

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

**VIVIANE LOPES GSCHWENTER DOS SANTOS**

**BENEFICIAMENTO EM JIGUE HIDRÁULICO PARA MELHORIA DA QUALIDADE  
DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO (RCD) UTILIZADOS EM CONCRETOS**

**Porto Alegre  
2020**

VIVIANE LOPES GSCHWENTER DOS SANTOS

**BENEFICIAMENTO EM JIGUE HIDRÁULICO PARA MELHORIA DA QUALIDADE  
DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO (RCD) UTILIZADOS EM CONCRETOS**

Tese 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 Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica.

**Orientadora: Profa. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino  
Coorientadora: Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Coorientador: Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós**

**Área de Concentração:  
Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa**

**Porto Alegre  
2020**

VIVIANE LOPES GSCHWENTER DOS SANTOS

**BENEFICIAMENTO EM JIGUE HIDRÁULICO PARA MELHORIA DA QUALIDADE  
DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E  
DEMOLIÇÃO (RCD) UTILIZADOS EM CONCRETOS**

---

**Profa. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino – orientadora**

---

**Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin – coorientadora**

---

**Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós– coorientador**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio**

Polytechnic University of Catalonia Barcelona (BarcelonaTech)

---

**Dr. Gerson Luis Miltzarek**

Laboratório de Processamento Mineral- LAPROM (UFRGS)

---

**Profa. Dra. Mônica Batista Leite**

Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo incentivo e amor incondicional.

Ao meu marido, pelo amor, dedicação, incentivo e orientação.

Agradecimento especial à Professora, orientadora, “chefa” e amiga Rejane, pelo incentivo, paciência, parceria e apoio em todos os momentos.

Agradeço à Professora Denise pelo total apoio, intelectual e prático, e toda dedicação sempre disponibilizada.

Ao Professor Wesley pelas ideias, orientação e todo o apoio durante a realização das “jigagens”.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por toda a minha formação e a oportunidade de aliar trabalho e estudo.

A todos os Professores e Servidores (colegas) do Centro de Tecnologia pelo apoio e convívio durante estes longos 13 anos.

Aos colegas do LEAMET, em especial ao Dr. Pedro e Dr. Régis pelas discussões e conhecimento compartilhado.

Ao LAPROM, em especial ao colega Dr. Gerson, que sempre compartilhou conhecimento e foi incansável no suporte técnico.

Aos amigos do NORIE/LAMTAC, Ari, Adalberto, e em especial ao Airton, pelo companheirismo, paciência, conhecimento compartilhado, suporte técnico e humor inigualável, que fez com que a parte prática se tornasse mais “leve”.

Ao LAFUN, pelo vínculo inicial, por ser meu eterno laboratório no CT. Em especial ao compadre Regis por ser responsável pelo início desta saga.

Um agradecimento *in memoriam* ao meu eterno orientador, Prof. Dr. Jaime Spim Jr. por toda dedicação, conhecimento repassado e apoio durante nossa convivência.

Também *in memoriam* agradecimento ao meu colega Mestre Michel, pela parceria, pela amizade e por todo suporte sempre dedicado a mim, com humor e alegria inabaláveis. Nesta vida, fiquei em dívida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M, pela oportunidade e formação, e à CAPES, pelo apoio financeiro a este programa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo suporte financeiro nos primeiros meses de doutorado antes de ingressar na carreira de servidora pública.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho, meu muito obrigada!

## RESUMO

O interesse na utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) na confecção de concretos tem aumentado nos últimos anos, porém a variedade de materiais que compõe o resíduo acaba por inviabilizar seu uso em condições normais. Assim, o objetivo do presente trabalho foi propor a utilização de diferentes rotas de beneficiamento em jigue hidráulico para separação de agregados graúdos de RCD, visando definir a rota mais adequada para obtenção de agregados com potencial de utilização na produção de concretos estruturais. Para tanto, foi confeccionado um agregado que simula a composição do RCD brasileiro contendo cerâmicos de alta resistência (~7 MPa) e de baixa resistência (~2 MPa), concretos convencionais (~50 MPa) e de baixa resistência (~15 MPa) e argamassa (~7 MPa). O processo de beneficiamento proposto foi realizado de duas formas diferentes, para fins de comparação de desempenho. Assim, o agregado composto de partes iguais de material cerâmico, concreto e argamassa foi submetido a um estágio único de jigagem, denominado Rota 1, e a um estágio com duas passagens pelo jigue, denominado Rota 2. Os agregados beneficiados foram avaliados em relação as suas propriedades físicas, e então utilizados na confecção de concretos, em que foram analisados nos estados fresco e endurecido. Os resultados obtidos mostraram que os concretos de baixa e de alta resistência se destacaram em relação às propriedades físicas. Quando comparadas as duas rotas de beneficiamento, verificou-se que as melhores características dos agregados beneficiados e dos concretos foram obtidas para a Rota 2, com destaque para os agregados concentrados (AR-C2 e AR-M2), que apresentaram resultados de beneficiamento superiores em recuperação de materiais de maior densidade (agregados de concreto) com 99,7% e 91,4%, respectivamente. Para os concretos confeccionados com agregados beneficiados das Rotas 1 e 2, quando comparados aos concretos referências no estado fresco e endurecido, pode-se afirmar que o melhor desempenho foi obtido para o concreto RCD agregado beneficiado concentrado (CRCD-C2), em função das relações água/cimento ( $a/c$ ), massas específicas, resistências à compressão e módulo de elasticidade. Desta forma, conclui-se que a rota de beneficiamento mais adequada foi observada para a Rota 2, obtendo-se um agregado concentrado com propriedades semelhantes ao agregado natural (AN-B) e um concreto com propriedades próximas ao concreto referência (CR-B), e que podem ser utilizados em função estrutural.

**Palavras-chave:** Beneficiamento, Jigue Hidráulico, Concreto, Resíduo, RCD, Resistência à Compressão.

## ABSTRACT

The interest in the use of construction and demolition wastes (CDW) in the production of concretes has increased in the last years, however the variability of the composition leads to restrictions of use under normal conditions. The objective of the present work is to purpose the use of different processing routes utilizing the hydraulic jig for separation of recycled coarse aggregates from CDW, aiming to define the most suitable ways to obtain recycled coarse aggregates with potential for using in structural concretes. For that, an aggregate that simulates the composition of a Brazilian CDW was confectioned by comminution of high strength (~7MPa) and low strength (~2MPa) ceramics, conventional (~50MPa) and low strength (~15MPa) concretes, and mortar (~7MPa). The proposed processing procedure was carried out in two different ways, with a view to comparing their performances. The aggregate composed of equal parts of ceramic, concrete and mortar was submitted to a single stage of jiggling, called Route 1, and to a double stage by two passages through the jig, called Route 2. The benefited aggregates were evaluated in relation to their physical properties, and then used to obtain concretes, which were analyzed in the fresh and hardened conditions. The obtained results showed that the high and low strength concretes exhibited the best physical properties among the investigated aggregates. When comparing the two processing routes, it was observed that the most promising characteristics for the aggregates were obtained in Route 2, specially for the concentrate aggregate (AR-C2 and AR-M2), which presented superior results in relation to the dense material recuperation (concrete concentration) of 99.7 and 91.4%, respectively. When compared the concretes confectioned using recycled aggregates from Routes 1 and 2, it was shown that the best performance was achieved for the CRCD-C2 (AR-C2 concrete) aggregate due to the w/c ratio, specific mass, compressive strength and Elastic modulus. Therefore, the most suitable processing route was observed in Route 2, allowing to obtain a concentrated aggregate with properties similar to those presented by natural aggregate (AN-B), and concretes presenting properties close to the reference concrete (CR-B) and suitable for use in structural functions.

Keywords: Recycling, Water Jig, Concrete, Waste, CDW, Compressive Strength

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. Composição do RCD no estado do Rio Grande do Sul em 2014.	30
FIGURA 2. Percentual de geração de RCD por tipo de gerador, em Guarulhos -SP.	32
FIGURA 3. Produção de agregados reciclados no município de Guarulhos do ano de 2017.	37
FIGURA 4. Movimento dos blocos durante a fragmentação no britador de mandíbulas.	39
FIGURA 5. Esquema do britador de impacto.	39
FIGURA 6. Principais causas de dificuldade na venda de agregado reciclado.	41
FIGURA 7. Formas da partícula do agregado reciclado de concreto.	44
FIGURA 8. Absorção de água em concretos com diferentes relações a/c onde (a) Relação massa específica agregado reciclado e absorção concreto e (b) Relação variação do tipo de agregado e absorção do concreto.	47
FIGURA 9. Influência da variação da massa específica do agregado reciclado sobre a resistência à compressão do concreto.	47
FIGURA 10. Agregado reciclado de concreto com argamassa aderida.	49
FIGURA 11. Esquema da formação da macroestrutura do agregado reciclado de concreto e suas zonas de transição.	50
FIGURA 12. Variação do teor de argamassa aderida e taxa de absorção dos concretos.	51
FIGURA 13. Variação do abatimento (mm) em relação ao teor de substituição onde a) areia reciclada e (b) agregado graúdo reciclado.	54
FIGURA 14. Efeito combinado da variação da relação a/c e teor de substituição dos agregados miúdo (AMR) e graúdos (AGR) reciclados na massa específica do estado fresco.	56
FIGURA 15. Variação da resistência à compressão em função do teor de substituição em diversos estudos.	57
FIGURA 16: Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.	59
FIGURA 17. Variação do módulo de elasticidade em função do teor de substituição de agregados reciclados.	61

FIGURA 18. Variação da intensidade de ligante (IL) em função da resistência à compressão para concretos reciclados com diferentes teores de agregados graúdos reciclados.	62
FIGURA 19. Mecanismo do processo de jigagem.	64
FIGURA 20. Elementos básicos do equipamento jigue.	64
FIGURA 21: Equipamento Jigue a seco – equipamento industrial.	65
FIGURA 22: Equipamento Jigue à água – equipamento industrial.	66
FIGURA 23: Equipamento Jigue à água – escala laboratorial.	67
FIGURA 24: Fluxograma resumido das etapas do procedimento experimental.	74
FIGURA 25: Detalhe e dimensões do bloco cerâmico de baixa resistência - não estrutural.	76
FIGURA 26: Detalhe e dimensões do bloco cerâmico de alta resistência - estrutural.	77
FIGURA 27: Ensaio massa unitária agregados graúdos – detalhe recipiente e pesagem- (a)recipiente com agregado reciclado e (b) pesagem do recipiente com agregado reciclado.	81
FIGURA 28: Ensaio massa específica agregados reciclados onde (a) se tem a pesagem do material, em (b) a aplicação de vácuo no conjunto e em (c) a pesagem do recipiente + água + placa de vidro.	82
FIGURA 29: Picnômetro.	83
FIGURA 30: Aparato porta amostra.	84
FIGURA 31: Estrutura para ensaio de absorção.	85
FIGURA 32: Preenchimento do porta-amostra onde (a) 3cm do fundo da peneira, (b) 1cm a partir dos agregados, (c) agregados preenchendo até 3cm de altura e (d) aparato/peneira imerso em água.	86
FIGURA 33: Preenchimento da composição inicial da primeira fase da Rota de jigagem.	88
FIGURA 34: Preenchimento do volume das gavetas onde (a) preenchimento da gaveta e (b) pesagem do material de uma gaveta	88
FIGURA 35: Esquema do procedimento operacional da Rota 1	90
FIGURA 36: Esquema do procedimento operacional da Rota 2	91
FIGURA 37: Detalhe do equipamento da ALLMINERAL AllJig® S-400.	92
FIGURA 38: Tipos de concretos	96

FIGURA 39: Curvas de distribuição granulométrica dos AR, AN-B, AR-C0 e limites da norma NBR 7.211 (ABNT, 2019c).	102
FIGURA 40: Taxa de absorção dos agregados reciclados: AR-A, AR-CEA, AR-CEB, AR-CC, AR-CCB e AR-C0.	106
FIGURA 41: Rota 1 – representação esquemática do processo.	111
FIGURA 42: Rota 1 – composição inicial – AR-C0- antes do início da jigagem.	111
FIGURA 43: Rota 1 – detalhe da composição das gavetas pós jigagem.	112
FIGURA 44: Rota 1 - detalhe dos agregados beneficiados: (a) bandeja meio e superior – AR-R1 e (b) bandeja inferior -AR-C1.	112
FIGURA 45: Fração de materiais dos AR da Rota 1 – AR-C0, AR-R1 e AR-C1.	114
FIGURA 46: Curvas de distribuição granulométrica – AR-C0, AR-R1, AR-C0 e AN-B	116
FIGURA 47: Comparativo da taxa de absorção dos agregados beneficiados na Rota 1, AR-C0 e AN-B.	117
FIGURA 48: Taxa de absorção – AR-C0, AR-R1 e AR-C1.	118
FIGURA 49: Rota 2 – representação esquemática do processo.	121
FIGURA 50: Vista frontal do equipamento pós segundo estágio de jigagem – detalhe da estratificação das gavetas.	122
FIGURA 51: Rota 2 - detalhe dos agregados beneficiados no segundo estágio onde (a) AR-T2, (b) AR-M2 e (c) AR-C2.	122
FIGURA 52: Fração de materiais dos AR da Rota 2 – AR-C0, AR-T2, AR-M2 e AR-C2	123
FIGURA 53: Curvas de distribuição granulométrica – AR-C0, AR-T2, AR-M2, AR-C2 e AN-B.	126
FIGURA 54: Comparativo da taxa de absorção dos agregados beneficiados na Rota 2, AR-C0 e AN-B.	127
FIGURA 55: Comparativo da taxa de absorção dos agregados beneficiados na Rota 2, AR-C0 e AN-B.	127
FIGURA 56: Gráfico dosagem CR-B.	131
FIGURA 57: Gráfico dosagem CR.	134
FIGURA 58: Gráfico dosagem CRCD.	137
FIGURA 59: Efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão – Rota 1.	144

FIGURA 60: Efeito isolado da distribuição granulométrica no módulo de elasticidade– Rota 1.	145
FIGURA 61: Efeito isolado do traço na resistência à compressão – Rota 1.	146
FIGURA 62: Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade – Rota 1.	147
FIGURA 63: Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão – Rota 1.	148
FIGURA 64: Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade – Rota 1.	149
FIGURA 65: Interação entre traço e tipo de beneficiamento na resistência à compressão– Rota 1.	151
FIGURA 66: Interação entre traço e tipo de beneficiamento no módulo de elasticidade – Rota 1.	151
FIGURA 67: Intensidade de ligante em relação e consumo de cimento em relação a resistência à compressão dos CR e CRCD da Rota 1.	152
FIGURA 68: Efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão – Rota 2.	154
FIGURA 69: Efeito isolado da distribuição granulométrica no módulo de elasticidade– Rota 2.	154
FIGURA 70: Efeito isolado do traço na resistência à compressão– Rota 2.	155
FIGURA 71: Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade– Rota 2.	156
FIGURA 72: Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão – Rota 2.	157
FIGURA 73: Interação entre traço e tipo de beneficiamento na resistência à compressão– Rota 2.	159
FIGURA 74: Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade – Rota 2.	160
FIGURA 75: Interação entre traço e tipo de beneficiamento no módulo de elasticidade– Rota 2.	161
FIGURA 76. Intensidade de ligante em relação a resistência à compressão dos CR e CRCD da Rota 2	162
FIGURA 77: Propriedades físicas e composições de agregados RCD e AR-N e Resistencia à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.	164

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Estimativa de geração de RCD em alguns países em 2014.	29
TABELA 2. Percentual da composição do RCD por município (continua).	33
TABELA 3. Traço e propriedades da argamassa.	76
TABELA 4. Traço e propriedades do concreto convencional.	77
TABELA 5. Traço e propriedades do concreto de baixa resistência.	78
TABELA 6. Quantidade de material, em massa, selecionado para cada ensaio (jigagem).	89
TABELA 7. Quantidade de material em massa e em % de massa.	89
TABELA 8. Teor de argamassa, traço em massa e quantidade de cimento e areia por traço de concreto para uma mistura de 20kg de brita.	97
TABELA 9. Módulo de Finura e Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados reciclados e da brita basáltica.	103
TABELA 10. Resultado do teor de absorção dos AR, AN-B, AR-C0 e respectivos resultados da literatura.	104
TABELA 11. Massa específica, massa unitária e índice de forma dos agregados reciclados e da brita basáltica.	106
TABELA 12. Critério de Concentração das interações entre tipos de agregados graúdos reciclados.	109
TABELA 13. Módulo de Finura e Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados beneficiados, AR-C0 e AN-B.	116
TABELA 14. Massa específica, massa unitária, índice de volume de vazios e índice de forma dos	119
TABELA 15. Módulo de Finura e Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados beneficiados da Rota 2, AR-C0 e AN-B.	126
TABELA 16. Massa específica, massa unitária e índice de forma dos agregados beneficiados da Rota 2, AR-C0 e AN-B.	128
TABELA 17. Dados de dosagem para o concreto referência brita basáltica.	130
TABELA 18. Dados de dosagem Concretos referência	132
TABELA 19. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão – concretos de referência – CR.	133

TABELA 20. Equações de regressão das curvas do diagrama de dosagem- Concretos referência.	135
TABELA 21. Dados de dosagem Concretos RCD (continua).	135
TABELA 22. Equações de regressão das curvas do diagrama de dosagem- Concretos RCD.	138
TABELA 23. Equações de regressão das curvas do diagrama de dosagem- Concretos RCD.	138
TABELA 24. Relação a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) de cada traço dos concretos da Rota 1, CR-B, CR-C0 e CRCD-C0.	140
TABELA 25. Análise de variância (ANOVA) dos CR e CRCD nas relações a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) Rota 1.	140
TABELA 26. Relação a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) de cada traço dos concretos da Rota 2, CR-B, CR-C0 e CRCD-C0.	141
TABELA 27. Análise de variância (ANOVA) dos CR e CRCD nas relações a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) Rota 2.	142
TABELA 28. Resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos referentes à Rota 1 (continua).	143
TABELA 28. Resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos referentes à Rota 1 (conclusão).	144
TABELA 29. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 1.	145
TABELA 30. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado do traço na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 1.	147
TABELA 31. Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão – Rota 1 – ANOVA e Teste de TUKEY.	149
TABELA 32. Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade– Rota 1 – ANOVA e Teste de TUKEY.	150
TABELA 33. Resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos referentes à	153
TABELA 34. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 2.	155

TABELA 35. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado do traço na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 2 (continua)	156
TABELA 36. Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão– Rota 2 – ANOVA e Teste de TUKEY.	158
TABELA 37. Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade– Rota 2 – ANOVA e Teste de TUKEY (continua).	160

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. Classificação dos resíduos de construção e demolição (RCD) (continua).	25
QUADRO 2. Leis, resoluções e decretos – Brasil (continua).	26
QUADRO 3. Leis, resoluções e decretos – Rio Grande do Sul.	27
QUADRO 4. Leis, resoluções e decretos - Porto Alegre.	27
QUADRO 5. Normas técnicas brasileiras associadas a resíduos sólidos e RCC.	28
QUADRO 6. Pesquisas científicas brasileiras no tema de agregados reciclados (continua).	35
QUADRO 7. Principais normas e guias recomendados em alguns países.	42
QUADRO 8. Classificação da forma de partículas do agregado.	44
QUADRO 9. Pesquisas utilizando jigues no processo de beneficiamento em RCD (continua).	72
QUADRO 9. Pesquisas utilizando jigues no processo de beneficiamento em RCD (conclusão).	73
QUADRO 10. Aspecto dos agregados após o processo de britagem.	79

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição.
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção.
AN-B	Agregado Natural Brita Basáltica
AR	Agregado Reciclado
AR-A	Agregado Reciclado de Argamassa
AR- CEA	Agregado Reciclado de Cerâmico de Alta Resistência
AR- CEB	Agregado Reciclado de Cerâmico de Baixa Resistência
AR-CC	Agregado Reciclado de Concreto Convencional
AR-COB	Agregado Reciclado de Concreto de Baixa Resistência
AR- C0	Agregado Reciclado Beneficiado Composição Inicial
AR- C1	Agregado Reciclado Beneficiado Concentrado C1
AR- C2	Agregado Reciclado Beneficiado Concentrado C2
AR- R1	Agregado Reciclado Beneficiado Resíduo C1
AR- T2	Agregado Reciclado Beneficiado Topo C2
AR- M2	Agregado Reciclado Beneficiado Meio C2
ARC	Agregado Reciclado de Concreto.
ARM	Agregado Reciclado Misto.
AMR	Agregado Médio Reciclado.
AGR	Agregado Graúdo Reciclado.
a/c	Relação Água/Cimento.
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente.
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente.
CP I	Cimento Portland Comum.
CP II – E	Cimento Portland Composto com Escória.
CP II – Z	Cimento Portland Composto com Pozolana.
CP III	Cimento Portland de Alto Forno.
CP IV	Cimento Portland Pozolânico.

CP V- ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.
CR	Concreto Referência
CR-B	Concreto Referência Brita Basáltica
CR-C1	Concreto Referência Concentrado C1
CR-C2	Concreto Referência Concentrado C2
CR-M2	Concreto Referência Meio C2
CR-T2	Concreto Referência Topo C2
CR-R1	Concreto Referência Resíduo C1
CRCD	Concreto Resíduo de Construção e Demolição
CRCD-C1	Concreto Resíduo de Construção e Demolição Agregado Beneficiado Concentrado C1
CRCD-C2	Concreto Resíduo de Construção e Demolição Agregado Beneficiado Concentrado C2
CRCD-M2	Concreto Resíduo de Construção e Demolição Agregado Beneficiado Meio C2
CRCD-T2	Concreto Resíduo de Construção e Demolição Agregado Beneficiado Topo C2
CRCD-R1	Concreto Resíduo de Construção e Demolição Agregado Beneficiado Resíduo C1
DMLU	Departamento Municipal de Limpeza Urbana.
fc	Resistência Característica à Compressão.
fcj	Resistência Característica à Compressão em j Dias.
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
MPa	Mega Pascal.
NBR	Norma Brasileira.
NM	Norma Mercosul.
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos.
PEV	Ponto de Entrega Voluntária.
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos.
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos.
RCD	Resíduo de Construção e Demolição.
RAG	Agregado Reciclado Graúdo de Argamassa.

RAM	Agregado Reciclado Miúdo de Argamassa.
RAC	<i>Recycled Aggregate Concrete.</i>
RCC	Resíduo de Construção Civil.
RCG	Agregado Reciclado Graúdo de Concreto.
RCM	Agregado Reciclado Miúdo de Concreto.
RVG	Agregado Reciclado Graúdo de Cerâmica.
RVM	Agregado Reciclado Miúdo de Cerâmica.
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente.
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária.
UDC	Unidade de Destino Certo.
R <sup>2</sup> ou r <sup>2</sup>	Correlação.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1. OBJETIVOS .....	20
1.1.1. Objetivo Geral .....	20
1.1.2. Objetivos Específicos.....	21
1.2. ESTRUTURA DA PESQUISA .....	21
1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	22
1.4. INEDITISMO .....	22
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1. DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO .....	23
2.1.1. Aspectos Legais e Normativos.....	26
2.2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) .....	28
2.2.1. Panorama Atual .....	28
2.2.2. Composição .....	31
2.2.3. Possibilidades de Reaproveitamento .....	33
2.3. AGREGADOS RECICLADOS .....	37
2.3.1. Beneficiamento .....	38
2.3.2. Controle da Variabilidade na Composição .....	40
2.3.3. Aspectos Legais e Normativos.....	41
2.3.4. Propriedades.....	43
2.3.4.1. Granulometria .....	43
2.3.4.2. Forma .....	43
2.3.4.3. Massa Unitária e Massa Específica .....	46
2.3.4.4. Absorção.....	48
2.4. CONCRETO COM AGREGADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	52
2.4.1. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado Fresco	
53	
2.4.2. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado	
Endurecido 56	
2.5. BENEFICIAMENTO EM JIGUES .....	63
2.5.1. Jigagem .....	63
a) Jigue a seco industrial .....	65
b) Jigue à água industrial .....	66

c) Jigue à água laboratorial.....	67
2.5.2. Critério de Concentração .....	67
2.5.3. Estado da Arte do Beneficiamento de RCD em Jigues.....	68
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>74</b>
3.1. ETAPA 1: AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	
75	
3.1.1. Obtenção das Matérias-Primas.....	75
3.1.1.1. Argamassa.....	75
3.1.1.2. Material Cerâmico de Baixa Resistência .....	76
3.1.1.3. Material Cerâmico de Alta Resistência .....	76
3.1.1.4. Concreto Convencional.....	77
3.1.1.5. Concreto de Baixa Resistência.....	78
3.1.2. Cominuição e Peneiramento.....	78
3.1.3. Caracterização: Propriedades Físicas dos Agregados Reciclados.....	79
3.1.3.1. Quarteamento .....	80
3.1.3.2. Distribuição Granulométrica.....	80
3.1.3.3. Índice de Forma .....	80
3.1.3.4. Massa Unitária.....	80
3.1.3.5. Massa Específica.....	81
3.1.3.6. Índice de Volume de Vazios.....	83
3.1.3.7. Absorção.....	83
3.1.3.8. Critério de Concentração .....	87
3.1.4. Composição Inicial para Jigagem – CR- C0 .....	87
3.2. ETAPA 2: ROTAS DE BENEFICIAMENTO .....	90
3.2.1. Rota 1 .....	90
3.2.2. Rota 2 .....	91
3.2.3. Parâmetros de Jigagem .....	92
3.2.4. Agregados Reciclados – Caracterização das Propriedades Físicas Pós	
Jigagem	94
3.2.4.1. Caracterização da Composição .....	94
3.3. ETAPA 3: CONCRETOS.....	94
3.3.1. Produção dos Concretos .....	94
3.3.2. Propriedades no Estado Fresco.....	98

3.3.2.1.	Trabalhabilidade .....	98
3.3.2.2.	Massa Específica.....	98
3.3.3.	Propriedades no Estado Endurecido .....	99
3.3.3.1.	Resistência à Compressão Axial .....	99
3.3.3.2.	Módulo de Elasticidade .....	99
3.3.3.3.	Intensidade de Ligante.....	100
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>101</b>
4.1.	ETAPA 1: AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	
	101	
4.1.1.	Caracterização das Propriedades Físicas dos Agregados -Natural, Reciclados e Composição Inicial.....	101
4.1.2.	Critério de Concentração .....	109
4.2.	ETAPA 2: ROTAS DE BENEFICIAMENTO .....	110
4.2.1.	Rota 1 .....	110
4.2.1.1	Composição – Fração de materiais .....	113
4.2.1.2	Distribuição granulométrica .....	115
4.2.1.3	Absorção.....	117
4.2.1.4	Massa específica, Unitária, Índice de Volume de Vazios e Índice de forma	118
4.2.2.	Rota 2 .....	120
4.2.2.1	Composição – Fração de materiais. ....	123
4.2.2.2	Distribuição granulométrica .....	125
4.2.2.3	Absorção.....	126
4.2.2.4	Massa específica, Unitária, Índice de volume de vazios e Índice de forma	128
4.3.	ETAPA 3: CONCRETOS.....	129
4.3.1.	Produção dos Concretos Referência (CR) e de RCD (CRCD) .....	129
4.3.2.	Concretos - Propriedades no Estado Fresco .....	139
4.3.2.1.	Rota 1 .....	139
4.3.2.2.	Rota 2 .....	141
4.3.3.	Concretos - Propriedades no Estado Endurecido .....	143
4.3.3.1.	Rota 1 .....	143
4.3.3.2.	Rota 2 .....	152

4.4. CORRELAÇÕES FINAIS ROTA 1 E 2.....	163
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>166</b>
<b>6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>168</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>169</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>191</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>193</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>200</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>202</b>
<b>PUBLICAÇÕES RELATIVAS À TESE.....</b>	<b>204</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O setor de construção civil é responsável por ser grande consumidor de recursos naturais e também por ser uma grande fonte de geração de resíduos.

De acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2016), o segmento da reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD) é um mercado desenvolvido em muitos países da Europa, em grande parte pela escassez de recursos naturais que aqueles países têm, porém, no Brasil, este mercado ainda é incipiente. Visando à redução dos impactos ambientais ocasionados por descartes inadequados, diversos estudos são relatados na literatura nacional e internacional apontando diferentes usos para o material reaproveitado, sendo que o mais comum e recorrente uso aponta para a utilização dos resíduos de construção cominuídos, substituindo os agregados em concretos (PINTO, 1986; ANGULO 2000, 2005; LEITE, 2001; JUAN; GUTIERREZ, 2009; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013; OMARY; GHORBEL; WARDEH, 2016; KISKU *et al.*, 2017; BAI *et al.*, 2020; MISTRI *et al.*, 2020; entre outros) e tornando-se uma alternativa viável uma vez que se pode gerar produtos com características muito semelhantes aos materiais originais. No Brasil, a norma técnica NBR 15.116 (ABNT, 2004f) trata especificamente da utilização dos agregados reciclados em camadas de pavimentação e em preparo de concretos sem função estrutural, e define que os materiais que poderão dar origem aos agregados são: materiais cerâmicos, tijolos, azulejos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa, concretos e solos resultantes de obras de terraplanagem. Em função da variabilidade do material de origem para confecção dos agregados de RCD, suas características físicas serão alteradas e estarão vinculadas à composição do material predominante, podendo assim afetar diretamente as propriedades mecânicas dos concretos produzidos. Uma vez que a variabilidade da composição dos resíduos da construção civil (concreto, argamassa e cerâmicos) interfere nas propriedades físicas dos agregados fabricados com estes materiais, torna-se fundamental o estudo de metodologias eficientes de separação desses componentes de modo a facilitar um eficaz controle de qualidade do produto final (MIRANDA, 2005; MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013, SILVA, BRITO; DHIR, 2014; RANGEL *et al.*, 2019).

Neste contexto de necessidade de beneficiamento de agregados de RCD para utilização em concretos, nos quais é rígido o controle de qualidade em relação às propriedades mecânicas, integra-se a utilização de conceitos e técnicas oriundos do processamento mineral para que explorem a diferença de densidade entre partículas para fins de separação. Diversos autores (XING, 2004; CAZACLIU *et al.*, 2014; SAMPAIO *et al.*, 2016; AMBRÓS *et al.*, 2017; PETICILA *et al.*, 2017; CUNHA, 2017; KHOURY *et al.*, 2018; HU *et al.*, 2019; SAMPAIO *et al.*, 2020; WASKOW, 2020) têm tratado o problema de separação e controle de qualidade de agregados de RCD para concreto como um problema típico de tratamento de minérios, utilizando assim equipamentos tais como os jigues para beneficiamento destes materiais. Em particular, a jigagem a seco tem sido objeto de vários estudos recentes voltados à separação de RCD (AMBRÓS *et al.*, 2017; AMBRÓS *et al.*, 2019; CAZACLIU *et al.*, 2014; HU *et al.*, 2019; PETICILA *et al.*, 2017; KHOURY *et al.*, 2018; SAMPAIO *et al.*, 2016; XING, 2004; XING; HENDRIKS, 2006). Entretanto, verifica-se que os agregados de RCD concentrados no final do processo de jigagem a seco geralmente apresentam propriedades que não atendem aos padrões de qualidade para substituição de agregados graúdos naturais em concretos. Por outro lado, estudos já comprovam que a utilização de jigue hidráulico apresenta resultados melhores de separação de agregados de RCD quando comparado ao jigue a seco (CUNHA, 2017; PETICILA *et al.*, 2017).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe avaliar uma alternativa de beneficiamento na qual o agregado de RCD é submetido a diferentes estágios de beneficiamento em jigue hidráulico, de modo a melhorar a qualidade do concentrado obtido.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo foi investigar a rota de separação por jigagem hidráulica mais adequada para obtenção de agregados graúdos reciclados de RCD a serem aplicados na produção de concretos estruturais.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral deste estudo, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar duas rotas de separação do RCD por jigagem hidráulica: Rota 1 – jigagem única; Rota 2 - jigagem dupla;
- b) determinar as alterações nas propriedades físicas (índice de forma, índice de volume de vazios, massas específica e unitária, absorção e distribuição granulométrica) dos agregados graúdos reciclados antes e após beneficiamento (concentrados) nas duas rotas propostas;
- c) verificar a influência da composição dos concentrados nas propriedades do concreto no estado fresco (massa específica) e no estado endurecido (resistência à compressão e módulo de elasticidade).

## 1.2. ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente tese está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1. Introdução são apresentadas as considerações iniciais sobre o tema da pesquisa, justificativa da escolha, objetivos, delimitações e ineditismo do trabalho. O Capítulo 2. Revisão Bibliográfica apresenta as pesquisas relacionadas ao assunto e temas considerados relevantes para a contextualização, desenvolvimento e execução da pesquisa. No Capítulo 3. Procedimento Experimental é detalhada a proposta de metodologia experimental aplicada no decorrer do trabalho. O Capítulo 4. Resultados e Discussões apresenta os resultados e suas discussões. O Capítulo 5. Conclusões compõe o quinto e último capítulo. Nos APÊNDICES A e B e nos ANEXOS A e B constam documentos complementares e tabela de dados. No item Publicações relativas à tese estão relacionadas as publicações com resultados parciais da tese.

### 1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho delimita-se ao estudo de agregados graúdos reciclados, compostos de concreto, argamassa e blocos cerâmicos, com propriedades e proporções conhecidas, beneficiados em jigue hidráulico através de duas rotas de beneficiamento. A verificação da influência deste método de beneficiamento se dá por meio da avaliação das propriedades físicas das diferentes composições de agregados, bem como, das propriedades dos concretos com eles produzidos, de modo a possibilitar sua especificação para concretos estruturais. Não são considerados a eficiência do processo de beneficiamento nem os consumos energéticos.

### 1.4. INEDITISMO

O ineditismo do presente trabalho incide na utilização do beneficiamento de RCD com o uso de jigue hidráulico, utilizando a metodologia de separação em múltiplos estágios (rotas). Neste processo, os produtos de jigagem passam por etapas adicionais de separação a fim de garantir uma maior pureza e/ou recuperação dos agregados de maior densidade. Deste modo, visa-se a melhoria das propriedades físicas (índice de forma, índice de volume de vazios, massa específica e unitária, absorção e distribuição granulométrica) dos agregados beneficiados de modo a otimizar e controlar as propriedades dos concretos no estado fresco (abatimento e massa específica) e endurecido (resistência à compressão e módulo de elasticidade). A literatura é escassa neste tema e os principais trabalhos abordam a utilização de rotas convencionais de processamento (em um único estágio), o que não garante a obtenção de propriedades mínimas requeridas para confecção de concretos estruturais.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e as Leis Federais, Estaduais e Municipais estabelecem conceitos, diretrizes e regulamentações em relação aos resíduos sólidos, cujos principais aspectos relacionados aos resíduos de construção e demolição (RCD) serão apresentados na sequência.

### 2.1. DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO

A NBR 10.004 (ABNT, 2004a) define resíduo sólido como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a).

A mesma norma classifica os resíduos sólidos de acordo com a sua periculosidade:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos; – resíduos classe II A – Não inertes. – Resíduos classe II B – Inertes.

Em 2 de agosto de 2010 foi aprovada a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010b), tendo por finalidade promover a destinação correta de todo tipo de resíduo, por meio da responsabilidade compartilhada dos diferentes agentes envolvidos na cadeia produtiva, abrangendo fabricantes, comerciantes, distribuidores, consumidores e responsáveis pelos serviços públicos de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos. De acordo com seu Artigo 13º, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I – quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas a e b; d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas b, e, g, h e j;
- d) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea c;
- e) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- f) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- g) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- h) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- i) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- j) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II – quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea a (BRASIL, 2010b).

Normalmente os resíduos da construção e demolição (RCD) estão enquadrados, conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), na classe II B. Entretanto, a presença de tintas, solventes, óleos e outros derivados pode mudar a classificação do RCD para classe I ou classe II A. De acordo com a Lei 12.305 (BRASIL, 2010b), estes resíduos são classificados como Resíduos de Construção Civil e podem ser enquadrados como Perigosos e Não Perigosos.

Com o conhecimento de que a disposição de RCD em locais impróprios contribui para a degradação da qualidade ambiental – entre outras questões ecológicas, sociais e de educação – o CONAMA implementou a Resolução nº 307

(BRASIL, 2002) alterada pelas resoluções nº 448 de 2012 (BRASIL, 2012a) e nº 469 de 2015 (BRASIL, 2015), visando dispor sobre a gestão dos resíduos da construção civil, os quais são definidos em seu Artigo 2º, como:

Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (BRASIL, 2002).

Para efeito desta resolução, conforme Artigo 3º, os RCD são classificados nas classes A, B, C e D, de acordo com o Quadro 1. O CONAMA indica em seu Artigo 10º que os RCD de Classe A devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura. Porém, se tratando dos resíduos das Classes B, C e D, a resolução não especifica formas de reciclagem ou reutilização para cada tipo de resíduo, apenas indica que devem ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

QUADRO 1. Classificação dos resíduos de construção e demolição (RCD) (continua).

<b>Classificação</b>	<b>Definição</b>	<b>Resíduos</b>
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura.	a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Quadro 1. Classificação dos resíduos de construção e demolição (RCD) (conclusão)

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

Fonte: Adaptado de CONAMA (BRASIL, 2002; BRASIL, 2012a; BRASIL, 2015).

### 2.1.1. Aspectos Legais e Normativos

Os RCD estão sujeitos à legislação federal, estadual e municipal, e também devem atender às normas técnicas brasileiras. A seguir são apresentadas as leis, resoluções e normas de acordo com o âmbito a qual pertencem. O Quadro 2 apresenta a compilação das leis, resoluções e decretos em âmbito federal. Neste âmbito, destacam-se a Resolução CONAMA nº. 307 (BRASIL, 2002)., a Lei nº. 12.305 (BRASIL, 2010b) e o Decreto nº. 7.404 (BRASIL, 2010a), cujas descrições são apresentadas a seguir.

QUADRO 2. Leis, resoluções e decretos – Brasil (continua).

Leis, resoluções e decretos	Descrição
Resolução CONAMA nº. 307 de 2002 (BRASIL, 2002). Resolução CONAMA nº. 448 de 2012 (BRASIL, 2012a). Resolução CONAMA nº. 469 de 2002 (BRASIL, 2015).	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

QUADRO 2. Leis, resoluções e decretos – Brasil (conclusão).

Lei nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010b).	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Decreto nº 7.404, de 2010 (BRASIL, 2010a).	Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de resíduos sólidos e o Comitê orientador para implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.

Fonte: Adaptado de Fernandez (2012).

O Quadro 3 apresenta a compilação das leis, resoluções e decretos no âmbito do estado do Rio Grande do Sul.

QUADRO 3. Leis, resoluções e decretos – Rio Grande do Sul.

<b>Normas</b>	<b>Descrição</b>
Resolução CONSEMA nº. 109/2005 (RIO GRANDE DO SUL, 2005).	Diretrizes para elaboração do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, a ser elaborado pelos Municípios.
Lei nº 14.528, de 2014 (RIO GRANDE DO SUL, 2014).	Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) e dá outras providências.

Fonte: a autora, 2020

O Quadro 4 apresenta a compilação das leis, resoluções e decretos em âmbito da cidade de Porto Alegre.

QUADRO 4. Leis, resoluções e decretos - Porto Alegre.

<b>Norma</b>	<b>Descrição</b>
Lei Nº 10.847, de 2010 (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2010)	Institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do Município de Porto Alegre, estabelece as diretrizes, os critérios e os procedimentos para a gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCCs) e dá outras providências.

Fonte: a autora, 2020

O Quadro 5 apresenta a compilação das principais normas técnicas vigentes no Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

QUADRO 5. Normas técnicas brasileiras associadas a resíduos sólidos e RCC.

<b>Norma</b>	<b>Descrição</b>
NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004a)	Resíduos Sólidos (classificação).
NBR 15.112:2004 (ABNT, 2004b)	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.113:2004 (ABNT, 2004c)	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.114:2004 (ABNT, 2004d)	Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.115:2004 (ABNT, 2004e)	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
NBR 15.116:2004 (ABNT, 2004f)	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Fonte: Adaptado de Fernandez (2012).

## 2.2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

### 2.2.1. Panorama Atual

A Tabela 1 apresenta dados estatísticos mundiais para da geração de RCD em diferentes países. Nela se destacam, como maiores geradores de RCD no ano de 2014 (em milhões de toneladas), a China e os Estados Unidos, seguidos por Alemanha, França e Reino Unido, por outro lado países como Austrália, Itália, Bélgica e Arábia Saudita apresentam valores inferiores. Provavelmente estes dados refletem o grau de desenvolvimento dos países, onde os mais desenvolvidos apresentam mais atualizações ou investimentos em infraestrutura do que aqueles considerados em desenvolvimento, acarretando mais RCD gerado, além das técnicas construtivas utilizadas, acarretando a ocorrência de mais ou menos resíduos.

TABELA 1. Estimativa de geração de RCD em alguns países em 2014.

<b>País</b>	<b>Geração (Mt)</b>
Estados Unidos	534
Austrália	19,5
China	1.130
Arábia Saudita	6,35
Alemanha	74,87
França	59,96
Reino Unido	55
Bélgica	16
Itália	34

Fonte: Adaptado de Menegaki e Damigos (2018).

No Brasil, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), existem diferentes tipos de unidade de processamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo estas instalações com ou sem equipamentos em que os RSU sejam submetidos a qualquer modalidade de processamento, abrangendo desde a simples disposição no solo em um lixão ou a usual transferência (ou transbordo) de um tipo de veículo coletor para outro, de maior capacidade; até, por exemplo, o tratamento em uma sofisticada unidade de incineração. As instalações voltadas aos resíduos de construção e demolição são denominadas como: área de reciclagem de RCD, aterro de resíduos da construção civil (aterro de inertes) e área de transbordo e triagem de RCD (BRASIL, 2019).

Os dados para o total recebido nas áreas de transbordo e triagem, aterros de resíduos de construção civil e áreas de reciclagem, no ano de 2018, somaram 4,4 milhões de toneladas, valor maior se comparado com 2017, registrado em 2,5 milhões de toneladas. Com relação à quantidade encaminhada para as unidades de reciclagem de RCD, registrou-se que o valor aumentou de 1,08 milhão de toneladas, em 2017, para aproximadamente 1,17 milhão de toneladas em 2018 (BRASIL, 2019).

De acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) (RIO GRANDE DO SUL, 2015), o Rio Grande do Sul apresentou uma estimativa de que em 2014, 80% dos resíduos de construção civil coletados se enquadrariam na classe A, podendo ser reutilizados, conforme Figura 1.

FIGURA 1. Composição do RCD no estado do Rio Grande do Sul em 2014.



Fonte: Governo do Estado do Rio Grande do Sul (2015).

Segundo o Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU – Porto Alegre), o número de recolhimento de resíduos de construção e demolição, em abril de 2011, atingiu 3.844 toneladas de calça e 6.610 toneladas de solo, ou seja, 0,03276 t/hab.ano e 0,05628 t/hab.ano, respectivamente (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2017).

Algumas prefeituras brasileiras têm incentivado o descarte correto dos resíduos de construção e demolição criando centros de recebimento de pequenos volumes. Em Porto Alegre, o Departamento Municipal de Limpeza Urbana inaugurou, em fevereiro de 2010, a primeira Unidade de Destino Certo (UDC). UDC é o nome oficial do conjunto de unidades que estão estrategicamente distribuídas pela cidade e se destinam a atender pequenos geradores de diversos resíduos que não podem ser descartados para recolhimento das coletas regulares - domiciliar e seletiva. As UDCs recebem calça entre outros resíduos sólidos, porém não são aceitos descartes maiores do que 0,5 m<sup>3</sup> por dia. Os endereços das UDC estão no ANEXO A deste trabalho.

O município de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, iniciou em 1995 um programa de reciclagem de resíduos de construção e demolição, que incluiu a instalação de três usinas (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE, 2017). Atualmente, duas estão em funcionamento: a da Pampulha, criada em 1996, e a da BR-040, criada em 2006. O material coletado representa 26% do total de resíduos destinados no município e respondem por 80% da coleta de materiais recicláveis, totalizando 837 toneladas diárias geradas (305.505 t/ano) (RESENDE, 2016).

No município de Guarulhos, estado de São Paulo, existem as chamadas redes

receptoras constituídas por Pontos de Entrega Voluntária (15 PEVs) e Unidades Processadoras (9 instalações de reciclagem de concreto e alvenaria, ou madeira) manejando boa parte do material gerado na cidade, 1.308 toneladas diárias (503,7 mil t/ano) (FERNANDEZ, 2012). Em seu Plano Diretor de Resíduos de Construção, a prefeitura afirma, através de uma projeção, que a geração de RCD no município para o ano de 2020 será de 804 mil toneladas (PREFEITURA MUNICIPAL DE GUARULHOS, 2011).

### 2.2.2. Composição

O nível de homogeneidade do RCD é fator que determina a qualidade do material reciclado para construção. Desta forma, quanto mais segregado e limpo estiver, mais uniformes serão as propriedades físicas do produto final, havendo mais opções para seu reaproveitamento (LIMA et al, 2015).

De acordo com Pinto e Gonzáles (2005), as fontes geradoras dos RCD podem ser divididas em três, como descrito a seguir:

- a) execução de reformas, ampliações e demolições;
- b) construção de edificações novas, térreas ou de múltiplos pavimentos - com áreas de construção superiores a 300 m<sup>2</sup>, cujas atividades quase sempre são formalizadas;
- c) construção de novas residências, tanto aquelas de maior porte, em geral formalizadas, quanto as pequenas residências de periferia, quase sempre autoconstruídas e informais – sem licenciamento.

Ainda neste estudo, Pinto e Gonzáles (2005) verificaram que 59% do RCD gerado nas cidades brasileiras é proveniente de reformas, ampliações e demolições. Os 41% restantes provém de obras novas, sendo 21% de construções maiores que 300m<sup>2</sup>, e 20% de construção de residências informais.

Levy (2001) apresentou dados da década de 90 referentes ao município de São Paulo, onde 60% do entulho oficialmente coletado ainda provinha de obra novas, afirmando este ser um panorama diferente do europeu, onde grande parte do RCD era proveniente de demolições.

A Prefeitura do Município de Guarulhos, em seu Diagnóstico dos Resíduos

Sólidos, dentro do Plano Diretor de Resíduos Sólidos de Guarulhos (PREFEITURA MUNICIPAL DE GUARULHOS, 2011), apresentou o percentual de geração de RCD por tipo de gerador, conforme apresentado na Figura 2, sendo 60% proveniente de reformas e construções informais, 30% de construções licenciadas de maior porte e 10% de construções licenciadas individuais.

A variabilidade da composição do resíduo também se dá principalmente pela ampla disponibilidade de técnicas construtivas que geram misturas de materiais com diferentes características. O cronograma de obra também colabora para uma variabilidade da qualidade do resíduo gerado, uma vez que cada fase construtiva possui materiais diferentes, fazendo com que em cada período as composições e perdas sejam diferentes (ANGULO, 2000).

FIGURA 2. Percentual de geração de RCD por tipo de gerador, em Guarulhos -SP.



Fonte: Prefeitura Municipal de Guarulhos (2011).

Altunku e Kasapseçkin (2011) estimaram que na Turquia, 8% do RCD é proveniente de novas construções, 44% de reformas e 38% de demolições. Mália *et al.* (2013) determinaram indicadores para estimar a quantidade de RCD gerada em novas construções, demolições e reformas através de estudos da União Europeia. Estes indicadores mostraram que a composição média dos resíduos gerados é composta de concreto e materiais cerâmicos. Recentemente, Pedro *et al.* (2018), em seu trabalho sobre especificações técnicas de agregados reciclados, enfatizaram que a maior parte do RCD é composta de concreto, alvenaria e argamassa.

Diversos estudos qualificaram e quantificaram estes resíduos, sendo que a Tabela 2 apresenta uma compilação dos estudos realizados em diferentes municípios do Brasil.

TABELA 2. Percentual da composição do RCD por município (continua).

<b>Município</b>	<b>Argamassa (%)</b>	<b>Concreto (%)</b>	<b>Cerâmicos (%)</b>	<b>Outros* (%)</b>	<b>Autor</b>
Porto Alegre (RS)	28,26	15,18	26,33	30,23	Leite (2001)
Porto Alegre (RS)	38,43	26,58	29,13	5,86	Scoot Hood (2006)
Fortaleza (CE)	22	15,6	31,1	31,3	Lima e Cabral (2013).
Sorocaba (SP)	25	5	30	40	Gonçalves (2016).
Vitória (ES)	54,35	21,48	17,37	6,8	Lyra, Assis, Vieira (2013)
São Carlos (SP)	63,67	4,88	17,98	13,47	Pinto (1986)
Passo Fundo (RS)	37,4	13,8	28,8	20	Bernardes <i>et al.</i> (2008)
Florianópolis (SC)	17,25	19,14	20,73	42,88	Xavier (2001)
Olinda (PE)	23	32	32	13	Falcão <i>et al.</i> (2012)
Salvador (BA)	34	13	49	4	Malta, Silva e Gonçalves (2013)

\* outros= madeiras, vidros, gesso, e demais contaminantes.

Fonte: a autora, 2020.

Fazendo uma análise da Tabela 2 verifica-se que existe uma amplitude na variação das composições dos materiais argamassa (de 17,25% até 63,67%) e cerâmicos (de 17,37% até 49%). Já o concreto apresenta os menores valores, entre os componentes do RCD, variando de 5% a 32%. Alguns estudos se destacam por apresentar em sua composição uma presença maior de materiais categorizados como outros em relação aos materiais cerâmicos, de argamassa e de concreto. Pode-se verificar tal condição nas cidades de Porto Alegre (30,23%), Fortaleza (31,3%), Sorocaba (40%) e Florianópolis (42,88%).

### 2.2.3. Possibilidades de Reaproveitamento

O aproveitamento de resíduos em novas construções é realizado desde os tempos mais remotos. Conforme Delatte (2001), os romanos utilizavam resíduos

cerâmicos em seus concretos, sendo os mesmos feitos de forma um tanto intuitiva, sem qualquer cuidado com especificações técnicas e resistências mecânicas. Ângulo e Figueiredo (2011) relatam que o RCD foi reciclado pela primeira vez na Alemanha pós-guerra e, que em função deste fato, o continente Europeu foi precursor em reciclagem e possui maior experiência no assunto.

Atualmente, o aumento da geração de resíduos e a severidade das leis ambientais gerou uma demanda de estudos de viabilidade de reuso dos materiais de construção e demolição. Já existem trabalhos consagrados na área e normas técnicas para uso destes materiais de reuso (ABNT, 2004f; ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011; CABRAL, 2007; CUNHA, 2017; LEITE, 2001; PINTO, 1986).

Considerando somente a demanda nacional por areia e brita, esta atingiu o recorde histórico de 745 milhões de toneladas em 2014, já em 2015 o setor sofreu queda de 30% com um volume aproximado de 519 milhões de toneladas (ANEPAC, 2016). Independentemente da variação do mercado, vale ressaltar que o Brasil possui uma enorme demanda reprimida para realização de investimentos necessários em infraestrutura e desenvolvimento urbano, este fato acaba por gerar alto consumo de agregados. Estudos de 2014 mostraram que o Brasil apresentava o menor consumo per capita, 3,7 t de agregados, quando comparado com diferentes países e regiões do mundo, tais como Estados Unidos 9 t, China 12t, Finlândia 17 t e Comunidade Europeia 5,2 t (ANEPAC, 2016).

De acordo com os estudos realizados pela ANEPAC (2016), foram previstos crescimentos até o ano de 2035, estimando uma área urbana três vezes maior que a do ano 2000, implicando em maior necessidade de materiais de construção em geral, dentre os quais, os agregados. Neste contexto, se identifica a oportunidade de utilização de RCD como matéria-prima para a produção de novos agregados. De acordo com o PERS (RIO GRANDE DO SUL, 2015), a correta gestão dos resíduos de construção, considerando-se o beneficiamento dos mesmos, resulta na produção de agregados reciclados com diferentes empregabilidades e, por consequência, reduz o emprego de recursos minerais no setor como, por exemplo, saibro em vias de leito natural.

O agregado reciclado de concreto foi inicialmente utilizado como aterro, no entanto, esta situação se modificou após inúmeros trabalhos de pesquisa e avanços significativos na visão sustentável de fabricação de concreto (ÂNGULO;

FIGUEIREDO, 2011; CABRAL, 2007; CUNHA, 2017; LEITE, 2001; PINTO, 1986; YANG; DU; BAO, 2011; LAVADO *et al.*, 2020; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2018).

As primeiras pesquisas científicas brasileiras a respeito do tema, agregado de RCD, foram realizadas por Pinto (1986). O Quadro 6 apresenta uma linha do tempo com base nas referências apresentadas no trabalho de Miranda, Ângulo e Careli (2009) e atualizada com estudos recentes.

QUADRO 6. Pesquisas científicas brasileiras no tema de agregados reciclados (continua).

<b>Ano</b>	<b>Título da pesquisa</b>	<b>Autor/ano publicação</b>
1986	Agregados reciclados em argamassas.	Pinto (1986)
1997	Agregados reciclados em pavimentos.	Bodi (1997)
1997	Agregados reciclados em argamassas.	Levy (1997)
1997	Agregados reciclados em concretos.	Zordan (1997)
2000	Variabilidade do agregado reciclado.	Ângulo (2000)
2000	Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.	Miranda (2000)
2001	Agregados reciclados em blocos de concretos pré-moldados.	Souza (2001)
2001	Agregados reciclados em concretos.	Leite (2001)
2002	Agregados reciclados em concretos.	Altheman (2002)
2003	Agregados reciclados em concretos: influência da idade do concreto.	Butler (2003)
2004	Agregados de telhas cerâmicas para pavimentos.	Dias (2004)
2005	Agregados reciclados em concretos.	Ângulo (2005)
2005	Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe A da construção civil.	Miranda (2005)
2005	Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.	Motta (2005)
2007	Caracterização de propriedades físicas dos agregados reciclados.	Damineli (2007)
2007	Agregado reciclado em base e sub-base de pavimentos	Leite (2007)
2007	Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.	Cabral (2007)
2007	Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.	Lovato (2007)

QUADRO 6. Pesquisas científicas brasileiras no tema de agregados reciclados (conclusão).

2008	Controle granulométrico nas características físicas e propriedades mecânicas dos agregados reciclados para uso em pavimentação.	Silva e Miranda (2008)
2009	Propriedades agregados reciclados de Recife-PE para uso em argamassas.	Silva (2009)
2011	Concreto: Ciência e Tecnologia – Capítulo: Concreto com Agregados Reciclados.	Ângulo e Figueiredo (2011)
2013	Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto.	Cordeiro (2013)
2013	Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição.	Malta (2013)
2013	Caracterização de agregado reciclado de resíduo de construção civil segundo a NBR 15116.	Lyra, Assis e Vieira (2013)
2016	Avaliação da influência do tipo de britador nas propriedades de agregados reciclados graúdos.	Souza <i>et al.</i> (2016)
2017	Viabilidade do uso de RCD proveniente da geração dos concretos convencional e de alta resistência através da utilização do jigge como agente do beneficiamento.	Cunha (2017)
2017	Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste.	Ambrós <i>et al.</i> (2017)
2018	Estudo as influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado reciclado.	Malysz (2018)
2020	Demolished concretes recycling by the use of pneumatic jigs.	Sampaio <i>et al.</i> (2020)
2020	Optimization and dust emissions analysis of the air jigging technology applied to the recycling of construction and demolition waste.	Waskow <i>et al.</i> (2020)
2020	Avaliação do efeito da jigagem em diferentes faixas granulométricas sobre as características do agregado graúdo reciclado de RCD e as propriedades do concreto.	Matos (2020)
2020	Determinação da ecoeficiência de concretos em função do consumo de ligantes.	Machado (2020)

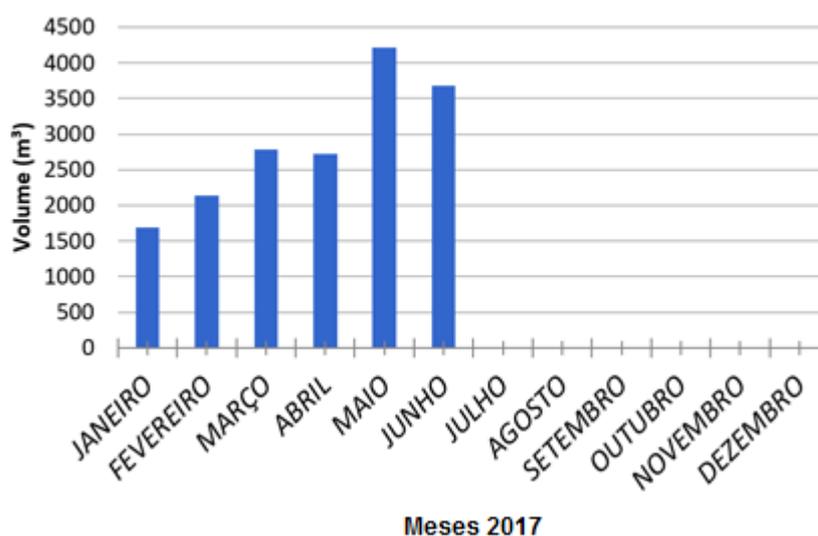
Fonte: a autora, 2020.

Observa-se no Quadro 6 que as pesquisas brasileiras no tema de agregados reciclados iniciaram-se na década de 80 e 90 com agregados de argamassa e concretos e utilização em pavimentação. No ano 2000, Ângulo (2000) inicia a preocupação com a variabilidade destes agregados, mas ainda se tem a aplicação direta do material sem preocupação com beneficiamento. A partir destes estudos, considerando a variabilidade do RCD, tem-se não só o foco nas propriedades como também os aspectos econômicos e ambientais do processamento destes agregados

A Figura 3 apresenta um gráfico da produção dos primeiros meses de 2017 de agregados reciclados da Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil do município de Guarulhos, responsável pelo beneficiamento de 100% de toda parcela mineral de RCD entregue nos Pontos de Entrega Voluntária (PROGUARU, 2017).

Pode-se dizer que o volume de resíduo gerado apresenta um crescimento ao longo dos meses de janeiro a junho, e o mês de maio que exibe o maior volume gerado do ano de 2017. A usina apresenta uma produção de 45 toneladas por hora. Os resíduos de concreto gerados são utilizados na produção de pré-moldados, meios-fios, blocos de concreto e calçadas. Já os resíduos mistos, a cerâmica e argamassa, procedentes de obras domésticas, vem sendo utilizados na conservação e pavimentação de vias urbanas (PROGUARU, 2017).

FIGURA 3. Produção de agregados reciclados no município de Guarulhos do ano de 2017.



Fonte: Adaptado de PROGUARU (2017).

### 2.3. AGREGADOS RECICLADOS

O agregado reciclado, de acordo com a NBR 15.116 (ABNT, 2004f), é um material granular que provém do beneficiamento dos resíduos de construção ou demolição e que apresenta características técnicas para aplicação em obras tanto de infraestrutura quanto de edificação.

### 2.3.1. Beneficiamento

O beneficiamento dos RDCs não difere muito dos processos envolvidos na produção de agregados naturais em função de passarem pelas mesmas fases de coleta e transporte, separação, britagem, peneiramento e sua estocagem para utilização. Desta forma, os equipamentos utilizados na produção dos agregados naturais podem perfeitamente se adequar à produção dos agregados reciclados (LEITE, 2001).

De acordo com Angulo (2005), as usinas nacionais de reciclagem de RCD são compostas basicamente de duas etapas: a cominuição e o peneiramento. A cominuição inicia na britagem, estágio que pode utilizar sucessivas fases para levar a granulometrias compatíveis para utilização direta, ou para posterior processamento e/ou liberação de materiais de alto valor agregado. A britagem tem a função de reduzir as partículas por meio de ação mecânica, seja ela por compressão (britador de mandíbula) ou por impacto (britador de impacto). O peneiramento é responsável pela separação das partículas em faixas granulométricas definidas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

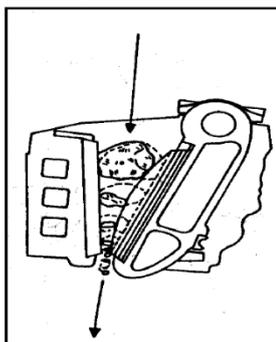
Em alguns casos, a britagem passa por duas fases: a britagem primária e a secundária. O britador de mandíbula, normalmente utilizado para a britagem primária, fornece ao material uma melhor distribuição de granulometria quando comparado aos demais britadores, porém as partículas se tornam mais alongadas. Os britadores de impacto, também utilizados em uma britagem secundária, levam à produção de agregados com uma boa distribuição granulométrica e uma forma menos alongada (SILVA; BRITO; DHIR, 2014). No entanto, quanto mais processos forem necessários para o beneficiamento do resíduo, mais caro se torna este material, por vezes inviabilizando seu uso, sendo assim necessária a otimização do processo (BRITO; SAIKIA, 2013).

#### a) Britador de Mandíbula

O britador de mandíbula, de acordo com Hansen (1986), é o que produz o agregado com a melhor distribuição granulométrica. É o equipamento utilizado para a fase de britagem primária em materiais de elevadas dimensões e/ou dureza,

possibilitando grandes variações de tamanho na alimentação. É composto de uma mandíbula fixa e uma móvel, ligada, que fornece o movimento de aproximação e afastamento entre essas, comprimindo o material, conforme apresenta a Figura 4. Desta maneira, o material alimentado na entrada do britador vai descendo entre as mandíbulas, enquanto recebe a compressão responsável pela fragmentação (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

FIGURA 4. Movimento dos blocos durante a fragmentação no britador de mandíbulas.

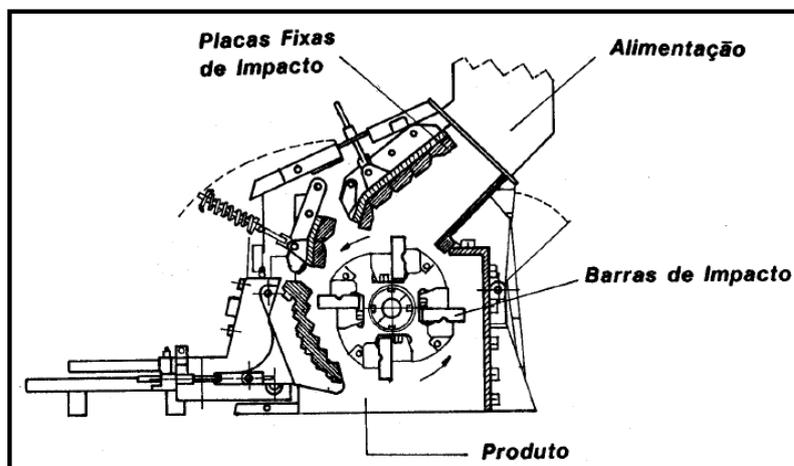


FONTE: Luz, Sampaio e França (2010).

#### b) Britador de Impacto

O britador de impacto é utilizado em britagem secundária, seu método de fragmentação é feito por impacto. Por meio do movimento das barras (500 até 3.000 rpm), parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o sobre as placas fixas de impacto onde ocorre a fragmentação, conforme detalhe da Figura 5.

FIGURA 5. Esquema do britador de impacto.



FONTE: Luz, Sampaio e França (2010).

O método utilizado para a britagem influencia a angularidade e a rugosidade dos diferentes componentes e, portanto, sua massa unitária (CAZACLIU *et al.*, 2014). Em estudo comparativo feito por Souza *et al.* (2016) a respeito da composição granulométrica, verificou-se que os britadores de impacto e de mandíbula possuem comportamento diferenciado. O britador de mandíbula tem uma menor capacidade de produção para a porcentagem de material com granulometria menor que 4,8 mm, independente da origem dos resíduos. O mesmo estudo verificou que o fator de forma não sofreu influência do equipamento de britagem.

Os agregados reciclados tendem a apresentar uma granulometria mais grossa, tanto na forma graúda quanto na forma miúda. Esta característica é relacionada com a origem do material e com o tipo de britador utilizado na cominuição (LEITE, 2001).

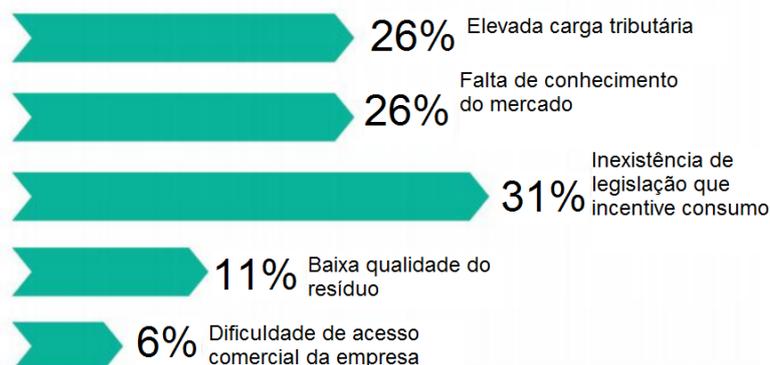
Após o processo de britagem acontece o peneiramento, que tem finalidade de realizar a distribuição granulométrica da amostra. Segundo Petrucci (1978) e Sbrighi Neto (2005), do ensaio de peneiramento serão obtidos os valores usualmente utilizados como parâmetros de avaliação da granulometria do material, os valores de módulo de finura e a dimensão máxima característica.

### 2.3.2. Controle da Variabilidade na Composição

Os agregados reciclados, compostos por concretos, argamassas, materiais cerâmicos ou misturas destes, estão sujeitos a vários padrões de qualidade, dependendo de sua origem, ou seja, dependendo dos materiais utilizados em sua composição (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013, RANGEL *et al.*, 2019).

De acordo com Miranda, Angulo e Careli (2009), a dificuldade para qualquer aplicação dos agregados reciclados está no controle da variabilidade das características físicas ou na presença de impurezas e contaminantes. Para Miranda (2005), analisando do ponto de vista industrial, a maior dificuldade enfrentada na produção de blocos e argamassa utilizando agregados reciclados é a sua elevada heterogeneidade, que pode variar de acordo com o tipo ou fase da obra, do país ou região, em função da diversidade de tecnologias construtivas utilizadas. A ABRECON (2015), em sua pesquisa setorial, analisou as principais causas que dificultavam a venda do agregado reciclado, conforme mostrado na Figura 6.

FIGURA 6. Principais causas de dificuldade na venda de agregado reciclado.



Fonte: Adaptado de ABRECON (2015).

A baixa qualidade do resíduo é um dos fatores citados na pesquisa apresentada na Figura 6, porém percebe-se uma maior preocupação nas questões de legislação, cargas tributárias e mercado do que a qualidade e variabilidade da composição do agregado em si.

Para obter um agregado reciclado de qualidade é necessária uma separação dos materiais, garantindo um nível mínimo de contaminantes, facilitando a certificação e ajudando a aumentar a confiança em sua especificação. A utilização do termo "contaminante" deve depender do tipo de uso em que o agregado estará sendo aplicado. Por exemplo, quando for composto de materiais à base de asfalto, é interessante para uso de recuperação de asfaltos, porém seria altamente prejudicial se misturado ao cimento (SILVA, BRITO e DHIR, 2014).

Lima *et al.* (2015) sugerem em sua pesquisa políticas públicas para o crescimento do mercado de agregados reciclados, tais como programas de incentivos fiscais, como reduzir o imposto pago pelas empresas que contratam o serviço de demolição seletiva; aumento no número das empresas que usam agregados reciclados; ampliação e difusão das normas técnicas em relação ao emprego dos agregados reciclados, entre outras.

### 2.3.3. Aspectos Legais e Normativos

O Brasil classifica os agregados reciclados de acordo com a NBR 15.116 (ABNT, 2004f) em dois tipos, a seguir relacionados:

- a) agregado reciclado de concreto (ARC), composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- b) agregado reciclado misto (ARM), composto na sua fração graúda, com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas (ABNT, 2004f).

O Quadro 7 apresenta uma compilação das principais normas recomendadas em países da Europa e da Ásia para a classificação de agregados para utilização em construção. Conforme observa-se, a maior quantidade de regulamentações concentra-se na Europa, onde países como a Alemanha, Portugal e Bélgica se destacam.

QUADRO 7. Principais normas e guias recomendados em alguns países.

<b>País</b>	<b>Norma</b>
Alemanha	DIN 4226-100 (2002): Aggregates for mortar and concrete part 100: “Aggregates for Mortar and Concrete—Recycled Aggregates”.
Hong Kong	WBTC No. 12/2002 Works Bureau Technical Circular No. 12 (2002): “Specification facilitating the use of recycled aggregates”.
Japão	Building Contractors Society of Japan (B.C.S.J) “Proposed standard for the use of recycled aggregates and RAC” (1977).
Reino Unido	BS 8500-2 (2002): “Concrete—Complementary British Standard to BS EN 206-1—Part 2: Specification for constituent materials and concrete”.
Holanda	CUR - Commissie voor van Uitvoering Research (1984,1986,1994).
Portugal	E471 (2006) “Guia para uso de agregados graúdos reciclados em concreto com ligante hidráulico” em NP EN 12620 - Agregados de Concreto.
Bélgica	PTV 406 (2003): Technical Prescriptions: “Recycled Aggregates from construction and Demolition Waste”.
Suíça	OT 70085 (2006) “Instruction technique. Utilization de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d’abris”.
Dinamarca	“Recommendation for the use of RA for concrete in passive environmental class”. “Addition to Danish Concrete Association N-34 for the use of recycled aggregate for concrete in passive environmental class” (1995).

Fonte: (BRITO; SAIKIA ,2013; PEDRO *et al.*, 2018).

#### 2.3.4. Propriedades

Neville (2016) afirma que a maioria das propriedades dos agregados provém da rocha matriz, ou material de origem, tais como: composição química e mineral, características petrográficas, massa específica, dureza, resistência, estabilidade físico-química, estrutura de poros, coloração, dimensões das partículas, forma e textura superficial. Todas estas propriedades acabam por afetar a qualidade do concreto.

##### 2.3.4.1. Granulometria

A NBR 7.211 (ABNT, 2009c) classifica os agregados com referência ao tamanho dos grãos, sendo eles graúdo com dimensões entre 75mm e 4,75mm, miúdo com dimensões entre 4,75mm e 0,15mm e fíler com dimensões inferiores a 0,075mm. A NBR 15.116 (ABNT, 2004f) especifica que para realização do ensaio de distribuição granulométrica em agregados reciclados seja utilizada a NBR NM 248 (ABNT, 2003) a cada lote.

Alguns estudos afirmam que o agregado reciclado não se encaixa dentro de nenhuma faixa de graduações previstas em norma NBR 7.211 (ABNT, 2009c) bem como apresentam valores de dimensão máxima característica inferiores (LEITE, 2001; CABRAL, 2007; BUTLER, 2003). Estudos ainda afirmam que a influência do britador e da abertura da mandíbula é o fator que irá condicionar o tamanho das partículas (BUTLER, 2003; PARK et al., 2018).

##### 2.3.4.2. Forma

Não somente a natureza do material tem importância, mas também a forma e textura superficial da partícula são aspectos relevantes de suas características, sendo conveniente definir as diferentes formas geométricas de cada um. De acordo com Neville (2016), os agregados podem apresentar as seguintes formas: arredondada, irregular, lamelar, angulosa, alongada e lamelar alongado, conforme Quadro 8.

QUADRO 8. Classificação da forma de partículas do agregado.

Classificação	Descrição
Arredondado	Completamente erodido pela água ou pelo atrito.
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente desgastado por atrito, com cantos arredondados.
Lamelar	Material em que a espessura é pequena em relação às outras dimensões.
Anguloso	Possuem arestas bem definidas formados pela interseção de faces relativamente planas.
Alongado	Geralmente anguloso, em que o comprimento é bem maior do que as outras dimensões.

Fonte: Adaptado de Neville (2016).

Park *et al.* (2018) realizaram um estudo da influência da britagem na fabricação do agregado reciclado de concreto, obtendo uma variedade de formas de partículas dos agregados reciclados, entre elas a forma arredondada (Figura 7a) e alongada (Figura 7b).

FIGURA 7. Formas da partícula do agregado reciclado de concreto.



(a) arredondado

(b) alongado

Fonte: Metha e Monteiro (2014).

A forma altera principalmente as propriedades do concreto no estado fresco e quanto mais ásperos, angulosos e alongados forem os agregados será exigida mais pasta para concretos de mesma trabalhabilidade. Esta quantidade maior de pasta é necessária para envolver a maior área superficial que estes grãos possuem e compensar dificuldades no rolamento dessas partículas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Estudos realizados por Afshar *et al.* (2017) comprovam que a resistência à tração da partícula e a sua energia de ruptura são dependentes do fator de forma. A forma do agregado tem relação direta com o processo de cominuição e, desta forma,

dependerá do equipamento utilizado para tal procedimento. Os trituradores de impacto, também utilizados em estágios secundários de trituração, produzem agregados com boa distribuição de grãos e menor índice de forma (Flakiness Index) conforme Silva *et al.* (2014).

Leite (2007) afirma em seu estudo sobre agregados reciclados na cidade de Santo André, SP, que 79,5% dos grãos lamelares são compostos por materiais cerâmicos, enquanto 55,7% dos grãos cúbicos são de materiais cimentícios. Desta forma, ainda relata o autor, que quanto maior a quantidade de materiais cerâmicos, maior tendência a se obter agregados lamelares e, quanto maior a quantidade de materiais cimentícios, maior a concentração de agregados cúbicos. Essa lamelalidade provém do fato do material cerâmico possuir uma resistência inferior à do concreto, e sua passagem pelo britador de mandíbulas produz uma quantidade muito maior de material lamelar (LEVY, 2001). Esta forma lamelar, no caso dos cerâmicos também pode ser explicada pela forma lamelar (placas) do material originário tais como: blocos estruturais, porcelanatos, azulejos (ROBLES, 2016). Vale ressaltar que, mediante exposto, a forma da partícula do agregado deverá ser controlada uma vez que é uma importante propriedade que influencia o fator de empacotamento do material e a aderência entre a pasta de cimento e a partícula (NEVILLE, 2016).

No Brasil a NBR 7.809 (ABNT, 2019d), que trata da determinação do índice de forma dos agregados graúdos, estabelece a metodologia da execução do ensaio com a utilização do paquímetro. Esta norma restringe a análise de partículas inferiores à 9,5mm. A norma brasileira que define as propriedades dos agregados para concreto, NBR 7.211 (ABNT, 2009c), especifica o limite para valores inferiores a 3 quando da utilização do ensaio da norma NBR 7.809 (ABNT, 2019d). Já a NBR 15.116 (ABNT, 2004f), que trata especificamente dos agregados reciclados, corrobora com o valor limite da norma (NBR 7.211, 2019c) para agregados naturais, tornando o limite único em ambos os casos. Waskow *et al.* (2018) avaliaram os índices de forma dos agregados cerâmicos, de argamassa e de concreto, obtendo valores inferiores a 3 para os agregados de argamassa e concreto (2,49 e 1,78, respectivamente), estes tendendo à forma cúbica, e agregados cerâmicos tendendo à forma lamelar, com valor 3,36.

A norma europeia EN 933-3 (UNE STANDARDS, 2012), para teste das propriedades geométricas de agregados, também trata do índice de forma, porém

voltado à lamelaridade dos materiais. Neste caso, uma partícula é considerada lamelar quando a sua espessura é menor que 0,6mm da sua dimensão nominal. O ensaio é aplicado em partículas maiores que 6,5mm e o resultado final é obtido pela relação percentual entre a quantidade passante através de gabarito específico pela massa total amostrada.

Os índices de forma e *Flakiness Index* de vários agregados de resíduos da construção civil relatados na literatura são comparáveis aos dos agregados naturais utilizados em estudos analisados por Brito e Saikia (2013). Para Silva et al. (2014), a composição e as propriedades físicas de um agregado reciclado devem ser determinadas antes da sua aceitação para utilização na produção de concretos, facilitando assim sua classificação, permitindo uma melhor compreensão do material e de seu provável desempenho.

#### 2.3.4.3. Massa Unitária e Massa Específica

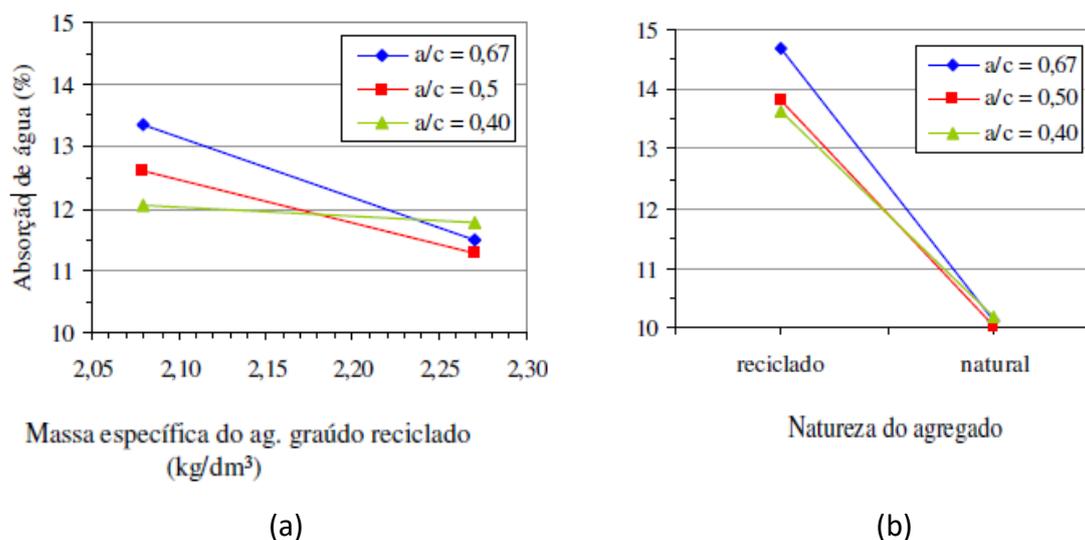
Segundo a NBR NM 52 (2009a), massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e o seu volume, excluindo os vazios nele contidos.

A massa unitária é definida, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), como a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente de acordo com o estabelecido (compactado ou não compactado) e o volume desse recipiente.

De acordo com Ribeiro, Pinto e Starling (2010), os agregados podem ser classificados quanto a sua massa específica em normais, leves ou pesados. Valores característicos de massa específica para agregados naturais estão entre 2,62 g/cm<sup>3</sup> para quartzitos e 2,80 g/cm<sup>3</sup> para basaltos (NEVILLE, 2016).

As massas unitária e específica dos agregados reciclados são menores que as dos agregados naturais, e de acordo com Lovato (2007), a massa específica do AR apresenta reduções da ordem de 9,5-15,8% e, a massa unitária, reduções de cerca de 23-30%. Tenório (2007) afirma em seus estudos que a massa específica do agregado reciclado é inversamente proporcional à absorção de água do concreto, independentemente de sua relação a/c, sendo que a Figura 8a apresenta esta relação. Comparando concretos fabricados com agregados naturais e reciclados, a absorção se apresenta maior em concretos fabricados com agregado reciclado independente de sua relação a/c, como pode ser observado na Figura 8b.

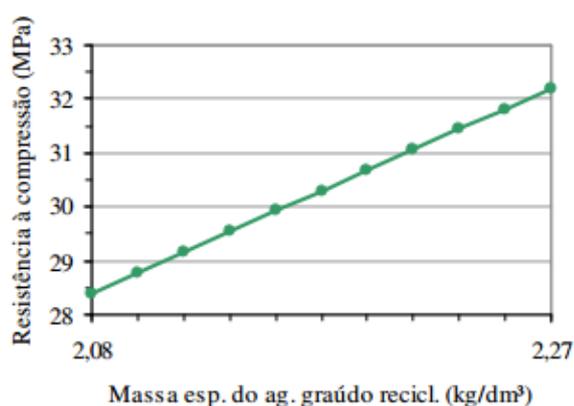
FIGURA 8. Absorção de água em concretos com diferentes relações a/c onde (a) Relação massa específica agregado reciclado e absorção concreto e (b) Relação variação do tipo de agregado e absorção do concreto.



Fonte: Adaptado de Tenório (2007).

Lovato (2007) também afirma que a massa específica do agregado reciclado influencia na resistência à compressão do concreto, conforme Figura 9.

FIGURA 9. Influência da variação da massa específica do agregado reciclado sobre a resistência à compressão do concreto.



Fonte: Adaptado de Tenório (2007).

Cabral (2007) obteve valores de massa específica para agregados reciclados inferiores aos agregados naturais, e alega que esta redução ocorre em função da alta porosidade dos mesmos. O autor ressaltou que os agregados reciclados de cerâmica vermelha foram os que apresentaram os menores valores (1,82 g/cm³), sendo, aparentemente, o agregado com maior quantidade de vazios. Por outro lado, o

agregado reciclado de concreto apresentou o maior valor de massa específica (2,27 g/cm<sup>3</sup>), dentre os agregados reciclados, provavelmente em virtude da maior quantidade de agregados naturais em sua composição. Por fim, o agregado de argamassa apresentou o valor de 2,01 g/cm<sup>3</sup>.

Ao avaliar a massa unitária dos agregados reciclados, Cabral (2007) verificou que os valores de massas unitárias dos agregados de concreto e cerâmicos apresentaram os valores de 1,54 g/cm<sup>3</sup> e 1,46 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, maiores que os dos agregados de argamassa, 1,44 g/cm<sup>3</sup>. E neste caso o valor do agregado natural foi igual ao de argamassa.

Thomas et al. (2019) analisaram agregados reciclados de concreto, obtendo valores de 2,32 g/cm<sup>3</sup> para massa específica e 1,42 g/cm<sup>3</sup> para massa unitária.

Florea e Brouwers (2013) relatam que, de modo geral, os agregados reciclados têm uma massa específica menor e maior absorção de água do que os agregados naturais, no caso dos agregados reciclados de materiais cimentícios esta diminuição está relacionada com a pasta de cimento presente no agregado.

#### 2.3.4.4. Absorção

O agregado reciclado possui uma maior absorção em função de apresentar uma porosidade também maior quando comparado ao agregado natural (BRITO; SAIKIA, 2013; CABRAL, 2007; DJERBI, 2020; ECKERT; OLIVEIRA, 2017; QUATTRONE *et al.*, 2016; SILVA; BRITO; DHIR, 2014, THOMAS *et al.*, 2019; WANG; YU; LI, 2020).

Lovato (2007), em sua pesquisa, afirma que a absorção é maior para agregados com composição rica em agregados de argamassa e cerâmicos, em torno de 10%. Quando se tem agregados compostos em partes iguais de argamassas, cerâmicos e rochas naturais esta absorção diminui para valores próximos à 5%. Thomas *et al.* (2019) e Eckert e Oliveira (2017) obtiveram valores de absorção de 5,3% e 5,9% para agregados de concretos. Cabral (2007) verificou que os agregados reciclados de cerâmica foram os que apresentaram maiores valores de absorção (10,69%), em função de apresentarem uma maior porosidade quando comparados às demais matérias-primas dos agregados reciclados. Observou-se que os agregados de concreto (5,65%) e de argamassa (9,52%) exibiram valores intermediários.

Quanto maior a porosidade do material de origem do agregado cerâmico, maior será a capacidade de absorção deste agregado (BICCA, 2000). No estudo de Leite (2007), os agregados reciclados obtidos de materiais cerâmicos do tipo telhas e tijolos apresentaram uma absorção de 20,7%, porém quando estes agregados eram compostos dos mesmos materiais cerâmicos, com revestimento impermeabilizante, este valor reduziu para 11,1%, semelhante aos obtidos para os agregados de materiais cimentícios que apresentaram valores em torno de 11,5%. Correia de Brito e Pereira (2006) verificaram que os agregados fabricados com tijolos apresentaram absorção de 12% enquanto os naturais apresentaram valor de 1%, valor semelhante foi encontrado nos estudos de Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018), 11,5%. Ângulo e Figueiredo (2011) afirmam que a absorção de água da cerâmica vermelha é muito variável, podendo chegar a até 24%. Os materiais cimentícios também possuem variação e podem chegar a até 15%.

Os agregados reciclados compostos de concreto se diferenciam dos agregados naturais por conter materiais diferentes em sua composição, sendo eles, principalmente, a argamassa de cimento aderida ao agregado natural, conforme mostra a Figura 10.

FIGURA 10. Agregado reciclado de concreto com argamassa aderida.



Fonte: Adaptado de Jayasuriy et al. (2021).

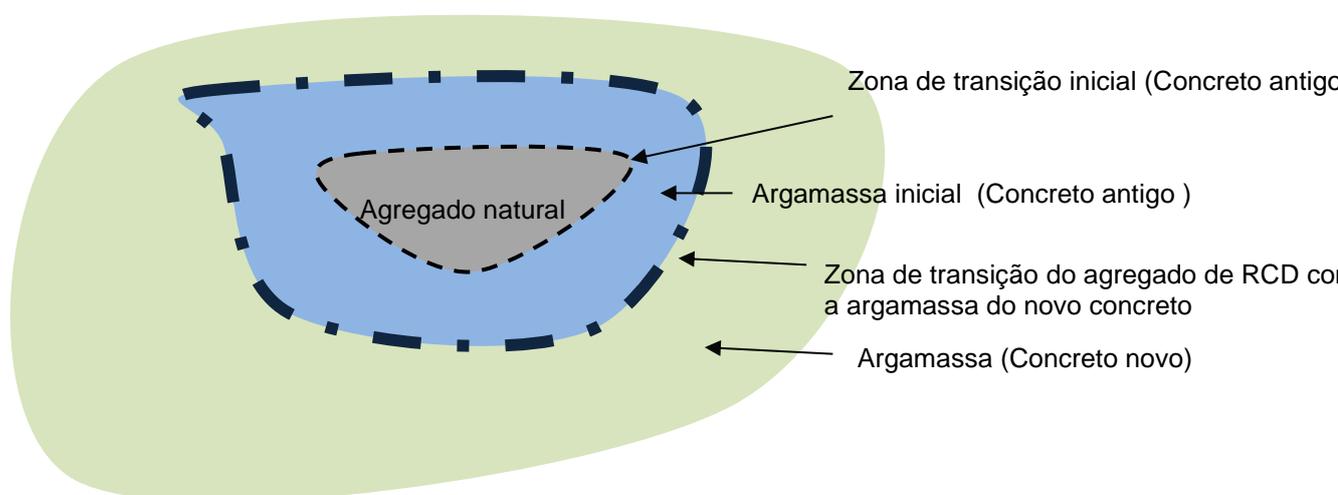
Vários autores concordam que a elevada porosidade do agregado reciclado de concreto está relacionada à quantidade de argamassa aderida. Esta argamassa é, por

consenso, a origem da piora nas propriedades dos agregados, como menor densidade, maior absorção, aumento de perda por abrasão, entre outros (BRITO; SAIKIA, 2013; BRITO; DHIR, 2014, BUTLER, 2003; CABRAL, 2007; DJERBI, 2020, ECKERT; OLIVEIRA, 2017; JAYASURIY *et al.*, 2021, QUATTRONE *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2014; SILVA, THOMAS *et.al.*, 2019; WANG; YU; LI, 2020).

Juan e Gutiérrez (2009), em seus estudos, observaram que um concreto estrutural de boa qualidade pode ser produzido selecionando agregados com teor de argamassa aderida inferior a 44%.

Estes agregados tendem a apresentar duas zonas de transição, uma entre o agregado natural e a matriz antiga, e outra entre a matriz antiga e a matriz nova de cimento. A Figura 11 apresenta um desenho esquemático da formação da macroestrutura do agregado reciclado de concreto e suas zonas de transição.

FIGURA 11. Esquema da formação da macroestrutura do agregado reciclado de concreto e suas zonas de transição.



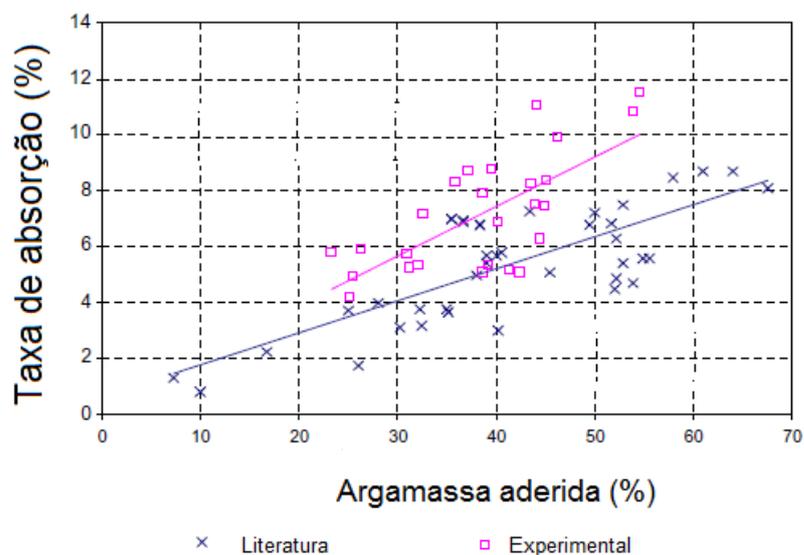
Fonte: a autora (2020).

A argamassa de cimento aderida ao agregado natural de agregados de concreto acaba por apresentar microfissuras em sua estrutura em função do processo de britagem, fato que aumenta sua porosidade, e conseqüentemente, evidencia um decréscimo na densidade e em sua resistência à abrasão (BRAVO *et al.*, 2015; OMARY; GHORBEL; WARDEH, 2016; OMARY; DJERBI, 2020; WANG; YU; LI, 2020).

A Figura 12 apresenta comparação de dados experimentais obtidos por Juan e Gutiérrez (2009) e dados da literatura da variação do teor de argamassa aderida e o

taxa de absorção dos concretos. Observa-se que os dados apresentados na literatura são menores quando comparados aos dados experimentais, o que evidencia a importância da correta caracterização para o material a ser utilizado.

FIGURA 12. Variação do teor de argamassa aderida e taxa de absorção dos concretos.



Fonte: Adaptado de Juan e Gutiérrez (2009).

Quando comparado aos demais materiais constituintes dos agregados reciclados, o concreto se apresenta como o menos poroso e produz os agregados reciclados de melhor qualidade, ainda, caso se remova a pasta de cimento durante o processamento, há possibilidade de se produzir agregados com absorção de água inferior a 3,0% (ÂNGULO E FIGUEIREDO, 2011).

A NBR 15.116 (ABNT, 2004f) recomenda absorção menor que 7% para agregados com no mínimo 90% de massa de fragmentos à base de cimento e rochas, e menor que 12% para agregados mistos com menos de 90% de fragmentos de cimento e rochas.

A absorção do agregado reciclado nos primeiros minutos de contato com a água pode chegar a valores de 70 a 90% da absorção após 24 horas (ÂNGULO E FIGUEIREDO, 2011). Bicca (2000) relatou em seu estudo que os agregados reciclados de materiais cerâmicos absorveram em 2 min 90% do esperado para 24 horas. Carrijo (2005) observou que em 10 minutos de imersão em água uma mistura de agregados cerâmicos, de concreto e de argamassa absorviam de 70 a 86% da absorção total, conforme procedimento da NBR NM 53 (2009f). Para o mesmo tempo,

Pacheco *et al.* (2019) verificaram uma absorção de 85,71% para agregados de concreto.

Lovato (2007) afirma em seu trabalho que o método de ensaio desenvolvido por Leite (2001) para análise da absorção de água em agregados reciclados se apresentou eficiente para agregados graúdos. Em seu estudo, observou que os agregados reciclados absorveram 50% de sua massa de água antes dos 30 minutos iniciais.

Correia de Brito e Pereira (2006) apontaram a pré-saturação como maneira de minimizar os impactos desta propriedade sobre os resultados de resistência à compressão, trabalhabilidade e durabilidade do concreto fabricado com estes agregados.

A pré-saturação dos agregados de RCD tem sido recomendada por diversos estudos sendo abordagem utilizada para contornar a perda de propriedades como consistência do concreto no estado fresco e melhorando o comportamento mecânico no estado endurecido (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011, BAI *et al.*, 2020; DJERBI, 2020; NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018; PACHECO *et al.*, 2019). Porém, as indicações de valores destas pré-saturações variam, sendo que Ângulo e Figueiredo (2011) indicam de 80 a 90%, e Leite (2001) de 40 a 50%.

#### 2.4. CONCRETO COM AGREGADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Levy (2001) afirma que, quanto à produção de concretos com agregados obtidos a partir de resíduos minerais reciclados, pode-se dizer que só a partir de 1982 começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática para avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de alvenaria britada e de concreto. Desde então diversas pesquisas têm sido desenvolvidas reconhecendo que o concreto fabricado com resíduos da construção civil tem seu comportamento alterado em função da absorção de água, forma e tamanho do agregado reciclado (YANG, DU e BAO, 2011).

Um dos destinos considerados viáveis para o reaproveitamento de resíduos da construção civil é sua utilização como agregado na mistura com materiais naturais – prática normatizada pela NBR 15.116 (ABNT, 2004f), que define os limites a serem respeitados e o potencial de uso dos resíduos dentro das tecnologias já

desenvolvidas.

Neste contexto, ressalta-se o crescimento da fabricação de concretos com agregados reciclados de RCD, e pode-se apontar como fator determinante para o desempenho destes concretos a variabilidade do agregado. O agregado para confecção de concretos possui algumas propriedades físicas essenciais para elaboração de um material que apresente desempenho e durabilidade, obedecendo às normas vigentes. As propriedades mais importantes que influenciam nas características dos concretos são granulometria, absorção de água, forma e textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes (LEITE, 2001). A forma da partícula do agregado deverá ser controlada uma vez que é uma importante propriedade que influencia o fator de empacotamento do material e aderência entre a pasta de cimento e a partícula.

As propriedades comumente analisadas para avaliação de substituições dentro do concreto podem ser divididas em seus estados fresco e endurecido.

#### 2.4.1. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado Fresco

O estado fresco do concreto apresenta algumas propriedades importantes para sua aplicação, visando bom desempenho durante a vida útil de projeto. As propriedades do estado fresco que podem sofrer alteração devido às substituições de agregados naturais por agregados reciclados são descritas a seguir.

##### 2.4.1.1 Trabalhabilidade

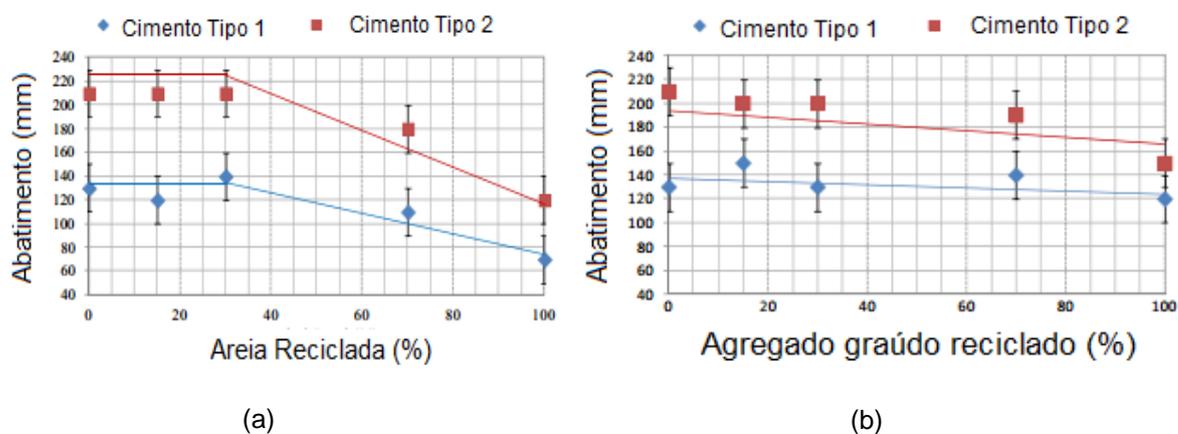
Neville (1997) afirma que o teor de água nas misturas é o principal fator que influencia a trabalhabilidade, independentemente da relação a/c e do consumo de cimento para determinado tipo de agregado. Quanto menor e mais anguloso o agregado, maior será o teor de água necessário para alcançar o abatimento necessário. Quando o traço e a relação a/c são fixados, a trabalhabilidade irá depender somente da granulometria, textura e forma dos agregados.

Quando não é realizado o procedimento de pré-saturação, a perda de trabalhabilidade do concreto reciclado é maior quando comparada com a do concreto

de agregados naturais, pois o agregado reciclado continua absorvendo água mesmo depois da mistura (BUTLER, 2003).

Quando comparada a variação de trabalhabilidade em relação ao tipo do agregado reciclado substituído, percebe-se que a substituição do agregado miúdo gera um impacto maior na diminuição da trabalhabilidade o que pode ser comprovado no estudo de Tahar *et al.* (2017). Foram avaliados concretos em que se substituiu o agregado miúdo natural por areia reciclada nas proporções de 15%, 30%, 70% e 100%, e no qual se substituiu somente agregado graúdo por concreto reciclado nas mesmas proporções. Foram variados os tipos de cimento, o cimento tipo 1 (CEM I 52.5R CE CP2) que possui menos  $C_3S$  e mais  $C_3A$  e é mais fino do que o cimento tipo 2 (CEM I 52.5R CE), e foi utilizado aditivo superplastificante. A Figura 13 apresenta os resultados deste estudo, em que o ensaio de abatimento pelo tronco de cone é realizado 30 s após a confecção do concreto.

FIGURA 13. Variação do abatimento (mm) em relação ao teor de substituição onde a) areia reciclada e (b) agregado graúdo reciclado.



Fonte: Adaptado de Tahar *et al.* (2017).

Pode-se observar que no concreto com agregado graúdo reciclado, a variação de abatimento entre os dois tipos de cimento foi de 80 mm (210 mm para o cimento tipo 1 e 130 mm para o cimento tipo 2). Analisando as regressões apresentadas pelos autores, percebe-se que no concreto com areia reciclada esta diferença se mantém constante até 30% de substituição, e após decresce. Já no concreto com agregado graúdo reciclado, a variação parece decrescer constantemente, obtendo valores de abatimento, com 100% de substituição, maiores do que o do concreto com substituição de areia reciclada. De acordo com Tahar *et al.* (2017), a perda de

trabalhabilidade com a substituição de agregados graúdos é menor do que com a de agregados miúdos.

Silva, De Brito e Dhir (2018) afirmam que é evidente a influência da absorção dos agregados reciclados na trabalhabilidade dos concretos, desta forma a pré-saturação como abordagem de compensação desta influência foi a forma que melhor apresentou resultados. Por outro lado, Leite, Figueiredo Filho e Lima (2013) afirmam que a melhor forma de compensação da absorção de água pelo agregado reciclado trata-se da utilização de aditivos superplastificantes.

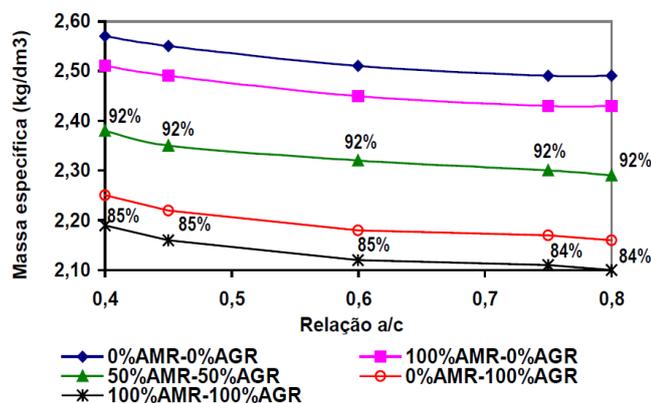
Rodrigues e Fucale (2014) observaram que a relação a/c apresentou mesma tendência de crescimento que o aumento de agregado reciclado durante a confecção dos concretos. A dificuldade de atingir a trabalhabilidade e o abatimento dos concretos reciclados apresentou-se proporcional ao aumento dos teores de substituição do agregado reciclado.

Estudos que avaliaram a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado cerâmico verificaram reduções na trabalhabilidade na ordem de 15 até 60% em teores de substituições que variaram de 20 a 60% (ZAREEI *et al.*, 2019).

#### 2.4.1.2 Massa Específica

A influência da relação a/c e de teores de agregados miúdos e graúdos de RCD no concreto foi avaliada por Leite (2011), que verificou que quanto maior os valores do teor de substituição e da relação a/c, menor o valor da massa específica do concreto no estado fresco. A mesma autora ainda comparou as variações de substituição dos teores de agregado miúdo reciclado (AMR) e agregado graúdo reciclado (AGR). O resultado pode ser verificado na Figura 14.

FIGURA 14. Efeito combinado da variação da relação a/c e teor de substituição dos agregados miúdo (AMR) e graúdos (AGR) reciclados na massa específica do estado fresco.



Fonte: Leite (2001).

Ao analisar as curvas referentes à relação entre massa específica e relação a/c verifica-se que todas as misturas apresentaram a mesma tendência, decréscimo da massa específica à medida que a relação a/c aumenta. A substituição do agregado natural pelo reciclado apresenta influência no resultado da massa específica, uma vez que o concreto de referência, contendo 100% de agregados naturais (0% AMR-0%AGR), apresenta os maiores valores independente da relação a/c. Ressaltam-se os percentuais de 85% e 92% de massa específica dos concretos 100% AMR-100%AGR e 50%AMR-50%AGR em relação ao concreto de referência. Estes resultados apresentam coerência com os de Radonjanin, Malesev e Marinkovic (2010), em que a massa específica de concreto no estado fresco diminui aproximadamente 2% quando se comparam os resultados dos concretos com agregados graúdos naturais e os concretos com agregados graúdos reciclados.

#### 2.4.2. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado Endurecido

Para o estado endurecido, as principais propriedades afetadas pela substituição do agregado natural pelo reciclado serão analisadas a seguir.

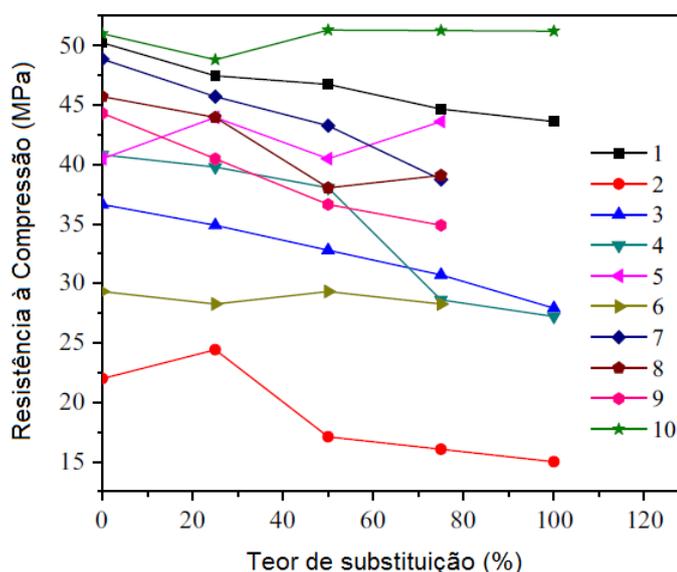
##### 2.4.2.1. Resistência à Compressão

Kisku et al. (2017) realizaram uma revisão sobre a avaliação para o uso de agregados graúdos reciclados como material de construção sustentável. Cada estudo

apresentou variáveis diferentes, tais como: qualidade do agregado reciclado, composição do agregado reciclado, tipo de cimento, relação a/c, entre outras. Neste estudo foi apresentando um gráfico comparativo (Figura 15) de 10 autores a respeito da variabilidade da resistência à compressão e o teor de substituição de agregados graúdos reciclados.

Observa-se que nesta comparação de estudos predomina a relação direta entre a diminuição da resistência à compressão e o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado. No entanto os estudos 10 (FONSECA; DE BRITO; EVANGELISTA, 2011), 6 (ETXEBERRIA *et al.*, 2007) e 5 (POON *et al.*, 2004) apresentaram comportamento diferenciado, evidenciando inclusive alguns acréscimos de resistências ao longo do aumento do teor de substituição dos agregados graúdos (aumento de 12,5% nos concretos com 100% de substituição do estudo 5 de Poon *et al.*, 2004).

FIGURA 15. Variação da resistência à compressão em função do teor de substituição em diversos estudos.



1: Rao; Bhattacharyya; Barai, 2011; 2 e 3: Elhakam; Mohamed; Awad, 2012; 4: Kwan *et al.*, 2012; 5, 8 e 9: Poon *et al.*, 2004; 6: Etxeberria *et al.*, 2007; 7: Kou e Poon, 2012; 10: Fonseca, de Brito, Evangelista, 2011.

Fonte: Adaptado de Kisku *et al.*, (2017).

Diversas pesquisas (BAI *et al.*, 2020; ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; FONSECA, DE BRITO, EVANGELISTA, 2011; KOU E POON, 2012; KISKU *et al.*, 2017; KWAN *et al.*, 2012; POON *et al.*, 2004) obtiveram

resultados em que concretos com agregados reciclados apresentaram uma redução na resistência à compressão quando comparados ao concreto de referência, variando esta redução de aproximadamente 12% (Rao; Bhattacharyya; Barai, 2011) à aproximadamente 33% (Elhakam; Mohamed; Awad, 2012).

Zareei *et al.* (2019) afirmam que a substituição de agregados naturais por agregados cerâmicos aumenta a resistência à compressão de misturas de concreto devido ao aumento do intertravamento deste agregado reciclado. O teor ideal encontrado neste estudo é igual a 40%, o que leva a um aumento de 13%, nesta propriedade em comparação ao concreto de controle.

Angulo (2005) encontrou, em seu estudo, 47% de diminuição de resistência e afirmou que ocorreu em função da porosidade do agregado. Já Levy (1997), em seu estudo com agregados reciclados de concreto, verificou que esta diminuição ocorreu em função da maior porosidade da antiga camada de argamassa aderida à superfície do agregado. Carrijo (2005) afirma que concretos fabricados com agregados de massa específica menor geram concretos com resistências à compressão menores.

Cabral *et al.* (2010) e Cabral (2007), a partir de dados experimentais, apresentam um modelo que estima o comportamento da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com agregados reciclados. Neste modelo é possível verificar que o percentual do tipo de material (cerâmico, concreto e argamassa) bem como o percentual tipo de agregado reciclado (miúdo e graúdo) afetam a resistência final.

Por outro lado, na pesquisa de Radonjanin, Malesev e Marinkovic (2010) foi verificado que agregados fabricados com concreto de alta resistência não afetaram a resistência à compressão final do concreto. Rodrigues e Fucale (2014) estudaram a influência do consumo de cimento na variação de resistência à compressão e verificaram que, mantendo o mesmo consumo de cimento nas misturas de concreto, não houve alterações significativas nos valores de resistência à compressão, tendo o concreto reciclado apresentado desempenho superior quando comparado com o de referência, devido à diminuição da relação *a/c* efetiva nos concretos reciclados.

Porém, quando se discute a variação da resistência mecânica e do consumo de cimento em concretos com agregados reciclados, diversos autores (CARRIJO, 2005; LEVY, 2011; CORDEIRO, 2013) afirmam que, agregados de menor densidade,

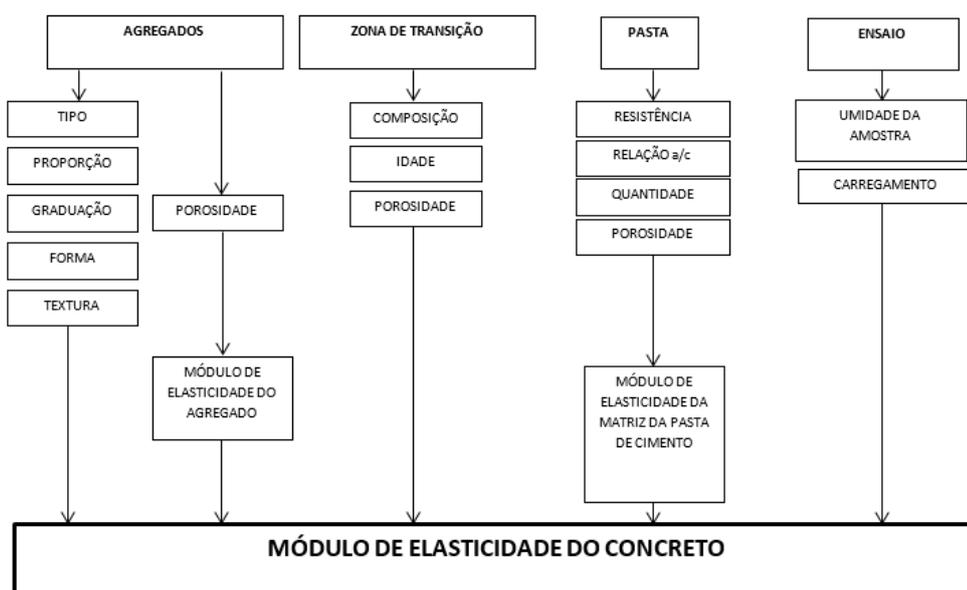
frágeis e mais porosos acabam por demandar um consumo maior de cimento quando comparado aos agregados naturais para uma mesma resistência.

A utilização dos agregados reciclados de RCD na confecção de concretos, teor de agregados graúdos e a relação a/c, através da porosidade do agregado reciclado e a porosidade da matriz, determinada pela relação a/c são fatores fundamentais na resistência final dos concretos (LEITE, 2001).

#### 2.4.2.2. Módulo de Elasticidade

A Figura 16 apresenta um esquema adaptado de Mehta e Monteiro (2014) que inter-relaciona os fatores e propriedades que afetam o módulo de elasticidade do concreto.

FIGURA 16: Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Adaptado de MEHTA; MONTEIRO (2014).

O módulo de elasticidade do concreto depende de vários fatores, como a pasta de cimento hidratada, a ligação pasta/agregado e do agregado utilizado, desta forma tende a variar muito em função do traço e materiais adotados (LEITE, 2001).

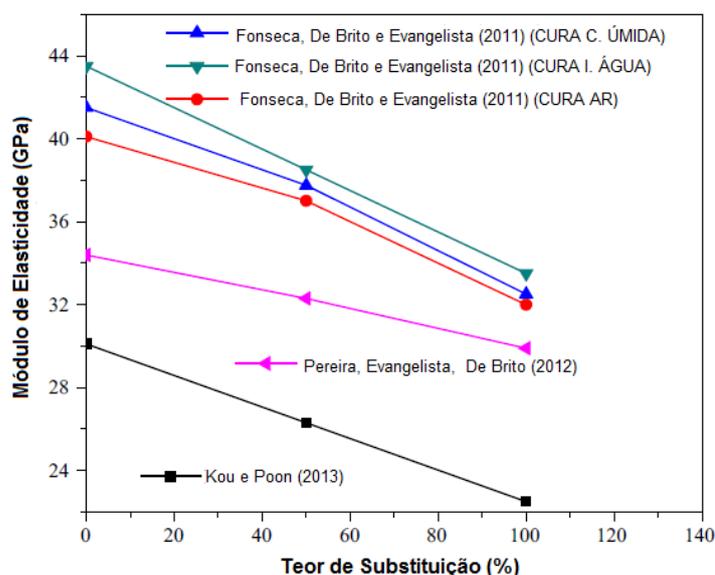
Dependendo do teor de substituição, tipo e dimensões dos agregados reciclados e relação a/c, a diminuição do módulo poderá chegar a 50% quando comparado ao concreto convencional (BRITO; SAIKIA, 2013). Em função deste decréscimo de valores, a RILEM (1994) sugere fatores de conversão estimando este

percentual. Quando considerados concretos com agregados reciclados de alvenaria o fator é 0,65, quando os agregados são basicamente formados apenas por concretos, 0,80 e quando são misturas de agregados reciclados e agregados naturais, dependendo do percentual de cada tipo, pode se considerar 1.

Da mesma forma que as propriedades de resistência, o módulo de elasticidade em concretos fabricados com RCD é normalmente menor, e tende a diminuir com o aumento do teor substituição dos agregados naturais pelo RCD (BERNDT, 2009; BRITO; SAIKIA, 2013; CUNHA, 2017; DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018; DOMINGO-CABO *et al.*, 2009, ETXEBERRIA, *et al.*, 2007; GONZALEZ-FONTEBOA; MARTINEZ-ABELLA, 2008; PACHECO-TORGAL *et al.* 2013; XIAO; FAN; HUANG, 2012). Gonzalez-Fonteboa e Martinez-Abella (2008) e Berndt (2009) verificaram que mesmo utilizando adições ao concreto o valor do módulo de elasticidade apresentou o mesmo comportamento, ou seja, diminuiu com o aumento do teor de substituição de agregado natural por reciclado.

KISKU *et al.* (2017) compararam estudos onde foram analisadas a influência do teor de substituição de agregados reciclados em função do módulo de elasticidade do concreto, conforme apresenta o gráfico da Figura 17. As reduções variam de 12% à 27%, e observa-se que com o aumento do teor de substituição, o módulo de elasticidade decresce em todos os casos. O estudo de Fonseca, De Brito e Evangelista (2011), apresentado na Figura 17, compara a influência do teor de substituição em função do módulo de elasticidade considerando concretos com diferentes processos de cura. Verifica-se que o concreto curado imerso em água apresentou os maiores valores, seguido do concreto curado em câmara úmida e do concreto curado ao ar, observando assim a influência do método de cura no módulo de elasticidade.

FIGURA 17. Variação do módulo de elasticidade em função do teor de substituição de agregados reciclados.



Fonte: Kisku *et al.* (2017).

Por outro lado, estudos de Zareei *et al.* (2019) mostraram uma tendência de crescimento dos resultados do módulo de elasticidade das misturas de concreto com o aumento da taxa de substituição de agregados naturais por reciclados cerâmicos, tendo seu pico em 40% de substituição com 2,8% de aumento. Uma das causas apontadas foi o aumento da quantidade de partículas angulares deste reciclado.

#### 2.4.2.3. Intensidade de Ligante

Para Machado (2020), a produção de concreto com foco na otimização do uso do cimento é considerada como ferramenta promissora para o desenvolvimento de concretos considerados ecoeficientes. Desta forma, pode-se dizer que a avaliação da intensidade de ligante (IL) nos concretos passa a ser um indicador importante, que junto a qualidade do agregado, resistência à compressão e módulo de elasticidade, pode ser utilizado como ferramenta de tomada de decisão para avaliação de eficiência e qualidade de concretos com agregados reciclados.

De acordo com Damineli (2013), é possível definir a eficiência das misturas de concreto determinando a eficiência do uso de ligantes, através do índice Intensidade de Ligante (IL), que é definido como a quantidade de ligante necessária para produzir uma unidade de resistência. O indicador proposto por Damineli *et al.* (2010) relaciona

o consumo total de ligantes do concreto e a resistência à compressão, apresentado na Equação 1:

$$IL = \frac{l}{Rc} \quad (1)$$

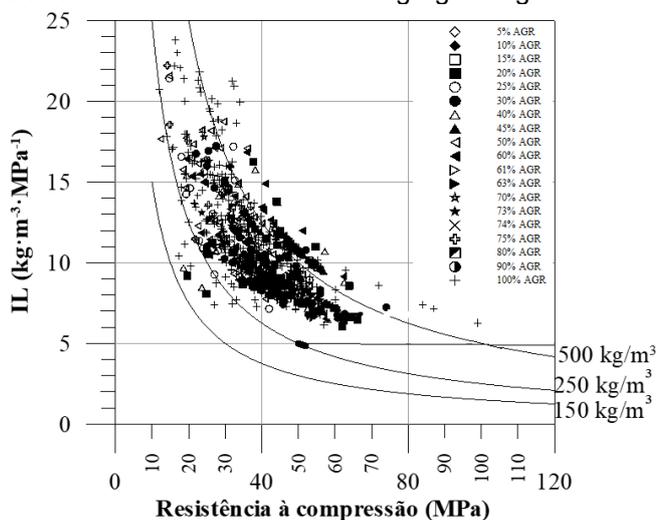
onde: IL = Intensidade de ligantes, em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{MPa}^{-1}$ ;

l = consumo total de materiais ligantes do concreto, incluindo cimento Portland e adições minerais (ativas e/ou inertes), em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;

Rc = resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, em MPa.

O levantamento realizado por Damineli *et al.* (2010) em literaturas nacionais e internacionais para concretos convencionais mostrou que a maior parte dos resultados apresentou valores entre 5 e 15  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{MPa}^{-1}$  para resistências à compressão aos 28 dias variando de 6 a 135 MPa. Para os concretos com RCD, o estudo de Machado (2020) avaliou diversos trabalhos que relacionavam a resistência a compressão de concretos de RCD e os IL, sendo que os resultados apresentaram variações de 6 até 25  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{MPa}^{-1}$  com resistências variando de aproximadamente 12 até 100 MPa e consumos de cimento de 150  $\text{kg}/\text{m}^3$  até valores superiores à 500 $\text{kg}/\text{m}^3$  (Figura 18). Vale observar que a NBR 12.655 (ABNT, 2015) estabelece consumo de cimento mínimo de 260 $\text{kg}/\text{m}^3$  para concretos estruturais.

FIGURA 18. Variação da intensidade de ligante (IL) em função da resistência à compressão para concretos reciclados com diferentes teores de agregados graúdos reciclados.



Fonte: Machado (2020).

O índice IL permite uma comparação entre misturas, na qual quanto maior o teor de ligantes para uma dada resistência, menor a ecoeficiência do concreto, sendo utilizado por muitas centrais de concreto para medir o desempenho econômico de seus produtos (DAMINELI, 2013).

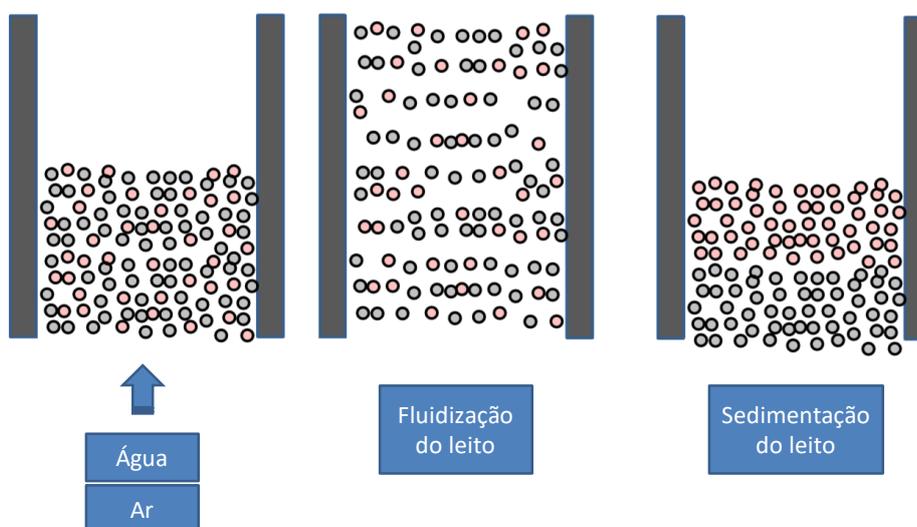
## 2.5. BENEFICIAMENTO EM JIGUES

Jigues estão entre os equipamentos mais antigos usados em concentração de minérios, e supõe-se que o princípio de funcionamento de separação por densidades em meio fluido era conhecido desde o Egito Antigo. De acordo com Sampaio e Tavares (2005), jigues são equipamentos amplamente utilizados em função da sua robustez, simplicidade de operação, baixo custo operacional e por admitirem o beneficiamento de materiais com ampla variação granulométrica.

### 2.5.1. Jigagem

A jigagem consiste em um processo de separação por densidade caracterizado pela repetida pulsação vertical de um leito de partículas através de um meio fluido (ar ou água – denominados jigagem pneumática ou jigagem hidráulica, respectivamente). O resultado esperado é a estratificação do leito, ou seja, a separação das partículas em camadas/estratos de diferentes densidades, sendo a mesma crescente do topo à base do leito (SAMPAIO; TAVARES, 2005; WILL; FINCH, 2015). A Figura 19 mostra o detalhe do processo de expansão e compactação do leito que caracteriza a jigagem.

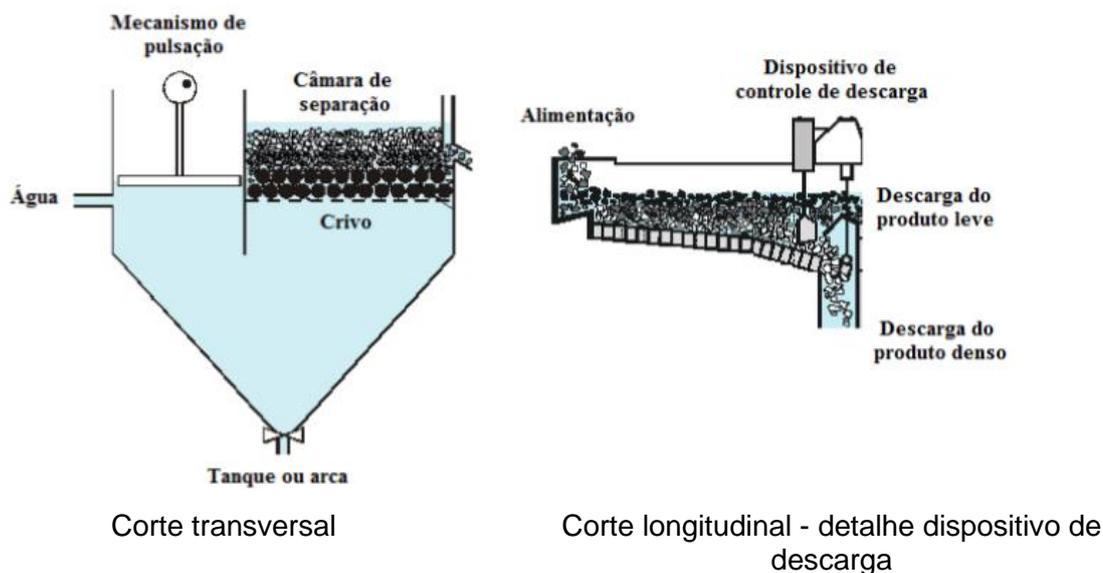
FIGURA 19. Mecanismo do processo de jigagem.



Fonte: Adaptado de Sampaio et al. (2016).

Tipos diferentes de jigues são compostos essencialmente pelos mesmos elementos, um tanque (arca) dividido em duas partes. A primeira parte é denominada de tela de suporte (crivo), sendo responsável pela sustentação do leito onde ocorre a estratificação (câmara de separação), e uma segunda parte onde as pulsações do fluido são geradas (mecanismo de pulsação). O equipamento se completa pelos sistemas de descarga (dispositivo de descarga) dos produtos leves e densos. A Figura 20 detalha estes elementos.

FIGURA 20. Elementos básicos do equipamento jigue.



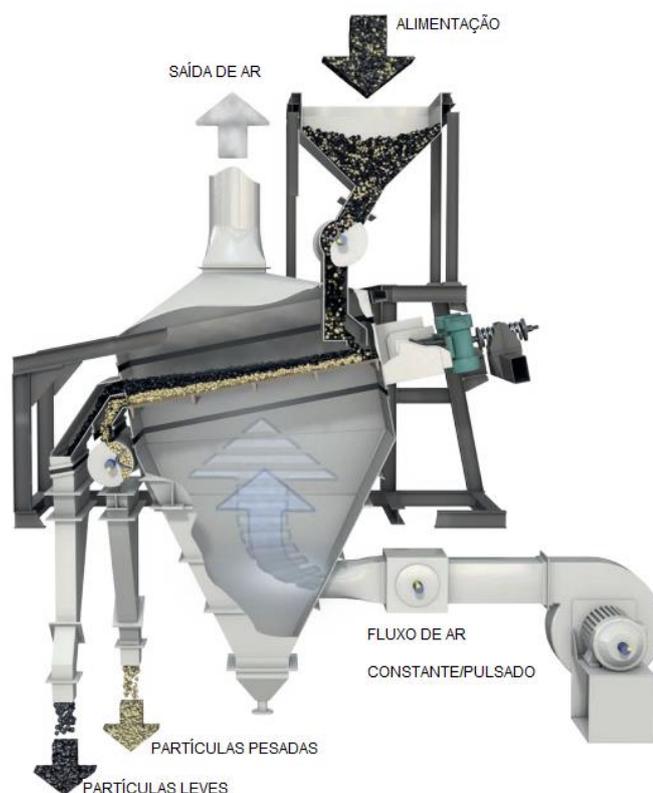
Fonte: Adaptado de Ambrós (2017).

Os equipamentos ainda se diferenciam em relação à forma de funcionamento, por fluxo contínuo ou em batelada. Normalmente os jigues industriais tem fluxo contínuo de entrada e saída de materiais, e os de escala laboratorial funcionam em batelada, onde o material é beneficiado por etapas. A seguir são descritos os equipamentos industriais jigue a seco e a água, bem como um equipamento em escala laboratorial de funcionamento à água, foco deste trabalho.

a) Jigue a seco industrial

O equipamento de jigue a seco foi projetado inicialmente para modernizar o beneficiamento de carvão. A Figura 21 mostra detalhes do equipamento industrial da empresa AllMineral, denominado ALLAIR, no qual se destaca a alimentação do material, o fluxo de ar (entrada e saída) e o material beneficiado dividido em partículas leves e pesadas.

FIGURA 21: Equipamento Jigue a seco – equipamento industrial.



Fonte: Adaptado de ALLMINERAL (2019).

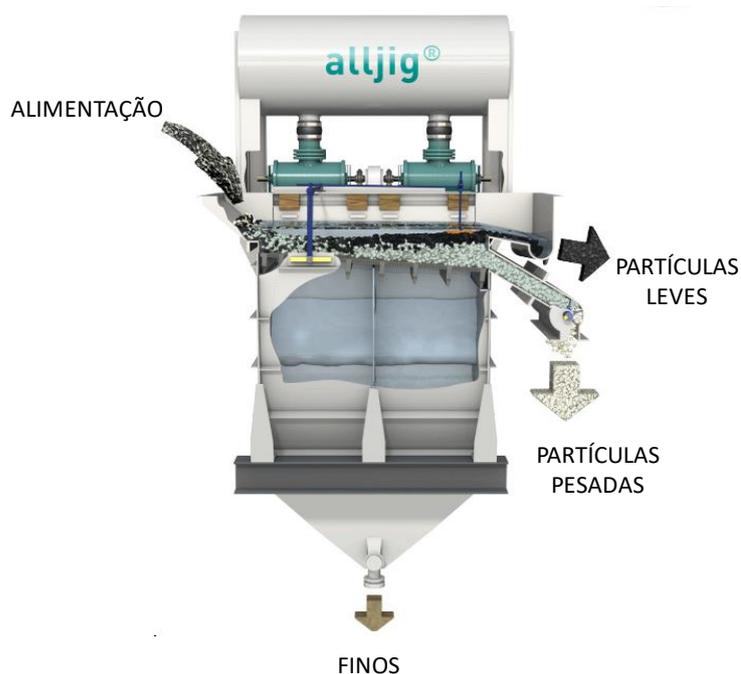
Este equipamento possibilita o beneficiamento de materiais com partículas entre 1 mm até 50mm, indicado para diversos usos desde que exista diferença de

densidade entre as partículas, podendo processar de 20-100t/h de material (ALLMINERAL, 2019).

b) Jigue à água industrial

Jigues à água tem o funcionamento muito parecido com o jigue a seco, sendo que a diferença está na utilização da água como fluido de pulsação. O equipamento fabricado pela empresa ALLMINERAL é denominado ALLJIG e indicado pelo fabricante para beneficiamento de vários materiais, entre eles cascalho, areia, materiais de reciclagem, resíduos de construção, metais, escórias, entre outros. O fabricante afirma que este equipamento beneficia 5-700 t/h de materiais com granulometria de 1 mm até 150 mm. Este equipamento é apresentado na Figura 22, destacando-se a alimentação do material e o material beneficiado dividido em partículas leves e pesadas e os finos (neste caso, material com granulometria menor do que a abertura da tela de sustentação do leito do jigue) (ALLMINERAL, 2019).

FIGURA 22: Equipamento Jigue à água – equipamento industrial.



Fonte: Adaptado de ALLMINERAL (2019).

c) Jigue à água laboratorial

Os jigues de escala laboratorial são capazes de reproduzir o processo de beneficiamento da escala industrial e normalmente possuem uma capacidade de beneficiamento por lote de material analisado de aproximadamente 50 kg. O dispositivo consiste normalmente em uma câmara de separação apoiado em uma placa perfurada, denominada de crivo, que é alocada em um tanque contendo água, que por sua vez é pulsada no recipiente por meio de um fluxo de ar, sendo este controlado por válvulas. A câmara de separação é formada por compartimentos de polímero transparente de espessuras 25 mm e 50 mm e as mesmas são utilizadas para a retirada dos materiais beneficiados. A Figura 23 detalha um equipamento jigue à água em escala laboratorial.

FIGURA 23: Equipamento Jigue à água – escala laboratorial.



Fonte: a autora, 2020.

Um dos pré-requisitos de sucesso no beneficiamento em jigues, definido pelo próprio fabricante e relatado na literatura (ALLMINERAL, 2019; SAMPAIO; TAVARES 2005), é a diferença de densidades entre partículas do material a ser separado. Neste sentido tem-se um critério (Critério de Concentração- CC) capaz de estabelecer o quão eficiente será o processo de um dado material.

### 2.5.2. Critério de Concentração

Com a finalidade de prever a facilidade, ou não, de separação de materiais nos processos de mineração, Taggart (1945) definiu o Critério de Concentração (CC) conforme Equação 2:

$$CC = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad (2)$$

onde: CC – critério de concentração (adimensional)

$\rho_h$  - densidade da partícula pesada (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_f$  – densidade do fluido (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_l$  – densidade da partícula leve (g/cm<sup>3</sup>)

Analisando a Equação 2, pode-se dizer que quanto mais próximo o valor da densidade do fluido ( $\rho_f$ ) à densidade do componente mais leve da mistura ( $\rho_l$ ), maior será o valor do CC. Verifica-se então que o CC depende não apenas da diferença de densidade nominal dos materiais que se deseja separar, mas também da diferença de densidades entre estes e o meio fluido usado na separação. Via de regra, quanto mais próximo a densidade do fluido estiver do componente mais leve, tanto mais fácil será a separação por densidade. Deste fato deduz-se que separadores (jigues, por exemplo) que empregam o meio água na separação tendem a apresentar melhores eficiências do que aqueles que, sob condições similares, empregam o meio ar (separação a seco).

Sampaio e Tavares (2005) corroboram com a afirmação anterior quando relatam que quando maior o valor de CC maior a diferença relativa de densidade entre dois materiais, tornando assim mais fácil a separação por métodos de separação gravimétrica, tal como a jigagem. Por outro lado, quando os materiais possuem densidades iguais ou muito próximas, os valores de CC tornam-se baixos identificando a dificuldade de separação entre eles.

### 2.5.3. Estado da Arte do Beneficiamento de RCD em Jigues

Diversos estudos afirmam que resíduos de construção e demolição possuem propriedades físicas e composições químicas próximas dos materiais de construção,

e podem ser utilizados como matéria prima secundária na construção civil. Para isso, sugerem que os mesmos sejam beneficiados utilizando técnicas de processamento mineral (AMBRÓS *et al.*, 2017; AMBRÓS *et al.*, 2019; CAZACLIU *et al.*, 2014; HU *et al.*, 2019; PETICILA *et al.*, 2017; KHOURY *et al.*, 2018; SAMPAIO *et al.*, 2016; XING, 2004; XING; HENDRIKS, 2006).

No fim dos anos 1990, o beneficiamento dos RCD por vias secas eram o estado da arte. Jungmann (1997) foi pioneiro em apresentar a viabilidade de beneficiamento utilizando jigue à água para estes resíduos. A autora ressaltou que algumas fábricas na Áustria, Noruega e Estados Unidos iniciavam a utilização de separação por jigue à água, obtendo bons resultados de materiais separados com mais eficiência (materiais cerâmicos e concretos), com menor teor de contaminação de finos e, praticamente, livre de qualquer matéria orgânica. Inclusive em alguns casos estes agregados estavam sendo utilizados para confecção de novos concretos.

Em função das diferenças que os resíduos de argamassas e cerâmicos apresentam, Xing e Hendriks (2006) compararam a utilização de jigue à água e separador magnético para verificar a eficiência de separação nos diferentes métodos. Na utilização do jigue à água, no qual a separação ocorre devido à diferença das densidades entre os materiais, foi possível recuperar duas frações de material, um concentrado mais denso contendo 99,4% de concreto, e outro menos denso com 89% de material cerâmico. O separador magnético foi utilizado de forma a separar materiais com diferentes teores de  $Fe_2O_3$ , inferiores à 1,25% nas argamassas e variando de 3-4% nos tijolos de argila selecionados, sendo a argamassa a fração não-magnética e os tijolos a fração magnética. Foram considerados os teores de recuperação de tijolos e a pureza de ambos os materiais recuperados, e neste caso a técnica de separação magnética se apresentou eficiente, recuperando teores de 33-71% de material cerâmico em proporções que variaram de 1:1, 3:7 e 7:3 (tijolo:argamassa).

Com o passar dos anos, estudos se aprofundaram visando a melhoria da qualidade do agregado beneficiado e estabelecendo novos horizontes de aproveitamento do RCD, uma vez que a qualidade dos agregados reciclados de RCD está estritamente relacionada ao conteúdo de materiais porosos, de baixa resistência e, especificamente, argamassas que permanecem fixadas à superfície dos agregados (ULSEN *et al.*, 2013).

Para viabilizar este incremento de qualidade nos agregados reciclados foram estudadas várias metodologias que procuram, normalmente após britagem e peneiramento dos RCD, separá-los por categoria, garantindo materiais mais homogêneos e retirando os materiais deletérios a novos concretos. Como a composição do RCD possui materiais de diferentes densidades, tem-se a utilização de jigues como metodologia apropriada para este beneficiamento.

Em estudos com jigues a seco, foram analisados os processos de separação de materiais como concreto, cerâmicos e gesso, obtendo ótimos resultados nos beneficiamentos. Cazacliu *et al.* (2014) realizaram estes ensaios de beneficiamento e obtiveram um produto com concentração de 90% de concreto. No trabalho de Sampaio *et al.* (2016) foram realizados estudos com utilização do mesmo equipamento visando também separar partículas de concreto, tijolo e gesso, e foi possível estratificar os materiais mais densos (produto denso composto por 80-90% da massa em concreto) e materiais menos densos (produto leve contendo 60-80% da massa de gesso).

Para verificar a possibilidade de remoção com o uso do jigues a seco de materiais contaminantes, como madeiras, papel e gesso, Ambrós *et al.* (2017) realizaram análises com misturas de igual volume de concreto e tijolo, nos quais foram adicionadas quantidades fixas de materiais indesejados. O produto obtido apresentou contaminação em níveis inferiores a 1%, em massa, e aproximadamente 90%, em massa, de concreto puro.

Apesar de apresentar resultados positivos na separação de materiais com diferentes densidades, o jigues à ar apresenta algumas peculiaridades que acabam por se tornar desvantagens quando analisadas no contexto do beneficiamento de agregados de RCD. Os estudos de Ambrós, Cazacliu e Sampaio (2016) mostram que o beneficiamento de agregados de concreto, tijolo e gesso com a utilização do jigues a seco em escala laboratorial apresentou o efeito denominado parede, que significa a ocorrência de partículas pesadas concentradas na zona central do estratificado e partículas leves próximas às paredes, dando origem a um perfil de estratificação horizontal. Também foram analisados os tempos de duração do teste, o que acaba por gerar uma remistura do leito, verificando que maiores tempos de funcionamento do equipamento fazem com que materiais densos se remisturem nas camadas superiores.

Em termos de granulometria, os jigues permitem a alimentação com partículas que variam de dimensões maiores de 1mm (diâmetro dos orifícios de passagem do fluido) e inferiores a 25mm (altura da menor gaveta), porém Ambrós (2017) verificou uma maior eficiência de separação de partículas mais finas no jigue a seco. Foi observado que a fração miúda (8-4,75mm) obteve 15% a mais de precisão no beneficiamento do que a fração grosseira (12,7-19,1mm).

Cazacliu *et al.* (2014) ressaltam que a separação entre partículas de cerâmicos e concretos é dificultada em função da semelhança entre densidades, uma vez que o critério de concentração que define esta separação depende das densidades dos materiais e também do meio fluido de separação, apontando assim uma maior dificuldade de separação entre estes materiais no jigue a seco.

O estudo de Waskow *et al.* (2020) avaliou a emissão de poeiras em testes de beneficiamento de agregados de RCD em jigue a seco e os resultados confirmaram a presença de emissão de partículas nas faixas de tamanho +10  $\mu\text{m}$ , -10  $\mu\text{m}$  + 2,5  $\mu\text{m}$  e -2,5  $\mu\text{m}$ . Neste estudo, cerca de 4,5g de poeira foram coletados por teste, predominando a fração +10  $\mu\text{m}$ , e os autores ressaltam que partículas menores que 2,5  $\mu\text{m}$  são particularmente perigosas devido à sua capacidade de penetrar nos pulmões, causando sérios problemas de saúde.

Os estudos de beneficiamento justificam a utilização do jigue hidráulico em função das vantagens de produtividade, custos reduzidos e confiabilidade do equipamento, melhores valores de critérios de concentração e uma grande vantagem no uso da água no processo, pois isso leva à limpeza dos agregados reciclados como produto final (KHOURY *et al.*, 2018; PETICILA *et al.*, 2017; XING, 2004).

Khoury *et al.* (2018) mostraram que mesmo agregados reciclados de concreto, originários de plantas industriais com controle de parâmetros, podem apresentar entre si grande disparidade no conteúdo de argamassa aderida. Para beneficiar este material, os autores utilizaram o beneficiamento em jigue à água. Após beneficiamento, os resultados apontaram que quando comparadas as camadas superiores e inferiores do leito de agregados, estas apresentaram diferenças significativas dos agregados ali estratificados em relação às densidades e à absorção de água. A camada superior apresentou materiais mais leves e absortivos, massa específica entre 2,08-2,15g/cm<sup>3</sup> e teor de absorção 8,3%, e na camada inferior

materiais mais pesados e menos absorptivos, entre 2,41-2,44g/cm<sup>3</sup> de massa específica e 3,1% de absorção.

Waskow, Santos e Tubino (2019) apresentam um estudo (sobre amostragem de resíduos de RCD brasileiro) e apontam os materiais cerâmicos, os concretos e as argamassas como composição básica neste país. Dentro deste aspecto, tem-se como objetivo principal em futuras pesquisas a separação destas categorias de modo a compor diferentes tipos de agregados reciclados. Para finalizar, o Quadro 9 apresenta uma compilação de alguns estudos utilizando jigues como meio de beneficiamento em diferentes materiais e RCDs. Vale ressaltar a pequena quantidade de estudos em jigues hidráulico.

QUADRO 9. Pesquisas utilizando jigues no processo de beneficiamento em RCD (continua).

ANO	FONTE	TIPO JIGUE	MATERIAIS	FINALIDADE
2014	Cazacliu <i>et al.</i> (2014)	seco	partículas de concreto, tijolo e gesso.	caracterização
2014	Xing (2004)	água	partículas de concreto e tijolo.	caracterização
2015	Silva <i>et al.</i> (2015)	seco	agregados reciclados de RCD.	uso em concretos
2016	Sampaio <i>et al.</i> (2016)	seco	partículas de concreto, tijolo e gesso.	caracterização
2016	Ambrós <i>et al.</i> (2016)	seco	partículas de concreto, tijolo e gesso.	caracterização
2017	Ambrós <i>et al.</i> (2017)	seco	partículas de concreto e tijolo e pequenas quantidades de madeira, gesso e papel.	caracterização
2017	Peticila <i>et al.</i> (2017)	seco	partículas de argamassa, cerâmica e basalto.	caracterização
2019	Aziz <i>et al.</i> (2019)	seco	partículas cobre, vidro e borracha.	caracterização
2018	Khoury <i>et al.</i> (2018)	água	agregados reciclados de concreto.	caracterização
2018	Malysz (2018)	seco	agregados reciclados de RCD.	uso em concretos
2019	Hu <i>et al.</i> (2019)	seco	agregados reciclados de RCD.	uso em concretos
2017	Cunha (2017)	água	agregados de concreto.	uso em concretos
2019	Ambrós, Cazacliu e Sampaio (2019)	seco	partículas de gesso, cerâmicos e cascalho.	caracterização
2020	Waskow <i>et al.</i> (2020)	seco	partículas de concreto, argamassa e cerâmicos	uso em concretos

QUADRO 10. Pesquisas utilizando jiges no processo de beneficiamento em RCD (conclusão).

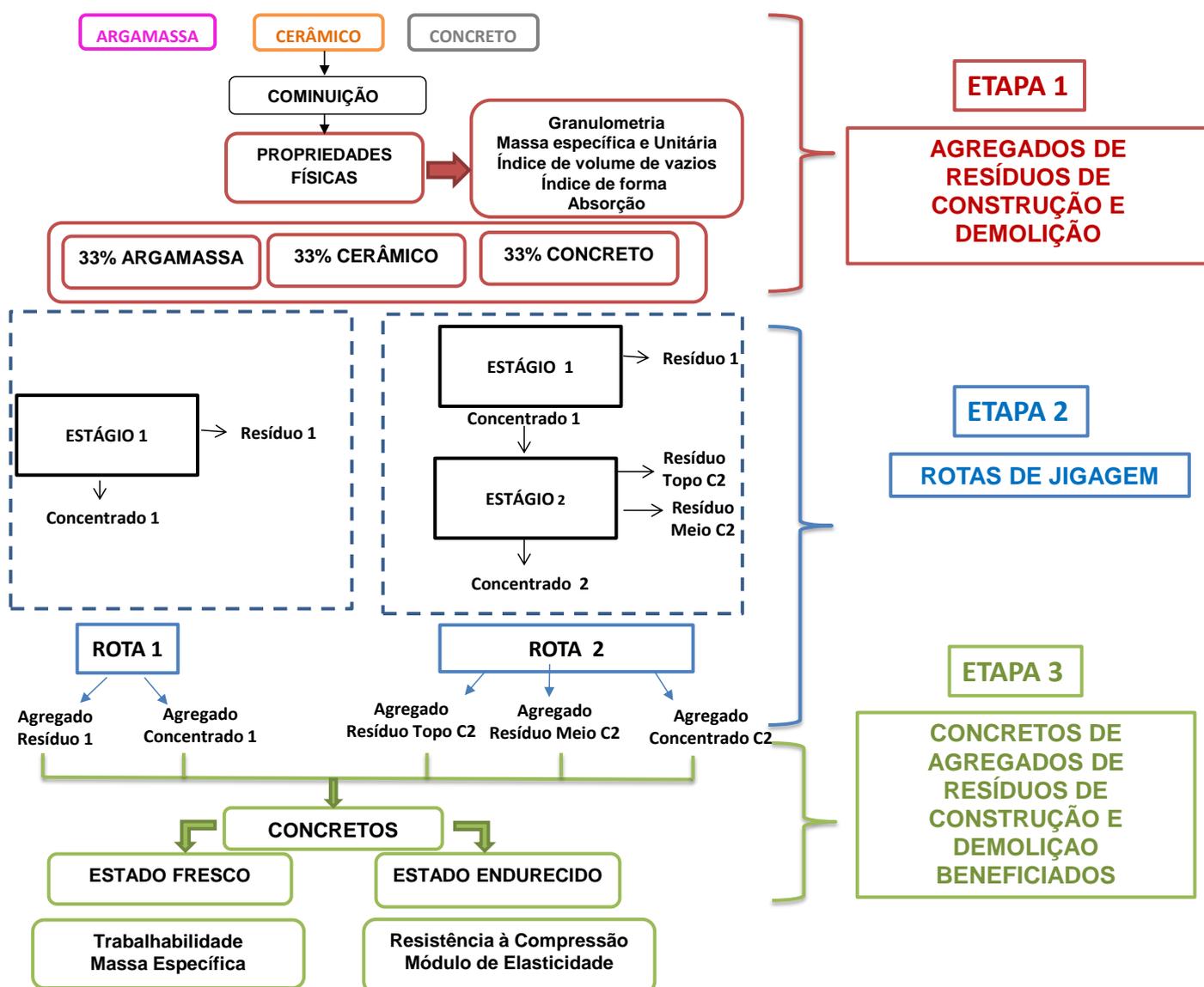
2020	Sampaio <i>et al.</i> (2020)	seco	partículas de concretos de diferentes resistências.	caracterização
2020	Matos (2020)	seco	agregados reciclados de RCD.	uso em concretos

Fonte: a autora (2020).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo estão descritas as etapas do procedimento experimental adotado no trabalho, o qual está dividido em 3 etapas elencadas a seguir e realizadas conforme fluxograma da Figura 24.

FIGURA 24: Fluxograma resumido das etapas do procedimento experimental.



Fonte: a autora (2020).

### 3.1. ETAPA 1: AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

#### 3.1.1. Obtenção das Matérias-Primas

As matérias-primas utilizadas para a obtenção de um simulado de agregado graúdo reciclado foram selecionadas de forma a apresentar diferentes propriedades e representar a variabilidade possível de ser encontrada no RCD brasileiro, tanto em relação ao tipo de material (concreto, cerâmico e argamassa) quanto à resistência mecânica (alta e baixa). Tanto a especificação do tipo, quanto da resistência de cada material foram definidas para que este agregado obtivesse uma grande faixa de variabilidade em relação à forma, coloração, massa específica e unitária. Foi estabelecido que este seria composto de argamassa, material cerâmico de alta e baixa resistências, e concretos convencional e de baixa resistência. A seguir são apresentados os materiais (matérias-primas) utilizados para a obtenção dos agregados.

##### 3.1.1.1. Argamassa

A argamassa obtida para compor o agregado reciclado foi preparada de modo a utilizar uma composição de materiais usados corriqueiramente em argamassas da construção civil brasileira, bem como apresentar uma resistência mecânica média para argamassas.

Foram utilizados cimento CP IV 32 (cimento Portland pozolânico), areia média característica da cidade de Porto Alegre (RS) de massa específica  $2,63\text{kg/dm}^3$ , cal hidratada tipo II de massa específica  $1,6\text{kg/dm}^3$ , e pigmento marrom (para facilitar a identificação do material após britagem e mistura com os demais agregados reciclados). O traço selecionado, bem como as propriedades apresentadas, se encontra na Tabela 3.

TABELA 3. Traço e propriedades da argamassa.

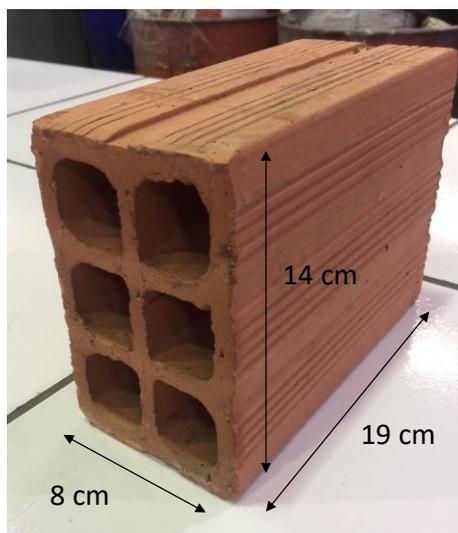
Material	Traço unitário em massa	Relação a/c	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)
Cimento	1	0,57	7,03
Cal	1		
Areia	6		
Pigmento Lanxess®	0,05		

Fonte: a autora (2020).

### 3.1.1.2. Material Cerâmico de Baixa Resistência

O material cerâmico de baixa resistência utilizado para compor o agregado reciclado, oriundo de blocos cerâmicos sem função estrutural, foi adquirido no comércio local de Porto Alegre (RS). Foi realizado ensaio de compressão axial no bloco e este apresentou uma resistência média à compressão de 2 MPa. A Figura 25 apresenta detalhe do bloco.

FIGURA 25: Detalhe e dimensões do bloco cerâmico de baixa resistência - não estrutural.



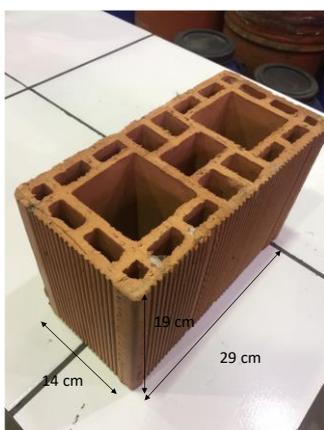
Fonte: a autora (2020).

### 3.1.1.3. Material Cerâmico de Alta Resistência

O material cerâmico de alta resistência utilizado para compor o agregado reciclado foi adquirido no comércio local de Porto Alegre (RS), sendo utilizado como bloco cerâmico com função estrutural. O fornecedor apresenta em seu catálogo técnico o valor de 7 MPa como resistência à compressão. A Figura 26(a) apresenta

detalhe do bloco e suas medidas e a imagem disponibilizada no catálogo do fornecedor é mostrada na Figura 26(b).

FIGURA 26: Detalhe e dimensões do bloco cerâmico de alta resistência - estrutural.



(a) Dimensões



(b) Imagem disponível no catálogo do fornecedor

Fonte: a autora (2020).

#### 3.1.1.4. Concreto Convencional

O concreto convencional produzido para compor o agregado reciclado foi confeccionado de modo a se obter um concreto com resistência à compressão em torno de 50 MPa aos 28 dias. Foram utilizados cimento CP IV 32 (cimento Portland pozolânico, massa específica  $2,76\text{kg/dm}^3$ ), areia média característica da cidade de Porto Alegre (RS) como massa específica de  $2,63\text{kg/dm}^3$ , brita basáltica de massa específica  $2,57\text{kg/dm}^3$  e dimensão máxima característica de 19mm, adição de sílica ativa e pigmento azul (para facilitar a identificação do material após britagem e mistura com os demais agregados reciclados). Os traços selecionados e as propriedades apresentadas se encontram na Tabela 4.

TABELA 4. Traço e propriedades do concreto convencional.

Material	Traço unitário em massa	Relação a/c	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)
Cimento	1	0,50	54
Areia	1,78		
Brita	2,56		
Sílica ativa	0,1		
Pigmento Lanxess®	0,01		

Fonte: a autora (2020).

### 3.1.1.5. Concreto de Baixa Resistência

Para compor o agregado reciclado de concreto de baixa resistência foram selecionados traço e materiais de modo que se obtivesse aos 28 dias um material com resistência à compressão em torno de 15 MPa. CP IV 32 (cimento Portland pozolânico, massa específica 2,76kg/dm<sup>3</sup>), areia média característica da cidade de Porto Alegre (RS) como massa específica de 2,63kg/dm<sup>3</sup>, brita basáltica de massa específica 2,57kg/dm<sup>3</sup> e dimensão máxima característica de 19mm e adição de pigmento amarelo (para facilitar a identificação do material após britagem e mistura com os demais agregados reciclados). Os traços selecionados, bem como as propriedades apresentadas, se encontram na Tabela 5.

TABELA 5. Traço e propriedades do concreto de baixa resistência.

Material	Traço unitário em massa	Relação a/c	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)
Cimento	1	0,56	16
Areia	2,94		
Brita	3,56		
Pigmento Lanxess®	0,017		

Fonte: a autora (2020).

### 3.1.2. Cominuição e Peneiramento

A fase seguinte para obtenção dos agregados reciclados (AR) foi a cominuição dos materiais, sendo esta realizada individualmente, para cada tipo de material, em britador de mandíbulas. Todos os materiais descritos foram cominuídos em moinho de mandíbulas Plangg, modelo MR812, do Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) do Centro de Tecnologia da UFRGS. Posteriormente, o material foi peneirado em peneirador mecânico também do laboratório LAPROM, separando-se os agregados graúdos dos miúdos. O material selecionado foi o passante na peneira #19mm e retido na peneira #4,75mm, faixa do agregado graúdo, sendo este intervalo estabelecido em função da faixa operacional dos jiges, a qual limita o tamanho mínimo de partícula a valores maiores que 1 mm (devido à abertura do crivo) e o tamanho máximo de partícula a 25 mm (AMBRÓS, 2017).

O aspecto dos materiais após processo de britagem, bem como as siglas adotadas podem ser observados no Quadro 10. Pode-se verificar, após análise das

imagens, que o material cerâmico apresentou partículas mais alongadas em relação aos demais.

QUADRO 11. Aspecto dos agregados após o processo de britagem.

Material	Imagem Partículas	Material	Imagem Partículas
Cerâmico de alta resistência (AR-CEA)		Cerâmico de baixa resistência (AR-CEB)	
Concreto convencional (AR-CC)		Concreto de baixa resistência (AR-COB)	
Argamassa (AR-A)			

Fonte: a autora (2020).

### 3.1.3. Caracterização: Propriedades Físicas dos Agregados Reciclados

Após o peneiramento na faixa do agregado graúdo (passante na peneira #19mm e retido na peneira #4,75mm) foram realizados os ensaios de caracterização física de cada um dos tipos de agregado. Para avaliação das propriedades físicas foram realizados ensaios de caracterização aplicados aos agregados graúdos naturais, podendo-se assim verificar as propriedades granulométricas, de forma, massa específica e massa unitária. Os agregados reciclados foram secos em estufa com temperatura pré-estabelecida pela NBR NM 53 (ABNT, 2009b).

### 3.1.3.1. Quarteamento

Para realização dos ensaios de distribuição granulométrica, índice de forma e massa unitária foi necessário realizar o quarteamento dos materiais. As amostras de cada tipo de material foram quarteadas conforme NBR NM 27 (ABNT, 2001) e após foram preparadas amostras conforme a necessidade de cada ensaio.

### 3.1.3.2. Distribuição Granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica e módulo de finura foi realizado conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003) e avaliado conforme os limites da NBR 7.211 (ABNT, 2019c).

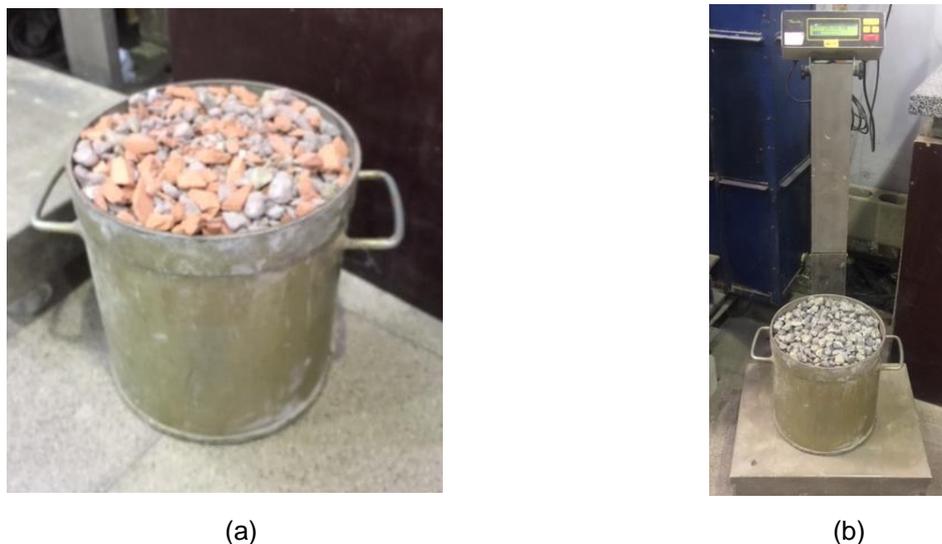
### 3.1.3.3. Índice de Forma

O ensaio de índice de forma foi realizado conforme NBR 7.809 (ABNT, 2019d) e avaliado conforme os limites da NBR 7.211 (ABNT, 2019c). De acordo com as recomendações da norma, são selecionados 200 agregados proporcionais às frações de massa das faixas 9,5-12,7mm e 12,7-19,5m constante em cada amostra. Os grãos selecionados foram medidos em seus comprimento e espessura com paquímetro, e calculado o índice de forma de cada grão e média da amostra.

### 3.1.3.4. Massa Unitária

A massa unitária foi determinada conforme o estabelecido na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), utilizando-se o método C, para massa unitária em estado solto. Este método consiste em determinar o volume e massa do recipiente padrão vazio, a seguir o recipiente é preenchido até que o mesmo transborde, a camada superior é nivelada e determina-se a massa do recipiente mais seu conteúdo. A Figura 27 detalha o recipiente preenchido com agregado reciclado.

FIGURA 27: Ensaio massa unitária agregados graúdos – detalhe recipiente e pesagem- (a) recipiente com agregado reciclado e (b) pesagem do recipiente com agregado reciclado.



Fonte: a autora (2020).

### 3.1.3.5. Massa Específica

O ensaio de massa específica foi realizado através de dois métodos distintos conforme metodologia desenvolvida e apresentada por Leite (2001) e utilizando um picnômetro de gás hélio. O ensaio estabelecido por Leite (2001) como proposta de norma (ANEXO B), de acordo com alguns autores se apresenta como o mais adequado (Cordeiro, 2013; Malysz, 2018) como forma de estabelecer a massa específica de agregados reciclados. Esta metodologia utiliza um kitasato de capacidade de 1000ml, balança com precisão de 0,1g e bomba de vácuo. A Figura 28 detalha as etapas desta metodologia.

No método proposto por Leite (2001), a amostra do agregado deve ser seca em estufa por 24h e resfriada em temperatura ambiente. Pesa-se, conforme Figura 29a, uma quantidade entre 800g e 1000g de material (C). O recipiente de vidro kitasato deve ser preenchido com água até a metade e o material é adicionado, sendo que a água deverá ser suficiente para submergir o material. O conjunto fica em repouso por 24 horas, e após este tempo é aplicado vácuo durante 15 minutos, agitando o recipiente para promover a saída de ar que permanece entre as partículas do material. Após este procedimento, o recipiente é preenchido em sua totalidade com água e coberto com uma placa de vidro. Determina-se a massa do conjunto (A). Retira-se todo o material do recipiente, que deve ser lavado e preenchido com água em sua

totalidade e tampado com placa de vidro para pesagem (B). A Equação 3 determina a massa específica do material como sendo:

$$\gamma = \frac{C}{B-A+C} \quad (3)$$

onde:  $\gamma$  = massa específica do agregado reciclado ( $\text{kg}/\text{dm}^3$  ou  $\text{g}/\text{cm}^3$ );

A = massa da amostra + recipiente + água + placa de vidro (g);

B = massa do recipiente + água + placa de vidro (g);

C = massa da amostra seca em estufa (g).

FIGURA 28: Ensaio massa específica agregados reciclados onde (a) se tem a pesagem do material, em (b) a aplicação de vácuo no conjunto e em (c) a pesagem do recipiente + água + placa de vidro.



Fonte: a autora (2020).

A utilização do picnômetro de gás se justifica em função de seu princípio de funcionamento, uma vez que o gás penetra em todos os poros da amostra não danificando-a e determina-se o volume verdadeiro deste sólido, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. Utiliza-se hélio em função de se tratar de um gás inerte e penetrar facilmente em todos os poros da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo, assim, determinar o volume do sólido com mais rigor. Este equipamento foi utilizado nos estudos de caracterização de agregados de RCD nos estudos de Khoury *et al.* (2018). A Figura 29 apresenta o equipamento Multipycnometer Quantachrome do laboratório LAPROM utilizado neste ensaio.

FIGURA 29: Picnômetro.



Fonte: a autora (2020).

### 3.1.3.6. Índice de Volume de Vazios

Para determinação do índice de volume de vazios foi utilizada a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os valores das variáveis envolvidas nos cálculos desta norma são provenientes das determinações realizadas através das metodologias descritas nos itens 3.1.3.4 e 3.1.3.5.

### 3.1.3.7. Absorção

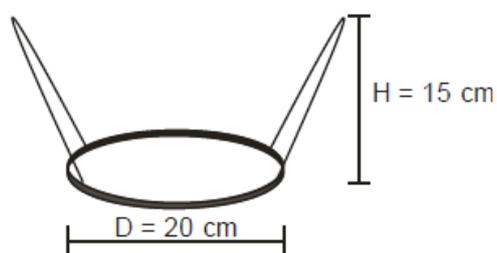
Em relação à avaliação da propriedade de absorção dos agregados reciclados é de consenso que normas de ensaios para agregados naturais não se aplicam para os reciclados em função da alta porosidade e da possibilidade de perda de material por desagregação. Desta forma foi determinado que neste trabalho o método escolhido seria adaptado do método utilizado por Leite *et al.* (2011), que calcula a taxa de absorção do material submerso e avalia a taxa de absorção ao longo de 24h, apresentando este dado em forma de gráfico. Em função de não se tratar de um ensaio normatizado, será descrito a seguir.

O ensaio inicia com o processo de secagem de aproximadamente 1000g do material que deverá permanecer aproximadamente 4h em estufa à temperatura de aproximadamente 105°C. Após a secagem, o material deverá ser colocado em uma peneira com abertura inferior à menor granulometria do agregado e, assim, permanecer até a estabilização da temperatura. A temperatura ambiente deve estar

entre  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e a umidade relativa do ar entre  $70 \pm 10\%$ .

O agregado deverá estar submerso, dentro de uma peneira, durante todo o ensaio, utilizando um aparato que esteja fixado na balança hidrostática e que possua possibilidade de encaixe de uma peneira. Este aparato para encaixe da peneira foi adaptado da descrição do trabalho de Cordeiro (2013) que também realizou ensaio de absorção utilizando o método de Leite *et al.* (2011). A Figura 30a apresenta a descrição do aparato utilizado por Cordeiro (2013) e a Figura 30b o aparato confeccionado neste trabalho utilizando alumínio e a peneira acoplada.

FIGURA 30: Aparato porta amostra.



(a) Descrição do aparato de Cordeiro (2013)

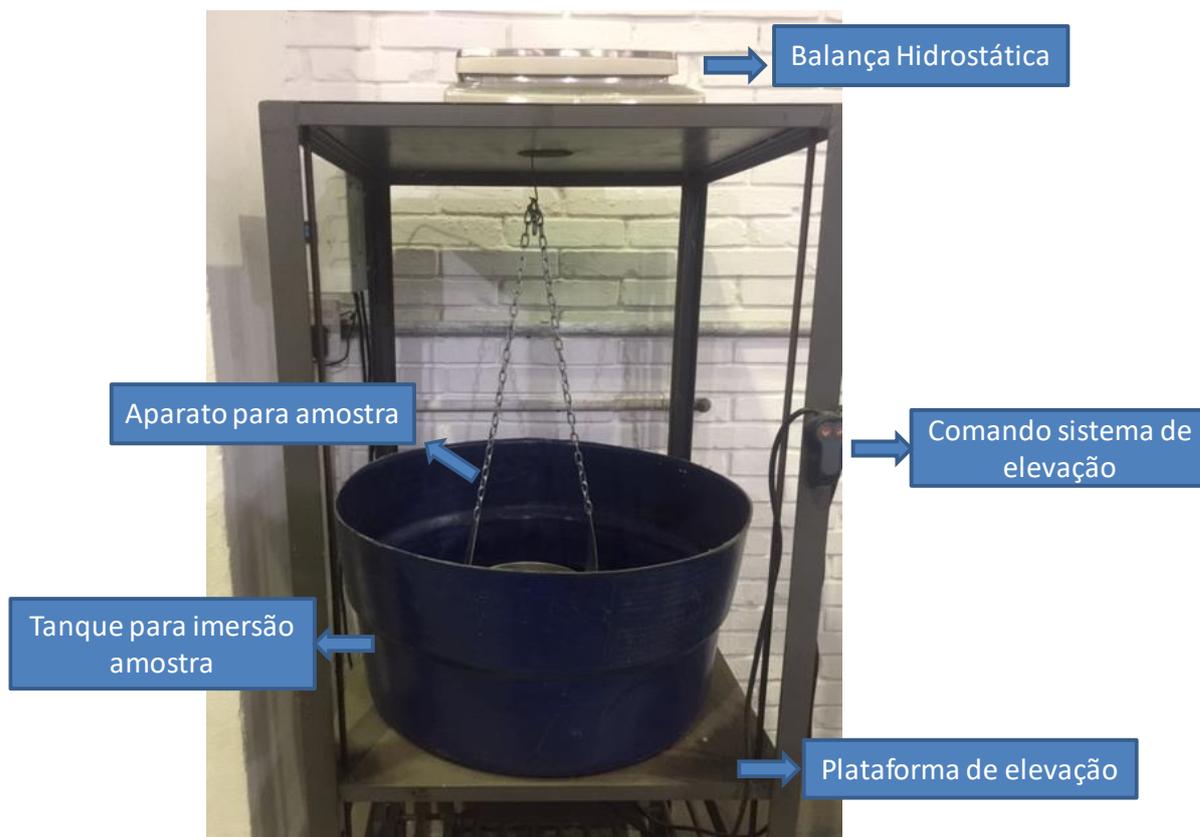


(b) Aparato confeccionado em alumínio e peneira

Fonte: a autora (2020).

O conjunto aparato-peneira-balança hidrostática foi instalado na estrutura utilizada para ensaios de densidade com balança hidrostática (Figura 30) pertencente ao laboratório LAPROM. Os itens destacados na Figura 31 são a balança hidrostática com precisão de 0,01g, o comando do sistema de elevação que permite ajuste de altura da plataforma de elevação onde se encontra o tanque para imersão da amostra e o aparato porta amostra confeccionado para este ensaio.

FIGURA 31: Estrutura para ensaio de absorção.



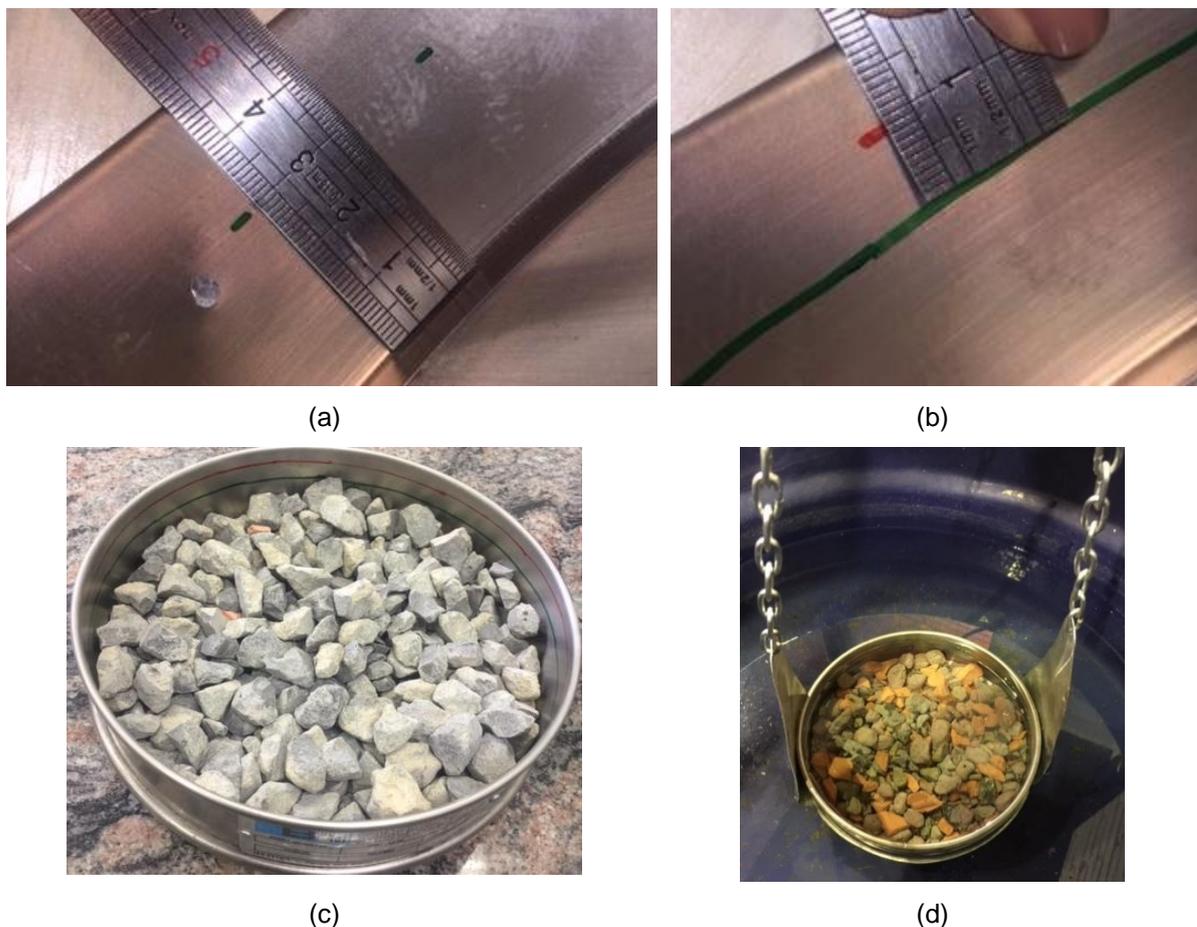
Fonte: a autora (2020).

A peneira acoplada no porta-amostra deve ter abertura 0,044mm e o agregado deve ser capaz de preencher o volume equivalente a 3cm medidos a partir da base da peneira, devendo ao submergir em água, ser coberto por uma lâmina d'água de 1cm. Para uma melhor precisão destas medidas as mesmas foram marcadas na peneira, conforme mostra a Figura 32.

O aparato-peneira é fixado na balança hidrostática e esta é tarada. O material é inserido na peneira de modo a preenchê-la até a primeira marca (3cm do fundo da peneira). Para submergir o aparato-peneira, a plataforma de elevação é acionada até o momento em que a água contida no tanque para imersão da amostra cubra os agregados e atinja a marca na peneira relativa a 1cm acima dos agregados.

A partir do instante em que a amostra submerge, o ganho de massa é monitorado, e antes de cada leitura o recipiente deve ser agitado cuidadosamente para facilitar a saída do ar aprisionado. A presença de ar aprisionado pode gerar erros experimentais, por isso, a recomendação da autora é que a determinação não seja feita de forma contínua, requerendo agitação nos diferentes intervalos de tempo.

FIGURA 32: Preenchimento do porta-amostra onde (a) 3cm do fundo da peneira, (b) 1cm a partir dos agregados, (c) agregados preenchendo até 3cm de altura e (d) aparato/peneira imerso em água.



Fonte: a autora (2020).

O minuto inicial a partir do momento que a água atinge a altura desejada é denominado de massa no instante inicial (MSUB I). Este monitoramento do ganho de massa dos agregados é realizado ao longo de 24 horas, efetuando-se leituras consecutivas, conforme os intervalos pré-estabelecidos de 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 180, 360 e 1440 minutos. No tempo de 1440 minutos é realizada a leitura final determinada de MSUB F, e a partir deste momento os agregados são cuidadosamente escoados e retirados da peneira para uma estufa à temperatura de  $\pm 105^{\circ}\text{C}$  para secarem até a constância de massa, sendo que as perdas não podem superar 5%. São realizadas, no mínimo, duas repetições do ensaio e a média entre elas gera o valor final.

Tem-se como resultado deste ensaio a taxa de absorção e a taxa da absorção percentual em função do tempo de duração do ensaio. A Equação 4 apresenta a expressão para determinação da Taxa de Absorção:

$$ASUB (\%) = \frac{MSUB F - MSUB I}{MSUB I} X 100 \quad (4)$$

onde:  $ASUB (\%)$  = taxa de absorção do material submerso (%);

$MSUB F$  = massa de material submerso no instante final (g);

$MSUB I$  = massa de material submerso no instante inicial (g);

A Equação 5 apresenta a expressão da absorção de água percentual em função do tempo de duração do ensaio:

$$AN (\%) = \frac{AN}{A24} X 100 \quad (5)$$

onde:  $AN (\%)$  = absorção de água percentual no instante n;

$NA$  = massa de água absorvida no instante n;

$A24$  = massa de água absorvida em 24 horas de ensaio.

### 3.1.3.8. Critério de Concentração

Para avaliar a facilidade de separação entre os diferentes tipos de agregados utilizados neste estudo foi utilizado o cálculo do Critério de concentração (CC) já descrito no item 2.5.2 do Capítulo 2 - Referencial Teórico.

### 3.1.4. Composição Inicial para Jigagem – CR- C0

Após caracterização de cada categoria dos agregados reciclados, foi definida a composição inicial a ser utilizada nas rotas 1 e 2 do beneficiamento. Foi estabelecido que para cada ensaio de jigagem o material inicial a ser utilizado deveria preencher o volume equivalente a 3 gavetas que compõe o compartimento do equipamento, e cada gaveta de 50mm de altura seria preenchida com um tipo de material: argamassa (A), cerâmico (CE) e concreto (CO), tendo-se assim uma composição inicial de 1/3 ou 33% em volume para cada material no início do processo. Esta definição garantiu que o volume dos diferentes materiais seria o mesmo, e tal procedimento foi observado em diversos estudos utilizando tanto jigagem à água quanto jigagem à ar (AMBRÓS *et al.*,

2016; AMBRÓS *et al.*, 2017; AMBRÓS, CAZACLIU E SAMPAIO, 2019; CAZACLIU *et al.*, 2014; SAMPAIO *et al.*, 2016; SAMPAIO *et al.*, 2020; WASKOW *et al.*, 2020). Entretanto, como os materiais cerâmico e concreto possuem 2 classes de resistência diferentes, foi estabelecido que nestes casos o volume da gaveta seria preenchido com a metade de cada material. A Figura 33 apresenta esquematicamente este preenchimento.

FIGURA 33: Preenchimento da composição inicial da primeira fase da Rota de jigagem.



Fonte: a autora (2020).

O preenchimento de cada gaveta foi realizado e a massa de material pesada de modo a determinar a quantidade em massa por gaveta, sendo que a Figura 34(a) ilustra o preenchimento da gaveta e a Figura 34(b) a posterior pesagem deste material.

FIGURA 34: Preenchimento do volume das gavetas onde (a) preenchimento da gaveta e (b) pesagem do material de uma gaveta



Fonte: a autora (2020).

No caso dos materiais com duas classes, cerâmicos e concretos, foi estabelecido que seria utilizada a metade da massa de cada classe para compor cada gaveta. Para garantia de total preenchimento das gavetas foi estabelecido que para cada ensaio (jigada) seria acrescido um teor de 10% de cada material. As quantidades em massa dos materiais constam na Tabela 6, bem como as siglas de nomenclatura estabelecidas para cada agregado.

TABELA 6. Quantidade de material, em massa, selecionado para cada ensaio (jigagem).

	Material	1 Gaveta (g)		Real Jigagem (g)
		1 Gaveta (g)	+ 10% (g)	
1 gaveta	CERÂMICO ALTA (AR-CEA)	5455,70	6001,27	3000,64
	CERÂMICO BAIXA (AR-CEB)	5673,80	6241,18	3120,59
1 gaveta	CONCRETO CONVENCIONAL (AR-CC)	7421,20	8163,32	4081,66
	CONCRETO BAIXA (AR-CB)	7053,70	7759,07	3879,54
1 gaveta	ARGAMASSA (AR-A)	5930,00	6523,00	6523,00
TOTAL		31534,40	34687,84	20605,42

Fonte: a autora (2020).

A quantidade real de jigagem (constante na Tabela 6) foi a quantidade em gramas de cada material selecionado para compor a composição inicial, que foi manualmente misturada, resultando em uma massa total de aproximadamente 20,61kg. Este material teve sua nomenclatura definida como Composição Inicial C0 Mistura Manual (AR-C0). Para análise posterior, a Tabela 7 apresenta o percentual de cada material, considerando a massa de cada gaveta.

TABELA 7. Quantidade de material em massa e em % de massa.

Compartimento	Material	Quantidade (g)	Percentual (%)	Percentual por categoria em massa (%)
GAVETA 1	CERÂMICO ALTA (AR-CEA)	3000,64	14,56	29
	CERÂMICO BAIXA (AR-CEB)	3120,59	15,14	
GAVETA 2	CONCRETO CONVENCIONAL (AR-CC)	4081,66	19,81	39
	CONCRETO BAIXA (AR-CB)	3879,54	18,83	
GAVETA 3	ARGAMASSA (AR-A)	6523,00	31,66	32
Total		20605,43	100,00	100,00

Fonte: a autora (2020).

### 3.2. ETAPA 2: ROTAS DE BENEFICIAMENTO

A metodologia de beneficiamento por jigagem deste trabalho baseia-se em duas rotas de beneficiamento, denominadas Rota 1 e Rota 2. Em ambas as rotas, a mistura inicial de agregados AR-C0 é submetida ao beneficiamento, gerando produtos denominados de agregados beneficiados. O princípio de concentração em jigues estabelece que o material concentrado na gaveta inferior apresente quantidade maior de agregados de massa específica alta (produto denso) e nas gavetas meio e topo o contrário (produtos leves).

#### 3.2.1. Rota 1

A Rota 1 tem como característica principal o uso de somente um estágio de separação no jigue, ou seja, o material é beneficiado somente uma vez, gerando um material concentrado na gaveta inferior, denominado de Concentrado C1 (AR-C1), e materiais concentrados nas gavetas meio e topo denominado de Resíduo C1 (AR-R1). O procedimento operacional da Rota 1 inicia com o preenchimento das 3 gavetas com o material AR-C0, composição detalhada no item 3.1.4 e quantidades em massa apresentadas nas Tabelas 6 e 7. A Figura 35 apresenta o esquema do procedimento operacional da Rota 1.

FIGURA 35: Esquema do procedimento operacional da Rota 1



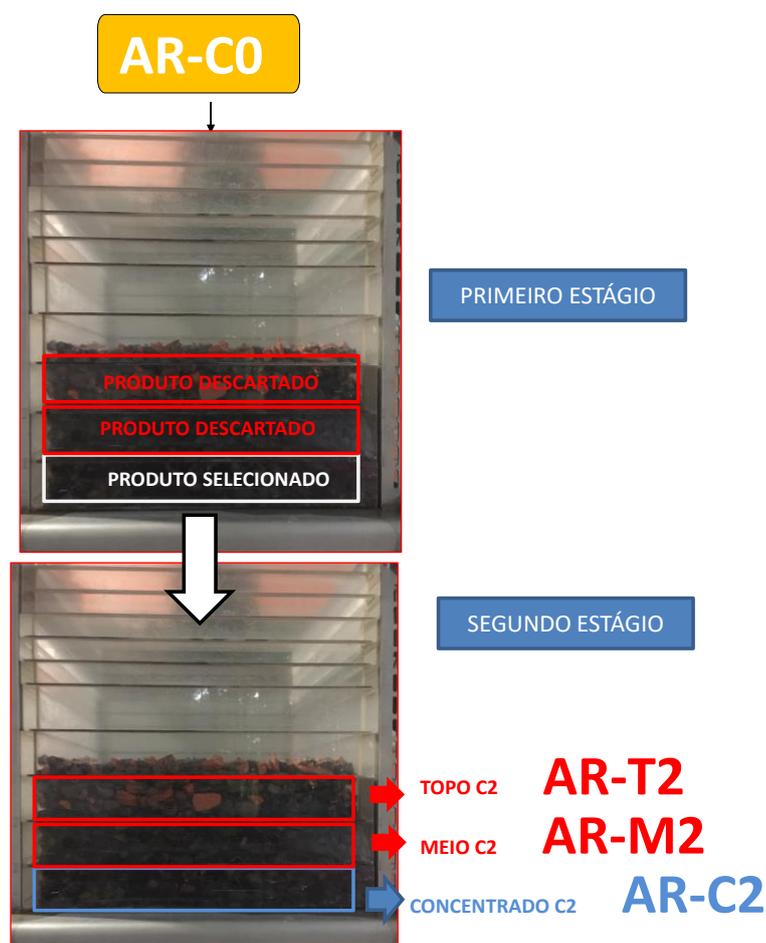
Fonte: a autora (2020).

### 3.2.2. Rota 2

A Rota 2 caracteriza-se por um procedimento com dois estágios de separação no jigge, o primeiro estágio é o mesmo da Rota 1, porém o material beneficiado nas gavetas de meio e topo é descartado e o material concentrado na gaveta inferior (produto denso denominado de Concentrado 1 na Rota 1) segue para alimentar um segundo estágio de separação.

Os materiais de interesse da Rota 2 são provenientes do segundo estágio de separação, no qual tem-se o agregado concentrado na última gaveta, Concentrado 2 (produto denso e de alta concentração/pureza), e os agregados concentrados nas gavetas topo e meio denominados Topo C2 (AR-T2) e Meio C2 (AR-M2) (onde topo/meio caracteriza a gaveta proveniente e C2 caracteriza o estágio proveniente). A Figura 36 apresenta o esquema do procedimento operacional da Rota 2.

FIGURA 36: Esquema do procedimento operacional da Rota 2



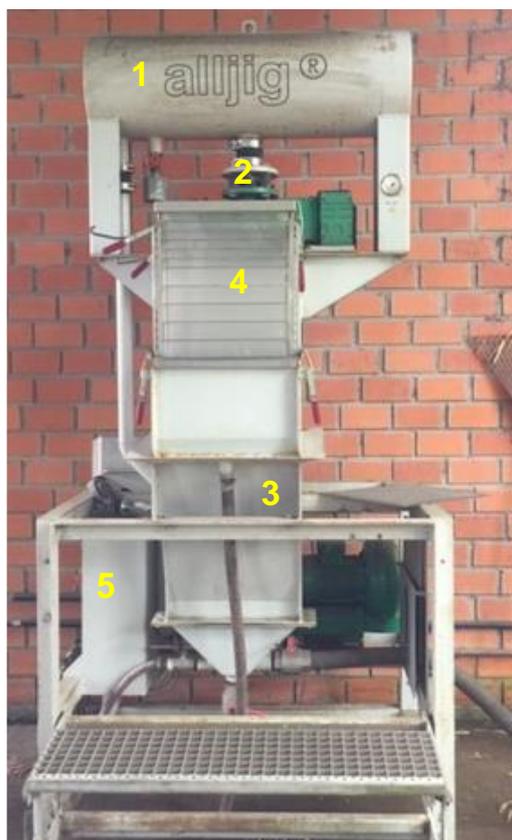
Fonte: a autora (2020).

A utilização de dois estágios de separação visa, por meio do reprocessamento do produto denso concentrado no primeiro estágio, melhoria na separação dos tipos de agregados, obtendo-se concentrados mais puros em qualidade. Porém, como desvantagem observa-se que uma grande quantidade de material é descartada durante o primeiro estágio de beneficiamento. Salienta-se que este material mesmo que concentrando agregados com densidades inferiores ainda poderá ser destinado a usos menos nobres dentro da construção civil.

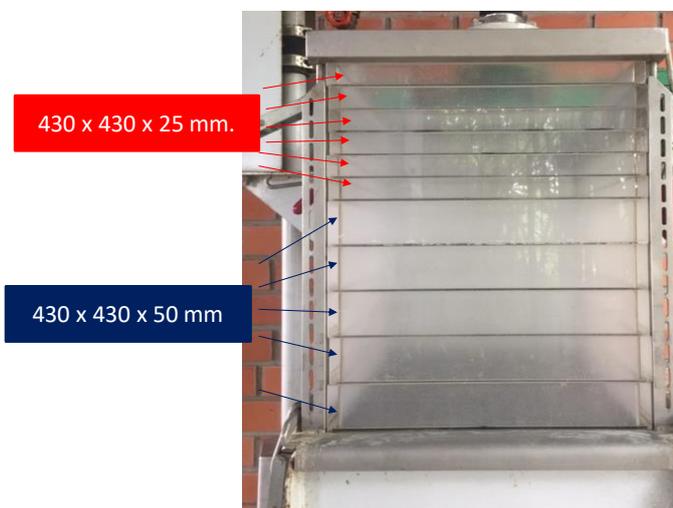
### 3.2.3. Parâmetros de Jigagem

O equipamento utilizado para o beneficiamento do material foi o Jigue hidráulico, modelo AllJig® S-400 da fabricante ALLMINERAL do laboratório LAPROM, conforme vista frontal da Figura 37.

FIGURA 37: Detalhe do equipamento da ALLMINERAL AllJig® S-400.



(a)



(b)

Fonte: a autora (2020).

O funcionamento do jigue pode ser explicado através dos detalhes da Figura 36(a): (1) câmara de ar: posicionada na parte superior do jigue recebe o ar do soprador e através dos controles das válvulas guilhotina e pistão injeta ar na arca; (2) válvulas guilhotina e pistão: controlam a entrada de ar na arca através da variação de vazão e frequência, respectivamente; (3) arca: compartimento preenchido com água submetido a um movimento pulsante pela ação do ar injetado proveniente da câmara de ar; (4) container do jigue: formado por compartimentos retangulares de Plexiglass (Polimetilmetacrilato – acrílico - Figura 36 (b)), usualmente denominados de gavetas, alocado sobre um suporte de tela perfurada com orifícios de 1mm, no qual a água proveniente da arca deverá pulsar. Suas dimensões são de (430 x 430 x 50) cm e (430 x 430 x 25) cm e possuem em sua base uma camada de borracha fixa para vedação do sistema; (5) painel de controle: posicionado na parte lateral do equipamento controla a frequência de pulsação do jigue através da frequência de entrada de ar na arca bem como o tempo de funcionamento. O equipamento opera em batelada e sua capacidade é no máximo de 50kg.

Parâmetros já utilizados em trabalhos anteriores (AMBRÓS, 2017; KHOURY *et al.*, 2018) foram utilizados neste trabalho. Estes parâmetros de operação do equipamento foram introduzidos no quadro de comando e mantidos constantes para todas as Rotas de beneficiamento, sendo eles:

- a) frequência de 90 rpm - a taxa de pulsação na câmara de estratificação;
- b) expansão do leito 10 cm;
- c) tempo de ensaio de 120 segundos.

Em cada ensaio do equipamento, denominado de jigada, foi utilizada a quantidade conforme Tabelas 6 e 7 (aproximadamente 20,61kg). Com a realização de um total de 9 jigadas para a Rota 1 e 37 jigadas para a Rota 2 foi possível obter aproximadamente 65 kg de cada tipo dos agregados beneficiados.

Ao final de cada ensaio, foi realizada a coleta do material concentrado em cada um dos compartimentos (gavetas) do equipamento separadamente, e o material ficou exposto ao ar para secagem. Após obtenção da quantidade total requerida para cada tipo de agregado beneficiado, a quantidade total coletada foi novamente homogeneizada e quarteada nas porções necessárias para a realização dos ensaios

de caracterização e confecção dos concretos, objetivando assim que todas as porções de amostras fossem representativas do material.

#### 3.2.4. Agregados Reciclados – Caracterização das Propriedades Físicas Pós Jigagem

Os agregados beneficiados em cada Rota de beneficiamento (AR-C1, AR-R1, AR-T2, AR-M2 e AR-C2) foram caracterizados fisicamente. Para isto foram quarteados conforme NBR NM 27 (ABNT, 2001), e após foram preparadas amostras conforme a necessidade de cada ensaio. O material utilizado para início das Rotas 1 e 2 também foi alvo de estudo e, como descrito anteriormente, foi denominado Composição Inicial C0 – Mistura Manual (AR-C0), pois não passa pelo processo de jigagem. As análises de distribuição granulométrica, índice de forma, massa unitária, massa específica e absorção seguiram os procedimentos descritos anteriormente nos itens 3.1.3.2 a 3.1.3.6 deste capítulo.

##### 3.2.4.1. Caracterização da Composição

Para uma avaliação complementar das propriedades físicas dos diferentes agregados beneficiados de cada rota, foram realizadas caracterizações das composições por tipo de RCD de cada beneficiado, avaliando-se o percentual obtido em cada gaveta a cada jigagem. Foi estabelecido que após finalizado um estágio de jigagem (Rota 1 - 1º Estágio e Rota 2 - 2º estágio), o material total beneficiado em cada gaveta seria coletado, seco ao ar e quarteado em amostras de aproximadamente 1kg cada. Cada amostra foi seca em estufa a 105°C até a constância de massa para pesagem da massa total e foram separados manualmente os diferentes tipos de agregados. Após a separação por tipo, foram pesados e calculados os percentuais de cada tipo de RCD em função da massa, estabelecendo assim a composição de cada agregado beneficiado. O agregado utilizado como alimentação das Rotas, AR-C0, também foi caracterizado da mesma forma.

### 3.3. ETAPA 3: CONCRETOS

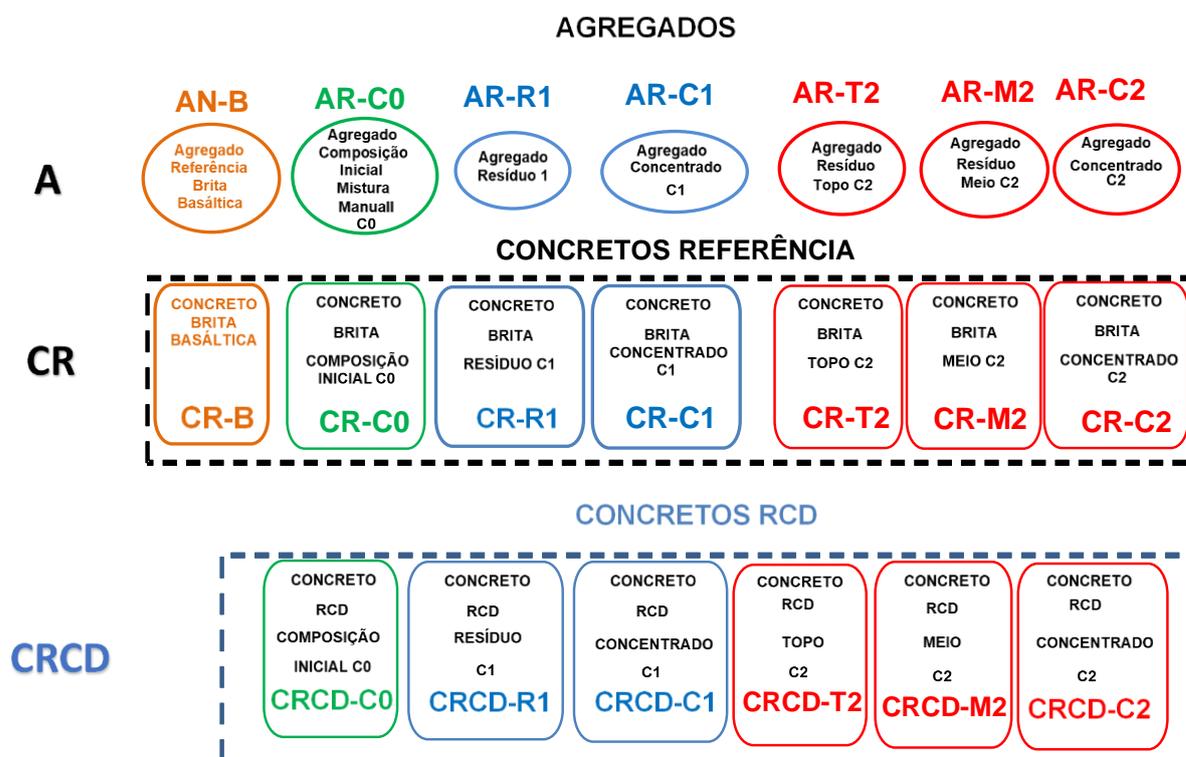
#### 3.3.1. Produção dos Concretos

Esta etapa consistiu em fabricar concretos com cada um dos agregados beneficiados com a intenção de avaliar a influência da heterogeneidade do beneficiado nas propriedades do concreto. Estes concretos foram denominados Concretos de RCD (CRCD).

Em função da provável diferença na distribuição granulométrica dos agregados beneficiados foi estabelecido que seriam fabricados concretos de mesmo traço e teor de argamassa utilizando o agregado graúdo brita basáltica com a mesma distribuição granulométrica de seu beneficiado de comparação, ou seja, AN-B teve sua composição granulométrica ajustada para cada tipo de AR obtido. Esta condição permite a análise da influência do agregado beneficiado reciclado nas propriedades do concreto fresco e endurecido, descartando o efeito da granulometria. Desta forma, tem-se a denominação do Concreto Referência (CR). A Figura 38 apresenta esquematicamente os diferentes tipos de agregados, concretos e suas siglas de nomenclatura.

Visando obter uma referência para todos os concretos foi produzido um concreto utilizando brita basáltica sem alterações em sua distribuição granulométrica, sendo o agregado denominado brita basáltica (AN-B) e o concreto Concreto Referência Brita Basáltica (CR-B). Por se tratar de agregado referência e concreto referência, este foi o primeiro a ser confeccionado, e a partir de sua mistura foi estabelecido o teor ideal de argamassa que, para se manter constante em todos os demais concretos produzidos com os diferentes agregados de resíduos de construção e demolição beneficiados, foi levemente majorado. Foi testado e estabelecido, sem perda de propriedades, que um teor superior de argamassa seria utilizado, 54%, não havendo assim necessidade de ajuste nos demais concretos, criando uma variável adicional. A sigla de nomenclatura de cada tipo de concreto é composta de duas partes, a primeira faz referência ao tipo de concreto onde CR – Concreto referência representa os agregados referência de brita basáltica nas diferentes distribuições granulométricas, e o CRCD – Concreto RCD os diferentes agregados reciclados avaliados, misturado manualmente ou beneficiado. A segunda parte da sigla se refere ao tipo específico de agregado, sendo eles B- brita basáltica, C0 – Composição Inicial, R1 - Resíduo 1, C1 - Concentrado C1, T2 – Topo C2, M2 – Meio C2 e C2 - Concentrado C2.

FIGURA 38: Tipos de concretos



Fonte: a autora (2020).

Para a produção dos concretos foi utilizado o método denominado EPUSP/IPT estabelecido pela Escola Politécnica da USP através do método desenvolvido no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (Helene e Terzian, 1992). Este método de dosagem caracteriza-se pela obtenção experimental de um diagrama de dosagem, que correlaciona resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento por metro cúbico de concreto. O método consiste em uma definição inicial experimental do teor ideal de argamassa para o agregado graúdo utilizado. O valor de abatimento é pré estabelecido, sendo definido como parâmetro de controle. Para tanto foram definidos o abatimento (12+/- 2 cm), a dimensão máxima do agregado graúdo (19mm) e foram estabelecidos três traços, um traço intermediário de 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) e, baseado nas informações dessa mistura, confeccionando mais dois, sendo um mais rico (1:3,5) e outro mais pobre (1:6,5). O teor ideal de argamassa foi definido após a confecção

do concreto referência, denominado Concreto Referência Brita Basáltica, e este teor foi majorado de 52 para 54%, de forma que contemplasse as demais composições de agregados. A Tabela 8 apresenta a quantidade de cada material para os traços citados. Buscando minimizar os fatores de erro, o tipo e lote do cimento (CPIV-32RS, massa específica 2,76kg/dm<sup>3</sup>), os lotes dos agregados miúdo (areia média passante na peneira com malha de abertura de #4,75mm da cidade de Porto Alegre, massa específica 2,63kg/dm<sup>3</sup>) e agregado graúdo natural (basalto da cidade de Montenegro – RS, massa específica 2,57kg/dm<sup>3</sup> e DMC 19mm), os equipamentos utilizados, os operadores e executores dos ensaios, e os demais parâmetros que podem influenciar os resultados do experimento foram mantidos constantes.

TABELA 8. Teor de argamassa, traço em massa e quantidade de cimento e areia por traço de concreto para uma mistura de 20kg de brita.

TRAÇO	TEOR DE ARGAMASSA (%)	TRAÇO UNITÁRIO (massa)			CIMENTO (kg)	AREIA (kg)
		1	a	P		
1:3,5	54	1	1,43	2,07	9,66	13,82
1:5	54	1	2,24	2,76	7,25	16,23
1:6,5	54	1	3,05	3,45	5,80	17,68

Fonte: a autora (2020).

Em função da alta absorção dos agregados reciclados foi estabelecido que estes, antes da mistura, deveriam estar na condição saturado superfície seca com 90% de água absorvida, de modo a evitar uma absorção exagerada nos primeiros minutos de mistura e erro na definição da quantidade de água de amassamento, bem como grandes variações no abatimento. Para tanto os agregados graúdos foram mantidos em água por 24 horas, após foram colocados em peneiras de modo a retirar o excedente de água. Foram medidas as massas dos agregados até a condição de saturado superfície seca com 90% de teor de água absorvida.

A pré-saturação (entre 80 e 90% da absorção de água) tem sido recomendada por diversos pesquisadores, tanto para agregados leves quanto para agregados de RCD. É uma abordagem clássica utilizada para se contornar a perda de consistência do concreto, evitando-se o uso de aditivos, e melhorar o seu comportamento mecânico (ÂNGULO E FIGUEIREDO, 2011; CORDEIRO, 2013; CORREIA; DE BRITO; PEREIRA, 2006; LEITE, 2001, MALYSZ, 2018; NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018;).

Para a obtenção dos concretos a sequência de inserção dos materiais na betoneira foi estabelecida da seguinte forma, primeiro a totalidade da brita, seguida da areia, do cimento e pôr fim a água. Foi estabelecido que a trabalhabilidade da mistura seria avaliada durante o processo, foram determinados os abatimentos até a obtenção de valores de 12 $\pm$  2cm, neste momento verificava-se a quantidade total de água utilizada para o cálculo da relação a/c.

Foram moldados cinco corpos de prova de formato cilíndrico (dimensões 10 x 20 cm) para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade. A confecção dos corpos de prova seguiu o estabelecido na NBR 5738 (ABNT, 2016) para moldagem e cura. A moldagem se deu imediatamente após a mistura e o concreto foi adensado em mesa vibratória, sendo os moldes metálicos preenchidos em duas camadas, com 15 segundos de vibração por camada.

Os corpos de prova foram mantidos cobertos por lona plástica até serem desmoldados, 24 horas após a concretagem, e armazenados em câmara úmida (com temperatura controlada de 23 $\pm$ 2°C e umidade relativa entre 90 a 100%) até a idade de 28 dias.

### 3.3.2. Propriedades no Estado Fresco

#### 3.3.2.1. Trabalhabilidade

Para a definição da trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998). A quantidade de água utilizada na dosagem foi quantificada para atingir os valores de abatimento definidos de 12  $\pm$  2 cm, conforme já citado.

#### 3.3.2.2. Massa Específica

A massa específica do concreto foi avaliada de acordo com a NBR 9.833 (ABNT, 2009e). É determinada pela relação entre a massa de concreto e o seu volume após adensamento, incluindo neste volume o ar eventualmente retido ou propositalmente incorporado a ele.

### 3.3.3. Propriedades no Estado Endurecido

Para a avaliação das propriedades no estado endurecido foram realizados os ensaios mecânicos de determinação da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade. A idade adotada para a realização dos ensaios dos concretos foi a de 28 dias, sendo ensaiados cinco corpos de prova por traço e todos os corpos de prova tiveram as bases previamente retificadas, conforme definido na NBR 5738 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados na prensa informatizada do modelo EMIC MCT30 PC 200i do Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE) da UFRGS.

Para o tratamento dos resultados das propriedades no estado endurecido foi utilizado o método de análise de variância (ANOVA) complementadas pelo teste de Tukey, através do processamento em software específico, Statgraphics Centurion 16.103, a fim de observar a influência das Rotas de beneficiamento sobre as propriedades, podendo-se, assim, chegar a conclusões sobre a significância ou não dos mesmos, com um nível de confiabilidade estatística de 95%.

#### 3.3.3.1. Resistência à Compressão Axial

Para determinação da resistência à compressão axial dos concretos foram moldados corpos de prova conforme NBR 5.738 (ABNT, 2008), e ensaiados conforme NBR 5.739 (ABNT, 2018).

#### 3.3.3.2. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade foi obtido através do ensaio seguindo o procedimento da NBR 8.522 (ABNT, 2017). Foi utilizada a Metodologia A na qual a tensão é fixa e a velocidade crescente de 0,50MPa/s com pausas de 60 segundos para as medições, com repetição de 3 ciclos antes da ruptura. Antes do ensaio é necessário o conhecimento do valor de ruptura de 2 corpos de prova da mesma amostra de material de modo a utilizar como base 30% do valor da carga de ruptura para estabelecer o plano de carregamento do ensaio de módulo.

Posteriormente são calculados os módulos secantes e tangente de cada tipo

de concreto conforme a NBR 8.522 (ABNT, 2017).

#### 3.3.3.3. Intensidade de Ligante

O índice de intensidade de ligante (IL) foi determinado através da Equação 1 conforme apresentada no item 2.4.2.3, sendo utilizado para avaliar a eficiência dos concretos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos, alguns tabulados através de médias, sendo os dados e tabelas completas apresentados nos Apêndices ao final do trabalho. Similar à estrutura descrita na metodologia experimental, os resultados também são agrupados em etapas.

### 4.1. ETAPA 1: AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

#### 4.1.1. Caracterização das Propriedades Físicas dos Agregados - Natural, Reciclados e Composição Inicial

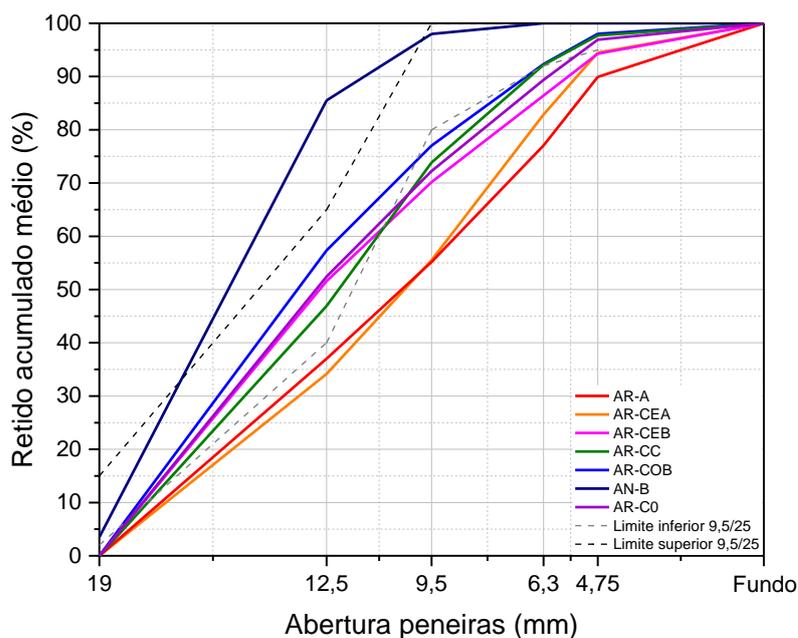
Neste subitem são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas do agregado graúdo natural (AN-B) e dos agregados graúdos reciclados (AR), bem como os do agregado referente à composição inicial (AR-C0). Por se tratar de material de referência tanto na fase de propriedades físicas quanto na obtenção dos concretos, os resultados dos ensaios do agregado graúdo natural brita basáltica (AN-B) foram fontes comparativas dos demais agregados e do AR-C0.

##### a) Distribuição Granulométrica

A Figura 39 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos AR, do AN-B, do AR-C0 e os limites superior e inferior das zonas granulométricas 4,75/12,5mm e 9,5/25mm da norma NBR 7.211 (ABNT, 2019c). O AN-B apresentou a distribuição granulométrica mais próxima dos limites superiores da norma, sendo que aproximadamente 70% de sua curva encontra-se acima do limite superior da zona granulométrica 9,5/25mm. No outro extremo do gráfico, próximo aos limites da zona 4,75/12,5mm, têm-se as curvas das distribuições granulométricas dos AR-A (agregados reciclados de argamassa) e AR-CEA (agregados reciclados cerâmicos de alta resistência). Observa-se que estes agregados possuem curvas de distribuição granulométrica mais uniformes, porém invertem seu comportamento a partir da abertura 9,5mm das peneiras (50% do material acumulado). Neste ponto, o agregado

de AR-A que se apresentava mais próximo ao limite inferior da 9,5/25mm inverte o comportamento em relação ao AR-CEA.

FIGURA 39: Curvas de distribuição granulométrica dos AR, AN-B, AR-C0 e limites da norma NBR 7.211 (ABNT, 2019c).



O AR-CEA apresentou comportamento em sua curva de distribuição granulométrica semelhante ao da curva de distribuição do AR-COB (agregado reciclado concreto de baixa resistência), porém o AR-CEA apresenta curva de distribuição abaixo do limite inferior da zona 9,5/25mm. A distribuição granulométrica do AR-CC (agregado concreto convencional) apresentou distribuição próxima às do AR-COB e mostra que 60% de sua massa se encontram entre o limite superior da 4,75/12,5mm e inferior da 9,5/25mm e os 40% restantes se apresentaram próximo ao limite inferior desta faixa (9,5mm).

Quando comparados à distribuição granulométrica do AN-B, os resultados das distribuições dos agregados reciclados apresentam granulometria mais fina, podendo-se justificar tais comportamentos em função da menor resistência dos materiais, com maior tendência de fratura pelo processo de cominuição. Para os casos dos concretos apresentarem distribuições inferiores à da AN-B, explica-se também pelo teor de

argamassa aderida neste agregado, que faz com que as partículas se tornem mais frágeis.

Alguns estudos afirmam que o agregado reciclado não se encaixa dentro de nenhuma faixa de graduação prevista na norma NBR 7.211 (ABNT, 2019c) bem como apresentam valores de dimensão máxima característica inferiores devido, na maior parte dos casos, ao processo de cominuição (BUTLER, 2003; CABRAL, 2007; LEITE, 2001; PARK et al., 2018). No entanto, os resultados obtidos demonstram que os agregados de concreto (AR-COB e AR-CC) e AR-CEB apresentam a maior parte de sua distribuição entre os limites da zona granulométrica  $d/D$  igual a 9,5/25mm.

Complementando os resultados apresentados para as curvas das distribuições granulométricas dos diferentes agregados reciclados e da brita basáltica, a Tabela 9 compara os dados obtidos do Módulo de Finura e da Dimensão Máxima Característica (DMC) destes agregados.

TABELA 9. Módulo de Finura e Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados reciclados e da brita basáltica.

<b>AGREGADO</b>	<b>MÓDULO DE FINURA</b>	<b>DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm)</b>
AR-A	5,95	19
AR-CEB	6,36	19
AR-CEA	6,22	19
AR-COB	6,65	19
AR-CC	6,60	19
AN-B	7,02	19
AR-C0	6,53	19

O Módulo de Finura do AN-B apresentou maior valor quando comparado aos demais agregados. Quando comparados somente os valores dos agregados reciclados, verifica-se que os concretos apresentaram os maiores valores, seguidos dos cerâmicos. O AR-A apresentou o menor valor, pelos fatores já expostos de fragilidade do material. Todos os agregados, inclusive o de brita basáltica e o AR-C0, apresentaram o mesmo valor de dimensão máxima característica.

## b) Absorção

Os resultados de taxa de absorção realizado pelo método de Leite (2011) dos agregados reciclados e do agregado de brita basáltica seguem na Tabela 10. A fim de uma comparação direta a coluna da direita da tabela apresenta os dados de absorção por tipo de agregado de RCD encontrados na literatura.

TABELA 10. Resultado do teor de absorção dos AR, AN-B, AR-C0 e respectivos resultados da literatura.

AGREGADO	ABSORÇÃO (%)	Dados de absorção da literatura
AR-A	7,15	9,52% (CABRAL, 2020), 11,5%* (LEITE, 2007), até 15%* ÂNGULO E FIGUEIREDO (2011),
AR-CEB	8,77	10,96% (CABRAL, 2007); 20,7% (LEITE, 2007), 12% (CORREIA; DE BRITO; PEREIRA, 2006), 11,5% (NEPOMUCENO, ISIDORO E CATARINO, 2018), Até 24% ÂNGULO E FIGUEIREDO (2011),
AR-CEA	4,74	
AR-COB	4,24	5,3% (THOMAS <i>et al.</i> , 2019), 5,65% (CABRAL, 2020), 5,9% (ECKERT E OLIVEIRA, 2017), 7,1 (BAHRAMI <i>et al.</i> , 2020), até 3 % ÂNGULO E FIGUEIREDO (2011), 11,5%* (LEITE, 2007), até 15%* ÂNGULO E FIGUEIREDO (2011),
AR-CC	4,51	
AN-B	0,95	1% (CORREIA; DE BRITO; PEREIRA, 2006),
AR-C0	4,53	-

\* literatura indica teor proveniente de agregado composto de material cimentício

Fonte: a autora (2020).

Em relação ao comparativo com a literatura, verifica-se que os dados obtidos na maioria dos estudos apresentam resultados superiores e variados dentro de uma mesma classe de agregados. Este aspecto ressalta a variabilidade desta propriedade do agregado reciclado que depende tanto do tipo quanto da qualidade do material que compõe o RCD.

Os AR-CC e AR-COB apresentaram resultados próximos, resultados estes que estão relacionados com a característica do agregado reciclado de concreto conter o agregado natural e algum teor de argamassa. O resultado esperado apresentaria o AR-CC com valores inferiores de absorção quando comparado ao AR-COB, porém a caracterização realizada após britagem mostrou que o primeiro não apresentou desprendimento de argamassa aderida, rompendo como material homogêneo (argamassa e brita juntos). Por outro lado, o AR-COB apresentou separação do

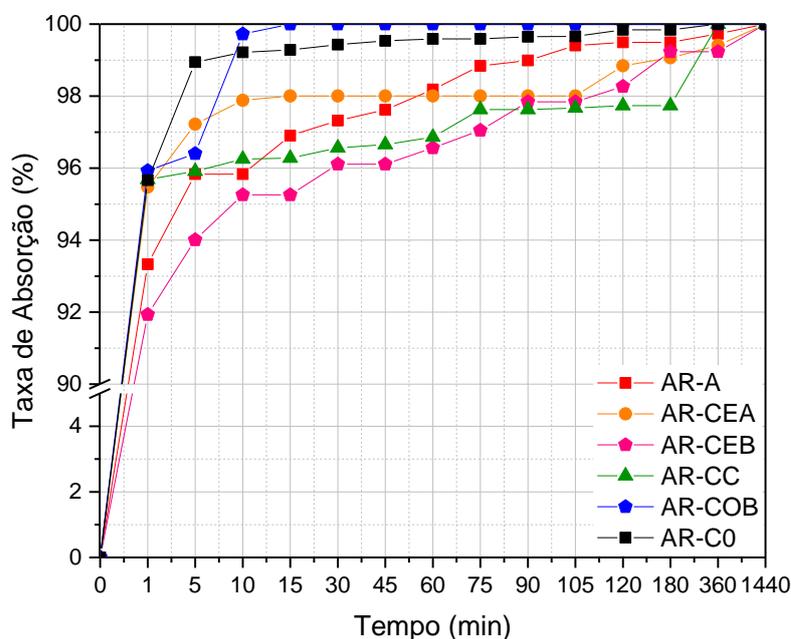
agregado e da argamassa aderida, formando mais finos, prevalecendo grãos de rocha com teor de argamassa inferior ao AR-CC.

Os resultados apresentam conformidade com a literatura que afirma que o agregado de concreto apresenta menor porosidade, e por consequência, menor absorção quando comparado aos demais reciclados (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011; CABRAL, 2007; LOVATO, 2007).

Cabral (2007) verificou que os agregados reciclados de cerâmica foram os que apresentaram maiores valores de absorção, em função de apresentarem uma maior porosidade quando comparados às demais matérias-primas dos agregados reciclados. Os agregados de concreto e de argamassa exibiram valores intermediários e tal comportamento pode justificar o resultado de AR-CEB, que apresenta o maior resultado quando comparado aos demais. Corroborando com os resultados de AR-A e AR-CEB tem-se o resultado de Lovato (2007), afirmando que a absorção é maior para agregados com composição rica em argamassa e cerâmicos.

O método de Leite (2001) também apresenta como resultado a taxa de absorção, que permite verificar o desenvolvimento da absorção ao longo do período de duração do ensaio. A seguir são apresentados os resultados para o AR-C0 e os demais agregados reciclados. A Figura 40 mostra que, independentemente do tipo do agregado de RCD, a absorção de água no primeiro minuto equivale de 92% a 96% da absorção de água após 24 h. A taxa de absorção para o agregado de brita basáltica mostrou que o material absorveu em 24h 0,95 % de água, resultado este inferior aos demais resultados dos agregados reciclados. O agregado reciclado de cerâmica de baixa resistência apresentou maior valor de taxa absorção quando comparado aos demais, seguido pelo agregado de argamassa. Uma das causas destes valores acentuados é a porosidade destes materiais, conforme dados da literatura que apontam que agregados reciclados possuem uma taxa de absorção maior em função de apresentar um teor de porosidade também maior (BRITO e DHIR, 2014; BRITO e SAIKIA, 2013; CABRAL, 2007; SILVA, LOVATO, 2007; NEPOMUCENO, ISIDORO E CATARINO, 2018).

FIGURA 40: Taxa de absorção dos agregados reciclados: AR-A, AR-CEA, AR-CEB, AR-CC, AR-CCB e AR-C0.



c) Massa Específica, Massa Unitária, Índice de Volume de Vazios e Índice de Forma

Os resultados dos ensaios de massa específica, massa unitária, índice de volume de vazios e índice de forma são apresentados na Tabela 11.

TABELA 11. Massa específica, massa unitária e índice de forma dos agregados reciclados e da brita basáltica.

AGREGADO	MASSA ESPECÍFICA		MASSA UNITÁRIA (g/cm <sup>3</sup> )	ÍNDICE DE VOLUME DE VAZIOS (%)	ÍNDICE DE FORMA
	Massa espec. Picnômetro (g/cm <sup>3</sup> )	Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> )			
AR-A	2,04	2,10	1,28	38,16	2,34
AR-CEB	2,43	2,22	1,23	73,65	2,94
AR-CEA	2,47	2,35	1,18	51,04	2,66
AR-COB	2,48	2,46	1,53	38,06	1,87
AR-CC	2,76	2,77	1,50	45,75	2,00
AN-B	2,90	2,93	1,57	46,14	2,19
AR-C0	2,68	2,51	1,27	51,06	2,41

Conforme se observa, os valores de massa específica revelaram que, quando comparados os agregados reciclados com o agregado referência de brita basáltica, este em coerência com o apresentado por Neville (2016) de  $2,8 \text{ g/cm}^3$  para basaltos, todos se apresentaram inferiores (decréscimo de 3% até 12%). Os resultados de massa unitária também apresentam a mesma característica, inferiores, de 5% a 25%. Em concordância com os resultados de Lovato (2007), a massa específica apresenta valores inferiores, na faixa de 9,5-15,8%, e da mesma forma para a massa unitária, de 23% até 30% de decréscimo. Sabe-se que a redução da massa específica dos agregados reciclados se deve às características das matérias-primas, que possuem uma menor densidade que a dos agregados graúdos naturais. Já a redução da massa unitária dos agregados reciclados ocorre tanto pela redução da própria densidade do material e da alta porosidade característica, como também pela forma mais lamelar das partículas dos agregados (CABRAL,2007; KOUHRY *et al.*, 2017; LOVATO,2007; NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018).

Os resultados de índice de forma dos agregados reciclados, concordam com os relatos da literatura, que apontam um consenso em função da tendência da forma de cada tipo de agregado reciclado em função do material básico de origem e o método de cominuição (AFSHAR *et al.*, 2017; PARK *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2016). Verifica-se que os agregados de concreto apresentam resultados mais próximos ao AN-B, seguidos pelo AR-A e os agregados cerâmicos, os últimos com tendência a apresentarem formas mais lamelares que os agregados cimentícios (LEITE,2007; NEPOMUCENO, ISIDORO, CATARINO, 2018). Vale ressaltar que todos os resultados de índice de forma estão dentro do limite de tolerância 3 tanto na norma NBR 7.211 (ABNT, 2019c) quanto na norma NBR 15.112 (ABNT, 2004b).

Os agregados reciclados cerâmicos, AR-CEA e AR-CEB, apresentaram os maiores valores de índices de volume de vazios entre os demais, 51,04% e 73,65% respectivamente, também apresentaram os menores valores de massa unitária,  $1,18 \text{ g/cm}^3$  e  $1,23 \text{ g/cm}^3$ , juntamente com os maiores índices de forma, 2,66 e 2,99. Desta forma verifica-se que são mais lamelares, o que aliado a massa unitária de baixo valor pode explicar o alto índice de volume de vazios, uma vez que pelo módulo de finura (AR-CEA com 6,22 e AR-CEB com 6,36) e massa específica (AR-CEA de 2,47 e 2,35  $\text{g/cm}^3$  e AR-CEB de 2,43 e 2,22  $\text{g/cm}^3$ ) apresentam apenas valores intermediários.

Especificamente em relação ao AR-A, valores inferiores de massa específica esperados se verificam, uma vez que o material argamassa é mais leve que a rocha basáltica originária da brita, e normalmente, mais leve que o material cerâmico. Este resultado é próximo ao obtido por Cabral (2007), de 2,01 g/cm<sup>3</sup>, e 2,2 g/cm<sup>3</sup> obtido por Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018). Em relação ao volume de vazios, o agregado apresenta o segundo menor valor dentre os reciclados (38,16%), massa unitária e índice de forma intermediários, de 1,28 g/cm<sup>3</sup> e 2,34, respectivamente, e menor módulo de finura (5,95).

Dentre todos os agregados reciclados, os maiores valores de massa unitária, massa específica e módulo de finura são encontrados nos agregados de concreto, sendo 1,53 g/cm<sup>3</sup>, 2,46 e 2,48g/cm<sup>3</sup> e 6,65 para AR-COB e 1,50 g/cm<sup>3</sup>, 2,76 e 2,77g/cm<sup>3</sup> e 6,60 para o AR-CC. Acredita-se que as pequenas diferenças de valores observadas entre estes agregados de concreto podem ser explicadas, tanto pelo teor, quanto qualidade da argamassa aderida (BRAVO *et al.*, 2015; KOUHRY *et al.*, 2018; OMARY, GHORBEL ;WARDEH, 2016). Por outro lado, estes agregados apresentam os menores valores de índice de forma, 1,87 (AR-COB) e 2,00 (AR-CC), indicando uma forma menos lamelar que as demais, inclusive quando comparado ao AN-B, significando que o material possui uma forma mais cúbica em relação à brita basáltica.

Sabendo-se que a forma e tamanho da partícula do agregado são importantes propriedades que influenciam no fator de empacotamento do material (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016; WEIDMANN, 2008), verifica-se que o volume de vazios intermediário em relação aos demais, 38,06% para o AR-COB e 45,75% AR-CC pode ser explicado em função de se apresentar como um agregado mais grosso e menos lamelar.

No comparativo geral, verifica-se que o AR-CC, entre todos os agregados reciclados, é o que apresenta os resultados que mais se assemelham ao agregado graúdo natural, AN-B.

O agregado reciclado AR-C0, composto de partes iguais em volume dos agregados reciclados supra citados, e com composição mássica de 39% de agregados de concreto, 28% de agregados cerâmicos e 32% de agregados de argamassa, apresenta valores intermediários de massa unitária (1,27g/cm<sup>3</sup>), índice de forma (2,41) e módulo de finura (6,53), justificados pela sua composição. Para os resultados das propriedades volume de vazios (51,06%) e massa específica (2,68 e

2,51g/cm<sup>3</sup>), verificou-se proximidade aos resultados dos agregados cerâmicos e concretos.

#### 4.1.2. Critério de Concentração

Como última propriedade a ser analisada antes do início das Rotas de jigagem, foram calculados os Critérios de Concentração (CC) Seco e Submerso conforme estabelecido no item 2.5.2, e considerando tanto a massa específica do material seco (método Picnômetro), quanto totalmente submerso em água (método de Leite). Foram relacionadas todas as qualidades dos agregados reciclados de modo a analisar as possibilidades de interação entre agregados. Este critério estabelece que quanto maior o valor, mais fácil se torna a separação dos dois materiais analisados, uma vez que resultados maiores provém de diferenças maiores entre massas específicas.

A Tabela 12 apresenta os agregados relacionados, bem como o Critério de Concentração seco e submerso de cada interação. Verifica-se que os valores obtidos para o CC submerso são maiores que do CC seco, o que se justifica em função da diferença de fluido considerado, e corroborando com a afirmação de que o jigue à água torna o beneficiamento mais eficiente. Analisando os resultados dos dois parâmetros pode-se afirmar que em ambos as interações dos AR-CC com AR-A apresentam os mais altos valores de Critério de Concentração. Estes resultados se mostram interessantes, uma vez que identifica a possibilidade de sucesso na separação dos materiais considerados mais benéficos ao concreto dos demais.

TABELA 12. Critério de Concentração das interações entre tipos de agregados graúdos reciclados.

Interações		CC Seco	CC Submerso
AR-CC	AR-A	1,35	1,61
AR-CC	AR-CEB	1,14	1,48
AR-COB	AR-A	1,22	1,33
AR-CC	AR-CEA	1,12	1,31
AR-CEA	AR-A	1,21	1,23
AR-CC	AR-COB	1,11	1,21
AR-COB	AR-CEB	1,02	1,22
AR-CEB	AR-A	1,19	1,09
AR-CEB	AR-CEA	1,02	1,13
AR-COB	AR-CEA	1,00	1,08

Hu *et al.* (2019) realizaram estudos de separação em jigue à ar de agregados de concretos e cerâmicos provenientes de RCD com faixa granulométrica variando de 5mm à 10mm (sem caracterização prévia de resistência destes materiais), e obteve o CC de 1,28 (considerando a densidade do concreto  $2,52\text{g/cm}^3$  e do cerâmico  $1,97\text{g/cm}^3$ ). Vale ressaltar que esta diferença entre densidades resultou em um beneficiamento onde os autores obtiveram e uma pureza de 95% em agregados de concreto. Xing (2004) comparou exemplos de Critérios de Concentração da separação de um concreto de massa específica  $2,4\text{g/cm}^3$  e de um cerâmico de  $1,7\text{g/cm}^3$  em jigue à ar e jigue à água, obtendo valores de 1,4 e 2,0 respectivamente. Este resultado mostra que neste caso se obteria um processo de beneficiamento mais eficiente utilizando o equipamento jigue à água corroborando com os resultados apresentados na Tabela 12.

## 4.2. ETAPA 2: ROTAS DE BENEFICIAMENTO

A etapa denominada Rotas de Beneficiamento iniciou-se após a caracterização física de todos os agregados reciclados (AR-CC, AR-COB, AR-CEA, AR-CEB, AR-A e AR-C0), bem como a avaliação dos Critérios de Concentração. Após a realização de cada Rota de Beneficiamento são apresentados os resultados da avaliação das propriedades físicas dos produtos de interesse.

### 4.2.1. Rota 1

A Figura 41 apresenta uma representação esquemática do processo e detalhes da Rota 1, no qual é possível observar, à esquerda, o material que alimenta esta etapa, o AR-C0 (misturado manualmente e denominado Composição Inicial C0 Mistura Manual), bem como o material dentro do jigue (ao centro) e os produtos resultantes desta rota, à direita.

Observa-se ainda na Figura 41, o material da gaveta fundo que deu origem ao AR-C1 e a gaveta topo e meio que compõe o AR-R1. Avaliando quantitativamente do total AR-C0 (20,61kg) recuperou-se 7,32kg de AR-C1 (35,52% do total) e 13,29kg de AR-R1 (64,48% do total).

FIGURA 41: Rota 1 – representação esquemática do processo.



Fonte: a autora (2020).

A Figura 42 mostra a vista superior do jigue com o material antes do início da jigagem, sendo observada a completa mistura entre os diferentes tipos de agregados do AR-C0.

FIGURA 42: Rota 1 – composição inicial – AR-C0- antes do início da jigagem.

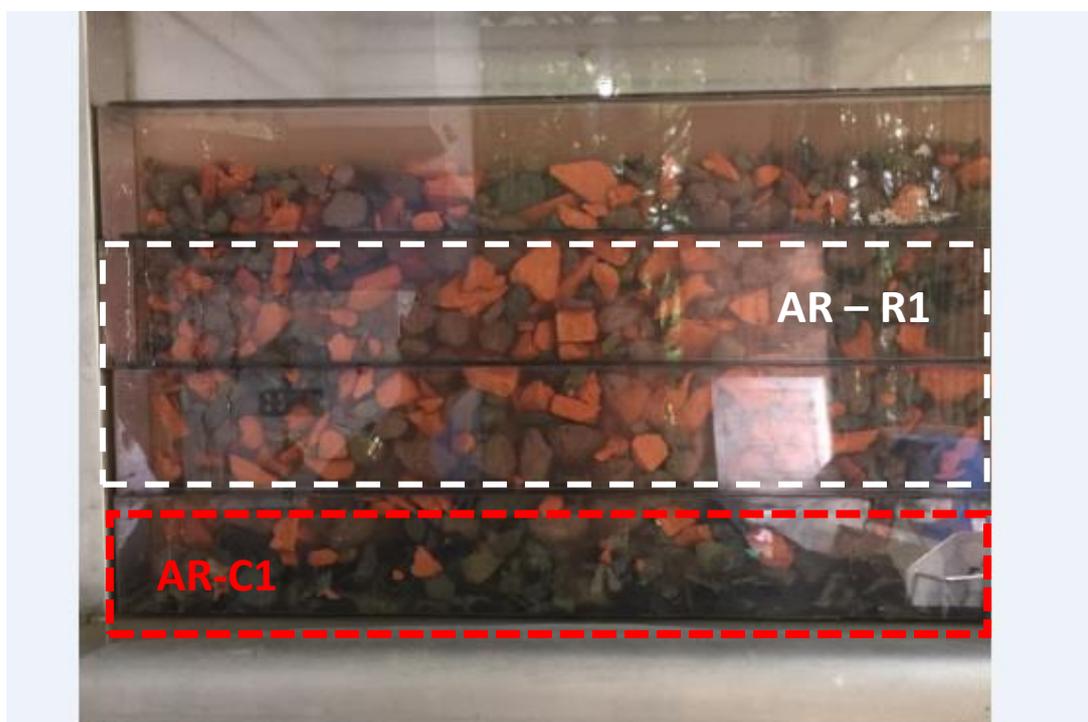


Fonte: a autora (2020).

A Figura 43 apresenta a vista frontal do jigue e a estratificação das gavetas após a jigagem, detalhe para as gavetas de fundo – AR-C1 e as demais gavetas – AR-R1. Percebe-se uma maior concentração de agregado de concreto na gaveta

inferior e uma mistura dos demais materiais nas gavetas superiores.

FIGURA 43: Rota 1 – detalhe da composição das gavetas pós jigagem.



Fonte: a autora (2020).

Após a retirada dos concentrados do equipamento, tem-se na Figura 44 o detalhe que confirma a percepção da estratificação dos agregados apresentados na Figura 43.

FIGURA 44: Rota 1 - detalhe dos agregados beneficiados: (a) bandeja meio e superior – AR-R1 e (b) bandeja inferior -AR-C1.



(a)



(b)

Fonte: a autora (2020).

O material AR-R1 apresenta uma grande quantidade de agregados cerâmicos conforme Figura 44(a), já a Figura 44(b) mostra um AR-C1 com uma grande quantidade de agregados de concreto e uma pequena quantidade de agregados cerâmicos. Este resultado era previsto em função tanto das características de funcionamento do equipamento quanto dos valores dos Critérios de Concentração encontrados e apresentados no item 4.1.2.

Para avaliar a Rota 1 de beneficiamento em relação às propriedades físicas dos agregados beneficiados, foram comparados os resultados para cada propriedade, distribuição granulométrica, absorção, massa específica, massa unitária e fator de forma. Também foram comparadas as frações das composições de cada material, resultados estes que ajudam a explicar as diferenças de propriedades entre os beneficiados.

Ressalta-se que o agregado reciclado AR-C0, mesmo não sendo beneficiado por jigagem, somente misturado manualmente, é avaliado em todas as suas propriedades físicas por se tratar da composição inicial das Rotas 1 e 2.

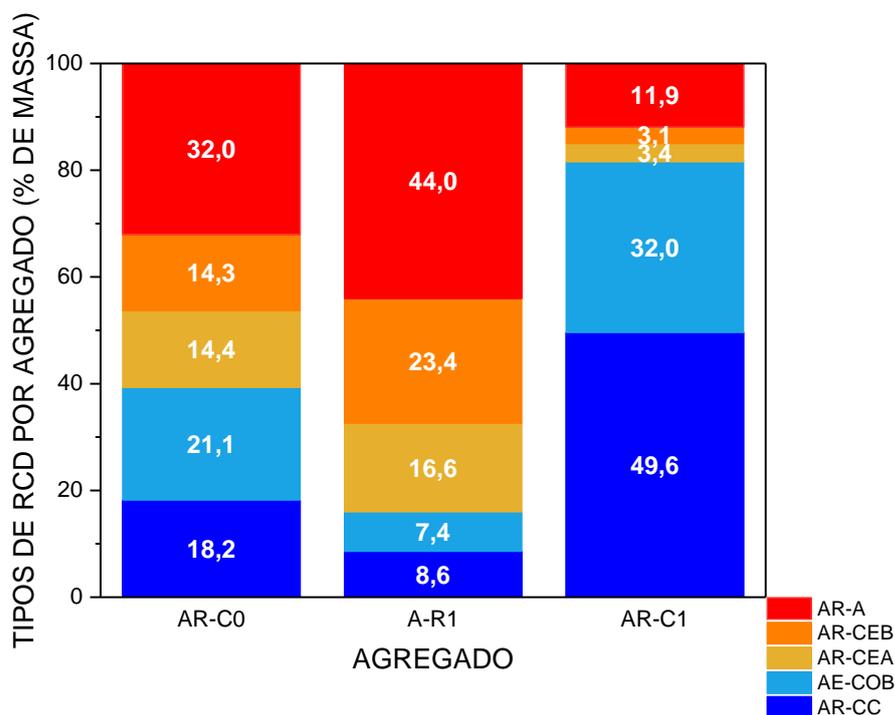
#### 4.2.1.1 Composição – Fração de materiais

A Figura 45 apresenta a caracterização da composição em fração mássica de cada agregado reciclado relacionado à Rota 1.

O primeiro tipo de agregado reciclado apresentado, AR-C0, mesmo tendo sua composição previamente conhecida e apresentada na Tabela 7, foi avaliado em relação a sua composição, apresentando resultado no qual os concretos representam 39,3% da massa total, os materiais cerâmicos somam 28,7% e a argamassa 32%, valores muito próximos aos da Tabela 7.

O AR-C1 apresenta concentração de 81,6% de concretos e apenas 6,5% de materiais cerâmicos e 11,9% de argamassa (Figura 45) e produziu em média 8,14 kg de material por cada acionamento do jig. Este resultado mostra que o beneficiamento obedece ao Critério de Concentração apresentado no item 4.1.2, que afirma a maior capacidade de separação dos concretos quando comparados aos demais materiais.

FIGURA 45: Fração de materiais dos AR da Rota 1 – AR-C0, AR-R1 e AR-C1.



Comparando os resultados de AR-C1 aos da literatura observa-se que se obteve um beneficiamento mais eficiente, uma vez que, Peticila *et al.* (2017) utilizaram jigues à água para beneficiar RCD com o mesmo volume e granulometria e obtiveram uma quantidade maior de materiais leves como argamassa (39,3%) e cerâmicos (23,5%) na gaveta inferior, e apenas 35,6% de material denso - rocha. Ao comparar os resultados obtidos com os estudos em jigues a seco, observa-se que o percentual de material denso concentrado na gaveta inferior é semelhante para os dois equipamentos Sampaio *et al.* (2016) obtiveram 86-92% e Cazacliu *et al.* (2014) 90,68% de concreto. Pode-se explicar tal comportamento através dos valores de CC saturado e seco (Tabela 12) que mostra que maiores valores CC para as interações AR-CC e AR-A tanto para o CC seco (1,35) quanto para o CC saturado (1,61). Porém, ao avaliar os materiais cerâmicos nesta gaveta o jigues à água apresenta melhores resultados, uma vez que nos estudos de Cazacliu *et al.* (2014) foi concentrado 11% de cerâmicos e para Sampaio *et al.* (2016) a quantidade de cerâmicos chegou a 8,35%. Considerando que o beneficiado AR-R1 (Figura 45) é composto pelos materiais concentrados nas gavetas superior e meio, produzindo aproximadamente 12,23 kg por jigagem, são esperadas quantidades superiores de materiais com baixa densidade, o que se confirma com o teor de 44% de argamassa e 40% de material

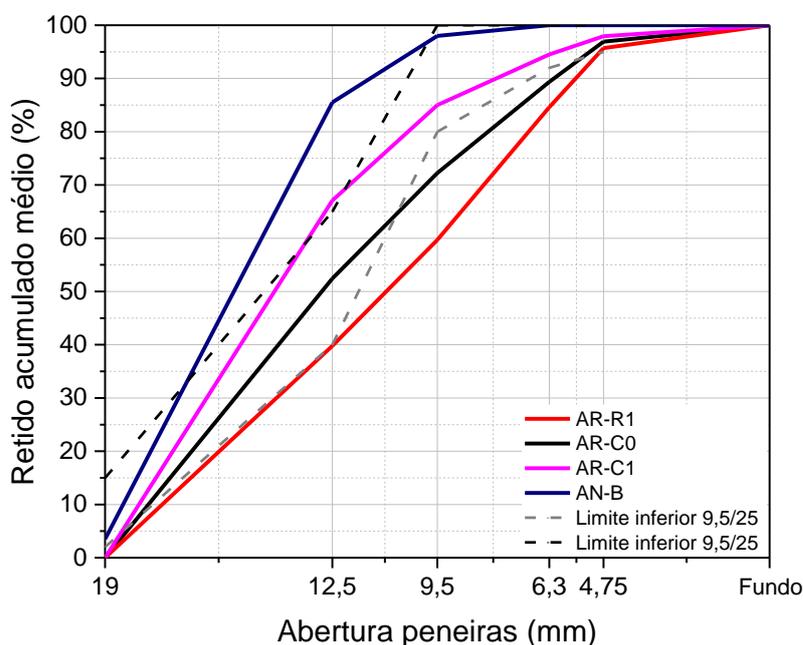
cerâmico, e menores quantidades de materiais mais densos, como o concreto (16%). Este resultado também complementa o resultado da composição do beneficiado AR-C1, apresentado anteriormente, que beneficiou uma quantidade maior de concretos. Resultado este semelhante ao encontrado por Peticila *et al.* (2017), que obtiveram nas gavetas de topo e meio 39,7% de material cerâmico, 50% de argamassa e 9,1% de rocha. Analisando o teor de materiais densos concentrados nas gavetas referentes ao agregado AR-R1, pode-se dizer que o jigue à água é mais eficiente, ou seja, concentra uma quantidade inferior de densos, conforme dados de Sampaio *et al.* (2016), que utilizando o jigue a seco, obteve concentração de agregados de concreto de até 48,67%, somando as gavetas topo e meio, para o beneficiamento de gesso, cerâmicos e concretos. Os resultados de Cazacliu *et al.* (2014) apontam na mesma direção, os mesmos RCD beneficiados também em jigue a seco obtiveram um concentrado de mais de 30% de concreto na gaveta meio e mais de 35% na gaveta de topo, o que representa uma grande quantidade de material denso misturado aos materiais leves.

#### 4.2.1.2 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados reciclados AR-C0, AR-R1 e AR-C1 e o agregado natural AN-B são representadas nas curvas da Figura 46.

Quando comparada à distribuição granulométrica do AN-B com o do AR-R1, verifica-se que esta possui diferente comportamento, e este pode ser explicado pela composição deste agregado beneficiado, rico em argamassa e materiais cerâmicos, obedecendo à distribuição granulométrica destes materiais.

FIGURA 46: Curvas de distribuição granulométrica – AR-C0, AR-R1, AR-C0 e AN-B



As dimensões máximas características apresentaram o mesmo valor para todos os beneficiados, 19mm, resultado semelhante aos agregados reciclados. Por outro lado, os módulos de finura acompanharam a distribuição de curvas da Figura 46, na qual o menor valor foi encontrado para o beneficiado AR-R1 (6,34) e o maior para o AR-C1 (6,73), conforme Tabela 13.

TABELA 13. Módulo de Finura e Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados beneficiados, AR-C0 e AN-B.

AGREGADO	MÓDULO DE FINURA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm)
AR-R1	6,34	19
AR-C1	6,73	19
AN-B	7,02	19
AR-C0	6,53	19

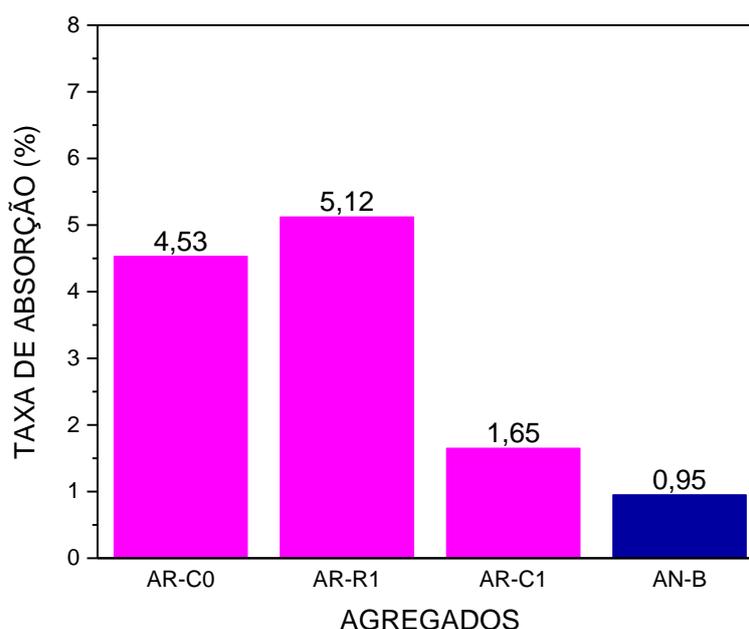
Analisando o comportamento da distribuição granulométrica dos agregados beneficiados, o AR-C1, por apresentar composição mais rica em concreto, se apresenta como mais próximo do comportamento da distribuição granulométrica do AN-B. Por outro lado, o beneficiado AR-R1 apresenta comportamento oposto, ou seja, por ser composto em sua maior parte de argamassa e materiais cerâmicos possui distribuição granulométrica distante da curva do AN-B e do AR-C1. O AR-C0

apresenta comportamento intermediário, justamente por apresentar em sua composição todos os materiais em proporções semelhantes em volume.

#### 4.2.1.3 Absorção

A Figura 47 apresenta um comparativo da taxa de absorção de cada agregado reciclado beneficiado na Rota 1, com os agregados referências AR-C0 e AN-B. O AR-C0 apresentou resultado próximo e inferior ao AR-R1 (4,53% e 5,12%), esperado em função de sua composição. Os agregados beneficiados AR-R1 e AR-C1 apresentaram resultados opostos em função de sua composição (AR-R1 rico em argamassa e cerâmicos - 5,12% e AR-C1 rico em concreto – 1,65%).

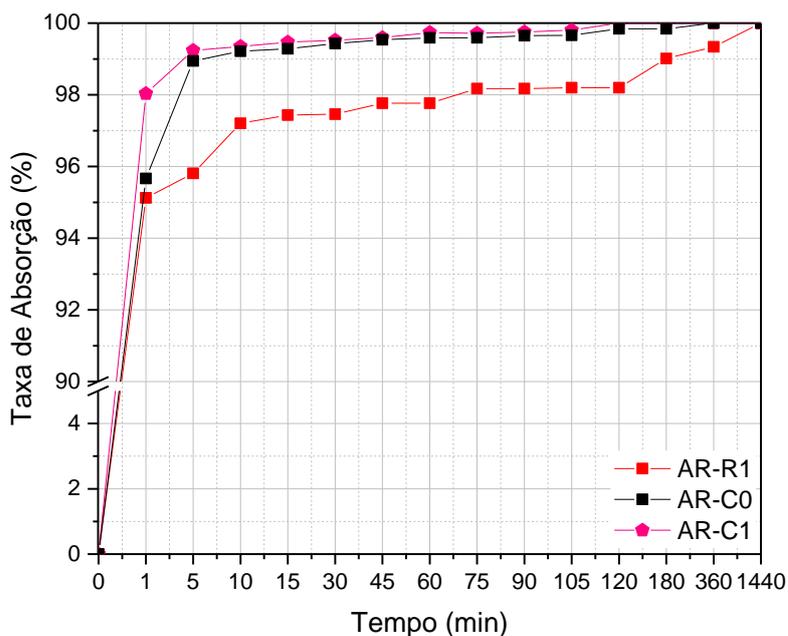
FIGURA 47: Comparativo da taxa de absorção dos agregados beneficiados na Rota 1, AR-C0 e AN-B.



A Figura 48 apresenta a curva de absorção para o período de 24h dos agregados reciclados AR-C0, AR-R1 e AR-C1. A avaliação da absorção do agregado reciclado AR-R1 mostra que de 95% do total absorvido em 24h (1440 minutos), até o primeiro minuto de imersão, são absorvidos 5,12%, conforme apresentado nas Figuras 47 e 48, respectivamente. Para Eckert e Oliveira (2017), a taxa de absorção obtida para uma composição de agregados de RCD de 74,5% argamassa e concreto

e 3,6% cerâmicos foi de 5,9%, por outro lado Peticila *et al.* (2017) obtiveram um valor de absorção de 13,20% para agregados concentrados nas gavetas topo e meio de jigagem à água.

FIGURA 48: Taxa de absorção – AR-C0, AR-R1 e AR-C1.



Para o agregado reciclado AR-C1, o ensaio de absorção mostrou que mais de 98% do total absorvido pelo material acontece até o primeiro minuto de imersão, conforme Figura 48, sendo que a taxa de absorção total encontrada foi de 1,65% Figura 47. Ao comparar aos valores relatados no estudo de Peticila *et al.* (2017) concentrados na gaveta inferior, verifica-se um valor muito superior de absorção, 11%, mas vale ressaltar que a literatura encontrou um material concentrado mais rico em argamassa e cerâmico.

#### 4.2.1.4 Massa específica, Unitária, Índice de Volume de Vazios e Índice de forma

A Tabela 14 apresenta os resultados para os ensaios de massa específica, unitária, índice de volume de vazios e índice de forma dos agregados AR-C0, AR-R1, AR-C1 e AN-B. Quando as massas específicas dos agregados reciclados são

comparadas com a do AN-B, verifica-se que os resultados dos beneficiados se apresentaram menores em função da tendência dos agregados reciclados apresentarem uma maior porosidade e, conseqüentemente, valores sempre inferiores nesta propriedade.

TABELA 14. Massa específica, massa unitária, índice de volume de vazios e índice de forma dos AR-C0, AR-R1, AR-C1 e AN-B.

AGREGADO	MASSA ESPECÍFICA		MASSA UNITÁRIA (g/cm <sup>3</sup> )	ÍNDICE DE VOLUME DE VAZIOS (%)	ÍNDICE DE FORMA
	Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> ) Picnômetro	Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> ) LEITE (2001)			
AR-R1	2,59	2,49	1,46	42,52	2,54
AR-C1	2,71	2,95	1,53	45,94	1,96
AN-B	2,90	2,93	1,57	46,14	2,19
AR-C0	2,68	2,51	1,27	51,06	2,41

Entre os agregados beneficiados na Rota 1, os resultados comparativos das propriedades físicas mostram concentração de materiais com massa específica de menor valor na gaveta superior (AR-R1 – 2,59g/cm<sup>3</sup> e 2,49g/cm<sup>3</sup>) e com massa específica maior na gaveta inferior (AR-C1- 2,71 g/cm<sup>3</sup> e 2,95 g/cm<sup>3</sup>), o que comprova a eficiência da jigagem na separação dos grãos por densidade. O AR-C0 apresenta valor intermediário de massa específica, 2,68 g/cm<sup>3</sup> e 2,51 g/cm<sup>3</sup>, resultado explicado por se tratar de um material com composição intermediária entre os beneficiados citados.

A composição do beneficiado AR-R1 (44% argamassa, 40% cerâmico e somente 16% de concreto) pode explicar os resultados inferiores das massas específica (2,59 e 2,49 g/cm<sup>3</sup>) e unitária (1,46 g/cm<sup>3</sup>), como também o alto valor para o índice de forma, uma vez que os agregados reciclados cerâmicos e de argamassa, individualmente, apresentaram os menores valores para massas específica (2,04 e 2,10 g/cm<sup>3</sup> argamassa, 2,22 e 2,32 g/cm<sup>3</sup> cerâmico de baixa resistência, 2,35 e 2,41 g/cm<sup>3</sup> cerâmico de alta resistência) e unitária (argamassa 1,28 g/cm<sup>3</sup>, cerâmico de baixa resistência 1,23 g/cm<sup>3</sup> e cerâmico de alta resistência 1,18 g/cm<sup>3</sup>) e os maiores valores de índice de forma (2,54) (argamassa 2,32, cerâmico de alta resistência 2,60 e cerâmico de baixa resistência 2,94). Ao comparar estes resultados com resultados de Peticila et al. (2017) do material concentrado nas gavetas superiores do jigge (50%

de argamassa, 39,7% cerâmicos e 9,1 rochas), verifica-se valores maiores de massa específica ( $2,414 \text{ g/cm}^3$ ) e inferiores aos de massa unitária ( $1,828 \text{ g/cm}^3$ ).

O resultado do índice de forma mostra que os AR-C0 (2,41) e AR-R1 (2,54) apresentam valores superiores, ou seja, agregados mais lamelares e alongados, quando comparados aos resultados do AN-B (2,19) e do beneficiado AR-C1 (1,96). Este resultado explica-se em função da composição destes agregados, sendo que os dois primeiros possuem uma quantidade maior da mistura de argamassas e cerâmicos, agregados estes que apresentam valores mais altos de índice de forma quando comparados aos agregados de concreto e de brita basáltica. Ressalta-se que o AR-C1 apresentou propriedades físicas muito próximas ao AN-B, dentre elas o índice de forma, que mostra um material menos lamelar, o que para concretos tende a ser mais interessante.

Avaliando o índice de volume de vazios destes agregados pode-se dizer que o AR-R1 e AR-C0 apresentaram valores mais altos em comparação aos demais, porém muito próximos, 75,20% e 74,18%, respectivamente. Esta proximidade também está evidenciada e pode ser explicada pela proximidade de valores de massa unitária e índice de forma, AR-R1 com  $0,63 \text{ g/cm}^3$  e 2,54 e AR-C0 com  $0,67 \text{ g/cm}^3$  e 2,41.

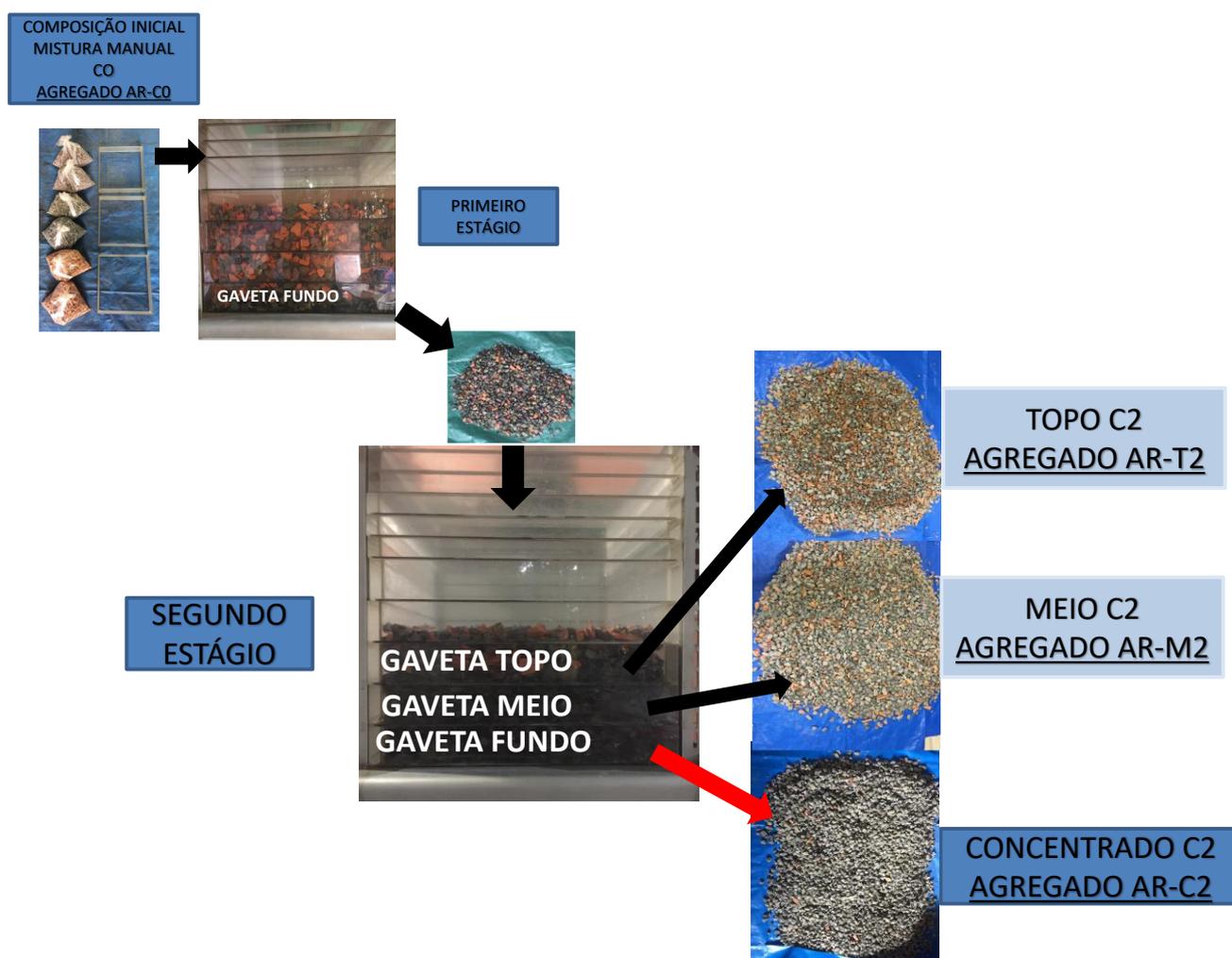
O AR-C1, em função de sua composição (81,6% de agregados de concreto), apresentou as mesmas variações impostas aos agregados AR-COB e AR-CC avaliadas no item 4.1.1 (c), volume de vazios intermediário entre os AR-R1, AR-C0 e o AN-B, se apresenta como um agregado mais grosso (módulo de finura 6,73) e menos lamelar (índice de forma 1,96). Avaliando as propriedades físicas e a composição dos produtos desta Rota 1, pode-se dizer que a utilização de um estágio de beneficiamento gera produtos com diferentes composições, o AR-C1 rico em material denso, e outro, rico em material leve, AR-R1, composições opostas e complementares.

Pode-se dizer que esta rota, avaliada em relação às propriedades físicas dos produtos do beneficiamento, possibilita a separação do AR-C0 em agregados com propriedades diferentes. Esta diferença de qualidade entre os beneficiados é evidenciada ao avaliar as propriedades dos concretos confeccionados com estes agregados, conforme poderá ser observado no item 4.3.

#### 4.2.2. Rota 2

A Figura 49 mostra detalhes da Rota 2, onde se evidencia o segundo estágio (segunda operação de jigagem) com diferentes aspectos visuais da composição dos materiais estratificados em cada uma das gavetas.

FIGURA 49: Rota 2 – representação esquemática do processo.

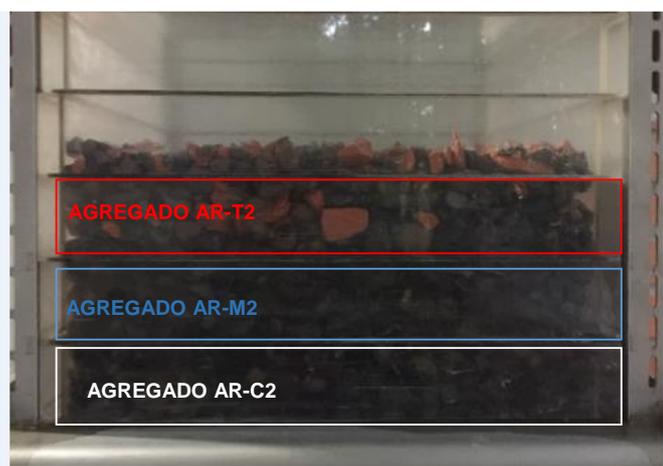


Fonte: a autora (2020).

Vale ressaltar que os agregados beneficiados de interesse desta Rota são provenientes de um segundo estágio de jigagem, ou seja, este beneficiamento acontece em um material que já foi beneficiado através de uma jigagem e apresenta uma composição rica em materiais densos, 81,6% de concreto, 11,9% de argamassa e 6,6% de cerâmicos (na Rota 1 foi denominado de AR-C1), para cada etapa de jigagem são necessários aproximadamente 23,10kg. A Figura 50 mostra a vista frontal

do equipamento, detalhe das 3 gavetas e suas composições após os dois estágios de jigagem.

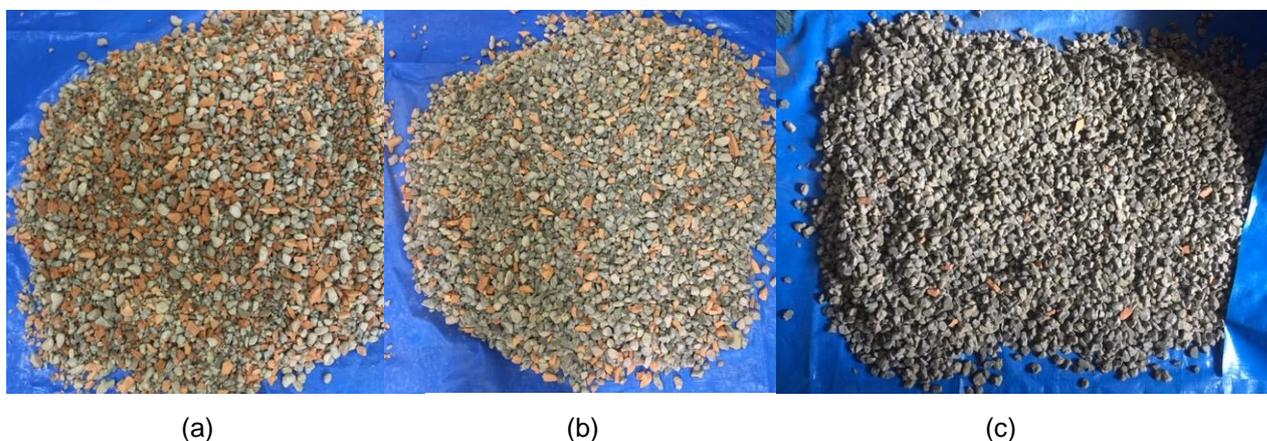
FIGURA 50: Vista frontal do equipamento pós segundo estágio de jigagem – detalhe da estratificação das gavetas.



Fonte: a autora (2020).

Os concentrados em cada gaveta, após retirados do equipamento, estão detalhados na Figura 51, e verifica-se a diferença de composição entre os produtos concentrados, ressaltando que o AR-C2 (Figura 51c), proveniente da gaveta de fundo, apresenta em sua totalidade material agregado de concreto. Considerando AR-C0 o material inicial do primeiro estágio de jigagem, pode-se afirmar que, são produzidos 62,64% de AR-R1, 10,67% AR-T2, 11,98% de AR-M2 e 14,71% de AR-C2.

FIGURA 51: Rota 2 - detalhe dos agregados beneficiados no segundo estágio onde (a) AR-T2, (b) AR-M2 e (c) AR-C2.

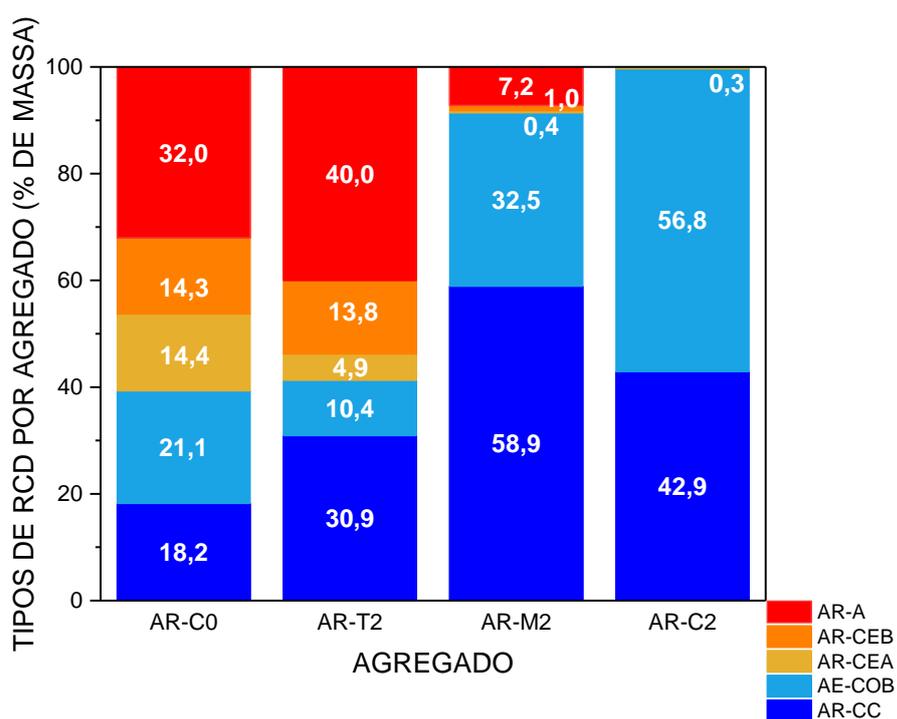


Fonte: a autora (2020).

#### 4.2.2.1 Composição – Fração de materiais.

A composição dos beneficiados AR-T2, AR-M2, AR-C2 bem como do AR-C0 tem sua caracterização, fração mássica de materiais, apresentada no gráfico da Figura 52.

FIGURA 52: Fração de materiais dos AR da Rota 2 – AR-C0, AR-T2, AR-M2 e AR-C2



A composição do AR-T2, Figura 52, apresenta a maior concentração de agregados de argamassa (40%) e concreto convencional (30,9%) desta rota, em um total de aproximadamente 6,6 kg de material recuperado nesta gaveta. A alta concentração de materiais leves nesta gaveta superior é justificada pelas propriedades de beneficiamento por jiques, uma vez que materiais leves tendem a se concentrar nas gavetas de topo e meio. O alto valor de agregados de concreto pode ser explicado uma vez que o material que alimentou o estágio que deu origem a este beneficiado é praticamente composto por concretos (81,6%). Comparando este beneficiado com o beneficiado AR-R1 (Figura 44), no âmbito das composições, pode-se dizer que, em termos de percentual de argamassa não há grande diferença (44% AR-R1 e 40% AR-T2), a diferença está na quantidade de cerâmicos 40% AR-R1 e 18,7% AR-T2) e de concreto, 41,3% AR-T2 e 16% AR-R1. Também se destacam os

percentuais de concreto concentrados em gavetas de topo quando comparados aos resultados de beneficiamentos em jigue a seco apresentados por Sampaio *et al.* (2016) com 8,67% e Cazacliu *et al.* (2014) com 3,39%, o que pode também estar relacionado, em outros fatores, ao elevado percentual de concreto que alimentou o jigue (AR-C1) no processo de separação da Rota 2 utilizado nesta pesquisa.

A quantidade de material recuperado por jigagem na gaveta AR-M2 é de aproximadamente 7,4 kg e a composição em fração mássica deste agregado é apresentado na Figura 52. A maior parte corresponde a agregados de concreto, com predomínio do concreto convencional. Verifica-se que o percentual de material denso, concretos, concentrados nesta gaveta predomina a composição, 91,4%, resultado este que apresenta proximidade com concentrados de gaveta de fundo em beneficiamentos por jigue a seco, exemplo de Sampaio *et al.* (2016) com 92,25% e Cazacliu *et al.* (2014) com 90,68%. Os materiais cerâmicos se apresentam em valores inferiores (1,4%) quando comparados a seus pares nos mesmos estudos, Sampaio *et al.* (2016) com 45-61% e Cazacliu *et al.* (2014) com 58,54%. Quando comparado ao beneficiado AR-C1 (81,6% de concreto) este beneficiado se apresenta mais puro em função da maior quantidade de concreto concentrada, resultado da maior quantidade de concreto que alimentou a Rota 2.

Por outro lado, o AR-C2 é composto basicamente por agregados reciclados de concreto (99,7%) com aproximadamente 9,1 kg de material recuperado nesta gaveta. Pode-se dizer que este beneficiado é composto de concreto, sendo o material cerâmico apenas um contaminante, uma vez que sua presença é quase nula (0,3%). Este resultado é inédito na literatura que estuda beneficiamento de RCD com jigues, uma vez que em todos os estudos, tanto em jigue à água quanto em jigue a seco, o material que entra na jigagem não reflete a composição de RCD típica e, além disso, apresentam como resultado percentuais significativos de outros materiais na gaveta de fundo (AMBRÓS *et al.*, 2016; AMBRÓS *et al.*, 2017; AMBRÓS *et al.*, 2019; CAZACLIU *et al.*, 2016;.PETICILA *et al.*, 2017; WASKOW *et al.*, 2020; SAMPAIO *et al.*, 2014). Verifica-se que o AR-C2 possui maior quantidade de AR-COB (massa específica 2,46g/cm<sup>3</sup>) que AR-CC (massa específica de 2,77g/cm<sup>3</sup>) diferença de 11%, porém, o AR-M2 apresenta comportamento inverso. Este comportamento pode ser explicado através da diferença entre valores de índice de forma entre AR-CC e AR-COB (6,5%). O AR-CC tem índice de forma maior (2,0) com tendência à formação de

placas. Assim, o empacotamento dos AR-CC e AR-COB, numa devida proporção, apresenta massa unitária mais alta e se concentram no AR-C2.

Pode-se então, por fim, verificar a eficiência da Rota 2 em relação ao material não beneficiado, que alimenta as duas rotas, AR-C0. Neste aspecto todos os agregados produzidos nesta Rota têm suas composições bem definidas, sendo o AR-T2 rico em argamassa e concretos, o AR-M2 predominantemente composto por concretos com baixo teor de argamassa e o AR-C2 composto de concretos.

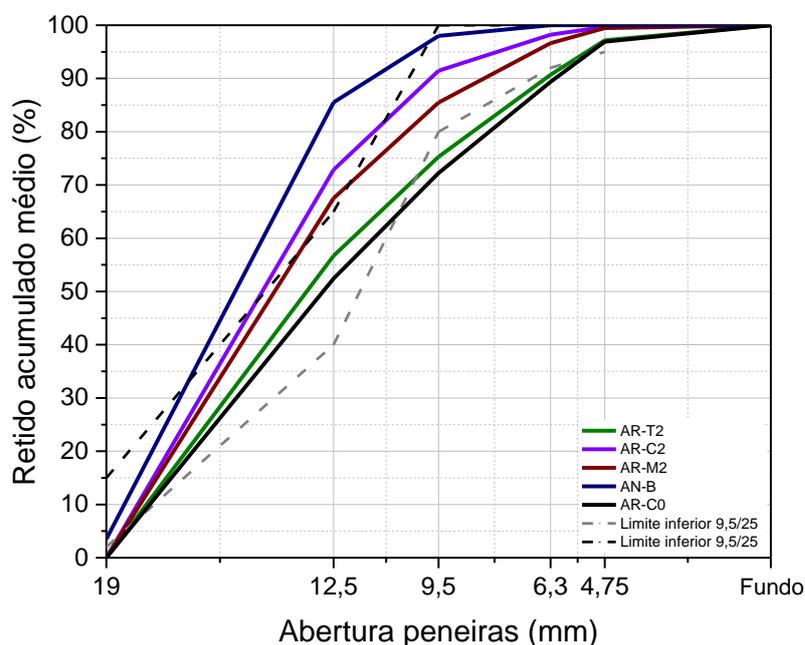
#### 4.2.2.2 Distribuição granulométrica

A Figura 53 mostra as curvas de distribuição granulométrica dos agregados beneficiados na Rota 2. Verifica-se que o beneficiado AR-C2 é o agregado que tem sua curva mais próxima da curva do AN-B. Em concordância com os resultados apresentados anteriormente, o beneficiado AR-M2 se mostra semelhante ao beneficiado AR-C2 em relação a sua distribuição granulométrica. Os AR-C0 e beneficiado AR-T2 aparecem com uma curva semelhante e mais próximos do limite inferior 25/9,5mm.

Observa-se que 70% da distribuição granulométrica do AR-T2 se encontra na faixa 9,5mm-12,5mm, com comportamento semelhante ao da curva do agregado AR-C0.

No outro extremo do gráfico da Figura 52, verifica-se que toda a distribuição granulométrica do AR-C2 se encontra abaixo da faixa 9,5mm, sendo este o agregado reciclado mais próximo, em distribuição granulométrica, do AN-B, seguido pela curva do AR-M2.

FIGURA 53: Curvas de distribuição granulométrica – AR-C0, AR-T2, AR-M2, AR-C2 e AN-B.



O módulo de finura mostra que os beneficiados mais grossos são AR-C2, AR-M2 e os mais finos AR-T2 e AR-C0, conforme Tabela 15.

TABELA 15. Módulo de Finura e Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados beneficiados da Rota 2, AR-C0 e AN-B.

AGREGADO	MÓDULO DE FINURA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm)
AR-T2	6,58	19
AR-M2	6,82	19
AR-C2	6,90	19
AN-B	7,02	19
AR-C0	6,53	19

#### 4.2.2.3 Absorção

A análise das propriedades físicas dos agregados beneficiados na Rota 2 podem ser complementadas pela Figura 54, que apresenta o comparativo da taxa de absorção entre estes agregados beneficiados, e a pela Figura 55, que mostra as respectivas curvas de absorção no período de 24 horas. Corroborando os resultados anteriores, têm-se os beneficiados AR-C2 (4% maior) e AR-M2 (54% maior) como os mais próximos do AN-B, apresentando a menor taxa de absorção, em função de sua composição predominantemente de agregados de concreto. Por outro lado, o

beneficiado AR-T2 se destaca como maior valor, provavelmente por possuir o maior teor de argamassa em sua composição (Figura 55).

FIGURA 54: Comparativo da taxa de absorção dos agregados beneficiados na Rota 2, AR-C0 e AN-B.

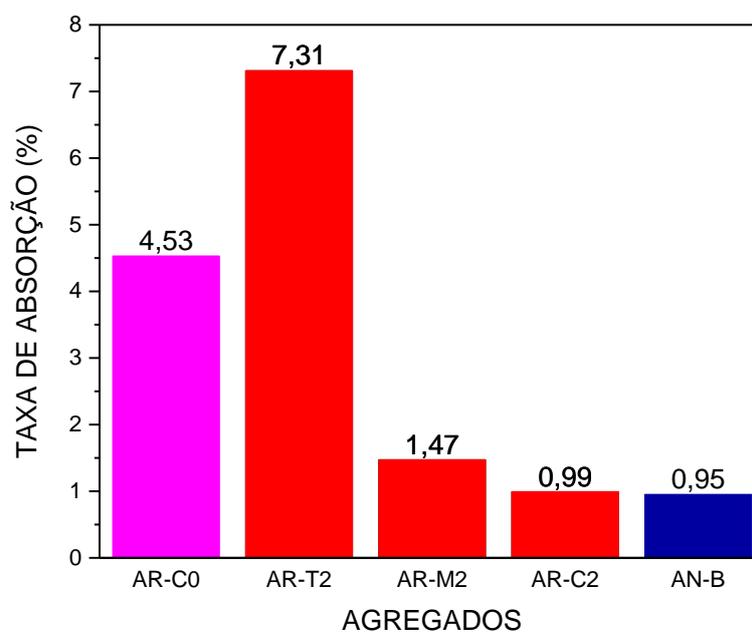
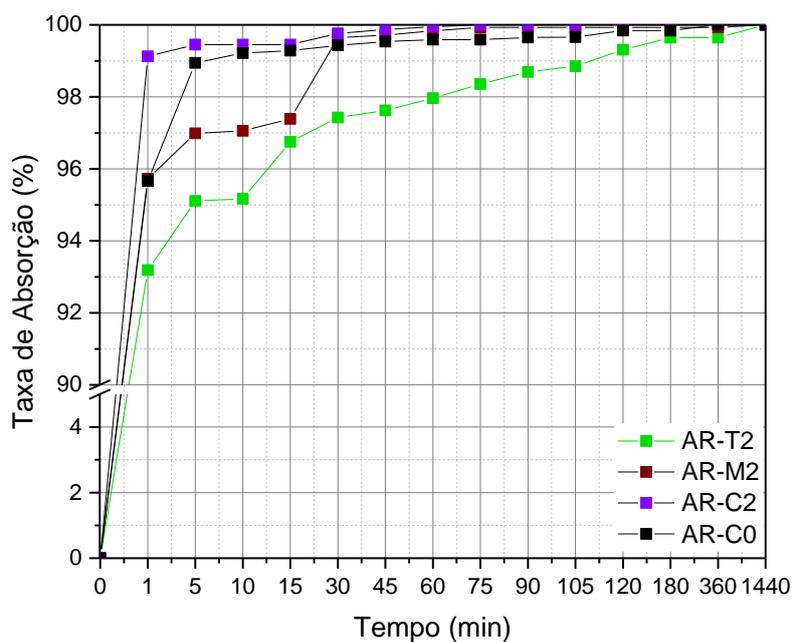


FIGURA 55: Comparativo da taxa de absorção dos agregados beneficiados na Rota 2, AR-C0 e AN-B.



Quando comparadas as taxas de absorção em 1440 minutos – 24horas, tem-se que o beneficiado AR-T2 apresentou a menor ganho de absorção no tempo em comparação aos demais, representada no gráfico da Figura 55, obtendo 93% do total absorvido pelo material até o primeiro minuto de imersão. Para o mesmo tempo de imersão, o AR-M2 apresentou cerca de 96% do total absorvido, semelhante ao comportamento do AR-C0, conforme mostra o mesmo gráfico. Por outro lado, o AR-C2 mostra que mais de 99% do total absorvido pelo material acontece até o primeiro minuto de imersão.

#### 4.2.2.4 Massa específica, Unitária, Índice de volume de vazios e Índice de forma

Os resultados das demais propriedades físicas, massa específica, unitária, índice de volume de vazios e índice de forma são apresentados na Tabela 16.

TABELA 16. Massa específica, massa unitária e índice de forma dos agregados beneficiados da Rota 2, AR-C0 e AN-B.

AGREGADO	MASSA ESPECÍFICA		MASSA UNITÁRIA (g/cm <sup>3</sup> )	ÍNDICE DE VOLUME DE VAZIOS (%)	ÍNDICE DE FORMA
	Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> ) Picnômetro	Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> ) LEITE (2001)			
AR-T2	2,66	2,47	1,43	44,25	2,03
AR-M2	2,78	2,62	1,60	40,74	1,98
AR-C2	2,71	2,81	1,96	28,99	1,84
AN-B	2,90	2,93	1,57	46,14	2,19
AR-C0	2,68	2,51	1,27	51,06	2,41

Ao relacionar os valores de massa específica e unitária dos diferentes agregados beneficiados da Rota 2 (Tabela 16), verifica-se que o beneficiado AR-T2 apresenta valores inferiores aos demais e próximos ao AR-C0. Comportamento esperado uma vez que a composição deste beneficiado apresenta 40% de argamassa e 19% de material cerâmico, materiais estes com valores inferiores de massa específica quando comparados ao AN-B. Analisando os resultados de AR-M2, verifica-se que se encontram abaixo dos valores do agregado de referência (4,14% e 10,58% menores para massa específica – método picnômetro e Leite,

respectivamente e 49% menor para massa específica). Sabendo-se que a composição deste beneficiado é 91% formada por concretos, este resultado era previsto.

A Tabela 16 mostra resultados de massa específica mais próximos entre o AR-C2 e o AN-B, isto porque a concentração deste beneficiado é 99,7% de agregados reciclados de concreto (42,9% agregado de concreto convencional e 56,8% agregado de concreto de baixa resistência). A diferença, 6,55% menor para o método picnômetro e 4,09% menor para o método de Leite (2001), provavelmente acontece em função da argamassa aderida no agregado reciclado de concreto.

Em relação aos resultados de índice de forma (Tabela 16) tem-se o AR-C2 com o menor valor, 1,84, próximo ao valor do índice do agregado reciclado de concreto de baixa resistência que apresenta valor de 1,87 (1,6% maior). Valor próximo, de 1,98, provavelmente em função de sua composição, apresenta o AR-M2.

Ao avaliar o índice de volume de vazios, verifica-se que os maiores valores são encontrados nos AR-C0 e AR-T2, por outro lado o menor valor foi verificado no AR-C2, que comparado ao AN-B, apresenta valor 21,61% maior.

Pode-se dizer que os agregados beneficiados na Rota 2 possuem propriedades físicas para uso em concreto próximas e/ou até melhores que as do agregado referência brita basáltica. Desta forma, ao avaliar as propriedades físicas e composição dos agregados beneficiados na Rota 2, pode-se dizer que foi possível a produção de 2 produtos de ótima qualidade – C2 e M2 - quando comparados ao material não beneficiado e ao AN-B.

O AR-C2 é um produto mais puro em percentual de concreto e com propriedades físicas mais próximas às do agregado referência e superando resultados da literatura. O beneficiado AR-M2 pode ser comparado ao AR-C1, porém ainda apresenta uma quantidade maior de um único material, concreto, e o AR-T2, 35% do material da Rota 2, que apresenta composição mais variada e elevadas taxas de absorção.

### 4.3. ETAPA 3: CONCRETOS

#### 4.3.1. Produção dos Concretos Referência (CR) e de RCD (CRCD)

O concreto referência de brita basáltica (CR-B) foi produzido para definição do

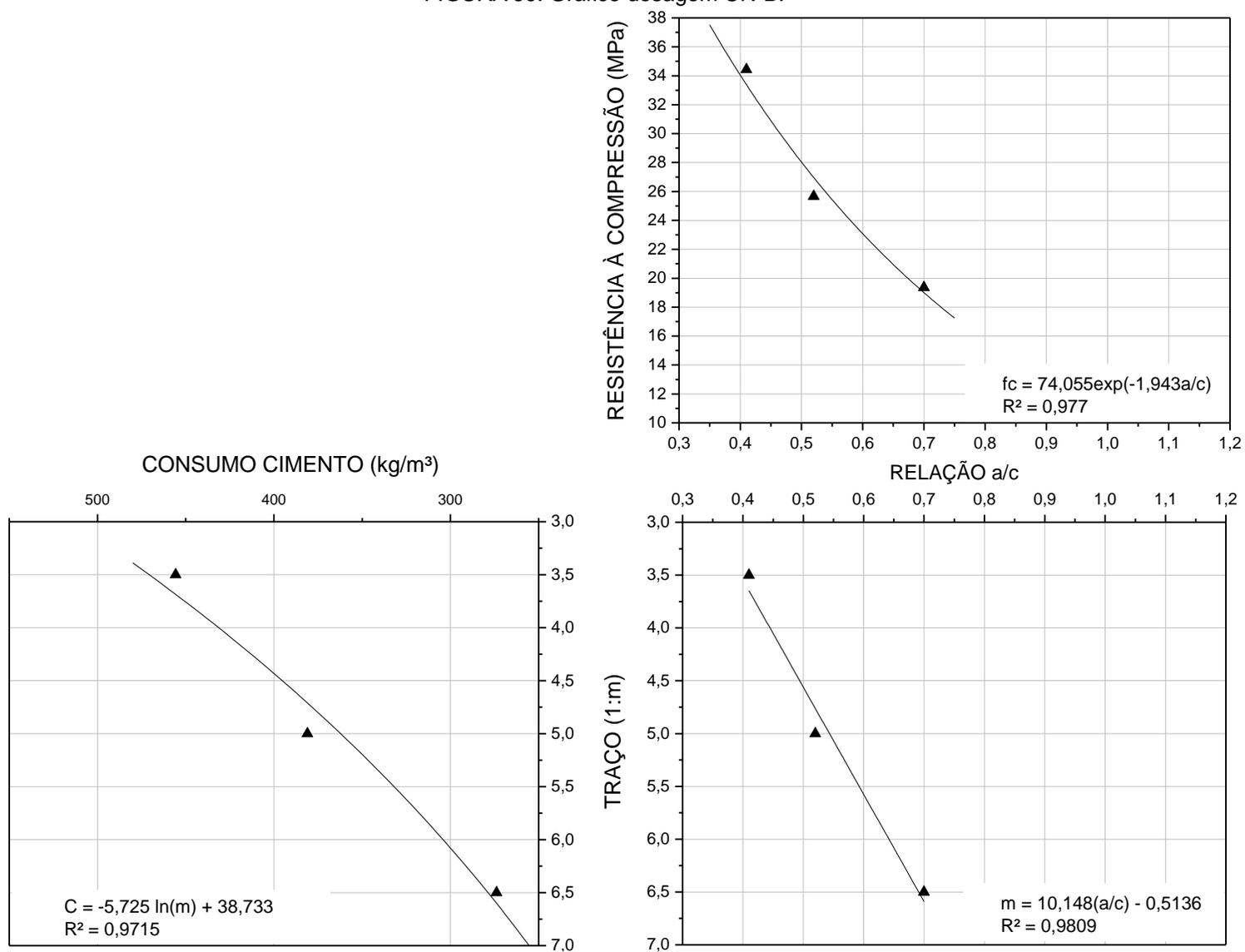
diagrama de dosagem referência. A Tabela 17 apresenta os dados coletados e calculados nesta dosagem, permitindo a elaboração das curvas do diagrama de dosagem do concreto referência de brita basáltica. Ressalta-se que os resultados das resistências à compressão apresentados neste e nos demais itens são referentes à média aritmética de 5 corpos de prova ensaiados e os resultados completos encontram-se no Apêndice B.

TABELA 17. Dados de dosagem para o concreto referência brita basáltica.

CONCRETO	m	Relação a/c	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)
CR-B	3,5	0,41	34,43	476,09	125
	5	0,52	25,67	380,99	120
	6,5	0,70	19,37	298,28	110

A partir dos dados da Tabela 17 foram elaborados os gráficos de comportamento referentes ao CR-B (Figura 56). Foram construídas curvas de tendência de forma a aproximar os dados das leis de Abrams, Lyse e Molinari.

FIGURA 56: Gráfico dosagem CR-B.



Na Tabela 18 estão apresentados os dados coletados e calculados em cada dosagem realizada para cada CR, fabricados com agregado natural brita basáltica onde a única diferença em relação ao CR-B é a granulometria do agregado graúdo (ajustada de acordo com a especificidade de cada agregado reciclado) e, conseqüentemente, seus módulos de finura (inferiores). As composições granulométricas de cada ajuste são apresentadas no item 2 do Apêndice A. Estes são necessários para a construção dos gráficos que relacionam propriedades necessárias para análise do comportamento dos diferentes concretos. Vale ressaltar que conforme as NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015) o limite inferior para as relações a/c de concretos estruturais é 0,45, desta forma verifica-se que a exceção do CR-C0 todos os concretos de referência do traço 1:3,5 se encontram abaixo deste valor mínimo.

TABELA 18. Dados de dosagem Concretos referência

CONCRETO	m	Relação a/c	Resistência à Compressão (MPa)	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)
CR-C0	3,5	0,45	32,53	457,44	110
	5	0,54	26,99	333,27	120
	6,5	0,63	17,17	304,76	100
CR-C1	3,5	0,43	32,67	499,99	130
	5	0,54	24,97	373,98	120
	6,5	0,62	19,53	299,65	135
CR-R1	3,5	0,34	35,99	497,93	130
	5	0,52	26,13	377,30	120
	6,5	0,63	19,76	300,12	125
CR-T2	3,5	0,44	33,97	490,60	110
	5	0,53	26,75	384,31	120
	6,5	0,83	15,64	292,86	130
CR-M2	3,5	0,43	35,91	498,70	100
	5	0,51	26,72	384,51	110
	6,5	0,63	17,54	303,98	120
CR-C2	3,5	0,41	34,50	486,89	120
	5	0,53	28,62	373,12	135
	6,5	0,63	18,23	283,61	125

A relação entre os resultados de resistência à compressão e relação a/c - Lei de Abrams - e a relação entre a relação a/c e o traço unitário (m) - Lei de Lyse - dos CR são avaliados na Figura 56. As curvas se sobrepõem entre si junto à curva do CR-B, o que pode indicar que a distribuição granulométrica praticamente não afeta as

propriedades do concreto, para avaliar tal afirmação, foi realizada análise estatística ANOVA entre os valores de resistências à compressão e verificou-se que não há diferença significativa, com 99,9% de nível de significância, conforme Tabela 19. Para o traço mais pobre (1:6,5) destaca-se o comportamento do CR-T2 que apresenta maiores valores de relação a/c. As equações das curvas de tendência apresentadas na Figura 57, para melhor visualização, estão apresentadas na Tabela 20.

TABELA 19. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão – concretos de referência – CR.

<b>Resistência à compressão (MPa)</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Nível de Significância</b>	<b>Significativo</b>
CR-CO, CR-R1, CR-C1, CR-T2, CR-M2 e CR-C2	10,27	5	2,05	0,030	99%	<b>NÃO</b>
Dentro dos grupos	816,92	12	68,07			
Total	827,19	17				

FIGURA 57: Gráfico dosagem CR.

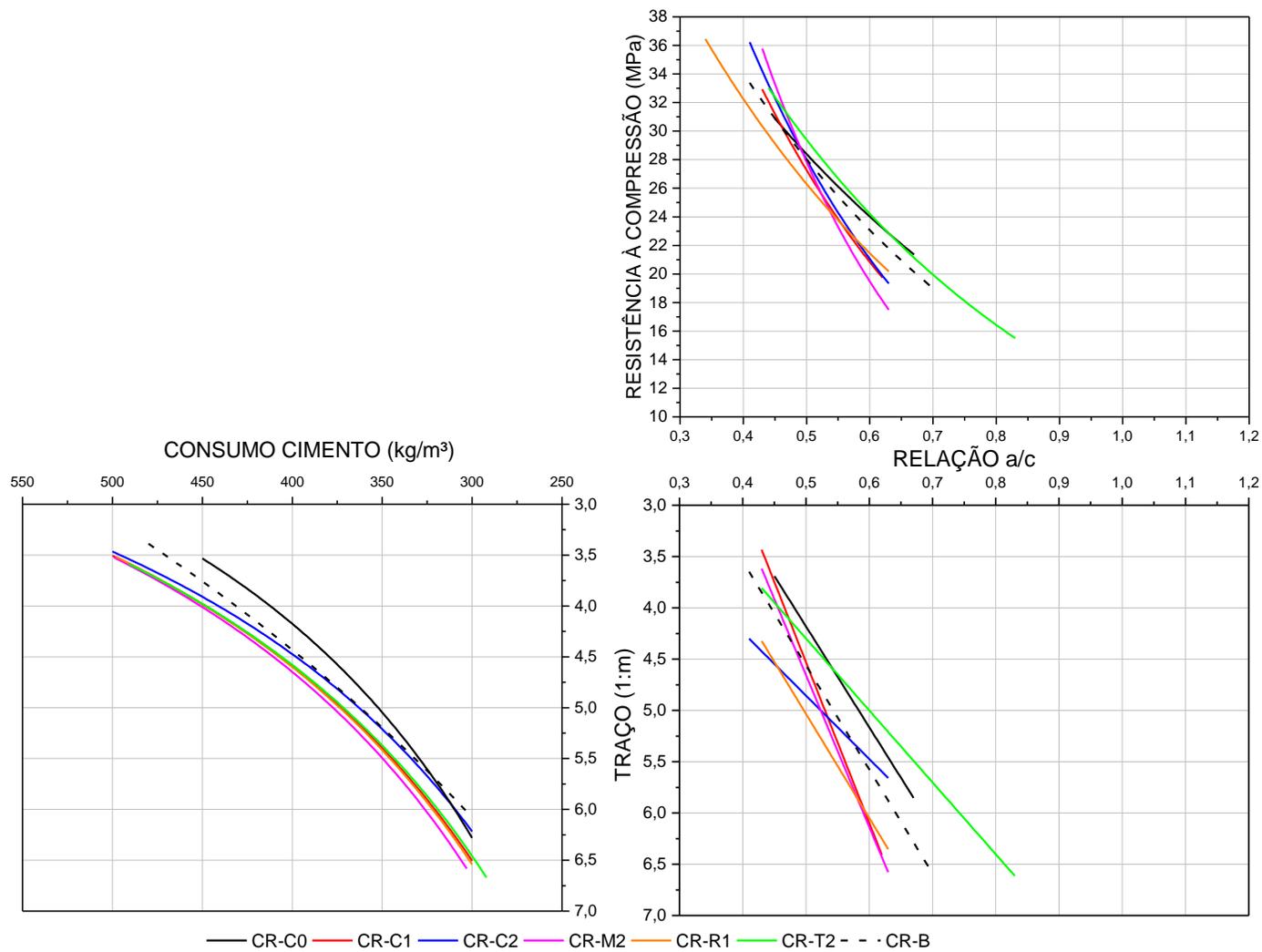


TABELA 20. Equações de regressão das curvas do diagrama de dosagem- Concretos referência.

Concreto	Curva	Equação	R <sup>2</sup>
CR-B	Lei de Abrams	$f_c = 74,055 * e^{-1,943*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9770
CR-C0		$f_c = 65,62 * e^{-1,675*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9568
CR-R1		$f_c = 72,911 * e^{-2,039*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9902
CR-C1		$f_c = 104,8 * e^{-2,692*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9958
CR-T2		$f_c = 77,509 * e^{-1,939*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9931
CR-M2		$f_c = 116,598 * e^{-3,577*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9998
CR-C2		$f_c = 116,78 * e^{-2,855*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9198
CR-B	Lei de Lyse	$m = 10,148 * a/c - 0,5136$	R <sup>2</sup> = 0,9809
CR-C0		$m = 9,8301 * a/c - 0,7342$	R <sup>2</sup> = 0,9898
CR-R1		$m = 10,148 * a/c - 0,04$	R <sup>2</sup> = 0,9809
CR-C1		$m = 15,659 * a/c - 3,2995$	R <sup>2</sup> = 0,9918
CR-T2		$m = 7,0144 * a/c + 0,7914$	R <sup>2</sup> = 0,9119
CR-M2		$m = 14,803 * a/c - 2,7467$	R <sup>2</sup> = 0,9868
CR-C2		$m = 6,1813 * a/c + 1,7651$	R <sup>2</sup> = 0,9060
CR-B	Lei de Molinari	$C = 5,725 * m^{-38,733}$	R <sup>2</sup> = 0,9715
CR-C0		$C = 20559 * m^{-1,419}$	R <sup>2</sup> = 0,9503
CR-R1		$C = 7082 * m^{-1,225}$	R <sup>2</sup> = 0,9990
CR-C1		$C = 6465,8 * m^{-1,21}$	R <sup>2</sup> = 0,9999
CR-T2		$C = 5892,3 * m^{-1,195}$	R <sup>2</sup> = 0,9860
CR-M2		$C = 8466,2 * m^{-1,253}$	R <sup>2</sup> = 0,9966
CR-C2		$C = 4240 * m^{-1,144}$	R <sup>2</sup> = 0,9907

Os dados obtidos e calculados na dosagem dos CRCD estão apresentados na Tabela 21.

TABELA 21. Dados de dosagem Concretos RCD (continua).

CONCRETO	m	Relação a/c	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)
CRCD-C0	3,5	0,38	24,20	446,92	115
	5	0,44	19,42	340,83	100
	6,5	0,59	13,56	272,43	100
CRCD-C1	3,5	0,40	32,35	471,84	120
	5	0,47	26,84	363,06	100
	6,5	0,61	18,69	272,50	120
CRCD-R1	3,5	0,33	17,28	439,13	110
	5	0,54	14,69	335,47	100
	6,5	0,67	11,03	269,28	100

TABELA 21. Dados de dosagem Concretos RCD (conclusão).

CONCRETO	m	Relação a/c	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)
CRCD-T2	3,5	0,41	23,41	423,01	100
	5	0,49	15,58	350,17	110
	6,5	0,61	15,66	272,68	95
CRCD-M2	3,5	0,39	28,20	483,23	120
	5	0,46	27,74	373,68	110
	6,5	0,64	21,60	290,00	115
CRCD-C2	3,5	0,42	34,45	484,75	115
	5	0,49	28,20	366,41	110
	6,5	0,62	19,25	294,08	100

Quando avaliadas as diferenças entre comportamentos dos diferentes CRCD, verifica-se que não há semelhança entre as curvas da Figura 58, inclusive observa-se uma grande variação na faixa de valores de resistências (de 11MPa até 34MPa) e relações a/c que variam de 0,33 até 0,67, indicando que o processo de beneficiamento produz agregados com propriedades distintas. Ressalta-se que os valores de a/c encontrados nos CRCDs encontram-se fora dos limites das relações a/c (inferior 0,45 e superior 0,65) estabelecidos pelas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015) no traço 1:3,5. Ainda na mesma figura, salienta-se que os resultados dos CR-B, CRCD-C2 e CRCD-C1 apresentam similaridade e proximidade entre as curvas, resultado previsto em função da pequena variação da relação a/c de cada traço desses concretos, para o alcance do abatimento estabelecido.

Semelhante à apresentação das equações das curvas de tendência do diagrama do CR, apresentam-se as equações das curvas de tendência dos CRCD na Tabela 22.

FIGURA 58:Gráfico dosagem CRCD.

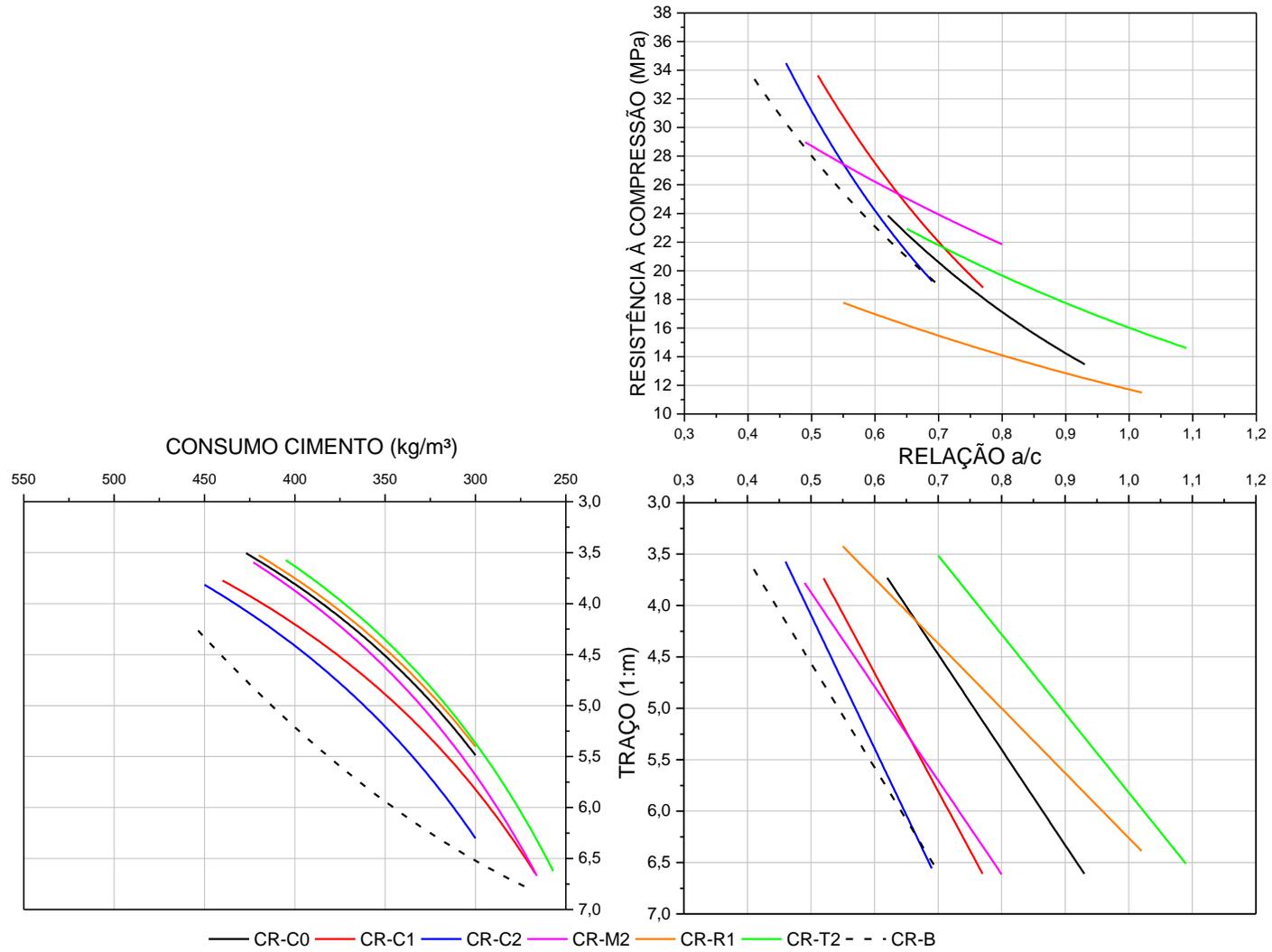


TABELA 22. Equações de regressão das curvas do diagrama de dosagem- Concretos RCD.

Concreto	Curva	Equação	R <sup>2</sup>
CR-B	Lei de Abrams	$fc = 74,055 * e^{-1,943*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9770
CRCD-C0		$fc = 74,839e * e^{-1,844*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9959
CRCD -R1		$fc = 29,588e * e^{-0,927*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9296
CRCD -C1		$fc = 104,87e * e^{-2,23*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9943
CRCD -T2		$fc = 44,639 * e^{-1,025*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,7298
CRCD -M2		$fc = 45,307 * e^{-0,912*a/c}$	R <sup>2</sup> = 0,9476
CRCD -C2		$fc = 110,54 * e^{-2,532*a/c}$	R <sup>2</sup> = 1
CR -B	Lei de Lyse	$m = 10,148 * a/c - 0,5136$	R <sup>2</sup> = 0,9809
CRCD -C0		$m = 9,2876 * a/c - 2,0276$	R <sup>2</sup> = 0,9597
CRCD -R1		$m = 6,3059 * a/c - 0,0447$	R <sup>2</sup> = 0,9879
CRCD -C1		$m = 11,503 * a/c - 2,2469$	R <sup>2</sup> = 0,9586
CRCD -T2		$m = 7,6906 * a/c - 1,87$	R <sup>2</sup> = 0,9998
CRCD -M2		$m = 9,1415x * a/c - 0,6982$	R <sup>2</sup> = 0,9446
CRCD -C2		$m = 12,97 * a/c - 2,3929$	R <sup>2</sup> = 0,9940
CR -B	Lei de Molinari	$C = -5,725Ln(m) + 38,733$	R <sup>2</sup> = 0,9715
CRCD -C0		$C = 7679,6 * m^{-1,27}$	R <sup>2</sup> = 0,9986
CRCD -R1		$C = 7474,3 * m^{-1,268}$	R <sup>2</sup> = 0,9985
CRCD -C1		$C = 3730,1 * m^{-1,133}$	R <sup>2</sup> = 0,9860
CRCD -T2		$C = 12339 * m^{-1,357}$	R <sup>2</sup> = 0,9885
CRCD -M2		$C = 11324 * m^{-1,332}$	R <sup>2</sup> = 0,9838
CRCD -C2		$C = 7347,4 * m^{-1,23}$	R <sup>2</sup> = 0,9998

O comportamento das relações  $a/c$  e traço unitário se repetem quando avaliadas as relações entre consumo de cimento e traço, e podem ser explicadas pela variação  $a/c$  de cada família de concretos analisada, as faixas de variação de relação  $a/c$  e consumo de cimento para concretos de 20, 25 e 30MPa são apresentados na Tabela 23.

TABELA 23. Equações de regressão das curvas do diagrama de dosagem- Concretos RCD.

Concretos	Resistência à compressão (28 dias)	Relação $a/c$	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
CR	20	0,60 até 0,70	310 até 400
CRCD		0,68 até 0,80	320 até 420
CR	25	0,54 até 0,60	320 até 420
CRCD		0,58 até 0,69	275 até 425
CR	30	0,44 até 0,50	375 até 500
CRCD		0,40 até 0,55	350 até 420

A Tabela 23 que resume as faixas de relação a/c e consumo de cimento dos Diagramas de dosagem, para os CR e os CRCD, Figura 57 e 58, mostram que quando comparados os concretos de 30MPa, os CR apresentam resultados inferiores de relações a/c, variando de 0,44 até 0,50, enquanto os CRCD variam de 0,40 até 0,55. Para os consumos de cimento em kg/m<sup>3</sup>, o resultado se inverte, valores entre 375 e 500 são encontradas nos CR e uma variação de 350 até 420 nos CRCD.

Por outro lado, os concretos com 20MPa mostram relações a/c que variam de 0,60 até 0,70 com consumos de cimento de 310 kg/m<sup>3</sup> e 400kg/m<sup>3</sup>, para os CR, enquanto os CRCD tem sua relação a/c variando de 0,68 até 0,80 com consumo de cimento de 320 kg/m<sup>3</sup> até 420kg/m<sup>3</sup>. Resultados intermediários foram verificados para os concretos de 25MPa, que para os CR apresentaram relações a/c que variam entre 0,54 até 0,60 e consumos de cimento de 320 até 420 kg/m<sup>3</sup>, próximas as relações a/c de CRCD (0,58 até 0,69) e consumo de cimento de 275 até 425 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.2. Concretos - Propriedades no Estado Fresco

Os concretos de referência (CR) e os concretos de RCD (CRCD) das Rotas 1 e 2 foram avaliados em relação a seu estado fresco por meio das propriedades de trabalhabilidade e massa específica. As propriedades foram avaliadas estatisticamente, analisando-se o conjunto dos resultados individuais de cada concreto.

##### 4.3.2.1. Rota 1

A Tabela 24 apresenta os resultados de relação a/c, massa específica e teor de água em função dos materiais secos dos concretos referência e RCD para cada traço da Rota 1 bem como os CR-B, CR-C0 e CRCD-C0.

Foram avaliadas por ANOVA o efeito da substituição do AN pelo AR em cada uma das propriedades.

TABELA 24. Relação a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) de cada traço dos concretos da Rota 1, CR-B, CR-C0 e CRCD-C0.

CONCRETO	RELAÇÃO a/c			MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )			H		
	m			m			m		
	3,5	5	6,5	3,5	5	6,5	3,5	5	6,5
CR-B	0,41	0,52	0,70	2,34	2,48	2,45	0,09	0,09	0,09
CR-C0	0,45	0,67	0,63	2,26	2,20	2,48	0,10	0,11	0,08
CR-R1	0,34	0,51	0,63	2,41	2,40	2,44	0,08	0,09	0,08
CR-C1	0,43	0,54	0,62	2,46	2,45	2,43	0,10	0,09	0,08
CRCD-C0	0,38	0,44	0,59	2,18	2,19	2,20	0,08	0,07	0,08
CRCD-R1	0,33	0,54	0,67	2,12	2,19	2,20	0,07	0,09	0,09
CRCD-C1	0,40	0,47	0,61	2,31	2,34	2,21	0,09	0,08	0,08
<b>ANOVA</b>	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>			<b>SIGNIFICATIVO</b>			<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>		

Verifica-se através da análise estatística que não houve diferença significativa entre os CR e CRCD quando avaliadas as relações a/c e o teor de água em função dos materiais secos da mistura (H) (Tabela 25).

TABELA 25. Análise de variância (ANOVA) dos CR e CRCD nas relações a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) Rota 1.

Relação a/c						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B, CR-CO, CR-R1, CR-C1, CRCD-R1e CRCD-C1	0,02	6	0,004	0,254	95%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	0,23	14	0,016			
Total	0,26	20				
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B, CR-CO, CR-R1, CR-C1, CRCD-R1e CRCD-C1	0,22	6	0,038	7,780	0,000799	<b>SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	0,06	14	0,004			
Total	0,29	20				
H						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B, CR-CO, CR-R1,	0,0007	6	0,00012	1,56862	23%	

CR-C1, CR-CR-R1e CRCD-C1						<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	0,0011	14	8,1E-05			
Total	0,00189	20				

Quando comparados os resultados das massas específicas dos concretos da Rota 1, verifica-se por ANOVA (Tabela 25) que há diferença significativa e observam-se variações apontadas por TUKEY entre os CR e os CRCD, com similaridade entre os CR e entre os CR e o CRCD-C1. Pode-se afirmar que a similaridade entre os CR e o CRCD-C1 é consequência do AR-C1 apresentar maior quantidade de agregados de concreto (81,6%), com massa específica média maior (2,83 g/cm<sup>3</sup>), aliado ao menor índice de volume de vazios (68,90%).

#### 4.3.2.2. Rota 2

Os resultados das propriedades no estado fresco dos concretos RCD e referência da Rota 2 bem como os CR-C0, CRCD-C0 e CR-B são apresentados na Tabela 26. Assim como a Rota 1 foram realizadas as análises de variância.

TABELA 26. Relação a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) de cada traço dos concretos da Rota 2, CR-B, CR-C0 e CRCD-C0.

CONCRETO	RELAÇÃO a/c			MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )			H		
	m			m			m		
	3,5	5	6,5	3,5	5	6,5	3,5	5	6,5
CR-B	0,41	0,52	0,7	2,34	2,48	2,45	0,09	0,09	0,09
CR-C0	0,45	0,54	0,63	2,26	2,20	2,48	0,10	0,11	0,08
CR-T2	0,44	0,53	0,83	2,42	2,51	2,44	0,10	0,09	0,11
CR-M2	0,43	0,51	0,63	2,46	2,50	2,47	0,10	0,09	0,08
CR-C2	0,41	0,53	0,63	2,39	2,45	2,31	0,09	0,09	0,08
CRCD-C0	0,38	0,44	0,59	2,18	2,19	2,20	0,08	0,07	0,08
CR-CR-T2	0,41	0,49	0,61	2,11	2,24	2,21	0,09	0,08	0,08
CRCD-M2	0,39	0,46	0,64	2,36	2,41	2,36	0,09	0,08	0,09
CRCD-C2	0,42	0,49	0,62	2,39	2,38	2,39	0,09	0,08	0,08
<b>ANOVA</b>	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>			<b>SIGNIFICATIVO</b>			<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>		

A relação a/c e o teor de água sobre os materiais secos (H) da Rota 2 não apresentaram diferença significativa conforme análise estatística, porém, a massa específica apresentou diferença significativa conforme Tabela 27.

TABELA 27. Análise de variância (ANOVA) dos CR e CRCD nas relações a/c, massa específica e teor de água/materiais secos (H) Rota 2.

Relação a/c						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B, CR-CO, CR-T2, CR-M2, CR-C2, CRCD-T2, CRCD-M2 e CRCD-C2	0,032	8	0,004	0,253	97%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	0,284	18	0,015			
Total	0,316	26				
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B, CR-CO, CR-T2, CR-M2, CR-C2, CRCD-T2, CRCD-M2 e CRCD-C2	0,268	8	0,033	7,472	0,000208	<b>SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	0,080	18	0,004			
Total	0,348	26				
H						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B, CR-CO, CR-T2, CR-M2, CR-C2, CRCD-T2, CRCD-M2 e CRCD-C2	0,001	8	0,000151	2,263	7%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	0,001	18	6,67E-05			
Total	0,002	26				

De modo a avaliar a diferença significativa entre as massas específicas dos concretos através do teste de Tukey, verificou-se que, existe similaridade apenas entre o CRCD-C2 e todos os CR e o CRCD-M2, as demais combinações são responsáveis pela diferença apresentada nesta propriedade.

### 4.3.3. Concretos - Propriedades no Estado Endurecido

As propriedades dos concretos CR e CRCD foram avaliadas em relação às propriedades no estado endurecido (resistência à compressão e módulo de elasticidade), sendo os resultados apresentados nos itens seguintes conforme a respectiva rota. Também foram analisados os índices de intensidade de ligante para os concretos de modo a avaliar a eficiência destes em relação a cada rota.

#### 4.3.3.1. Rota 1

A Tabela 28 apresenta os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade por traço unitário para os concretos referentes à Rota 1. São apresentados os valores médios das cinco observações experimentais de cada traço em cada propriedade avaliada, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação. Os dados completos são apresentados nas tabelas do Apêndice B.

TABELA 28. Resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos referentes à Rota 1 (continua).

Concreto		Traço (m)	Resistência à Compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
REFERÊNCIA	CR-B	3,5	34,45	0,423	1%	35,64	4,24	12%
		5,0	25,67	1,872	7%	36,49	4,15	11%
		6,5	19,37	0,951	5%	30,00	4,17	14%
	CR-C0	3,5	32,53	1,05	3%	38,39	1,51	4%
		5,0	26,99	0,88	3%	35,97	3,86	11%
		6,5	17,17	0,81	5%	31,29	0,43	1%
	CR-R1	3,5	35,99	2,00	6%	37,39	4,13	11%
		5,0	26,13	1,65	6%	37,82	4,48	12%
		6,5	19,76	0,93	5%	32,11	3,45	11%
	CR-C1	3,5	32,67	0,99	3%	38,64	0,63	2%
		5,0	24,97	1,86	7%	33,5	2,95	9%
		6,5	19,58	0,87	4%	31,41	2,42	8%
RC	CRCD-C0	3,5	24,20	0,84	3%	25,08	6,98	28%
		5,0	19,42	1,65	8%	24,72	4,84	20%

TABELA 29. Resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos referentes à Rota 1 (conclusão).

Concreto	Traço (m)	Resistência à Compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
	6,5	13,56	1,15	8%	22,53	2,02	9%
CRCD-R1	3,5	17,28	0,52	3%	27,93	0,42	2%
	5,0	14,69	0,49	3%	25,75	0,42	2%
	6,5	11,03	0,65	6%	22,31	0,66	3%
CRCD-C1	3,5	32,35	1,7	5%	34,32	3,61	11%
	5,0	26,84	0,93	3%	34,12	1,78	5%
	6,5	18,69	0,85	5%	29,13	1,64	6%

Comparando os resultados de resistência à compressão média e módulo de elasticidade médio dos concretos de referência da Rota 1, incluindo o CR-B e CR-C0, avalia-se o efeito isolado da distribuição granulométrica dos diferentes agregados empregados. Verifica-se que a diferença da granulometria não influenciou os resultados conforme pode ser observado nas Figuras 59 e 60.

FIGURA 59: Efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão – Rota 1.

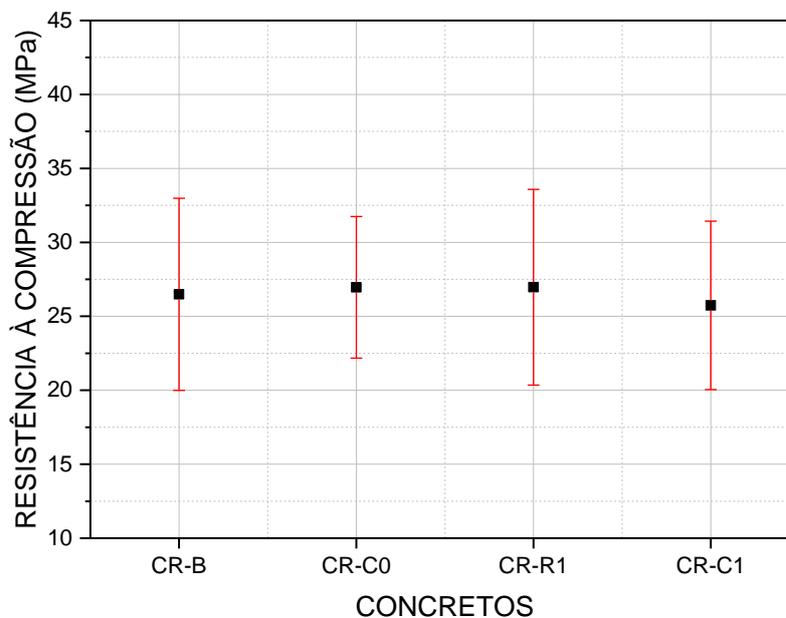
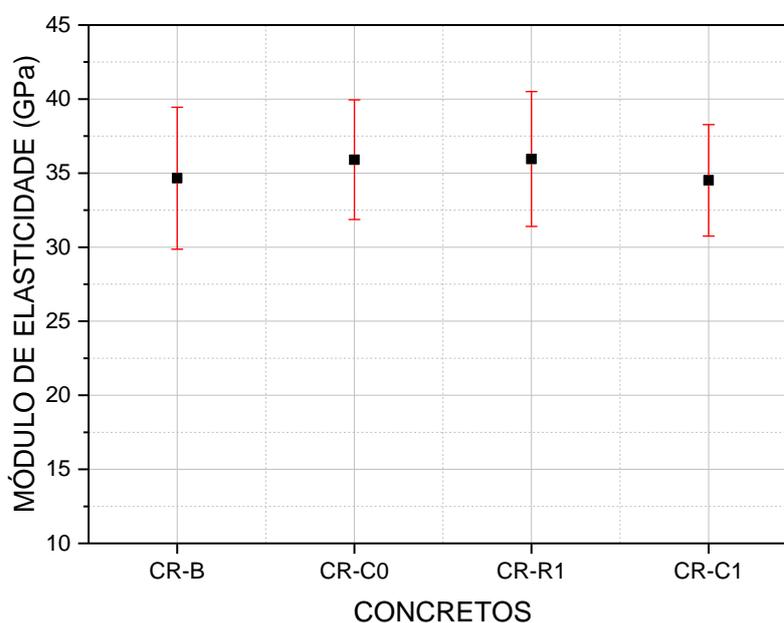


FIGURA 60: Efeito isolado da distribuição granulométrica no módulo de elasticidade– Rota 1.



Os resultados anteriormente apresentados foram tratados estatisticamente através da análise de variância (ANOVA) e são apresentados na Tabela 29. O nível de significância considerado nesta avaliação foi de 5%, sendo que somente os fatores ou combinações com probabilidade inferior a 5% são consideradas como significativas, ou seja, causam alterações na variável de resposta.

TABELA 30. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 1.

Resistência à compressão (MPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B,CR-CO, CR-R1 e CR-C1	15,07	3	5,02	0,14	93%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	1977,69	56	35,31			
Total	1992,77	59				
Módulo de elasticidade (GPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B,CR-CO, CR-R1 e CR-C1	27,29	3	9,09	0,49	69%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	1038,24	56	18,54			
Total	1065,54	59				

O resultado não significativo da análise de variância mostra que a diferença

entre as distribuições granulométricas dos agregados não altera os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de referência. Não havendo diferenças significativas entre os concretos de referência, quando avaliados em relação à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade, considera-se a partir deste momento o concreto CR-B como o “material” referência para as demais análises.

Em função desta definição, os resultados apresentados nas Figuras 61 e 62, que mostram o valor médio de resistência à compressão e módulo de elasticidade em relação a cada traço, também foram avaliados por ANOVA, conforme Tabela 30.

FIGURA 61: Efeito isolado do traço na resistência à compressão – Rota 1.

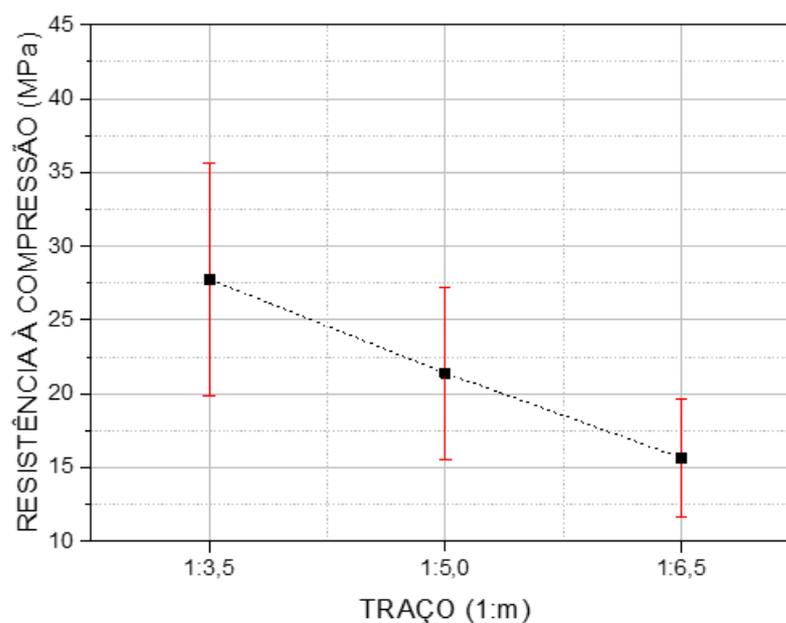


FIGURA 62: Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade – Rota 1.

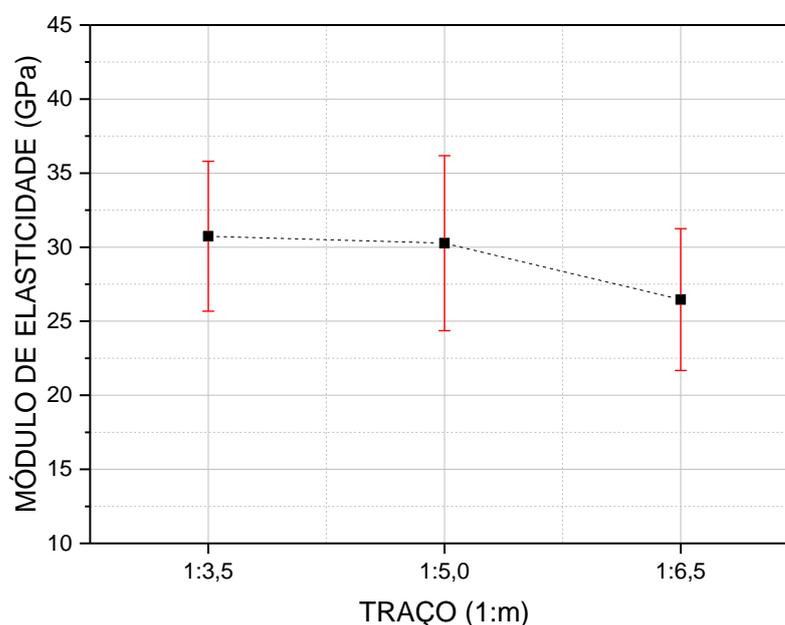


TABELA 31. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado do traço na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 1.

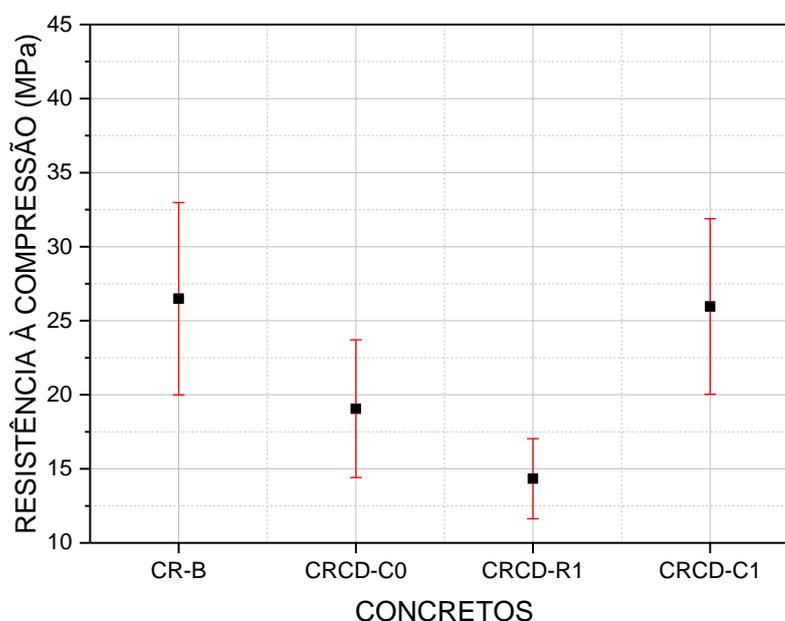
Resistencia à compressão (MPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
1:3,5/1:5,0/1:6,5	1301,41	2	650,70	21,60	1,04E-04%	SIGNIFICATIVO
Dentro dos grupos	1716,78	57	30,11			
Total	3018,19	59				
Módulo de elasticidade (GPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
1:3,5/1:5,0/1:6,5	44,21	2	22,10	0,79	48%	NÃO SIGNIFICATIVO
Dentro dos grupos	250,35	9	27,81			
Total	294,56	11				

Os resultados de 0,000104% e 48% de probabilidade mostram que a variação do traço causa alterações significativas apenas na resistência à compressão, de acordo com o verificado na Figura 61.

Para a condição pós beneficiamento, foram analisados os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade, para o CR-B e os concretos de RCD. A Figura 63 apresenta o efeito do beneficiamento na Rota 1 avaliado em relação

à resistência à compressão. Estes resultados apontam para uma diferença entre os valores de resistência à compressão entre o CR-B e os concretos CRCD-C0 (28% menor) e CRCD-R1 (45% menor), bem como proximidade entre o CR-B e CRCD-C1 (2% menor), confirmando as tendências de que os concretos com agregados reciclados apresentaram uma redução na resistência à compressão quando comparados ao concreto de referência (KISKU *et al.*, 2017; ELHAKAM; MOHAMED; AWAD, 2012; KWAN *et al.*, 2012; POON *et al.*, 2004; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; KOU E POON, 2012; FONSECA, DE BRITO, EVANGELISTA, 2011; BAI *et al.*, 2020), com variações entre 12% (Rao; Bhattacharyya; Barai, 2011) à 47% (Angulo, 2005).

FIGURA 63: Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão – Rota 1.



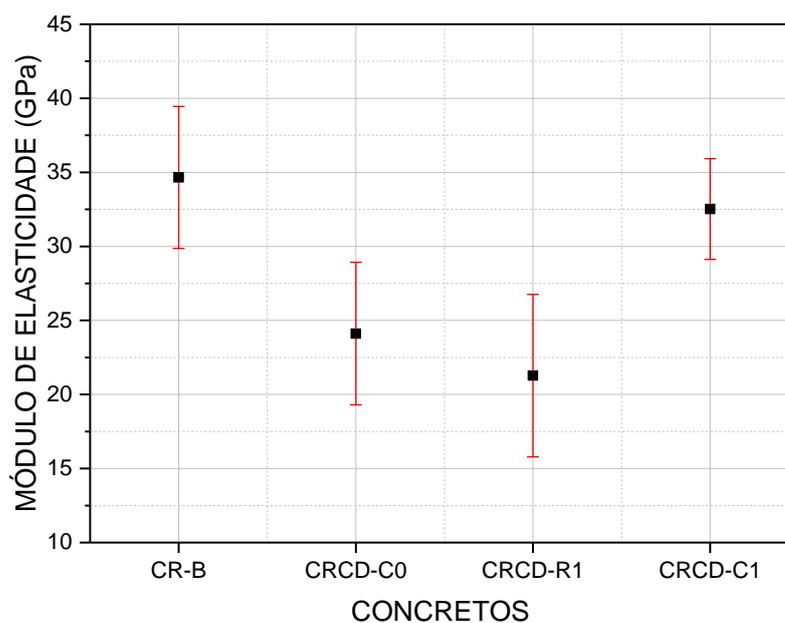
Para uma avaliação estatística, estes resultados foram avaliados por ANOVA, e complementarmente, em caso de resultado significativo, foi realizado teste de TUKEY de forma a comparar as médias. A Tabela 31 apresenta os resultados da ANOVA e Teste de Tukey, que indicam que existe diferença significativa entre os valores das resistências (ANOVA) e semelhança entre os resultados CR-B e CRCD-C1 (Teste de Tukey). Pode-se justificar tal semelhança através da afirmação de Radonjanin, Malesev e Marinkovic (2010) no qual foi verificado que agregados fabricados com concreto de alta resistência não afetaram a resistência à compressão final do concreto.

TABELA 32. Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão – Rota 1 – ANOVA e Teste de TUKEY.

Resistência à compressão (MPa)						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B/CRCD-C0/CRCD-R1/CRCD-C1	1530,48	3	510,16	19,20	0,00000109%	<b>SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	1487,71	56	26,56			
Total	3018,19	59				
Teste de Tukey						
Interações	Significativo					
CR-B - CRCD-C0	<b>SIGNIFICATIVO</b>					
CR-B - CRCD-C1	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CR-B - CRCD-R1	<b>SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C0 - CRCD-C1	<b>SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C0 - CRCD-R1	<b>SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C1 - CRCD-R1	<b>SIGNIFICATIVO</b>					

Análises similares foram realizadas para os resultados do módulo de elasticidade, sendo apresentadas na Figura 64 e Tabela 32.

FIGURA 64: Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade – Rota 1.



Verificando a diferença entre os resultados da Figura 64, as reduções do módulo de elasticidade em relação ao CR-B variam de 6% para o CRCD-C1, 31% para o CRCD-C0 e 38% para o CRCD-R1 efeito do tipo de agregado e da relação a/c. Desta forma, se torna evidente a influência da substituição do agregado natural por agregados de RCD em propriedades mecânicas dos concretos, corroborando com resultados da literatura que mostram decréscimo dos valores de módulo de elasticidade em concretos de RCD quando comparados ao concretos de agregados naturais (DIMITRIOU, SAVVA E PETROU, 2018; BRITO E SAIKIA, 2013; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; GONZALEZ-FONTEBOA; MARTINEZ-ABELLA, 2008; DOMINGO-CABO *et al.*, 2009, BERNDT, 2009; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013; XIAO; FAN; HUANG, 2012; CUNHA, 2017). Para KISKU *et al.* (2017), as reduções variaram de 12% à 27%.

TABELA 33. Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade– Rota 1 – ANOVA e Teste de TUKEY.

<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>						
<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Nível de Significância</b>	<b>Significativo</b>
CR-B/CRCD-C0/CRCD-R1/CRCD-C1	1876,287	3	625,4291	28,51488	0,00000000252%	<b>SIM</b>
Dentro dos grupos	1228,272	56	21,93343			
Total	3104,559	59				
<b>Teste de Tukey</b>						
<b>Interações</b>	<b>Significativo</b>					
CR-B - CRCD-C0	<b>SIGNIFICATIVO</b>					
CR-B - CRCD-C1	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CR-B - CRCD-R1	<b>SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C0 - CRCD-C1	<b>SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C0 - CRCD-R1	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C1 - CRCD-R1	<b>SIGNIFICATIVO</b>					

O efeito do beneficiamento no módulo de elasticidade apresentou resultado semelhante ao de resistência à compressão, diferença significativa quando comparados os valores entre si (ANOVA) e diferença não significativa entre os valores dos concretos CR-B e CRCD-C1 e CRCD-C0 e CRCD-R1. As Figuras 65 e 66 apresentam compilação da influência dos traços dos concretos e beneficiamento dos

agregados na resistência à compressão e módulo de elasticidade dos CR-B e CRCD.

FIGURA 65: Interação entre traço e tipo de beneficiamento na resistência à compressão– Rota 1.

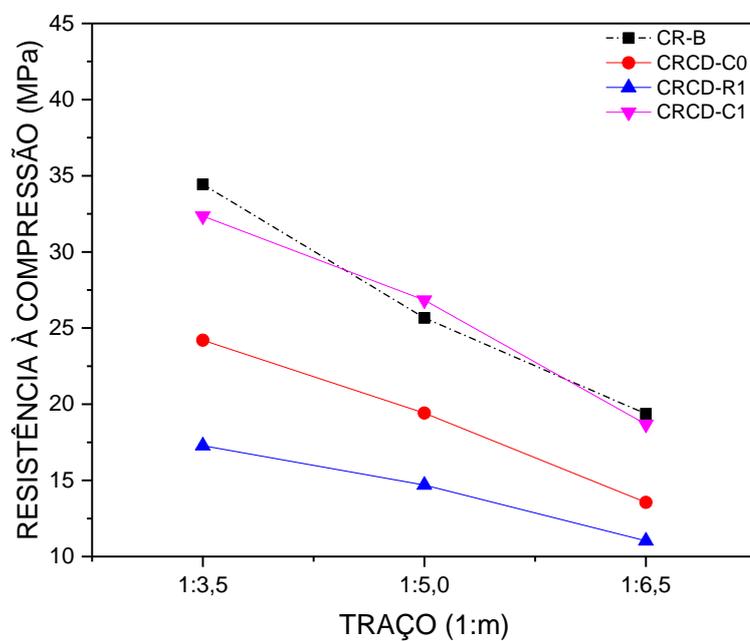
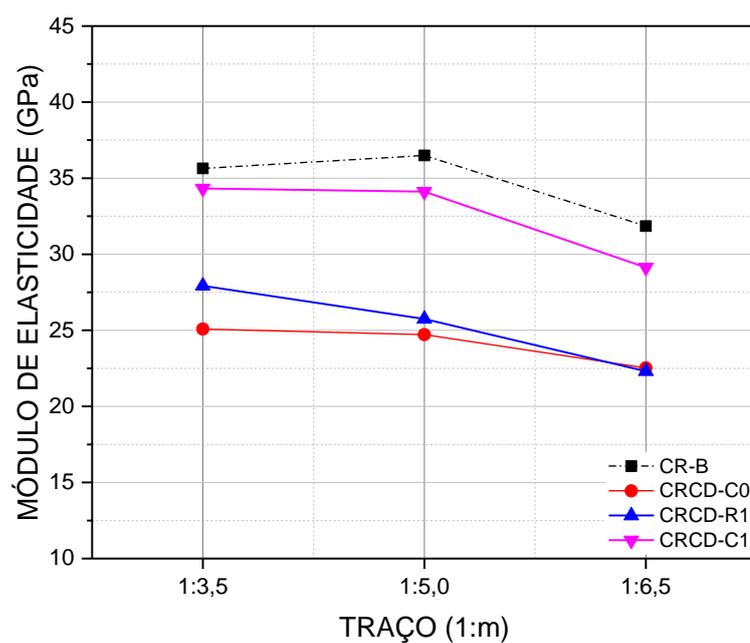


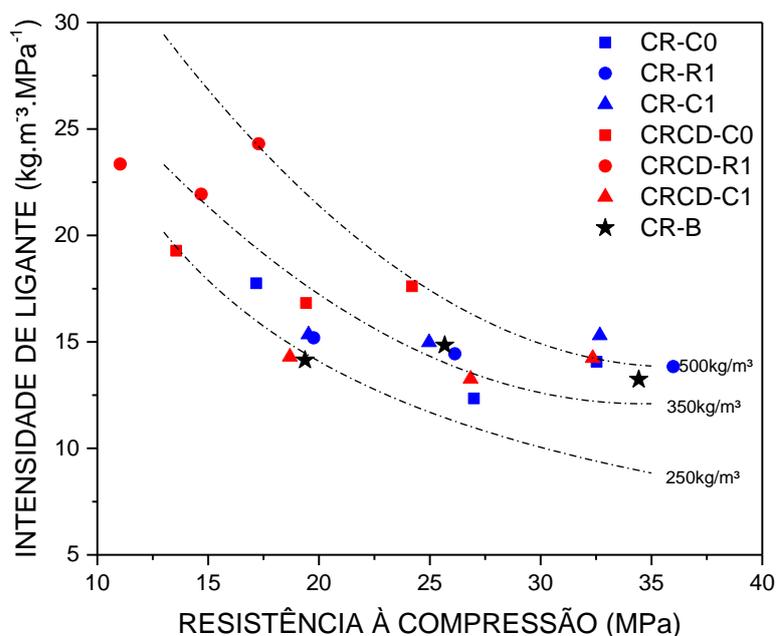
FIGURA 66: Interação entre traço e tipo de beneficiamento no módulo de elasticidade – Rota 1.



Os resultados das avaliações de ANOVA e Teste de Tukey, apresentados nos parágrafos anteriores, podem ser visualizados na disposição das curvas das Figuras 65 e 66. Verifica-se a proximidade entre as curvas dos concretos CR-B e CRCD-C1 e entre as curvas CRCD-C0 e CRCD-R1, sendo os primeiros, concretos que apresentam valores mais altos nas duas propriedades e os últimos concretos que apresentam valores inferiores.

O índice de intensidade de ligante para os concretos desta rota variou de 24,31  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{MPa}^{-1}$  à 12,35  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{MPa}^{-1}$  para resistências variando de 11,03MPa à 35,99MPa, e consumos de cimento que variaram de 257,74 até 499,99MPa, sendo estes resultados apresentados na Figura 67. Este indicador apontou os maiores valores de IL para os concretos CRCD-R1 e CRCD-C0 que apresentaram as menores resistências à compressão entre os demais. Os concretos que se apresentam como mais ecoeficientes, ou seja, com intensidade de ligante com valores inferiores, neste caso, são os concretos referências, seguidos pelos CRCD-C1, resultado este justificado pela composição do agregado reciclado AR-C1.

FIGURA 67: Intensidade de ligante em relação e consumo de cimento em relação a resistência à compressão dos CR e CRCD da Rota 1.



#### 4.3.3.2. Rota 2

Utilizando-se da mesma metodologia aplicada no item 4.3.3.1 Rota 1, a seguir serão apresentados os resultados referentes à Rota 2. A Tabela 33 apresenta os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos referência e concretos de agregados reciclados da Rota 2, e as Figuras 68 e 69 mostram o comportamento destas propriedades em função da variação de distribuição granulométrica dos agregados.

TABELA 34. Resistência à compressão e módulo de elasticidade para os concretos referentes à Rota 2.

Concreto		Traço (m)	Resistência à Compressão Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
REFERÊNCIA	CR-B	3,5	34,45	0,42	1%	35,64	4,24	12%
		5,0	25,67	1,87	7%	36,49	4,15	11%
		6,5	19,37	0,95	5%	30,00	4,17	14%
	CR-C0	3,5	32,53	1,05	3%	38,39	1,51	4%
		5,0	26,99	0,88	3%	35,97	3,86	11%
		6,5	17,17	0,81	5%	31,29	0,43	1%
	CR-T2	3,5	33,97	1,48	4%	37,81	2,94	8%
		5,0	26,75	2,04	8%	34,72	1,42	4%
		6,5	15,64	0,81	5%	31,03	3,09	10%
	CR-M2	3,5	35,91	2,40	7%	37,71	3,81	10%
		5,0	26,72	0,81	3%	35,88	2,37	7%
		6,5	17,54	0,31	2%	31,39	3,59	11%
CR-C2	3,5	34,50	0,90	3%	35,87	3,81	11%	
	5,0	28,62	0,78	3%	31,72	3,05	10%	
	6,5	18,23	0,50	3%	34,69	3,67	11%	
RCD	CRCD-C0	3,5	24,2	0,84	3%	25,08	6,98	28%
		5,0	19,42	1,65	8%	24,72	4,84	20%
		6,5	13,56	1,15	8%	22,53	2,02	9%
	CRCD-T2	3,5	23,41	1,64	7%	27,32	5,47	20%
		5,0	15,58	1,08	7%	25,09	3,10	12%
		6,5	15,66	0,44	3%	21,25	4,56	21%
	CRCD-M2	3,5	28,20	1,61	6%	30,47	5,08	17%
		5,0	27,74	1,72	6%	32,94	1,38	4%
		6,5	21,6	0,98	5%	28,78	4,92	17%
	CRCD-C2	3,5	34,45	2,62	8%	36,74	8,38	23%
		5,0	28,20	0,99	4%	33,71	2,31	7%
		6,5	19,25	0,75	4%	32,06	2,64	8%

FIGURA 68: Efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão – Rota 2.

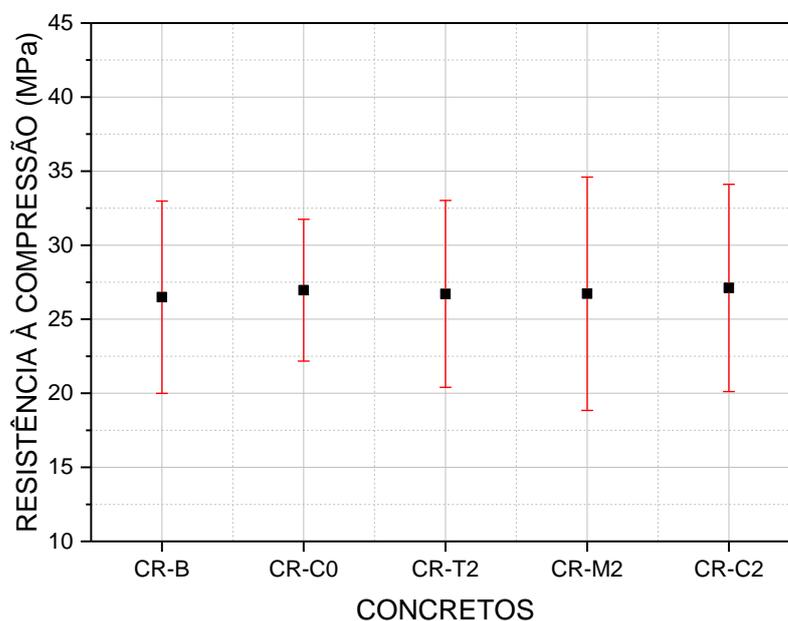
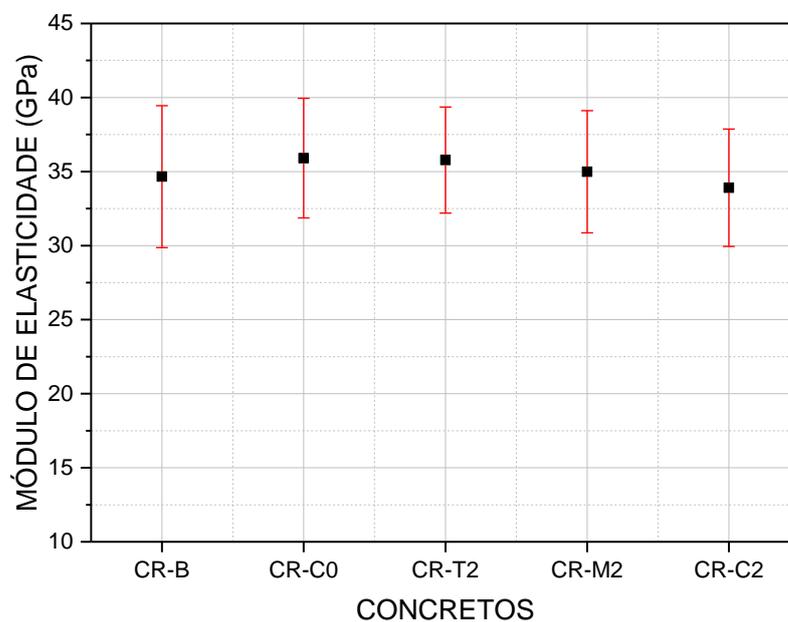


FIGURA 69: Efeito isolado da distribuição granulométrica no módulo de elasticidade – Rota 2.



Analisando os resultados obtidos, observa-se que não houve influência da distribuição granulométrica nas propriedades investigadas, confirmado pela análise de variância ANOVA, com nível de significância superior a 5%, conforme Tabela 34.

TABELA 35. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado da distribuição granulométrica na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 2.

Resistência à compressão (MPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B,CR-CO, CR-T2,CR-M2 e CR-C2	3,57	4	0,89	0,02	100%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	3024,42	70	43,21			
Total	3027,99	74				
Módulo de elasticidade (GPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B,CR-CO, CR-T2,CR-M2 e CR-C2	3,57	4	0,89	0,02	100%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	3024,42	70	43,21			
Total	3027,99	74				

Complementarmente à análise da variabilidade da granulometria na avaliação das propriedades resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos referência, foi investigado o efeito da variação do traço, e os resultados são apresentados nas Figuras 70 e 71.

FIGURA 70: Efeito isolado do traço na resistência à compressão– Rota 2.

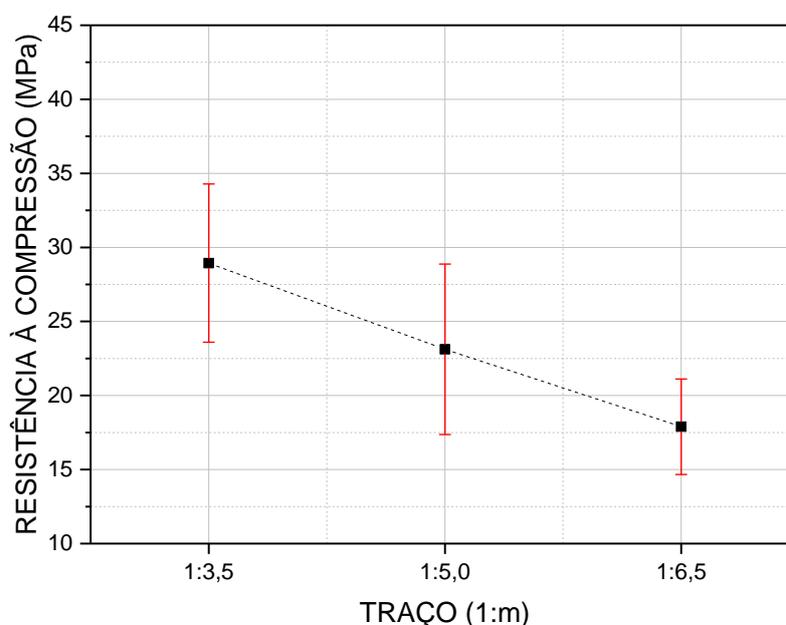
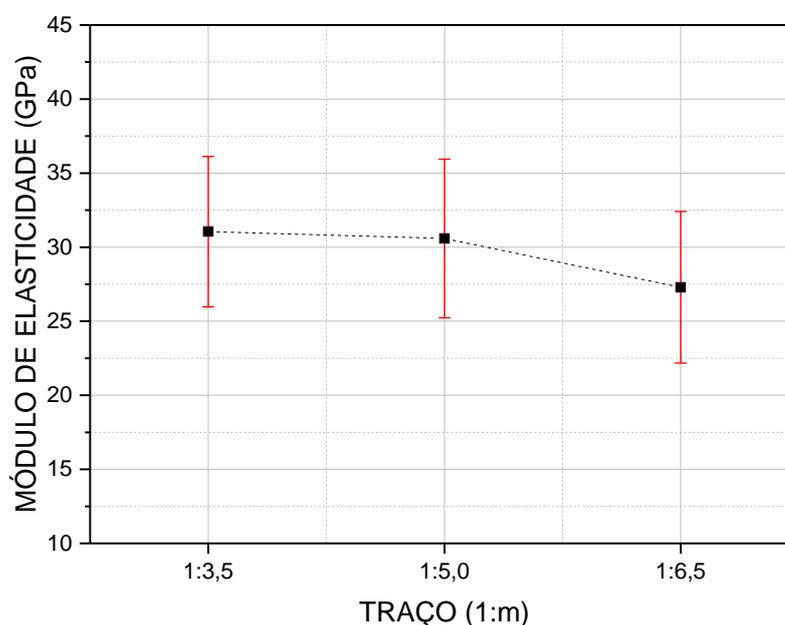


FIGURA 71: Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade– Rota 2.



Os níveis de significância para as análises das duas propriedades, resistência à compressão e módulo de elasticidade, 1% e 48%, respectivamente, mostram que nesta rota, o traço afeta somente a resistência à compressão quando avaliado entre os concretos referência (Tabela 35).

TABELA 36. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado do traço na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 2 (continua)

Resistencia à compressão (MPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
1:3,5/1:5,0/1:6,5	305,76	2	152,88	6,36	1%	<b>SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	288,43	12	24,03			
Total	594,20	14				
Teste de Tukey						
Interações		Significativo				
1:3,5/1:5		<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>				
1:3,5/1:6,5		<b>SIGNIFICATIVO</b>				
1:5/1:3,5		<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>				
1:5/1:6,5		<b>SIGNIFICATIVO</b>				
1:6,5/1:3,5		<b>SIGNIFICATIVO</b>				
1:6,5/1:5		<b>SIGNIFICATIVO</b>				

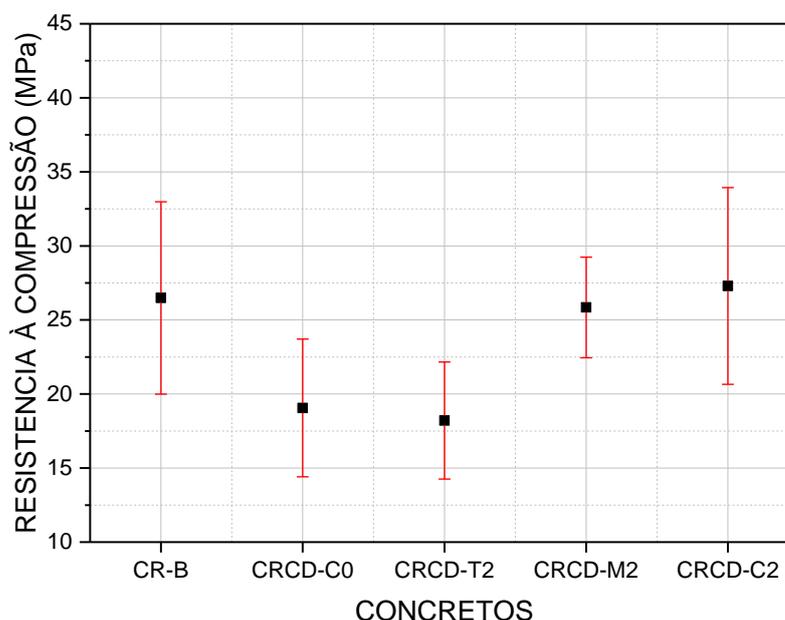
TABELA 35. Análise de variância (ANOVA) do efeito isolado do traço na resistência à compressão e módulo de elasticidade - Rota 2 (conclusão)

Módulo de elasticidade (GPa)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
1:3,5/1:5,0/1:6,5	41,97	2	20,98	0,77	48%	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	323,01	12	26,91			
Total	364,98	14				

De acordo com o Teste de Tukey, existe similaridade, diferença não significativa, entre os traços 1:3,5 e 1:5.

A influência do beneficiamento dos agregados de RCD nas propriedades de resistência à compressão (Figuras 72 e 73 e Tabela 36) e módulo de elasticidade dos concretos (Figura 74 e 75 e Tabela 37) foram analisadas individualmente.

FIGURA 72: Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão – Rota 2.



O beneficiamento dos agregados de RCD apresenta influência na variação dos resultados, quando comparados os resultados de resistência à compressão do CR-B e dos concretos de RCD da Rota 2, (Figura 72). Verifica-se redução na resistência dos concretos CRCD-C0 de 28% (conforme apresentado na Rota 1), de 31% para o CRCD-T2, e 3% para o CRCD-M2, e aumento de 3% na resistência do concreto

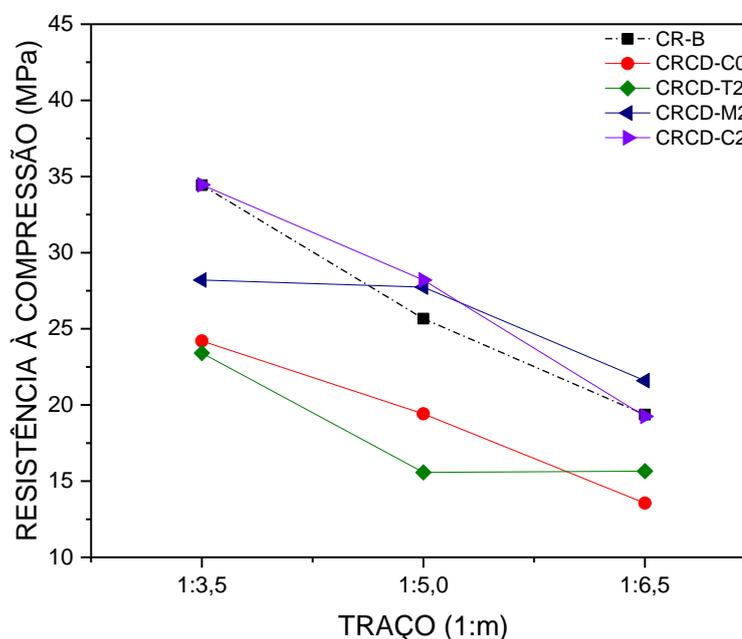
CRCD-C2. Corroborando com estes resultados tem-se a Tabela 33, que mostra diferença significativa entre as resistências dos concretos (nível de significância ANOVA de 0,0000887%). Porém, de acordo com o Teste de Tukey, existe similaridade, ou seja, diferença não significativa entre CR-B e CRCD-C2, CR-B e CRCD-M2, CRCD-C0 e CRCD-T2, e CRCD-C2 e CRCD-M2.

TABELA 37. Efeito isolado do beneficiamento na resistência à compressão– Rota 2 – ANOVA e Teste de TUKEY.

<b>Resistência à compressão (MPa)</b>						
<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Nível de Significância</b>	<b>Significativo</b>
CR-B/CRCD-C0/CRCD-T2/ CRCD-M2/CRCD-C2	1146,52	4	286,63	10,61	0,0000887%	<b>SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	1890,80	70	27,01			
Total	3037,32	74				
<b>Teste de Tukey</b>						
<b>Interações</b>	<b>Significativo</b>					
CR-B - CRCD-C0	SIGNIFICATIVO					
CR-B - CRCD-C2	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CR-B - CRCD-M2	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CR-B - CRCD-T2	SIGNIFICATIVO					
CRCD-C0 - CRCD-C2	SIGNIFICATIVO					
CRCD-C0 - CRCD-M2	SIGNIFICATIVO					
CRCD-C0 - CRCD-T2	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C2 - CRCD-M2	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CRCD-C2 - CRCD-T2	SIGNIFICATIVO					
CRCD-M2 - CRCD-T2	SIGNIFICATIVO					

A interação entre traço e tipo de beneficiamento na resistência à compressão do CR-B e dos CRCD é apresentada na Figura 73.

FIGURA 73: Interação entre traço e tipo de beneficiamento na resistência à compressão–  
Rota 2.



Verifica-se que existe proximidade, na região superior do gráfico da Figura 73, entre as curvas CR-B, CRCD-M2 e CRCD-C2, ressaltando-se os traços 1:5 e 1:6,5. Por outro lado, o traço 1:3,5 de matriz mais rica, de menor relação a/c e, conseqüentemente mais resistente, parece exigir mais das propriedades dos agregados, que no caso do CR-B e CRCD-C2, por serem partículas mais densas e de melhor qualidade, conseguem acompanhar a maior capacidade da matriz cimentícia.

A quantidade de agregado de qualidade inferior na composição do AR-M2, quando comparado aos CR-B e AR-C2, influenciou o CRCD-M2 a atingir sua resistência limite aos 28 MPa, aproximadamente, provavelmente pelo rompimento do agregado em uma matriz mais resistente.

Na região inferior do mesmo gráfico, a proximidade envolve as curvas dos concretos CRCD-C0 e CRCD-T2, tal semelhança pode ser explicada em função das massas específicas semelhantes dos AR-C0 e AR-T2 e levam a crer que a capacidade resistente de ambos seja similar, menores que os AR-C2 e AR-M2 (que possuem maior massa específica), regendo o rompimento do concreto em níveis inferiores de resistência.

A variação entre os resultados da avaliação do efeito do beneficiamento dos agregados de RCD no resultado do módulo de elasticidade apresentou

comportamento semelhante à resistência à compressão, conforme Figura 74 e Tabela 36.

FIGURA 74: Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade – Rota 2.

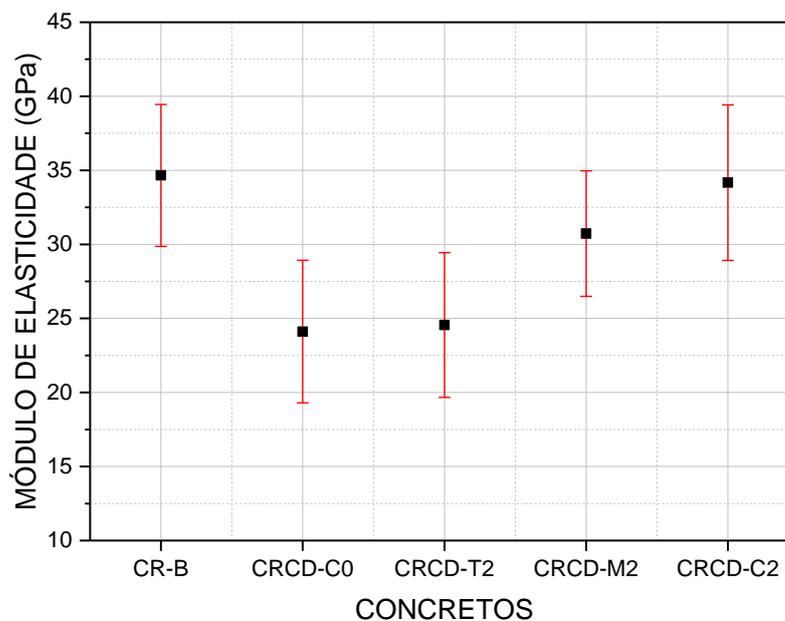


TABELA 38. Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade– Rota 2 – ANOVA e Teste de TUKEY (continua).

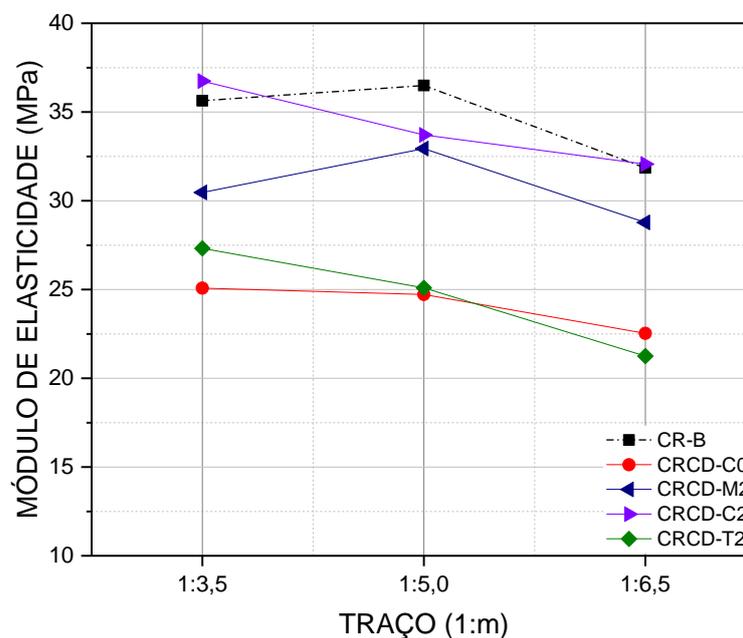
Resistência à compressão (MPa)						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Teste F	Nível de Significância	Significativo
CR-B/CRCD-C0/CRCD-T2/ CRCD-M2/CRCD-C2	1549,69	4	387,42	16,75	0,000000112%	<b>SIGNIFICATIVO</b>
Dentro dos grupos	1618,30	70	23,11			
Total	3167,99	74				
Teste de Tukey						
Interações	Significativo					
CR-B - CRCD-C0	SIGNIFICATIVO					
CR-B - CRCD-C2	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					
CR-B - CRCD-M2	SIGNIFICATIVO					
CR-B - CRCD-T2	SIGNIFICATIVO					
CRCD-C0 - CRCD-C2	SIGNIFICATIVO					
CRCD-C0 - CRCD-M2	SIGNIFICATIVO					
CRCD-C0 - CRCD-T2	<b>NÃO SIGNIFICATIVO</b>					

TABELA 36. Efeito isolado do beneficiamento no módulo de elasticidade– Rota 2 – ANOVA e Teste de TUKEY (conclusão).

Teste de Tukey	
CRCD-C2 - CRCD-M2	NÃO SIGNIFICATIVO
CRCD-C2 - CRCD-T2	SIGNIFICATIVO
CRCD-M2 - CRCD-T2	SIGNIFICATIVO

O módulo de elasticidade apresentou diferença significativa entre os resultados dos diferentes beneficiamentos, conforme Figura 75 e análise ANOVA da Tabela 37. Em relação às interações avaliadas no Teste de Tukey, tem-se similaridade, diferença não significativa, entre os concretos CR-B e CRDC-C2, CRCD-C0 e CRCD-T2, CRCD-C2 e CRCD-M2. Estas similaridades podem ser verificadas na Figura 75, onde a região superior do gráfico mostra a proximidade entre as curvas dos concretos CR-B, CRCD-C2, CRCD-M2, no outro extremo do gráfico tem-se a proximidade entre as curvas CRCD-C0 e CRCD-T2.

FIGURA 75: Interação entre traço e tipo de beneficiamento no módulo de elasticidade– Rota 2.

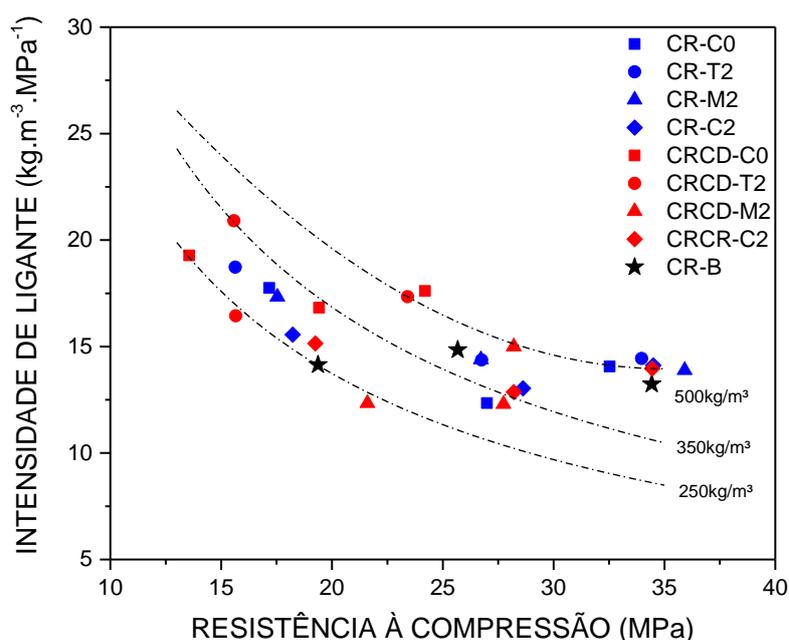


Vale ressaltar, que a diferença entre as análises do Teste de Tukey para avaliar a similaridade entre resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade entre os concretos mostra a similaridade entre CR-B e CRCD-M2 na resistência à

compressão, enquanto no módulo de elasticidade esta similaridade não está evidenciada, e pode ser visualizada pelo posicionamento entre as curvas destes concretos (Figura 75). Tal comportamento pode ser explicado em função da influência do módulo de elasticidade e resistência à compressão do agregado no módulo de elasticidade do concreto, uma vez que o AR-M2 possui pelo menos 9% de agregados de argamassa e cerâmicos, mais porosos, mais deformáveis quando comparados ao AN-B. Desta forma a composição do AR-M2 reflete diretamente no valor do módulo de elasticidade deste concreto reciclado.

A relação entre intensidade de ligante e resistência à compressão para os concretos CR e CRCD da Rota 2 pode ser verificada na Figura 76.

FIGURA 76. Intensidade de ligante em relação a resistência à compressão dos CR e CRCD da Rota 2



De acordo com a Figura 76, os resultados de intensidade de ligante se apresentam próximos ao da Rota1, com valores entre 12,30 e 20,91 kg.m-3MPa-1. Porém, neste caso os resultados dos CR e CRCD estão mais próximos entre si, uma vez que a composição destes agregados também é semelhante (beneficiados ricos em concreto). De maneira similar a Rota 1, as resistências variaram de 35,91MPa até 13,56MPa e o consumo de cimento de 498,70kg/m<sup>3</sup> à 257,45kg/m<sup>3</sup>. Para destacar concretos mais ecoeficientes nesta Rota, dentre os CRCD, pode-se apontar os

referentes aos agregados AR-M2 e AR-C2. Os melhores resultados, independentemente do tipo de agregado, são alcançados para os concretos de maiores resistências. O que faz o desempenho em termos de consumo de ligantes ser maior.

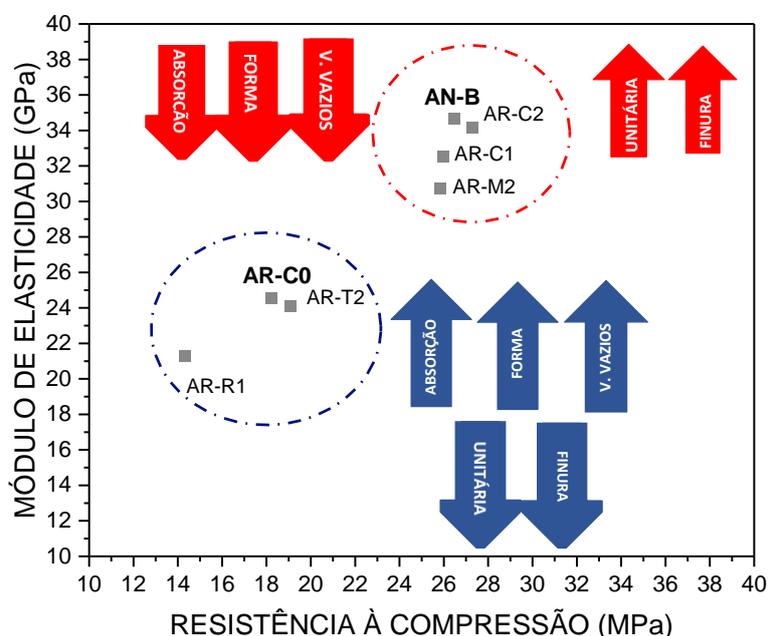
#### 4.4. CORRELAÇÕES FINAIS ROTA 1 E 2

Para a definição da rota mais adequada de beneficiamento foram correlacionadas as propriedades físicas e composições dos agregados de RCD beneficiados com as propriedades dos concretos com eles produzidos, cujos dados foram compilados e apresentados na Figura 77.

Na Figura 77 os pontos representam os valores médios dos resultados dos 3 traços de cada família de concreto para as propriedades resistência à compressão e módulo de elasticidade. Observa-se agrupamento de resultados em dois comportamentos distintos, aqueles que apresentam maiores valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, compatíveis com AN-B, e aqueles com valores inferiores e similares ao AR-C0. Também foi possível estabelecer uma relação com as propriedades físicas tais como, massa específica média, massa unitária, índice de forma, índice de volume de vazios e absorção, para os grupos definidos. Ao avaliar a absorção dos agregados, comparando os dois grupos, verificou-se que para o de maior resistência à compressão e módulo de elasticidade, os resultados apresentaram variação de 0,83% até 1,65%, estes inferiores à faixa de resultados dos concretos de menor resistência e módulo, que variaram de 4,53% a 7,31%, estas diferenças foram representadas com setas, com sentido para baixo (menor que) e para cima (maior que), respectivamente (Figura 77).

Diversos autores afirmam que a absorção é dependente do material que compõe este agregado, e uma maior absorção deste está relacionada aos poros capilares e vazios internos existentes, reduzindo a resistência e aumentando a deformação dos agregados e, conseqüentemente dos concretos com eles produzidos (BRITO e SAIKIA, 2013; BRITO e DHIR, 2014, BUTLER, 2003; CABRAL, 2007; DJERBI, 2020; ECKERT e OLIVEIRA, 2017; QUATTRONE *et al.*, 2016; SILVA, BRITO e DHIR, 2014, THOMAS *et al.*, 2019; WANG, YU, e LI, 2020; JAYASURIY *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2014; SILVA, THOMAS *et al.*, 2019; WANG, YU, e LI, 2020).

FIGURA 77: Propriedades físicas e composições de agregados RCD e AR-N e Resistencia à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.



Comportamento semelhante à absorção foi verificado para a propriedade de índice de volume de vazios, 46,14% a 70,37% (maior resistência e módulo) contra 72,32% a 75,20% (menor resistência e módulo). Uma vez que o teor de argamassa seca foi constante, 54%, para todas as misturas pode-se dizer que os concretos com menor índice de vazios ficaram com um teor de argamassa levemente superior ao mínimo necessário (teor ideal de argamassa), o que leva a uma maior facilidade de moldagem, reduzindo o risco de falhas de concretagem e de aprisionamento de ar apresentando assim resultados de resistências e módulos superiores (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016; WEIDMANN, 2008)

Quanto menor resultado do índice de forma, tem-se a tendência de um agregado mais arredondado, e esta propriedade, para agregados utilizados em concretos, leva a uma maior a facilidade de moldagem, menor a zona de transição formada diminuindo as tensões localizadas no entorno do agregado, o que leva a uma maior resistência e maior módulo (AFSHAR *et al.*, 2017; MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016; WEIDMANN, 2008). Esta análise corrobora com o resultado encontrado que apresenta índices de forma, 1,84 até 2,19 para as maiores resistências e módulos e 2,03 até 2,54 para as menores resistências e módulos.

Comportamento oposto foi verificado para as propriedades de massa específica

(média entre os valores determinados por picnometria e pelo método de LEITE), massa unitária e módulo de finura, onde o grupo de maior resistência e módulo apresentou faixas mais altas, de 2,70 até 2,91 g/cm<sup>3</sup>, 1,53g/cm<sup>3</sup> até 1,96g/cm<sup>3</sup> e 6,51 a 7,02, quando comparados a variação de 2,54 a 2,59 g/cm<sup>3</sup>, 1,27g/cm<sup>3</sup> até 1,46g/cm<sup>3</sup> e 6,34 a 6,73 do grupo de resistências e módulos inferiores. Tal comportamento pode ser explicado uma vez que quanto maior o valor da massa específica dos agregados, estes se tornam mais densos e menos porosos, conseqüentemente tendem a ser mais resistentes e menos deformáveis. Valores maiores da propriedade massa unitária tendem a gerar um maior empacotamento dos grãos e por conseqüência menor volume de vazios, aumentando assim a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Junto a estas propriedades tem-se o módulo de finura que quando apresenta valores maiores representa uma maior granulometria dos agregados, uma menor superfície específica, uma menor demanda de água permitindo reduzir a relação água/cimento, mantendo a trabalhabilidade e aumentando, conseqüentemente, a resistência (CABRAL, 2007; FLOREA E BROUWERS, 2013)

Quanto à ecoeficiência dos concretos, indicados pela intensidade de ligante, pode-se dizer que os valores deste índice indicam proximidade entre as rotas, mas pode-se destacar os concretos CRCD-C1, CRCD-M2 e CRCD-C2.

Por meio destes resultados, pode-se dizer que a Rota 1 produz dois agregados distintos em propriedades físicas e concretos que refletem estas propriedades. Neste caso específico, pode-se dizer que somente o agregado AR-C1 produz concreto com propriedades aceitáveis para um concreto estrutural. Por outro lado, a Rota 2 produz três agregados distintos, sendo dois deles com propriedades físicas próximas às da brita basáltica. Dos concretos fabricados com estes agregados, pode-se dizer que dois deles, AR-M2 e AR-C2 produzem concretos com propriedades compatíveis com concretos estruturais e próximos aos de agregado natural brita basáltica.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir da utilização da metodologia proposta permitiram a obtenção das seguintes conclusões:

Entre os agregados graúdos obtidos de argamassa (AR-A), cerâmico de baixa resistência (AR-CEB), cerâmico de alta resistência (AR-CEA), concreto de baixa resistência (AR-COB) e concreto convencional (AR-CC), os que mais se aproximaram das propriedades físicas (distribuição granulométrica, módulo de finura, taxa de absorção, massa específica e unitária) do agregado graúdo natural de brita basáltica (AN-B) são os agregados reciclados de concreto. Por outro lado, tem-se o AR-A com os menores resultados de módulo de finura e massa específica e o AR-CEB com valores elevados de absorção e índice de forma, fatores que influenciam na trabalhabilidade, na relação a/c e na resistência à compressão de concretos. Estes resultados demonstraram a viabilidade de utilização destes agregados reciclados como misturas para simular um RCD de composição típica no Brasil, uma vez que estas variabilidades apresentadas se encontram dentro dos resultados da literatura para as diferentes qualidades de agregados reciclados analisados.

Quando comparadas as duas rotas de beneficiamento, conclui-se que as melhores características dos agregados foram obtidas para a Rota 2, com destaque para o AR-C2 e AR-M2, que apresentaram resultados superiores em recuperação de materiais de maior densidade, sendo estes agregados oriundos de concreto, com 99,7 e 91,4%, respectivamente, resultados estes inéditos na literatura. Também pode-se afirmar que a Rota 1 com o beneficiado AR-C1 se destaca quando apresenta uma composição menos heterogênea em relação ao material não beneficiado, com maior concentração de agregados de concreto (81,6% em relação ao não jigado).

Os concretos confeccionados com agregados beneficiados das Rotas 1 e 2, quando comparados aos concretos referências no estado fresco, não apresentaram diferenças significativas em relação à massa específica, de acordo com as análises ANOVA.

Considerando o estado endurecido, verificou-se que quando avaliados os efeitos isolados da distribuição granulométrica e do tipo de traço, não houve diferença significativa entre o CR-B e os demais concretos referência. Desta forma, o CR-B foi

selecionado como referência para as demais comparações nas duas rotas. O efeito do beneficiamento na Rota 1 apresenta, para as propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade, semelhanças entre CR-B e CRCD-C1, e CRCD-C0 e CRCD-R1, porém os primeiros com resultados superiores aos últimos. Mesma avaliação de propriedades para a Rota 2 apontou valores superiores e semelhantes nos concretos CR-B, CRCD-M2 e CRCD-C2, e resultados inferiores e semelhantes para os CRCD-C0 e CRCD-T2.

As rotas de beneficiamento foram eficientes na melhoria da qualidade dos agregados reciclados, AR-C1, AR-M2, AR-T2 e AR-C2, e na qualidade dos concretos com eles confeccionados. A rota de beneficiamento mais adequada, considerando apenas as propriedades físicas e mecânicas avaliadas, foi a Rota 2, com aplicação de dois estágios de separação (duas jigs sucessivas), obtendo-se dois tipos de agregados, ambos com propriedades físicas próximas à da brita basáltica e, conseqüentemente, concretos com resistências à compressão (34,45 MPa, 28,20 MPa e 19,25 MPa) e módulo de elasticidade (36,74 GPa, 33,71 GPa e 32,06 GPa) mais próximos ao concreto de referência com brita basáltica (resistência à compressão, 34,43 MPa, 25,67 MPa, 19,37 MPa e módulo de elasticidade 35,64 GPa, 36,49 GPa, 31,85 GPa).

## 6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- a) estudo da influência do AR com propriedades semelhantes ao agregado natural, sem alteração nas relações a/c;
- b) estudo de outras rotas de beneficiamento que possibilitem o reaproveitamento do AR-R1;
- c) estudo de Análise de Ciclo de Vida (ACV) para os concretos das Rotas 1 e 2 em comparação ao concreto convencional;
- d) estudo do reaproveitamento da água de jigagem para outros fins ou reuso no processo;
- e) utilizar como ferramenta de decisão na escolha da rota mais adequada a eficiência do processo utilizando dados de rendimentos dos beneficiados e os consumos de água e energia de cada etapa;
- f) análise da durabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados com e sem beneficiamento em jigue.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 27: Agregados - Redução da Amostra de Campo para Ensaio de Laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 45: Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52: Agregado Miúdo - Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 53: Agregado Graúdo - Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67: Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5.738: Concreto – Procedimento de Moldagem e Cura de Corpos de Provas. Rio de Janeiro: ABNT, 2016

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5.739: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6.118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7.211: Agregados para Concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7.809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019d.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8.522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9.833: Concreto Fresco - Determinação da Massa Específica, do Rendimento e do Teor de Ar pelo Método Gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009e.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.112: Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos - Áreas de Transbordo e Triagem - Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.113: Resíduos Sólidos da Construção Civil e Resíduos Inertes - Aterros - Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.114: Resíduos Sólidos da Construção Civil - Áreas de Reciclagem - Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.115: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil - Execução de Camadas de Pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004e.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.116: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil: Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto sem Função Estrutural: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004f.

ABRECON - **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.abrecon.org.br/mercado/>. Acesso em: 17/06/2016.

ABRECON - **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**. São Paulo, 2015. Disponível em: [https://www.abrecon.org.br/pesquisa\\_setorial/](https://www.abrecon.org.br/pesquisa_setorial/). Acesso em: 06/07/2017.

AFSHAR, T.; DISFANI, M. M.; ARULRAJAH, A.; NARSILIO, G. A.; EMAM, S. Impact of Particle Shape on Breakage of Recycled Construction and Demolition Aggregates. **Powder Technology**, v. 308, p. 1–12, 2017.

ALLMINERAL - **alljig® | Product Information** - Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG. Düsseldorf, 2019. <https://www.allmineral.com/en/products/alljig/>. Acesso em 17/05/2020.

ALTHEMAN, D. **Avaliação da Durabilidade de Concretos Confeccionados com Entulho de Construção Civil**. Campinas, 2002. 102 f. Relatório (Iniciação Científica) – Universidade de Campinas.

ALTUNKU, D., KASAPSEÇKIN, M.A., **Management and recycling of constructional solid waste in Turkey**. In: 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, Procedia Engineering, v. 21, pp. 1072–1077, 2011.

AMBRÓS, W.M. **Novos aspectos da estratificação de partículas em jiges descontínuos**. Porto Alegre, 2017. 179pf. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – PPGE3, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

AMBRÓS, W.M.; CAZACLIU, B.G.; SAMPAIO, C.H. Wall effects on particle separation in air jigs. **Powder Technology**, v. 301, p. 369-378, 2016.

AMBRÓS, W.M.; SAMPAIO, C.H.; CAZACLIU, B.G.; MILTZAREK, G.L.; MIRANDA, L.R. Usage o fair jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. **Waste management**, v.60, p. 75-83, 2017.

AMBRÓS, W.M.; SAMPAIO, C.H.; CAZACLIU, B.G.; CONCEIÇÃO, P.N.; REIS, G.S. Some observations on the influence of particle size and size distribution on stratification in pneumatic jigs. **Powder Technology**, v.342, p. 594-606, 2019.

ANEPAC - **Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção**. Mercado – Perspectivas para o Setor de Agregados. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.anepac.org.br/agregados/mercado>. Acesso em: 06/07/2017. 2016

ANGULO, S. C. **Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. 2000. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento Mecânico dos Concretos**. São Paulo, 2005. 149f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo,

São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. **Concreto: Ciência e Tecnologia – Capítulo: Concreto com Agregados Reciclados**. São Paulo: IBRACON, Editor G. C. Isaia, v. II, p. 1731-1767, 2011.

AZIZ, M.A.AISA, K.Md MILES, N.J.; RASHID, R.A. Pneumatic jig: effect of airflow, time and pulse rates on solid particle separation. **International Journal of Environmental Science and Technology**. v.16, p.11-22, 2019.

BAHRAMI, N; ZOHRABI, M.; MAHMOUDY, S.A.; AKBARI, M. Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties. **Journal of Building Engineering**, n. 31, p. 101361, 2020.

BAI, G.; ZHU, C.; LIU, C.; LIU, B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction and Building Materials**. v. 240, p. 179-178, 2020.

BICCA, I.S. **Estudo da viabilidade de utilização do rejeito cerâmico, como agregado graúdo, na produção de concreto com características estruturais**. Porto Alegre, 2000. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, Á. G. Quantificação e Classificação dos Resíduos da Construção e Demolição Coletados no Município de Passo Fundo, RS. **Revista Ambiente Construído**, v. 8, n. 3, p. 65-76, jul./out. 2008.

BERNDT, M. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate', **Construction and Building Materials**, v.23, p. 2606 – 2613, 2009.

BODI, J. Experiência Brasileira com Entulho Reciclado na Pavimentação. In: **Reciclagem na Construção Civil, Alternativa Econômica para a Proteção Ambiental**, 29., São Paulo, 1997. Anais... São Paulo: Núcleo de Desenvolvimento de Pesquisas POLI /UPE, 1997. p. 56-63.

BOGGIO, A. J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. Porto Alegre, 2000. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BRASIL. **Resolução nº 307. CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação, de 5 julho de 2002. Diário Oficial da União, n. 136 , p. 95-96 , 17 jul. 2002.

BRASIL. **Resolução nº 448. CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação, de 19 janeiro de 2012. Diário Oficial da União de 19 de janeiro de 2012, p. 76, 19 jan. 2012.

BRASIL. **Resolução nº 469. CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação, de 30 de julho de 2015, Diário Oficial da União, n. 1 , p. 109-110 , 30 jul. 2015.

BRASIL. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Diário Oficial da União, n. edição extra, p.1 , 23 dez 2010, 2010a

BRASIL. **Lei 12.305: PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos**, de 02 de agosto de 2010. Diário Oficial da União, seção 1, p.3, 03 agosto 2010, 2010b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, Brasília, 2012.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento:**

**Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018.** Brasília: SNS/MDR, 247 p. , 2019.

BRAVO, M.; BRITO, J. DE; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical Performance of Concrete made with Aggregates from Construction and Demolition Waste Recycling Plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 59–74, 2015.

BRITO, J.; SAIKIA, N. **Recycled Aggregate in Concrete Use of Industrial, Construction and Demolition Waste.** Londres, Springer, 2013.

BUTLER, A. M. **Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** São Carlos, 2003. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

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.** 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CABRAL, A.E.B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, RIBEIRO, J.L.D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.24, p. 421-430, 2010.

CARRIJO, P.M. **Análise da da Massa Específica de Agregados Graúdos Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto.** São Paulo: USP, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.

CAZACLIU, B.; HOFFMANN, C.; MILTZAREK, G.; PETTER C., LE GUEN, L., PARANHOS ,R., HUCHET, F., KIRCHHEIM, A.P. The Potential of Using Air Jigging

to Sort Recycled Aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 46–53, 2014.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

Correia J R; de Brito J; Pereira A S. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. **Materials and Structures** , v. 39, p.:169 – 77, 2006.

CUNHA, M.G.C. **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 de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

DAMINELI, B. L. **Estudo de Métodos para Caracterização de Propriedades Físicas de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados.** São Paulo, 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F.M.; AGUIAR, P.S.; JOHN, V.M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & Concrete Composites**, n. 32, p. 555–562, 2010.

DELATTE, N. J. Lessons From Roman Cement and Concrete. **Journal of Professional Issues in Engineering Educations and Practice**, p.109–115, 2001.

- DIAS, J. F. **Avaliação de Resíduos da Fabricação de Telhas Cerâmicas para seu Emprego em Camadas de Pavimento de Baixo Custo**. São Paulo, 2004. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v. 150, p. 228-235, 2018.
- DJERBI, A. Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete. **Construction and Building Materials**. v. 190, p. 1023-1033, 2020.
- DOMINGO-CABO, A.; LÁZARO, C.; LÓPEZ-GAYARRE, F.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; SERNA, P.; CASTAÑOTABARES, J.O. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials** , v. 23 , p. 2545 – 2553 , 2009.
- ECKERT, M.; OLIVEIRA, M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. **Construction and Building Materials**. v. 133, p. 416-424, 2017.
- ELHAKAM, A.A.; MOHAMED, A.M.; AWAD, E. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. . **Construction and Building Materials**. v. 35, p. 421-427, 2012.
- UNE STANDARDS.EN 933-3. Tests for geometrical properties of aggregates - Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index, UNE STANDARDS, 2012.
- FALCÃO, N. C. B.; FARIAS, A. B.; SUKAR, S. F.; GUSMÃO, A. D. **Diagnóstico da Gestão de Resíduos da Construção Civil no Município de Olinda (PE) - Estudo de Caso**. Encontro Técnico Nacional de Auditoria de Obras Públicas – ENAOP. Anais... Palmas - TO, 2012.

- FERNANDEZ, J. A. B. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil– Relatório de Pesquisa**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: IPEA, 2012.
- FLOREA, M.V.A; BROUWERS, H.J.H. Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use. **Cement and Concrete Research**. v. 52 , p.11–21, 2013.
- GONÇALVES.D.B. A gestão de Resíduos da Construção Civil no Município de Sorocaba-SP. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, V 11, Nº 2, P.15-26, 2016.
- FONSECA; N; DE BRITO, J; EVANGELISTA, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. **Cement and Concrete Composites**. v.33, p. 637-643, 2011.
- ETXEBERRIA M. , MARI A.; VAZQUEZ E. Recycled aggregate concrete as structural material , **Materials and Structures** , v. 40 , p. 529 – 541, 2007.
- GONZALEZ-FONTEBOA, B.; MARTINEZ-ABELLA, F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. **Materials and mechanical properties. Building and Environment** , 43 , p. 429 – 43, 2008.
- HANSEN, T.C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. **Demolition and Recycling of Concrete. Rilem technical Committee-37-DRC**, 1986.
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo. PINI; Brasília, DF: SENAI, 1992.
- HU, K.; CHEN, Y.; NAZ, F.; ZENG, C.; CAO, S. Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste. **Waste Management**, n. 85, p. 396-404, 2019.

- JAYASURIYA, A.; SHIBATA, E.S.; CHEN, T.; ADAMS, M.P. Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregate. **Resources, Conservations & Recycling**, n. 164, p.105-121, 2021.
- JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A., Study on the Influence of Attached Mortar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate. **Construction and Building Materials**, v 23, p.872–877, 2009.
- JUNGMANN, A. Building Rubble Treatment Using the alljig in Europe and USA. **Aufbereitungs-Technik**, V.18, 1997.
- KWAN, W.H.; RAMLI, M.; KAM, K.J.; SULIEMAN, M.Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. . **Construction and Building Materials**. v. 26, p. 565-573, 2012.
- KHOURY, E.; AMBRÓS, W.; CAZACLIU, B.; SAMPAIO, C.H.; REMOND, S. Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. **Construction and Building Materials**. v. 175, p. 705-713, 2018.
- KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S.K.; NAYAK, S.; DUTTA, S.C. A Critical Review and Assessment for Usage of Recycled Aggregate as Sustainable Construction Material. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 721–740, 2017.
- KOU, S.C ; POON, C.S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.
- LAVADO, J., BOGAS, J., DE BRITO, J., HAWREEN, A. Fresh properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.232, p.117322, 2020.

LEITE, M.B., FIGUEIRÊDO FILHO, J.G., LIMA, P.R.L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structures**, v. 46, p. 1765-1778, 2013.

LYRA, D. M.; ASSIS, R. G.; VIEIRA, G. L. Caracterização de Agregado Reciclado De Resíduo De Construção Civil Segundo a NBR 15116. In: **55 Congresso Brasileiro do Concreto**, Gramado, 2013. Anais... Gramado: IBRACON 2013.

LEITE, M. B. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEITE, F. C. **Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil de Base e Sub-Base de Pavimentos**. São Paulo, 2007. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEITE, M. B.; CORDEIRO, L.N.P; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Proposta de adaptação do procedimento proposto por Leite (2001) para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduo de construção demolição. In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 7º, 2011, Fortaleza. Anais CINPAR, 2011.

LEVY, S. M. **Reciclagem do Entulho de Construção Civil para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos**. São Paulo, 1997. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LEVY, S. M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos Produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001.

- LIMA, A.S.; CABRAL, A.E.B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n.2, p. 169-176, 2013.
- LIMA, F.M.R.S, LOVON, G., OLIVEIRA, P., NOCITO, G., ALVARADO, L.M.T. Demolição Seletiva no Brasil: Estudo de Caso na Cidade do Rio de Janeiro com Sistemas Dinâmicos. In: **XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Poços de Caldas, 2015. Anais... Poços de Caldas, 2015.
- LOVATO, P.S. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto**. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- LUZ, A. B., SAMPAIO J. A., FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5a Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- MACHADO, L. S. **Determinação da ecoeficiência de concretos reciclados em função do consumo de ligantes**. Feira de Santana, 2020. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2020.
- MÁLIA, M., DE BRITO, J.; PINHEIRO, M. D. ; BRAVO, M. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management**, v. 31 (3), p.241–255, 2013.
- MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. **Argamassa Contendo Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo de Construção e Demolição**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA) v. 1, n, p. 176-188, 2013.
- MALYSZ, G.N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado reciclado**. Dissertação de Mestrado, 2018. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

- MATOS, R.S.C. **Avaliação do efeito da jigagem em diferentes faixas granulométricas sobre as características do agregado graúdo reciclado de RCD e as propriedades do concreto.** Dissertação de Mestrado, 2020. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S. DE; FRÍAS, M. **Cement & Concrete Composites Properties of Recycled Ceramic Aggregate Concretes: Water Resistance.** **Cement and Concrete Composites**, v. 40, p. 21–29, 2013.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.
- MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management, **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, pp.8-15, 2018,
- MIRANDA, L. F. R. **Estudo de Fatores que Influem na Fissuração de Revestimentos de Argamassa com Entulho Reciclado.** São Paulo, 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao Desenvolvimento da Produção e Controle de Argamassas de Revestimento com Areia Reciclada Lavada de Resíduos Classe A da Construção Civil.** São Paulo, 2005. 441 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- MIRANDA; L.F. R., ÂNGULO; S.C., CARELLI, E.D. A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

- MISTRI, A.; BHATTACHARYYA, S.K.; NAVDEEO, D.; MUKHERJEE, A.; BARAI, S.V. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**. v. 233, p. 117894, 2020.
- MITTEMEIJER, E.J. **Fundamentals of Materials Science. The Microstructure–Property Relationship Using Metals as Model Systems**. Berlim. Springer, 594p, 2011.
- MOTTA, R. dos S. **Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego**. São Paulo, 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- NEPOMUCENO, M. ; ISIDORO , R. A.S.; CATARINO, J.P.G. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 284–294, 2018.
- NETO, C. S. **Agregados para Concreto**. In: IBRACON Concreto. Ensino Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 11, p. 323 - 343.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- OMARY, S.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Relationships between Recycled Concrete Aggregates Characteristics and Recycled Aggregates Concretes Properties. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 163–174, 2016.
- PACHECO, J.; de BRITO, J. CHASTRE, C.; EVANGELISTA, L. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 201, p. 10-20, 2019.

PACHECO-TORGAL,F; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A. AND BRITO J. **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

PARK, S.S.; KIM, S.J.; CHEN, K.; LEE, Y.L.; LEE, S.B. Crushing characteristics of a recycled aggregate from waste concrete. *Construction and Building Materials*. v. 160, p. 100-105, 2018.

PAULUZZI. Catálogo de Produtos. Pauluzzi Produtos Cerâmicos Ltda, 2020. <https://pauluzzi.com.br/downloads/> Acesso em: 17.05.2020

PEDRO, D.; BRITO, J. DE; EVANGELISTA, L.; BRAVO, M. Technical Specification Proposal for Use of High-Performance Recycled Concrete Aggregates in High-Performance Concrete Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, p. 1-1, 2018.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 5. ed. Porto Alegre: Globo, 1978. 307 p.

PETICILA M, YOUNG AS, CAZACLIU B, SAMPAIO CH, VERAS MM, PETTER CO. Improving the characteristics of recycled aggregates by using mineral processing equipment: water jig and sensor-based sorting. In **5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management**, Athens, Greece, 21-24th June, 2017.

PINTO, T. P. P. **Utilização de Resíduos de Construção: Estudo do Uso em Argamassas**. São Paulo, 1986. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

PINTO, T. P.; GONZALES, J. Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil - Manual de Orientação: Como Implantar um Sistema de Manejo e Gestão nos Municípios. **Brasília: Caixa**, v.1, 196 p, 2005.

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S.C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 34, p. 31-36, 2004.

PROGUARU. **Progresso e Desenvolvimento de Guarulhos S/A**. Disponível em: <http://www.proguaru.com.br/site/recicladora> Acesso em: 09/07/2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Plano Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos de Belo Horizonte**, 2017. Disponível em: <http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?app=planoresiduosbh>. Acesso em: 09/07/2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE GUARULHOS. **Plano Diretor de Resíduos Sólidos de Guarulhos**, 2011. Disponível em: <http://planodiretor.guarulhos.sp.gov.br> Acesso em: 09/07/2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **DMLU**. Disponível em: [http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmlu/default.php?p\\_secao=131](http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmlu/default.php?p_secao=131) Acesso em: 09/07/2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Lei nº 10.847, de 9 de março de 2010**. Diário Oficial de Porto Alegre, Porto Alegre, p. 2, 10 de março 2010.

QUATTRONE, M.; CAZACLIU, B.; ANGULO, S. C.; HAMARD, E.; COTHENET, A. Measuring the Water Absorption of Recycled Aggregates, What is the Best Practice for Concrete Production? **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 690–703, 2016.

RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; MARINKOVIĆ, S. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. **Sustainability**, v. 2, p. 1204–1225, 2010.

RANGEL, C.S.; TOLEDO FILHO, R.; AMARIO, M., PEPE, M.; POLISSENI, G.C.; ANDRADE, G.P. Generalized quality control parameter for heterogenous recycled

concrete aggregates: A pilot scale case study. **Journal of Cleaner Production**. v.208 ,p. 589-601, 2019.

RAO, M.C.; BHATTACHARYYA, S.K. BARAI, S.V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Materials and Structures**. v. 44, p.205–220, 2011.

RESENDE L.H.S, **Análise da Gestão de Resíduos Sólidos de Construção Civil de Belo Horizonte (MG) a partir da Percepção dos Atores Envolvidos**. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais da Construção Civil**. 2ª Edição. Belo Horizonte: editora UFMG, 2003.

RILEM. TC 121-DRG -Specifications for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, v., 27,p. 557-559, 1994.

RIO GRANDE DO SUL. **Conselho Estadual do Meio Ambiente**. Resolução n. 109, de 22 de setembro de 2005. Porto Alegre, RS, 2005. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201611/30150536-resolucao-109-05-residuos-da-construcao-civil.pdf> . Acesso em: 13/07/2017.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei n° 14.528**, de 16 de abril de 2014. Diário Oficial do Estado n.º 074, 17 de abril. 2014 Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/LEI%2014.528.pdf>. Acesso em: 13/07/2017.

RIO GRANDE DO SUL. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul**. PERS, 2015. Disponível em: <[http://www.pers.rs.gov.br/noticias/arq/Cartilha PERS-RS.pdf](http://www.pers.rs.gov.br/noticias/arq/Cartilha%20PERS-RS.pdf)>. Acesso em: 09/07/2017.

ROBLES, D.R. **Ceramic and mixed construction and demolition wastes (CDW): A**

**technically viable and environmentally friendly source of coarse aggregates for the concrete manufacture.** Tese (Doutorado) - Universidade De Leon - Leon, Espanha, 2016.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo de Construção e Demolição. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 99–111, 2014.

SAMPAIO, C.H.; CAZACLIU, B.G.; MILTZAREK, G.L.; H. HUCHET F., LE GUEN, L. , PETTER, C.O., PARANHOS, R.C , AMBRÓS, W.M.;; OLIVEIRA, M.L.S. Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 63-72, 2016.

SAMPAIO, C.H.; CAZACLIU, B.G.; MILTZAREK, G.L.; AMBRÓS, W.M.; KRONBAUER, M.A.; TUBINO, R.M.C.; DAL MOLIN, D.C.C.; OLIVA, J.; WASKOW, R.; DOS SANTOS, V.L.G. Demolished concretes recycling by the use of pneumatic jigs. **Waste Management and Research**, v.38(4), p. 392-399, 2020.

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.

SBRIGHI NETO, C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Ed. G.C.Isaía. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. 1600p.

SCOOT HOOD, R. S. **Análise da Viabilidade Técnica da utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Agregado Miúdo reciclado na Confecção de Blocos de Concreto para Pavimentação.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2006.

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

- SILVA, R. V.; BRITO, J. DE; DHIR, R. K. Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201–217, 2014.
- SILVA RV, DE BRITO J, DHIR RK. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v.178, p.19-31, 2018.
- SILVA, E. C. R. et al. Propriedades de Agregados Reciclados Produzidos a partir de RCD Gerado em Canteiros de Obras de Recife/PE para Uso em Argamassas. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, 8., Curitiba, 2009. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009.
- SILVA, P. C. G.; MIRANDA, L. F. R. Análise da Influência do Controle Granulométrico nas Características Físicas e Mecânicas de Agregados Reciclados para Pavimentação. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Fortaleza, 2008. Anais... Fortaleza: ANTAC, 2008.
- SOUZA, E. ; MARINHO, G.; DEGRAF, H. ; SANTOS; L. ;MIRANDA, L., VOGT, V. Avaliação da Influência do Tipo de Britador nas Propriedades de Agregados reciclados Graúdos. **Ambiente Construído**, p. 4346–4357, 2016.
- SOUZA, J. G. G. **Contribuição ao Estudo da Relação entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. Brasília, 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.
- TAGGART, A.F.. **Handbook of Mineral Dressing: Ores and Industrial Minerals**. Austin: John Wiley & Sons, 1945.
- TAHAR, Z.; NGO, T.; HADJ, E.; et al. Effect of Cement and Admixture on the Utilization of Recycled Aggregates in Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 91–102, 2017.

- TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de Propriedades do Concreto Produzido com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição Visando Aplicações Estruturais**. Maceió, 2007. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.
- THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J.A.; de BRITO, J.; FIOL, F. Micro- and macro-porosity of dry- and saturated-state recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 211, p. 932-940, 2019.
- ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G. et al pg 58; MASINI, E.A.; ÂNGULO, S.C. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste Management**. V.33 , p.656-662 , 2013.
- WANG, R.; YU, N.; LI, Y. Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. **Construction and Building Materials**. V. 242, p. 118-164, 2020.
- WASKOW, R.; DOS SANTOS, V.L.G.; KANNO, R.; TUBINO, R.M.C. Test for geometrical properties of recycled aggregates: comparisons of EN 933-3: 2003 and NBR 7809:2008 standard test methods. In: IV International conference progress of Recycling in the Built Environment, 2018. Anais.... Lisboa: Portugal, 2018.
- WASKOW, R.; DOS SANTOS, V.L.G.; AMBRÓS, W.; SAMPAIO, C.H.; PASSUELO, A.; TUBINO, R.M.C. Optimization and dust emissions analysis of the air jigging technology applied to the recycling of construction and demolition waste. **Journal of Environmental Management**. v. 266, p. 1-12, 2020.
- WILL, B.A.; FINCH, J.A. **Wills' Mineral Processing Technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 8ª edição Butterworth-Heinemann, 2015.
- XAVIER, L. L. **Diagnóstico do Resíduo da Construção Civil na cidade de Florianópolis/SC**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em

Eng. Civil – UFSC. Florianópolis, 2001.

XIAO, J.; LI, W.; FAN, Y.; HUANG, X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials** , v. 31 , p. 364 – 383, 2012 .

XING, Weihong. **Quality Improvement of Granular Secondary Raw Building Materials by Separation and Cleansing Techniques**. 2004. 157 f. Tese (Doutorado) - Technische Universiteit Delft, Delft, 2004.

XING, Weihong; HENDRIKS, Charles. Decontamination of granular wastes by mining separation techniques. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 14, n. 8, p.748-753, jan. 2006. Elsevier BV.

YANG, J.; DU, Q., BAO, Y. Concrete with Recycled Concrete Aggregate and Crushed Clay Bricks. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1935–1945, 2011.

ZAREEI, S.A.; AMERIA, F.; BAHRAMIA, N.; SHOAEI, P.; MUSAEI, H.R.; NURIANA, F. Green high strength concrete containing recycled waste ceramic aggregates and waste carpet fibers: Mechanical, durability, and microstructural properties. **Journal of Building Engineering**. v. 26, p. 100914, 2019.

ZORDAN, S. E. A **Utilização do Entulho como Agregado, na Confecção do Concreto**. Campinas, 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

## APÊNDICE A

### 1. PROPRIEDADES FÍSICAS AGREGADOS RECICLADOS - RESUMO

AGREGADO	COMPOSIÇÃO EM MASSA (%)					PROPRIEDADES FÍSICAS								
	CONCRETO CONVENCIONAL	CONCRETO BAIXA RESISTÊNCIA	CERÂMICO DE ALTA RESISTÊNCIA	CERÂMICO DE BAIXA RESISTÊNCIA	ARGAMASSA	ABSORÇÃO (%)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> ) <u>Picnômetro</u>	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> ) <u>Leite (2001)</u>	MASSA ESPECÍFICA Média (g/cm <sup>3</sup> )	MASSA UNITÁRIA (g/cm <sup>3</sup> )	ÍNDICE DE FORMA	VOLUME DE VAZIOS (%)	DMC (mm)	MÓDULO DE FINURA
AN-B	0	0	0	0	0	0,95	2,90	2,93	2,915	1,57	2,19	46,14	19	7,02
AR-CC	100	0	0	0	0	4,51	2,76	2,77	2,77	1,50	2,00	45,75	19	6,60
AR-COB	0	100	0	0	0	4,24	2,48	2,46	2,47	1,53	1,87	38,06	19	6,65
AR-CEA	0	0	100	0	0	4,74	2,47	2,35	2,41	1,18	2,66	51,04	19	6,22
AR-CEB	0	0	0	100	0	8,77	2,43	2,22	2,32	0,61	2,94	73,65	19	6,36
AR-A	0	0	0	0	100	7,15	2,04	2,10	2,07	1,28	2,34	38,16	19	5,95
AR-C0	18,2	21,1	14,4	14,3	32,0	4,53	2,68	2,51	2,595	1,27	2,41	74,18	19	6,53
AR-R1	8,6	7,4	16,6	23,4	44,0	5,12	2,59	2,49	2,54	1,46	2,54	42,52	19	6,34
AR-C1	49,6	32,00	3,4	3,1	11,9	1,65	2,71	2,95	2,83	1,53	1,96	45,94	19	6,73
AR-T2	30,9	10,4	4,9	13,8	40,00	7,31	2,66	2,47	2,57	1,43	2,03	44,25	19	6,58
AR-M2	58,9	32,5	0,4	1,0	7,2	1,47	2,78	2,62	2,7	1,60	1,98	40,74	19	6,82
AR-C2	42,9	56,8	0	0	0,30	0,99	2,71	2,81	2,76	1,96	1,84	28,99	19	6,90



## APÊNDICE B

### PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

#### 1. CONCRETOS REFERÊNCIA

CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	
CR-B	1	3,5	0,41	35,11	34,43	0,42	1,23	39,82	35,64	4,24	11,90
	2	3,5		34,49				39,47			
	3	3,5		33,99				30,20			
	4	3,5		34,22				36,20			
	5	3,5		34,32				32,50			
	6	5	0,52	25,47	25,67	1,87	7,29	33,91	36,49	4,15	11,37
	7	5		23,69				32,71			
	8	5		26,54				34,62			
	9	5		28,38				38,30			
	10	5		24,27				42,90			
	11	6,5	0,70	19,28	19,37	0,95	4,91	29,51	31,85	5,47	17,17
	12	6,5		20,67				30,55			
	13	6,5		19,02				35,07			
	14	6,5		18,09				24,90			
	15	6,5		19,77				39,20			

CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	
CR-CO	1	3,5	0,45	31,95	32,53	1,05		37,98	38,39	1,51	3,93
	2	3,5		32,02			38,03				
	3	3,5		32,64			37,10				
	4	3,5		34,31			41,00				
	5	3,5		31,73			37,85				
	6	5	0,67	25,94	26,99	0,88		34,23	35,97	3,86	10,73
	7	5		28,20			35,69				
		5		26,34			42,70				
	9	5		27,28			33,33				
	10	5		27,17			33,90				
	11	6,5	0,63	21,02	17,17	0,81		-	33,99	5,42	15,95
	12	6,5		21,02			30,81				
	13	6,5		22,18			4,72	31,65			

14	6,5		20,53				42,10			
15	6,5		22,10				31,40			

	CP	TRAÇO	a/c	fc (MPa)	fc (MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	<b>CR-R1</b>	1	3,5	0,34	37,27	35,99	2,01	5,58	41,03	37,39	4,13
2		3,5	36,28		40,48						
3		3,5	34,64		39,55						
4		3,5	33,64		38,98						
5		3,5	33,20		32,60						
6		3,5	38,14		31,70						
	7	5	0,52	25,53	26,13	1,65	6,32	33,95	37,82	4,48	11,86
	8	5		23,96				32,89			
	9	5		26,28				36,90			
	10	5		28,53				38,10			
	11	5		26,37				44,30			
	12	6,5	0,63	18,26	19,76	0,93	4,72	28,72	32,11	3,46	10,77
	13	6,5		19,59				29,74			
	14	6,5		20,50				31,20			
	15	6,5		20,55				33,50			
	16	6,5		19,92				37,40			

	CP	TRAÇO	a/c	Fc(MPa)	Fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	<b>CR-C1</b>	1	3,5	0,43	32,91	32,67	0,99	3,03	38,55	38,64	0,63
2		3,5	33,38		38,83						
3		3,5	32,06		39,20						
4		3,5	33,71		39,02						
5		3,5	31,30		37,60						
	6	5	0,54	27,01	24,97	1,86	7,45	34,92	33,50	2,95	8,82
	7	5		25,59				33,99			
	8	5		26,20				29,10			
	9	5		23,36				32,48			
	10	5		22,68				37,00			
	11	6,5	0,62	20,69	19,58	0,87	4,44	30,57	31,41	2,42	7,69
	12	6,5		19,22				29,46			
	13	6,5		20,28				29,10			
	14	6,5		18,65				33,40			
	15	6,5		19,05				34,50			

CR-T2	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
		3,5	0,44	35,59	33,97	1,48	4,36	40,10	37,81	2,94	7,78
	2	3,5		33,18				38,70			
	3	3,5		34,89				40,30			
	4	3,5		31,85				33,30			
	5	3,5		34,33				39,80			
	6	5	0,53	26,81	26,75	2,04	7,63	34,80	34,72	1,42	4,09
	7	5		28,67				36,00			
		5		26,56				35,90			
	9	5		28,24				35,70			
	10	5		23,47				32,60			
	11	6,5	0,83	18,87	15,64	0,81	5,18	29,20	33,90	4,49	13,26
	12	6,5		18,96				29,30			
	13	6,5		20,23				34,60			
	14	6,5		18,65				38,40			
15	6,5	20,34		38,00							

CR-M2	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	1	3,5	0,43	34,86	35,91	2,40	6,68	39,68	37,71	3,81	10,10
	2	3,5		34,37				39,40			
	3	3,5		36,80				32,30			
	4	3,5		33,80				41,80			
	5	3,5		39,70				35,37			
	6	5	0,51	25,33	26,72	0,81	3,03	33,82	35,88	2,37	6,61
	7	5		27,39				35,17			
	8	5		27,19				33,70			
	9	5		26,91				37,70			
	10	5		26,77				39,00			
	11	6,5	0,62	17,49	17,54	0,31	1,77	28,10	31,39	3,59	11,44
	12	6,5		17,39				28,02			
	13	6,5		17,53				30,90			
	14	6,5		17,23				33,60			
15	6,5	18,06		36,30							

CR-C2	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
	1	3,5	0,41	33,65	34,50	0,90	2,61	38,98	35,87	3,81	10,62
	2	3,5		33,97				39,17			
	3	3,5		35,70				33,90			
	4	3,5		35,23				31,80			
	5	3,5		33,96				40,60			
	6	5	0,53	28,51	28,62	0,78	2,73	35,88	31,72	3,05	9,62
	7	5		27,56				35,28			
	8	5		29,61				29,50			
	9	5		29,09				34,40			
	10	5		28,32				29,90			
	11	6,5	0,63	17,33	18,23	0,50	2,74	27,97	34,69	3,67	10,58
	12	6,5		18,44				28,86			
	13	6,5		18,39				33,70			
	14	6,5		18,54				37,00			
15	6,5	18,44		31,60							

## 2. CONCRETOS CRCD

CRCD-C0	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
	1	3,5	0,38	23,98	24,20	0,84	3,48	32,91	25,08	6,98	27,84
	2	3,5		23,25				32,40			
	3	3,5		23,62				19,10			
	4	3,5		25,07				21,60			
	5	3,5		25,09				19,40			
	6	5	0,44	19,90	19,42	1,65	8,51	29,98	24,72	4,84	19,58
	7	5		19,54				29,71			
	8	5		20,80				22,80			
	9	5		20,29				19,40			
	10	5		16,59				21,70			
	11	6,5	0,59	11,55	13,56	1,15	8,46	22,84	22,53	2,02	8,97
	12	6,5		13,75				24,92			
	13	6,5		14,12				19,50			
	14	6,5		13,95				23,50			
15	6,5	14,41		21,90							

CRCD-R1	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
	1	3,5	0,33	17,29	17,28	0,52	3,04	27,94	27,94	0,42	1,52
	2	3,5		17,20				27,87			
	3	3,5		17,40				28,03			
	4	3,5		16,53				27,32			
	5	3,5		18,00				28,51			
	6	5	0,54	14,62	14,69	0,49	3,33	25,69	25,75	0,42	1,65
	7	5		15,52				26,47			
	8	5		14,39				25,49			
	9	5		14,28				25,39			
	10	5		14,64				25,71			
	11	6,5	0,67	11,39	11,03	0,65	5,92	22,68	22,31	0,66	2,97
	12	6,5		11,84				23,12			
	13	6,5		10,64				21,92			
	14	6,5		11,14				22,43			
15	6,5	10,16		21,42							

CRCD-C1	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
	1	3,5	0,40	30,05	32,35	1,79	5,54	36,84	34,32	3,61	10,51
	2	3,5		33,93				39,14			
	3	3,5		33,75				31,50			
	4	3,5		33,21				30,60			
	5	3,5		30,81				33,50			
	6	5	0,47	28,08	26,84	0,99	3,69	36,11	34,12	1,78	5,22
	7	5		25,36				35,70			
	8	5		26,57				33,70			
	9	5		27,11				33,30			
	10	5		27,06				31,80			
		6,5	0,61	17,51	18,69	0,85	4,54	28,12	29,13	1,64	5,63
	2	6,5		18,11				28,60			
	13	6,5		19,16				30,30			
	14	6,5		19,16				27,30			
5	6,5	19,53		31,31							

CRCD-T2	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	1	3,5	0,41	22,40	23,41	1,64	7,00	31,80	27,32	5,47	20,01
	2	3,5		24,37				33,17			
	3	3,5		22,44				21,60			
	4	3,5		25,83				21,70			
	5	3,5		22,00				28,30			
	6	5	0,49	15,86	15,58	1,08	6,93	26,76	25,09	3,10	12,34
	7	5		13,85				25,01			
	8	5		15,28				29,10			
	9	5		16,39				20,90			
	10	5		16,50				23,70			
	11	6,5	0,61	15,26	15,66	0,44	2,84	26,25	21,25	4,56	21,44
	12	6,5		15,22				26,22			
	13	6,5		16,22				18,40			
	14	6,5		15,58				17,70			
15	6,5	16,00		17,70							

CRCD-M2	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	1	3,5	0,39	25,43	28,20	1,61	5,69	33,89	30,47	5,08	16,66
	2	3,5		28,74				36,03			
	3	3,5		28,27				24,10			
	4	3,5		29,42				32,05			
	5	3,5		29,12				26,30			
	6	5	0,46	27,25	27,74	1,72	6,19	35,08	32,94	1,38	4,20
	7	5		25,00				33,60			
	8	5		28,40				32,00			
	9	5		28,62				32,00			
	10	5		29,42				32,00			
	11	6,5	0,64	22,18	21,60	0,98	4,53	31,65	28,78	4,92	17,09
	12	6,5		23,05				32,26			
	13	6,5		20,81				22,30			
	14	6,5		21,04				33,00			
15	6,5	20,93		24,70							

CRC-D-C2	CP	TRAÇO	a/c	fc(MPa)	fc(MPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Módulo Elasticidade (GPa)	Módulo Elasticidade (GPa) Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
	1	3,5	0,42	38,10	34,45	2,62	7,62	41,48	36,74	8,38	22,81
	2	3,5		32,31				38,20			
	3	3,5		35,46				47,40			
	4	3,5		31,54				28,70			
	5	3,5		34,84				27,90			
	6	5	0,49	28,88	28,20	0,93	3,29	35,61	33,71	2,31	6,84
	7	5		28,23				33,84			
		5		27,00				34,10			
	9	5		29,28				29,80			
	10	5		27,59				35,20			
	11	6,5	0,62	18,79	19,25	0,75	3,88	29,13	32,06	2,64	8,24
	12	6,5		20,43				30,37			
	13	6,5		19,53				31,10			
	14	6,5		18,89				34,80			
15	6,5	18,60		34,90							

## ANEXO A

Endereços de unidades da UDC de Porto Alegre:

UDC CRUZEIRO DO SUL: AV. CRUZEIRO DO SUL, 1.445 - BAIRRO CRUZEIRO DO SUL - FONE: 3231-6064.

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: DE SEGUNDA-FEIRA À SEXTA-FEIRA, DAS 7H30 ÀS 17H, E AOS SÁBADOS, DAS 7H30 ÀS 12H.

UDC CARVALHO DE FREITAS: RUA CARVALHO DE FREITAS, 1.012 - BAIRRO GLÓRIA - FONE: 3322-0340.

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: DE SEGUNDA-FEIRA À SEXTA-FEIRA, DAS 7H30 ÀS 17H, E AOS SÁBADOS, DAS 7H30 ÀS 12H.

UDC DIÁRIO DE NOTÍCIAS: AV. DIÁRIO DE NOTÍCIAS, 1.111 - BAIRRO CRISTAL - FONE: 3311-4730.

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: DE SEGUNDA-FEIRA À SEXTA-FEIRA, DAS 7H30 ÀS 17H, E AOS SÁBADOS, DAS 7H30 ÀS 12H.

UDC BERNARDINO SILVEIRA DE AMORIM: AV. BERNARDINO SILVEIRA DE AMORIM, 2.261 - BAIRRO RUBEM BERTA - FONE: 3386-2155.

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: DE SEGUNDA-FEIRA A SÁBADO, DAS 8H ÀS 20H.

UDC CÂNCIO GOMES: TRAVESSA CARMEM, 111 - BAIRRO FLORESTA - FONE: 3268-8330.

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: DE SEGUNDA-FEIRA A SÁBADO, DAS 7H ÀS 19H.

UDC FÁTIMA PINTO: RUA ALFREDO FERREIRA RODRIGUES, 975 – BAIRRO BOM JESUS - FONE: 3367-3777.

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: DE SEGUNDA A SEXTA-FEIRA, DAS 7H ÀS 17H E, AOS SÁBADOS, DAS 7H ÀS 12H.

UDC TENENTE ALPOIN: RUA CORONEL JOSÉ RODRIGUES SOBRAL, 958 – BAIRRO PARTENON – FONE: 3354-6248.

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: DE SEGUNDA-FEIRA À SEXTA-FEIRA, DAS 7H ÀS 19H.

Endereços de unidades de coleta de Belo Horizonte.

PAMPULHA ENDEREÇO: RUA POLICARPO MAGALHÃES VIOTTI, 450, BANDEIRANTES

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: SEGUNDA A SEXTA-FEIRA - DAS 8H ÀS 11H E DAS 13H ÀS 16H  
TEL.: (31) 3277-7912.

USINA BR-040 BR-040, KM 531, JARDIM FILADÉLFIA

HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO: SEGUNDA A SEXTA-FEIRA - DAS 8H ÀS 12H E DAS 13H ÀS  
17H TEL: (31) 3277-9299.

## ANEXO B

### METODOLOGIA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA PROPOSTA POR LEITE (2001).

TÍTULO: PROPOSTA DE NORMA PARA ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.

1. OBJETIVO: Determinar a massa específica do agregado graúdo reciclado de resíduos de construção e demolição, visando sua aplicação no estudo de dosagem e produção de concretos.
2. APARELHAGEM:
  - 2.1 Balança: a balança utilizada deve ter resolução mínima de 0,1 g e capacidade compatível com a massa a determinar.
  - 2.2 Bomba de vácuo: a bomba de vácuo utilizada, com registros, vacuômetro e conexões, deve ser capaz de aplicar um vácuo de 88 kPa (66 cm de Hg a 0°), para remoção do ar presente nas partículas de agregado reciclado.
  - 2.3 Recipientes para amostra: deve se utilizado um picnômetro ou balão volumétrico de vidro, com capacidade mínima de 1.000 ml, cujo gargalo possua no mínimo a dimensão máxima do agregado, determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), mais folga de 5 mm ( $D_{máxi} \pm 5$  mm).

O recipiente deve possuir um dispositivo capaz de ajustar conexão com a bomba de vácuo para retirada do ar da amostra.
  - 2.4 Placa de vidro: deve ser utilizada uma placa de vidro de seção quadrada, com aresta superior a 2 vezes o diâmetro de abertura do recipiente para a amostra, e espessura de no mínimo 5 mm.
3. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA:
  - 3.1 A amostra de agregado graúdo deve ser coletada de acordo com a NBR 7211 (ABNT,2019) e reduzida conforme NBR NM 27 (2001).
  - 3.2 Todo o material passante na peneira # 4,8 mm deve ser desprezado, através de peneiramento á seco, seguido de lavagem cuidadosa dos grãos, em água corrente, para retirada do material pulverulento aderido.
4. EXECUÇÃO DO ENSAIO:
  - 4.1 Secar a amostra por 24 horas, à temperatura de 105-110°C.
  - 4.2 Deixar a amostra resfriar ao ar à temperatura ambiente. Pesar uma quantidade de material da amostra seca e fria entre 800 g e 100 g. Determinar a massa da amostra seca em estufa (C).
  - 4.3 Adicionar água à temperatura ambiente ao recipiente de vidro em quantidade suficiente para que a amostra de agregado possa ficar submersa, porém sem preenche-lo completamente.

- 4.4 Adicionar cuidadosamente a amostra de agregado graúdo reciclado no recipiente de vidro contendo água e deixar o conjunto tampado em repouso durante 24 horas.
  - 4.5 Antes de realizar a primeira pesagem do conjunto, deve ser aplicado vácuo, durante pelo menos 15 minutos, agitando cuidadosamente o recipiente em intervalos regulares, permitindo a saída do ar aprisionado entre os grãos do agregado.
  - 4.6 Acrescentar ao recipiente, água em temperatura ambiente, até preenchê-lo completamente.
  - 4.7 Colocar a placa de vidro sobre o recipiente que contém a amostra+água, de modo que não haja nenhuma bolha de ar aprisionada.
  - 4.8 Secar externamente o recipiente, com cuidado para não incorporar ar junto.
  - 4.9 Determinar a massa do conjunto amostra+recipiente+água+placa de vidro (A).
  - 4.10 Retirar a amostra do recipiente, lavá-lo e em seguida preenche-lo com água. Colocar a placa de vidro sobre o recipiente de forma que nenhuma bolha de ar fique aprisionada no conjunto. Determinar a massa do recipiente+água+placa de vidro (B). É importante secar externamente o conjunto.
5. RESULTADOS:
- 5.1 A massa específica do agregado graúdo é calculada através da expressão:

$$\gamma = \frac{C}{B - A + C}$$

Onde:  $\gamma$  = massa específica do agregado graúdo, expressa em kg/dm<sup>3</sup> ou g/cm<sup>3</sup>;

A = massa da amostra+recipiente+água+placa de vidro, expressa em g;

B = massa do recipiente+água+placa de vidro, expressa em g;

C = massa da amostra seca em estufa, expressa em g.

- 5.2 Devem ser realizadas, no mínimo, duas determinações consecutivas com amostra do mesmo agregado.
- 5.3 O resultado é a média entre os resultados de cada determinação e deve ser expresso com dois algarismos significativos.

## PUBLICAÇÕES RELATIVAS À TESE

- CUNHA, M.G.; WASKOW, R.; SANTOS, V.L.G.; KANNO, R.; SILVA, L.A.; TUBINO, R.M.C. Índice de Forma do Agregado Reciclado de Concreto: Comparativo entre EN 933- 3:2003 e NBR 7809:2008. LIVX Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves-RS, Out/Nov, 2017. Anais [...]. 2017.
- WASKOW, R.P.; GSCHWENTER, V. L.; TUBINO, R.M.C., Projeto amostral para resíduos brasileiros de construção e demolição. VII Seminário de Inovação e Tecnologia IFSul. Anais [...], Porto Alegre, Brazil, 2018.
- WASKOW, R.P.; SANTOS, V.L.G.; KANNO, R.; TUBINO, R.M.C. Test for Geometrical Properties of Recycled Aggregates: Comparisons of EN 933-3:2003 and NBR 7809:2008 Standard Test Methods. IV International Conference Progress of Recycling in the Built Environment, Lisboa, Portugal, out. 2018. Anais [...]. 2018.
- WASKOW, R.P., SANTOS, V. L. G., KANNO, R., TUBINO, R.M.C. Cost Assessment of the Brazilian Construction and Demolition Waste Recycling Plant: A Case Study of Porto Alegre. **Revista Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)**. 2019. No prelo.
- WASKOW, R.P., SANTOS, V. L. G., TUBINO, R.M.C. Delineamento Amostral de Agregados de Construção e Demolição. **Mix Sustentável**. 5 (4), 2019. p. 79-88.
- WASKOW, R.; DOS SANTOS, V.L.G.; AMBRÓS, W.; SAMPAIO, C.H.; PASSUELO, A.; TUBINO, R.M.C. Optimization and dust emissions analysis of the air jiggling technology applied to the recycling of construction and demolition waste. **Journal of Environmental Management**. v. 266, p. 1-12, 2020.
- SAMPAIO, C.H.; CAZACLIU, B.G.; MILTZAREK, G.L.; AMBRÓS, W.M.; KRONBAUER, M.A.; TUBINO, R.M.C.; DAL MOLIN, D.C.C.; OLIVA, J.; WASKOW, R.; DOS SANTOS, V.L.G. Demolished concretes recycling by the use of pneumatic jigs. **Waste Management and Research**, v.38(4), p. 392-399, 2020.