secos/cimento, em massa (kg/kg);

a/c = relação água/cimento, em massa (kg/kg);

K_i = depende exclusivamente dos materiais empregados.

Lei de Molinari: Segundo a equação 3 o consumo de cimento de um concreto correlaciona-se com o valor do traço seco “ m ” através de uma curva do tipo:

$$C = \frac{1000}{(k5 + k6 . m)} \quad (3)$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³);

m = relação agregados secos/cimento, em massa (kg/kg);

K_i = depende exclusivamente dos materiais empregados.

O consumo de cimento por metro cúbico de concreto pode ser determinado a partir do ensaio de massa específica do concreto γ_{conc} e do traço (1:a:b:a/c), através das expressões complementares, representadas nas equações 4, 5 e 6.

$$C = \frac{\gamma_{conc}}{1 + a + p + a/c} \quad (4)$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado em kg/m³;

γ_{conc} = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m³;

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

p = relação agregados graúdos secos/cimento em massa, em kg/kg.

a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg.

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c} \quad (5)$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado em kg/m^3 ;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm^3/m^3 ;

γ_c = massa específica do cimento em kg/dm^3 ;

γ_a = massa específica do agregado miúdo em kg/dm^3 ;

γ_p = massa específica do agregado graúdo em kg/dm^3 ;

a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg ;

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg ;

p = relação agregados graúdos secos/cimento em massa, em kg/kg .

$$Q = C \cdot a/c \quad (6)$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado em kg/m^3 ;

a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg .

2.4 ENSAIOS

2.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a capacidade de um material resistir às tensões sem ruptura, dando uma percepção da qualidade do concreto, pois está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada (MEHTA E MONTEIRO, 1994). É a particularidade do concreto adotada pela grandeza em suportar o dimensionamento da estrutura. Alguns fatores para a resistência são extremamente importantes como a relação água/cimento, pois

ela afeta tanto a matriz da pasta do cimento como a zona de transição entre a pasta e o agregado (HELENE E TERZIAN, 1992). Os autores ainda acrescentam 3 fatores independentes, que compõem a qualidade do concreto em relação às tensões aplicadas, são elas: características e proporções dos materiais; condições de cura; e os parâmetros de ensaio.

Em relação ao uso dos agregados (RCD) em concretos alguns autores defendem o uso do agregado reciclado, na qual a sua resistência pode atingir cerca de 33% a mais que o agregado de referência (VIEIRA, 2003). Entretanto para Sanchez (2004), o RCD, por ter uma maior porosidade, possui a resistência mecânica cerca de 45% menor em relação ao agregado natural.

2.4.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma especificação mecânica que indica a rigidez do material em estado sólido. É uma propriedade específica dos materiais, que depende da composição química dos mesmos, microestrutura e defeitos (poros e trincas). São determinantes para a razão entre a tensão (carga aplicada) exercida e a deformação (mudança nas dimensões) sofrida (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Entre os concretos com agregados reciclados e os com agregados naturais existe uma diminuição entre 15% a 40% nos valores de módulos de elasticidade, e a medida que aumenta a resistência à compressão, maior a diferença entre os valores (HANSEN, 1992).

2.4.3 Índice de forma

Para Mehta e Monteiro (2008), a forma e a textura das partículas dos agregados atuam diretamente no concreto fresco. Segundo os autores, partículas arredondadas e lisas comparadas com as partículas ásperas e angulosas, gastam menos cimentos, com isso, diminui o custo do concreto.

A norma ABNT NBR 7809:1983 (Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro) define através do tamanho das partículas uma faixa de valor ideal.

2.4.4 Massa específica, massa específica aparente e absorção

Diversos autores (SAMPAIO E TAVARES, 2005; CABRAL, 2007; MEHTA E MONTEIRO, 1994) relatam que a massa específica é definida pela massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos da partícula. Para diversos tipos de rochas estes valores variam de 2,60 a 2,70 g/cm³. Classificação dos agregados quanto à massa específica:

- Leves: (<1g/cm³): pedras-pomes, vermiculitas e argilas expandidas;
- Normais: (1g/m³ a 2g/m³): areias quartzosas, seixos e britas gnáissicas;
- Pesados (> 2g/m³): barita, magnetita, limonita, etc.

Absorção é definida pela quantidade total de água demandada para fazer o agregado na condição seca para a condição de superfície seca saturada (METHA E MONTEIRO, 1994). A ABNT NBR 15116:2004 (Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural) limita a absorção de água em 12% e 7% para agregados miúdos e graúdos de concretos.

2.5 COMINUIÇÃO

O processo de fragmentação, no campo de beneficiamento de minérios, consiste em um conjunto de técnicas que tem por objetivo diminuir, por ação mecânica, um sólido, de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor (LUZ et al., 2010). Leite (2001) ressalta que a escolha do tipo de britador, o torna encarregado pela maior parte das propriedades. Para Tavares (2009), esta técnica representa de 50 a 75% de custos nas usinas de mineração, concentrando no consumo de energia elétrica e desgaste de metal. A cominuição se divide em duas etapas: a britagem representa a primeira etapa, responsável pelo tamanho e pela forma dos fragmentos de minério, a moagem como segunda etapa, incumbida da fragmentação fina.

Gonçalves e Neves (2003) indicam que os melhores resultados para agregados de RCD são os produtos vindo da combinação de uma britagem de mandíbula (gera partículas angulares), seguido por de uma britagem giratória (gera partículas mais arredondadas).

De acordo com Telles (2006), o britador de mandíbulas fragmenta o material comprimindo em um movimento periódico, uma superfície fixa e a outra superfície móvel, normalmente a câmara em formato de V.

2.6 GRANULOMETRIA

Granulometria é a classificação de diferentes tamanhos de partículas (grãos), em porcentagem, que constituem um agregado, definido por uma série de peneiras de aberturas padronizadas, com a finalidade de determinar suas características físicas, representados através de uma curva (SAMPAIO E TAVARES, 2005). A composição granulométrica tem uma grande influência nas propriedades das argamassas e concretos, no entanto, não existe uma composição ideal, pois a trabalhabilidade depende de outras variáveis como área superficial, quantidade de finos e relação a/c (NEVILLE E BROOKS, 2013). A norma ABNT NBR 7211:2005, define a classificação dos agregados miúdos e graúdos. No caso dos agregados reciclados a curva granulométrica é instável, por essa razão irá depender do tipo de material que está sendo beneficiado, o método aplicado e a granulometria do material inicial (LIMA, 1999).

2.7 BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO

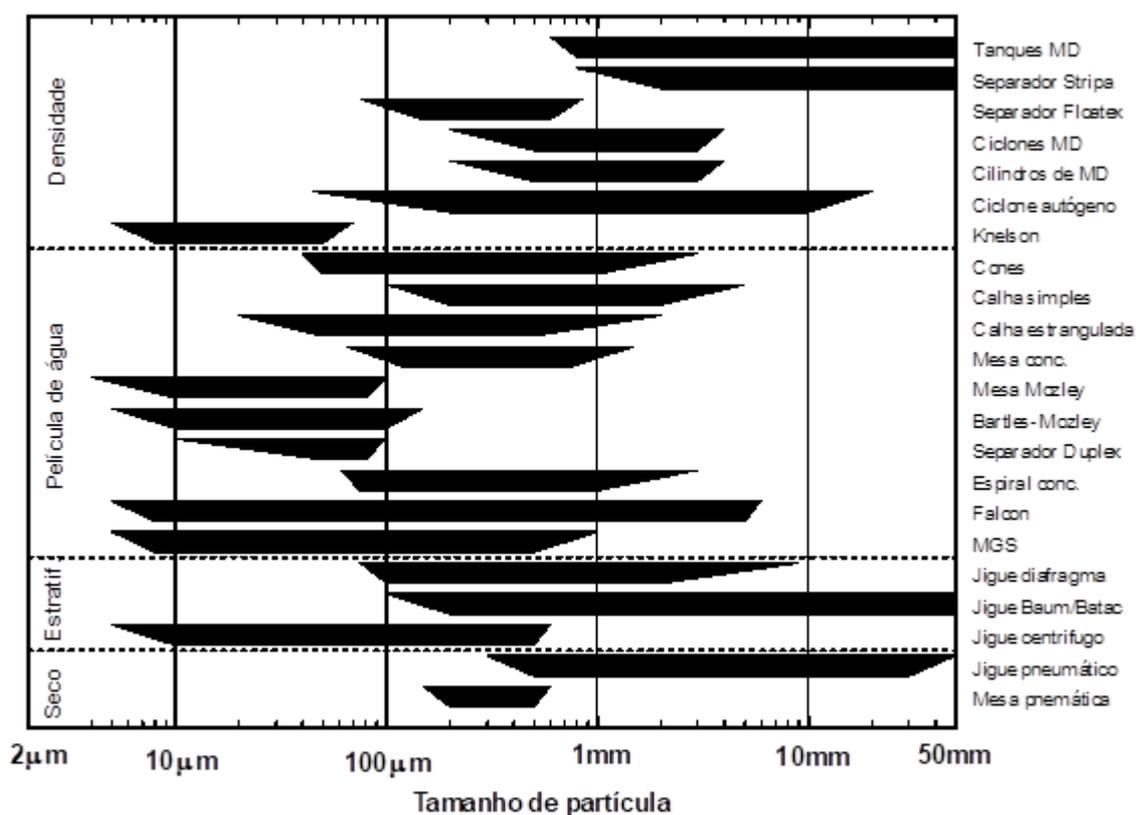
Segundo Sampaio e Tavares (2005), o beneficiamento gravimétrico consiste no uso de técnicas que visam separar partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas na mineração. Tem como objetivo isolar os elementos através de aparelhos concentradores, ocasionando o movimento das partículas em fluídos, evidenciando a diferença entre as características físicas e químicas de cada material. Por meio destas propriedades como diferenças de massa, formato, tamanho, porosidade, além da densidade, se houver distinção em pelo menos alguma delas é possível haver separação entre os materiais.

2.7.1 Critérios para a seleção do equipamento

De acordo com Ulsen (2006), a reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) poderia ser classificada como um beneficiamento de mineral já que se trata de agrupar materiais homogêneos oriundos de materiais heterogêneos. Para Sampaio e Tavares (2005), para a escolha do equipamento mais adequado ou processo, é preciso levar em conta alguns fatores importantes, como a granulometria, a taxa de alimentação, a fase em que é empregado no processo, custo e a eficiência. Os autores ainda salientam que na reciclagem de materiais, é um processo de alta precisão, devido a busca pela qualidade dos produtos.

A Figura 2, mostra a aplicação de diferentes técnicas de concentração gravimétrica em função da granulometria, para minerais pesados de gangas silicatadas.

Figura 2 - Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria



Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

Os limites existentes do tamanho das partículas, na utilização dos tipos de processos, irão depender das densidades e da forma dos materiais. Existem mais de um equipamento que podem ser usados em um determinado material, porém deve-se mensurar algumas questões como eficiência, capacidades, custos de operação e investimento. Os processos de jigagem em meio-denso são principalmente as opções para materiais acima de 2 milímetros, afirmam Sampaio e Tavares (2005).

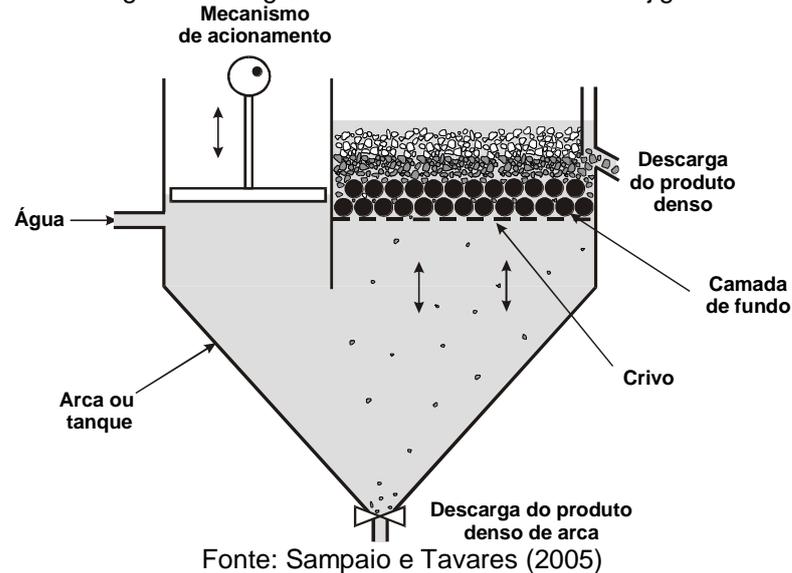
2.7.2 Jigagem

O processo de jigagem consiste em separar os materiais em camadas ou faixas, através da dilatação e contração vertical de um leito particulado. Esta aplicação resulta para as partículas uma separação, pois potencializa as diferenças de densidades entre os materiais, com isso, gradualmente estratificando o material, desde o topo até sua base (SAMPAIO E TAVARES, 2005). A jigagem é uma técnica antiga. Pressupõem que seu princípio básico começou no Egito, porém seu aperfeiçoamento iniciou no tempo de Georgius Agricola no ano de 1556. Este método é amplamente usado devido à sua economia.

Os jiges podem ser classificados em duas categorias: os jiges de crivo fixo são os mais comuns, onde a água se move através do crivo, causando a expansão e dilatação frequente do leito. E jiges de crivo móvel consiste na formação de um leito em uma superfície dotada de movimento alternativo vertical dentro de um tanque, formando um movimento de pulsação da água através do fundo do crivo (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

A Figura 3, mostra um jige de crivo fixo, em que o seu mecanismo é através da expansão do fluido, sendo realizada de forma mecânica ou por meio de um êmbolo. A pulsação da água ou ar de forma intermitente é obtida por uma válvula especial, afirmam Sampaio e Tavares (2005).

Figura 3 - Diagrama de funcionamento de um jigue



O material heterogêneo é alimentado pela parte superior do equipamento, com isso, o reservatório é ocupado por água (fluido) até o material estar totalmente submerso. O acionamento do equipamento de expansão e contração cria a movimentação do material.

No estudo dos fundamentos da jigagem existem duas teorias que defendem diversas questões da estratificação de jigagem na vertical. A primeira seria a hidrodinâmica, que retrata a atuação da partícula individual no fluido. A outra teoria seria a energia potencial, que descreve a atuação do leito como um todo (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

2.7.2.1 Teoria da hidrodinâmica da jigagem

A teoria hidrodinâmica retrata que o movimento de uma única partícula no jigue, reflete o movimento das demais em conjunto. Gaudin¹ (1939 *apud* Sampaio e Tavares, 2005) expôs que este movimento seria a combinação de três mecanismos principais: a sedimentação retardada diferencial, a aceleração diferencial no início da queda, e a consolidação intersticial das partículas durante a sucção. Estes mecanismos são descritos na sequência.

¹ GAUDIN, A. M.; 1939. Principles of mineral dressing, MacGraw- Hill Book Company Inc.; New York. 554pp.

2.7.2.1.1 Sedimentação retardada diferencial

A sedimentação retardada diferencial compete na razão de sedimentação correspondente ao quociente dos tamanhos das partículas de mesma velocidade terminal de sedimentação, na qual, quanto maior a razão na sedimentação, mais fácil será o beneficiamento das partículas por densidade expressa pela equação 7 (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

$$\frac{d_l}{d_d} = \left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_l - \rho_a} \right)^q \quad (7)$$

Onde:

ρ_l e ρ_d = densidades dos componentes leve e denso;

ρ_a = densidade aparente da polpa;

$q = 1$ para o regime Newton ou $q = 0,5$ para o regime Stokes.

Conforme aumenta a densidade aparente da polpa, aumenta também a razão da sedimentação. Outro fator que contribui para o aumento desta relação é o uso do regime de Newton para partículas de faixas maiores devido a diferença de densidades. No regime Stokes onde prevalece a granulometria mais finas, a separação pelo mecanismo da sedimentação diferencial é menos eficaz (SAMPAIO E TAVARES, 2005). À medida que o tamanho da partícula diminui, as forças de natureza física (a gravidade) tornam-se insignificantes, ao mesmo tempo em que as chamadas forças de superfície (forças estruturais, ou interações coloidais) aumentam sua importância e passam a determinar o comportamento dos sistemas coloidais que são caracterizados pela estabilidade, estrutura e reologia (DA LUZ et al., 2010).

2.7.2.1.2 Aceleração diferencial

Para Sampaio e Tavares (2005), a aceleração diferencial expressa pela equação 8, seria válida somente para o início do movimento no jigge, sendo possível separar as partículas de diferentes densidades, sem que houvesse

interferência do tamanho das partículas, levando em conta análise da variação da velocidade de sedimentação no fluido.

$$\frac{d\sigma(0)}{d\tau} = \frac{2(\rho_s - \rho_f)}{2\rho_s + \rho_f} \times g \quad (8)$$

Onde:

$d\sigma$ = diâmetro volumétrico equivalente da partícula;

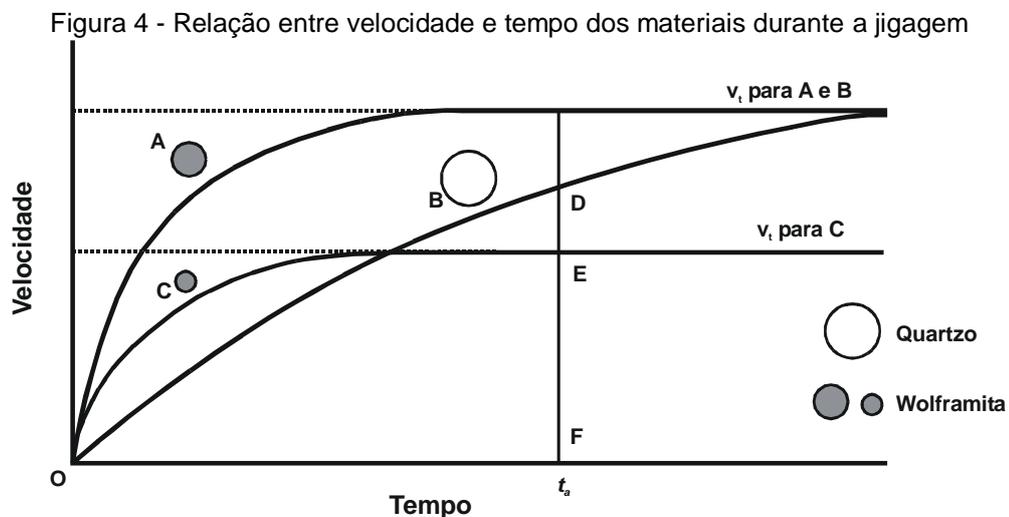
ρ_s = densidade da partícula;

ρ_f = densidade do fluido;

g = aceleração da gravidade.

Lins (2004) afirma que, em decorrência de acelerações e desacelerações as partículas acabam sendo ocupadas boa parte do seu período total de deslocamento no estágio da aceleração.

A Figura 4 exhibe a variação da velocidade de sedimentação em relação ao tempo, para duas partículas esféricas distintas (wolframita e quartzo) em água, significando que a influência da partícula maior (B) ao longo do tempo de sedimentação aumenta, se igualando com a partícula menor (A) na velocidade terminal (V_t).



Com isso, para que ocorra a separação mais significativa é preciso diminuir o tempo de deslocamento e que o ciclo de jigagem (expansão e

compactação) seja realizado inúmeras vezes em um curto período de tempo, fazendo com que o resultado da aceleração diferencial prevaleça sobre a velocidade terminal (V_t) (SAMPAIO E TAVARES, 2005). Ressalta-se que a teoria estuda as partículas esféricas, não levando em conta o efeito da forma e as interações entre elas.

2.7.2.1.3 *Consolidação intersticial*

O mecanismo de consolidação intersticial define que partículas de tamanhos e densidades distintas, percorrem distâncias diferentes durante a jigagem. Sampaio e Tavares (2005) afirmam que, com as maiores velocidades de sedimentação, as partículas maiores irão atingir suas posições de repouso antes das menores, na região do crivo do jig ou acima de alguma camada. Barcelos (1998) reitera que as partículas transitam por caminhos distintos em cada período de queda, e conseqüentemente repousam em lugares diferentes. No entanto, devido a presença de interstícios entre as partículas grossas, as partículas finas continuam no processo de sedimentação. Esta prática é chamada de consolidação intersticial. Este mecanismo é difícil mensurar quantitativamente, para partículas esféricas em um arranjo compacto a consolidação intersticial é igual a 0,41 vezes o diâmetro das esferas.

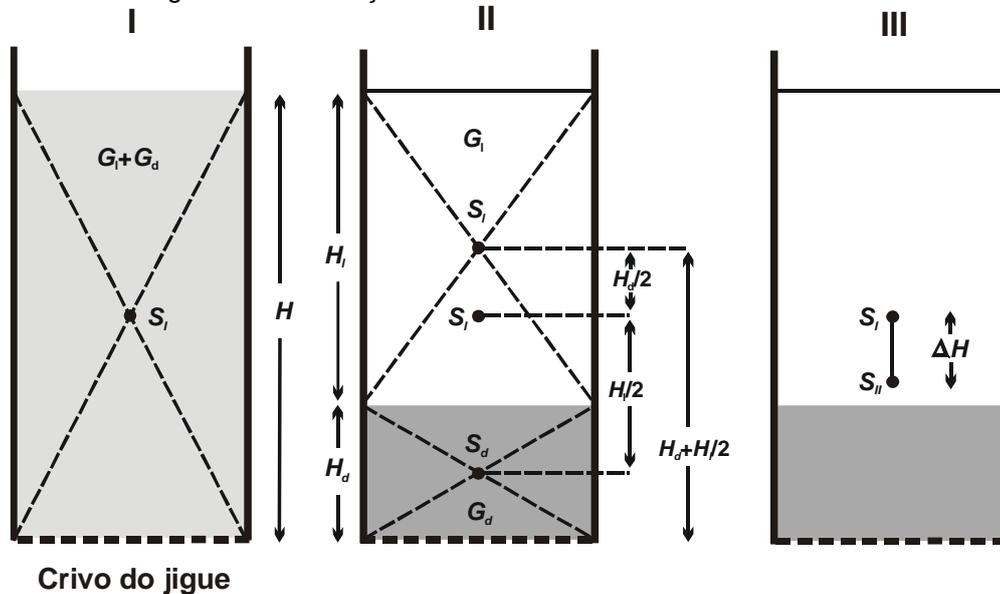
Para uma consolidação intersticial significativa é importante que durante a jigagem, seja utilizada um fluido denso para a recuperação das partículas finas. Porém, como a velocidade terminal das partículas finas é pequena, é necessário que o período de sucção seja suficientemente longo (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

2.7.2.2 **Teoria da Energia Potencial**

De acordo com Sampaio e Tavares (2005), a teoria da energia potencial apresentada por Mayer (1964), indica uma diferença de energia potencial gravitacional, entre o material misturado e o estratificado, em relação à densidade. Sabendo-se que a energia potencial é a verdadeira responsável pela estratificação, esta teoria pode ser desenhada por uma mistura binária simples de dois estados ideais no leito de partículas, esboçado na Figura 5.

Barcelos (1998) acrescenta que todo leito possui uma energia potencial: com a dispersão do leito e redistribuição das partículas com densidades distintas, acabam buscando rearranjo gerando o mínimo de energia.

Figura 5 - Localização do centro de massa em um sistema binário



Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

No primeiro (I) a energia potencial do leito do jigge perfeitamente homogênea das partículas de diferentes densidades e tamanhos, representados na nomenclatura $G_l + G_d$ (G_l para partícula leve e G_d partícula densa) e o S_1 como o centro das partículas, através da equação 9.

$$E_I = (G_l + G_d) H/2 \quad (9)$$

Onde:

E_I = energia potencial (I);

G_l = partícula leve;

G_d = partícula densa;

H = altura.

No segundo (II) a energia potencial gravitacional do leito totalmente estratificada das partículas de diferentes densidades, as partículas com densidades leves (G_l) na parte superior e partículas densas no fundo (G_d), conforme a equação 10.

$$E_{II} = (H_I/2 + H_d) + G_d (H_d/2) \quad (10)$$

Onde:

E_{II} = energia potencial (II);

H_I = altura da partícula leve;

H_d = altura da partícula densa.

E o terceiro (III) a variação da altura entre os centros das partículas demonstrado nas letras S_I e S_d (S_I centro das partículas leves e S_d partículas densas) do material já estratificado. A equação 11 exibe o resultado geral aplicado nas duas etapas do beneficiamento do material. Se o termo $((G_I H_d)/2)$ é positivo, representa um acúmulo de energia (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

$$\Delta E = E_I - E_{II} = (G_d H_I - G_I H_d) / 2 \quad (11)$$

Sendo assim, existe uma diferença de energia potencial gravitacional entre o material estratificado para o não estratificado, por meio da diferença de peso específico das partículas. Outro ponto, a importância do material não estratificado (homogêneo), com densidade distinta, em um processo mecânico visa a diminuição de energia, tornando o beneficiamento perfeito (SAMPAIO E TAVARES, 2005). Os autores ainda destacam a relevância de manter as mesmas proporções volumétricas de cada material, em atuação com a diferença de densidade, ocasionando a facilitação da separação.

O número de pulsações ou o tempo de jigagem são fatores pertinentes para a estratificação do material de uma forma eficiente, segundo a equação 12, na qual a constante K que caracteriza a velocidade da estratificação, indica que quanto maior for o seu valor, mais rapidamente ocorrerá a separação (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

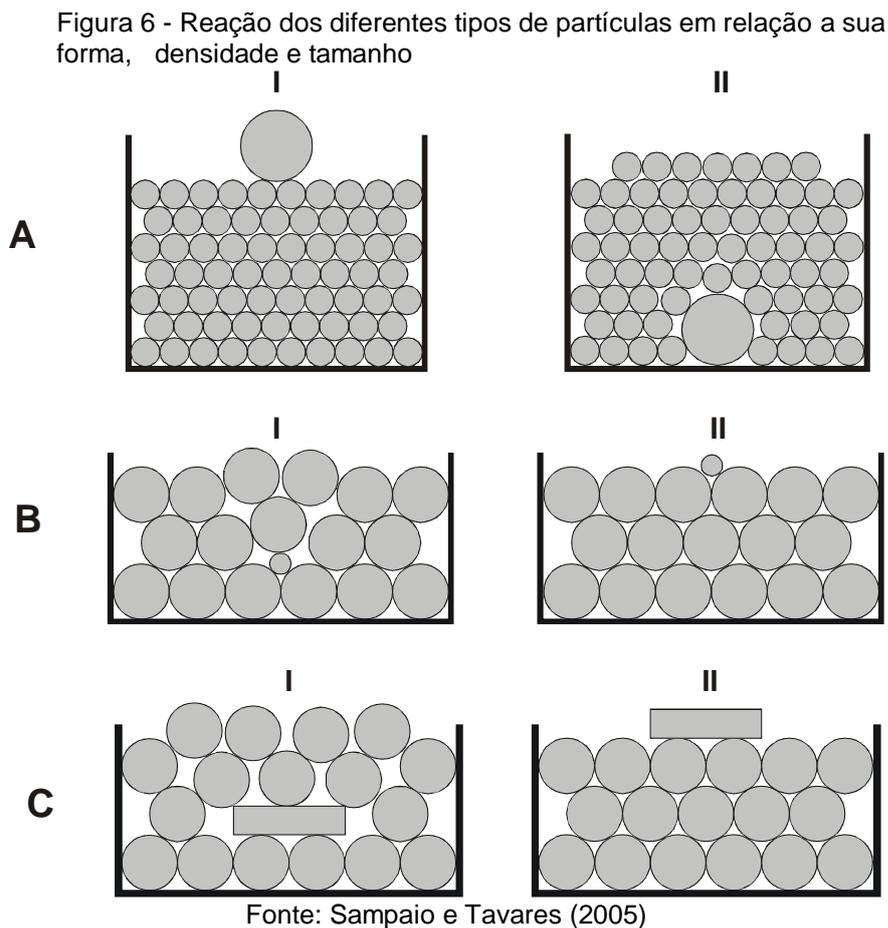
$$H(t) = \Delta h \exp(-Kt) \quad (12)$$

Onde:

K = constante;

t = tempo.

Para isso, a separação completa só será atingida após inúmeros ciclos de jigagem. No estudo, Mayer (1964) considerou a forma das partículas e a distribuição granulométrica, e também a sua densidade de empacotamento, fatores que influenciam no beneficiamento do material, conforme a Figura 6 (SAMPAIO E TAVARES, 2005).



A Figura 6A exibe uma partícula grossa com partículas finas em um leito, ambas com mesmas densidades, com a jigagem a partícula grossa que se encontrava na parte superior (estado I) muda para parte inferior, estado II. O fato ocorre devido a partícula grossa no estado II realiza uma menor energia potencial, em relação às finas, pois a densidade aparente próximo à base do leito é maior (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

A Figura 6B indica o comportamento da partícula fina em relação às partículas grossas. O material fino cria um distúrbio sobre a arrumação do

material grosso, gerando uma diferença de energia potencial entre os sistemas (estado I e II). No estado II a energia potencial é menor, que no estado I.

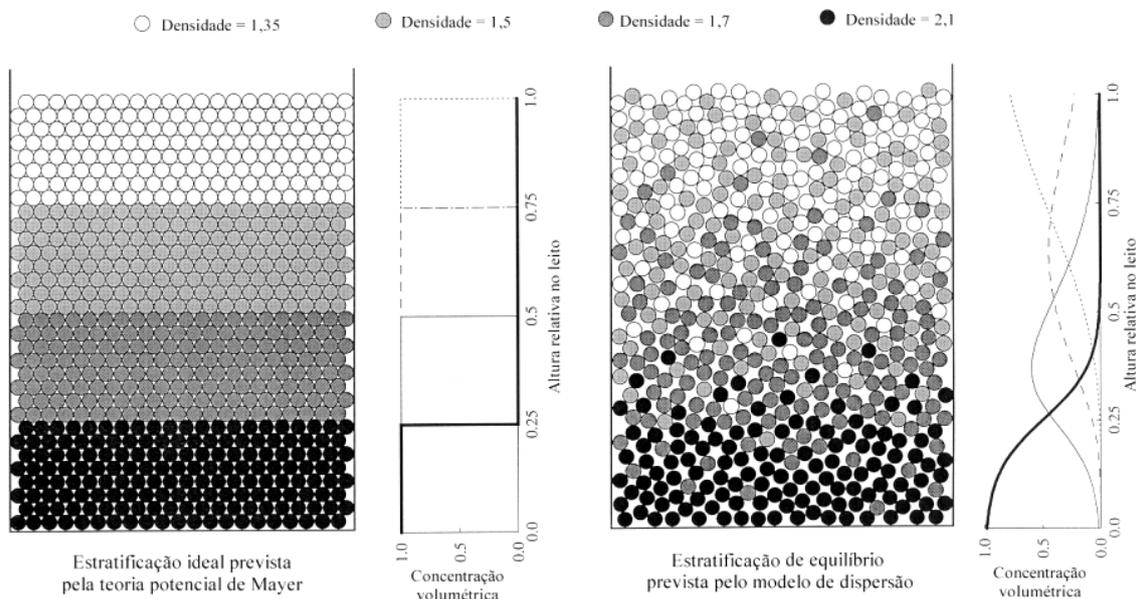
A Figura 6C apresenta uma partícula tabular em meio a um ambiente de partículas esféricas. Fica claro que a quantidade de espaços vazios no estado I é maior do que no estado II. Portanto a energia potencial no estado II é menor que o estado I.

Afinal, a teoria de Mayer (1964) considera que o tempo é o único fator determinante de uma separação bem sucedida. Se usado o tempo suficiente, o resultado será um beneficiamento perfeito com camadas de densidades distintas.

2.7.2.3 Modelo de dispersão

O modelo de dispersão consiste em um modelo de efeito contrário apresentado por Mayer (1964), no qual, diminuindo a energia potencial (ou força motriz), o beneficiamento será através de densidades diferentes, do topo até a sua base. O inverso disso, é o processo dispersivo (Figura 7), que baseia-se em remisturar as camadas estratificadas, com isso, seria possível explicar o processo de jigagem como um equilíbrio entre os fluxos contrários (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

Figura 7 - Efeito da dispersão das partículas na jigagem descontínua e a representação dos leitos calculados segundo a teoria de Mayer (1964) e o modelo de dispersão

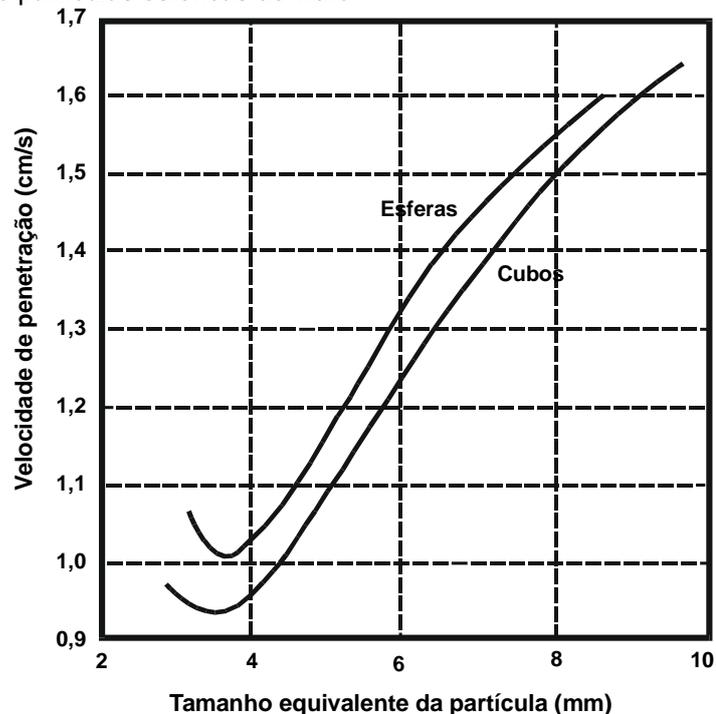


Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

A Figura 7 mostra o efeito da dispersão das partículas no perfil de estratificação de equilíbrio na jigagem descontinuada. A esquerda o modelo de Mayer (1964) e a direita modelo de dispersão, ao lado de cada modelo a representação da concentração para os quatro componentes, presentes em iguais proporções volumétricas.

O modelo de dispersão sugere que a estratificação depende somente de três fatores: das condições operacionais da jigagem, da granulometria e do formato das partículas. As condições operacionais irão influenciar pela frequência e amplitude das pulsações que determina a velocidade de penetração para mobilidade das partículas, conforme a Figura 8. Por meio do efeito da granulometria, quanto maior a propagação das partículas finas, mais significativo será a precisão da separação por jigagem (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

Figura 8 - Influência do tamanho de partícula na velocidade de penetração de esferas e cubos de aço em um leito de partículas esféricas de vidro



Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

Desta forma, o controle sobre as variáveis taxa de adição de água, amplitude e frequência das pulsações, irão otimizar a estratificação.

2.7.2.4 Ciclo de jigagem

O ciclo de jigagem é a maneira que se comportam as partículas individuais e do sincronismo no movimento do leito entre a expansão e sucção. A velocidade do fluxo na vertical é inversamente proporcional ao pistão, a expansão representa o movimento na ascendente (valores positivos) e a sucção exibe o movimento de descida (valores negativos), conforme a equação 13 (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

$$u(t) = \pi N r \text{sen}(2\pi N t) \quad (13)$$

Onde:

u = velocidade superficial do fluido;

r = amplitude;

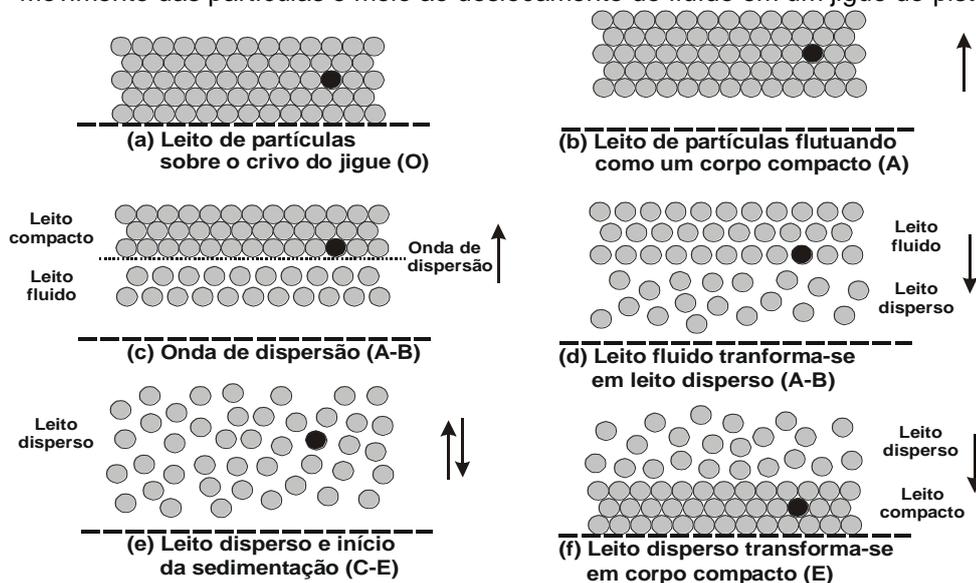
N = frequência;

t = tempo (s);

$u_{\text{max}} = \pi N r$ sua velocidade máxima.

A Figura 9, ilustra o efeito do movimento das partículas em meio ao deslocamento do fluido em um jigge de pistão, em conjunto com a variação da velocidade e porosidade do leito.

Figura 9 - Movimento das partículas e meio ao deslocamento do fluido em um jigge de pistão



Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

O cenário A (repouso) para B (pulso), se inicia a dispersão. Com movimento de baixo para cima, como aspecto de onda, este deslocamento faz com que as partículas individuais se desprendam do leito e uma das outras. Com isso, formam-se camadas com maior porosidade interna, fazendo com que as forças de interação entre as partículas diminua. Ocorre a desaceleração de algumas partículas em relação ao leito, quando estas estão prestes a alcançar a sua velocidade terminal (sedimentação retardada diferencial), mas para as partículas finas sua movimentação é maior em relação às partículas grossas densas (SAMPAIO E TAVARES, 2005).

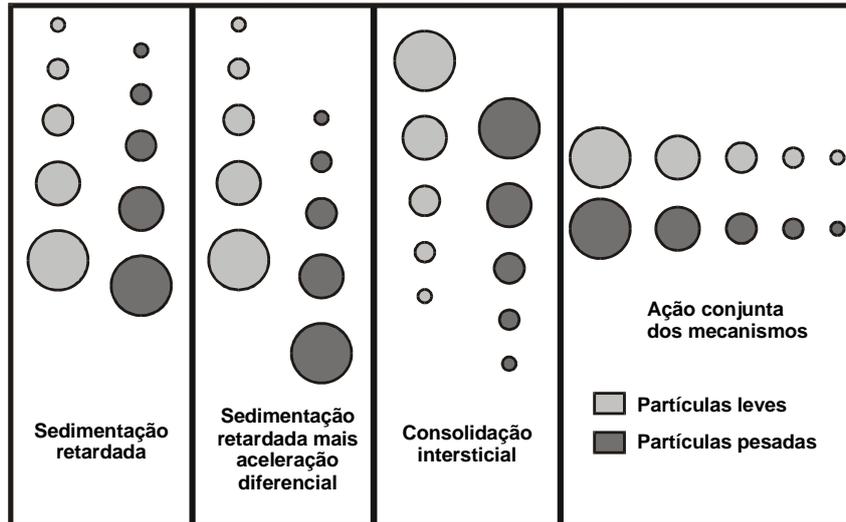
No cenário C, as partículas estão ainda na ascendente. É o momento que a porosidade alcança seu valor máximo e as partículas finas são arrastadas com o fluido. A passagem do cenário C para D, é marcada pela mudança de sentido do material (mecanismo da aceleração diferencial), onde para algumas partículas sua velocidade será nula (irão se posicionar no topo do leito).

O cenário D para E, compreende a queda das partículas, onde cada partícula irá se deslocar de acordo com sua velocidade terminal.

A passagem do cenário E para o F é marcada pelo empacotamento das partículas que são empurradas para o crivo. A base é formada por partículas grossas densas, pois sofrem um deslocamento para cima numa distância menor e na sua queda a velocidade é maior, fazendo com que sejam as primeiras a chegarem, seguido pelas mais leves grossas e as finas (consolidação intersticial).

Para Sampaio e Tavares (2005) a Figura 10 mostra o conceito adotado no processo da jigagem para interpretar o comportamento das partículas de acordo com os mecanismos referidos na teoria hidrodinâmica. Para partículas mais densas, localizadas na base, são conferidas as teorias de sedimentação retardada e a aceleração diferencial, agindo também nas leves finas na camada de topo.

Figura 10 - O processo da jigagem para interpretar o comportamento das partículas



Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

2.8 ENSAIO DE ABSORÇÃO

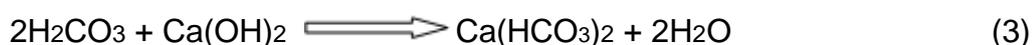
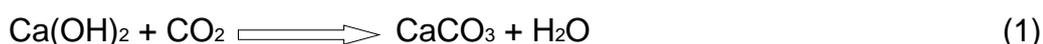
O ensaio de absorção no concreto tem como finalidade verificar a ameaça de exposição da armadura do concreto em ambientes agressivos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Ainda os autores salientam que por meio de microfissuras e vazios provenientes da zona de transição entre o cimento da argamassa e os agregados, facilitam a penetração de água e outros elementos destrutivos que favorecem a corrosão da armadura. Desta forma, foi aplicado o ensaio de permeabilidade conforme a norma ABNT NBR 9779:2012 para avaliar os concretos.

2.9 CARBONATAÇÃO

A carbonatação consiste em uma reação química entre o dióxido de carbono, mais conhecido como gás carbônico (CO_2) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) este conferindo ao concreto uma alta alcalinidade com pH entre 12 a 13 (DA SILVA, 1998). Com a reação, o pH diminui para menos de 10. Com esta nova alcalinidade, a armadura é destruída por meio da corrosão pela presença de umidade e oxigênio (LIANG et al, 1990). Conforme Da Silva (1998) existe dois estágios de carbonatação: a iniciação e a propagação. A iniciação é definida pelo contato do carbono penetrando a estrutura do concreto

e a etapa de propagação definida pela corrosão até a deterioração do material. As reações químicas 1 a 4 ilustram como ocorre o processo de carbonatação.

A primeira ocorre como período de iniciação (reação 1). A segunda representada na reação 2, o gás carbônico atmosférico é dissolvido na água intersticial do concreto formando o ácido carbônico. A terceira conforme a reação 3, o ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio originando bicarbonato de cálcio e água. A quarta, exibida pela reação 4, ocorre a terceira da carbonatação, o bicarbonato de cálcio e o hidróxido de cálcio dando origem, em uma reação de dupla troca, a carbonato de cálcio e água.



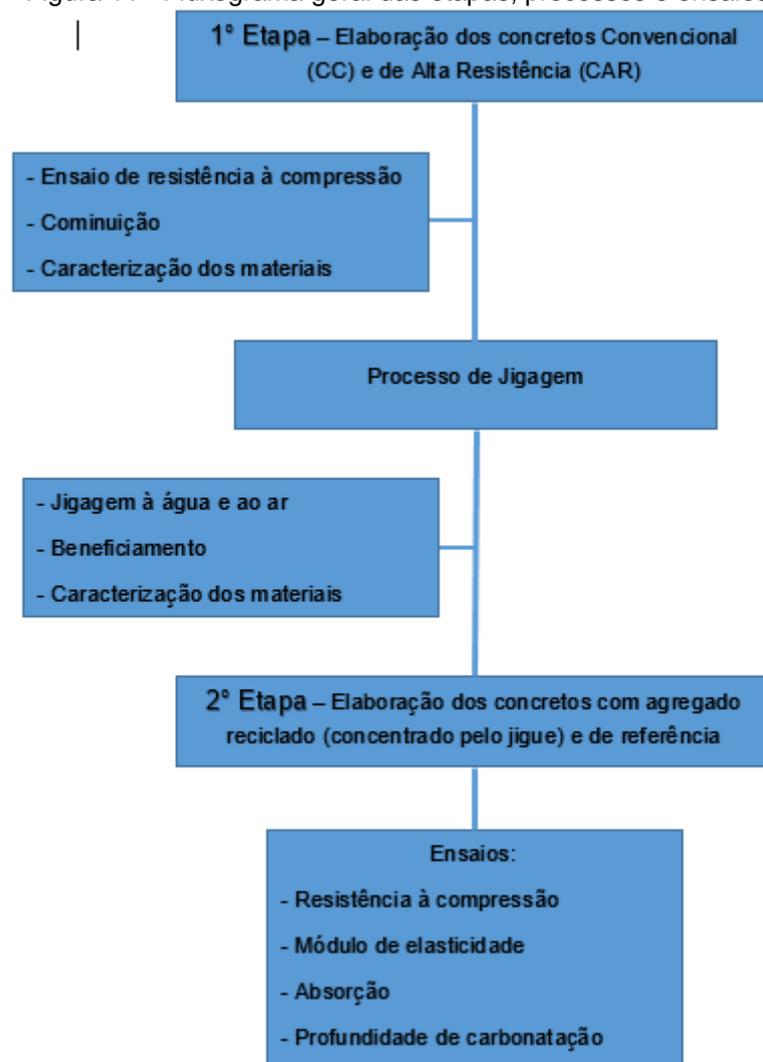
Algumas medidas podem ser usadas para proteger a armadura da corrosão devido à carbonatação, como o cobrimento de espessura adequada, e um traço bem elaborado de acordo com o ambiente de exposição, para garantir uma baixa permeabilidade ao concreto (HELENE E TERZIAN, 1992).

O método aplicado CPC -18 (RILEM, 1988) não é normalizado no Brasil, porém muito utilizado na construção civil, segundo Geyer (2001). Ainda a autora, esclarece que o método consiste em aplicar sobre a superfície, uma solução de fenolftaleína (provocando a cor violeta) ou timolftaleína (dando a cor azulada) sobre a superfície para ser analisada. Estas reações químicas geram colorações a partir de um determinado pH da solução, indicando uma linha divisória entre a zona carbonatada (cor incolor) e a zona não carbonatada (cores violeta ou azulada).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo retrata os materiais utilizados nas duas etapas: a primeira, na confecção dos concretos Convencional (CC) e de Alta Resistência (CAR) dando origem posteriormente aos agregados reciclados de concreto (ARC); a segunda, na elaboração dos concretos com agregados reciclados e dos concretos de referência. São descritos ainda a forma que foram executados os experimentos, a preparação dos materiais, a caracterização e os ensaios aplicados. A Figura 11 mostra de forma macro este processo.

Figura 11 - Fluxograma geral das etapas, processos e ensaios



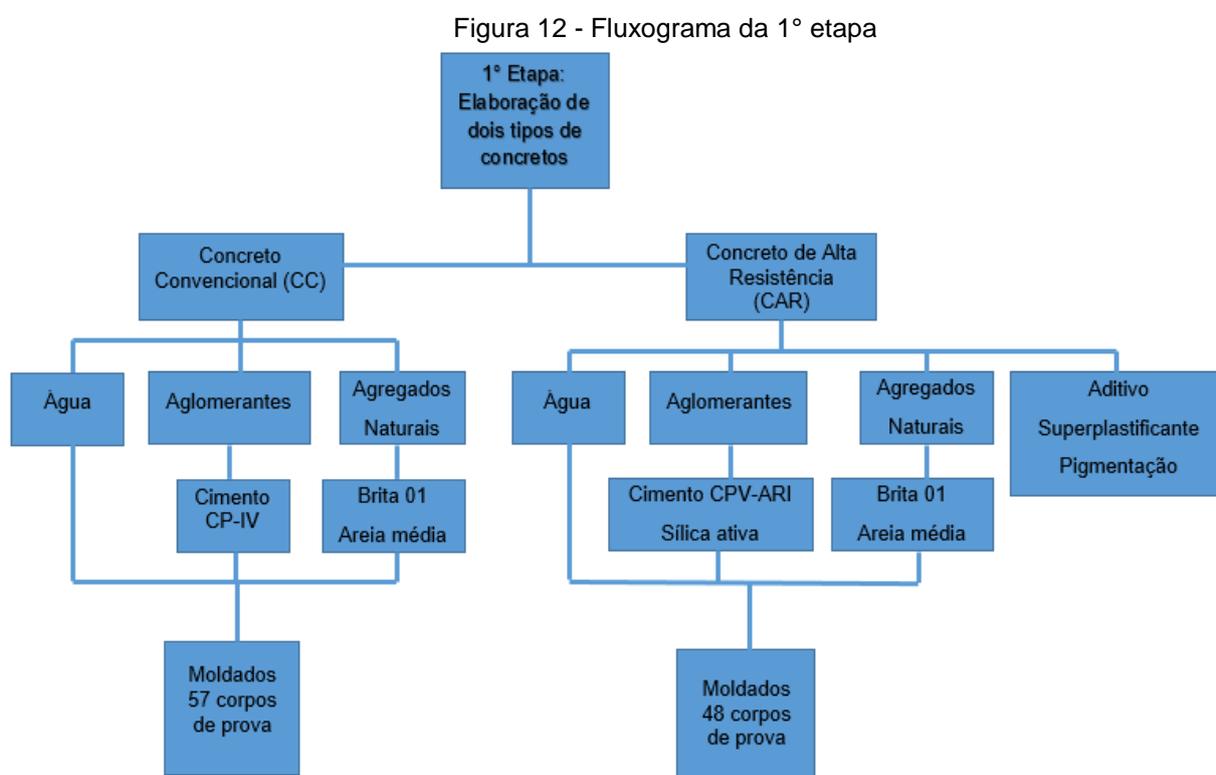
Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxograma geral das etapas, processos e ensaios retrata a estrutura com que foi desenvolvido o trabalho, na primeira etapa com a elaboração dos

dois tipos de concretos (origem dos ARC) e seus ensaios. Seguido pelo processo de jigagem, pesquisando a melhor eficiência e caracterizando. E a segunda etapa com a elaboração do concreto com o agregado reciclado e o de testemunho, e aplicação dos testes.

3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA 1º ETAPA

Na primeira etapa são apresentados os materiais utilizados na elaboração dos concretos Convencional (CC) e de Alta Resistência (CAR), representados conforme a Figura 12.



Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxograma da primeira etapa exhibe os materiais usados para a elaboração dos dois concretos (convencional e de alta resistência), associando para cada concreto o agrupamento dos materiais ligantes, os agregados naturais e demais constituintes resultando nas quantidades de corpos de prova elaborados.

3.1.1 Aglomerantes

Estes materiais são substâncias com propriedades aglomerantes, podendo ligar-se a outros materiais, tais como, agregados graúdos e miúdos. Seguem os materiais utilizados neste estudo.

3.1.1.1 Cimento Portland CP-IV 32

Para o concreto convencional (CC), o aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP-IV 32. Na Tabela 1, seguem as especificações do material, apresentadas no trabalho de Rubin (2015, p.68), que fez uso do mesmo lote de cimento.

Tabela 1 - Caracterização do cimento CP IV utilizado

CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO			
QUÍMICA			
Características avaliadas (% massa)	Resultados fabricante	Exigências da NBR 5736/1991	
SO ₃	2,44	≤ 4,00	
MgO	4,50	≤ 6,50	
Perda ao fogo	3,87	≤ 4,50	
Resíduo Insolúvel	31,41	-	
FÍSICA			
Características avaliadas	Resultados (fabricante)	Resultados (LAMTAC/NORIE)	Exigências da NBR 5736/1991
Massa Específica (g/cm ³)	-	2,79	-
Massa unitária (g/cm ³)	-	0,792	-
Expansão à quente	0,0	-	≤ 5,00
Tempo de pega (h:min)	Início	4:26	≥ 1,0
	Fim	4:95	≤ 12,0
Área superficial	-	4142,0 m ² /g	-
MECÂNICA			
Resistência à compressão (MPa)	Idade (dias)	Resultados (fabricante)	Exigências da NBR 5736/1991
	3	22,0	≥ 10,0
	7	27,0	≥ 20,0
	28	38,8	≥ 32,0

Fonte: Rubin (2015)

3.1.1.2 Cimento Portland CPV-ARI

Para a realização do concreto de alta resistência (CAR) optou-se por utilizar o cimento Portland CP V ARI (alta resistência inicial), pois é o mais puro e com maior resistência disponível no mercado. Suas características químicas,

físicas e mecânicas são apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3. Conforme a norma ABNT NBR 5733:1991, o cimento usado atende as exigências indicadas, apresentado nas tabelas, conforme Rohden (2015, p.77), que fez uso do mesmo lote de cimento.

Tabela 2 - Características químicas do cimento Portland CP V ARI empregado

Propriedades químicas	%	Limites % (NBR5733)
Resíduos insolúveis	1	1,00%
Perda ao fogo	3,3	<4,5%
Oxido de magnésio (MgO)	1,75	<6,5%
Trióxido de enxofre (SO ₃)—quando C3A do clínquer <8%	3,11	<3,5%

Tabela 3 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI

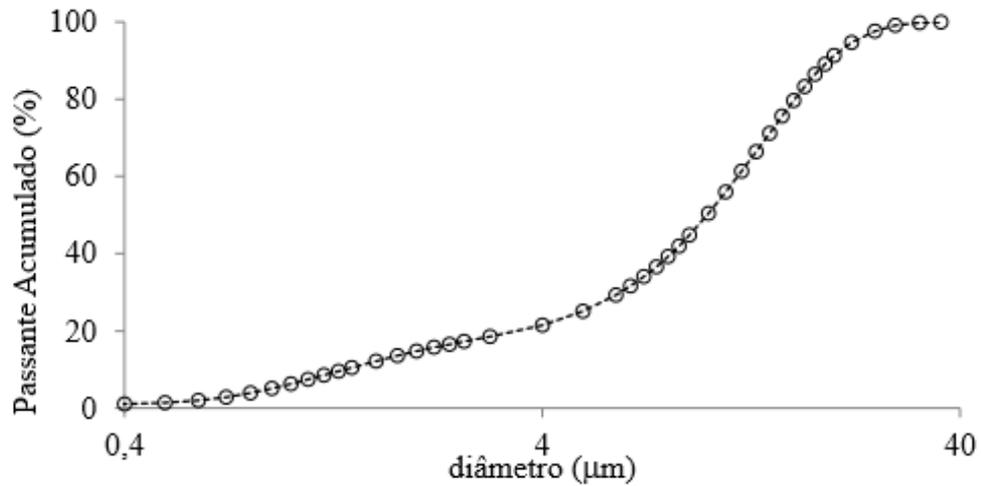
Características e propriedades	Umidade	Fabricante	Limite
Finura (resíduo na peneira de 75 µm)	%	1,5	<6,0
Tempo e início de pega	min	160	>60
Tempo de fim da pega	min	315	-
Blaine	m ² /kg	446,7	>300
Resistência à compressão	1 dia	MPa	24,2
	3 dias	MPa	35,5
	7 dias	MPa	41
	28 dias	MPa	50,9
Massa específica determinada de acordo com ABNT NM 23:2000 = 3,15 kg/dm ³			

Fonte: Tabelas 2 e 3 Rohden (2015)

3.1.1.3 Sílica ativa

De acordo com Rohden (2015, p.78), a sílica ativa utilizada nesta pesquisa foi submetida ao ensaio de granulometria a laser realizado no LACER—Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS, em que apresentou um resultado de 10,34 µm (valor com distorção devido a aglomeração do ensaio realizado) para o diâmetro médio das partículas, apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Diâmetro das partículas de sílica ativa



Fonte: Rohden (2015, p.78)

A Tabela 4 apresenta um resumo da análise granulométrica com o percentual passante (acumulado) em algumas peneiras.

Tabela 4 - Composição granulométrica resumida da sílica ativa

Diâmetro (µm)	% passante
1,35	10
9,92	50
19,39	90
10,34	Médio

Fonte: Rohden (2015)

3.1.2 Aditivo superplastificante

Aditivos superplastificantes são aditivos químicos que podem ser usados nos concretos, permitindo obter uma mesma fluidez com menor uso de água, e aumentando a trabalhabilidade no estado fresco sem alterar a relação água/cimento. A resistência final é inversamente proporcional à adição de quantidade água (relação água/cimento). Na realização do traço do Concreto de Alta Resistência (CAR), o aditivo pode ser utilizado em menor quantidade, dependendo da necessidade. Para este trabalho representou 0,5% sobre a massa de cimento. O aditivo utilizado corresponde ao superplastificante de 3º geração, com as seguintes especificações técnicas (segundo o fabricante):

base química policarboxilatos; densidade 1,067 a 1,107 g/cm³; pH 5 a 7; e o teor sólido 38 a 40%.

3.1.3 Água

A água utilizada para produção dos concretos foi coletada na rede pública de saneamento da cidade de Porto Alegre - DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos).

3.1.4 Pigmentação

Foi adicionada a pigmentação de cor vermelha (pó xadrez) para a identificação do concreto de alta resistência (CAR) facilitando, com isso, a sua visualização ao longo do processo. A quantidade adicionada representa 1% em relação à massa de cimento usada.

3.1.5 Agregados naturais

Foram utilizados como agregados naturais os disponíveis comercialmente na cidade de Porto Alegre - RS.

3.1.5.1 Agregado miúdo

Foi utilizada a areia média com procedência do rio Jacuí localizada na região de Porto Alegre. Essa areia foi lavada e seca para depois ser submetida aos ensaios de granulometria conforme a ABNT NM 248:2003. De acordo com a Tabela 5, a distribuição granulométrica é atendida nas especificações da norma estabelecida na ABNT NBR 7211:2005, segundo Rohden (2015, p.82) que fez o uso do mesmo lote.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% Retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	6,30	0	0
		4,80	2	2
		2,40	2	4
		1,20	3	7
		0,60	8	15
		0,30	42	57
		0,15	38	95
		0,075	6	100
		Fundo	1	100
Dimensão máxima característica (mm)	NM 248 (ABNT, 2003)	2,40		
Módulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	1,8		
Massa unitária (kg/dm ³)	NM 52 (ABNT, 2009)	1,55		
Massa específica (kg/dm ³)	NM 52 (ABNT, 2009)	2,61		

Fonte: Rohden (2015)

3.1.5.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado para neste trabalho foi a pedra basáltica oriunda da pedreira Vila Rica localizada na cidade de Montenegro/RS. Utilizou-se a brita denominada comercialmente como brita 01 na fração 25mm a 4,75mm. O material foi lavado e posteriormente seco para a realização do ensaio de granulometria apresentado na Tabela 6 (segundo a norma ABNT NM 248:2003), conforme Rohden (2015) que fez uso do mesmo lote.

Tabela 6 - Ensaio de granulometria do agregado graúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% Retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	25	0	0,00
		19	18	18
		12,5	82	100
		9,5	0	100
		6,3	0	100
		4,8	0	100
		Fundo	0	100
Dimensão máxima característica (mm)	NM 248 (ABNT, 2003)	25		
Módulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	7,18		

Fonte: Rohden (2015)

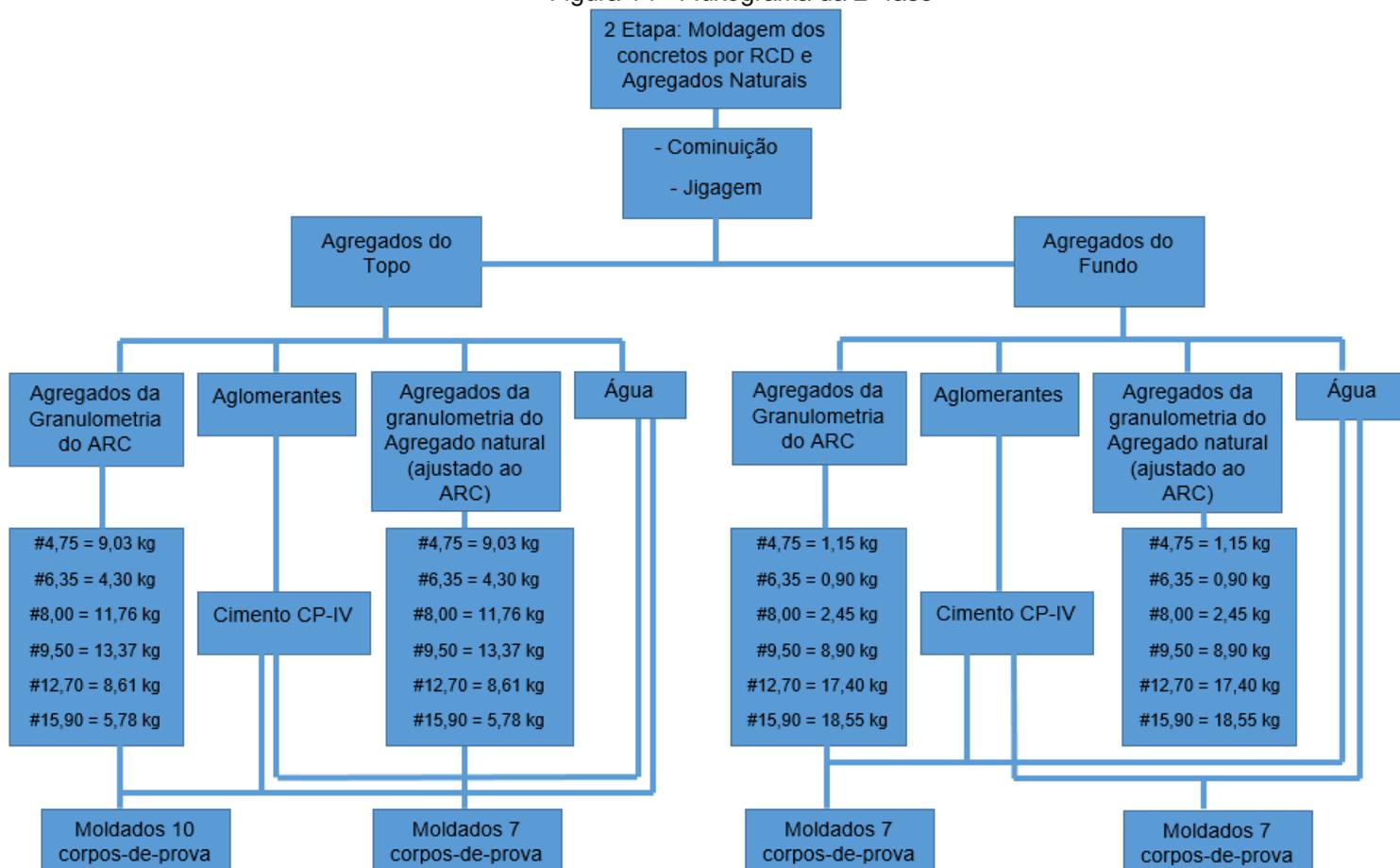
O ensaio de índice de forma do agregado graúdo foi realizado segundo a norma ABNT NBR 7809:2006. No ensaio são avaliadas 200 partículas através

da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos, por meio de uma amostra representativa, seguindo a norma ABNT NBR 10007:2004. Seu objetivo é estabelecer o método para determinação do índice de forma dos agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, pelo método do paquímetro, e para avaliar seu comportamento na elaboração de concretos. O resultado apresentado para o índice de forma foi de 2,14 para o agregado natural, este material passante pela malha de 19,1mm e retida na malha 9,5 mm.

3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA 2ª ETAPA

Para o agregado graúdo reciclado (concreto proveniente da primeira etapa), o material, após ser cominuído, passou por dois processos de Jigagem. Jigagem a ar e jigagem a água (técnicas da mineração que separam as partículas, por meio da densidade), beneficiando assim o material em três camadas (Topo, Meio e Fundo). Para este estudo foram escolhidas as camadas Topo e Fundo, evidenciando as extremidades no beneficiamento, sendo a camada Fundo um material mais concentrado. A seguir, são apresentados os materiais utilizados na elaboração dos concretos nesta etapa, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma da 2ª fase



Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxograma da segunda etapa, representado na Figura 14, indica a elaboração dos novos concretos a partir da classificação (processo de jigagem) dos agregados reciclados (camadas topo e fundo) e os agregados naturais como testemunho. Os agregados reciclados foram caracterizados, através do ensaio de granulometria, índice de forma e replicados para os agregados naturais, unidos com os materiais ligantes para elaboração dos concretos.

3.2.1 Aglomerantes

O aglomerante utilizado na segunda etapa deste estudo foi o cimento Portland CPIV 32 (mais utilizado comercialmente). Consiste no aglomerante hidráulico obtido através da mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos moídos em conjunto ou separados. O cimento usado, da marca Cimpor de lote 23072016 disponível no mercado, foi analisado a ensaios

BET, FRX e granulometria no laboratório LACER – UFRGS, conforme a norma ABNT NBR 5736:1991, conforme os itens 3.2.1.1 a 3.2.1.3.

3.2.1.1 Determinação de Área Superficial – Método BET

O Método de BET, ou ainda Teoria de Adsorção Multimolecular, é uma teoria matemática com o objetivo de descrever a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida. Serve como base para uma técnica de análise importante, para medir a área superficial específica de um material. O resultado obtido neste método foi 10,811 m²/g (valor com distorção devido a aglomeração do ensaio realizado).

3.2.1.2 Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X

O FRX (ensaio de fluorescência de raios X) determina a análise química das matérias-primas do cimento, foi realizado no laboratório LACER da UFRGS. Com base nas análises químicas, conforme a Tabela 7, foi determinado que o cimento Portland pozolânico utilizado, atende às legislações pertinentes.

Tabela 7 - Análise química das matérias-primas do cimento CP IV

Elementos	Resultado (%)	Exigência da NBR (%)	Norma
SiO ₂	42,51	---	
CaO	30,11	---	
Al ₂ O ₃	10,82	---	
Fe ₂ O ₃	5,74	---	
SO ₃	2,64	<4,0	5745
K ₂ O	1,74	---	
MgO	1,60	<6,5	9203
TiO ₂	0,97	---	
MnO	0,12	---	
P ₂ O ₅	0,12	---	
ZnO	0,06	---	
SrO	0,06	---	
ZrO ₂	0,05	---	
Y ₂ O ₃	0,02	---	
CO ₂	3,38	<3,0	5736

Fonte: Análise realizada pelo laboratório LACER da UFRGS

3.2.1.3 Distribuição granulométrica

A análise granulométrica consiste em determinar uma sequência de peneiras distintas, permitindo que percentuais diferentes de materiais fiquem retidos e outros percolem para a próxima peneira. O resíduo para ser adicionado ao cimento deve passar pela peneira com 0,075 mm de diâmetro (série Taylor # 200).

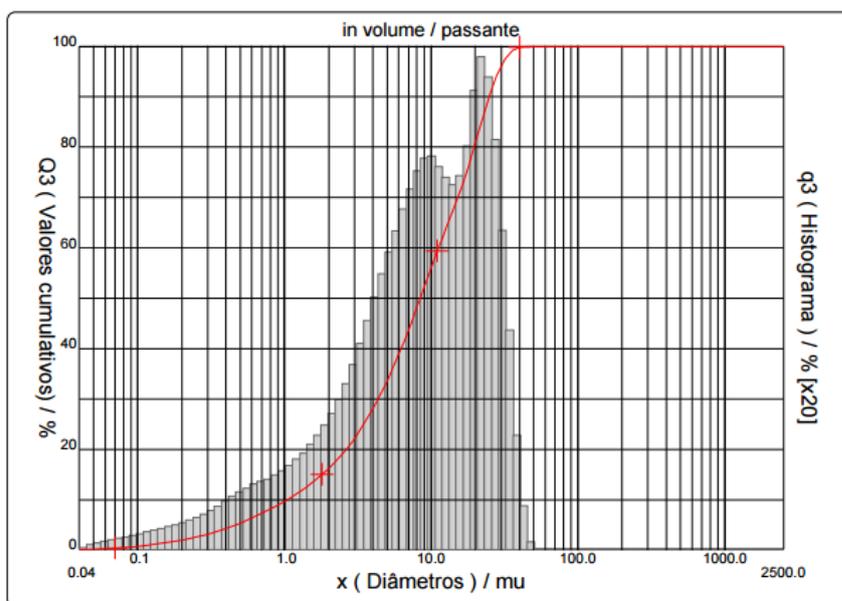
O resultado do processo de peneiramento é a quantidade retida acumulada do material em cada peneira. Segue na Tabela 8 os valores acumulados e na Figura 15 o gráfico do detalhamento de tamanho das partículas.

Tabela 8 – Granulometria a laser

Dados	Valores			
X : Diâmetro / μm	0,10	1,00	10,0	100,0
Q3: Valores acumulados / %	0,72	9,68	56,05	100,0

Fonte: Análise realizada pelo laboratório LACER da UFRGS

Figura 15 - Representatividade do diâmetro das partículas



Fonte: Análise realizada pelo laboratório LACER da UFRGS

3.2.2 Agregados naturais

Os agregados utilizados no concreto foram brita basáltica tipo 1 e areia média quartzosa. Todos os agregados foram lavados e secos para a realização dos ensaios.

3.2.2.1 Agregado miúdo

O ensaio de massa específica do agregado miúdo foi executado seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 52:2003, obtendo-se 2,58 g/cm³. A distribuição granulométrica e o módulo de finura podem ser vistos na Tabela 9. Os ensaios foram executados de acordo com as recomendações da ABNT NBR NM 248:2003 e atende as especificações da norma NBR 7211.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica e módulo de finura do agregado miúdo

Peneira (mm)	Massa retida individual (g)	Percentual Retido	
		Individual (%)	Acumulado (%)
4,75	22,72	2	2
2,36	46,63	5	7
1,18	89,88	9	16
0,60	165,52	17	33
0,30	404,43	41	74
0,15	234,65	23	97
Fundo	33,18	3	100
Total	997,01		
Módulo de finura		2,29	
Diâmetro máximo		4,75 mm	

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.2 Agregado graúdo

Na Tabela 10, são apresentados os resultados da distribuição granulométrica dos agregados, conforme procedimentos da ABNT NBR NM 248:2003, a massa específica, encontrada de acordo com a ABNT NBR NM 53:2003, o diâmetro máximo, a absorção de água e o módulo de finura.

Tabela 10 – Caracterização física do agregado graúdo

Peneira (mm)	Agregado natural com granulometria Topo e Fundo		
	Massa retida individual (kg)	Percentual Retido	
		Individual (%)	Acumulado (%)
15,9	24,33	24	24
12,7	26,01	25	49
9,5	22,27	22	71
8	14,21	14	85
6,35	5,2	5	90
4,75	10,18	10	100
Total	102,2		
Módulo de finura	6,71		
Massa específica	2,91 g/cm³		
Diâmetro máximo	19,00 mm		
Absorção de água	0,66%		

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.3 Índice de forma do agregado graúdo

O ensaio de índice de forma foi realizado segundo a norma ABNT NBR 7809:2006 em que foram medidas 200 partículas, resultando na média entre o comprimento e a espessura dos grãos. O resultado foi de 2,09 do material retido na malha 9,5mm (material apto dentro da norma), obtidos por meio de uma amostra representativa seguindo a norma ABNT NBR 10007:2004.

3.2.3 Água

A água utilizada para este trabalho foi fornecida pela rede pública de saneamento da cidade de Porto Alegre - DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos).

3.2.4 Agregados reciclados

Estes materiais foram processados por meio do equipamento Jigue à água, que agrupa partículas com características semelhantes. Este método foi usado para os concretos gerados na primeira etapa, Concreto Convencional (CC) e Concreto de Alta Resistência (CAR) de cor vermelha. A aplicação deste

equipamento mostrou visualmente o beneficiamento em 3 tipos de agregados: Topo, Meio e Fundo. Através da identificação visual foi possível diferenciar as camadas geradas, observadas na Figura 16.

Figura 16 - Beneficiamento do Jigue, gerando as três camadas



Fonte: Acervo do autor

3.2.4.1 Agregado reciclado da camada do Topo

Classificado através do beneficiamento do jigue, o agregado reciclado da camada do Topo ficou retido na superfície, sendo o primeiro estágio da gaveta do equipamento, denominado de Topo, apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Vista de cima do material beneficiado, identificado como Topo



Fonte: Acervo do autor

Com este material, foram realizados os ensaios: quantitativo (percentual de massa retida por camada), massa específica, massa específica aparente, absorção, granulometria, índice de forma, microscopia digital, determinação de massa unitária, massa unitária SSS e volume de vazios, elaborados através de uma amostra representativa conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004) e para alguns ensaios foi realizado com todo o material.

3.2.4.2 Agregado reciclado da camada do Fundo

Após o beneficiamento do jig, a última gaveta foi denominada como camada do Fundo. O material foi retirado do equipamento e colocado em uma bandeja, para melhor visualização do aspecto dos grãos, conforme a Figura 18. Para os materiais da camada de fundo realizou-se os mesmos ensaios aplicados na camada de topo.

Figura 18 – Vista do material após o beneficiamento do jigue, camada de Fundo



Fonte: Acervo do autor

3.3 MÉTODOS

No decorrer deste capítulo serão apresentados de maneira cronológica os métodos e procedimentos utilizados na realização da pesquisa.

3.3.1 1º etapa – Produção dos agregados reciclados de concreto Convencional (CC) e de Alta Resistência (CAR)

Para produção dos agregados reciclados de concreto (ARC), foram elaborados os concretos no laboratório LAMTAC (Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído) do NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação) da UFRGS, localizado no Campus do Centro em Porto Alegre.

3.3.1.1 Definição da resistência à compressão e proporcionamento dos concretos de origem dos ARC

Com o objetivo de verificar a influência da resistência do concreto no desempenho de concretos estruturais, produzidos com agregado reciclado, foram dosados concretos com dois níveis de resistência: um convencional (CC) para obtenção de uma resistência à compressão de 20 MPa, e um de alta resistência (CAR) para atingir 100 MPa. Os dois proporcionamentos utilizaram os mesmos agregados naturais (item 3.1.5) e foi estabelecido um teor de argamassa conforme a equação 14, único para os dois níveis de resistência, de forma a manter fixa a quantidade de agregado graúdo por volume de concreto.

O traço do CAR foi estabelecido através do método de dosagem Mehta-Aitcin (MEHTA E AITCIN, 1990) e do CC através do método de dosagem IPT-EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992).

$$\alpha = \frac{1 + \text{areia}}{1 + \text{areia} + \text{brita}} \quad (14)$$

Desta forma, para o traço do concreto convencional (CC), foram adotadas as seguintes proporções, em massa: 1:2,94:3,56; a/c:0,61. Para o concreto de alta resistência (CAR), as proporções para o traço foram: 1:1,11:2; a/c: 0,22; com a incorporação de aditivo superplastificante e de adição de sílica ativa, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Materiais utilizados para o traço

PRODUTOS	TIPOS DE CONCRETOS			
	Traço unitário / CC (em massa)	Convencional	Traço unitário / CAR (em massa)	Alta Resistência
Cimento CPIV	1	28,09 kg		
Cimento CP V-ARI			1	50 kg
Areia	2,94	82,58 kg	1,1	55,25 kg
Brita	3,56	100 kg	2	100 kg
Água	0,6 (a/c)	17 Litros	0,22 (a/c)	11 Litros
Silica Ativa			0,1	5,25 kg
Superplastificante			0,02	1,107 kg
Pigmentação			0,01	0,5 kg

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1.2 Produção dos concretos de origem dos ARC

Após imprimação da betoneira, iniciou-se a elaboração do concreto convencional (CC) adicionando na betoneira já em funcionamento, a brita, seguido por parte da água, cimento, areia, e o restante da água, com tempo total de mistura de 4 a 5 minutos. Para o concreto de alta resistência (CAR), após o preparo da betoneira a sequência do material depositado começou com a brita, água, cimento, sílica ativa, areia, aditivo superplastificante e o pigmento, com tempo total de 5 a 6 minutos.

A verificação do abatimento deu-se através da norma ABNT NBR NM 67:1998. Para realização deste trabalho foram seguidos também os procedimentos da norma ABNT NBR 5738:2003.

Foram produzidos corpos de prova nos moldes cilíndricos 100X200 mm, onde suas superfícies internas foram lubrificadas com óleo mineral. Os mesmos foram adensados, em duas camadas, utilizando-se a mesa vibratória durante 15 segundos, em cada camada, e posteriormente identificados permanecendo em repouso, cobertos com plástico para evitar perda de água, aguardando o desmolde para o processo de cura, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Identificação dos corpos de prova



Fonte: Acervo do autor

Após 24 horas, ocorreu a desforma e os corpos de prova foram armazenados em uma câmara úmida com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa $95 \pm 5\%$, iniciando o processo de cura, conforme a ABNT NBR

5738:2015, ambos controlados, submersos em água com uma solução de hidróxido de cálcio (cal), indicado na Figura 20.

Figura 20 – Cura dos corpos de prova de concreto



Fonte: Acervo do autor

O processo de cura durou 28 dias, sendo finalizado no dia 8 de agosto de 2015. O material foi retirado da câmara úmida, e retirou-se 4 corpos-de-prova de cada traço para a realização do ensaio de resistência à compressão, que passaram pelo processo de retificação, preparando-os para o ensaio.

3.3.1.3 Ensaio de resistência à compressão axial

A retificação dos corpos de prova garante que a superfície esteja plana em ambas extremidades, de modo que a força aplicada pelo equipamento seja distribuída uniformemente. Também foram medidos os diâmetros em milímetros dos corpos de prova em três pontos distintos, através do paquímetro digital e em seguida realizado suas médias.

Os ensaios foram realizados no laboratório LAMTAC/NORIE. Com isso, foram obtidos resultados de cada traço e a média representando a resistência obtida. A Figura 21 mostra o equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão.

Figura 21 - Equipamento usado para o ensaio de resistência à compressão



Fonte: Acervo do autor

A Figura 22(a) exibe o rompimento típico do concreto convencional (CC) com fissuras após ruptura. No concreto de alta resistência (CAR), devido a elevada resistência o rompimento se dá de forma explosiva, resultando em fragmentação do corpo de prova, conforme Figura 22(b), seguindo a norma ABNT NBR 5739:2007.

Figura 22 (a) - Concreto Convencional (CC)

(b) - Concreto de Alta Resistência (CAR)



Fonte: Acervo do autor



Fonte: Acervo do autor

Os restantes dos corpos de prova foram levados para o Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da UFRGS, localizado no Campus do Vale, no Centro de Tecnologia, para o andamento da próxima etapa, a cominuição.

3.3.1.4 Cominuição dos corpos de prova de concreto para produção dos ARC

A cominuição foi realizada em um britador de mandíbulas da marca Plangg do LAPROM/UFRGS para os Concretos Convencional (CC) e Concreto de Alta Resistência (CAR), ajustado para a granulometria abaixo de 19,1 milímetros, conforme Figura 23.

Figura 23 - Britador de mandíbulas



Fonte: Acervo do autor

Todo o material de cada traço foi fracionado em lotes com 6 corpos de prova do mesmo traço, para ser pesado antes da britagem, conforme a Figura 24.

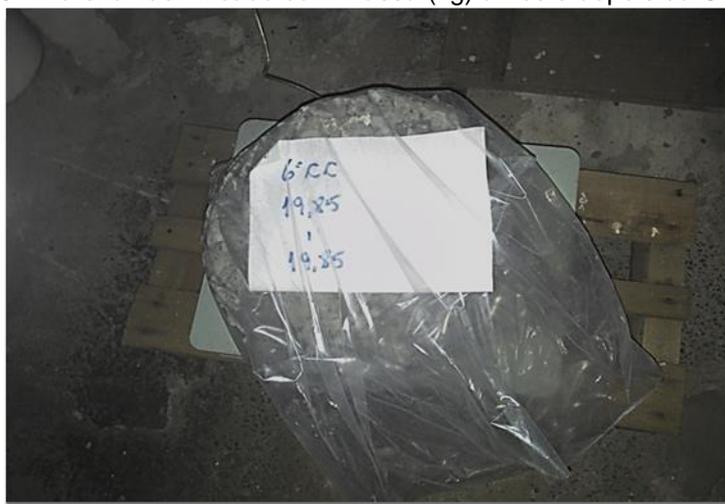
Figura 24 - Pesagem dos 6 corpos de prova de concreto que compõem um lote



Fonte: Acervo do autor

Na Figura 25, nova pesagem após a britagem, e identificação nos sacos plásticos.

Figura 25 - Material identificado com massa (kg) antes e depois da Cominuição



Fonte: Acervo do autor

A cominuição ocorreu com a britagem de um corpo de prova por vez. A Figura 26 mostra o concreto convencional (CC) cominuído, representado através da sua cor cinza.

Figura 26 – Aspecto visual do agregado proveniente do concreto convencional (CC)



Fonte: Acervo do autor

O concreto de alta resistência (CAR) apresenta cor vermelha devido a sua pigmentação na elaboração do concreto para melhor visualização. A Figura 27 mostra o material no reservatório após ser britado.

Figura 27 – Aspecto visual do agregado proveniente concreto de Alta Resistência (CAR)



Fonte: Acervo do autor

3.3.1.5 Granulometria do ARC

Após a cominuição dos corpos de prova, foram realizados dois ensaios de granulometria: o primeiro, para os conjuntos de malhas +19,1 mm, +15,9 mm +12,7 mm +9,5 mm e -9,5 mm. E o segundo, para as peneiras +19,1 mm, +12,7 mm, +9,5 mm, +6,35mm, +4,75 mm e -4,75 mm. Foram escolhidos 3 sacos aleatórios de cada traço (composto de 6 corpos de prova fragmentados) para o ensaio de granulometria, a ser utilizado em cada conjunto de peneiras.

a) 1º conjunto de malhas: +19,1 mm, +15,9 mm, +12,7 mm, +9,5 mm e - 9,5 mm

Para o concreto convencional (CC) foram escolhidos aleatoriamente os sacos 3, 8 e 9 representando 31,72% (percentual em massa) de todo o material. No concreto de alta resistência (CAR) os sacos escolhidos foram 1, 2 e 4 representando 38,14% (percentual em massa) de todo o material deste traço.

b) 2º conjunto de malhas: +19,1 mm, +12,7 mm, +9,5 mm, +6,35 mm, +4,75 mm e - 4,75 mm

Para o concreto convencional (CC) foram escolhidos os sacos 4, 5 e 7 representando 31,67 % (percentual em massa) de todo o material. No concreto de alta resistência (CAR) os sacos escolhidos foram 3, 5 e 7 representando 37,79% (percentual em massa) de todo o material deste traço.

3.3.1.6 Beneficiamento do ARC através do Jigue

A função e os princípios de operação do jigue foram descritos na introdução e na metodologia.

Os primeiros testes foram realizados no jigue a ar, ilustrado através da Figura 28 (a) , posteriormente sendo aplicada no jigue a água, conforme Figura 28(b), para estudar a eficiência do beneficiamento nos equipamentos.

Figura 28 (a) - Jigue a ar



Fonte: Acervo do autor

(b) - Jigue a água



Fonte: Acervo do autor

Intercalando os parâmetros de tempo, frequência e volume em ambos equipamentos, foram realizados os testes conforme a Tabela 12 e Tabela 13. No capítulo de resultados e discussões são os melhores parâmetros para este caso.

Tabela 12 - Parâmetros utilizados no Jigue à ar

AllAir S 500 - Jigue a Ar				
Controle	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Tempo (s)	60	120	180	240
Frequência (min⁻¹)	80	75	50	90
Volume por estágio	1	1,5	2	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 - Parâmetros utilizados no Jigue a água

Alljig - Jigue a Água				
Controle	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Tempo (s)	60	120	180	240
Frequência (min⁻¹)	80	75	50	90
Volume por estágio	1	1,5	2	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor

A alimentação do material no equipamento foi realizada através do volume preenchido de um estágio (gaveta) de 5 cm, e meio estágio de 2,5 cm, num total de 7,5 cm de ambos os traços (CC e CAR) com granulometria de -

19,1 mm a +4,75 mm. Após a preparação, ocorreu a homogeneização inserindo-se os dois volumes em um mesmo saco plástico e agitando-os.

A conclusão da eficácia do beneficiamento valeu-se de uma classificação aparente no aspecto visual dos seus condutores.

A separação no jigue a ar não se mostrou eficiente. Desta forma, optou-se por utilizar o jigue à água para a separação dos agregados.

Com o material beneficiado foram realizados alguns ensaios, através de uma amostra representativa, conforme a norma ABNT NBR 10007:2004 e outros realizados com todo o material.

3.3.1.6.1 Análises de quantificação do material beneficiado em cada estágio

Ao final do beneficiamento do jigue, os materiais foram retirados das suas camadas (Topo, Meio e Fundo) e colocados em bandejas. De forma manual, as partículas de cada camada foram separadas através de suas cores, (cinza para Concreto Convencional CC e cor vermelha para o Concreto de Alta Resistência CAR) e identificando-se os resultados por meio de sua massa encontrada.

3.3.1.6.2 Determinação de massas específica real, massa específica aparente e absorção de água

Foi realizada segundo a norma ABNT NBR NM 53:2003 para as camadas de Topo e Fundo, devido ao foco do estudo.

3.3.1.6.3 Granulometria por camada Topo e Fundo

Todo o material beneficiado passou pelo conjunto das seguintes malhas: +15,9mm +12,7mm +9,5mm +8,0mm +6,35mm +4,75mm, caracterizando o tamanho das partículas.

3.3.1.6.4 Índice de forma

O ensaio foi determinado através da norma ABNT NBR 7809:2008 em ambos as faixas de Topo e Fundo.

3.3.1.6.5 *Microscópio digital*

Através de imagens microscópicas foi possível identificar a zona de transição das partículas. Foram escolhidos materiais de ambas as camadas (Topo e Fundo) e de concretos diferentes (CC e CAR).

3.3.1.6.6 *Determinação da massa unitária, massa unitária SSS e o volume de vazios*

Determinação da massa unitária e volume de vazios dos materiais, conforme ABNT NM 45:2006, aplicando-se o método C.

3.3.2 2º etapa - Elaboração dos concretos com ARC e testemunho (com agregados naturais)

A elaboração dos concretos da segunda etapa também foi realizada no laboratório LAMTAC/NORIE, seguindo os mesmos procedimentos adotados na primeira etapa. Para este ensaio foram definidos três traços distintos segundo método de dosagem IPT-EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992), descrito no capítulo 2 e classificados conforme a Tabela 14

Tabela 14 - Tipos de traços aplicados

Identificação	Classificação	Traço
M3	rico	1:1,10:1,90
M5	intermediário	1:2,15:2,85
M7	pobre	1:3,20:3,80

Fonte: Elaborado pelo autor

Os traços com a mesma dosagem foram aplicados para os diferentes tipos de agregados: os reciclados (camadas de Topo e Fundo) e os naturais (Testemunho).

3.3.2.1 Preparação dos agregados reciclados

Esta etapa exigiu uma atenção especial para a preparação dos agregados reciclados (após jigge) e dos naturais, submetendo-os aos ensaios de granulometria para assim caracterizá-los. Por meio do conjunto de malhas (+19,1mm+15,9mm, +12,7mm, +9,5mm, +8,0mm, +6,35mm e +4,75mm), determinou-se a quantidade em massa retida em cada uma das malhas, para ambas as camadas (Topo e Fundo), apresentados na Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15 - Distribuição Granulométrica do material de Topo

Topo				
# Malhas (mm)	Massa retida (kg)	Retido individual %	Acumulado %	Porção ÷ 3 (kg)
+ 19,0	0	0		0
+ 15,9	5,78	11	11	1,93
+ 12,7	8,61	16	27	2,87
+ 9,50	13,37	26	53	4,46
+ 8,00	11,76	22	75	3,92
+ 6,35	4,30	8	83	1,43
+ 4,75	9,03	17	100	3,01
Totais	52,85	100		17,62

DMC # 19 mm
MÓDULO DE FINURA 6,53

Fonte: Elaborado pelo autor

Estas tabelas exibem os valores de módulo de finura para cada uma das camadas de topo e fundo. A camada de topo contém maiores quantidade de finos (possuir mais argamassa devido ao CC) do que a camada de fundo por apresentar grãos maiores (agregado natural - CC e agregado reciclado – CAR).

Tabela 16 - Distribuição Granulométrica do material de Fundo

Fundo				
# Malhas (mm)	Massa retida (kg)	Retido individual %	Acumulado %	Porção ÷ 3 (kg)
+ 19,0	0	0		0
+ 15,9	18,55	38	38	6,18
+ 12,7	17,4	35	73	5,80
+ 9,50	8,90	18	91	2,97
+ 8,00	2,45	5	96	0,82
+ 6,35	0,90	2	98	0,30
+ 4,75	1,15	2	100	0,38
Totais	49,35	100		16,45
DMC # 19 mm				
MÓDULO DE FINURA 6,91				

Fonte: Elaborado pelo autor

As quantidades mássicas retidas dos agregados reciclados foram replicadas para os agregados naturais. Com isso, para cada uma das camadas, Topo e Fundo, as quantidades retidas nas peneiras foram divididas em três partes iguais, formando ao final, três porções homogêneas.

As porções de cada camada (Topo e Fundo) do material reciclado foram submetidas à imersão em água durante 1 hora e 30 minutos para ficar em estado de saturação. Após retirou-se a água restante, e os agregados foram espalhados no ambiente para secarem a sua superfície durante o período de 1 hora, ilustrado na Figura 29, segundo procedimento recomendado por Cordeiro (2013), para compensar a maior absorção dos ARC em comparação aos agregados naturais. Os demais materiais como: cimento CP IV, água, areia média e brita natural também foram caracterizados.

Figura 29 - Agregado reciclados em processo de secagem superficial



Fonte: Acervo do autor

3.3.2.2 Nomenclatura dos Traços

Para os traços elaborados, a identificação dos corpos de prova ocorreu aplicando-se a nomenclatura, indicada na Tabela 17(a) e Tabela 17(b). A primeira letra refere-se ao tipo de camada, representada por T= Topo e F= Fundo. As demais referem-se à origem dos agregados, ARC= Agregado de Resíduo de Concreto e AN= Agregado Natural. E o número representa o tipo de traço (dosagem) aplicado: m=3 (rico), m=5 (intermediário) e m=7 (pobre), onde “m” representa a massa de agregados (miúdo e graúdo).

Tabela 17(a) – Nomenclatura da camada Topo

Topo		
Agregados	Traço	Identificação
ARC	M3	TARC 3
ARC	M5	TARC 5
ARC	M7	TARC 7
Natural	M3	TAN 3
Natural	M5	TAN 5
Natural	M7	TAN 7

Fonte: Elaborado pelo autor

(b) - Nomenclatura da camada Fundo

Fundo		
Agregados	Traço	Identificação
ARC	M3	FARC 3
ARC	M5	FARC 5
ARC	M7	FARC 7
Natural	M3	FAN 3
Natural	M5	FAN 5
Natural	M7	FAN 7

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.2.3 Ensaio com os concretos de origem ARC e AN

Os concretos foram armazenados na câmara úmida por 28 dias no processo de cura, como se confere na Figura 30. Após, o material foi retirado da câmara úmida, e ensaiado. Foram usados 3 corpos de prova de cada traço para a realização do ensaio de resistência à compressão, 3 corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade, 2 para absorção e 1 corpo de prova para o ensaio de carbonatação, finalizando os ensaios planejados para este estudo.

Figura 30 – Corpos de prova armazenados na câmara úmida



Fonte: Acervo do autor

3.3.2.3.1 Absorção de água

O método utilizado para o ensaio de absorção de água, foi baseado na norma ABNT NBR 9779:2012, adaptado com a inclusão de novas técnicas de aperfeiçoamento deste mesmo ensaio, desenvolvido pelo laboratório LAMTAC/NORIE. O teste foi aplicado em dois corpos de prova de cada traço (para os concretos elaborados com agregados naturais e os reciclados, nos traços rico, intermediário e pobre).

Após 24 horas na estufa, os corpos de prova foram pincelados na sua lateral com material impermeabilizante deixando apenas 3 milímetros acima da base sem pintar (Figura 31), para ocorrer o contato com a água.

Figura 31 – Corpos de prova pintados e identificados



Fonte: Acervo do autor

Os corpos de prova foram pesados antes de serem submetidos ao contato com a água e após o início com intervalos de tempo de 3 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas. Ao término do último intervalo de tempo os corpos-de-prova foram rompidos longitudinalmente e medidos com paquímetro o quanto a umidade percorreu no corpo de prova, conforme a Figura 32.

Figura 32 – Corpo de prova rompido para medir o avanço da umidade



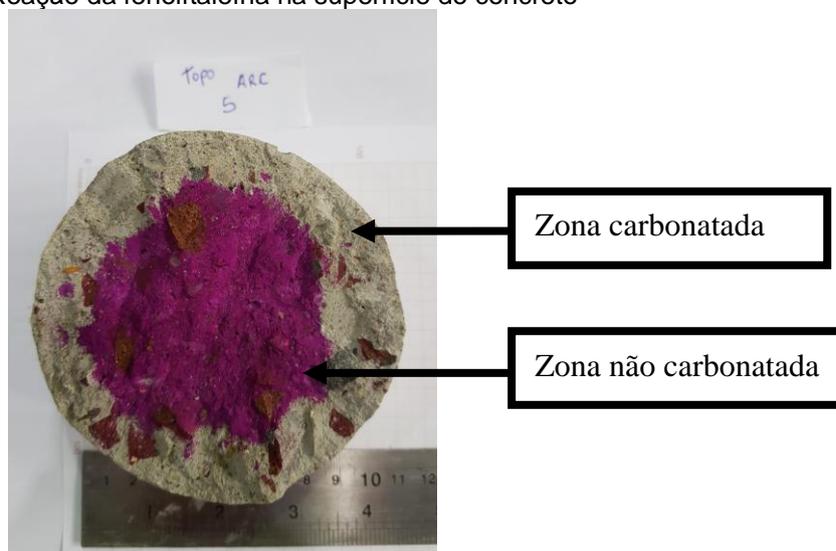
Fonte: Acervo do autor

3.3.2.3.2 Carbonatação

A profundidade de carbonatação foi determinada nos corpos de prova com idade de 428 dias, dos quais 414 dias os CPs estavam armazenados na câmara úmida com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa $95\pm 5\%$. E os 14 dias finais, na câmara de carbonatação com temperatura de 21 ± 2 °C, umidade relativa $72\pm 5\%$, e concentração de 5% de CO₂ (gás carbônico ou dióxido de carbono). Ao completarem os 14 dias na câmara de carbonatação iniciou-se o ensaio com um corpo de prova de cada traço (pobre, intermediário e rico), da camada topo e fundo elaborado com agregado natural (AN) e o outro com agregado reciclado de concreto (ARC).

Com o equipamento do tipo prensa, exercendo uma força localizada foi possível romper do corpo de prova uma fatia (corte na horizontal de 30mm a partir de sua base de 100 mm). Com esta fatia, a face interna foi borrifada com uma solução de fenolftaleína (produção através de 1g de fenolftaleína dissolvida em 50g de álcool e 50g de água), ocasionando uma reação. Através das cores foi possível identificar a profundidade de carbonatação (Figura 33). No local onde o resultado for incolor o pH é inferior a 8,3 (houve carbonatação), para valores de pH superiores a 9,5 torna-se vermelho carmim (não houve carbonatação), entre 8 e 9,5 fica com coloração variável de rosa.

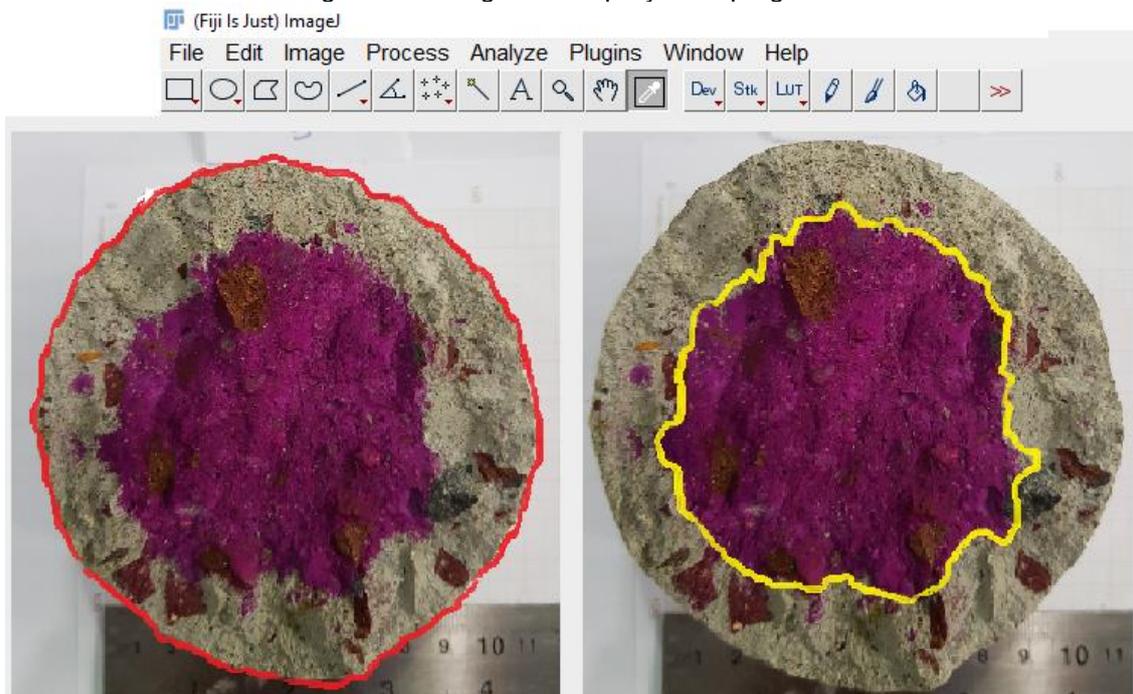
Figura 33 - Reação da fenolftaleína na superfície do concreto



Fonte: Acervo do autor

Para o cálculo da área carbonatada e não carbonatada, foi utilizado o software IMAGEJ® que realiza a medição de áreas. A Figura 34 apresenta a tela do programa durante a captação das áreas, na primeira imagem mostra a demarcação da área externa do corpo de prova (em linha vermelha). A segunda imagem apresenta a demarcação da área não carbonatada delimitada pela linha amarela.

Figura 34 - Imagem da captação no programa



Fonte: Acervo do autor

O programa gerou o valor a primeira área da parte externa e consequentemente o valor da segunda área interna, com estes valores foi possível determinar a área afetada pela carbonatação representando os valores em percentuais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados deste estudo, a partir da elaboração dos concretos com o ensaio de resistência à compressão, a cominuição, os ensaios de caracterização dos materiais, e a elaboração dos novos concretos e seus ensaios.

4.1 1º ETAPA – RESULTADOS DA ELABORAÇÃO DOS CONCRETOS DE ORIGEM DOS ARC

Nesta etapa foram moldados 57 corpos de prova do concreto Convencional (CC – cor cinza) com um abatimento de 190 mm. Em relação ao Concreto de Alta Resistência (CAR – cor vermelha) foram moldados 48 corpos de prova com abatimento de 260 mm.

O ensaio do abatimento (*slump test*) está relacionado à trabalhabilidade, que determina o esforço necessário para a sua manipulação, de acordo com Mehta e Monteiro (1994). Ainda segundo os autores, a trabalhabilidade é composta por no mínimo dois fatores: a fluidez e a coesão. No CAR foi adicionado superplastificante, que ajuda na fluidez da mistura, aumentando a trabalhabilidade, conforme Zhang e Kong (2015).

4.1.1 Resistência à compressão

Após o período de cura dos corpos de prova, foram realizados o ensaio de resistência à compressão no concreto convencional (CC) e no de Alta Resistência (CAR). Para isso, eles passaram pelo processo de retificação, e foram medidos seus diâmetros através de um paquímetro digital em três pontos distintos (vertical, horizontal e diagonal), que são apresentados na Tabela 18 e Tabela 19, em que os valores médios são necessários para o cálculo da resistência à compressão.

Tabela 18 - Medida dos diâmetros dos corpos de prova (CC)

Traço Concreto Convencional - CC				
Medidas (mm)	Cp1	Cp2	Cp3	Cp4
Medida 1	100,03	100,00	99,45	99,58
Medida 2	100,14	100,63	100,92	100,12
Medida 3	100,59	100,33	101,53	100,02
Média	100,25	100,32	100,63	99,91

Fonte: Elaborado pelo autor

As médias dos diâmetros e a idade dos corpos de prova foram inseridas no programa do equipamento para aplicação dos testes.

Tabela 19 - Medida dos diâmetros dos corpos de prova (CAR)

Traço Concreto de Alta Resistência - CAR			
Medidas (mm)	Cp1	Cp2	Cp3
Medida 1	100,00	94,51	100,98
Medida 2	99,68	95,08	99,81
Medida 3	100,25	94,86	101,79
Média	99,98	94,82	100,86

Fonte: Elaborado pelo autor

Nos resultados do Concreto Convencional (CC) apresentados consta um desvio padrão de 0,96 entre as resistências. No indicador tempo, ocorreu uma variação de 24,32 segundos entre o mínimo e o máximo do rompimento entre os CPs, conforme a Tabela 20.

Tabela 20 - Ensaio de resistência à compressão do Concreto Convencional

Ensaio de Resistência à compressão do Concreto Convencional (CC)					
CP's	Idade (d)	Tempo (s)	Deformação (mm)	Força (KN)	Resist. Compressão (MPa)
1	28	48,68	27,44	155,3	19,78
2	28	53,30	21,68	172,3	21,94
3	28	73,00	57,49	163,0	20,76
4	28	66,72	45,28	169,4	21,61
Médias				165,0	21,02
Desvio Padrão					0,96
Coefficiente de variação					4,56%

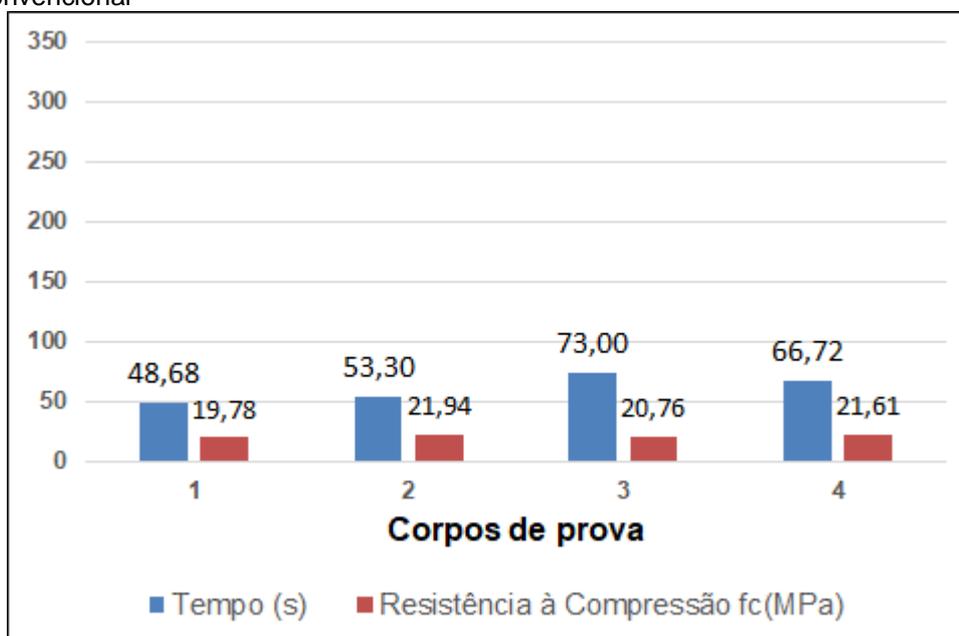
Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Correa (2003), um grande desvio padrão indica que os pontos dos dados estão espalhados longe da média, e um pequeno desvio padrão indica que os pontos dos dados estão agrupados perto da média. O resultado

no ensaio de resistência à compressão para o concreto convencional apresentou um pequeno desvio padrão. Para o coeficiente de variação dos concretos convencionais (CC), o valor de 4,56% indicou uma baixa dispersão das médias em relação ao ensaio de resistência à compressão. Correa (2003) salienta que valor igual ou menor que 15% representa uma baixa dispersão, dados homogêneos.

Os valores das resistências dos corpos de prova apresentados no ensaio evidenciou a proposta inicial de criar o concreto com esta resistência de 20 MPa. O gráfico da Figura 35 apresenta uma melhor visualização para a identificação do comportamento entre os CPs do Concreto Convencional (CC).

Figura 35 - Resistência à compressão e dispersão dos corpos de prova do Concreto Convencional



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos resultados do Concreto de Alta Resistência (CAR), o desvio padrão foi de 2,48 entre as resistências. A diferença no indicador de tempo mínimo e máximo entre os CPs, foi de 45,83 segundos até o rompimento, segundo a Tabela 21.

Tabela 21 - Ensaio de resistência à compressão do Concreto de Alta Resistência

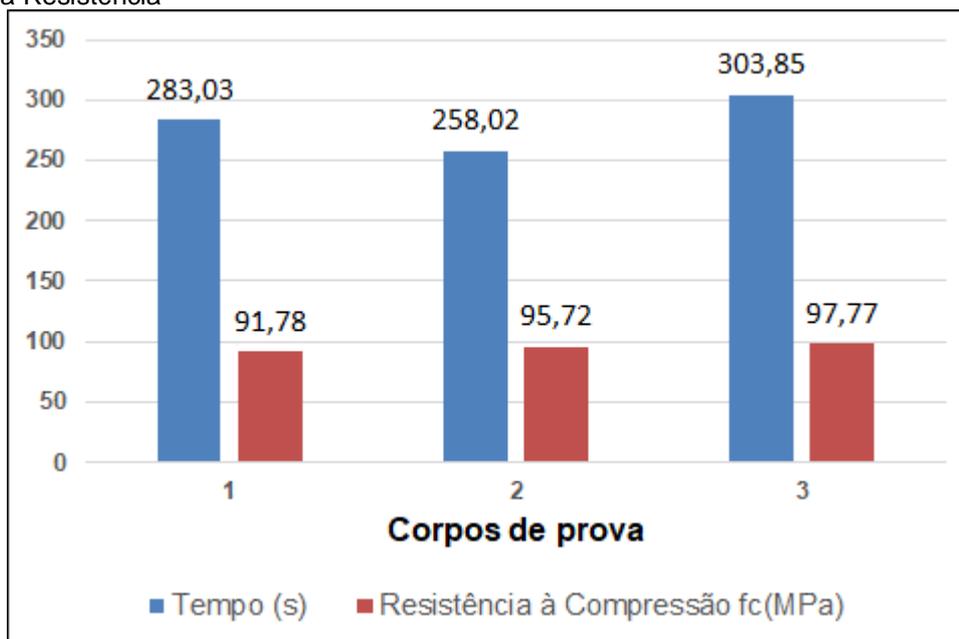
Ensaio de Resistência à compressão do Concreto de Alta Resistência (CAR)					
CP's	Idade (d)	Tempo (s)	Deformação (mm)	Força (KN)	Resist. Compressão (MPa)
1	28	283,03	160,43	718,0	91,78
2	28	258,02	124,93	675,6	95,72
3	28	303,85	190,16	767,9	97,77
Médias				706,9	95,09
Desvio Padrão					2,48
Coefficiente de variação					2,60%

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o concreto de alta resistência, o desvio padrão apresentou uma dispersão de valor baixo, considerando como referência próxima de 2,50. O coeficiente de variação no valor de 2,60% para os concretos de alta resistência (CAR) indica uma baixa dispersão da média no ensaio de resistência à compressão.

A Figura 36 mostra a dispersão dos CPs para o Concreto de Alta Resistência (CAR) destacando o tempo necessário para o seu rompimento.

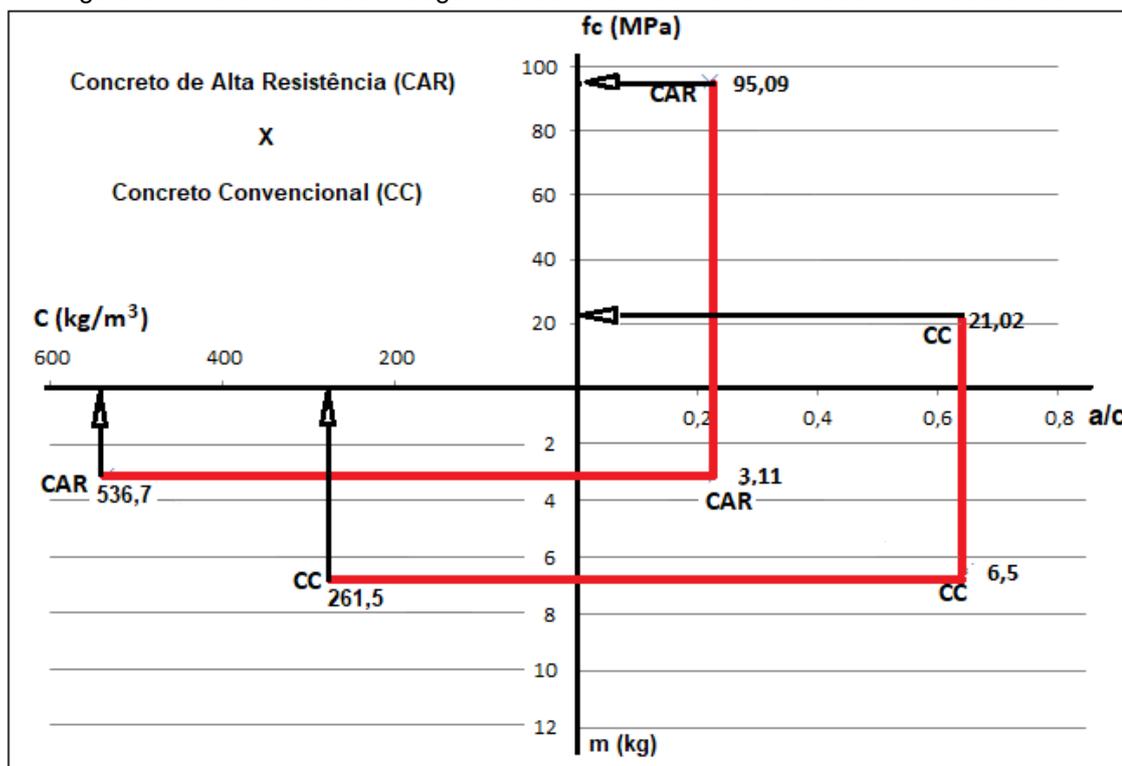
Figura 36 - Resistência à compressão e dispersão dos corpos de prova do Concreto de Alta Resistência



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 37, mostra os parâmetros de dosagem dos concretos convencional (CC) e de alta resistência (CAR).

Figura 37 - Parâmetros de dosagem do Concreto Convencional e de Alta Resistência



Fonte: Elaborado pelo autor

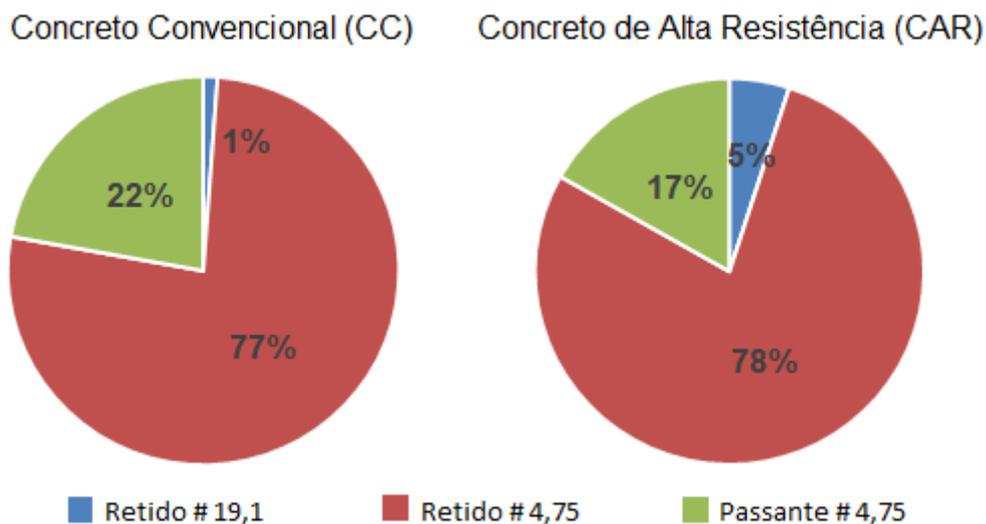
O consumo de cimento em kg/m^3 do CC foi igual a 261 e para o CAR igual a 536. Ao analisar os valores obtidos, a relação água/cimento (a/c) entre os concretos e o uso de uma quantidade maior de cimento, aparece de forma notória as diferenças entre as suas resistências. Helene e Terzian (1992) explicam que a relação água/cimento e a resistência são inversamente proporcionais e os usos materiais específicos transformam o produto final.

4.1.2 Cominuição

Todo material foi cominuído no britador de mandíbulas para granulometria abaixo de 19,1 milímetros, percorrendo somente uma vez pelo britador. A escolha por este equipamento foi pela sua capacidade de fazer a britagem primária, e por ser capaz de processar diversos tipos de materiais, como rochas duras ou materiais reciclados, e por ser o processo utilizado em escala industrial (METSO, 2011). Sua granulometria é estabelecida pelo ajuste do encontro das duas superfícies, uma fixa e outra móvel e também pela descarga, conforme descreve Figueira et al. (2004).

A Figura 38 exibe o resultado da eficiência do britador de mandíbula sobre os dois concretos, convencional (CC) e de alta resistência (CAR), para o conjunto de peneiras: + 19,1 mm, + 4,75 mm, - 4,75 mm.

Figura 38 - Granulometria dos dois tipos de concretos



Fonte: Elaborado pelo autor

A representatividade de ambos os concretos se mostrou muito próxima entre eles, e principalmente na granulometria do material passante pela peneira 19,1mm e pelo retido na peneira 4,75mm, atendendo assim o objetivo do trabalho na geração de um agregado graúdo.

4.1.3 Granulometria

São apresentados dois conjuntos de peneiras que foram aplicados para ambos os traços, convencional (CC) e de alta resistência (CAR), através de uma amostra representativa, conforme a norma ABNT NBR 10007:2004. Para Neville e Brooks (2013), é essencial saber a granulometria do material, por haver influência nas propriedades dos concretos, assim como, a definição de sua classificação nos agregados miúdos e graúdos.

4.1.3.1 1° conjunto de malhas: +19,1mm, +15,9mm, +12,7mm, +9,5mm e -9,5mm

A seguir, na Tabela 22, observa-se uma quantidade maior de finos passante da peneira 9,5mm para o Concreto Convencional (CC) em relação ao Concreto de Alta Resistência (CAR), sendo uma diferença de 7% entre as massas.

Tabela 22 - Acumulado do primeiro conjunto de malhas

Análise Granulométrica +19,1 para -9,5					
Malhas (mm)	-9,5	+9,5	+12,7	+15,9	+19,1
Massa CC (%)	40	41	73	99	100
Massa CAR (%)	31	37	69	95	100

Fonte: Elaborado pelo autor

Para as demais malhas, o concreto de alta resistência (CAR) mostrou que manteve partículas mais retidas ou iguais ao concreto convencional (CC).

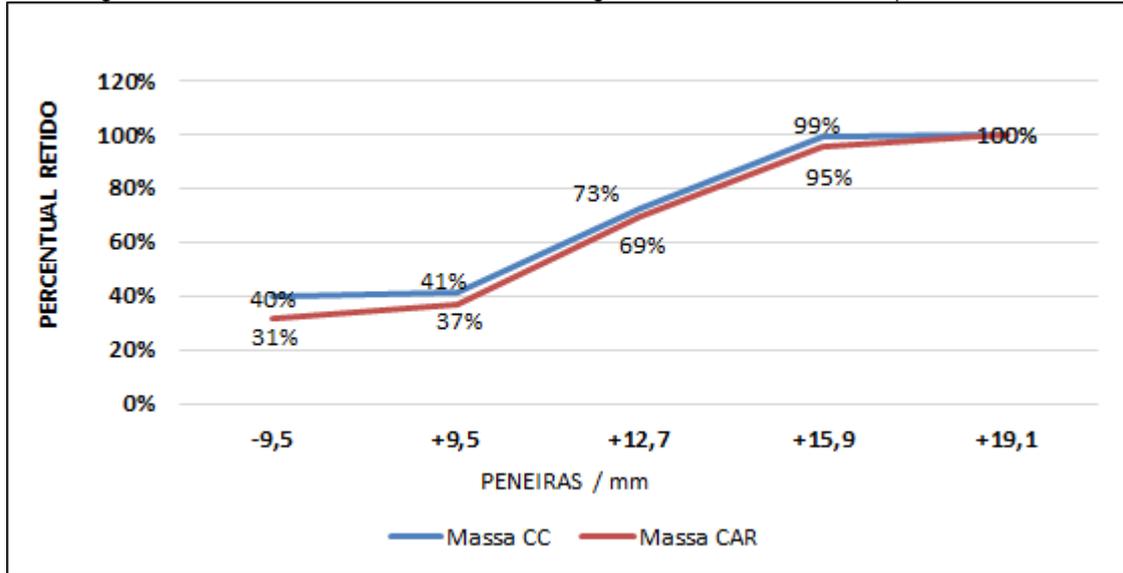
Este resultado está relacionado às propriedades dos materiais utilizados para elaboração dos concretos, a distinção entre os cimentos é uma delas (MEHTA e MONTEIRO, 1994), bem como a relação água/cimento que influencia fortemente a resistência da pasta de cimento endurecida.

A geração de partículas finas se justifica ao concreto convencional (CC) elaborado com CP IV e relação a/c de 0,60, por apresentar sua resistência menor do que a brita basáltica (que tem resistência aproximada de 100 MPa), liberando a argamassa, conforme estudo de Júnior (2013).

Já para o concreto de alta resistência (CAR), produzido com CPV e sílica ativa, com relação a/c de 0,22, o rompimento das partículas predominou um formato lamelar e angular, já que a argamassa e a brita apresentam resistência similares.

A Figura 39 mostra os valores cumulativos em percentuais da análise granulométrica +19,1mm para -9,5mm, apresentando uma curva semelhante para ambos os concretos, mas com predominância de grãos menores para o CC, compostos essencialmente por argamassa (conforme análise visual).

Figura 39 - Valores cumulativos da análise granulométrica +19,1mm para -9,5mm



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3.2 2º conjunto de malhas: +19,1mm,+12,7mm, +9,5mm, +6,35mm, +4,75mm e -4,75mm

No segundo conjunto de peneiras, o Concreto Convencional (CC) apresentou uma maior quantidade de finos passante na malha 4,75mm, diferença de 10,22% (entre as massas), indicados na Tabela 23.

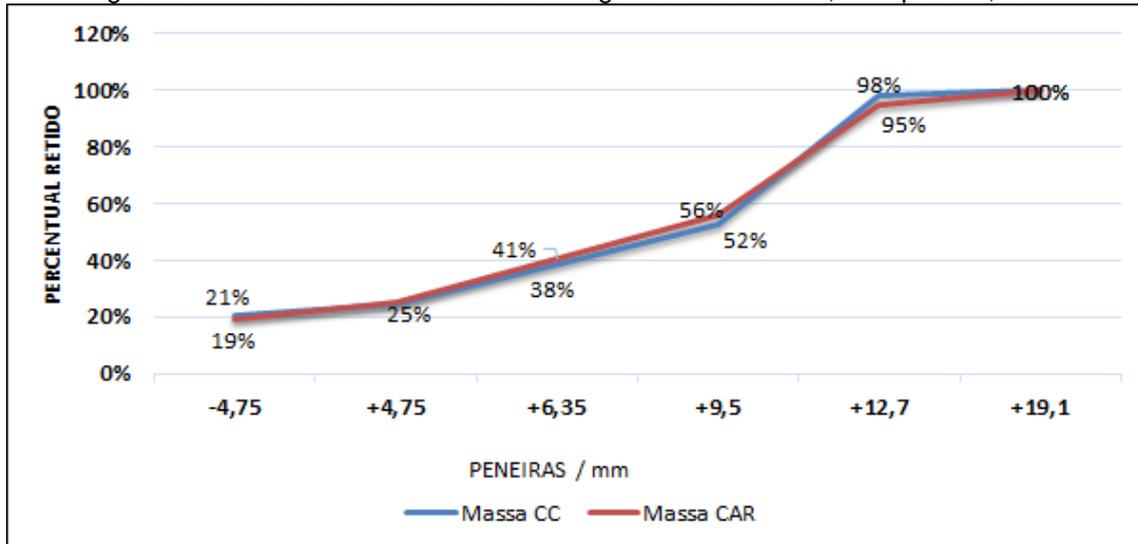
Tabela 23 - Acumulado do segundo conjunto de malhas

Análise Granulométrica +19,1 para -4,75						
Malhas (mm)	-4,75	+4,75	+6,35	+9,5	+12,7	+19,1
Massa CC (%)	21	25	38	52	98	100
Massa CAR (%)	19	25	41	56	95	100

Fonte: Elaborado pelo autor

No conjunto de malhas da +19,1mm até -4,75mm, a curva mostrou um comportamento similar entre os concretos, em algumas peneiras com números muito próximos, segundo a Figura 40.

Figura 40 - Valores cumulativos da análise granulométrica +19,1mm para -4,75mm



Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente o concreto de alta resistência apresentou um número de partículas retidas maior que o concreto convencional, exceto pelas malhas: passante 4,75mm e 12,7mm.

Lima (1999) salienta que, para os casos dos agregados reciclados, a curva granulométrica é instável, e por essa razão a mesma irá depender do tipo de material que está sendo beneficiado, o método aplicado e a granulometria do material inicial. Porém neste estudo, ambos concretos reciclados mantiveram o mesmo comportamento como exposto nos gráficos.

4.2 BENEFICIAMENTO DO MATERIAL ATRAVÉS DO JIGUE

Os testes foram iniciados no jigue a ar, alternando os parâmetros de tempo, frequência e volume. Não foi possível identificar o beneficiamento no material (não ocorreu a segregação).

Durante o processo de jigagem, foi apresentada uma elevação de partículas finas (pó), mas visualmente não foi possível identificar nenhuma classificação. Sampaio e Tavares (2005) reforçam que o beneficiamento trata de agrupar materiais homogêneos provenientes de materiais heterogêneos, levando em conta alguns fatores, como granulometria, taxa de alimentação, densidades, formato das partículas, entre outros.

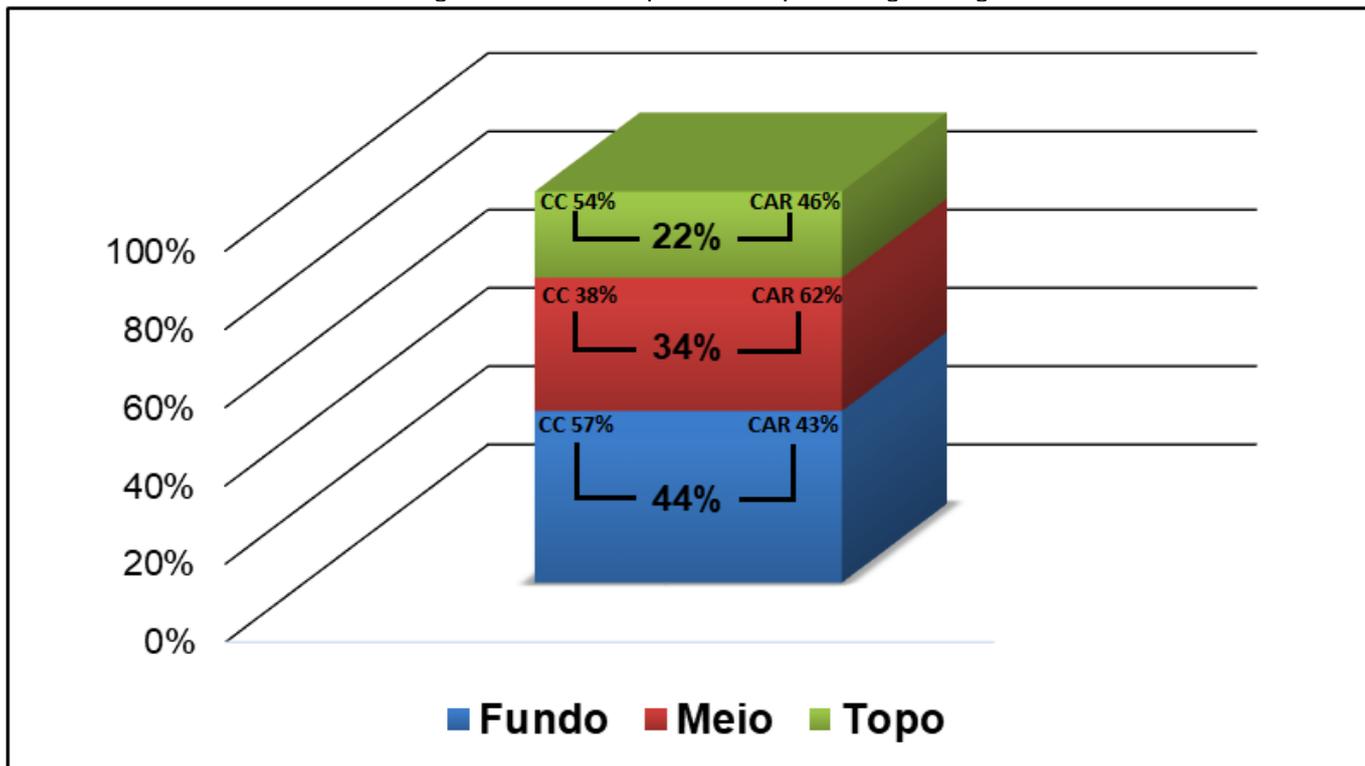
Alternando os mesmos parâmetros usados no jigue a ar, o jigue de fluido líquido (Jigue à água) mostrou resultados mais aparentes visualmente. O local

de armazenamento do material no equipamento é menor que o jigue a ar, resultando em um maior tempo de uso, e o emprego da água. Ainda conforme Sampaio e Tavares (2005), a reciclagem de materiais é um processo de alta precisão, devido à procura da qualidade dos materiais e também o fato de incluir mais um elemento no caso o uso da água. A melhor relação de ajuste no equipamento para adquirir o beneficiamento, foi com o tempo de 120 segundos, 75 rpm e alimentação por volume de um estágio e meio por tipo de concreto.

4.2.1 Ensaio quantitativo no Jigue à água

A Figura 41 apresenta o gráfico com o percentual da massa beneficiada, por camada. A fração Fundo representou 44% da massa total beneficiada (sendo 43% do concreto de alta resistência - CAR e 57% do concreto convencional - CC), camada do Meio 34% (CAR 62%; CC 38%) e a camada de Topo 22% (CAR 46%; CC 54%), elaborados através de amostra representativa.

Figura 41 - Ensaio quantitativo para o Jigue a água



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se levar em conta que as partículas da camada do fundo são mais densas que as demais (teoria da Sedimentação retardada diferencial) e o fato das partículas maiores se concentrarem no fundo.

4.2.2 Massas específica, massa específica aparente e absorção de água

A Tabela 24 exibe os resultados das massas específica, massa específica aparente e absorção de água nas camadas de topo e fundo.

A massa específica na camada de topo apresentou um valor menor do que a camada de fundo. Segundo Cabral (2007), materiais reciclados são menos densos que os agregados naturais, o que vai ao encontro com o beneficiamento onde materiais mais densos se agrupam na base (camada do fundo), segundo Sampaio e Tavares (2005).

Tabela 24 - Valores para massa específica, aparente e absorção de água

Massa específica		Massa esp. Aparente		Absorção	
Topo	Fundo	Topo	Fundo	Topo	Fundo
1,35 g/cm ³	1,89 g/cm ³	1,65 g/cm ³	2,00 g/cm ³	13,6%	2,8%

Fonte: Elaborado pelo autor

A absorção na camada de topo supera a norma brasileira, ABNT NBR 15116:2004, que limita a absorção em 12% para agregados miúdos e 7% para agregados graúdos de concreto. A característica do material na camada de topo é predominante por argamassa sem o agregado (brita) do concreto convencional.

4.2.3 Granulometria do ARC por camada de Topo e Fundo

Este ensaio foi realizado com todo o material beneficiado de ambas as faixas. A camada de topo foi o balizador para a produção dos novos concretos, pois resultou o material de menor produção.

Na Tabela 25 é apresentado o comportamento do tamanho das partículas da camada de Topo, onde suas maiores concentrações de massa ficaram retidas entre as peneiras intermediárias e as peneiras menores (+9,5 a

+4,75) causando efeito de 73%, resultando em material de granulometria menor.

Tabela 25 - Granulometria retida na camada do Topo

Topo				
# Malhas (mm)	Massa retida (kg)	Retido individual %	Acumulado %	Porção ÷ 3 (kg)
+ 19,0	0	0		0
+ 15,9	5,78	11	11	1,93
+ 12,7	8,61	16	27	2,87
+ 9,50	13,37	26	53	4,46
+ 8,00	11,76	22	75	3,92
+ 6,35	4,30	8	83	1,43
+ 4,75	9,03	17	100	3,01
Totais	52,85	100		17,62
DMC # 19 mm				
MÓDULO DE FINURA 6,53				

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 26, mostra a caracterização do tamanho das partículas para a camada de Fundo, evidenciando uma concentração de partículas maiores nas peneiras superiores de 91% entre as malhas +15,9 a +9,5mm.

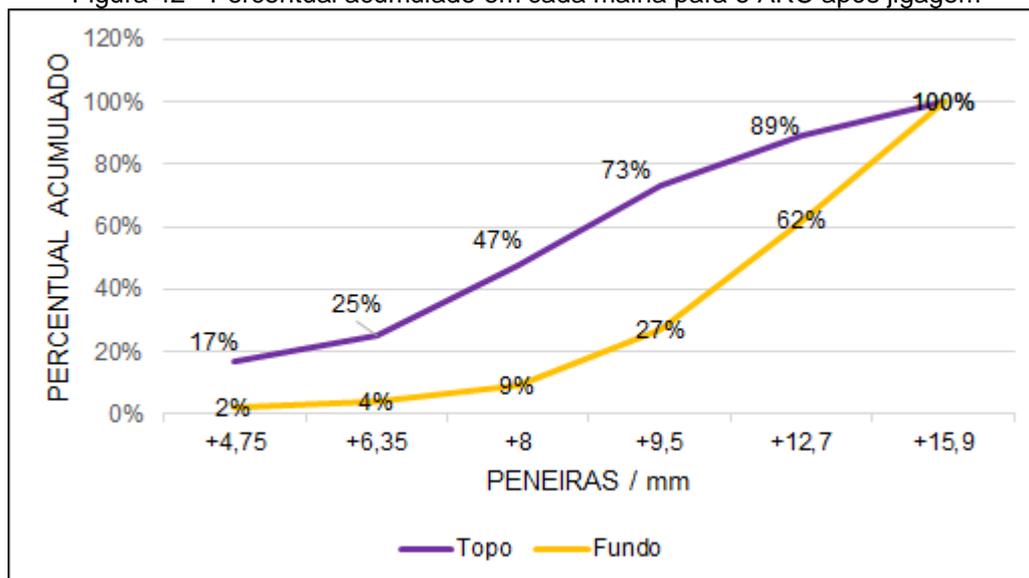
Tabela 26 - Granulometria retida na camada do Fundo

Fundo				
# Malhas (mm)	Massa retida (kg)	Retido individual %	Acumulado %	Porção ÷ 3 (kg)
+ 19,0	0	0		0
+ 15,9	18,55	38	38	6,18
+ 12,7	17,4	35	73	5,80
+ 9,50	8,90	18	91	2,97
+ 8,00	2,45	5	96	0,82
+ 6,35	0,90	2	98	0,30
+ 4,75	1,15	2	100	0,38
Totais	49,35	100		16,45
DMC # 19 mm				
MÓDULO DE FINURA 6,91				

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 42 mostra uma comparação do comportamento da quantidade de material acumulado em cada peneira para as camadas de Topo e Fundo.

Figura 42 - Percentual acumulado em cada malha para o ARC após jigagem



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 42 exibe que os agregados reciclados da camada de fundo apresentam uma curva de distribuição granulométrica, onde grande parte do material está representado nas maiores peneiras. Já os agregados reciclados da camada topo apresenta uma variabilidade na distribuição granulométrica.

4.2.4 Índice de forma do agregado graúdo reciclado

O Índice de forma é apresentado na Tabela 27. A análise foi realizada nas camadas Topo e Fundo.

Tabela 27 - Valores dos Índices de forma para os concretos

Camada	Índice de forma	
	Topo	Fundo
CC	2,97	2,42
CAR	3,85	3,30
Média	3,41	2,86

Fonte: Elaborado pelo autor

A norma ABNT NBR 7809:1983 determina que os valores de índice de forma dos grãos não podem ultrapassar o valor de 3 para o agregado graúdo para concreto.

O concreto convencional (CC) para ambas camadas topo e fundo, o agregado ficou classificado como apto perante a norma, tal fato é o motivo da resistência da argamassa ser mais fraca que a resistência da brita, deixando-a liberada com pouca argamassa e arredondada. Para o concreto de alta resistência (CAR), as camadas topo e fundo, apresentaram valores acima do estabelecido na norma, constatando um formato lamelar nas partículas, razão das resistências da argamassa e da brita serem muito próximas.

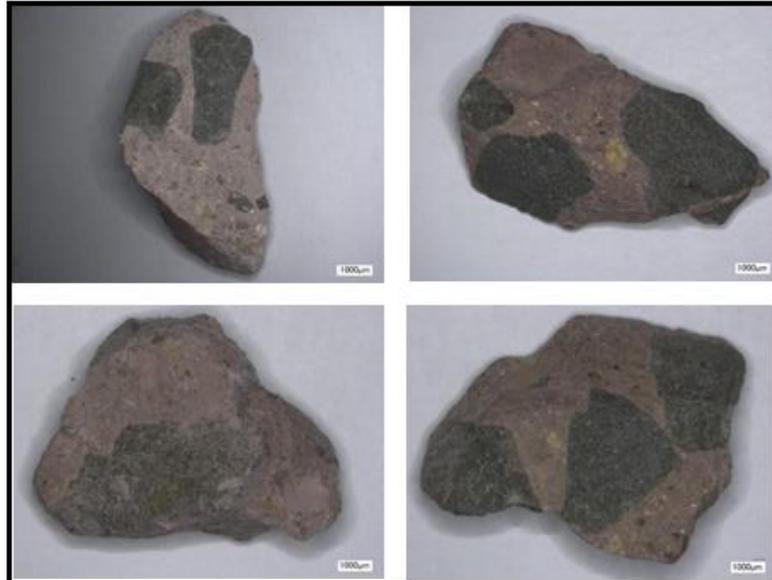
Para Mehta e Monteiro (2008), propriedades físicas como forma e textura tem um impacto nas propriedades na elaboração do concreto no estado fresco.

4.2.5 Microscopia digital

A ampliação da imagem possibilitou identificar as zonas de transição, assim como a composição das partículas. Foram fotografadas cada uma das camadas de Topo e Fundo e respectivamente os dois tipos de concretos, convencional (CC) e de alta resistência (CAR).

A Figura 43 refere-se ao material da camada de Fundo do Concreto de Alta Resistência (CAR). A imagem mostra a zona de transição entre a brita (rocha) e a matriz (argamassa). Observa-se que estes agregados reciclados de CAR mantém a argamassa aderida aos agregados naturais, tendo a ruptura ocorrido através dos agregados, como se o material fosse homogêneo. Este comportamento pode ser explicado em função da resistência da argamassa ser próxima à do agregado natural e o uso da sílica ativa que aumenta a aderência (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Figura 43 - Camada do Fundo do Concreto de Alta resistência (CAR)



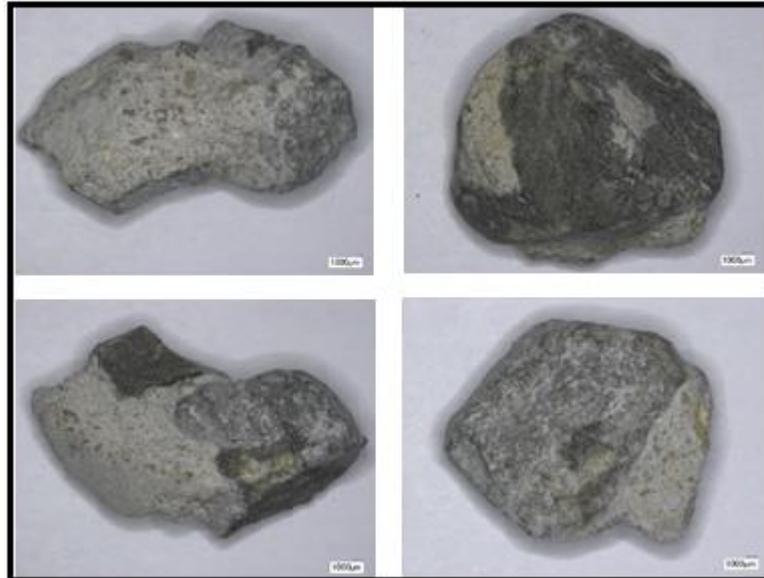
Fonte: Acervo do autor

Como a cominuição foi feita em britador de mandíbulas, e não houve a separação da argamassa, o agregado resultante ficou lamelar e alongado.

Mehta e Monteiro (1994) classificam como lamelar, quando a espessura é menor que as outras dimensões e alongado quando o comprimento é consideravelmente maior que as outras dimensões.

Na camada de Fundo do Concreto Convencional (CC), a brita apresenta-se mais liberada, com pouca presença de argamassa representado na Figura 44. Resultado esperado devido ao material utilizado e a dosagem aplicada, tornando a argamassa com a resistência abaixo da resistência da brita (HELENE E TERZIAN, 1992). Observa-se a formação de agregados reciclados mais arredondados, tendendo a reproduzir a forma dos agregados naturais.

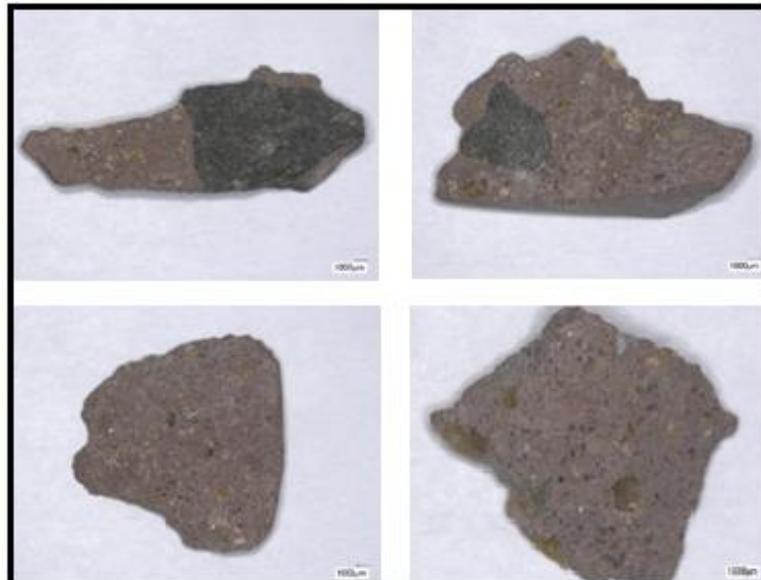
Figura 44 - Camada do Fundo do Concreto Convencional (CC)



Fonte: Acervo do autor

A Figura 45 apresenta as partículas da camada de Topo do Concreto de Alta Resistência (CAR), presença de pasta (argamassa) liberada e também existência de brita.

Figura 45 - Camada do Topo do Concreto de Alta resistência (CAR)

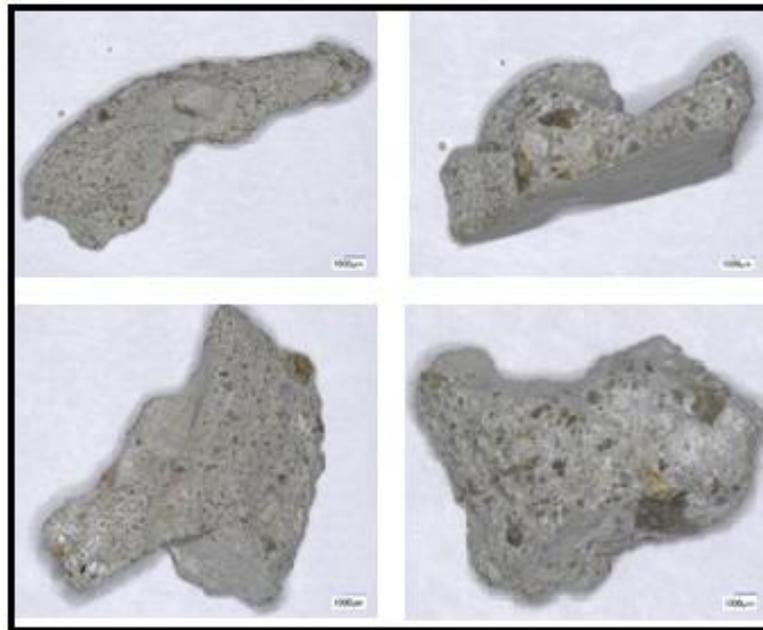


Fonte: Acervo do autor

Novamente as partículas apresentam características de formato lamelar, a espessura é menor que as outras dimensões e formato alongado. O comprimento é consideravelmente maior que as outras dimensões (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Na camada de Topo do Concreto Convencional (CC) foram encontradas partículas de ARC com predominância de argamassa liberada da brita, segundo a Figura 46. Como a densidade da argamassa é bem menor que a do agregado natural, as partículas formadas pela argamassa liberada tendem a subir (topo), ficando na camada inferior o material mais denso, formado principalmente pelos agregados liberados do concreto convencional.

Figura 46 - Camada do Topo do Concreto Convencional (CC)



Fonte: Acervo do autor

Mehta e Monteiro (1994) conceituam como partícula alongada, quando o comprimento é consideravelmente maior que as outras dimensões e arredondado, quando é formada por atrito, as partículas tendem a ser arredondadas, também podem ser desgastadas pela ação das águas.

4.2.6 Determinação da massa unitária, massa unitária SSS e do volume de vazios

A Tabela 28 indica os valores de massa unitária, massa unitária SSS (superfície seca em estado de saturação) e volume de vazios, para as camadas topo, meio e fundo.

Pacheco-Torgal et al. (2013) apontam que o valor da massa unitária aproximada dos agregados naturais comumente usados em concreto,

normalmente varia de 1300 a 1750 kg/m³. Com isso, as camadas do meio e fundo estariam inseridas com base nos valores dos autores, porém a camada de topo não atinge o valor necessário para inclusão.

Tabela 28 - Valores da massa unitária, massa unitária SSS e índice de vazios

Ensaíos	Topo	Meio	Fundo
Massa unitária (kg/m³)	1080	1366	1444
Massa unitária SSS (kg/m³)	1226	1460	1485
Índice de Volume de vazios (%)	0,09	----	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o índice de volume de vazios, as duas camadas (topo e fundo) não apresentaram um valor maior que 1%, conforme a norma ABNT NBR NM 45:2006.

4.3 2º ETAPA – ELABORAÇÃO DOS CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO E AGREGADO NATURAL (CONCRETO TESTEMUNHO)

Seguem os resultados dos ensaios realizados de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção e profundidade de carbonatação para os concretos com agregados reciclados e testemunho. Para todos os ensaios realizados foi aplicado o método estatístico de análise de variância (ANOVA) que serve para comparar três ou mais condições impostas ou objeto que se deseja avaliar ou medir. Valores próximos ao valor 1 indica menor diferença entre eles, para valores próximos a zero indicaram uma maior diferença (CORREA, 2003).

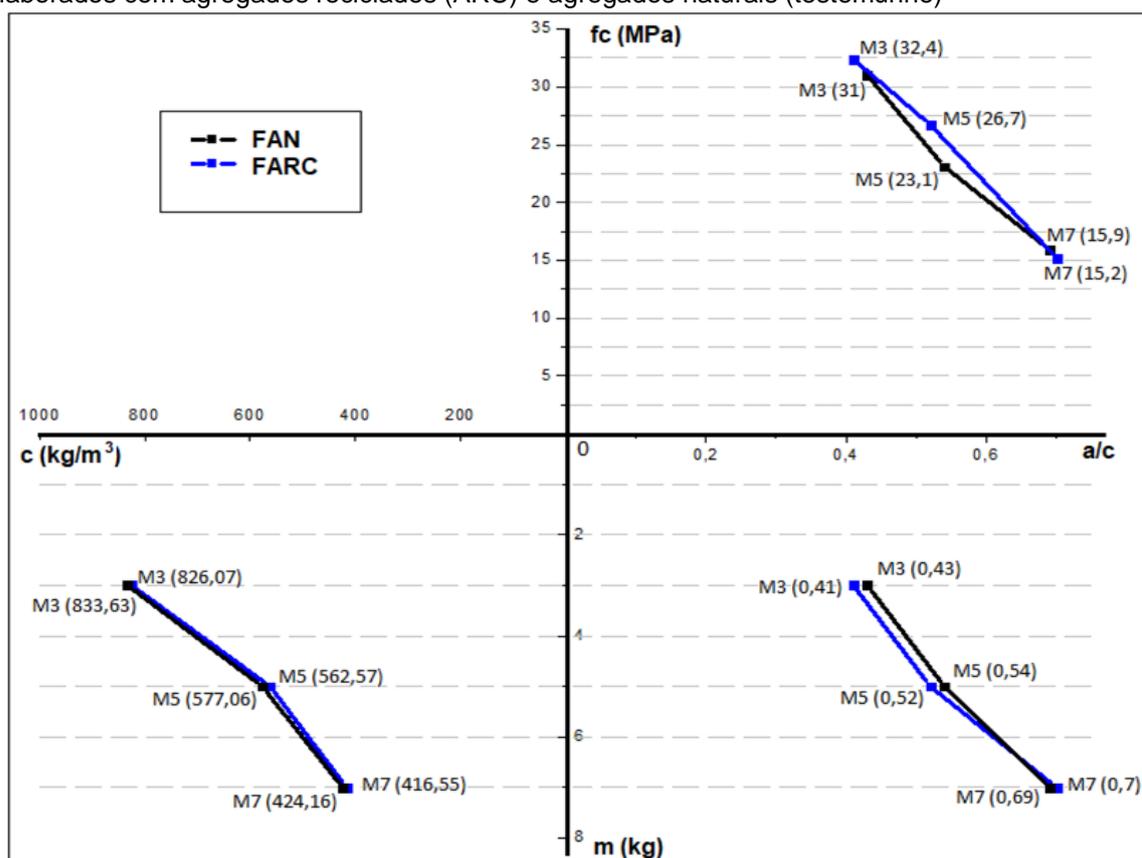
4.3.1 Curvas de Dosagem das camadas Topo e Fundo dos agregados reciclados e natural

A Figura 47 exibe as curvas de dosagem para os concretos produzidos com a camada de Fundo, elaborados com agregado reciclado e agregado natural (Testemunho). Foram proporcionados concretos com 3 relações

água/cimento, relativas a um traço pobre (M7), um intermediário (M5) e um rico (M3).

Comparando no gráfico da Figura 47, o concreto reciclado e o concreto testemunho na resistência à compressão, para o M7, mostrou que ambos os concretos apresentaram resultados muito próximos. Para os traços M5 e M3, houve uma diferença entre a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado e a do natural, o concreto reciclado supera o concreto de agregado natural. Vieira (2003) relata que a resistência pode aumentar na utilização de agregados reciclados, podendo chegar a ser 33% maior do que a do concreto testemunho. A resistência do concreto com agregado reciclado do M5 foi maior em 13% comparado com o concreto testemunho. Possivelmente porque a camada de fundo concentrou uma maior quantidade de agregados (brita) com liberação da argamassa (principalmente para o concreto convencional) e as partículas com argamassa aderida eram provenientes, em grande parte, do CAR.

Figura 47 - Curva de dosagem para os concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho)



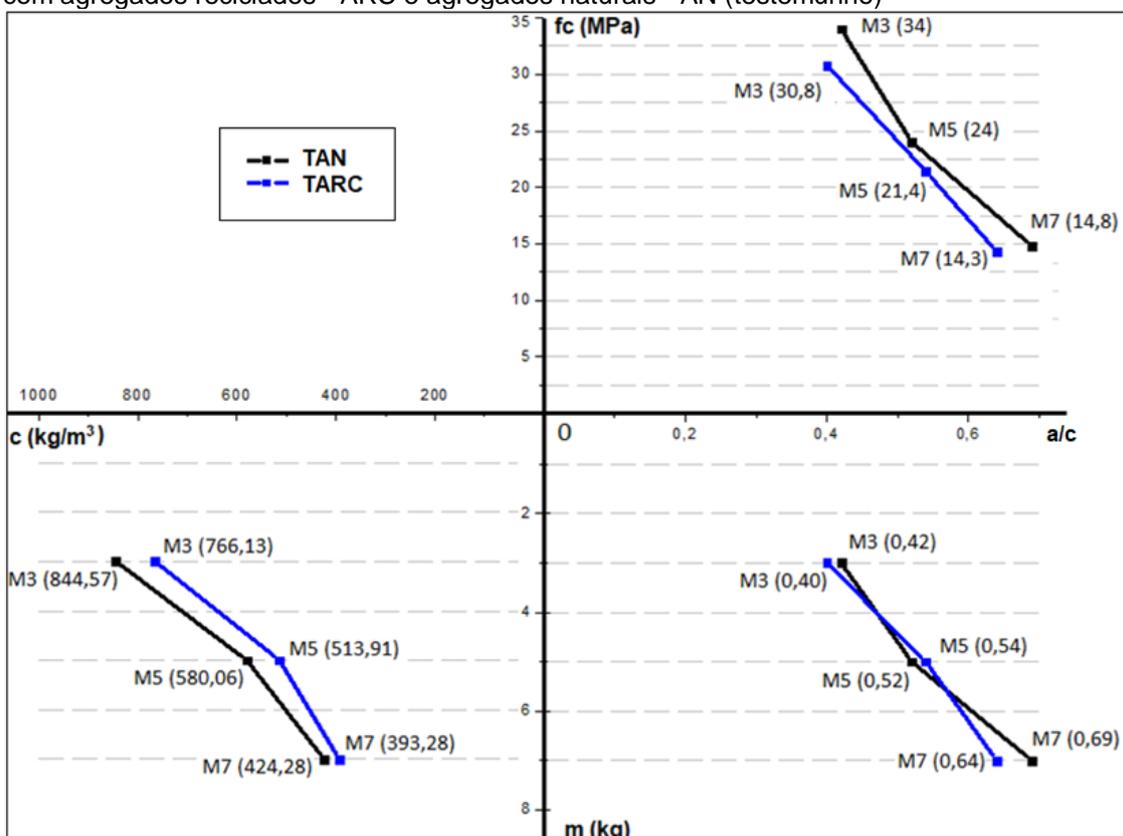
Fonte: Elaborado pelo autor

A relação água/cimento e o consumo de cimento, ficaram praticamente iguais para as dosagens com ARC e com agregado natural. Aplicando a análise estatística de variância ANOVA (anexo 1), determinou que não há diferença significativa (valor de $P=0,84$) entre as resistências.

A Figura 48 apresenta a curva de dosagem dos concretos produzidos da camada de topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho). Em comparação dos tipos de traços (rico = M3, intermediário = M5 e pobre = M7), confrontando no gráfico os resultados da resistência à compressão, o agregado natural foi maior em todos os traços, com pouca diferença no traço pobre (M7). Sanchez (2004) afirma que o agregado reciclado pode reduzir a resistência mecânica em 45%, por ter uma maior porosidade no RCD devido à argamassa aderida ao agregado natural, entre outros. Os demais traços (M3 e M5) apresentaram um aumento próximo de 10%.

O agregado natural, obteve um maior consumo de cimento que o reciclado em todos os traços e também um maior consumo na relação água/cimento, com exceção no traço médio (M5). Pela análise estatística ANOVA (anexo 2), identificou que a diferença entre eles, é pouco significativa (valor de $P=0,78$) entre as resistências.

Figura 48 - Curva de dosagem para os concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados - ARC e agregados naturais - AN (testemunho)



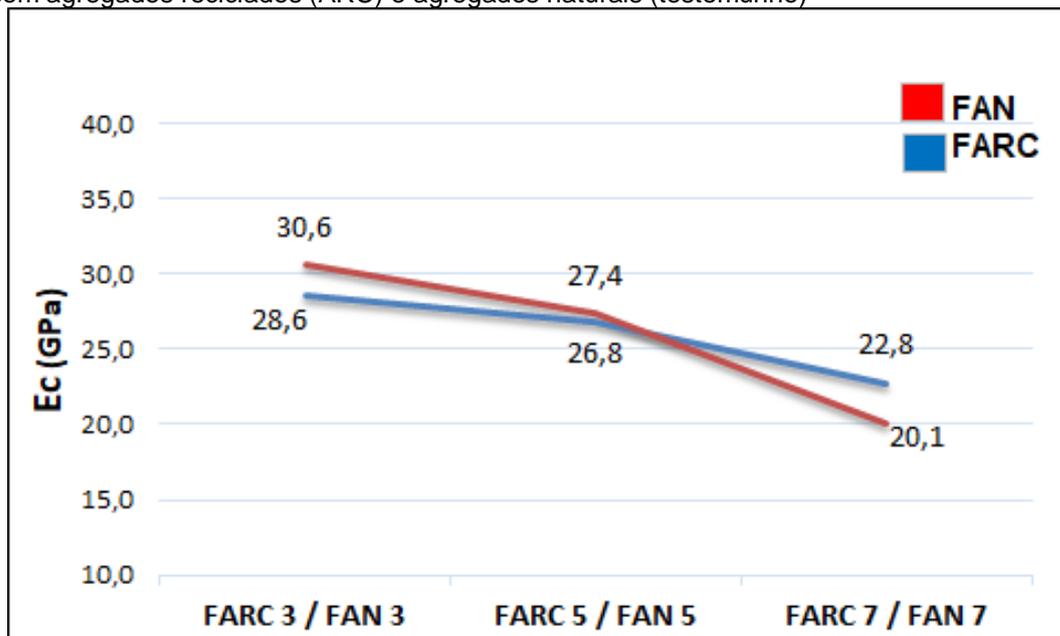
Fonte: Elaborado pelo autor

Confrontando os gráficos das camadas de Fundo e Topo, os concretos de agregados reciclados com os concretos de agregados naturais, através da curva de dosagem. O desempenho da camada de fundo dos concretos com agregado reciclado no ensaio de resistência à compressão, para os traços rico e intermediários, foram melhores que os resultados apresentados pelos concretos reciclados da camada de Topo. Tal fato ocorre, provavelmente, devido a liberação do agregado graúdo pelo CC e também a resistência do agregado proveniente do CAR ter a sua resistência muito próxima do agregado natural. Portanto, a qualidade dos concretos moldados com estes agregados tende a ter um melhor desempenho.

4.3.2 Módulo de Elasticidade das camadas Topo e Fundo

Comparando no gráfico o ensaio de Módulo de Elasticidade, através da Figura 49, a camada de Fundo no traço rico (M3) os concretos com agregados naturais mostraram um resultado melhor, mas sem diferença significativa, entre os concretos reciclados, seguindo um comportamento similar para o traço intermediário (M5). No traço pobre (M7) o concreto reciclado mostrou ser melhor que o concreto com agregado natural, com uma diferença de 12%.

Figura 49 - Módulo de Elasticidade dos concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho)



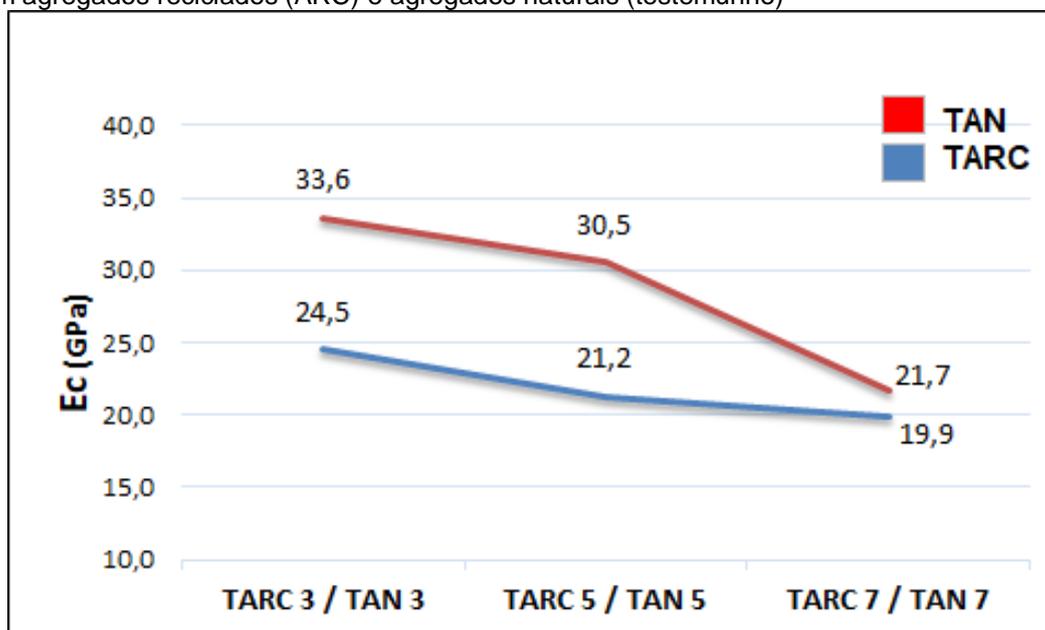
Fonte: Elaborado pelo autor

Indicando a qualidade dos concretos produzidos com os agregados reciclados da camada de Fundo, formada por agregados naturais liberados do CC e por partículas do CAR, cuja argamassa é pouco porosa e muito mais resistente (próxima a 100 MPa emparelhada com a resistência do agregado natural). No entanto, para a análise de variância ANOVA (anexo 3), consta que não há diferença significativa (valor de $P=0,99$) no módulo de elasticidade.

Para a camada de Topo no ensaio de Módulo de Elasticidade, os concretos produzidos com agregados naturais (AN) apresentaram uma larga diferença em relação aos concretos produzidos com os agregados reciclados (ARC): para o traço rico (M3) de 27% e para o traço intermediário (M5) de 30%.

No traço pobre (M7) há um estreitamento entre os concretos, ilustrado na Figura 50.

Figura 50 - Módulo de Elasticidade dos concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho)



Fonte: Elaborado pelo autor

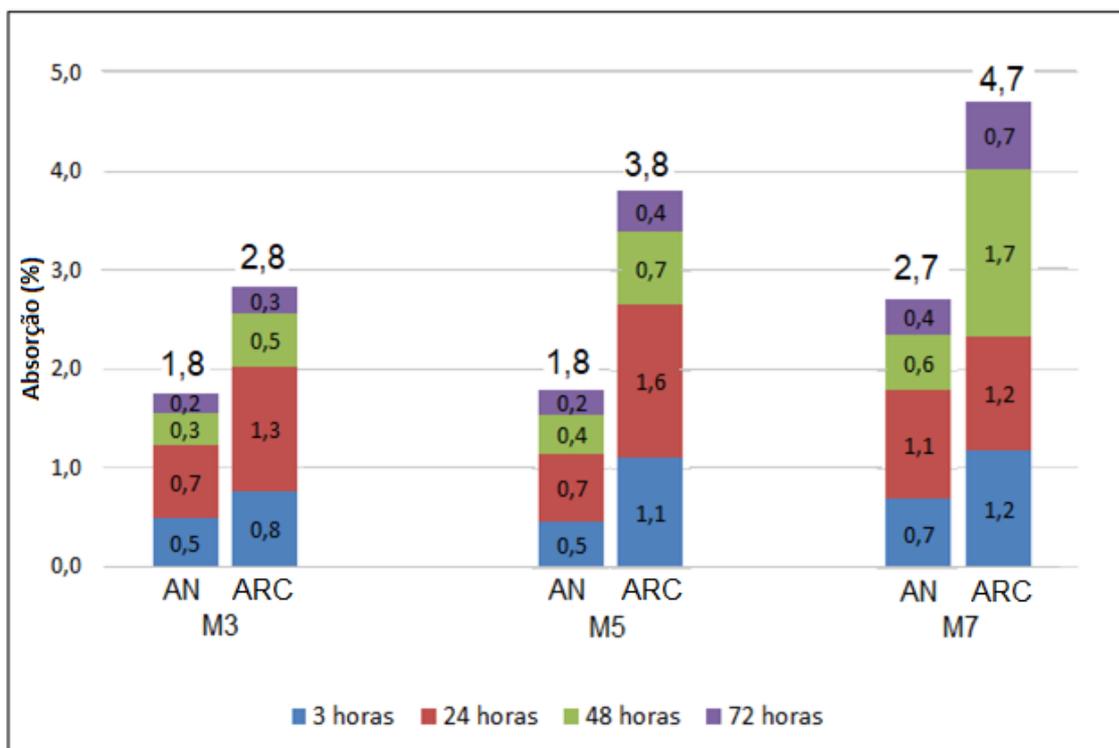
Nota-se que os concretos produzidos com agregados reciclados da camada de topo, tem predominância de argamassa liberada do CC, com maior porosidade que os agregados naturais, além disso, as partículas são menores ($M_f=6,53$ para camada de Topo e $M_f=6,91$ para camada de Fundo). Quem rege o módulo do concreto é o agregado graúdo, que normalmente possui densidade maior que a argamassa e conseqüentemente um módulo maior. Para Hansen (1992), existe uma diminuição dos valores de módulos de elasticidade entre concretos com agregados reciclados comparados com concretos de agregados naturais, variando entre 15 e 40%. O autor ainda destaca que quanto maior for a resistência do concreto, maior a diferença entre os valores. Pela análise estatística ANOVA (anexo 4), há diferença significativa com $P=0,15$ entre os traços.

4.3.3 Absorção de água

A Figura 51 exibe o resultado do ensaio de absorção para os concretos da camada do topo, comparando os concretos produzidos com os agregados

naturais (AN) sobre os concretos produzidos com agregados reciclados (ARC) para os três traços distintos (M3 para rico, M5 para o intermediário e M7 para o traço pobre). Os concretos com agregados naturais (AN) mantiveram absorção de água muito abaixo em comparação com os concretos produzidos com reciclados (ARC), absorção aumenta à medida que o traço se encaminha do mais forte (rico) para o mais fraco (pobre).

Figura 51 - Absorção dos concretos confeccionados da camada do topo para os concretos produzidos com agregados naturais e concretos produzidos com reciclados



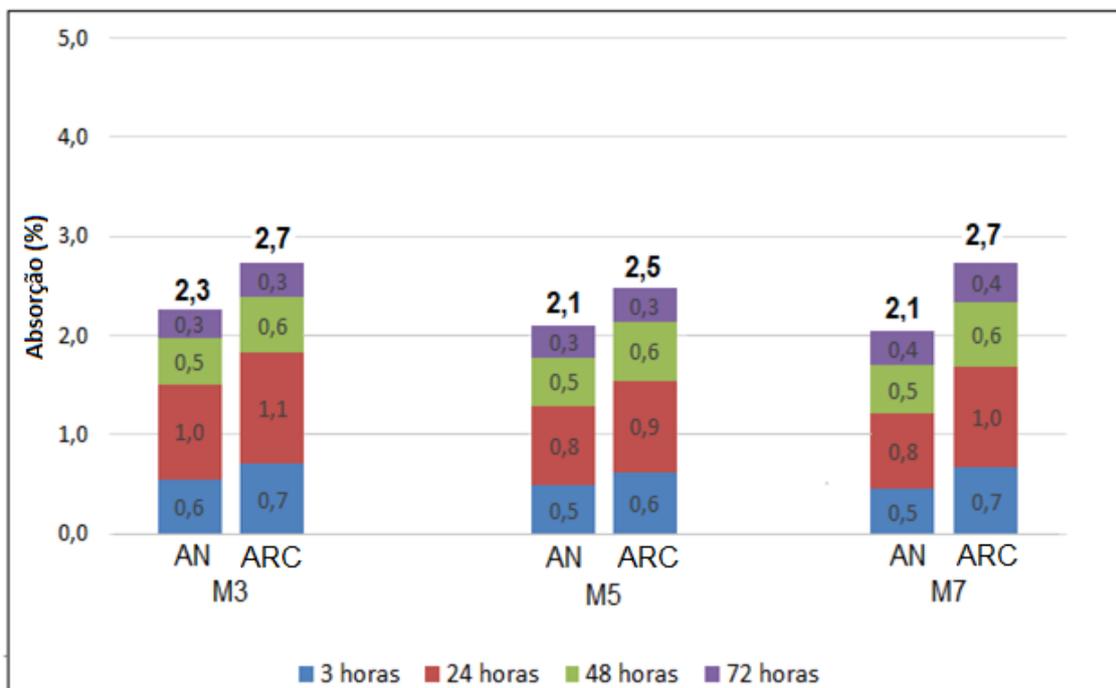
Fonte: Elaborado pelo autor

Tal fato da diferença de absorção de água entre os concretos produzidos com agregados naturais (AN) sobre os concretos produzidos com agregados reciclados (ARC), valeu-se que os agregados reciclados da camada de topo são compostos por grande parte de argamassa, que é mais porosa. A análise de variância (anexo 5) indica que há diferença significativa entre eles, com $P=0,05$.

A Figura 52 apresenta o resultado da absorção de água para os concretos da camada do fundo, comparando os concretos produzidos com agregados naturais (AN) e os concretos produzidos com agregados reciclados (ARC) para todos os traços, o M3 para rico, M5 para o intermediário e M7 para

o traço pobre. Os concretos produzidos com os reciclados (ARC) absorveram mais água do que os concretos produzidos com agregados naturais (AN), a análise estatística ANOVA (anexo 6), indica diferença significativa de $P= 0,007$.

Figura 52 – Absorção dos concretos da camada do fundo para os concretos produzidos com agregados naturais e concretos produzidos com reciclados



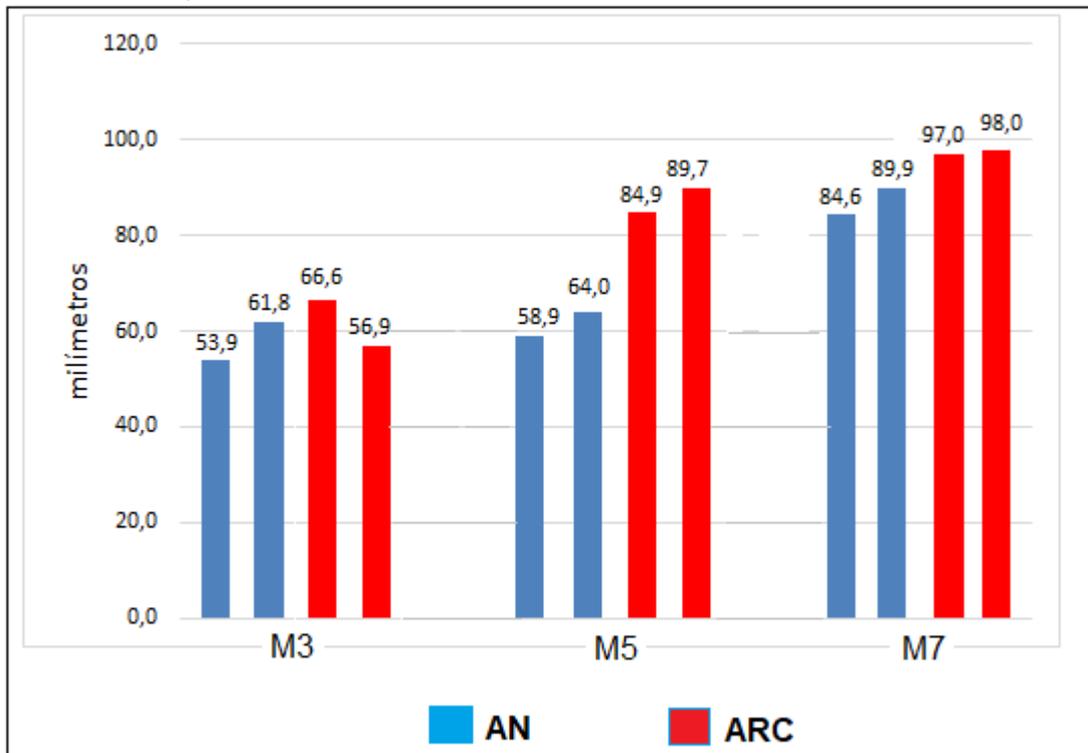
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os concretos produzidos com agregados reciclados (ARC) em relação aos concretos produzidos com agregados naturais, os concretos reciclados da camada de topo absorveram mais água que os concretos reciclados da camada de fundo. Mehta e Monteiro (2008) comentam que por meio microfissuras e vazios provenientes da zona de transição, facilitam a penetração de água.

Na Figura 53 e Figura 54 são exibidos os ensaios de quanto percorreu a umidade no sentido vertical partindo de sua base. Para os concretos produzidos com agregados naturais (AN) e concretos com agregados reciclados (ARC), nos traços M3, M5 e M7 referentes as camadas de topo e fundo.

Os concretos da camada de topo são apresentados na Figura 53, onde os concretos elaborados com agregados reciclados percorreram uma distância maior do que os concretos elaborados com agregados naturais.

Figura 53 - Distância percorrida na vertical pela umidade nos concretos elaborados da camada de topo

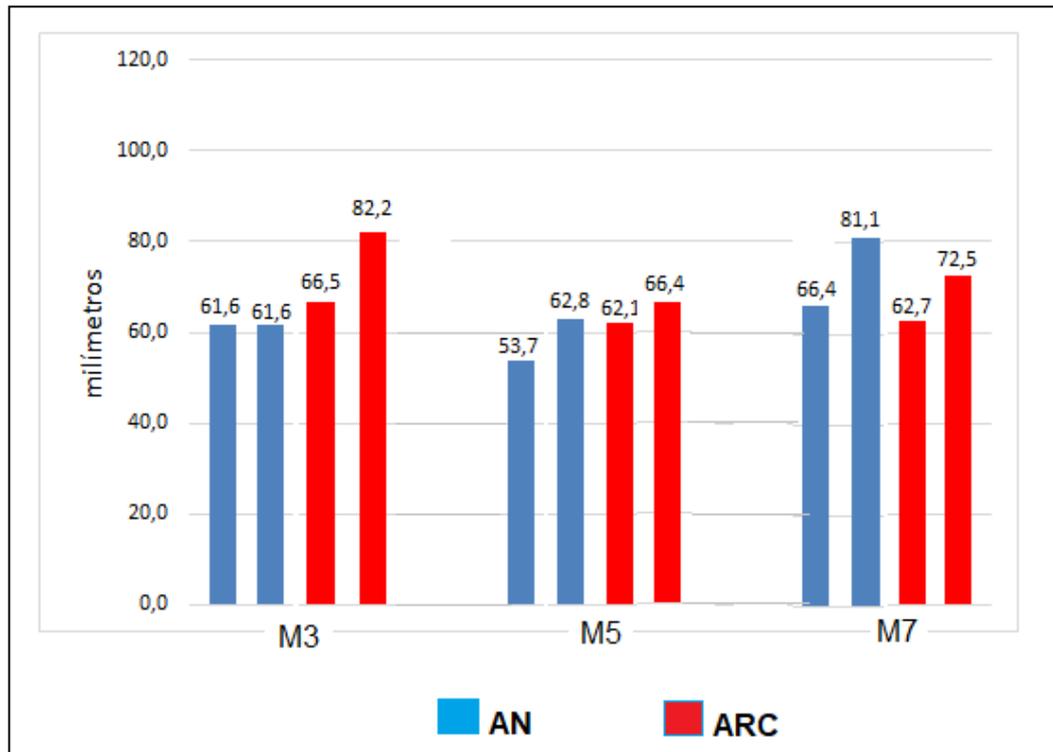


Fonte: Elaborado pelo autor

Esse avanço se explica através da elaboração dos concretos com agregado reciclado, sendo um material mais poroso, e à medida que aumenta esta proporção de agregado através da dosagem, aumenta absorção. Para ANOVA (anexo 9) acaba evidenciando esta diferença com valor de $P=0,175$.

A Figura 54 mostra o quanto a umidade ascendeu para os concretos produzidos a partir da camada de fundo, em ambos os traços.

Figura 54 - A distância percorrida na vertical pela umidade nos concretos elaborados da camada de fundo



Fonte: Elaborado pelo autor

Diferentemente dos concretos produzidos com a camada de topo, onde os mesmos produzidos com agregados reciclados apresentaram valores superiores ao concreto produzido com agregados naturais. Os concretos elaborados na camada de fundo permaneceram semelhantes em ambos os concretos com agregados naturais e reciclados. Para a ANOVA (anexo 10) esta diferença é apresentada no valor de $P=0,406$.

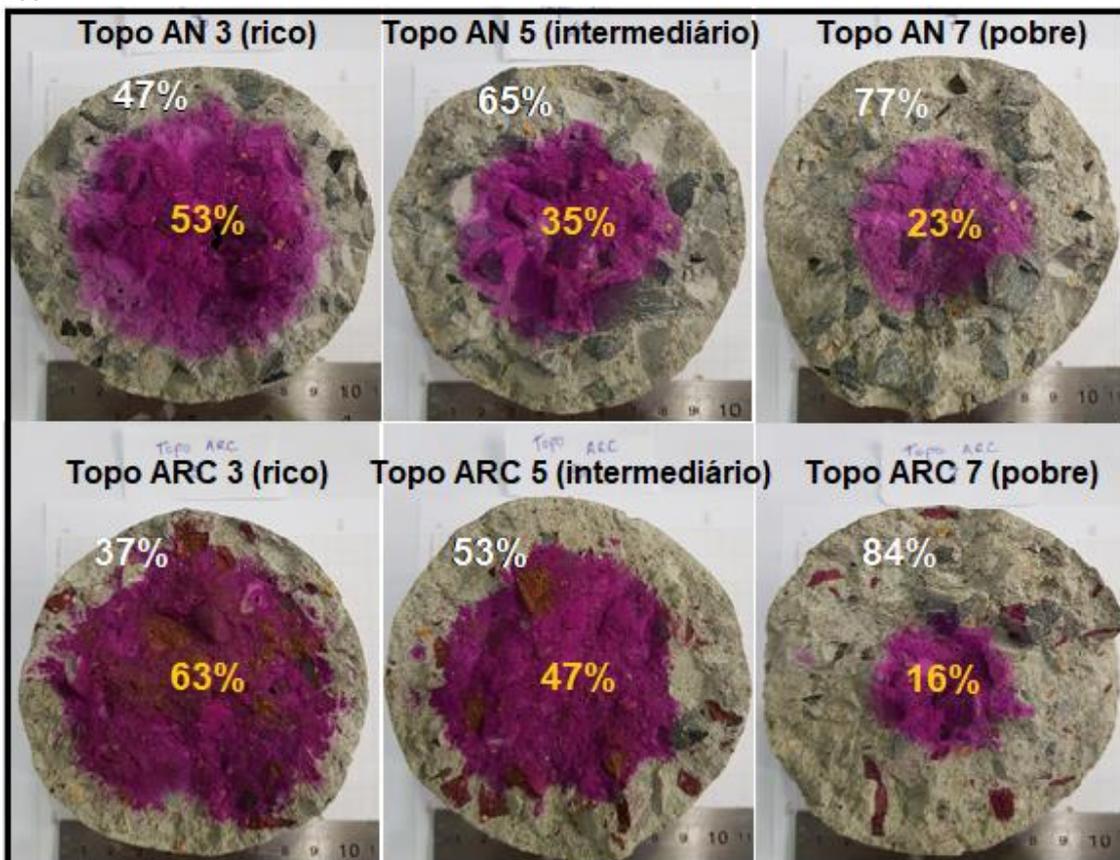
4.3.4 Carbonatação

Os ensaios de profundidade de carbonatação foram realizados nos corpos de prova, para os concretos produzidos com agregados naturais (AN) testemunho e concretos produzidos com agregados reciclados (ARC), verificando a diferença do avanço da frente de carbonatação nos diferentes concretos. As figuras deste subtítulo estão exibidas com a identificação do tipo de traço localizado no cabeçalho de cada imagem do corpo de prova, os

percentuais distingam a área da reação no corpo de prova, percentuais com valores da cor branca na parte superior sinalizam área carbonatada e valores na cor verde ao centro do corpo de prova sinaliza a área não carbonatada.

A Figura 55 apresenta as imagens do ensaio de carbonatação nos concretos AN e ARC da camada de topo.

Figura 55 - Ensaio de carbonatação da camada de topo para os traços pobre, intermediário e rico



Fonte: Acervo do autor

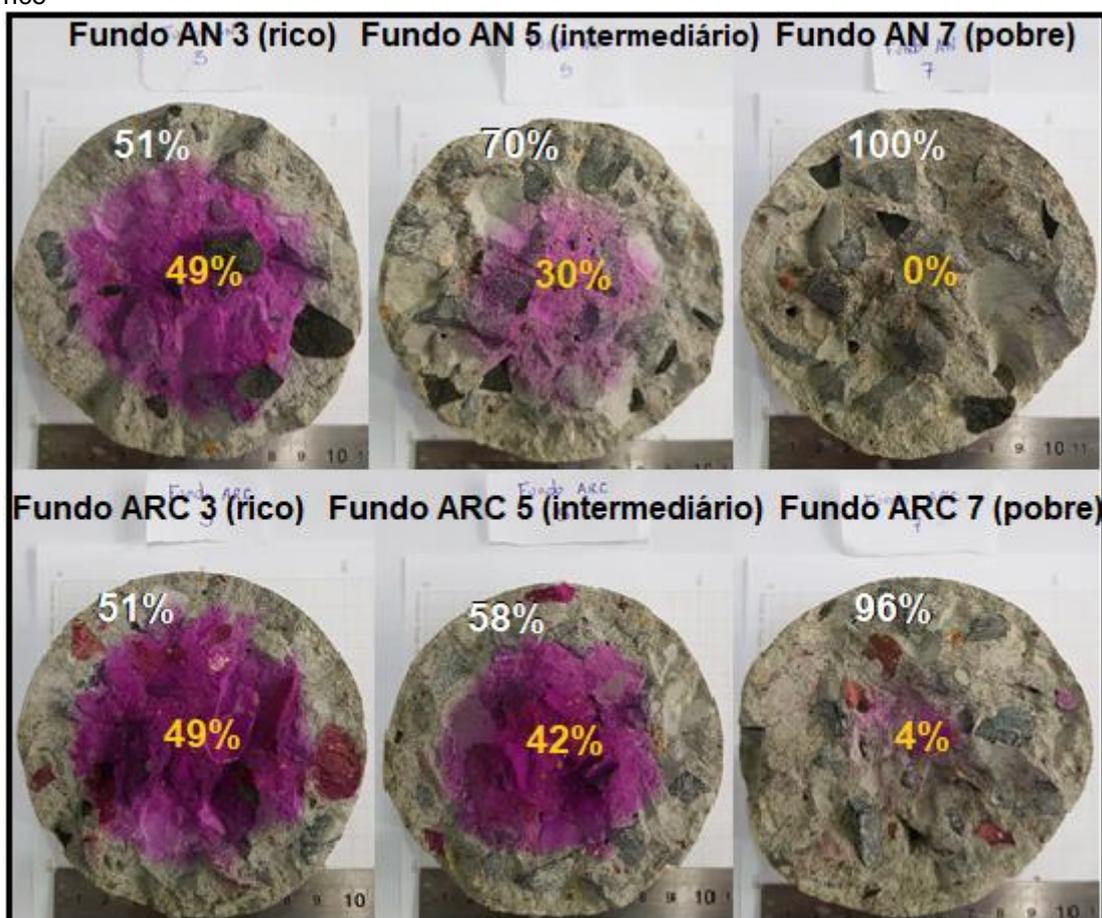
Comparando as imagens os traços rico e intermediário do agregado reciclado (ARC), apresentaram uma menor área de profundidade de carbonatação (37% para o traço rico e 53% para o traço intermediário) que os concretos produzidos com agregado natural (47% para o traço rico e 65% para o traço intermediário). Para o traço pobre, o concreto produzido com agregado natural (AN) testemunho, a área carbonatada foi de 77%, mostrou uma maior resistência que o agregado reciclado com 84% de sua área carbonatada, exibido na Figura 55. Ressaltando que à medida que aumenta a proporção dos

agregados e conseqüentemente diminui a quantidade de cimento, aumenta a área de carbonatação.

O traço pobre do agregado reciclado mostrou uma área maior carbonatada com 84% em comparação ao traço pobre do concreto com agregado natural, que apresentou o resultado de 77%. Este resultado provavelmente foi influenciado pela qualidade do seu material reciclado ser mais poroso evidenciando, assim, uma maior permeabilidade, conforme o ensaio de absorção. Pela análise estatística ANOVA (anexo 7), a diferença não é significativa com $P=0,77$.

Na Figura 56 pode-se verificar o avanço da frente de carbonatação nas imagens do ensaio dos concretos AN e ARC da camada de fundo.

Figura 56 - Ensaio de carbonatação da camada de fundo para os traços pobre, intermediário e rico



Fonte: Acervo do autor

Analisando as imagens, pode-se verificar que o empobrecimento do traço tem relação direta com o aumento da área carbonatada. Quando

comparados os dois concretos do traço rico percebe-se que não houve diferença na área de carbonatação, ambos apresentaram o valor de 51%.

O M5 referente ao traço intermediário o concreto reciclado se mostrou com uma resistência maior na carbonatação que o concreto com agregado natural. Em relação ao traço pobre M7, o concreto com agregado natural apresentou o resultado de 100% de carbonatação. A análise de variância ANOVA (anexo 8), resulta que não há diferença significativa com $P=0,80$.

Analisando todos resultados de carbonatação dos concretos produzidos com agregados reciclados (ARC) e os concretos produzidos com agregados naturais (AN), o concreto reciclado na maioria dos casos apresentou melhores resultados. Leite (2001) salienta que alguns fatores exercem influência na carbonatação, entre eles, como o tipo de cimento, as adições, os agregados que definem a composição da mistura e sua estrutura de poros. Melhora a zona de transição, aderência, cura interna e fecha os capilares.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi verificar a viabilidade do uso do RCD proveniente da geração dos concretos convencional e de alta resistência através da utilização do jigue como agente do beneficiamento. Para tal foi realizado dois lotes de concretos com resistências distintas, um concreto com 20 MPa (CC) e outro de 100 MPa (CAR). As conclusões a seguir são válidas para os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

A aplicação do jigue a água possibilitou o beneficiamento dos agregados reciclados de concreto em três camadas de igual volume, topo, meio e fundo. Para o ensaio quantitativo a camada do fundo apresentou 44% em massa, indicando o material mais denso, que a camada topo com 22% e camada do meio com 34%.

Para o ensaio de massa específica, a camada de topo apresentou um valor menor que a camada de fundo (diferença de 28%), comprovando ser menos denso. No ensaio de massa específica aparente a camada topo exibiu um valor 17% menor que a camada do fundo. Para o ensaio de absorção o resultado da camada de topo foi de 13,6% ultrapassando o limite da norma que é 12%.

A avaliação da distribuição granulométrica, apresentou curvas distintas entre as camadas de fundo e topo. A camada de fundo apresentou um percentual maior retido nas peneiras maiores malhas (91%) já a camada de topo a massa retida ficou mais bem distribuída entre as peneiras. No ensaio de índice de forma, a camada de topo e fundo apresentaram valores de 3,41 e 2,86, respectivamente, sendo que o limite é 3. O ensaio de microscopia digital possibilitou verificar que o CAR rompe de forma homogênea (argamassa e brita) e o CC rompe na zona de transição (argamassa e a brita). Para o ensaio de massa unitária e massa unitária SSS, a camada do fundo apresentou o valor similar ao de um agregado natural e para a camada de topo a diferença foi 25% menor. No ensaio de índice de vazios, ambos resultados estão dentro da norma.

Os agregados da camada de fundo apresentaram melhores resultados para todos os ensaios realizados, desta forma pode se dizer que este agregado

possui qualidade superior, evidenciando que a separação por gravidade foi eficaz.

Os concretos confeccionados com agregados provenientes da camada topo e fundo foram analisados em relação à resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção e carbonatação. Analisando a camada de topo para o M3 (traço rico), entre o concreto convencional e o concreto reciclado, o concreto convencional apresentou resultados melhores nos ensaios de resistência à compressão (9% maior), módulo de elasticidade (27% maior) e absorção (35% menor). No item de carbonatação o concreto com agregado reciclado teve menos área carbonatada que o concreto convencional, com diferença de 10%. Para o M5 (traço intermediário) da camada de topo, o concreto convencional apresentou resultados melhores que os concretos reciclados nos ensaios de resistência à compressão (10% maior), módulo de elasticidade (30% maior) e absorção (52% menor), no item de carbonatação o concreto reciclado obteve menos área carbonatada que o concreto convencional, com diferença de 12%. Para M7 (traço pobre) da camada topo para os concretos convencionais e concretos reciclados (ARC), o concreto convencional exibiu resultados melhores em todos os ensaios, resistência à compressão (3% maior), módulo de elasticidade (8% maior), absorção (42% menor) e a área carbonatada menor com diferença de 7%.

Na camada de fundo para o traço M3 (rico) o concreto reciclado apresentou uma resistência à compressão 4% melhor que o concreto convencional, para o ensaio de módulo de elasticidade o concreto convencional ficou 6% maior que o concreto reciclado, na absorção o concreto reciclado é 14% maior que o concreto convencional, e o mesmo valor de área carbonatada. O traço M5 (intermediário) da camada fundo, o resultado dos concretos reciclados no ensaio de resistência à compressão mostraram valores acima que o convencional em 13%, no módulo de elasticidade a diferença foi de 2% maior para o concreto reciclado (ARC). No ensaio de absorção para o concreto reciclado o valor ficou 16% maior que o convencional. A área carbonatada do concreto com agregado convencional (AN) foi 12% maior. O M7 (traço pobre) da camada fundo, a resistência à compressão do concreto convencional foi de 4% a mais que o reciclado, para o módulo de elasticidade a diferença foi de 11% maior para o concreto reciclado. Na absorção o concreto

confeccionado com agregado reciclado foi 22% maior que o concreto convencional, porém a área carbonatada do concreto convencional foi 4% maior em comparação com o reciclado.

Após a análise de todos os resultados dos concretos, pode-se dizer que os concretos produzidos com agregados reciclados não superam os agregados naturais, porém comparando os concretos produzidos com agregados da camada de topo e fundo pode-se afirmar que o agregado reciclado proveniente do fundo é o mais indicado entre os tipos de reciclados em substituição ao agregado natural. Desta forma o uso do jigue melhora a qualidade do agregado reciclado de concreto (ARC) segregando o material de diferentes resistências.

6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros a instigação na aplicação da camada intermediária, com aplicação dos mesmos ensaios.

Estudos em outros equipamentos da mineração para o beneficiamento de RCD.

Inserir na geração de agregados reciclados de concretos (ARC) com resistências intermediárias para avaliar o comportamento mais detalhado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, I. R.; **Betões de alta resistência e durabilidade- composição e características**. Lisboa, 1990. 740p. Tese (Doutorado em Engenharia)- Laboratório Nacional de Engenharia Civil-LNEC- Portugal.

ANGULO, S.C.; FIGUEIREDO, A.D. **Concretos com Agregados Reciclados**. IBRACON, São Paulo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica - Classificação. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 33**: Concreto – Amostragem de concreto fresco - Classificação. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios - Classificação. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente - Classificação. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água - Classificação. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Classificação. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5732**: Cimento Portland comum- Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial- Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico- Classificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova- Classificação. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5743:** Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo- Classificação. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5745:** Cimento Portland – Determinação de anidrido sulfúrico- Classificação. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5891:** Regras de arredondamento na numeração decimal - Classificação. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 7211:** Agregados para concretos – Especificação - Classificação. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro–Método de ensaio – Classificação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9203:** Cimento Portland comum e clínquer – Análise química por complexometria. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **ABRECON**. Disponível em: <www.abrecon.org.br>. Acesso em: 09 de abril 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **ANEPAC**. Disponível em: <www.anepac.org.br>. Acesso em: 01 de abril 2017.

BARCELOS, H. O. **Jigagem de minérios itabiríticos**. 2010. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação do departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1998.

BRASIL. Lei nº 6938/81, 31 de agosto 1981. **Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA)**.

BRASIL. Lei nº 12.305/10, 2 de agosto 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**.

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**. 2007. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CALDERONI, S. Aspectos Econômicos Custo do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos e as Externalidades, V SEMEIA, 2012, Ilhéus. **Anais eletrônicos. Disponível em: <http://docplayer.com.br/13152513-Aspectos-economicos-custo-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-e-as-externalidades.html>**> acessado em: 9 de maio 2016.

CARNEIRO, A.P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – **CONAMA 307** - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, 2002.

CORDEIRO, L. de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)**. 2013. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística**. Belo Horizonte; PUC Minas Gerais, 2003.

DA LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010, p.560.

DA SILVA, T. J. **Predicción de la Vida Útil de Forjados Unidireccionales de Hormigón Mediante Modelos Matemáticos de Deterioro**. 1998. 327 f. Tese de Doutorado, Universidade Politécnica de Catalunha. Espanha, 1998.

FERNANDEZ, J. A. B.; **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil** – Relatório de Pesquisa. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Brasília, 2012.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. **Cominuição**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2004.

Frost and Sullivan (2011), **Strategic Analysis of the European Recycled Materials and Chemicals Market**. Disponível em: <http://www.frost.com/prod/servlet/report.Acessado> 14 junho 2017.

GEYER, R., M., T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GONÇALVES, A.; NEVES, R. **“Agregados reciclados”**, Seminário sobre agregados, LNEC, Lisboa, 2003.

GUIMARÃES, J.P.; **Sinergia entre a nanosílica e a sílica ativada na produção de concreto**. IBRACON 56°. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/56cbc/JPauloGuimaraes.pdf>. Acessado 20 março 2017.

HANSEN, T.C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316p. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1992.

JÚNIOR, J. A. F.; **Materiais de Construção (TC-31): Agregados**. 2013. 110p. Setor de Tecnologia. Departamento de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, 2013.

LEAL, U. **Sobras que valem uma obra**. TECHNE: Revista de Tecnologia da Construção, v. 10, n. 55, p. 10-14, 2001.

LEHMANN, S. (2011), ‘ **Resource recovery and materials flow in the city: Zero waste and sustainable consumption as paradigm in urban development** ’, Journal of Green Building , 6 , 88 – 105 . Disponível em: <http://digitalcommons.wcl.american.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1450&context=sdlp>. Acessado 20 abril 2017.

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

LIANG, M.T.; WANG, K.L., LIANG, C.H. **Service Life prediction of reinforced concrete structures.** Cement and Concrete Research , 1990.

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

LINS, F. A. F. Concentração gravítica. In ed. **Tratamento de minérios.** 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004 p.241-267.

LOVATO, P.S. et al. Modeling of Mechanical Properties and Durability of Recycle Aggregate Concretes. **Construction and Building Materials**, 2012.

Lu, W.; Yuan,H.(2011), ‘ **A framework for understanding waste management studies in construction, Waste Management.** Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/8b96/2549ab82d21e75a5febcc621d569da45f452.pdf>. 31 , 1252 – 1260. Acessado em 5 de maio 2017.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. **Tratamento de Minérios – 5ª Edição/Ed. -** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MARINKOVIC, S.; RADONJANIN, V.; MALESEV, M. and IGNJATOVIC, I. **Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, Waste Management**, 2010.

MAYER, F.W. **Fundamentals of potential theory of the jigging process.** In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 7., 1964, Nova York. Anais. Nova York: Part 2, 1964.

MEHTA, P. K.; AİTCIN, P. C. **Principles underlying production for High Strength Performance concrete.** Cement, concrete & aggregates. V.12, n.2, 1990.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 2ª.ed. Ibracon, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994. 573p.

METSO. **Catálogo Nordberg Britadores de Mandíbulas Série C.** Finlândia, 2011. 24p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, c2013.

NEVILLE, A. M.; **Propriedades do concreto**. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OIKONOMOU, N. D. **Recycled concrete aggregates. Concrete & Cement Composites**, 2005.

PACHEGO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y., DE BRITO, J. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. 1a ed. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi. Woodhead Publishing Limited. 2013.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999.

PIOVESAN, A. Z. **Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedades de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco**. 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

REMBISKI, F.D. **Análise de Multimétodo de Percepções de Agentes Intervenientes na Pesquisa e no Gerenciamento de Agregados Reciclados de Resíduos da Construção Civil**, 2012.

RILEM CPC 18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Materials and Structures, v. 21, n. 126, p. 453-455, 1988.

RIO GRANDE DO SUL. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS - RS)**, 2015. Disponível em: <http://www.pers.rs.gov.br/oplano.html>. Acessado março 2017.

ROHDEN, A.B. **Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura**. 2015. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RUBIN, A.P. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra**. 2015. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L.M.M. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora UFRGS 2005.

SANCHEZ, M. (2004) – **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. Tese de Doutorado em Construção, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid.

TAVARES L.M.M. **Apostila Processamento de Recursos Minerais I**, 2009.

TELLES, A. C. S. S. **Operações unitárias I: sistemas particulados** – notas de aula. Disponível em: <<http://www.lscp.pqi.ep.usp.br/disciplinas/pqi2303/arquivos/Apostila%20Particulados%202013.pdf>>. Acesso em: 5 julho 2017.

ULSEN C. **Caracterização Tecnológica de Resíduos de Construção e Demolição**. 2006. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VIEIRA, V.T. **Efeitos do crescimento urbano sobre os canais**. Rio de Janeiro, 2003.

ZHANG, Y.; KONG, X.; **Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types of superplasticizer and their impacts on cement hydration with the absorption in fresh cement pastes**. Cement and Concrete Research, 2015.

ANEXOS

Anexo 1 – Cálculos da ANOVA para as resistências à compressão dos concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Resistência Compressão			Anova: fator único						
Fundo	ARC	AN	RESUMO						
M3	32,4	31	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
M5	26,7	23,1	ARC	3	74,3	24,76666667	76,7633		
M7	15,2	15,9	AN	3	70	23,33333333	57,0433		
			ANOVA						
			<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
			Entre grupos	3,081666667	1	3,081666667	0,04606	0,84056	7,70865
			Dentro dos grupos	267,6133333	4	66,90333333			
			Total	270,695	5				

Anexo 2 – Cálculos da ANOVA para as resistências à compressão dos concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Resistência Compressão			Anova: fator único						
Topo	ARC	AN	RESUMO						
M3	30,8	34	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
M5	21,4	24	ARC	3	66,5	22,1667	68,5033		
M7	14,3	14,8	AN	3	72,8	24,2667	92,2133		
			ANOVA						
			<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
			Entre grupos	6,615	1	6,615	0,08232	0,78843	7,7086474
			Dentro dos grupos	321,4333333	4	80,3583			
			Total	328,0483333	5				

Anexo 3 – Cálculos da ANOVA para o módulo de elasticidade dos concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Módulo de elasticidade			Anova: fator único						
Fundo	ARC	AN	RESUMO						
M3	28,6	30,6	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
M5	26,8	27,4	ARC	3	78,2	26,06666667	8,81333		
M7	22,8	20,1	AN	3	78,1	26,03333333	28,9633		
			ANOVA						
			<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
			Entre grupos	0,001666667	1	0,001666667	8,8E-05	0,993	7,7086474
			Dentro dos grupos	75,55333333	4	18,88833333			
			Total	75,555	5				

Anexo 4 – Cálculos da ANOVA para o módulo de elasticidade dos concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Módulo de elasticidade			Anova: fator único						
Topo	ARC	AN	RESUMO						
M3	24,5	33,6	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
M5	21,2	30,5	ARC	3	65,6	21,8667	5,62333		
M7	19,9	21,7	AN	3	85,8	28,6	38,11		
			ANOVA						
			<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
			Entre grupos	68,00666667	1	68,0067	3,11006	0,153	7,7086474
			Dentro dos grupos	87,46666667	4	21,8667			
			Total	155,4733333	5				

Anexo 5 – Cálculos da ANOVA para o ensaio de absorção dos concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Absorção									
Topo	ARC	AN	Anova: fator único						
M3	2,8	1,8							
M5	3,8	1,8	RESUMO						
M7	4,7	2,7							
			<u>Grupo</u>	<u>Contagem</u>	<u>Soma</u>	<u>Média</u>	<u>Variância</u>		
			ARC	3	11,3	3,76667	0,90333		
			AN	3	6,3	2,1	0,27		
ANOVA									
			<u>Fonte da variação</u>	<u>SQ</u>	<u>gl</u>	<u>MQ</u>	<u>F</u>	<u>valor-P</u>	<u>F crítico</u>
			Entre grupos	4,166666667	1	4,16667	7,10227	0,056	7,7086474
			Dentro dos grupos	2,346666667	4	0,58667			
			Total	6,513333333	5				

Anexo 6 – Cálculos da ANOVA para o ensaio de absorção dos concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Absorção									
Fundo	ARC	AN	Anova: fator único						
M3	2,7	2,3							
M5	2,5	2,1	RESUMO						
M7	2,7	2,1							
			<u>Grupo</u>	<u>Contagem</u>	<u>Soma</u>	<u>Média</u>	<u>Variância</u>		
			ARC	3	7,9	2,633333333	0,01333		
			AN	3	6,5	2,166666667	0,01333		
ANOVA									
			<u>Fonte da variação</u>	<u>SQ</u>	<u>gl</u>	<u>MQ</u>	<u>F</u>	<u>valor-P</u>	<u>F crítico</u>
			Entre grupos	0,326666667	1	0,326666667	24,5	0,008	7,7086474
			Dentro dos grupos	0,053333333	4	0,013333333			
			Total	0,38	5				

Anexo 7 – Cálculos da ANOVA para o ensaio de carbonatação dos concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Carbonatação									
Topo	ARC	AN	Anova: fator único						
M3	63	53							
M5	47	35	RESUMO						
M7	16	23							
			<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
			ARC	3	126	42	571		
			AN	3	111	37	228		
ANOVA									
			<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
			Entre grupos	37,5	1	37,5	0,09387	0,775	7,7086474
			Dentro dos grupos	1598	4	399,5			
			Total	1635,5	5				

Anexo 8 – Cálculos da ANOVA para o ensaio de carbonatação dos concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Carbonatação									
Fundo	ARC	AN	Anova: fator único						
M3	49	49							
M5	42	30	RESUMO						
M7	4	0							
			<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
			ARC	3	95	31,66666667	586,333		
			AN	3	79	26,33333333	610,333		
ANOVA									
			<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
			Entre grupos	42,66666667	1	42,66666667	0,07131	0,803	7,7086474
			Dentro dos grupos	2393,333333	4	598,3333333			
			Total	2436	5				

Anexo 9 – Cálculos da ANOVA para o ensaio de umidade percorrida nos concretos produzidos da camada de Topo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Umidade percorrida - Topo						
		ARC	AN			
	M3	66,6	53,9			
	M3	56,9	61,8			
	M5	84,9	58,9			
	M5	89,7	64			
	M7	97	84,6			
	M7	98	89,9			
Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Coluna 1	6	493,1	82,18333333	283,1336667		
Coluna 2	6	413,1	68,85	217,379		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	533,3333	1	533,3333333	2,131148196	0,175	4,964602744
Dentro dos grupos	2502,563	10	250,2563333			
Total	3035,897	11				

Anexo 10 – Cálculos da ANOVA para o ensaio de umidade percorrida nos concretos produzidos da camada de Fundo, elaborados com agregados reciclados (ARC) e agregados naturais (testemunho).

Umidade percorrida - Fundo						
		ARC	AN			
	M3	66,5	61,6			
	M3	82,2	61,6			
	M5	62,1	53,7			
	M5	66,4	62,8			
	M7	62,7	66,4			
	M7	72,5	81,1			
Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Coluna 1	6	412,4	68,73333333	57,27466667		
Coluna 2	6	387,2	64,53333333	83,10266667		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	52,92	1	52,92	0,753967877	0,406	4,964602744
Dentro dos grupos	701,8867	10	70,18866667			
Total	754,8067	11				