



DESEMPENHO DO AGREGADO RECICLADO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE BRASIL E PORTUGAL, BASEADO NA ESPECIFICAÇÃO E 471:2009

THALYTA TOFFOLI

Outubro de 2016

**DESEMPENHO DO AGREGADO RECICLADO: UM ESTUDO COMPARATIVO
ENTRE BRASIL E PORTUGAL, BASEADO NA ESPECIFICAÇÃO E 471:2009**

THALYTA TOFFOLI

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Paulo Augusto Ribeiro Guedes

Co-Orientador: Ana Lucia da Fonseca Bragança (Universidade Presbiteriana Mackenzie)

SETEMBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xvii
Abreviaturas	xix
1 Introdução.....	1
2 Resíduos da Construção Civil	3
3 Agregados Reciclados.....	7
4 Pesquisa Experimental	29
5 Análise dos Resultados.....	51
6 Conclusão	63
Referências Bibliográficas	65

RESUMO

A presente dissertação foi elaborada no âmbito da unidade curricular de DIPRE (Dissertação/Projeto/Estágio), que se encontra no plano de estudos do 2º semestre do 2º ano do Mestrado em Engenharia Civil, no ramo de Estruturas do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Responsável pelo grande consumo de recursos naturais e pela grande quantidade de resíduos gerados, a indústria da construção civil busca alternativas para minimizar esse impacto. A reciclagem destes resíduos surge nesta busca como a melhor alternativa, retornando ao sector uma nova matéria prima, o agregado reciclado. Deste modo, nem o meio ambiente e nem a demanda são prejudicadas.

Apenas os resíduos oriundos da construção, demolição, reabilitações e reparos podem ser reutilizáveis como agregados. E entre os vários resíduos da construção civil (RCC), os resíduos de betão são os que apresentam maior potencial de utilização, devido ao baixo grau de contaminação por outros materiais.

Apesar das inúmeras pesquisas desenvolvidas com o objetivo de viabilizar o aproveitamento desses resíduos, não há um consenso na sua utilização. A legislação brasileira, NBR 15116, permite a aplicação do agregado reciclado apenas em betões sem fins estruturais, enquanto a legislação portuguesa, E471:2009, permite a aplicação da classe dos agregados reciclados de betão (ARB) em betões com fins estruturais.

Em busca de avaliar o potencial do agregado reciclado de betão (ARB), no fabrico de betão com fim estrutural; foi realizado um estudo experimental inicialmente de caracterização do material e posteriormente de produção de betão produzido com as percentagens de ARB permitidas na especificação portuguesa E 471:2009. Com o presente estudo procurou-se avaliar a viabilidade de utilização de agregados reciclados actualmente existentes no Brasil na execução de betões com fins estruturais.

Os resultados encontrados permitiram concluir que a fração graúda do ARB, apresenta grande potencial, porém a falta de controlo no seu beneficiamento impossibilita ampliar sua utilização.

Palavras-chave: Agregado reciclado. Agregado reciclado de betão. Resíduos da construção civil.

ABSTRACT

This dissertation was prepared in the context of curricular unit of DIPRE (Dissertation/Project/Internship), which is the 2nd semester of the 2nd year of the master's degree in Civil Engineering, in the structures field of the Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Responsible for the large consumption of natural resources and the large amount of waste generated, the construction industry seeks alternatives to minimize this impact. The recycling of this waste comes this search as the best alternative, returning to a new raw material sector, the recycled aggregate. Accordingly, neither the environment nor the demand is hampered.

Only waste from construction, demolition, restoration and repairs can be reusable as aggregates. And among the various construction waste (RCC), the waste concrete are those with the greatest potential for use due to the low degree of contamination by other materials.

Despite numerous research developed in order to facilitate the use of this waste, there is no consensus on its use. The Brazilian law NBR 15116, allows the application of recycled aggregate concrete only without structural purposes, while the Portuguese legislation, E471: 2009, allows you to turn the application of the class of recycled aggregate concrete (ARB) in betões structural purposes.

Seeking to evaluate the potential of recycled concrete aggregate (ARB) in the manufacture of concrete structural end; It was carried out an experimental study initially characterization of the material and then concrete production produced with the ARB percentages allowed in the Portuguese specification E 471: 2009. With the present study sought to evaluate the feasibility of using recycled aggregates existing in Brazil in the implementation of concrete with structural purposes.

The results showed that the fraction of the big shots ARB, has great potential, but the lack of control in their processing impossible expand its use.

Keywords: Recycled Aggregate. Recycled Concrete Aggregate. Construction waste.

AGRADECIMENTOS

Pirmeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, permanecendo ao meu lado em todo percurso desta caminhada, dando forças para seguir em busca dos meus objetivos e sabedoria quando tive que fazer minhas escolhas. Ele é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais, dois guerreiros que nunca deixaram de me apoiar e lutar para me proporcionar a melhor educação. Obrigada por abrirem mão dos seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus.

Às minhas irmãs, que sempre se fizeram presentes, acreditaram em mim e torceram pelo meu sucesso. São anos de convivência, amizade e incentivo. Vocês têm minha admiração.

Ao meu namorado, pessoa com que tenho satisfação em partilhar a vida. Você esteve comigo, durante boa parte da minha trajetória acadêmica. Obrigada pelo carinho e paciência durante esses anos, aos quais sempre buscou me levantar nos momentos de fraqueza, seja com uma palavra, um gesto amigo ou simplesmente permanecendo ao meu lado.

Aos meus orientadores Paulo Augusto Ribeiro Guedes e Ana Lucia da Fonseca Bragança, minha eterna gratidão, por compartilharem vossos conhecimentos e experiências.

Ao técnico laboratorial, Lázaro de Castro, e ao professor Simão Prizskulnik que me auxiliaram com os ensaios deste trabalho.

A toda equipe da Proguaru, que cordialmente me receberam em vossa Usina, compartilhando vosso conhecimento e disponibilizando amostra do agregado reciclado para o estudo experimental.

Aos familiares, amigos e todas as outras pessoas que indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Objetivos.....	2
2	Resíduos da Construção Civil.....	3
2.1	Geração.....	3
2.2	Composição e Classificação.....	4
2.3	Gestão do RCC.....	6
3	Agregados Reciclados.....	7
3.1	Beneficiamento do RCC – Classe A.....	7
3.1.1	Triagem.....	7
3.1.2	Cominuição.....	9
3.1.3	Separação Granulométrica.....	10
3.2	Classificação.....	12
3.3	Controlo de Qualidade.....	14
3.4	Propriedades Físicas.....	15
3.4.1	Massa específica, Absorção de água e Porosidade.....	15
3.4.2	Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade.....	17
3.5	Usos e Limitações.....	18
3.5.1	Argamassas.....	19
3.5.2	Pavimentos.....	20
3.5.3	Betão.....	20

3.6	Comparação da NBR 15116 e da E 471.....	22
3.7	Produção de Agregados Reciclados em Guarulhos -SP.....	23
3.7.1	Processamento	24
3.7.2	Aplicação do ARB - Proguaru	27
4	Pesquisa Experimental	29
4.1	Materiais	29
4.1.1	Aglomerante	29
4.1.2	Agregado miúdo natural.....	31
4.1.3	Agregado graúdo natural.....	33
4.1.4	Agregado graúdo reciclado.....	35
4.2	Caracterização do Agregado Reciclado.....	37
4.2.1	Massa Específica e Absorção de Água	37
4.2.2	Teor de Material Pulverulento.....	38
4.3	Fabrico do Betão	39
4.3.1	Traço	39
4.3.2	Processo produtivo	41
4.3.3	Estado Fresco.....	42
4.3.4	Estado Endurecido	44
5	Análise dos Resultados.....	51
5.1	Granulometria.....	51
5.1.1	Agregado miúdo	51
5.1.2	Agregado graúdo	52
5.2	Massa Específica e Absorção de Água	54
5.3	Material Pulverulento	55
5.4	Betão no Estado Fresco.....	56
5.4.1	Relação água/cimento	56
5.4.2	Massa Específica	57

5.5	Betão no Estado Endurecido.....	58
5.5.1	Resistência à Compressão	58
5.5.2	Módulo de Elasticidade	61
6	Conclusão	63
	Referências Bibliográficas	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Resíduos da construção beneficiados pela Proguaru.....	8
Figura 3.2 – Britador de Mandíbula (Hj Crusher, 2016)	9
Figura 3.3 – Britador de Impacto (Tkis, 2016).....	10
Figura 3.4 – Peneiro Vibratória (Furlan, 2016).....	11
Figura 3.5 – Classificadores Pneumáticos (Hendriks 2000, apud Angulo 2005)	12
Figura 3-6 – Microestrutura do betão (Buttler, 2003)	16
Figura 3-7 – Microestrutura do betão reciclado (Buttler, 2003).....	16
Figura 3.8 – Equivalência de 1 metro cúbico de entulho (Prefeitura de Guarulhos 2016).....	24
Figura 3.9 – RCC entregue à Proguaru	25
Figura 3.10 – Triagem manual feita na Usina (Proguaru 2016).....	25
Figura 3.11 – Abastecimento do triturador (Proguaru 2016)	26
Figura 3.12 – Triturador de mandíbula utilizado pela Proguaru (Proguaru 2016).....	26
Figura 3.13 – Triagem após cominuição.....	27
Figura 3.14 – Separação Granulométrica	27
Figura 3.15 – Aplicação do ARB em lajes pré-moldadas	28
Figura 4.1 – Agregado miúdo natural utilizado para fabrico do betão	31
Figura 4.2 – Curva granulométrida do agregado miúdo utilizado	33
Figura 4.3 – Agregado graúdo natural utilizado para fabrico do betão	33
Figura 4.4 – Curva granulométrida do agregado graúdo natural utilizado.....	35
Figura 4.5 – Agregado graúdo reciclado utilizado para fabrico do betão	35
Figura 4.6 – Curva granulométrida do agregado graúdo reciclado utilizado.....	36
Figura 4.7 – Procedimentos do Ensaio para determinação de Massa Específica e Absorção de Água	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.8 – Procedimentos do Ensaio para determinação do Teor de Material (Autora 2016)	38
Figura 4.9 – Balança utilizada na pesquisa	41
Figura 4.10 – Betoneira utilizada na pesquisa.....	42
Figura 4.11 – Procedimentos do Ensaio para Determinação da Consistência	43
Figura 4.12 – Moldagem e Cura dos provetes.....	44
Figura 4.13 – Procedimentos do Ensaio de Compressão Axial.....	47
Figura 5.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado e seus limites	52
Figura 5.2 – Curva granulométrica dos agregados graúdos utilizados.....	54
Figura 5.3 – Gráfico de resistência à compressão para 5 dosagens.....	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Origem Mundial dos RCC (Angulo, 2000).	4
Tabela 2.2 – Composição dos Resíduos de novas construções (Angulo, 2000).	5
Tabela 3.1 – Caracterização do RCC (Proguaru, 2016).	8
Tabela 3.2 – Comparativo entre britador de mandíbula e britador de impacto (Vázquez, 2006).	10
Tabela 3.3 – Classificação pela composição do agregado reciclado - NBR 15116 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).	12
Tabela 3.4 – Classificação pela composição do agregado reciclado – E 471 (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009).	13
Tabela 3.5 – Classificação pela granulometria do agregado reciclado (Proguaru, 2016).	13
Tabela 3.6 – Recomendações de aplicações do Agregado Reciclado – ABRECON (Urbem Tecnologia Ambiental, 2016).	19
Tabela 3.7 – Requisitos para AR destinado ao preparo de betão sem função estrutural – NBR 15116 (ABNT, 2004).	21
Tabela 3.8 – Requisitos para AR graúdo destinado ao preparo de betão com função estrutural – E471 (LNEC, 2009, p.3).	22
Tabela 4.1 – Teores dos componentes do Cimento Portland Comum – NBR 5732 (ABNT, 1991).	30
Tabela 4.2 – Exigências químicas para o Cimento Portland Comum – NBR 5732 (ABNT, 1991).	30
Tabela 4.3 – Exigências físicas e mecânicas para o Cimento Portland Comum – NBR 5732 (ABNT, 1991).	30
Tabela 4.4 – Classes de resistência dos cimentos Portland – NBR 5732.	31
Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica da Areia Natural Média Fina	32
Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica da Areia Natural Fina	32
Tabela 4.7 – Distribuição granulométrica da Brita Natural.	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.8 – Distribuição granulométrica da Brita Reciclada.....	36
Tabela 4.9 – Cálculo da Massa Específica e Absorção de Água – Agregado graúdo reciclado.....	38
Tabela 4.10 – Cálculo do Teor de Material Pulverulento – Agregado graúdo reciclado.....	38
Tabela 4.11 – Traço adotado em unidades	40
Tabela 4.12 – Traço adotado em massa (kg).....	41
Tabela 4.13 – Sequência dos materiais na betoneira e tempo de mistura	42
Tabela 4.14 – Relação água/cimento efetiva	43
Tabela 4.15 – Massa Específica do Betão	43
Tabela 4.16 – Propagação Ultrassônica aos 7 dias.....	45
Tabela 4.17 – Propagação Ultrassônica aos 28 dias.....	45
Tabela 4.18 – Resistência à compressão aos 7 dias	47
Tabela 4.19 – Resistência à compressão aos 28 dias	48
Tabela 4.20 – Módulo de Elasticidade aos 28 dias.....	49
Tabela 5.1 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211, 2005, pg.5).....	51
Tabela 5.2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo (NBR 7211, 2005, pg.5).....	53
Tabela 5.3 – Requisitos para Massa Específica.....	55
Tabela 5.4 – Requisitos para Absorção de Água	55
Tabela 5.5 – Requisitos para Material Pulverulento	56
Tabela 5.6 – Aumento na relação água/cimento	56
Tabela 5.7 – Redução da Massa Específica do Betão	57
Tabela 5.8 – Resistência Média aos 7 dias	58
Tabela 5.9 – Resistência Média aos 28 dias	59
Tabela 5.10 – Redução ou melhoria das Resistências Médias aos 28 dias	60
Tabela 5.11 – Redução do Módulo de Elasticidade aos 28 dias.....	61

ABREVIATURAS

AR - Agregado Reciclado

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil

ARC - Agregado de Resíduo de Betão

ARM - Agregado de Resíduo Misto

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NBR - Norma Brasileira

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCC - Resíduos da Construção Civil

RCD - Resíduos da Construção e Demolição

SINDUSCON - Sindicato da Indústria da Construção Civil

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente relatório aborda as normas de utilização do agregado reciclado de betão, tanto brasileira quanto portuguesa, buscando ampliar o campo de aplicação deste material com grande potencial. Este tema apresenta significância uma vez que a reciclagem dos resíduos gera inúmeras vantagens ambientais, sociais e econômicas.

A disposição irregular dos resíduos, além de causar gastos públicos, também gera degradação ambiental. A falta de locais adequados para receber os resíduos da construção civil (RCC) não é o único fator a contribuir com esta problemática mundial, o grande desperdício nos estaleiros, associado à falta de gestão destes resíduos são fatores relevantes para tal contribuição. Praticamente todos países no mundo investem num sistema formal de gerenciamento para reduzir a deposição ilegal. Tal cenário só é alterado a partir do momento que o gerador do entulho passa a se responsabilizar pelo mesmo.

A reciclagem surge como uma solução viável, amenizando a ação nociva causada pela disposição dos resíduos no ambiente urbano. O primeiro registro significativo de reciclagem dos resíduos da construção civil (RCC) para a produção do agregado reciclado (AR) foi em 1946, após a Segunda Guerra Mundial, quando os escombros resultantes foram britados e usados na reconstrução das cidades europeias. No Brasil, esse assunto aparece de maneira tardia em 1986, com os estudos de Pinto (1989), ganhando maior visibilidade com a instituição da Resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), em 2002 (BRASIL, 2002).

Com essa Resolução diretrizes e responsabilidades para gestão dos resíduos sólidos da construção civil são impostas, impedindo sua disposição irregular e tornando obrigatório a segregação dos resíduos passíveis de serem reutilizados ou reciclados como agregados. Esses, classificados como Classe A, compreendem os resíduos:

- 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 betão;

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

O uso do AR, em pavimentação viária e preparação de betão sem função estrutural, é normalizado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 15116 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004, p.2). Para efeitos dessa Norma, o AR é definido como “Material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura.”

Muitos estudos, voltados para avaliação do comportamento do agregado reciclado, estão sendo desenvolvidos. Algumas propriedades como maior absorção de água, maior porosidade, maior teor de finos e menor densidade já estão em pauta na literatura (Angulo, 2005; Gonçalves, 2000; Leite, 2001; Miranda, Ângulo e Careli, 2009). As técnicas utilizadas no beneficiamento desses agregados, também estão sendo discutidas, pois estas impactam diretamente na qualidade do agregado produzido.

Alguns países, como Holanda, Alemanha e Japão, estão avançados nos estudos do agregado reciclado. Muitos desses países já possuem normas ou especificações que permitem sua aplicação em betões com funções estruturais (Gonçalves, 2007).

Diante dessa divergência de usos, este trabalho recorreu a uma dessas especificações que possibilita a aplicação do agregado reciclado de betão na produção de betões estruturais: a Especificação E 471 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Portugal, 2009) - Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. Obtendo as recomendações necessárias, as percentagens permitidas para uso estrutural foram aplicadas ao agregado coletado no Brasil; avaliando o desempenho dos betões produzidos com os agregados que atendam as especificações e permitindo concluir se é possível ou não ampliar o uso do agregado reciclado no Brasil.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho apresenta uma análise da viabilidade técnica do uso da fração graúda do agregado reciclado de betão produzido a partir de resíduos da construção civil brasileira, na produção de betões estruturais, tendo como base os parâmetros estabelecidos pela especificação portuguesa E 471:2009.

A pesquisa bibliográfica baseou-se em estudos sobre o uso do resíduo Classe A na produção do agregado reciclado de betão, assim como seu processamento, controle de qualidade do produto, propriedades e usos. Em complemento, a pesquisa prática contemplou ensaios de caracterização do agregado reciclado, de resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão fabricado com frações de agregado graúdo reciclado.

2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1 GERAÇÃO

A maioria das atividades pertencentes à indústria da construção civil gera resíduos. No Brasil, estes resíduos são conhecidos popularmente como entulho e tecnicamente como Resíduos da Construção e Demolição (RCD) ou Resíduos da Construção Civil (RCC).

Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2016), o RCC é todo resíduo gerado no processo construtivo, de reforma, escavação ou demolição. A Resolução CONAMA 307, de 5 de julho de 2002 (Brasil, 2002), além das fontes citadas pela ABRECON, considera também a fase de preparação do terreno, para posterior escavação, como um gerador.

As obras de reabilitação também produzem RCC e não podem ser desprezadas pois, apesar de não serem comuns no Brasil, apresentam significância em países europeus. Na literatura portuguesa, Gonçalves (2007) inclui estas obras como uma origem, dividindo o RCC em 3 grupos: resíduos de construção, resíduos de demolição e resíduos de reabilitação. As obras de reabilitação apresentam relevância em Portugal, onde os edifícios de betão armado construídos na década de 50 aproximam-se do fim de sua vida útil.

No caso dos resíduos de betão, os principais geradores são as fábricas de pré-moldados, usinas de betão pré-misturado, demolições de construções e pavimentos rodoviários Buttler (2003).

Cada país apresenta um percentual variável da participação das diferentes origens na geração dos RCC (Angulo, 2000), conforme os dados da Tabela 2.1. A participação das reformas é pouco divulgada e muitas vezes esta parcela é contabilizada como resíduos de demolições.

Tabela 2.1 – Origem Mundial dos RCC (Angulo, 2000).

País	RCC (t/ano)	Resíduo de Construção (t/ano)	Resíduo de Demolição (t/ano)	% Resíduo de Construção no RCC	% Resíduo de Demolição no RCC	ANO
Países Baixos	14 milhões					1996
Inglaterra	70 milhões					1997
Alemanha	32,6 milhões	10 milhões	22,6 milhões	31	69	1994
Estados Unidos	31,5 milhões	10,5 milhões	21,0 milhões	33	66	1994/ 1997
Brasil	70 milhões	35 milhões	35 milhões	30-50	50-70	1999
Japão	99 milhões	52 milhões	47 milhões	52	48	1993
França			25 milhões			1994
Europa Ocidental	215 milhões	40 milhões	175 milhões	19	81	Previsão 2000

Cada fonte apresenta seu motivo. Durante a construção a ABRECON (2016) atribui às perdas como a principal causa do entulho gerado; Gonçalves (2007) acredita que o sobre dimensionamento, danos e desperdícios são os principais responsáveis. Ainda segundo a ABRECON (2016), nas obras de reformas a falta de uma cultura de reutilização e reciclagem são as principais causas; já nas obras de demolição o resíduo sempre existirá, pois se trata do produto do processo.

Nas fábricas de pré-moldados, o desperdício do betão está associado ao controlo de qualidade dos elementos e sobras de betão fresco ao final do processo. Nas centrais dosadoras este desperdício é atribuído ao retorno de sobras de betão nos caminhões betoneira, bomba de betão ou pela lavagem dos caminhões e instalação da central (Buttler, 2003).

2.2 COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A composição do RCC é variável, cada região ou país trabalha com as condições e recursos naturais disponíveis, desenvolve suas técnicas construtivas e tem presente seus hábitos culturais. Estes fatores também são relevantes na composição do RCC. Gonçalves (2007), afirma que as características da obra, como localização geográfica, época de construção e utilização que o edifício mantinha, interferem na composição dos resíduos.

A madeira, por exemplo, é muito presente nos RCC das construções americanas e japonesas, enquanto no Brasil é pouco significativa (Pinto, 1999). A revisão da literatura comprova que diferentes regiões nacionais apresentam variações, e tal variações ganham dimensões quando comparadas internacionalmente, fato este exemplificado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição dos Resíduos de novas construções (Angulo, 2000).

Materiais	Resíduos de Construção em Massa (%)		
	Holanda	Japão	Brasil
Cerâmica	39	12	29
Madeira	17	19	
Betão	13	17	4
Tijolos e elementos sílico-calcáreos	14	1	Nd
Argamassas	8	Nd	64
Outros (plásticos, solos, papel, mat.orgânico)	9	51	3

Segundo Gonçalves (2007) a fração inerte representa cerca de 70% do volume total do RCC, podendo assumir valores mais expressivos, dependendo do tipo de obra. A Resolução CONAMA 307 (Brasil, 2002) afirma que os RCC podem ser constituídos por tijolos, blocos cerâmicos, betão em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica e os demais materiais relacionados à obra.

A classificação do RCC é feita de acordo com sua composição e finalidade após reciclagem. No Brasil, a Resolução CONAMA 307 (Brasil, 2002) apresenta a seguinte classificação:

1. Classe A- resíduos reutilizáveis como agregados, tais como:
 - a. De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem;
 - b. De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e betão;
 - c. De processo de fabricação e/ou de demolição de peças pré-moldadas em betão (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos estaleiros.
2. Classe B- resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

3. Classe C- resíduos para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
4. Classe D- resíduos perigosos, oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

2.3 GESTÃO DO RCC

O gerenciamento dos resíduos deve iniciar a partir do momento que ele é gerado, independente da atividade geradora. Quando não há mecanismos e ferramentas para gerir a quantidade de entulho descartada, este resíduo se torna um problema caro para o poder público municipal, responsável pelo serviço de coleta (ABRECON, 2016).

A Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), estabelecem diretrizes para a gestão dos resíduos gerados pela construção civil, tendo como principal objetivo disciplinar as ações necessárias e atribuir responsabilidades compartilhadas aos geradores, transportadores e gestores municipais no que se refere à gerência destes resíduos, de forma a minimizar os impactos ambientais. De acordo com a Resolução 307 do CONAMA, cada município deverá elaborar um plano integrado de gerenciamento de resíduos, sendo de responsabilidade de cada um definir uma política municipal para o RCC, incluindo sistemas de pontos de coleta. Aos construtores, cabe a implantação de planos de gerenciamento de resíduos para cada empreendimento.

Ainda de acordo com esta Resolução 307, a responsabilidade pela destinação final dos resíduos é dos geradores. Quando não há possibilidade da reciclagem na própria fonte geradora, através da implantação de uma usina de reciclagem móvel, o resíduo deve ser coletado e transportado até uma usina de reciclagem fixa ou um aterro de resíduos.

Responsabilizar o gerador pelo destino dos RCC é uma medida eficaz quando fiscalizada. Na Dinamarca, as estações de tratamento cobram certa taxa para receber os resíduos, porém quando o produtor realiza a separação deste material ou destina para reciclagem, estes impostos são reembolsados (Gonçalves, 2007).

3 AGREGADOS RECICLADOS

De acordo com o CONAMA (2002) apenas os resíduos Classe A podem ser reutilizáveis como agregado. As características deste agregado reciclado variam de acordo com as características dos resíduos beneficiados. Diversos fatores intervêm na sua composição física, química e mineralógica, como os materiais e técnicas construtivas adotadas, fase da obra e características regionais.

3.1 BENEFICIAMENTO DO RCC – CLASSE A

O beneficiamento dos resíduos Classe A compreende triagem, transporte, britagem e separação por granulometria. A ABRECON (2016) resume este processo basicamente em seleção dos materiais recicláveis do entulho e a trituração em equipamentos apropriados. Angulo (2000) afirma que a reciclagem como um todo é um processo mais complexo, que necessita, inclusive, de outros equipamentos.

A NBR 15114 - Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) determina os requisitos mínimos para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de RCC. Um dos requisitos é que sejam aceitos apenas os resíduos Classe A, no entanto a triagem preliminar, no estaleiro, muitas vezes não ocorre e os resíduos podem vir misturados, necessitando retirá-los com processos de separação antes da reciclagem.

3.1.1 Triagem

A primeira separação deve ocorrer nos estaleiros. Como as condições de reaproveitamento e reciclagem estão condicionadas à ausência de contaminação, os resíduos devem ser segregados ainda na fonte geradora, atendendo o disposto na Resolução nº 307 do CONAMA “[...] o gerador deve garantir o confinamento dos resíduos após a geração até a etapa de transporte, assegurando em todos os casos em que seja possível, as condições de reutilização e de reciclagem [...]” (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002, não paginado).

O material deve ser segregado manualmente e acondicionado em caçambas estacionárias no local da obra, para posteriormente ser transportado até a usina de reciclagem. Mesmo com a coleta seletiva e separação tátil-visual dos resíduos recicláveis, pode-se encontrar materiais indesejáveis.

Na usina o material é separado e empilhado de acordo com sua composição em RCC de concreto (RCC-C) e RCC misto (RCC-M). A composição desses resíduos pode ser observada na Tabela 3.1, onde é apresentada a caracterização dos resíduos recebidos pela empresa de reciclagem de resíduos da empresa Progresso e Desenvolvimento de Guarulhos S/A (Proguaru), localizada no município de Guarulhos, São Paulo.

Tabela 3.1 – Caracterização do RCC (Proguaru, 2016).

RCC – Resíduo da Construção Civil - CONCRETO	Composto de diferentes concentrações de resíduos inertes de areia, brita, cimento, consolidados ou não em diversas granulometrias.
RCC – Resíduo da Construção Civil - MISTO	Composto de diferentes concentrações de resíduos inertes de cor cinza (betão); resíduos inertes de cor vermelha (cerâmicos crus ou cozidos, de tamanhos diversos e parte de solos ou argila).



a) RCC de Betão



b) RCC Misto

Figura 3.1 – Resíduos da construção beneficiados pela Proguaru

Uma segunda triagem manual é executada, de modo a serem separados os resíduos indesejados como madeira, ferro e plástico. Após a separação, o material é encaminhado para o britador por alimentador vibratório, pá escavadeira ou por um equipamento gravimétrico que separa os materiais pela sua

densidade por meio de expansão e contração vertical de um leito de partículas pelo movimento pulsante de ar ou água.

3.1.2 Cominuição

As operações de cominuição ou fragmentação, como também é denominado, são utilizadas para reduzir o tamanho das partículas, e são compostas por dois processos: britagem e moagem. A britagem pode ser definida como uma operação de cominuição grosseira, enquanto a moagem caracteriza-se como um cominuição fina.

No processo de britagem, os equipamentos mais comuns são os britadores de mandíbulas e os britadores de impacto. Segundo Buttler (2003), a correta escolha do britador otimiza os resultados, proporcionando agregados com granulometria e forma desejada.

Os britadores de mandíbula (Figura 3.2) são usados na britagem primária, para reduzir blocos de elevadas dimensões e dureza através da compressão. Segundo Hansen (1985, apud Buttler 2003, p.25) o britador de mandíbula fornece melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para produção do betão. As principais vantagens deste equipamento são: grande capacidade de trabalho, mecânica simples e baixo custo de manutenção.

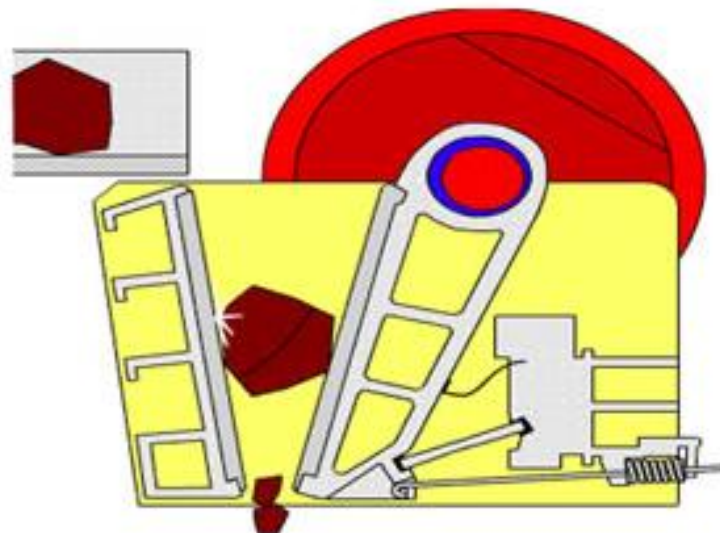


Figura 3.2 – Britador de Mandíbula (Hj Crusher, 2016)

Os britadores de impacto (Figura 3.3) também são usados para britagem primária, a fragmentação ocorre por impacto contra uma peça de metal ao invés de compressão. Segundo Hansen (1985, apud Buttler 2003, p.25) o britador de impacto fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para ser utilizado em sub-bases e bases de rodovias. Sua desvantagem quando comparado ao de mandíbula é a produção inferior.



Figura 3.3 – Britador de Impacto (Tkis, 2016)

A Tabela 3.2 apresenta um estudo comparativo entre esses dois equipamentos.

Tabela 3.2 – Comparativo entre britador de mandíbula e britador de impacto (Vázquez, 2006).

Propriedade	Britador de mandíbulas	Britador de impacto
Capacidade	Alta	Baixa
Custo de produção	Baixo	Alto
Desgaste	Baixo	Alto
Qualidade do Agregado	Baixo	Alto
Quantidade de finos produzida	Baixo	Alto
Consumo de energia	Baixo	Alto

Segundo Hendriks (2000, apud Angulo 2005, p.24), assim como no Brasil, na Europa existem usinas com um único estágio de cominuição, porém é mais comum usinas realizarem esta etapa em dois estágios, um primário com britador de mandíbulas e outro secundário com britador de impacto, ou vice-versa.

Após fragmentação os agregados vão para a fase de separação.

3.1.3 Separação Granulométrica

Nesta fase, as partículas são separadas por tamanho, com auxílio de peneiros ou classificadores (pneumáticos ou hidráulicos) Angulo (2005).

O peneiramento é normalmente realizado via seca, com peneiros vibratórias (Figura 3.4), resultando sempre uma parcela de fração fina aderida à fração graúda.



Figura 3.4 – Peneiro Vibratória (Furlan, 2016)

Os classificadores pneumáticos (Figura 3.5) geram uma corrente de ar ascendente e separam as partículas leves, como papel, plástico, madeira, etc. dos agregados reciclados. Os classificadores hidráulicos utilizam uma corrente de água, a qual as partículas circulam em direção contrária de modo a retirar a fração fina (<0,15mm) presente nos agregados reciclados (Hendriks 2000, apud Angulo, 2005, p.26).

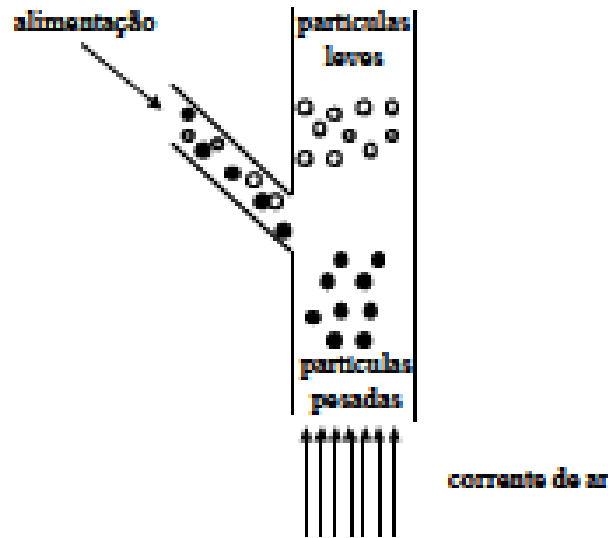


Figura 3.5 – Classificadores Pneumáticos (Hendriks 2000, apud Angulo 2005)

Após o peneiramento, o material é transportado através de esteiras, chamadas transportadoras de correia e armazenados, em pilhas.

3.2 CLASSIFICAÇÃO

Os agregados obtidos desses resíduos são classificados de acordo com sua composição pela NBR 15116 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) em Agregado de Resíduo Misto (ARM) e Agregado de Resíduo de Concreto (ARC), de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classificação pela composição do agregado reciclado - NBR 15116 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Tipo	Descrição
Agregado de resíduo de concreto (ARC)	“[...] agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.”
Agregado de resíduo misto (ARM)	“[...] agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.”

A especificação portuguesa E 471 (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009) atribui classificação aos agregados reciclados graúdos, semelhante a brasileira; conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Classificação pela composição do agregado reciclado – E 471 (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009).

Tipo	Descrição
ARB 1	Constituídos predominantemente por betões, misturados ou não a agregados não ligados de cimento Portland e rochas.
ARB 2	
ARC	Constituídos por agregados reciclados compostos, contendo betões, agregados não ligados e elementos de alvenaria. Não há determinação quanto à proporção de seus componentes.

Após classificação de acordo com sua composição, o AR é classificado de conforme sua granulometria, de acordo com a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Classificação pela granulometria do agregado reciclado (Proguaru, 2016).

Tipo	Tamanho (granulometria)	Similaridade ao natural	Descrição
Areia Reciclada Mista – ARM 0	0,1 a 4,8mm	Areia média	Obtido pelo beneficiamento de resíduos de telha, tijolo, bloco, pré-moldado, argamassa, piso de betão ou cerâmico.
Agregado Reciclado Misto – ARM 1	4,8 a 9,5mm	Pedrisco	Idem acima
Agregado Reciclado Misto – ARM 2	9,5 a 25mm	Pedra 1 e 2	Idem acima
Agregado Reciclado Misto – ARM 3	25 a 50mm	Pedra 3	Idem acima
Agregado Reciclado Graúdo Misto	> 50mm	Rachãozinho	Idem acima
Bica Corrida Reciclada	0,1 a 50mm	Bica Corrida	Idem acima

Tipo	Tamanho (granulometria)	Similaridade ao natural	Descrição
Areia Reciclada de Betão – ARC 0	0,1 a 4,8mm	Areia Média	Obtido pelo beneficiamento de resíduo de betão, simples, armado, protendido, composto de, no mínimo, 90% de massa de fragmentos à base de cimento Portland e de rocha (ABNT/NBR 15116/2004).
Agregado Reciclado de Betão –ARC 1	4,8 a 9,5mm	Pedrisco	Idem acima
Agregado Reciclado de Betão –ARC 2	9,5 a 25mm	Pedra 1 e 2	Idem acima
Agregado Reciclado de Betão –ARC 3	25 a 50mm	Pedra 3	Idem acima
Agregado Reciclado Graúdo de Betão	> 50mm	Rachãozinho	Idem acima

3.3 CONTROLO DE QUALIDADE

Para garantir as especificações técnicas e qualidade do produto final, cada etapa do beneficiamento deve ser controlada. O grande desafio encontra-se primeiramente na segregação do material na própria fonte geradora e posteriormente na aplicação das normas técnicas nas usinas de reciclagem, entre outras.

A demolição seletiva pode ser empregada, contribuindo na retirada de materiais indesejados e reaproveitamento de outros. Com esta técnica, agregados reciclados de resíduos de demolição são obtidos com melhor qualidade. Tal processo requer maior disponibilidade de tempo do que as demolições tradicionais. (Wahlstrom et al, 1996; Ruch et al., 1997; Schultmann et al., 1997 apud Angulo, 2000, p.15).

Gonçalves (2007) também afirma que a demolição seletiva tem um papel fundamental para que os resíduos cheguem em condições apropriadas de reciclagem às usinas.

Para Angulo (2005), a variedade dos componentes do RCC e suas diferentes origens podem resultar em agregados reciclados com diferentes propriedades físicas, obstando a classificação da fração mineral conforme as normas técnicas. “[...] as classificações do RCC mineral como resíduos de betão, de alvenaria ou mistos não garantem agregados reciclados com composição e propriedades físicas constantes, o que dificulta sua inserção no mercado de agregados.” (Angulo, 2005, p.44).

Ainda segundo Angulo (2005, p.44) “[...] a catação que é o método visual de controle de fases dos agregados graúdos de RCC reciclados utilizados nas normas técnicas, é trabalhosa, demorada e sujeita a erro por desatenção ou fadiga, apesar de sua simplicidade.”. A separação por fases por meio da catação não é eficiente para controlar o comportamento dos betões produzidos. A separação por líquidos densos é uma técnica eficiente para separar agregados reciclados graúdos com valores diferentes de massa específica aparente. Como a porosidade dos AR influencia na massa específica aparente, haverá separação de agregados de acordo com a porosidade e assim a obtenção de betões com comportamento mecânico e absorção de água similares (Angulo, 2005).

3.4 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades dos agregados reciclados são alteradas de acordo com a composição do resíduo processado, dos equipamentos usados, do teor de impurezas, da granulometria, entre outros fatores. As características dos agregados que são importantes para a tecnologia do betão incluem porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes.

É possível estabelecer relações entre diversas propriedades do betão.

3.4.1 Massa específica, Absorção de água e Porosidade

A massa específica e absorção de água são propriedades dependentes da porosidade. Uma vez dependente da porosidade do material, afeta diretamente a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade do betão.

Diversos estudos concluem que o agregado reciclado absorve maior quantidade de água quando comparado ao agregado natural, e tal comportamento é atribuído à argamassa aderida às partículas.

Segundo Buttler (2003), a nível macroscópico da estrutura do betão com agregado natural, há a pasta de cimento endurecida e partículas de agregados; porém a nível microscópico (Figura 3.6) é possível distinguir uma zona de contato entre o agregado e a pasta de cimento, chamada de zona de transição. Esta zona apresenta características diferentes do restante da pasta e maior fragilidade, por esse motivo exerce maior influência nas propriedades do betão. A microestrutura do betão com agregado graúdo reciclado (Figura 3.7) apresenta uma camada de argamassa, entre o agregado e a zona de transição; as propriedades dessa argamassa aderida e da nova matriz de cimento que influenciam nas propriedades do material.

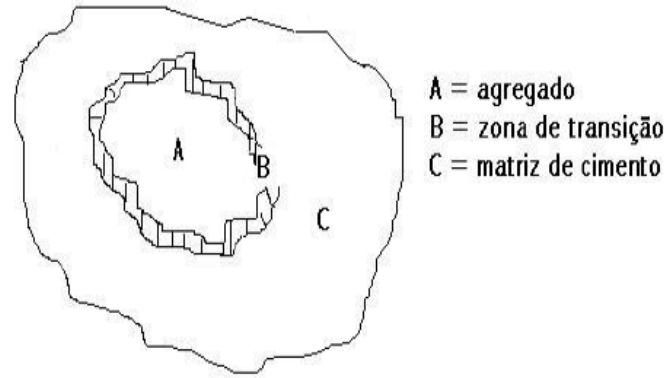


Figura 3-6 – Microestrutura do betão (Buttler, 2003)

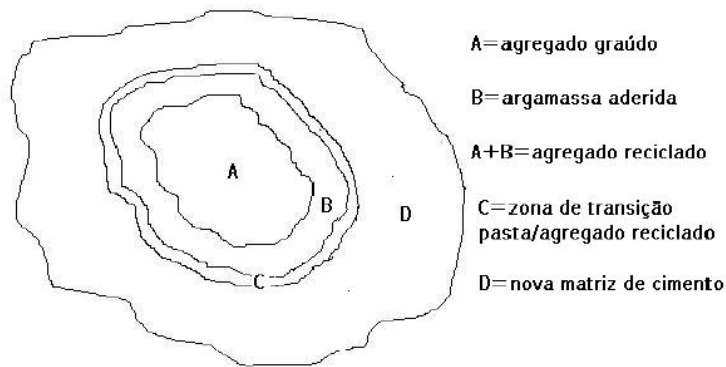


Figura 3-7 – Microestrutura do betão reciclado (Buttler, 2003)

Araújo, Felix, Santos e Silva (2016) submetaram a fração graúda do AR de betão e argamassa a um tratamento mecânico, com equipamento de abrasão de “Los Angeles”, buscando eliminar os restos de argamassas e finos envolvidos no agregado graúdo. Os agregados resultantes do final do processo apresentaram massa específica praticamente igual à massa específica dos agregados naturais, e uma melhoria na taxa de absorção, passando de 7% para 3%.

Angulo (2011) observou que os mesmos agregados que apresentam alta taxa de absorção de água, apresentam menor valor de massa específica.

Carrijo (2005) por meio da separação em diferentes faixas de densidade, buscou analisar a influência da massa específica dos agregados reciclados no comportamento mecânico e nas propriedades físicas do betão estrutural. A utilização de agregados reciclados na faixa de densidade de 2,2 a 2,5 kg/dm³ não resultou em aumento significativo do consumo de cimento em betões de resistências semelhantes. Já nos betões com agregados reciclados com menores densidades, as relações consumo/resistência foram altas, tornando estes betões economicamente menos vantajosos que os betões naturais.

Hansen e Narud (1983) afirmam que o agregado reciclado graúdo possui menor densidade e maior absorção de água do que os naturais, devido à quantidade de argamassa do betão original aderida na superfície dos agregados naturais. Tal fato foi comprovado no programa experimental, ao encontrarem uma percentagem média de 30% de argamassa aderida ao material obtido após a britagem.

Leite (2001) também conclui que os agregados reciclados apresentam maior absorção de água. Seus estudos mostram que em 10 minutos houve uma absorção de cerca de 50% da absorção total, tanto dos agregados graúdos quanto miúdos. Tal fenômeno pode conferir perda de resistência ao betão, uma vez que a água da mistura é absorvida pelos agregados reciclados.

Devido à alta taxa de absorção de água pelos agregados reciclados, diversos autores recomendam a prática da pré-molhagem dos mesmos. No entanto, não há consenso sobre o método para estimar o teor de água a ser usado.

3.4.2 Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

A resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade dos agregados são propriedades inter-relacionadas, muito influenciadas pela porosidade. Os agregados naturais comumente usados para a produção de betão, geralmente são densos e resistentes.

Segundo Buttler (2003) a massa específica do agregado graúdo influi diretamente na massa específica e na resistência do betão, quanto maior o índice de vazios do agregado, menor sua resistência.

Geilma (2004) avalia a resistência à compressão do betão com substituição do agregado natural por agregado reciclado nas proporções de 50% e 100%, com diferentes relações água/cimento. Segundo seus estudos, o agregado miúdo apresenta maior resistência, à proporção que a relação água/cimento e o percentual de substituição aumentaram. Segundo Leite (2001), o grande percentual de finos presentes nos agregados reciclados proporciona um maior fechamento de vazios, aumenta a absorção de água, mas aumenta a aderência entre a pasta e o agregado, gerando aumento da resistência (Leite, 2001).

Já os resultados de Geilma (2004) para o agregado graúdo reciclado apresentaram menor resistência à medida que a relação água/cimento diminuiu e o percentual de substituição aumentou. Tal resultado pode ser atribuído à baixa resistência e densidade do grão do agregado, que o torna um fator limitante na resistência de misturas com baixa relação água/cimento. Hansen (1992) afirma que ao utilizar relações água/cimento maiores, reduz-se o efeito negativo do percentual de agregados graúdos reciclados no betão, e a resistência à compressão deixa de estar limitada à resistência do agregado e passa a depender da resistência da pasta de cimento endurecida.

O melhor desempenho da atuação conjunta dos agregados miúdo e graúdo reciclados, na pesquisa de Geilma (2004), se deu nos betões com 50% de substituição de agregado graúdo reciclado (AGR) e 100%

de agregado miúdo reciclado (AMR) e com 50% de ambos, porque não houve perda de resistência. O ganho foi observado para todas as classes de resistências, tendo seu maior valor obtido para o traço 100% de AMR e 50% de AGR e relação a/c = 0,80, em que o aumento da resistência foi de 56% em relação ao betão de referência.

Hansen (1992) constatou perda da resistência quando se trabalha com 100% de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, embora a sua taxa máxima de redução tenha ficado em torno de 16%. Vázquez (2006, apud Gonçalves, 2007, p.3.9) também chegou em valores próximos de Hansen, para uma taxa de substituição de 100% de agregados graúdos houve uma diferença de resistência da ordem dos 20%; para substituições de até 50%, as diferenças situam-se entre 2 e 15%. Essa diferença pode atingir valores inferiores a 5% quando a taxa de substituição é limitada entre 20 e 30%.

Gonçalves (2000) afirma que os agregados reciclados pouco influem na resistência à compressão. Já a fração miúda reduz consideravelmente o módulo de elasticidade.

A deformação elástica do betão depende fundamentalmente da sua composição, especialmente dos agregados. Por isso que o módulo de elasticidade do betão é controlado pelo módulo de elasticidade de seus componentes. Os valores medidos variam usualmente de 120% a 80%, em função do tipo de agregado utilizado.

Segundo Levy (2001), o módulo de elasticidade permite prever deformações de uma estrutura e, em função do seu carregamento, prever o surgimento de fissuras e o valor de sua abertura. Para Buttler (2003) as propriedades de deformabilidade como módulo de elasticidade, retração por secagem e fluência são os principais problemas dos betões com agregados reciclados. Betões com agregados graúdos reciclados apresentam uma retração por secagem de 30% a 60% maior quando comparada com os resultados obtidos para betões com agregados naturais.

3.5 USOS E LIMITAÇÕES

Angulo (2000) afirma que os agregados miúdos favorecem a utilização em argamassas e blocos, enquanto os agregados graúdos são mais adequados à utilização em betões.

As possibilidades de usos são amplas, estudos sobre a utilização do agregado reciclado em betões, argamassas, obras de pavimentação, elementos de alvenaria, entre outros usos, estão sendo realizados. A ABRECON (2016) faz algumas recomendações quanto à utilização do AR, conforme exemplificado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Recomendações de aplicações do Agregado Reciclado – ABRECON (Urbem Tecnologia Ambiental, 2016).

Produto	Características	Uso recomendado
Areia reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de betão e blocos de betão.	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
Pedrisco reciclado	Material com dimensão máxima característica de 6,3 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de betão e blocos de betão.	Fabricação de artefatos de betão, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros.
Brita reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de betão e blocos de betão.	Fabricação de betões não estruturais e obras de drenagens.
Bica corrida	Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil, livre de impurezas, com dimensão máxima característica de 63 mm (ou a critério do cliente).	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos.
Rachão	Material com dimensão máxima característica inferior a 150 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de betão e blocos de betão.	Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem.

3.5.1 Argamassas

A fração miúda é inevitavelmente produzida durante o processo de britagem. Essa quantidade é significativa para ser banalizada, é neste sentido que “[...] as argamassas apresentam-se então como a solução mais óbvia para utilização da fração fina dos RCD.” (Gonçalves, 20007, p.2.18).

De acordo com a ABRECON (2016) o processamento do RCC por argamasseiras, presentes na própria obra, gera um agregado de granulometria semelhante à da areia, podendo ser utilizado em revestimentos e contra pisos. As vantagens deste beneficiamento, são:

- a) utilização do resíduo no local gerador, o que elimina custos com transporte;
- b) efeito pozolânico apresentado pelo entulho moído;
- c) redução no consumo do cimento e da cal;

d) ganho na resistência a compressão das argamassas.

Miranda (2000) mostrou que a resistência mecânica das argamassas produzidas com AR é superior às argamassas convencionais. Levy (1997a) acredita que a atividade pozolânica, originada pela parcela cerâmica dos RCC utilizados, seja responsável por tal melhoria.

3.5.2 Pavimentos

A utilização do agregado reciclado como base e sub-base de pavimentos, é uma das aplicações mais usual. No Brasil, a Norma NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de betão sem função estrutural – Requisitos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) estabelece os requisitos do agregado reciclado para utilização em pavimentos, e a Norma NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) é voltada apenas para pavimentos, estabelecendo os procedimentos para execução de camadas de pavimentação.

De acordo com a ABRECON (2016) a utilização do agregado reciclado em pavimentação (base, sub-base ou revestimento primário) é a maneira mais simples de reciclagem do RCC. Este uso possui grandes vantagens, como:

- a) a forma de reciclagem que exige menor utilização de tecnologia o que implica menor custo do processo;
- b) permite a utilização de todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.), sem a necessidade de separação de nenhum deles;
- c) economia de energia no processo de moagem do RCC (em relação à sua utilização em argamassas), uma vez que, usando-o no betão, parte do material permanece em granulometrias graúdas;
- d) possibilidade de utilização de uma maior parcela do RCC produzido, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/ trituração;

3.5.3 Betão

No Brasil, a aplicação do AR no betão limita-se a usos não estruturais, como composição de camadas de proteção, envelopamento de tubos, enchimentos de camadas, base de blocos, lastros, contra pisos e alvenarias. A fração utilizada no betão pode ser tanto a graúda quanto a miúda, agregados reciclados de betões ou mistos.

Os requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de betão sem função estrutural, conforme a Tabela 3.7, encontra-se na norma NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção

civil – Utilização em pavimentação e preparo de betão sem função estrutural – Requisitos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Tabela 3.7 – Requisitos para AR destinado ao preparo de betão sem função estrutural – NBR 15116 (ABNT, 2004).

Propriedades		Agregado Reciclado Classe a			
		ARC		ARM	
		graúdo	miúdo	graúdo	miúdo
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥ 90	-	< 90	-
Absorção de água (%)		≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1			
	Sulfatos	1			
	Materiais não minerais	2			
	Torrões de argila	2			
	Teor total máximo de contaminantes	3			
Teor de material passante na malha 75 um (%)		≤10%	≤15%	≤ 10%	≤ 20%

De acordo com Miranda, Angulo e Careli (2009), para que o agregado seja utilizado no betão, é necessário realizar a substituição parcial dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Quando limitamos a percentagem do agregado reciclado em relação ao natural, pode haver a redução da variabilidade das propriedades e assim os limites dados nas normas podem ser atendidos.

Gonçalves (2001) afirma que a deformação do betão com agregado reciclado é o principal problema. Esta deformação está associada à menor massa específica e, consequentemente maior porosidade, além de menor trabalhabilidade. A resistência à compressão não é muito influenciada pela presença do material reciclado, o que já não acontece com o módulo de elasticidade, que possui seu valor razoavelmente reduzido devido ao aumento do consumo de cimento.

Em alguns países desenvolvidos, como o Japão, há normas que permitem a utilização do agregado reciclado para produção de betão estrutural. Em Portugal, os agregados reciclados graúdos podem ser usados na produção de betões estruturais. Os requisitos para emprego deste agregado, de acordo com a Tabela 3.8, encontram-se na especificação E 471 – Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009).

Tabela 3.8 – Requisitos para AR graúdo destinado ao preparo de betão com função estrutural – E471
(LNEC, 2009, p.3).

Classe	Proporção dos constituintes (EN 12620: 2002/A1: 2008)					
	Rc (%)	Rc+Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	X + Rg (%)	FL (%)
ARB1	≥ 90		≤ 10	≤ 5	≤ 0,5	≤ 2
ARB2	≥ 70		≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 2
ARC	≥ 90			≤ 30	≤ 2	≤ 2

R_c= betão, produtos de betão, argamassa

R_u= agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos

R_b= materiais betuminosos

R_a= elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolos, ladrilhos, telhas etc), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio, betão celular não flutuante

R_g= vidro

FL= material flutuante em volume

X= outros – materiais coesivos (ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos), madeira não flutuante e estuque.

Os agregados graúdos ARB1 e ARB2 podem ser usados na produção de betão armado ou simples. Em betão armado, podem constituir até 25% e 20% dos agregados, respectivamente. Para betões simples de enchimentos ou regularização não há limite de porcentagens de uso, para essas duas classes.

Os agregados graúdos ARC só podem ser usados em betões de enchimentos e de regularização, sem fins estruturais, e em ambientes não agressivos.

3.6 COMPARAÇÃO DA NBR 15116 E DA E 471

No Brasil, os requisitos para utilização de agregados reciclados, a partir de resíduos da construção civil, na produção de betão sem fim estrutural, são estabelecidos pela NBR 15116 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Em sua análise de legislações, Gonçalves (2007) afirma que em relação aos agregados reciclados de betão a Norma assume uma posição bastante conservadora, no que respeita à utilização em betão, pois apenas permite a produção de betões para fins não estruturais. Ao não estabelecer requisitos quanto à massa específica mínima dos ARC, mas estabelecendo taxas máximas de absorção de água, por relação entre essas propriedades é possível chegar em valores de massa específica de 2000 kg/m³ para os agregados graúdos e de 1800 kg/m³ para a fração fina.

Em relação aos agregados reciclados mistos, não é muito clara. Ao estabelecer um intervalo grande, menor que 90%, para o teor de fragmentos de cimentos e rochas, os limites impostos tornam-se curtos caso a percentagem de material cerâmico seja grande. O autor presume que com estas medidas, a norma

brasileira tenta reduzir a presença de materiais cerâmicos, mesmo dentro da classe ARM (Gonçalves, 2007).

A norma é bastante permissiva na percentagem de partículas inferiores a 75 µm, uma vez que este material superfino é propenso a conter partículas contaminantes, influenciando negativamente algumas propriedades dos agregados como resistência à compressão ou o módulo de elasticidade.

Em Portugal, os requisitos para utilização de agregados reciclados graúdos, a partir de resíduos da construção civil na produção de betões de ligantes hidráulicos, são estabelecidos pela E 471 (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009).

Nesta legislação não são apresentadas exigências para a fração miúda, devido à sua maior taxa de absorção de água, dificultando o controle da trabalhabilidade e comprometendo a resistência mecânica do betão. Gonçalves (2007) conclui que pelo elevado valor da massa específica mínima e a máxima taxa de absorção de água exigidos para os agregados classes ARB1 e ARB2, a especificação utiliza-se apenas de um material com boas características. Em relação aos ARC a especificação é exigente, devido a utilização proposta.

3.7 PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM GUARULHOS -SP

Visto que a disposição irregular dos RCC traz grandes consequências ambientais, a reciclagem acaba sendo a melhor alternativa para reduzir esses impactos negativos. Há registros de usinas de reciclagem no Brasil desde 1986, em 2002 haviam apenas 16 usinas instaladas no país, após a Resolução CONAMA 307 de 2002 esse cenário mudou significativamente, passando para cerca de 48 usinas em 2009 (Miranda et al., 2009).

O relatório setorial realizado pela ABRECON, entre junho de 2014 e setembro de 2015, conseguiu levantar mais de 310 usinas no país. A maioria dessas usinas é privada e o Estado de São Paulo apresenta o maior número de usinas instaladas. Dentre essas empresas de reciclagem de RCC associadas à ABRECON, podemos citar: AB Ambiental (Pindamonhangaba – SP), Ecovia Reciclagem de Resíduos da Construção Civil LTDA (Varginha – MG), Alpha Ambiental (Taubaté – SP), Foccus Gerenciamento de Resíduos (Praia Grande – SP), Galvão Soluções (Uberaba – MG), Global Indústria e Comércio de Resíduos LTDA (Engenho de Dentro – RJ), Progresso e Desenvolvimento de Guarulhos – Proguaru (Guarulhos – SP), R3ciclo Gestão de Resíduos (Morumbi – SP), Trataentulho Reciclagem Ambiental LTDA (Guarulhos – SP), Urbem Tecnologia Ambiental (São Bernardo do Campo – SP), WRJ Reciclagem (Limeira – SP).

Para melhor compreensão do processo de beneficiamento do RCC, foi realizada uma visita técnica à Usina recicladora da empresa Proguaru, localizada em Cabuçu – Guarulhos – SP. Implantada no ano de 2003, atendendo à Resolução CONAMA 307 de 2002 e operando com licença da CETESB, a Usina de Reciclagem

de Resíduos da Construção Civil é parte integrante da Política de Gestão de Resíduos do Município, trata-se de uma usina do setor público.

O munícipe de Guarulhos que faz pequenas reformas em sua moradia, ou por outros motivos gera RCC, tem o direito de entregar gratuitamente até 1 m³ por dia (ver Figura 3.8) nos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs). Há 18 pontos instalados na cidade, para atender o município e assim solucionar os problemas causados pela disposição irregular do entulho. A única exigência feita ao gerador, é que o material seja separado por tipo e depositado conforme a indicação do local.



Figura 3.8 – Equivalência de 1 metro cúbico de entulho (Prefeitura de Guarulhos 2016)

A Prefeitura se encarrega de levar o material coletado nos PEVs até a Usina. Para volume acima de 1 m³ é necessário contratar um transportador cadastrado e licenciado no município.

O setor privado também pode entregar seus resíduos Classe A (betão e misto), diretamente na Usina, com agendamento prévio e sob pagamento de R\$ 8,00/m³. A empresa deixa claro que a triagem deve ser feita no local de origem, para que o material seja aceito.

3.7.1 Processamento

Uma vez selecionado, o RCC Misto e o RCC de Betão são entregues e estocados separadamente na Usina, conforme a Figura 3.9.



a) RCC – Betão

b) RCC - Misto

Figura 3.9 – RCC entregue à Proguaru

Os provetes de betão fazem parte de uma parceria entre a Proguaru e um Laboratório de controlo tecnológico dos materiais da Construção Civil. Não é cobrada nenhuma taxa para entrega deste material, pois o resíduo entregue é de boa qualidade, não apresenta contaminação por outros materiais.

O beneficiamento dos resíduos segue o processamento comum: triagem, britagem e separação por granulometria. Após triagem do próprio gerador, o material passa por uma segunda triagem na usina: a triagem manual, conforme ilustra a Figura 3.10.



Figura 3.10 – Triagem manual feita na Usina (Proguaru 2016)

Uma vez selecionado, o material é levado por uma retroescavadeira até o triturador; conforme ilustra a Figura 3.11.



Figura 3.11 – Abastecimento do triturador (Proguaru 2016)

O equipamento utilizado na cominuição do RCC é o triturador de mandíbula, conforme ilustra a Figura 3.12, devido à sua alta capacidade de produção e baixo custo de manutenção.



Figura 3.12 – Triturador de mandíbula utilizado pela Proguaru (Proguaru 2016)

Após sofrer redução das partículas, o RCC cai em forma de agregado sob uma esteira rolante, para ser conduzido à fase de separação granulométrica. Neste percurso, inicialmente o AR passa por um ímã, de modo que os metais sejam retirados; logo em seguida, um funcionário faz uma segunda triagem manual, com o objetivo de retirar os materiais indesejados passantes. Tais processos são ilustrados da Figura 3.13.



Figura 3.13 – Triagem após cominuição

Para finalizar o processamento, o agregado reciclado é separado de acordo com suas dimensões, através de uma peneira vibratória, como mostra a Figura 3.14.



Figura 3.14 – Separação Granulométrica

3.7.2 Aplicação do ARB - Proguaru

Na própria Usina recicladora foi possível acompanhar a utilização do ARB em betão estrutural. Apesar da Norma brasileira não permitir esse uso, o Engenheiro da Usina tinha conhecimento das demais normas que permitem tal aplicação, além de saber a procedência do agregado.

O betão produzido parcialmente com ARB, estava sendo utilizado na fabricação de lajes pré-moldadas, conforme ilustra a Figura 3.15. Esses elementos serão utilizados na ampliação da própria Usina, não foram produzidos com fins comerciais.



Figura 3.15 – Aplicação do ARB em lajes pré-moldadas

4 PESQUISA EXPERIMENTAL

A pesquisa experimental é dividida em 2 fases. Na primeira fase o agregado reciclado coletado é caracterizado, pois suas características influenciam as características dos betões. Na segunda fase este agregado é incorporado no fabrico de betões, e os provetes são submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

4.1 MATERIAIS

Os materiais empregados nesta pesquisa, para o fabrico do betão estudado foram:

1. Cimento Portland;
2. Agregado miúdo natural;
3. Agregado graúdo natural;
4. Agregado graúdo reciclado.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados seguindo as recomendações das Normas Brasileiras, no laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da Universidade Mackenzie.

4.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o cimento CII-E-32, cujas características físicas e mecânicas devem obedecer às recomendações da NBR 5732 – Cimento Portland Comum (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991). De acordo com esta Norma, a composição deste cimento deve estar compreendida entre os limites fixados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Teores dos componentes do Cimento Portland Comum – NBR 5732 (ABNT, 1991).

Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP I	32	100	0		

As exigências químicas prescritas pela mesma Norma, estão descritas na Tabela 54.2.

Tabela 4.2 – Exigências químicas para o Cimento Portland Comum – NBR 5732 (ABNT, 1991).

Determinações	Limites (% da massa)
Resíduo Insolúvel (RI)	≤ 1,0
Perda ao fogo (PF)	≤ 2,0
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,0
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 1,0

Quanto às exigências físicas e mecânicas prescritas pela Norma, estão descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Exigências físicas e mecânicas para o Cimento Portland Comum – NBR 5732 (ABNT, 1991).

Características e propriedades		Unidade	Limites da Classe
Finura	Resíduo na peneira 0,075 mm	%	≤ 12
	Área Específica	m ² /kg	≥ 260
Tempo de início de pega		h	≥ 1
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 10
	7 dias de idade	MPa	≥ 20
	28 dias de idade	MPa	≥ 32

A classe 32 representa o mínimo de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em Mpa. Seus limites são descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Classes de resistência dos cimentos Portland – NBR 5732

Classe de resistência	Resistência à compressão aos 28 dias de idade (Mpa)	
	Limite inferior	Limite superior
32	32	49

4.1.2 Agregado miúdo natural

Os agregados miúdos naturais utilizados foram a areia média fina e a areia fina, conforme ilustra a Figura 4.1. Esta última, com uma aparência mais quartzosa, é da Região de São Carlos.



a) Areia Média Fina



b) Areia Fina

Figura 4.1 – Agregado miúdo natural utilizado para fabrico do betão

A distribuição granulométrica foi realizada de acordo com os procedimentos da NBR NM 248 – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). As percentagens retidas e acumuladas encontram-se nas Tabelas 4.5 e 4.6 e as curvas granulométricas podem ser visualizadas na Figura 4.2.

Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica da Areia Natural Média Fina

Abertura dos peneiros (mm)	Parcelas retidas em cada peneira (g)		Porcentagens retidas individuais (%)			Porcentagens retidas acumuladas (%)
	1ª determ.	2ª determ.	1ª determ.	2ª determ.	Média	
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	3,77	2,62	0,8	0,5	0	0
2,36	9,78	10,43	2,0	2,1	2	2
1,18	25,48	23,50	5,0	4,7	5	7
0,600	117,42	110,05	23,5	22,0	23	30
0,300	213,03	213,87	42,7	42,8	43	73
0,150	100,79	107,03	20,2	21,5	21	94
Fundo < 0,150	28,96	32,02	5,8	6,4	6	100
Totais	499,23	499,52	100	100	100	
Dimensão máxima característica = 2,36 mm				Módulo de finura (MF) = 2,06		

Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica da Areia Natural Fina

Abertura dos peneiros (mm)	Parcelas retidas em cada peneira (g)		Porcentagens retidas individuais (%)			Porcentagens retidas acumuladas (%)
	1ª determ.	2ª determ.	1ª determ.	2ª determ.	Média	
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	0	0,6	0	0,1	0	0
2,36	1,8	3,6	0,4	0,7	1	1
1,18	1,5	2,0	0,3	0,4	0	1
0,600	11,7	12,4	2,4	2,5	3	4
0,300	159,9	161,2	32,0	32,3	32	36
0,150	215,4	216,5	43,1	43,4	43	79
Fundo < 0,150	109,1	103,1	21,8	20,6	21	100
Totais	499,6	499,4	100	100	100	
Dimensão máxima característica = 0,600 mm				Módulo de finura (MF) = 1,21		

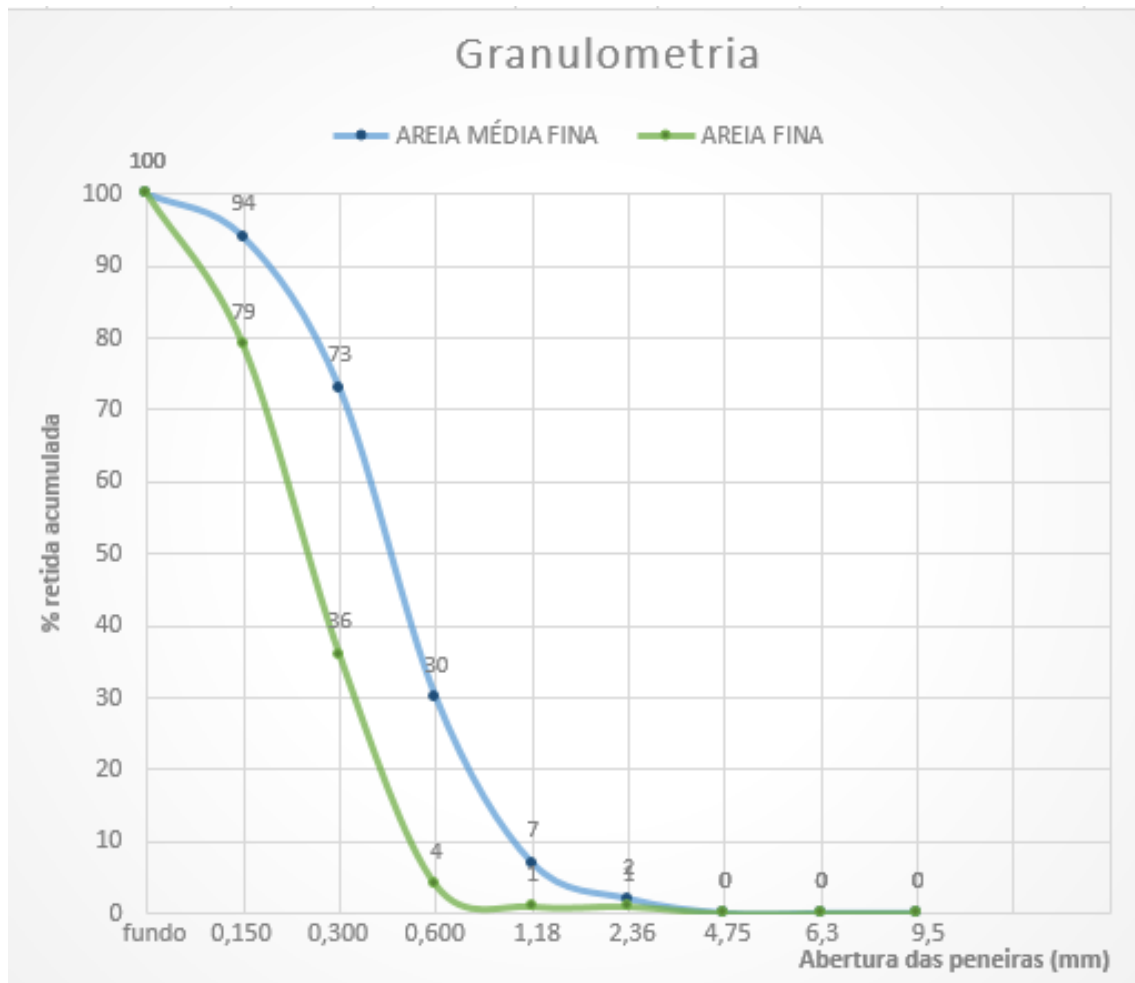


Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado

4.1.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural utilizado foi a pedra britada de origem basáltica, conforme ilustra a Figura 4.3. As percentagens retidas e acumuladas encontram-se na Tabela 4.7, e a curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 4.4.



Figura 4.3 – Agregado graúdo natural utilizado para fabrico do betão

Tabela 4.7 – Distribuição granulométrica da Brita Natural

Abertura dos peneiros (mm)	Parcelas retidas em cada peneira (g)		Porcentagens retidas individuais (%)			Porcentagens retidas acumuladas (%)
	1ª determ.	2ª determ.	1ª determ.	2ª determ.	Média	
75	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
37,5	0	0	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	624,3	600,4	12,5	12,0	12	12
12,5	2590,8	2463,4	51,9	49,3	51	63
9,5	1220,1	1161,6	24,5	23,3	24	87
6,3	435,7	609,4	8,7	12,2	10	97
4,75	48,5	46,2	1,0	0,9	1	98
2,36	0	0	0	0	0	98
1,18	0	0	0	0	0	98
0,6	0	0	0	0	0	98
0,3	0	0	0	0	0	98
0,15	0	0	0	0	0	98
Fundo < 0,150	68,7	113,5	1,4	2,3	2	100
Totais	4988,1	4994,5	100	100	100	
Dimensão máxima característica = 25 mm				Módulo de finura (MF) = 6,87		

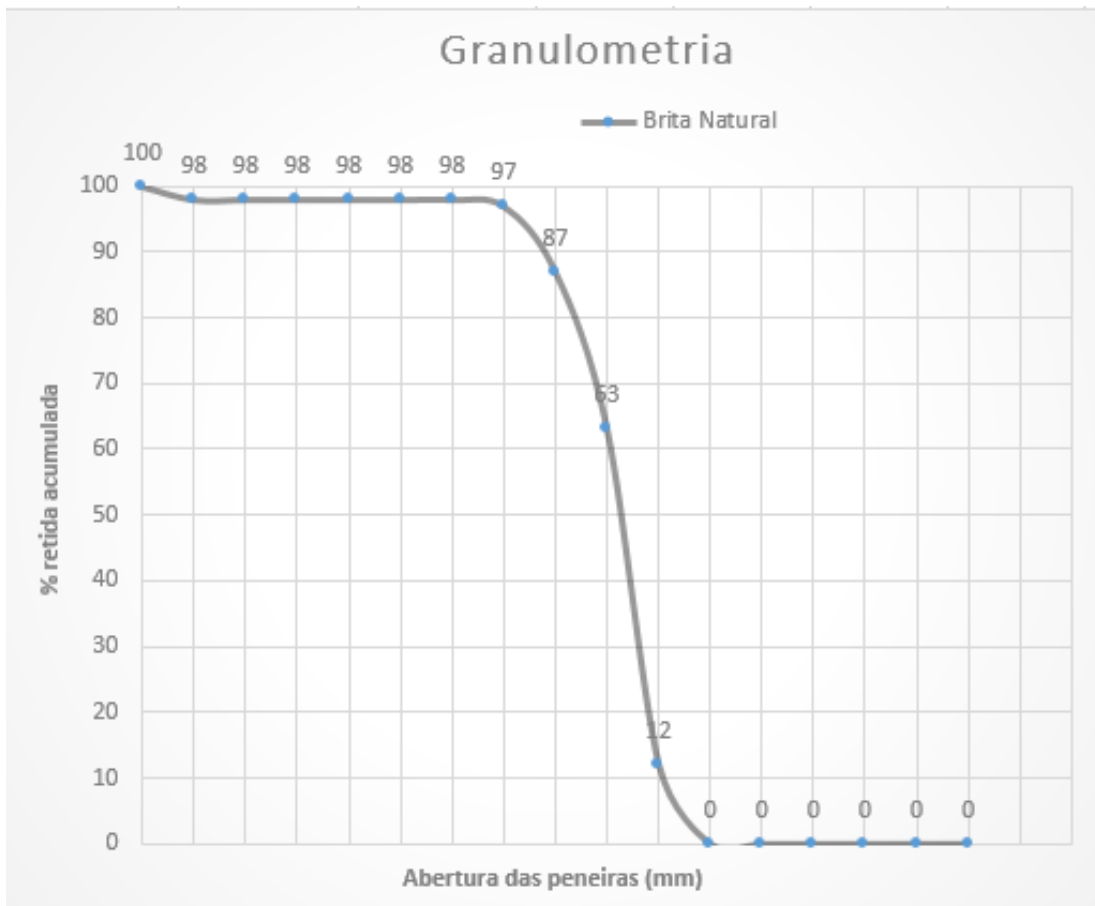


Figura 4.4 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural utilizado

4.1.4 Agregado graúdo reciclado

O agregado graúdo reciclado utilizado foi o AR de betão, com betões de diferentes resistências, aos quais não há conhecimentos dos valores. Devido a pequena dimensão dos grãos da brita reciclada, conforme ilustra a Figura 4.5, para sua caracterização foram utilizadas as peneiros do ensaio de agregado miúdo. As percentagens retidas e acumuladas encontram-se na Tabela 4.8, e a curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 4.6.



Figura 4.5 – Agregado graúdo reciclado utilizado para fabrico do betão

Tabela 4.8 – Distribuição granulométrica da Brita Reciclada

Abertura dos peneiros (mm)	Parcelas retidas em cada peneira (g)		Porcentagens retidas individuais (%)			Porcentagens retidas acumuladas (%)
	1ª determ.	2ª determ.	1ª determ.	2ª determ.	Média	
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	187,40	213,60	37,6	42,9	40	40
4,75	132,10	156,20	26,5	31,3	29	69
2,36	154,10	118,90	30,9	23,9	27	97
1,18	13,20	3,60	2,6	0,7	2	98
0,600	4,10	1,10	0,8	0,2	1	99
0,300	1,20	0,80	0,2	0,2	0	99
0,150	0,70	0,30	0,1	0,1	0	99
Fundo < 0,150	5,80	3,80	1,2	0,8	1	100
Totais	498,60	498,30	100	100	100	
Dimensão máxima característica = 9,5 mm			Módulo de finura (MF) = 5,61			

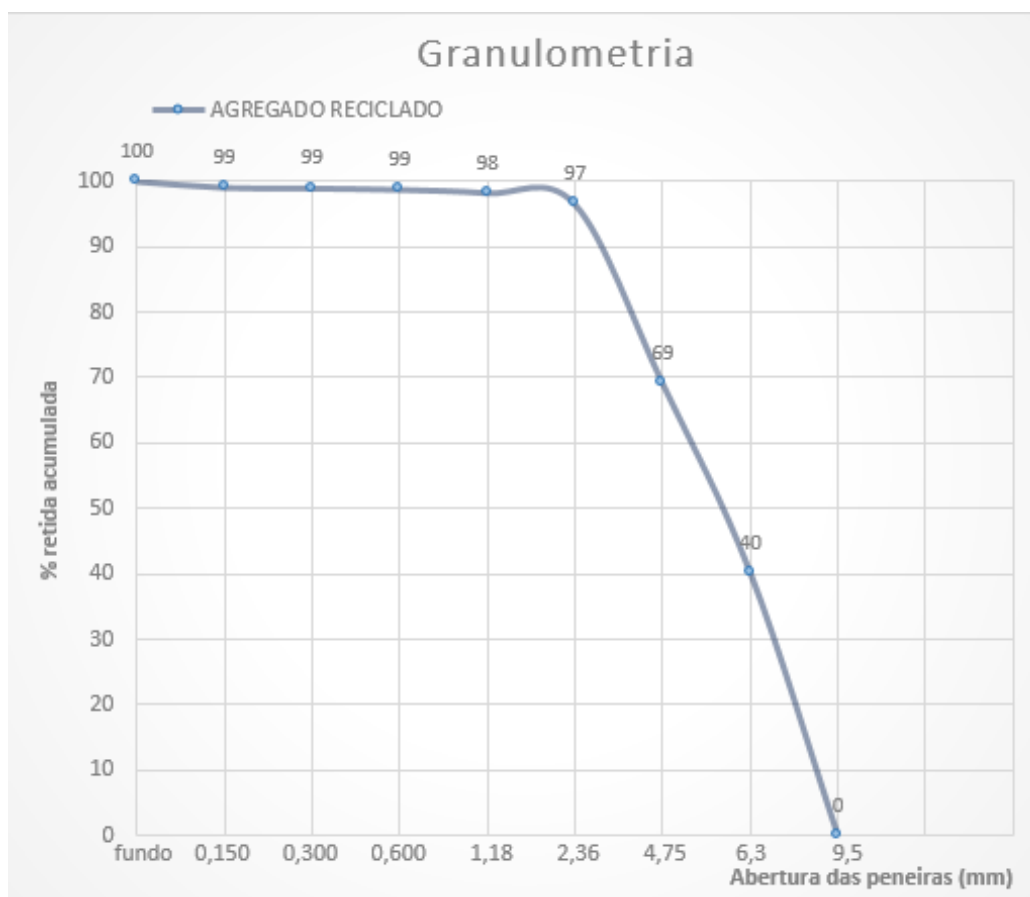


Figura 4.6 – Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado utilizado

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

O agregado graúdo reciclado foi submetido aos principais ensaios normalizados utilizados para a sua caracterização. A seguir os mesmos são apresentados.

4.2.1 Massa Específica e Absorção de Água

A massa específica e a taxa de absorção de água do agregado graúdo reciclado foram determinadas de acordo com os procedimentos da NBR NM 53 – Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). Tais procedimentos podem ser visualizados na Figura 4.7, e os resultados encontram-se na Tabela 4.9.



Figura 4.7 – Procedimentos do Ensaio para determinação de Massa Específica e Absorção de Água

Tabela 4.9 – Cálculo da Massa Específica e Absorção de Água – Agregado graúdo reciclado

Agregado	Massa específica (g/mL) ou (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Brita 0 reciclada	2,18	5,1

4.2.2 Teor de Material Pulverulento

A quantidade de material pulverulento presente no agregado reciclado foi determinada de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 7219 – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987). Tais procedimentos podem ser visualizados na Figura 4.8, e os resultados encontram-se na Tabela 4.10.

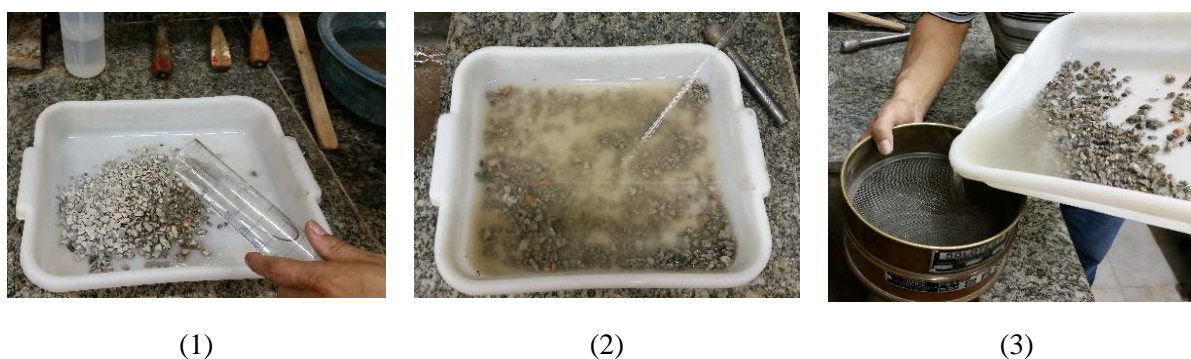


Figura 4.8 – Procedimentos do Ensaio para determinação do Teor de Material (Autora 2016)

Tabela 4.10 – Cálculo do Teor de Material Pulverulento – Agregado graúdo reciclado

Agregado	Massa da amostra inicial (g) Mi	Massa da amostra final após lavagem e secagem (g) Mf	Teor Material Pulverulento (%) [(Mi-Mf)/Mi]*100
Brita 0 reciclada	200	186,3	6,9%

4.3 FABRICO DO BETÃO

A fase da pesquisa experimental é definir os traços para o betão e moldar os provetes, concomitante a este processo realizar os ensaios no estado fresco; e após tempo de cura executar os ensaios no estado endurecido, todos este obedecendo os procedimentos das normas da ABNT.

4.3.1 Traço

Os traços utilizados para cada dosagem, foram diferentes. Como parâmetro de controle, foi escolhido o abatimento de tronco de cone, portanto cada traço teve uma relação água/cimento em função do mesmo resultado de abatimento.

Inicialmente foram estabelecidos 3 traços brutos: 1:4,5, 1:5,5, 1:6,5; onde o primeiro é mais rico em cimento, o segundo é um traço intermediário e o terceiro mais pobre em cimento. A expressão 4.1 exemplifica o traço bruto.

$$1:m \quad (4.1)$$

onde:

m — areia (a) + brita (b) no traço de betão.

Posteriormente um teor de argamassa seca foi estabelecido no valor de 52. De acordo com a equação 4.2 foi possível determinar a quantidade de areia e brita necessários para cada traço.

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m} \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

α — teor de argamassa seca;

1 — parcela de cimento no traço de betão;

a — parcela de areia no traço de betão.

A relação água/materiais secos foi estabelecida no valor de 8. De acordo com a equação 4.3 foi possível obter o valor inicial da relação água/cimento.

$$H = \frac{x}{1+m} \times 100 \quad (4.3)$$

onde:

H — relação água/materiais secos;

x — relação água/cimento;

A partir dos traços brutos obteve-se os traços desdobrados: 1: 1,86: 2,64; 1: 2,38: 3,12 e 1: 2,90: 3,60. Para cada traço houve uma substituição parcial em 25% de agregado graúdo natural por reciclado, de acordo com a especificação portuguesa E471:2009. Para o traço intermediário (1: 2,38: 3,12) teve uma substituição parcial em 50% de agregado graúdo natural por reciclado, e ainda a produção do betão de referência (0% de agregado graúdo reciclado). Ao todo são 5 teores diferentes, expressos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Traço adotado em unidades

Materiais	Teor de substituição de reciclado por natural				
	Piloto	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
	0%	25%	25%	25%	50%
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Areia Natural Média Fina	1,19	0,93	1,19	1,45	1,19
Areia Natural Fina	1,19	0,93	1,19	1,45	1,19
Brita 1 Natural	3,12	1,98	2,34	2,70	2,34
Brita 0 Reciclada	–	0,66	0,78	0,90	0,78
Relação a/c inicial	0,52	0,44	0,52	0,60	0,52

O consumo de material necessário foi calculado para 6 provetes a cada traço, onde três seriam ensaiados aos 7 dias e os outros três aos 28 dias. Os resultados para este consumo encontram-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Traço adotado em massa (kg)

Materiais	Teor de substituição de reciclado por natural					Total (kg)
	Piloto	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	
	0%	25%	25%	25%	50%	
Cimento	6,40	8,00	6,40	5,60	6,40	32,80
Areia Natural Média Fina	7,62	7,44	7,62	8,12	7,62	38,41
Areia Natural Fina	7,62	7,44	7,62	8,12	7,62	38,41
Brita 1 Natural	19,97	15,84	14,98	15,12	9,98	75,89
Brita 0 Reciclada	–	5,28	4,99	5,04	9,98	25,30

4.3.2 Processo produtivo

Após definir o consumo de cada material, os mesmos foram pesados em balança eletrônica da marca Toledo, modelo 2098 com capacidade para 300 kg; conforme ilustra a Figura 4.9.



Figura 4.9 – Balança utilizada na pesquisa

Após pesagem os materiais foram misturados em uma betoneira modelo BTF-130CMM, da marca Fischer, com capacidade para 130 litros; conforme ilustra a Figura 4.10. A ordem de colocação dos materiais na

betoneira faz diferença, principalmente no caso dos agregados reciclados que apresentam maior taxa de absorção. A tabela 4.13 traz essa sequência adotada durante a pesquisa, e os tempos de mistura.



Figura 4.10 – Betoneira utilizada na pesquisa

Tabela 4.13 – Sequência dos materiais na betoneira e tempo de mistura

Lançamento	Materiais	Tempo de mistura
1º	Agregado graúdo + Parte da água	1 minuto
2º	Cimento + Agregado miúdo	1 minuto
3º	Restante da Água	2 minutos

4.3.3 Estado Fresco

Nesta fase, as relações água/cimento foram efetivadas através da consistência requerida, adotada em relação ao traço piloto no valor de 40 ± 10 mm. Este ensaio seguiu os procedimentos da NBR NM 67 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998), conforme ilustra a Figura 4.11. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.14.



(1)

(2)

(3)

Figura 4.11 – Procedimentos do Ensaio para Determinação da Consistência

Tabela 4.14 – Relação água/cimento efetiva

Materiais	Teor de substituição de reciclado por natural				
	Piloto	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
	0%	25%	25%	25%	50%
Relação a/c efetiva	0,58	0,52	0,60	0,64	0,62
Índice de consistência (mm)	40	50	40	40	40

Ainda no estado fresco foi determinado a massa específica do betão para cada teor, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 9833 – Betão fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009). Os resultados deste ensaio estão expressos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Massa Específica do Betão

Materiais	Teor de substituição de reciclado por natural				
	Piloto	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
	0%	25%	25%	25%	50%
Massa do molde vazio (kg)	2,584	2,584	2,584	2,584	2,584
Massa do molde cheio (kg)	9,880	9,740	9,640	9,760	9,580

Materiais	Teor de substituição de reciclado por natural				
	Piloto	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
	0%	25%	25%	25%	50%
Massa do betão (kg)	7,296	7,156	7,056	7,176	6,996
Volume do molde (L)	3,055	3,055	3,055	3,055	3,055
Massa específica (kg/L)	2,390	2,340	2,310	2,350	2,290
Massa específica (kg/m ³)	2390	2340	2310	2350	2290

Após ensaios no estado fresco, os provetes foram moldados e curados de acordo com os procedimentos da NBR 5738 – Betão – Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), conforme ilustra a Figura 4.12.



Figura 4.12 – Moldagem e Cura dos provetes

4.3.4 Estado Endurecido

No estado endurecido do betão, primeiramente foi realizado o ensaio de ultrassom de acordo com os procedimentos da NBR 8802 – Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007). Os resultados obtidos aos 7 e 28 dias encontram-se respectivamente nas Tabelas 4.16 e 4.7.

Tabela 4.16 – Propagação Ultrassônica aos 7 dias

Traço	Corpo Prova Nº	Massa Específica (kg/m ³)	Altura (cm)	Tempo Percurso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Coef. Poisson	Módulo Elasticid. Dinâmico (GN/m ²)
Traço Piloto	28	2390	20	43,8	4566	0,2	44,8
	29			43,8	4566		44,8
	30			43,3	4618		45,8
Traço 1 (25%)	4	2340	20	43,7	4576	0,2	44,0
	5			43,4	4608		44,7
	6			44,5	4494		42,5
Traço 2 (25%)	10	2310	20	46,0	4347	0,2	39,2
	11			46,8	4273		37,9
	12			46,6	4291		38,2
Traço 3 (25%)	16	2350	20	46,8	4273	0,2	38,6
	17			46,0	4347		39,9
	18			45,2	4420		41,3
Traço 4 (50%)	22	2290	20	47,7	4192	0,2	36,2
	23			46,8	4273		37,6
	24			47,3	4228		36,8

Tabela 4.17 – Propagação Ultrassônica aos 28 dias

Traço	Corpo Prova Nº	Massa Específica (kg/m ³)	Altura (cm)	Tempo Percurso da Onda (µs)	Velocidade (m/s)	Coef. Poisson	Módulo Elasticid. Dinâmico (GN/m ²)
Traço Piloto	25	2390	20	41,9	4773	0,2	48,9
	26			41,7	4796		49,4
	27			42,7	4683		47,1
Traço 1 (25%)	1	2340	20	44,5	4494	0,2	42,5
	2			43,4	4608		44,7
	3			43,6	4587		44,3
Traço 2 (25%)	7	2310	20	45,8	4366	0,2	39,6
	8			45,4	4405		40,3
	9			46,6	4291		38,2

Traço	Corpo Prova Nº	Massa Específica (kg/m³)	Altura (cm)	Tempo Percorso da Onda (µs)	Velocidad e (m/s)	Coef. Poison	Módulo Elasticid. Dinâmico (GN/m²)
Traço 3 (25%)	13	2350	20	44,5	4494	0,2	41,9
	14			45,5	4395		40,1
	15			45,4	4405		40,3
Traço 4 (50%)	19	2290	20	45,4	4405	0,2	39,9
	20			45,1	4434		40,5
	21			45,5	4395		39,8

Após este ensaio não destrutivo, os provetes foram submetidos ao ensaio destrutivo de compressão axial. Este ensaio foi executado de acordo com os procedimentos da NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007), os quais podem ser visualizados na Figura 4.13. Os resultados obtidos aos 7 e 28 dias encontram-se respectivamente nas Tabelas 4.18 e 4.19.



(1)



(2)



(3)



(4)

(5)

(6)

Figura 4.13 – Procedimentos do Ensaio de Compressão Axial

Tabela 4.18 – Resistência à compressão aos 7 dias

Traço	Corpo de Prova Nº	Diâmetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à Compressão	
					kgf/cm ²	MPa
Traço Piloto	28	10,02	78,85	14110	178,94	17,5
	29	10,04	79,17	10730	135,53	13,3
	30	10,03	79,01	12980	164,28	16,1
Traço 1 (25%)	4	10,01	78,70	16380	208,14	20,4
	5	10,03	79,01	13950	176,56	17,3
	6	10,07	79,64	14450	181,43	17,8
Traço 2 (25%)	10	10,00	78,54	11160	142,09	13,9
	11	10,04	79,17	12170	153,72	15,1
	12	10,01	78,70	11500	146,13	14,3
Traço 3 (25%)	16	10,04	79,17	11500	145,26	14,2
	17	10,02	78,85	10730	136,07	13,3
	18	10,02	78,85	10180	120,10	12,7
Traço 4 (50%)	22	10,01	78,70	10650	135,33	13,3
	23	10,07	79,64	10820	135,86	13,3
	24	10,03	79,01	11110	140,61	13,8

Tabela 4.19 – Resistência à compressão aos 28 dias

Traço	Corpo de Prova	Nº	Diâmetro (cm)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência à compressão	
						kgf/cm ²	MPa
Traço Piloto	25		10,02	78,85	22600	286,60	28,1
	26		10,02	78,85	21600	273,92	26,9
	27		10,00	78,54	22300	283,93	27,8
Traço 1 (25%)	1		10,05	79,33	25500	321,45	31,5
	2		10,00	78,54	25200	320,86	31,5
	3		10,03	79,01	29100	368,30	36,1
Traço 2 (25%)	7		10,02	78,85	21900	277,73	27,2
	8		10,02	78,85	20500	259,97	25,5
	9		9,99	78,38	19200	244,95	24,0
Traço 3 (25%)	13		9,98	78,23	20900	267,17	26,2
	14		10,02	78,85	17400	220,66	21,6
	15		10,03	79,01	20200	255,66	25,1
Traço 4 (50%)	19		10,02	78,85	20700	262,51	25,7
	20		10,07	79,64	19200	241,08	23,6
	21		10,04	79,17	22600	285,46	28,0

O módulo de deformação foi analisado aos 28 dias, de acordo com os procedimentos da NBR 8522 – Concreto – Determinação do Módulo Estático de Elasticidade à Compressão (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008). Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Módulo de Elasticidade aos 28 dias

Traço	Corpo de Prova Nº	Módulo de Elasticidade (Esec)	
		kgf/cm ²	GPa
Traço Piloto	26	507265	50,73
	27	346755	34,68
Traço 1 (25%)	2	281656	28,17
	3	324180	32,42
Traço 2 (25%)	8	257790	25,78
	9	336591	33,66
Traço 3 (25%)	14	311756	31,18
	15	339420	33,94
Traço 4 (50%)	20	316629	31,66
	21	311747	31,17

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos serão analisados comparativamente através de gráficos e tabelas. Como a percentagem permitida de agregado reciclado, utilizada na dosagem de betões, foi retirada da Especificação E 471:2009, é necessário confrontar os resultados obtidos com os valores permitidos.

5.1 GRANULOMETRIA

A análise granulométrica visa classificar as partículas de uma amostra, pelo respectivo tamanho. A classificação granulométrica é determinada comparando sua composição com as faixas granulométricas especificadas em normas.

5.1.1 Agregado miúdo

A única propriedade física dos agregados miúdos analisada foi a granulometria. A distribuição granulométrica deve atender aos limites estabelecidos pela NBR 7211, valores expressos na Tabela 5.1. As curvas granulométricas com tais limites encontram-se na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211, 2005, pg.5).

Peneiro com abertura de malha	Percentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites superiores	
	Zona Utilizável	Zona ótima	Zona Utilizável	Zona ótima
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 μ m	15	35	55	70

Peneiro com abertura de malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites superiores	
	Zona Utilizável	Zona ótima	Zona Utilizável	Zona ótima
300 μ m	50	65	85	95
150 μ m	85	90	95	100

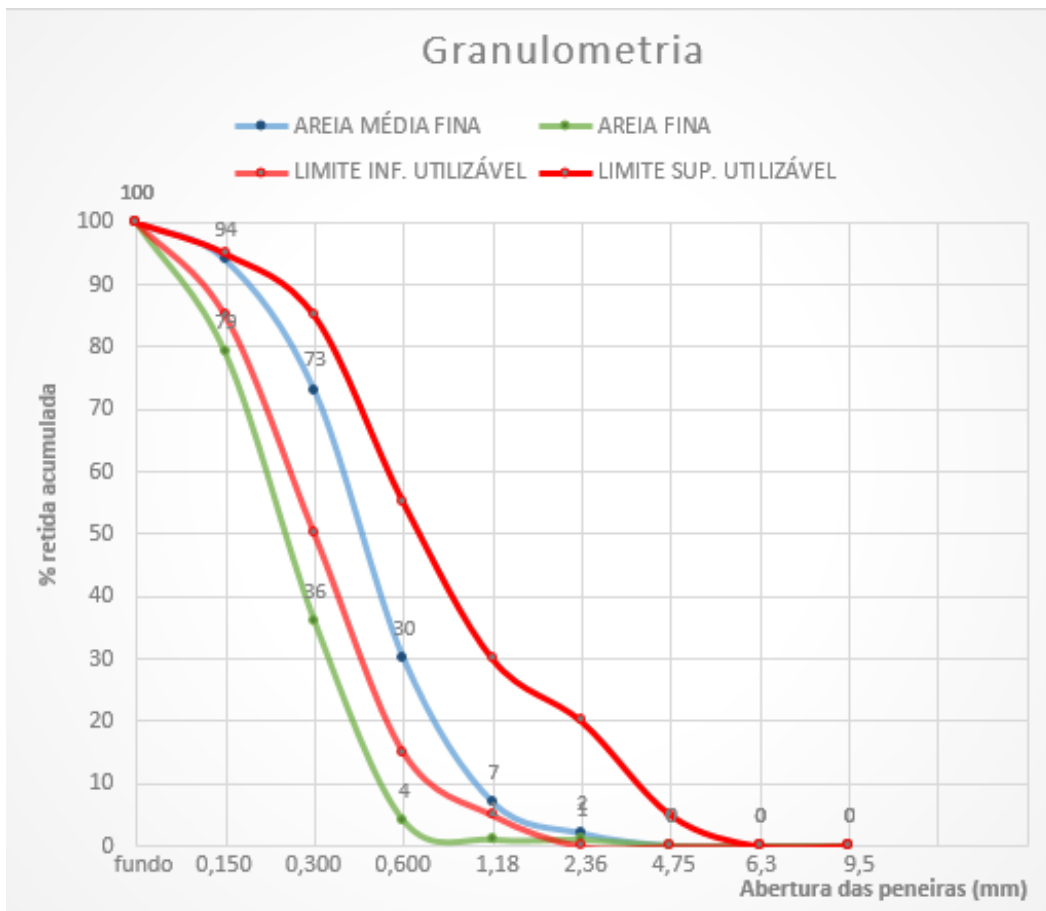


Figura 5.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado e seus limites

De acordo com a curva granulométrica, a areia média fina encontra-se na zona ótima. A areia fina, está abaixo dos limites inferiores utilizáveis, devido a grande quantidade de material fino, tal fato é comprovado pelo valor da dimensão máxima característica, igual a 0,600 mm.

5.1.2 Agregado graúdo

A NBR 7211 também estabelece limites para os agregados graúdos. Deste modo, os resultados obtidos no ensaio de granulometria devem atender os limites expressos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo (NBR 7211, 2005, pg.5).

Peneiro com abertura de malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15	65 – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 – 65	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15	80 - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 – 65	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

Pelo traçado das curvas granulométricas dos agregados graúdos utilizados na pesquisa, apresentadas na Figura 5.2, nota-se uma redução das partículas do agregado reciclado quando comparado com o natural. Tal fato é comprovado pela dimensão máxima característica, enquanto a brita natural apresenta um valor de 25 mm a reciclada apresenta um valor de 9,5 mm. A tipo de britador e a abertura de sua mandíbula é que já condicionar o tamanho das partículas. Mesmo apresentando dimensões pequenas, este material é considerado graúdo uma vez que 40% permanece retido na peneira 6,3 mm; sendo assim é classificado como Brita 0.

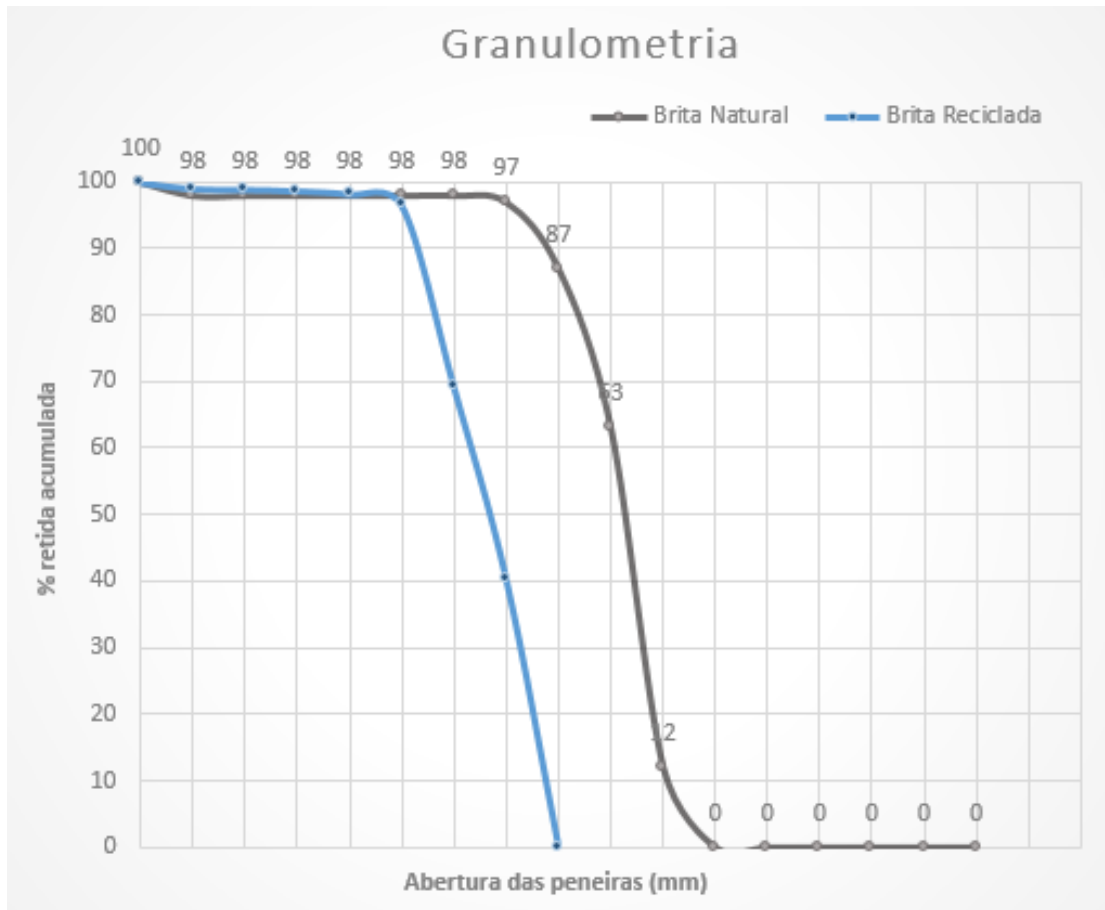


Figura 5.2 – Curva granulométrica dos agregados graúdos utilizados

5.2 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para dosagem do concreto é importante conhecer o volume ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros. Portanto, é necessário determinar a massa específica, definida como a massa do material por unidade de volume. Relacionada indiretamente à porosidade, quanto maior o índice de vazios presentes nas partículas, menor sua massa específica.

Gonçalves (2000) obteve valores de massa específica até 10% menores para o material reciclado. O resultado obtido, nesta pesquisa, para massa específica foi de 2180 kg/m³. Este valor encontra-se fora do limite estabelecido pela E 471:2009, para utilização em betões estruturais. A Norma brasileira não estabelece valores mínimos, uma vez que seu uso não é exigente. Tais limites encontram-se resumidos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Requisitos para Massa Específica

Propriedades	NBR 15116	E 471	Ensaio
	ARC	ARB 1 e ARB 2	
Massa Específica (kg/m ³)	-	≥ 2200	2180

O valor obtido, pode ser explicado devido a dimensão das partículas do ARB utilizado. Segundo Gómez Soberon (2002, apud Buttler 2003, p.130), o aumento da massa específica é proporcional ao tamanho da partícula.

A absorção de água é outra propriedade influenciada pela porosidade. Os valores para esta propriedade são maiores nos agregados reciclados, quando comparados com os agregados naturais.

Em seu estudo experimental, Buttler (2003) observou que nos primeiros 10 minutos de imersão dos agregados, 88% da água total foi absorvida pelos agregados reciclados. Esta elevada absorção condiciona uma perda de trabalhabilidade no concreto fresco., por isso deve ser prevista.

A taxa de absorção de água encontrada para o ARB estudado, foi de 5,1%. Este valor encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela E 471:2009, para utilização em betões estruturais. A Norma brasileira limita ao mesmo valor, porém não permite sua aplicação em betões estruturais. Tais limites encontram-se resumidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Requisitos para Absorção de Água

Propriedades	NBR 15116	E 471	Ensaio
	ARC	ARB 1 e ARB 2	
Absorção de água (%)	≤ 7%	≤ 7%	≤ 5,1%

Gonçalves (2000) encontrou resultados muito próximos aos obtidos por esta pesquisa. Para o agregado graúdo reciclado, a taxa de absorção de água foi 4,9%. Segundo Buttler (2003), essa propriedade pode assumir valores significativos de acordo com o tempo de cura do resíduo de betão, quanto maior for o período de cura, maior o grau de hidratação.

5.3 MATERIAL PULVERULENTO

Material pulverulento é o pó que envolve os grãos ou acompanha o agregado sendo constituído por partículas inferiores a 0,075 mm. Este pó é prejudicial na aderência entre agregado e pasta aglomerante, exigindo maior quantidade de água e consequentemente reduzindo a resistência.

O teor de material pulverulento obtido no ensaio foi de 6,9%. Este valor encontra-se fora do limite estabelecido pela E 471:2009. A Norma brasileira é mais permissiva, aceitando valores até 10%. Essa discrepância de limites estabelecidos, deve-se às diferentes aplicabilidades. A nível estrutural, as exigências devem ser maiores. Os limites encontram-se resumidos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Requisitos para Material Pulverulento

Propriedades	NBR 15116	E 471	Ensaio
	ARC	ARB 1 e ARB 2	
Teor de material passante na malha 75 μm (%)	$\leq 10\%$	$\leq 4\%$	6,9%

5.4 BETÃO NO ESTADO FRESCO

5.4.1 Relação água/cimento

Algumas características do AR, analisadas anteriormente, como a porosidade devido à argamassa aderida e a grande quantidade de material pulverulento, influenciam na quantidade de água absorvida. O aumento na relação água/cimento afeta a trabalhabilidade do concreto, e conseqüentemente reduz sua resistência. Estas características presentes no ARB utilizado, foram comprovadas pelo aumento, significativo, da relação água/cimento.

Adotada como parâmetro para comparação de dosagens diferentes, a trabalhabilidade obtida para o concreto referência (40 \pm 10) mm foi adotada para as demais dosagens. Para alcançar tal objetivo, houve uma correção da relação água/cimento. Essa correção chegou a um aumento de até 19%, caso ela não houvesse, ocorreria uma grande perda de consistência. Nos piores casos, como no Traço I, esta percentagem elevada pode ser atribuída ao baixo consumo de cimento deste traço, além das características do ARB analisadas anteriormente. No caso do Traço IV, este aumento pode ser explicado pela maior percentagem de ARB incorporado ao traço, ultrapassando os 25% permitidos pela E 471 e chegando aos 50%. Os dados dessa análise estão expostos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Aumento na relação água/cimento

	Piloto	Traço I	Traço II	Traço III	Traço IV
Relação a/c estimada	0,52	0,44	0,52	0,6	0,52
Relação a/c efetiva	0,58	0,52	0,6	0,64	0,62
Aumento relação a/c	11,5%	18,2%	15,4%	6,7%	19,2%

Em sua pesquisa, Buttler (2003) também corrige a relação água/cimento para que não haja perda de consistência. Ele atribui esse aumento à grande absorção de água pelos agregados, cerca de três vezes maior nos dez primeiros minutos. Essa água que daria a trabalhabilidade a mistura.

5.4.2 Massa Específica

A grande quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado reciclado o torna menos denso quando comparado aos naturais. Segundo Buttler (2003) essa característica influencia negativamente o betão, ocasionando redução na sua massa específica.

Os concretos reciclados apresentaram valores semelhantes ao concreto referência (Traço Piloto). Estes valores estão expressos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Redução da Massa Específica do Betão

Materiais	Teor de substituição de reciclado por natural				
	Piloto	Traço I	Traço II	Traço III	Traço IV
	0%	25%	25%	25%	50%
Massa específica (kg/m ³)	2390	2340	2310	2350	2290
Redução	Referência	2,1%	3,3%	1,7%	4,2%

O menor valor encontrado para massa específica do betão, foi de 2290 kg/m³. Este valor representa uma redução de 4% em relação a massa específica do Traço Piloto. Golçalves (2000) obteve mesmas percentagens de redução, utilizando a fração graúda reciclada. Buttler (2003) encontrou valores muito similares, em média 5% menor que a massa específica do concreto natural.

De acordo com a NBR 8953 - Betão para fins Estruturais – Classificação por grupos de resistência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), os betões normais apresentam massa específica seca entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³. Baseado nesta definição, todas as dosagens podem ser classificadas como betões normais.

5.5 BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

5.5.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade são propriedades inter-relacionadas, muito influenciadas pela porosidade. Buttler (2003) afirma que a porosidade da matriz e a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo, determinam a característica de resistência dos concretos normais.

Para os resultados obtidos no ensaio de compressão, foram calculados as resistências médias à compressão, aos 7 e 28 dias, levando em consideração o desvio padrão das amostras. Os resultados estão expressos nas Tabelas 5.8 e 5.9, e o gráfico pode ser visualizado na Figura 5.3.

Tabela 5.8 – Resistência Média aos 7 dias

TRAÇO	RESISTÊNCIA 7 DIAS (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO	NOVA RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)
PILOTO	17,5	15,6	2,17	16,8
	13,3			
	16,1			
TRAÇO I	20,4	18,5	1,67	17,6
	17,3			
	17,8			
TRAÇO II	13,9	14,4	0,58	14,1
	15,1			
	14,3			
TRAÇO III	14,2	13,4	0,79	13,4
	13,3			
	12,7			
TRAÇO IV	13,3	13,5	0,29	13,5
	13,3			
	13,8			

Tabela 5.9 – Resistência Média aos 28 dias

TRAÇO	RESISTÊNCIA 28 DIAS (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO	NOVA RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)
PILOTO	28,1	27,6	0,66	28,0
	26,9			
	27,8			
TRAÇO I	31,5	33,0	2,67	31,5
	31,5			
	36,1			
TRAÇO II	27,2	25,6	1,61	25,6
	25,5			
	24,0			
TRAÇO III	26,2	24,3	2,38	25,6
	21,6			
	25,1			
TRAÇO IV	25,7	25,8	2,18	25,8
	23,6			
	28,0			

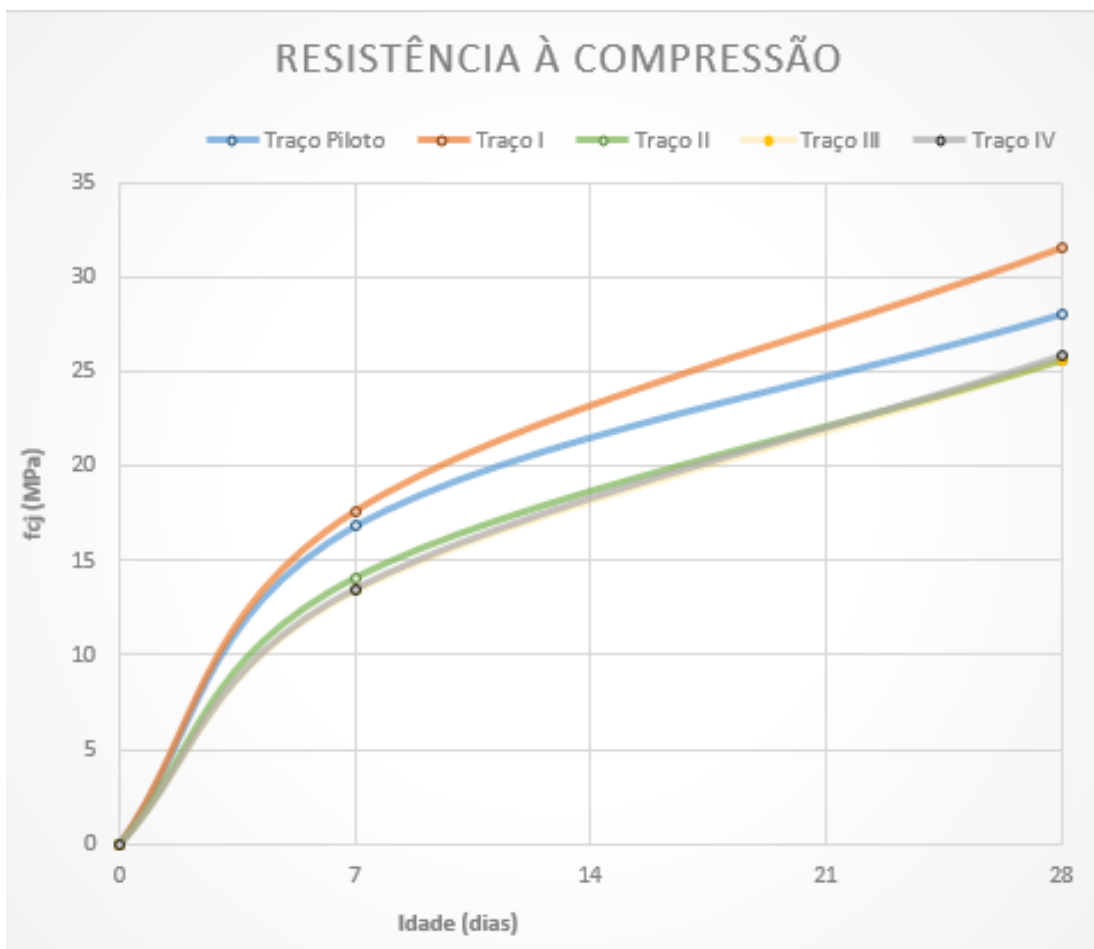


Figura 5.3 – Gráfico de resistência à compressão para 5 dosagens

Analisando os resultados, observa-se que apenas o concreto reciclado Traço I apresentou resistência à compressão superior à obtida para o Traço Piloto, em aproximadamente 11%. As demais dosagens apresentaram resistência à compressão inferior a obtida pelo concreto referência. Essa percentagem de redução ou melhoria podem ser observadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Redução ou melhoria das Resistências Médias aos 28 dias

Traço	Redução aos 28 DIAS (%)	Teor Substituição (%)
Traço I	+11	25%
Traço II	-8,6	25%
Traço III	-8,6	25%
Traço IV	-7,9	50%

Os valores obtidos estão dentro dos limites encontrados por Vázquez (2006, apud Gonçalves, 2007, p.3.9) entre 2 e 15%, para uma taxa de substituição de até 50% de agregados graúdos.

Nos resultados de Buttler (2003), ao substituir a fração graúda do agregado natural pelo reciclado de betão, apenas 1 dosagem encontrou-se abaixo do concreto referência. O betão originário do AR, utilizado nesta dosagem, não foi adensado e possuía alto índice de vazios, tais características explicam essa redução na resistência do betão. A maior relação água/cimento utilizada na dosagem, pode ter provocado a mobilização de água do AR para a pasta, aumentando a porosidade na zona de transição e consequentemente reduzindo a resistência. Para as demais dosagens, que apresentaram resultados superiores ao concreto referência, há dois possíveis justificativas: a grande quantidade de partículas de cimento não hidratadas aderidas à superfície do agregado acabam se hidratando na nova mistura com agregados reciclados, e logo após o endurecimento, pode ocorrer a migração da água do agregado para a pasta, deste modo a presença da água no interior do agregado promoverá um cura interna na zona de transição, melhorando suas propriedades.

5.5.2 Módulo de Elasticidade

A porosidade do agregado graúdo é uma das propriedades que mais influencia o módulo de deformação do betão. Segundo Buttler (2003) é a porosidade do agregado que determina sua rigidez, ou seja, sua capacidade de limitar deformações na matriz. Sendo assim, quanto maior a porosidade, menor módulo de deformação. Os resultados do módulo de deformação aos 28 dias, encontram-se na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Redução do Módulo de Elasticidade aos 28 dias

Traço	Módulo de Elasticidade (Esec)	Média Módulo de Elasticidade	Desvio Padrão	Nova Média do Módulo de Elasticidade	Redução %
	GPa	Gpa		GPa	
Traço Piloto	50,73 34,68	42,71	11,35	34,68	Referência
Traço 1 (25%)	28,17 32,42	30,30	3,00	30,30	12,6
Traço 2 (25%)	25,78 33,66	29,72	5,57	29,72	14,3
Traço 3 (25%)	31,18 33,94	32,56	1,95	32,56	6,1
Traço 4 (50%)	31,66 31,17	31,41	0,35	31,41	9,4

Analisando os resultados, todas as dosagens permaneceram abaixo do concreto referência, apresentando uma redução média de 11% no módulo de deformação do betão reciclado em relação ao natural. Esses

CAPÍTULO 5

valores foram os mesmos encontrados por Gonçalves (2000) ao utilizar a fração graúda do agregado reciclado.

Apesar da maior resistência à compressão do Traço I, o que deveria conduzir a um maior módulo de elasticidades, ocorreu uma redução de aproximadamente 13%, tal fato pode ser explicado pela menor consumo de cimento. O Traço III, considerado o traço mais “rico” em cimento, apresentou o maior valor para as dosagens.

Buttler (2003) encontrou uma redução do módulo de elasticidade de até 22%, para betões fabricados com resíduos de betão curados a 28 dias. Essa redução caiu significativamente, quando os resíduos foram curados apenas por 1 dia e apresentavam menor porosidade.

6 CONCLUSÃO

As conclusões obtidas nesse trabalho foram satisfatórias e houve um consenso referente algumas propriedades.

Baseando-se nos objetivos principais deste trabalho, como identificar a composição e outras propriedades dos agregados reciclados, permitindo uma avaliação do desempenho da fração graúda na fabricação de betões, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- a) As propriedades encontradas para o agregado reciclado estudado, convergem com os estudos encontrados na revisão da literatura.
- b) Os resultados da resistência mecânica do betão com agregado reciclado foram satisfatórios, mesmo não cumprindo aos requisitos da E 471. Tal fato pode ser explicado devido a uma quantidade de cimento extra, incorporada no próprio ARC, adicionada aos traços e não previstas. Deste modo, as resistências ficaram próximas do traço piloto.
- c) Na produção de betões, para uma substituição parcial de 25% até 50%, a resistência característica à compressão resultou uma redução de menos de 10%, apresentando resultados satisfatórios e positivos quanto a sua utilização.
- d) A substituição do agregado natural pelo agregado reciclado é possível desde que haja caracterização física dos agregados para o controle da qualidade. Suas propriedades permitem prever seu comportamento e avaliar seu desempenho.

Diante desses resultados, é possível afirmar que os agregados reciclados de betão possuem grande potencial para serem utilizados, pois trata-se de um material de melhor qualidade que os agregados reciclados mistos. Porém como este material é heterogêneo, e não há uma padronização do RCC (matéria-prima para fabricação do agregado) e nem do seu beneficiamento, suas características e propriedades acabam sendo afetadas. Por estes motivos que a norma brasileira NBR 15116 não prevê a utilização do ARC utilização para a fins mais exigentes.

Em pesquisas futuras, poderão ser abordados os seguintes temas:

- a) Desenvolvimento de técnicas de separação do resíduo de construção civil, na própria fonte geradora;

CAPÍTULO 6

- b) Desenvolvimento de regulamentação para padronizar o processamento do RCC, estabelecendo limites e formas para granulometria;
- c) Melhorar as técnicas de construção existentes, e desenvolver novas técnicas para reduzir a quantidade de RCC gerados;
- d) Estudo da resistência de elementos estruturais, fabricados com betões de agregados reciclados de betão, ao invés de corpos de prova.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO BRASIL: 1986-2008. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 9, n. 1, Não jan/ma. 2009. Trimestral.

INFLUÊNCIA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO. Goiânia: Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 11, n. 1, dez 2015 – jun 2016. Semestral.

ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos. São Paulo, 2005. 167 f. Teses (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S.C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Araújo, D.L;

Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON). São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). NBR 7211: Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 7219: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 9833: Concreto Fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). NBR. 5732 – Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). NBR. 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). NBR.7223: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, ABNT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). NBR. 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). NBR. 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). NBR. 5739: Concreto-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1996). NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, ABNT.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008). NBR. 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade á compressão. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2011). NBR. 9935: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, ABNT.

Brasil. Resolução CONAMA Nº 307/2002 - Data da legislação: 05/07/2002 - Publicação DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96

Brasil. Resolução CONAMA Nº 307/2002 - Data da legislação: 05/07/2002 - Publicação DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96

Brasil. Resolução CONAMA Nº 308/2002 - Data da legislação: 21/03/2002 - Publicação DOU de 29/07/2002.

- BUTTLER, Alexandre Marques. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 2003. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- CARRIJO, P. M. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. São Paulo: USP, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.
- FOCCUS Gerenciamento de Resíduos. São Paulo, 2011. Usina de reciclagem de agregados. Disponível em: < <http://foccus.com.br/>> .
- GONÇALVES R. D. C. Agregados reciclados de resíduos de concreto - um novo material para dosagens estruturais. Dissertação mestrado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. (2000).
- HANSEN T. C. RILEM Report 6 Recycling of Demolished Concrete and Masonry, London, E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992. 305p.
- HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate Concrete International- Design and Construction, 5 n.1 p. 79-83,1983.
- HJ Crusher, Britador de mandíbula. Disponível em: < <http://www.hjcrusher.com.pt/2-jaw-crusher-1.html>>. Acesso em 20 de Setembro de 2016.
- INFLUÊNCIA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO. Goiânia: Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 11, n. 1, dez 2015 – jun 2016. Semestral.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (2009). E 471: Guia para utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos. Portugal, LNEC.
- LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto alegre. Tese de doutorado em engenharia civil, programa de pós graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- LEITE, F. C., Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 2007.
- LEVY, S. M. Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PORTAL METALICA. Construção Civil. Britadores e moinhos. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/artigos-tecnicos/britadores-e-moinhos>>. Acesso em 27 de abril de 2016.

PROGUARU S/A PROGRESSO E DESENVOLVIMENTO DE GUARULHOS. Usina de reciclagem de resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.proguaru.com.br/site/recicladora>>. Acessado em: 2016.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. Manual sobre os resíduos sólidos da construção civil. 2001. Disponível em: <<http://www.sinduscon-ce.org/ce/downloads/pqvc/Manual-de-Gestao-de-Residuos-Solidos.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2014.

VIEIRA, Geilma L; MOLIN, Deise C.C. dal; LIMA, Fávio B de. Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição. Maceió, n. 19, p.5-18, 2004.

URBEM Tecnologia Ambiental. São Bernardo do Campo, 2012. Usina de reciclagem de agregados. Disponível em: < <http://www.urbem.com.br/principal.htm>>.