

**Universidade Federal
do Pará**



Paulo Loureiro Bitencourt

**Agregados graúdos reciclados de
concreto aplicados em concretos
estruturais**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Mestrado Profissional em Processos Construtivos
e Saneamento Urbano

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza
Picanço.

Belém – Pará – Brasil
2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS CONSTRUTIVOS E
SANEAMENTO URBANO**

**AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO APLICADOS EM
CONCRETOS ESTRUTURAIS**

PAULO LOUREIRO BITENCOURT

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Mestrado Profissional
em Processos Construtivos e
Saneamento Urbano da Universidade
Federal do Pará como requisito para a
obtenção do grau de Mestre.

Belém/Pará
2015

**AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO APLICADOS EM
CONCRETOS ESTRUTURAIIS**

PAULO LOUREIRO BITENCOURT

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, área de concentração Estruturas, Construção Civil e Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano (PPCS) do Instituto de Tecnologia (ITEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Aprovada em 24 de Fevereiro de 2016.

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, D.Sc. – Coordenador do PPCS

Marcelo de Souza Picanço, Dr. – Professor Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Adelson Bezerra de Medeiros, Dr. – UFPA
(Examinador Externo)

Bernardo Borges Pompeu Neto, Dr. - UFPA
(Examinador Interno)

Belém/Pará
Fevereiro de 2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus pela oportunidade concedida. Também dedico a todos os meus familiares, em especial aos meus pais (Nazareno e Conceição), à minha querida esposa (Rosely) e meus filhos (Lucas e Maria), pelo amor, paciência, compreensão, apoio e incentivo incondicional em todos os momentos difíceis durante a elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Dr. Marcelo de Souza Picanço pela paciência, experiência e conhecimentos transmitidos durante a orientação deste trabalho científico.

Aos professores da Universidade Federal do Pará, sobretudo aos que ministraram o curso de Mestrado Profissional na cidade de Macapá-AP.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, Joel Martins e Emanuel Garcez (Maneca) pelo apoio concedido durante a realização dos ensaios de laboratório.

Ao meu querido tio Eder (in memória), por todas as alegrias compartilhadas, por sua imensa generosidade com o próximo, por ter me ensinado a cultivar as velhas e conquistar as novas amizades e acima de tudo por ter me ensinado a acreditar sempre na perspectiva da vinda de dias melhores. Qualquer dia desses iremos nos encontrar novamente e então poderei lhe dar um abraço forte e dizer: muito obrigado por tudo.

RESUMO

BITENCOURT, P. L. Agregados graúdos reciclados de concreto aplicados em concretos estruturais . 2016 . Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos e Saneamento Urbano) – Programa de Mestrado Profissional, UFPA, Belém-PA.

Os resíduos de construção civil (RCC) constituem-se num problema ambiental generalizado e de ampla discussão em todo mundo. Em 2014 no Brasil, foram produzidos aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, dos quais cerca de 60% estima-se ser de resíduo de construção civil. Uma forma viável de se mitigar os impactos ambientais decorrentes tanto da disposição irregular desses resíduos sobre o meio ambiente, quanto da exploração crescente e indiscriminada de jazidas naturais, é o seu reaproveitamento na forma de agregados reciclados. O reaproveitamento dos (RCC) na forma de agregados reciclados, demonstram perspectivas viáveis do ponto de vista técnico e ambiental. E nesta perspectiva encontram-se inseridos os resíduos de concreto, pois apresentam um dos maiores potenciais de reutilização, devido sua maior homogeneidade e menor grau de contaminação por outros tipos de resíduos. No Brasil, as pesquisas sobre o reaproveitamento dos resíduos de concreto para produção de concretos estruturais são relativamente recentes, sendo consideradas ainda bastante restritas seu campo de aplicação. Neste sentido, torna-se cada vez mais importante conhecer as características físicas, bem como as propriedades mecânicas dos concretos produzidos a partir desses resíduos com o objetivo de viabilizar sua utilização. Neste contexto, este trabalho apresenta o uso de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) aplicados em concretos estruturais, tendo como objetivo avaliar as características físicas, bem como a influência da incorporação desse tipo de agregado nas propriedades mecânicas de consistência, resistência a compressão e módulo de elasticidade de novos concretos reciclados. Para tanto foram produzidos concretos utilizando-se dosagem pelo método IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992), com traço intermediário de (1:5) fixo, onde foram realizadas cinco misturas, uma com 100% de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) e mais três admitindo teores de substituição de 10%, 20% e 30% de (AGRC) na condição totalmente seca, por agregado graúdo natural (AGN), sendo todas as misturas comparadas com uma mistura de referência contendo 100% de (AGN). Para a obtenção dos resultados esperados, o programa experimental foi dividido em 4 etapas. Nas etapas iniciais foram realizadas a seleção, caracterização física dos materiais, bem como os procedimentos de dosagem, produção, moldagem e cura dos concretos, com a determinação de consistência dos concretos no estado fresco. Nas etapas finais foram realizados nos concretos no estado endurecido os ensaios mecânicos de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias e módulo de elasticidade estático aos 28 dias. Dos resultados constatou-se que os concretos que utilizaram (AGRC) apresentaram resistência à compressão simples menores que o concreto de referência. Entretanto, em comparação com o concreto totalmente reciclado, na medida em que foram crescendo os teores de substituição de (AGRC) por (AGN), observou-se tendência de crescimento de resistência à compressão dos concretos, com acréscimos máximos registrados de 51,54% aos 7 dias e de 27,69% aos 28 dias, ambos para o concreto com teor de substituição de 30%. Quanto ao módulo de elasticidade foi possível observar também que todos os concretos que utilizaram (AGRC) apresentaram módulo de elasticidade inferiores ao concreto de referência. Entretanto, em comparação com o concreto totalmente reciclado, na medida em que foram crescendo os teores de substituição de (AGRC) por (AGN), observou-se tendência de crescimento do módulo de elasticidade dos concretos, com crescimento máximo registrado de 13% aos 28 dias para o concreto com teor de substituição de 30%. Pela análise dos resultados obtidos, considerando as condições de dosagens e as características físicas dos agregados reciclados utilizados, concluiu-se que a partir dos teores de substituição de 20% e 30% de substituição de (AGRC) por (AGN), torna-se possível produzir concretos estruturais com resistência à compressão e módulo de elasticidade em condições satisfatórias.

Palavra-chave: concreto, reciclagem, agregado reciclado, agregado graúdo reciclado de concreto.

ABSTRACT

BITENCOURT, P. L. Recycled coarse aggregate concrete (AGRC) applied in structural concrete. 2016. Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos e Saneamento Urbano) – Programa de Mestrado Profissional, UFPA, Belém-PA.

Civil construction waste (RCC) is a generalized environmental issue widely discussed worldwide. In 2014, around 45 million tons of urban solid waste were produced in Brazil, of which approximately 60% derived from civil construction waste. A workable way to mitigate the environmental impact caused by both irregular disposal of this kind of waste on environment and increasing and indiscriminate exploration of natural deposits, is reusing it as recycled aggregates. Reusing RCC as recycled aggregates show viable perspectives from technical and environmental point of view. In this perspective are inserted the concrete wastes, once they present one of the biggest reusing potential, due to their bigger homogeneity and lower degree of contamination by other kind of waste. In Brazil, researches about reuse of concrete wastes to produce structural concrete are relatively recent, thus still being considered restrict to their application field. In this context, it becomes increasingly important to know the physical characteristics, as well as mechanical properties of the concrete produced from this waste, aiming to enable its use. Thus, the present study presents the use of recycled coarse aggregate concrete (AGRC) applied in structural concrete, with the objective to evaluate both physical characteristics and influence of incorporation of this kind of aggregate in mechanical properties of consistency, compression strength and modulus of elasticity of new recycled concrete. For this purpose, concrete was produced by means of dosage by IPT/ EPUSP method (Helene e Terzian, 1992), with trace intermediate of (1:5) fixed, in which were performed five mixtures, one with 100% of recycled coarse aggregate concrete (AGRC) and three left admitting replacement levels of 10%, 20% and 30% of AGRC in totally dry condition by natural coarse aggregate (AGN), with all mixtures compared to one reference mixture containing 100% of AGN. To obtain the expected results, the experimental program was divided into 4 steps. In the early stages, selection, physical characterization of materials, as well as dosage, production, casting and concrete curing procedures were performed, determining the consistency of fresh concrete. In the late stages, mechanical essays of compression strength on hardened state concrete were performed at days 7 and 28 and modulus of elasticity was performed at day 28. From the results, it was observed that concretes that used AGRC presented lower compression strength than reference concrete. However, in comparison to totally recycled concrete, according to the increase of replacement levels from AGRC to AGN, it was observed a growth trend on concrete compression strength, with registered maximum increases of 51,54% at day 7 and 27,69% at day 28, both to the concrete with replacement level of 30%. Regarding to modulus of elasticity, it was also possible to observe that every concrete which used AGRC presented modulus of elasticity lower than reference concrete. Meantime, in comparison to totally recycled concrete, according to the increase of replacement levels from AGRC to AGN, it was observed a growth trend on concrete modulus of elasticity, with registered maximum growth of 13% at day 28 for the concrete with replacement level of 30%. Analyzing the obtained results, considering dosage conditions and physical characteristics of the recycled aggregates used, it was concluded that from replacement levels of 20% and 30% from AGRC to AGN, it becomes possible to produce structural concrete with compression strength and modulus of elasticity in satisfactory conditions.

Key-words: concrete, recycling, recycled aggregate, recycled coarse aggregate concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Total de RCC coletados Brasil e Regiões	2
Figura 2 - RCC estocado em usina de reciclagem - Guarulhos, São Paulo	2
Figura 3 - Principais etapas de beneficiamento do RCC	2
Figura 4 - Detalhe do beneficiamento de RCC em AGRC.....	2
Figura 5 - Detalhe dos tipos de britadores a) mandíbula e b) impacto	2
Figura 6 - Faixa granulométrica do agregado graúdo natural para concreto	2
Figura 7 - Correlação entre massa específica do concreto fresco e a massa específica dos agregados reciclados (Adaptado de Carrijo, 2005)	2
Figura 8 - Desenvolvimento do índice de consistência no ensaio de mesa de consistência (adaptado de NEALEN e RUHL, 1997)	2
Figura 9 - Gráfico do módulo de elasticidade do concreto	2
Figura 10 - Módulo de elasticidade em função da relação a/c para diferentes taxas de substituição de AGRC	2
Figura 11 - Absorção de água do concreto em função da massa específica dos AGRC (adaptado de Carrijo, 2005)	2
Figura 12 - Índices de vazios do concreto em função da massa específica dos AGRC (adaptado de Carrijo, 2005)	2
Figura 13 - Comportamento das propriedades dos concretos em função do teor de AGRC.....	2
Figura 14 - a) Detalhe do silo de cimento CP - IV, b) Amostra de cimento CP - IV utilizada.	2
Figura 15 - Detalhe da amostra do agregado miúdo natural utilizado	2
Figura 16 - Detalhe do silo e da amostra do agregado graúdo natural utilizado	2
Figura 17 - a) corpos-de-prova; b) britador de martelo; c) peneirador mecânico; d) amostra de AGRC; e) Máquina de abrasão Los Angeles.....	2
Figura 18 - Detalhe da pesagem e dosagem dos materiais para produção dos concretos.....	2
Figura 19 - Ordem de colocação dos materiais e tempo de mistura do concreto de referência	2

Figura 20 - Ordem de colocação dos materiais e tempo de mistura dos concretos reciclados	2
Figura 21 - a) Dosagem dos materiais; b.1) e b.2) Produção dos concretos em betoneira com eixo inclinado.....	2
Figura 22 - Etapas do processo de moldagem e cura dos corpos-de-prova	2
Figura 23 - Etapas do ensaio de consistência do concreto	2
Figura 24 - a) Ensaio de resistência à compressão; b) Detalhe das dimensões dos corpos-de-prova	2
Figura 25 - a) Ensaio do módulo de elasticidade dos concretos;	2
Figura 26 - Curvas granulométricas do agregado miúdo natural.....	2
Figura 27 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclados .	2
Figura 28 - Variação da resistência à compressão dos concretos aos 7 e 28 dias	2
Figura 29 - Variação da resistência à compressão dos concretos em função dos teores de substituição de AGRC por AGN aos 7 e 28 dias	2
Figura 30 - Variação da resistência à compressão dos concretos em função da relação a/c aos 7 e 28 dias.....	2
Figura 31 - Variação da resistência à compressão dos concretos em função das massas específicas das misturas de AGRC e AGN	2
Figura 32 - Variação média dos módulos de elasticidade dos concretos.....	2
Figura 33 - Variação dos módulos de elasticidade em função dos teores de substituição de AGRC por AGN aos 28 dias.....	2
Figura 34 - Variação dos módulos de elasticidade em função da relação a/c aos 28 dias.....	2
Figura 35 - Valores individualizados dos módulos de elasticidade dos concretos aos 28 dias.....	2

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de RCC coletados pelos municípios no Brasil	2
Tabela 2 - Resumo do Programa Experimental	2
Tabela 3 - Identificação dos corpos de prova do programa experimental	2
Tabela 4 - Resumo das dosagens experimentais para os concretos	2
Tabela 5 - Ensaios mecânicos realizados nos corpos-de-prova de concreto.....	2
Tabela 6 - Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP - IV	2
Tabela 7 - Composição granulométrica do agregado miúdo natural	2
Tabela 8 - Composição granulométrica e características físicas dos agregados gráudos naturais (AGN) e reciclados de concreto (AGRC)	2
Tabela 9 - Composição granulométrica e características físicas das misturas otimizadas de agregados gráudos naturais e reciclados de concreto	2
Tabela 10 - Relação do abatimento dos concretos em função do teor de argamassa e do fator água/cimento das misturas	2
Tabela 11 - Médias das resistências à compressão dos concretos aos 7 e 28 dias	2
Tabela 12 - Médias dos módulos de elasticidade dos concretos aos 28 dias	2
Tabela 13 - Resumo do ensaio de granulometria do AGN	2
Tabela 14 - Determinação da massa específica do AGN.....	2
Tabela 15 - Resumo do ensaio de granulometria do agregado miúdo natural	2
Tabela 16 - Determinação da massa específica do agregado miúdo natural.....	2
Tabela 17 - Resumo do ensaio de granulometria do AGRC	2
Tabela 18 - Determinação da massa específica do AGRC	2
Tabela 19 - Determinação da massa unitária do agregado miúdo natural	2
Tabela 20 - Determinação da massa unitária do AGN	2
Tabela 21 - Determinação da massa unitária do AGRC.....	2
Tabela 22 - Determinação do desgaste por abrasão Los Angeles do AGRC.....	2
Tabela 23 - Valores individuais de resistência à compressão dos concretos aos 7 dias.....	2
Tabela 24 - Valores individuais de resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.....	2

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa da pesquisa.....	2
1.2 Objetivos da pesquisa	3
1.3 Delimitação da pesquisa	4
1.4 Organização da pesquisa.....	4
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Cenário atual da reciclagem de RCC no Brasil e no Mundo	6
2.2 Resíduos de construção civil (RCC).....	8
2.3 Classificação dos resíduos de construção civil (RCC)	9
2.4 Agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC).....	10
2.5 Principais características dos (AGRC)	12
2.5.1 Formato e textura superficial	13
2.5.2 Granulometria.....	14
2.5.3 Massa específica e Massa unitária.....	15
2.5.4 Porosidade	17
2.5.5 Abrasividade.....	17
2.5.6 Impurezas e contaminantes	18
2.6 Concretos reciclados produzidos com (AGRC)	19
2.7 Propriedades dos concretos reciclados produzidos com (AGRC).....	19
2.7.1 Massa específica.....	20
2.7.2 Trabalhabilidade.....	21
2.7.3 Resistência à compressão simples	24
2.7.4 Módulo de elasticidade.....	26
2.7.5 Durabilidade	29
2.8 Produção de concretos estruturais com (AGRC)	33
3.0 PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
3.1 Considerações iniciais.....	36
3.2 Materiais e Métodos	36
3.2.1 Aglomerante (cimento)	36
3.2.2 Agregado miúdo natural (areia).....	37
3.2.3 Agregado graúdo natural (brita)	38

3.2.4 Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)	39
3.2.5 Água	40
3.3 Dosagem, produção, moldagem e cura dos concretos	40
3.3.1 Dosagem experimental dos concretos	40
3.3.2 Produção dos concretos	43
3.3.3 Moldagem e cura dos concretos.....	46
3.4 Realização dos ensaios mecânicos.....	47
3.4.1 Ensaio de consistência do concreto	48
3.4.2 Ensaio de resistência à compressão simples.....	49
3.4.3 Ensaio de módulo de elasticidade estático.....	50
4.0 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
4.1 Caracterização física dos materiais.....	52
4.1.1 Aglomerante (cimento)	52
4.1.2 Agregado miúdo natural (areia)	53
4.1.3 Agregado graúdo natural (AGN) e reciclado de concreto (AGRC)	54
4.2 Propriedades mecânicas	59
4.2.1 Consistência.....	59
4.2.2 Resistência à compressão simples	61
4.2.3 Módulo de elasticidade estático	66
5.0 CONCLUSÃO	69
6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICES	78

1.0 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável por grande parte da geração de resíduos sólidos, tanto pelo consumo de matérias-primas, quanto pela geração de resíduos durante os processos construtivos. Segundo Pinto (1999) e Ângulo (2005), em cidades brasileiras de médio e grande porte, os resíduos originados de construção civil representam de 40 a 70% de todos os sólidos nas cidades brasileiras, cujo destino incorreto traz prejuízos econômicos, sociais e ambientais irreparáveis.

O Resíduo de Construção Civil (RCC) é composto em geral por: argamassas, cerâmica, concreto, gesso, madeira, etc. No Brasil esses resíduos são formados por cerca de 53% de concretos e argamassas, 22% de solo e areia, 9% de cerâmica vermelha, 5% de cerâmica branca, 5% de rochas e 4% de plásticos. (NAGALLI, 2014).

Atualmente, a maioria dos países desenvolvidos sofre com a escassez de brita e areia como matéria-prima. Para solucionar tais problemas, alguns países desenvolveram estudos sistemáticos para reutilizar o (RCC) para a produção de novos concretos. A Holanda, Bélgica e Dinamarca, são exemplos de países que investiram em pesquisa para aproveitar esses resíduos e atualmente reciclam mais de 90% dos seus RCC. (ABRECON, 2015).

A reciclagem de RCC no Brasil ainda é muito pequena se comparada a muitos países da Europa. A ABRELPE (2014) constatou que os municípios brasileiros coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de (RCC) em 2014, o que implica no aumento de 4,1% em relação a 2013. Esta situação, também observada em anos anteriores, exige atenção especial quanto a destinação final dos resíduos, visto que a quantidade total de RCC é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos.

Nas últimas décadas, os (RCC) vêm recebendo atenção crescente por parte de construtores e pesquisadores em todo mundo. Isto se deve, principalmente, ao fato de que esses resíduos estão se tornando um dos principais agentes para a poluição ambiental.

Segundo Buttler (2003), dentre os vários materiais que compõem os RCC, os resíduos de concreto apresentam um dos maiores potenciais de reutilização, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas (f_c , idade, etc), sua maior homogeneidade e menor grau de contaminação por outros tipos de resíduos. No Brasil, as pesquisas sobre o reaproveitamento dos resíduos de concreto ainda estão começando e os principais estudos são relacionados com a reciclagem de agregados mistos. Dentro desse contexto, torna-se importante conhecer as propriedades físicas dos agregados reciclados de concreto e as propriedades mecânicas dos concretos que incorporem esses resíduos com o objetivo de viabilizar sua utilização.

Dentro da perspectiva do reaproveitamento dos (RCC), a que vem despertando mais interesse e que talvez seja a mais nobre delas é a utilização dos agregados reciclados para a produção de novos concretos, sendo contudo, a aplicação que exige mais cuidados e estudos, tendo em vista o importante papel que os agregados desempenham no comportamento dos concretos.

Diante deste cenário, a presente pesquisa apresenta a utilização dos agregados graúdos reciclados de concretos (AGRC) aplicados em concretos estruturais, tendo como objetivos específicos avaliar as propriedades mecânicas de consistência, resistência à compressão simples e módulo de elasticidade estático dos concretos, a partir da substituição total e parcial dos agregados reciclados de concreto por agregados graúdos naturais.

A metodologia experimental baseia-se na dosagem de concretos pelo método IPT/EPUSP, considerando para as misturas um traço piloto intermediário de referência com relação aglomerante : agregados secos de (1:5) e abatimento em 70 ± 10 mm fixos, admitindo teores de argamassa e frações de agregados graúdos variando nos teores de substituição de 10%, 20% e 30% de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) por agregados graúdos naturais (AGN).

1.1 Justificativa da pesquisa

Os resíduos de construção civil constituem-se num problema amplo e generalizado em todo mundo. Segundo a Associação Brasileira das Empresas

de Limpeza Pública - ABRELP, em 2014, somente no Brasil, foram produzidos quase 45 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos.

Dentre todos os materiais que compõem esses resíduos, a utilização de resíduos de concretos provenientes de resíduos de construção civil (RCC) possibilita obter agregados reciclados com maior controle das propriedades do concreto reciclado produzido.

O uso de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) aplicados em concretos estruturais ainda não se encontra totalmente difundido, tendo em vista não existirem normas consistentes que auxiliem na caracterização dos agregados e no seu emprego em concretos.

Nesse contexto, torna-se importante conhecer as propriedades físicas dos agregados reciclados e as propriedades mecânicas dos concretos que incorporem esses resíduos com o objetivo de viabilizar sua utilização.

1.2 Objetivos da pesquisa

Objetivo Geral:

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a aplicação dos agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) em concretos estruturais, a partir de uma dosagem experimental proposta pelo método IPT/EPUSP, variando apenas teores de substituição de 10%, 20% e 30% de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) por agregados graúdos naturais (AGN).

Objetivos específicos:

- Avaliar as características físicas de granulometria e mecânicas de massa específica e massa unitária dos agregados miúdo e graúdos naturais (AGN) e reciclados de concreto (AGRC);
- Analisar as condições de consistência e trabalhabilidade das misturas de concreto, a partir dos teores de substituição de 10%, 20% e 30% de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) por agregado graúdo natural (AGN);

- Analisar as propriedades mecânicas de resistência à compressão simples dos concretos produzidos a partir dos teores de substituição de 10%, 20% e 30% de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) por agregado graúdo natural (AGN);
- Avaliar as propriedades do módulo de elasticidade estático dos concretos produzidos a partir dos teores de substituição de 10%, 20% e 30% do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), por agregado graúdo natural (AGN).

1.3 Delimitação da pesquisa

O trabalho delimita-se em analisar a aplicação dos agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), no estado seco, na produção de concretos estruturais, avaliando tão somente a influência desses agregados nas propriedades mecânicas de consistência, resistência à compressão simples e módulo de elasticidade estático.

1.4 Organização da pesquisa

O trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução na qual se discute a contextualização, os objetivos geral e específicos, a justificativa e as delimitações do tema proposto.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica para fundamentar os conceitos relacionados à aplicação dos agregados reciclados em concretos para fins estruturais, onde são discutidos aspectos gerais relativos aos resíduos de construção civil, com ênfase na abordagem das principais características e propriedades dos agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), correlacionando essas características com as principais propriedades dos concretos produzidos com esses tipos de agregados.

No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento do programa experimental da pesquisa, onde são descritos todos os fatores a serem controlados nos ensaios de laboratório, como seleção dos materiais a serem

utilizados, caracterização física e mecânica dos materiais, produção, moldagem, cura e rompimento dos corpos-de-prova com respectiva apropriação dos resultados.

No quarto capítulo é feita a apresentação, análise e discussão dos resultados encontrados das diferentes etapas. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões a que este estudo conduziu e por fim no sexto capítulo são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento e o crescimento dos grandes centros urbanos trazem à sociedade um problema que não pode ser ignorado, que é a geração de resíduos sólidos. Segundo Pinto (1999), em cidades brasileiras de médio e grande porte, os resíduos originados de construção civil representam de 40 a 70% de todos os sólidos nas cidades brasileiras, cujo destino incorreto traz prejuízos econômicos, sociais e ambientais irreparáveis.

No Brasil, a disposição irregular deste material tem causado enchentes, perda de infraestrutura de drenagem por entupimento de galerias e assoreamento de canais, além da proliferação de vetores de doenças, poluição e do aumento desnecessário dos custos da administração pública com limpeza urbana.

Em algumas cidades este material ainda é depositado em lixões e/ou aterros sanitários, procedimento este que é considerado um desperdício duplo de dinheiro. Diante deste cenário, uma forma viável de se reduzir estes impactos ambientais negativos ainda é através da adoção de procedimentos técnicos de reciclagem de resíduos de construção civil, sobretudo aqueles voltados ao reaproveitamento dos resíduos como agregados graúdos reciclados para a utilização em novas misturas de concretos.

As últimas pesquisas relacionadas ao estudo de agregados reciclados de concreto atestam que o material tem grande potencial de utilização. No Brasil, os estudos estão concentrados basicamente no reaproveitamento de resíduos de

construção e demolição (RCD) para reforço de sub-base e base de pavimentos rodoviários e na produção de concretos não estruturais.

Segundo Buttler (2003) as principais diferenças apontadas na literatura entre agregados naturais e agregados reciclados de concreto, destacam-se, para os agregados reciclados, a menor massa específica, maior absorção de água e principalmente a quantidade de argamassa aderida à superfície dos agregados graúdos, que influencia desde as propriedades do agregado, até as do concreto produzido com este, seja no estado fresco ou endurecido.

Diante deste cenário, torna-se importante que sejam desenvolvidas novas tecnologias e/ou técnicas construtivas para o reaproveitamento desses materiais reciclados, a fim de reduzir o volume de resíduos gerados por novas obras, reformas e demolições, pelo qual somente pode ser viabilizado através da aplicação de investimentos para o desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de reciclagem de materiais de construção, o que de certa forma motivará cada vez mais o desenvolvimento continuado de novas pesquisas científicas dentro dos meios acadêmicos e institucionais engajados no tema.

2.1 Cenário atual da reciclagem de (RCC) no Brasil e no Mundo

Segundo dados da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON/2015) o volume de RCC gerado em todo mundo é alarmante. Por ano, são produzidos na Alemanha cerca de 33 milhões de toneladas. Na Inglaterra, chega a 70 milhões de toneladas por ano e, na França, de 20 a 25 milhões de toneladas. Em algumas cidades da Europa, a quantidade varia de 0,7 a 1,0 tonelada por habitante, quase duas vezes a massa do resíduo sólido municipal. No Canadá, o volume de RCC representa 35% do total de resíduos produzidos, o que equivale a 11 milhões de toneladas.

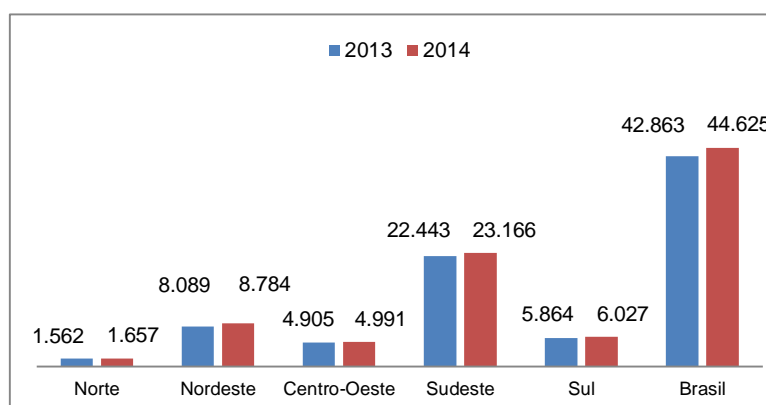
Diante deste problema, a reciclagem de RCC tem sido estudada por vários países desenvolvidos, como Holanda, Bélgica, França, Japão e Inglaterra. Tal iniciativa vem demonstrando bons resultados, a exemplo da Alemanha que já recicla cerca de 60% do RCC gerado. Na Holanda esse percentual é ainda

maior, cerca de 95% do RCC produzido é reciclado. Atualmente, nos países europeus, cerca de 60% do RCC produzido está sendo reciclado corretamente.

No Brasil, PINTO (1999) mostrou que é gerada, em média, 0,52 toneladas de RCC por habitante/ano ou 150 kg por m² construído, representando de 54% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos.

A Figura 1 mostra que os municípios coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de RCC em 2014, o que implica no aumento de 4,1% em relação a 2013. Esta situação, também observada em anos anteriores, exige atenção especial quanto ao destino final dado aos RCC, visto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos.

Figura 1 - Total de RCC coletados Brasil e Regiões



Fonte: Pesquisa ABRELPE/IBGE (2014)

Em geral os municípios coletam os resíduos de construção civil (RCC) sob sua responsabilidade e os lançados em logradouros públicos.

Mesmo não representando o total de RCC gerado pelos municípios, esta parcela é a única que possui registros confiáveis e, portanto, é a que integra a pesquisa municipal realizada anualmente pela ABRELPE.

A comparação entre os dados de RCC em 2014 e 2013 resulta na constatação de um aumento de 4,1% na quantidade coletada pelos municípios brasileiros.

Tabela 1 - Quantidade de RCC coletados pelos municípios no Brasil

Região	2013		2014	
	RCC coletado (t/dia)/índice (kg/hab/dia)	População Total (hab)	RCC coletado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)
Brasil	117.435/0,584	202.799.518	122.262	0,603

Fonte: Pesquisa ABRELPE/IBGE (2014)

Além de causarem a degradação ambiental, os resíduos da construção civil aumentam expressivamente os custos da administração municipal. Logo, é importante que sejam desenvolvidos novos materiais e técnicas construtivas para materiais reciclados que diminuam o volume de RCC gerado por novas obras, reformas e demolições, o que somente pode ser combatido através da educação para a reciclagem, fiscalização, difusão de leis municipais específicas para a indústria de reciclados e, sobretudo através do incentivo à pesquisa científica voltada para o desenvolvimento e aprimoramento do tema.

A figura 2 a seguir mostra resíduos de construção civil (RCC) estocados numa usina de reciclagem no município de Guarulhos no Estado de São Paulo.

Figura 2 - RCC estocado em usina de reciclagem - Guarulhos, São Paulo



Fonte: Próprio autor

2.2 Resíduos de construção civil (RCC)

De acordo com Benetti (2012) os resíduos de concreto podem ser provenientes de diferentes processos, como os de produção de estruturas, e de elementos pré-fabricados, os de produção e fornecimento de concretos pré-misturados e os de demolição de estruturas e pavimentos. Pela britagem desses

materiais obtém-se o agregado reciclado de concreto que é composto por agregado natural e argamassa aderida em sua superfície.

A ABNT NBR 15.116/2004 define como resíduo de construção civil (RCC) os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

2.3 Classificação dos resíduos de construção civil (RCC)

A Resolução n°. 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) classifica os resíduos de construção civil da seguinte forma:

- **Classe A** – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, como componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos, etc.), argamassa e concreto; de construção e demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- **Classe B** – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- **Classe C** – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou sua recuperação;
- **Classe D** – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reforma e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A partir desta classificação, cabe observar, que a definição como Classe A é alvo da maior quantidade de pesquisas científicas relacionadas à reciclagem de resíduos da construção civil.

Pela ABNT NBR 10.004/2004, o resíduo de construção civil foi designado por uma classificação diferente, mas não conflitante, da proposta dada pelo CONAMA, que é a seguinte:

- **Classe I:** são os que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, considerados resíduos perigosos;
- **Classe II:** são os resíduos não perigosos, divididos nas subclasses II A (não inertes) e II B (inertes).

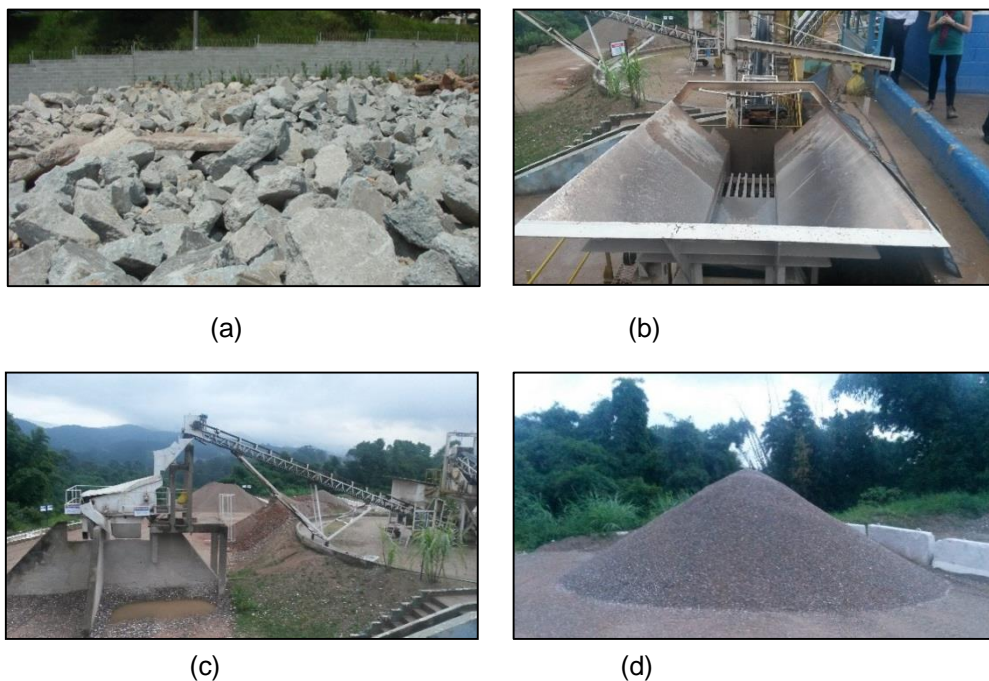
2.4 Agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC)

Nos próximos parágrafos serão discutidas as principais características dos agregados reciclados de concreto.

Segundo Buttler (2003) os resíduos de concreto incluem rejeitos de demolição de estruturas de concreto, resíduos de usinas de concreto pré-misturados, fábricas de elementos pré-moldados e de pavimentos de concretos e blocos. Pela britagem desses materiais obtém-se o agregado reciclado de concreto que é composto por agregado natural e argamassa aderida em sua superfície.

A ABNT NBR 9935/2011 define o agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) como aquele material obtido através 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. A figura 3 a seguir mostra as principais etapas de beneficiamento do resíduo de construção civil (RCC) em agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) em uma usina de reciclagem de entulho de construção (URC).

Figura 3 - Principais etapas de beneficiamento do RCC



a) Resíduo de construção civil (RCC); b) britador associado (impacto/mandíbula) de (RCC);
c) sistema de esteira rolante com peneira vibratória; d) silo de agregado graúdo reciclado.
(Usina de Reciclagem de RCC – PROGUARU (2015) – Guarulhos – São Paulo)

Fonte: Próprio autor

Apesar da possibilidade de estudo das propriedades do agregado se desenvolver de forma separada, aquelas consideradas importantes para a tecnologia do concreto estão inter-relacionadas e podem assim ser agrupadas (METHA e MONTEIRO, 2008):

- a) Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade;
- b) Características dependentes das condições prévias de exposição e das condições de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- c) Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Ainda de acordo com os autores, em termos de relação com as propriedades do concreto, as propriedades do agregado podem assim ser agrupadas:

- a) Influenciadoras do estado fresco: porosidade ou massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial;
- b) Influenciadoras do estado endurecido: porosidade, composição mineralógica e outras propriedades dependentes destas.

2.5 Principais características dos (AGRC)

Segundo Buttler (2003), dentre os vários resíduos da construção civil, podem ser citados os resíduos de concreto como tendo um dos maiores potenciais de utilização, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas (f_c , idade, etc) e seu menor grau de contaminação por outros materiais, quando comparados com outros resíduos da construção.

Para Cordeiro (2013), as principais características dos agregados graúdos reciclados de concreto dependem basicamente de três fatores: materiais de origem, equipamento utilizado no beneficiamento e dos procedimentos empregados para eliminar as impurezas presentes. Neste item serão discutidas as características mais relevantes dos agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC). As figuras a seguir mostram corpos-de-prova sendo beneficiados para produção de AGRC.

Figura 4 - Detalhe do beneficiamento de RCC em AGRC



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

2.5.1 Formato e textura superficial

O formato final do agregado reciclado pode ser anguloso, lamelar, dependendo do material presente no RCC, e do equipamento de britagem utilizado, que poderá aumentar a superfície específica dos agregados com formato irregular, resultando em uma maior quantidade de argamassa e pasta de cimento a ser aderida. (FONSECA, 2002).

Leite (2001) comenta que os agregados reciclados de concreto são geralmente irregulares e angulares e com texturas mais ásperas e rugosas que os agregados naturais, devido a presença da argamassa aderida na superfície do agregado natural.

A forma e a textura superficial do agregado influenciam diretamente na trabalhabilidade do concreto. A angulosidade dos grãos tende a promover misturas mais ásperas, com conseqüente travamento dos grãos, levando a um aumento no volume dos vazios devido às partículas de agregado encontrarem dificuldade de acomodação.

Para Mehta e Monteiro (1994) concretos com partículas de textura áspera, angulosa e alongada necessitam de um volume maior de pasta de cimento que partículas arredondadas e lisas. Esse aumento no volume de pasta afeta no custo final do produto final.

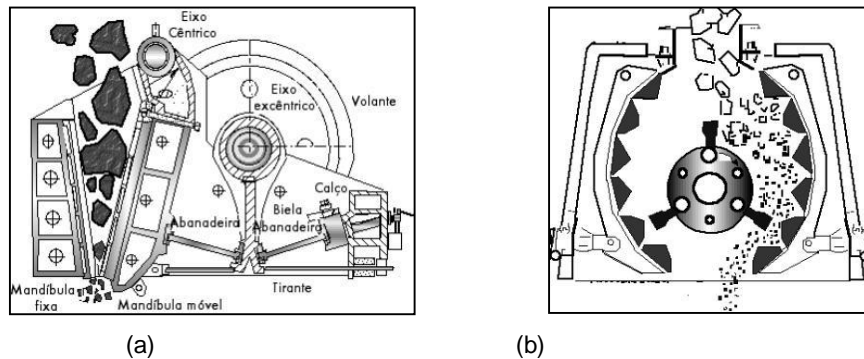
A textura superficial do grão tem influencia sobre sua aderência com a pasta de cimento Portland. A classificação da textura superficial baseia-se no grau de polimento da superfície das partículas, se a mesma é lisa ou áspera. E dependerá da dureza e porosidade da rocha matriz e da sua subsequente exposição à ação de atrito.

Para concretos constituídos por partículas menos angulosas, haverá menores ângulos de atrito internos, possibilitando assim, melhores arranjos das partículas e conseqüentemente melhores níveis de trabalhabilidade e compacidade da mistura. (MEHTA e MONTEIRO, 2004)

De acordo com Nunes (2007) as melhores forma e composição granulométricas são obtidas quando o processo de britagem consiste na utilização inicial de um britador de mandíbulas, seguindo de um britador giratório.

Os britadores de mandíbulas formam partículas de formas mais angulares, enquanto que os britadores giratórios produzem partículas mais arredondadas. As figuras a seguir mostram os tipos usuais de britadores para agregados reciclados.

Figura 5 - Detalhe dos tipos de britadores a) mandíbula e b) impacto



Fonte: www.metalica.com.br

2.5.2 Granulometria

A composição granulométrica é uma característica importante do agregado, uma vez que influencia na trabalhabilidade, na resistência mecânica, no consumo de aglomerantes, na absorção de água, na fluência e no módulo de elasticidade do concreto. (CORDEIRO, 2013)

De acordo com a autora, uma distribuição granulométrica contínua indica que o agregado está uniformemente graduado para todos os tamanhos, permitindo melhores condições de interação entre as partículas, proporcionando resistências mecânicas mais elevadas ao concreto.

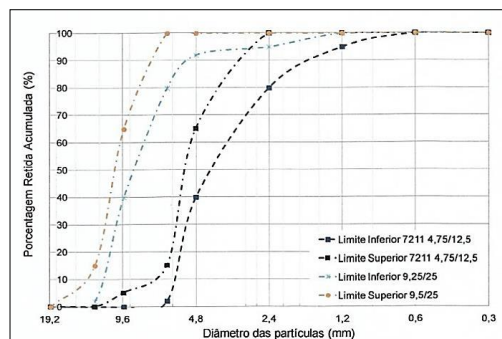
A granulometria dos agregados compreende a determinação do tamanho das partículas sólidas, bem como da frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. Esta característica influencia na trabalhabilidade, no consumo de cimento, na absorção de água, na resistência mecânica e no módulo de elasticidade, possuindo papel fundamental na dosagem dos concretos.

De acordo com Altheman (2002), há diversos fatores que influenciam na granulometria do agregado graúdo reciclado, dentre os quais destacam-se o tipo de resíduo processado, a relação água/cimento do concreto de origem beneficiado, o tipo de equipamento e regulagem utilizada para britagem e o tipo de sistema adotado no peneiramento.

Para Gonçalves (2011) a composição granulométrica do agregado graúdo reciclado é uma propriedade relevante, indicando a quantidade de finos existente no material. Tais finos são oriundos da argamassa que se desprende do agregado natural devido a movimentação. Grandes quantidades de finos no agregado passam a ser um problema, pois afetam a aderência da pasta com os agregados, além de aumentar a quantidade de água na mistura.

As curvas granulométricas das frações graúdas adequadas para concreto são normalizadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009), a qual estabelece os limites que o agregado para concreto deve se enquadrar. (Figura 6).

Figura 6 - Faixa granulométrica do agregado graúdo natural para concreto



Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009)

2.5.3 Massa específica e Massa unitária

Segundo a NBR ABNT NM 53/2009, a massa específica do agregado é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis e a massa unitária é o quociente da massa do agregado lançado em um recipiente de volume conhecido.

O agregado graúdo reciclado de concreto possui em sua composição uma quantidade de argamassa aderida, que o diferencia dos agregados naturais. A presença dessa argamassa nos grãos influencia em características como massa específica, taxa de absorção, módulo de elasticidade, resistência mecânica, e de durabilidade dos concretos com eles produzidos. (CORDEIRO, 2013).

Em se tratando de dosagem de concreto, o uso de agregado reciclado com menor massa específica resulta num maior volume de agregados, quando são tomadas massas iguais de agregados naturais e reciclados. Este é um fato que deve ser observado no momento de se adaptar o traço de concreto convencional aos agregados reciclados, principalmente quando são realizados estudos comparativos de laboratório (TENÓRIO, 2007).

Para Cordeiro (2013) a argamassa aderida no agregado reciclado de concreto tem uma densidade significativamente menor que a dos agregados naturais originais, e quanto maior a quantidade de argamassa aderida no agregado natural, menor será a massa específica do agregado reciclado.

Ainda segundo a autora, os resultados de massa específica e massa unitária dos agregados reciclados de concreto são muito variáveis e que essa diferença ocorre por diversos fatores tais como resistência do concreto de origem, diferença de granulometria, de métodos de ensaio e de mecanismos de britagem.

De acordo com Gonçalves (2011) é importante observar a propriedade massa específica dos agregados, pois um agregado graúdo reciclado de concreto de baixa massa específica não produz um concreto de elevada resistência, devido a uma maior presença de vazios (porosidade) na mistura.

Sendo assim, em geral quanto maior a massa específica e massa unitária dos agregados, melhor será o desempenho do agregado que os incorpora, sendo que para a massa unitária esta afirmação dependerá além da massa do material, da forma das partículas e de como elas estão dispostas.

2.5.4 Porosidade

A porosidade dos agregados influencia diretamente propriedades do concreto tais como resistência a compressão, módulo de elasticidade e absorção. Cordeiro (2013) menciona que todas as propriedades do concreto, em especial, as relacionadas à reologia do concreto fresco, são afetadas pela absorção de água do agregado caso este seja utilizado na condição seca. Quando os agregados são heterogêneos, como o agregado de concreto, esta influencia se torna ainda mais significativa.

Damineli (2007) comenta que a absorção de água está diretamente relacionada à estrutura de poros do corpo, sendo uma proporção da quantidade de água possível de ser retida nestes poros em relação à massa seca do material. As propriedades de massa específica aparente e absorção estão relacionadas à estrutura porosa permeável do corpo, sendo medidas indiretas da porosidade dos agregados.

Observa-se que a taxa de absorção de água do agregado reciclado de concreto é superior à taxa de absorção do agregado natural. E também que a mesma está relacionada a distintos fatores tais como: origem, dimensão, tipo de britador, entre outros. Segundo o autor, o ideal é que o agregado reciclado esteja na condição intermediária de umidade a fim de minimizar ou anular os efeitos negativos da absorção. (CORDEIRO, 2013)

2.5.5 Abrasividade

Para Mehta e Monteiro (2008), a resistência à abrasão se inter-relaciona com propriedades tais como resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

Cordeiro (2013) comenta que os agregados reciclados apresentam um elevado coeficiente Los Angeles devido à grande quantidade de argamassa que se desprende durante o ensaio. Quanto menor a relação a/c do concreto de origem, menor o coeficiente Los Angeles dos agregados que provém dele. Um

dos métodos utilizados para a avaliação desta característica baseia-se no ensaio americano denominado de abrasão Los Angeles, que combina abrasão e atrito.

A NBR NM 51 (ABNT, 2001) descreve que o ensaio de abrasão Los Angeles é um ensaio que permite aferir a resistência ao desgaste sofrido pelo material, quando submetido a um determinado número de revoluções na máquina Los Angeles, juntamente com uma carga abrasiva à velocidade de 30 a 33 RPM. O valor obtido pelo ensaio serve como parâmetro de qualidade do material a ser utilizado no concreto, uma vez que representa a capacidade de fragmentação por choque e atrito das partículas graúdas.

No caso dos agregados reciclados, apesar de não existir uma referência normativa que estabeleça o limite máximo de perda de resistência à abrasão, seu conhecimento é importante visto que interfere nas principais propriedades mecânicas do concreto.

2.5.6 Impurezas e contaminantes

A quantidade de contaminantes e impurezas demonstra ser maior em agregados reciclados do que em agregados naturais. De acordo com CORDEIRO (2013), a presença das impurezas está muitas vezes relacionada à etapa da demolição a qual o resíduo faz parte. Materiais provenientes de demolições de estruturas de concreto contêm na maioria das vezes menos impurezas que materiais originados pela quebra de paredes de alvenarias. O resíduo da fragmentação da alvenaria vem, em geral, acompanhado de argamassa, madeira, gesso e vidros.

A presença de impurezas nos agregados diminui a resistência mecânica dos concretos produzidos com materiais contaminados. Para evitar tal situação o ideal seria trabalhar com a demolição seletiva, dessa forma o resíduo poderia ter um maior e melhor aproveitamento.

2.6 Concretos reciclados produzidos com (AGRC)

Nos próximos itens, são apresentadas informações mais detalhadas sobre o emprego de (AGRC) na produção de concretos, tema base deste trabalho, bem como suas propriedades físicas e comportamento mecânico.

É importante conhecer as características e os constituintes do concreto. Um dos seus principais constituintes são os agregados, no qual segundo a ABNT NBR 7225/2009 os agregados podem ser miúdos, graúdos, naturais ou reciclados. A ABNT NBR 15.116/2004 define o agregado reciclado como sendo o material granular originado do beneficiamento dos resíduos de construção e demolição de obras civis, o qual apresenta características técnicas para aplicação em obras de edificação e infraestrutura. Esta norma classifica em dois os tipos de agregados reciclados, os agregados de resíduo misto (ARM) e os agregados de resíduos de concretos (ARC), o qual deve ser composto em sua fração graúda por no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas.

2.7 Propriedades dos concretos reciclados produzidos com (AGRC)

Da mesma maneira que as propriedades físicas dos agregados naturais influenciam na produção de concretos convencionais, as propriedades físicas dos agregados reciclados também influenciam nas dosagens e misturas de novos concretos.

Uma vez os agregados reciclados tendo propriedades variáveis, os concretos produzidos a partir desses resíduos tendem também a apresentar variabilidade de propriedades.

Para (Leite, 2001), O conhecimento dessas propriedades é tão importante quanto o conhecimento das propriedades do agregado, visto que é a partir do entendimento das relações existentes entre esses dois conjuntos de dados que se pode proporcionar o emprego adequado e confiável dos agregados reciclados. Também é baseado no conhecimento das propriedades e do

desempenho dos concretos que se restringe ou se recomenda seu mais adequado uso, dimensionam-se estruturas e estabelecem-se valores normativos.

Nos parágrafos que seguem serão comentadas as propriedades dos concretos fabricados com agregados graúdos reciclados de concreto no estado fresco e endurecido.

2.7.1 Massa específica

A massa específica do concreto reciclado fresco tende a ser menor que a do concreto convencional devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado e por uma quantidade maior de vazios incorporada ao concreto com este material. Esta influência do agregado reciclado sobre a massa específica do concreto acaba conferindo-lhe valores tais que o concreto produzido fica situado no limite entre o concreto leve e o convencional (LATTERZA e MACHADO Jr (1999) apud LEITE (2001)).

Para Mehta e Monteiro (2008), a massa específica do concreto no estado fresco depende, além da massa do agregado e da sua porosidade, da sua textura e tamanho.

Segundo Kikuchi et al (1993) apud Leite (2001), é importante relatar a diminuição gradual da massa específica do concreto reciclado à medida que o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado aumenta. Da mesma forma, o teor de ar aumenta à medida que aumenta o teor de substituição, contribuindo assim, para a diminuição da massa específica.

Carrijo (2005) quantificou a variação da massa específica do concreto fresco em função da relação a/c e da massa específica do agregado utilizado, onde se observa que à medida que se reduz a massa específica do agregado e aumenta a relação a/c, reduz a massa específica do concreto, conforme mostra a Figura 7.

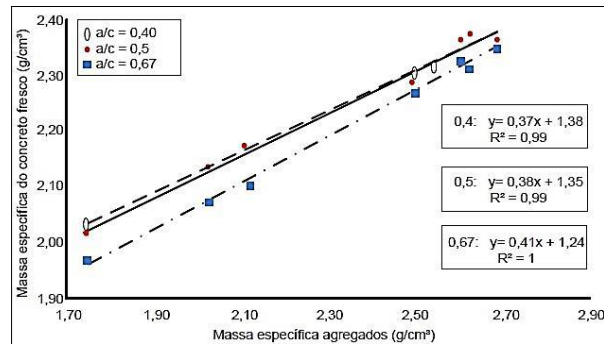


Figura 7 - Correlação entre massa específica do concreto fresco e a massa específica dos agregados reciclados (Adaptado de Carrijo, 2005)

Para Cordeiro (2013), a maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado é uma das maiores causas para que esta redução ocorra. A pasta aderida ao agregado natural é uma das grandes responsáveis pela alta porosidade dos agregados reciclados, e à medida que a massa específica dos agregados reduz, a porosidade dos agregados aumenta devido à presença de uma maior quantidade de pasta aderida.

De acordo com Leite (2001), é importante lembrar que a composição dos resíduos também influencia no valor da massa específica. Quanto mais densos os materiais que compõem o resíduo, maior será a massa específica do concreto reciclado.

2.7.2 Trabalhabilidade

Trabalhabilidade é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular as operações de preparo, lançamento, adensamento e acabamento de uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco, a trabalhabilidade pode ser considerada como uma das mais importantes, uma vez que exerce grande influência sobre as propriedades do concreto no estado endurecido.

Segundo Cordeiro (2013), é um consenso que a presença de agregados reciclados em concreto afeta diretamente a trabalhabilidade. Os fatores

principais que influenciam nesta variação são a forma irregular, a textura áspera e sua alta taxa de absorção, devido sua superfície porosa por conta da argamassa aderida. De acordo com o autor, concretos com agregados reciclados, geralmente, apresentam misturas mais secas que as que utilizam agregados naturais, com a mesma relação água/cimento.

Para Gonçalves (2011), outro fator a ser levado em consideração também é a forma dos agregados, pois agregados britados em diferentes tipos de equipamentos tendem a apresentar formas diferentes, com conseqüentes áreas superficiais diferentes, o que também influencia na quantidade de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade.

Ainda segundo o autor, outro fator relevante é que, em geral, a massa específica dos agregados reciclados é menor que a dos agregados naturais, a substituição em massa destes por agregados reciclados conduz a um maior volume de agregados na mistura, o que também pode aumentar a quantidade de água requerida para a mesma trabalhabilidade. Para esta situação, Rakshvir e Barai (2006) apud Gonçalves (2011), afirmam que ocorre uma maior fricção interna nos concretos confeccionados com agregados reciclados, exigindo maior quantidade de pasta, para que se tenha a mesma trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados naturais.

De acordo com Padmini et al (2009) apud Cordeiro (2013) o tamanho do agregado influencia também diretamente na trabalhabilidade do concreto, segundo os autores quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor a adsorção de água e melhor a trabalhabilidade.

Outros autores, como Leite (2001), Mendes et al (2004), Carrijo (2005) e Malesev et al (2010), compartilham que é possível manter a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado semelhante a do concreto com agregado natural, realizando para isso a pré-molhagem e/ou compensação de água.

Nealem e Ruhl (1997) apud Cordeiro (2013) realizaram um estudo no qual compararam a evolução, ao longo do tempo, da trabalhabilidade de um concreto com agregado graúdo natural e com um agregado graúdo reciclado de concreto, ambos com a mesma relação a/c e a mesma distribuição granulométrica inicial,

avaliando o índice de consistência. O resultado desta pesquisa está expresso na figura 8 a seguir.

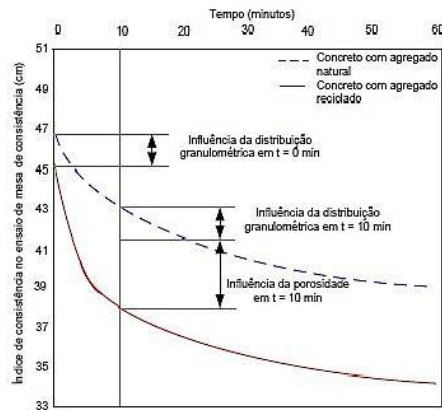


Figura 8 - Desenvolvimento do índice de consistência no ensaio de mesa de consistência (adaptado de NEALEN e RUHL, 1997)

De acordo com Cordeiro (2013), a figura mostra que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam uma consistência inferior que a dos concretos com agregado natural. Verificou-se também que nos 10 minutos iniciais de mistura ocorreu uma acentuada perda de trabalhabilidade nos concretos com resíduo. Este comportamento pode ser atribuído a elevada absorção inicial dos resíduos e a alteração da distribuição granulométrica dos agregados reciclados causada pela mistura em betoneiras.

Padovan (2013), verificou a influência de diferentes teores de pré-molhagem de AGRC nas propriedades de novos concretos, com e sem aditivo. Foi observado que a pré-molhagem em diferentes teores influencia na trabalhabilidade. Segundo a autora, as maiores perdas de trabalhabilidade ocorrem para os níveis de saturação de 40 e 100%. Trata-se de perdas significativas, em termos estatísticos, para os fatores analisados. Porém, essas variações são inferiores a 10 mm, valor que de acordo com a NM 67 (ABNT, 1998) está dentro do limite de ensaio tolerado.

Ainda segundo Padovan (2013), os concretos produzidos com AGRC sem aditivo demandam até 10% mais água para que o abatimento estabelecido fosse atingido, comparados aos concretos com aditivo, e os seus concretos de referência.

Analisando os trabalhos dos diversos autores pesquisados, pode-se concluir que a característica de trabalhabilidade do concreto no estado fresco possui relação inversa à absorção de água do agregado reciclado e, portanto, da quantidade de argamassa aderida ao material.

2.7.3 Resistência à compressão simples

A resistência mecânica é a principal propriedade dos concretos. É influenciada por diversos fatores, como: relação água/cimento, a idade de existência em dias e a forma dos corpos de prova.

A resistência à compressão simples é a propriedade mecânica mais importante do concreto, não somente porque o concreto trabalha predominantemente à compressão, como também porque fornece outros parâmetros físicos que podem ser relacionados empiricamente à resistência à compressão. (CORDEIRO, 2013)

Segundo Gonçalves (2011), todos os materiais dos quais o concreto é composto afetam diretamente a sua resistência e o seu desempenho final. Assim, os agregados também são extremamente importantes para análise criteriosa das propriedades do concreto. Qualquer variação dos materiais componentes do concreto merece um estudo sistemático e isso também se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem a até 80% de toda a mistura.

De acordo com Montgomery (1998) apud Gonçalves (2011), ao ser avaliado o efeito da quantidade de cimento e de argamassa aderida às partículas de agregado reciclado, nas propriedades de novos concretos, conclui-se que a qualidade do agregado reciclado de concreto influi significativamente na resistência à compressão. Pois, para concretos com AGRC com grande quantidade de argamassa aderida, a resistência à compressão aos 28 dias foi cerca de 15% menor se comparada ao concreto de referência. Já para agregados reciclados que foram submetidos a um processo de abrasão, visando diminuir a quantidade de argamassa aderida à sua superfície, essa diferença ficou em torno de 6%.

Diversos autores como (Gómez-Soberón, 2002; Topçu e Sengel, 2004; Xiao et al, 2005; Rahal, 2007; Xiao e Falkner, 2007) todos citados por Cordeiro (2013), estudaram o desempenho do concreto, em termos mecânicos, com agregados reciclados. Em geral esses autores observaram que a resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados é menor do que a de concretos produzidos com agregados naturais, para um mesmo consumo de cimento. Tal fato pode estar associado a fatores tais como: menor resistência do agregado reciclado; porosidade do resíduo de concreto decorrente da quantidade de argamassa aderida ao agregado natural; entre outros.

Para Sami e Akmal (2009) apud Gonçalves (2011), a substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto de maior resistência, origina novos concretos de resistência mais elevada e a substituição de agregados reciclados de menor resistência, geram novos concretos de baixa resistência.

Em pesquisa realizada por Hansen e Narud (1983) apud Cordeiro (2013), sobre a influência da relação água/cimento nos resultados de resistência à compressão dos concretos de origem, notou-se que os concretos produzidos com agregados originários de concretos com baixa relação água/cimento são capazes de produzir novos concretos com resistências iguais ou superiores a sua resistência de origem.

A porosidade dos agregados reciclados de concreto encontra-se na matriz cimentícia, na zona de transição pasta-agregado. Sanchez (2004) ressalta que enquanto o concreto com agregado natural apresenta uma zona de transição, nos concretos com agregados reciclados de concreto encontram-se duas zonas de transição, uma referente ao concreto antigo, e outra gerada pelo novo concreto.

Segundo Gonçalves (2011), quando a matriz do concreto produzido com agregados reciclados for menos resistente que o próprio agregado reciclado, este último não exercerá grande influencia na resistência mecânica do concreto, uma vez que a matriz será o elo mais fraco do mesmo, portanto, muito possivelmente o concreto irá se romper na matriz. Entretanto, quando a matriz do concreto for mais resistente que o agregado reciclado, este último terá

substancial influencia na resistência do concreto, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado.

Ao se avaliar os aspectos ligados à resistência a compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, depreende-se que a resistência dos concretos com agregados reciclados de concreto está associada à qualidade e classe de resistência do concreto que lhe deu origem, sendo que o agregado reciclado é menos resistente que o agregado natural, em função de suas características físicas, apresentando alta porosidade, absorção de água e uma baixa massa unitária e específica.

Neste sentido, verificou-se que a maioria das pesquisas desenvolvidas com agregados reciclados de concreto indica que a diminuição da resistência à compressão de novos concretos está relacionada com o teor de substituição e com a resistência do agregado reciclado.

2.7.4 Módulo de elasticidade

Quando um dado material sofre tensões crescentes de tração ou de compressão, tipicamente se verifica que até determinado limite superior de tensão, as tensões (σ) são proporcionais às deformações específicas correspondentes (ϵ), entendendo como deformação específica o quociente entre o alongamento ou encurtamento do corpo de prova e o comprimento inicial deste. É a conhecida Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$). A constante de proporcionalidade (E) é uma propriedade característica do material em ensaio e é denominada de módulo de elasticidade.

Geometricamente, o módulo é a tangente do menor ângulo que o trecho retilíneo do diagrama tensão-deformação forma com o eixo das deformações. Decorre que quanto mais próximo da vertical (eixo das tensões) estiver o diagrama tensão-deformação, maior o módulo de elasticidade do material.

A preocupação com as deformações e flechas admissíveis é de notória importância no cálculo estrutural, principalmente após a introdução das revisões das normas de cálculo. Este fato tem levado progressivamente o projeto das estruturas de concreto especificar além do indispensável valor da resistência

característica à compressão do concreto (f_{ck}), também o valor mínimo do módulo de elasticidade na idade considerada para o (f_{ck}), normalmente 28 dias, fazendo crescer a importância do módulo e de sua determinação experimental.

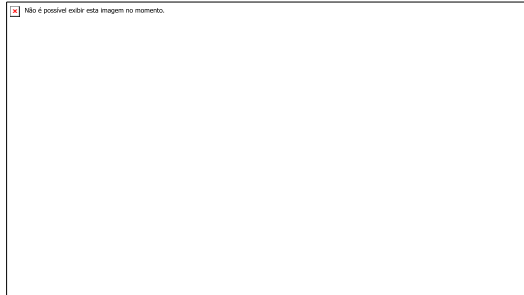


Figura 9 - Gráfico do módulo de elasticidade do concreto

De acordo com a NBR 8522 (2008) o módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados nos cálculos estruturais, que relaciona a tensão aplicada à deformação instantânea obtida. Mehta e Monteiro (2008) comentam que, apesar de o concreto não apresentar um comportamento linear, é necessário uma estimativa do módulo de elasticidade dentro de um limite proporcional adotado, para que se possa, além de conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, também calcular as tensões de projeto sob carga.

O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe.

As características de elasticidade de um material são importantes, pois medem sua capacidade de rigidez. Para Mehta e Monteiro (2008), a importância do limite de elasticidade em um projeto estrutural deve-se ao fato do mesmo representar a deformação máxima permitida antes de o material adquirir deformação permanente.

Para Cordeiro (2013), o módulo de elasticidade do concreto depende da porosidade de suas fases (pasta, agregado e zona de transição). No agregado graúdo as características que podem influenciar na elasticidade são dimensão máxima, forma, textura superficial e composição mineralógica.

Ainda segundo a autora, quando se trata de agregados reciclados tem-se ainda sua maior porosidade quando comparados com os materiais naturais. A porosidade do agregado determina sua rigidez, que por sua vez controla a capacidade do agregado em restringir deformações da matriz.

Hansen (1992) apud Cordeiro (2013) menciona que concretos com agregados reciclados, apresentam, em geral, uma redução entre 15% a 40% do módulo de elasticidade em relação aos concretos com agregados naturais. E mostra que a diferença entre o módulo de elasticidade dos concretos reciclados e convencionais aumenta à medida que crescem os valores da resistência à compressão.

Leite (2001) comenta que as propriedades de resistência à tração em concretos com agregados reciclados de concreto leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas, sendo que o uso dos agregados reciclados promove uma boa aderência entre a pasta e o agregado em virtude de sua forma mais irregular e rugosa, portanto, a zona de transição do concreto confeccionado com agregados reciclados é muito boa.

Segundo Arias (2012) apud Cordeiro (2013) o agregado reciclado de concreto, usado em substituição do agregado graúdo natural numa taxa de 20%, não apresenta influência significativa no módulo de elasticidade se comparado com concretos convencionais. O autor afirma que o uso do método de dosagem adequado, em concretos com agregados reciclados permite que se alcance concretos com características similares, e com condições estruturais similares aos dos convencionais.

Analisando os aspectos inerentes à resistência à tração de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, infere-se que quanto maior a taxa de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto, menores serão os valores de módulo de elasticidade.

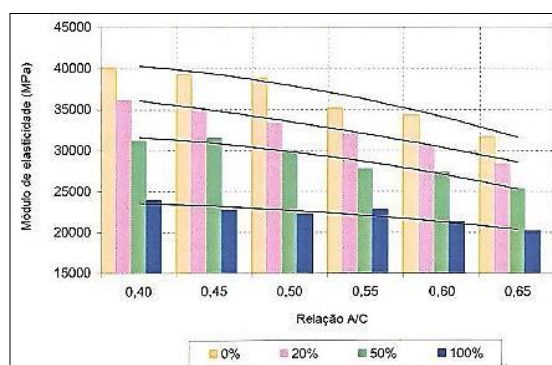


Figura 10 - Módulo de elasticidade em função da relação a/c para diferentes taxas de substituição de AGRC

2.7.5 Durabilidade

Cada vez mais presente nas discussões técnicas sobre a qualidade dos concretos, a durabilidade é atribuída por um conjunto de fatores, considerando as suas propriedades físicas, químicas e o ambiente ao qual está exposto.

De acordo com o American Concrete Institute – ACI (2001), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataque químico, abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração.

Para Neville (1997) apud Tenório (2007), a deterioração do concreto acontece pela ação de fatores externos ou até internos ao próprio material, os quais podem ser mecânicos (impacto, abrasão, erosão ou cavitação), químicos (de origem exterior: íons agressivos e muitos líquidos e gases naturais ou industriais) ou físicos (efeitos de altas temperaturas ou de diferenças entre os coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratada).

A estrutura será considerada durável quando desempenhar as especificações de projeto, mantendo resistência e utilidade com segurança durante um período de tempo predeterminado. De acordo com a ABNT NBR 6118/2014, a vida útil de uma estrutura é aquele período de tempo em que as características originais da estrutura de concreto são mantidas sem que haja necessidade de manutenções e reparos, além daquelas originais já estabelecidas.

O conceito de vida útil está ligado ao ato de planejar, projetar, construir, utilizar e manter uma estrutura de concreto, o qual remete a outro conceito importante denominado de medida de desempenho.

Para Gonçalves (2011) o desempenho de uma estrutura entende-se como a avaliação do seu comportamento durante sua vida útil. Uma estrutura de concreto terá seu desempenho julgado melhor ou pior, dependendo de como foi seu comportamento mediante as condições de projeto e utilização que lhe foram impostas.

Dentro das discussões técnicas atuais relacionadas a durabilidade do concreto, é de se esperar que seus critérios sejam especificados de forma clara no projeto de estruturas de concreto para as mais diversas formas de exposição. Além disso, existe a consciência crescente da importância de preservação dos recursos naturais mediante a construção de estruturas com vida útil mais prolongada, bem como da produção de materiais alternativos, como os agregados reciclados.

Para que os agregados reciclados de concreto sejam utilizados de forma mais ampla, existe uma necessidade de se conhecer o seu comportamento diante de condições que afetam negativamente as propriedades do concreto.

Para Brandão (2002) apud Tenório (2007), apesar de tantos serem os fatores ligados à durabilidade do concreto, esta característica depende muito da facilidade com que os fluidos (líquidos e gases) podem adentrar e movimentar-se em seu interior, de forma que ela é muito mais dependente da permeabilidade e a capacidade de absorção do compósito, as quais são condicionadas à porosidade, do que de propriedades bastante aceitas, como resistência, módulo de elasticidade e etc.

De fato, segundo Mehta e Monteiro (1994), a maioria dos problemas de durabilidade do concreto tem como fator central um fluido em especial, a água. Além disso, por estar a resistência do concreto também relacionada à porosidade, é possível notar que ainda outros fatores de deterioração, como impacto e abrasão, por exemplo, guardam relação com esta propriedade, o que reforça a necessidade de analisá-la.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a permeabilidade é a principal propriedade frente à durabilidade de concretos, sejam convencionais ou reciclados. As degradações químicas como a carbonatação, ataques por sulfatos e cloretos, etc., são proporcionais à permeabilidade do concreto.

Para Gonçalves (2011), a durabilidade de concretos, sejam eles naturais ou reciclados, incide diretamente na facilidade ou dificuldade do transporte de fluidos dentro do concreto, sendo classificado como um concreto pouco ou muito permeável. Os principais agentes de transporte de fluido no concreto são a água, que pode estar pura ou conter agentes agressivos, como o dióxido de carbono e o oxigênio.

De acordo com Tenório (2007), o agregado reciclado tende a permitir uma densificação da zona de transição e diminuição da microfissuração dessa fase em razão de seu menor módulo de elasticidade permitir a compatibilização de sua deformação com a da pasta. Tal fato poderia levar a uma diminuição da facilidade de movimentação dos fluidos no concreto. Entretanto, o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural, trazendo assim, mais vazios para o composto, podendo também aumentar a conectividade entre os poros do sistema e, conseqüentemente, a facilidade com que fluidos se movam dentro deste.

Carrijo (2005) analisou a porosidade dos concretos produzidos com agregados reciclados separados por faixas de densidade medindo a absorção de água e o índice de vazios do compósito. Foi observado que as duas propriedades cresceram à medida que a relação a/c aumentou e a massa específica do agregado graúdo diminuiu. Porém, essas alterações no concreto foram mais sensíveis às alterações da massa específica dos agregados. Neste caso, a autora constatou que a porosidade do agregado teve efeito mais significativo que sua natureza mineralógica.

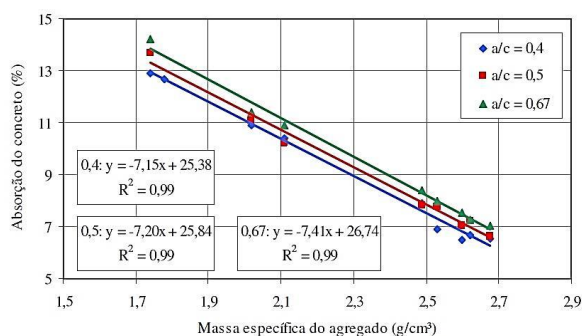


Figura 11 - Absorção de água do concreto em função da massa específica dos AGRC (adaptado de Carrijo, 2005)

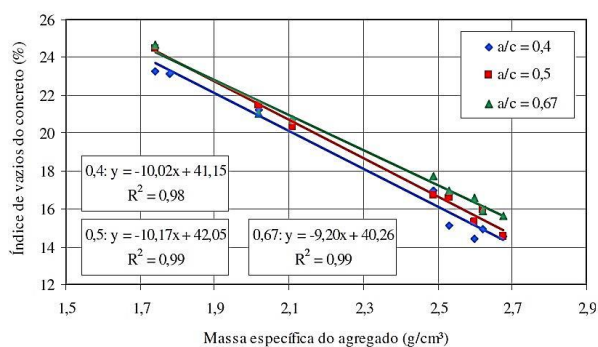


Figura 12 - Índices de vazios do concreto em função da massa específica dos AGRC (adaptado de Carrijo, 2005)

Na avaliação da durabilidade, com ênfase na carbonatação, realizada por Werle (2010) apud Gonçalves (2011), observou-se que a velocidade de carbonatação diminui à medida que é aumentada a resistência do agregado reciclado de concreto incorporado à nova matriz de concreto, ao comparar-se às amostras referenciais. De acordo com a autora este comportamento possui relação com a porosidade do agregado reciclado.

A partir das informações descritas pelos autores citados, conclui-se que a durabilidade do concreto associada à sua porosidade mostra-se influenciada pela porosidade dos agregados, e que concretos reciclados menos porosos, ou seja, mais duráveis, podem ser obtidos por meio da redução da porosidade da fase agregado, na qual pode conseguida através da redução do teor de participação de agregados reciclados na composição de novos concretos ou através da redução da porosidade individual do agregado graúdo reciclado.

2.8 PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS COM (AGRC)

O concreto com agregado graúdo reciclado de concreto pode ser usado tanto para a fabricação de concreto massa, quanto para concreto armado, sempre tomando o cuidado de seguir os critérios normativos. Na Espanha, as exigências normativas permitem que sejam produzidos concretos para fins estruturais com o uso de 20% de substituição de agregado natural por agregado graúdo de concreto.

No Brasil, as exigências normativas limitam-se basicamente a ABNT NBR 15.116/2004, a qual estabelece as diretrizes técnicas para utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, entretanto somente para preparo de concretos sem função estrutural, específicos para serviços de pavimentação.

Segundo Cabral (2007), em pesquisa desenvolvida com agregados reciclados mistos, concluiu que algumas técnicas podem ser utilizadas para se elevar a resistência dos concretos com agregados reciclados a níveis iguais ou superiores às resistências dos concretos convencionais, tais como o uso de adições minerais (sílica ativa, metacaulim, escória de aciaria, de alto-forno ou de cobre) e aditivos superplastificantes. Kou et al (2011) apud Cordeiro (2013) diz que o uso de superplastificantes apesar de tornar o processo mais caro, melhora consideravelmente a trabalhabilidade dos concretos.

A qualidade do concreto de origem também influencia nos resultados. Outros autores como Sanchez e Alaejos (2006) citados por Cordeiro (2013), afirmam que concretos com até 44% de argamassa na sua composição podem ser usados para produção de concretos estruturais.

Limbachiya et al (2012) apud Cordeiro (2013), analisando o comportamento das propriedades dos concretos a medida que se incorporava resíduos, percebeu que com até 30% de substituição obtém –se concretos com resistências mecânicas, durabilidade, retração e fluência a níveis satisfatórios.

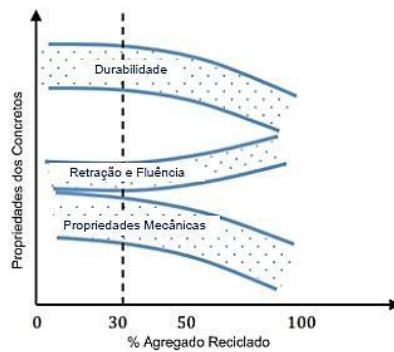


Figura 13 - Comportamento das propriedades dos concretos em função do teor de AGRC

Ettxerberria (2004) apud Cordeiro (2013) conclui que para um teor de 25% de substituição de agregado graúdo, mantendo-se a quantidade de cimento e a relação água/cimento, não se tem alteração nas propriedades mecânicas dos concretos, entretanto o autor aconselha o uso de cimentos com baixa alcalinidade, a fim de evitar futuras reações álcali-agregado.

Segundo Cabral (2007), existe uma técnica para elevar a resistência que é o método de mistura dos constituintes do concreto chamado de double-mixing, onde a diferença para o método tradicional é que a água é adicionada em duas etapas. O objetivo deste método é fazer com que os agregados reciclados tenham contato primeiramente com a argamassa de baixa relação água/cimento, sendo envolvidos por uma camada dessa argamassa, obtendo assim, melhores propriedades na zona de transição.

Pope e Jennings (1992) apud Cordeiro (2013) em sua pesquisa observaram que a mistura em etapas melhora a resistência à compressão e uniformizam a zona de transição. Os autores sugerem separar a ordem de colocação dos materiais, tais como misturar primeiro a argamassa, para em seguida adicionar os demais materiais.

Oyanadel (2009) apud Cordeiro (2013) em sua pesquisa observou que as misturas em duas etapas tiveram maiores resistências à compressão aos 28 dias, do que os misturados pela forma tradicional. O autor pré-misturava a pasta cimentícia (cimento, adição pozolânica e água) e posteriormente incorporava os agregados. Antes da mistura o autor estimava a umidade dos agregados, de maneira a calcular a umidade livre e a quantidade de água a agregar na mistura.

Os resultados foram uma maior viscosidade e coesão da pasta, um aumento de até 18% na resistência das etapas iniciais.

Salas et al (2010) apud Cordeiro (2013) aplicou em sua pesquisa o processo de mistura em duas etapas, para a produção de concretos com agregados reciclados, o objetivo era permitir uma melhor saturação dos agregados reciclados e assim melhorar a aderência entre as partículas dos agregados e a pasta de cimento.

Na primeira etapa da mistura o autor usou agregado reciclado mais cimento, misturando por um minuto, logo em seguida adicionou 50% da água e misturou mais um minuto, em seguida colocou os agregados graúdos e a areia mais o restante de água e misturou tudo por mais dois minutos. O objetivo dessa ordem de mistura era revestir previamente o agregado reciclado com a pasta de cimento, e dessa forma teria uma melhora na resistência da zona de transição. O efeito dessa alteração foi uma melhora na resistência à compressão, uma redução da profundidade de penetração de água.

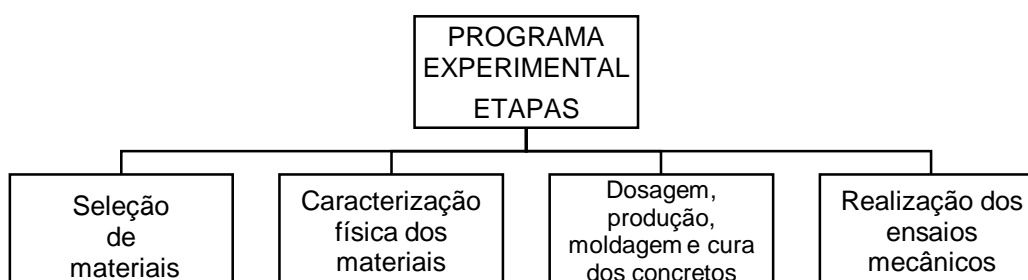
3.0 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental é o processo pelo qual se organizam as atividades necessárias a evolução satisfatória das fases da pesquisa experimental, bem como a análise dos dados e conclusões. Torna-se, portanto, parte imprescindível a toda pesquisa que deseja garantir uma organização em seus procedimentos a fim de alcançar com qualidade os objetivos propostos.

Conforme descrito nos objetivos desta pesquisa, este capítulo descreve os procedimentos experimentais adotados para avaliar a aplicação do agregado graúdo reciclado de concreto em concretos estruturais, que podem ser divididas em 4 etapas, conforme apresenta na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Resumo do Programa Experimental



3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise da aplicação do agregado graúdo reciclado de concreto em concretos estruturais, utilizaram-se os seguintes materiais:

3.2.1 Aglomerante (cimento)

O aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland CP IV da marca Nassau. A opção por este cimento pozolânico decorre do seu baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. De acordo com as especificações do

fabricante, seu alto teor de pozolana, entre 15 e 50% em massa, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes com características de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. O alto teor de pozolana do CP IV confere a este cimento alta impermeabilidade e maior durabilidade. Segundo a Associação Brasileira do Cimento Portland – ABCP, o concreto fabricado com o cimento CP – IV se torna mais impermeável, apresenta resistência mecânica à compressão superior ao concreto de cimento Portland comum à longo prazo. Além disso, sua utilização já é de uso corrente na produção de concretos estruturais na região metropolitana da cidade de Belém/PA.

Para a realização desta pesquisa foi feita a caracterização física do cimento Portland CP IV, para tanto foram realizados ensaios de massa específica (NBR NM 23, ABNT, 2000) e módulo de finura do cimento (NBR NM 11.579, ABNT, 1990). A figura 14 abaixo demonstra o silo de armazenagem e a amostra material utilizado.

Figura 14 - a) Detalhe do silo de cimento CP - IV, b) Amostra de cimento CP - IV utilizada.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

3.2.2 Agregado miúdo natural (areia)

O agregado miúdo é areia natural de granulometria fina proveniente dos silos de armazenagem do próprio Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará – (UFPA), de fácil obtenção no mercado da região metropolitana da cidade de Belém/PA. Para o agregado miúdo foram realizados

ensaios de composição granulométrica (NBR NM 248, ABNT, 2003), determinação de massa unitária (NBR NM 45, ABNT, 2003) e massa específica (NBR NM 52, ABNT, 2009). A figura 15 a seguir demonstra o material utilizado.

Figura 15 - Detalhe da amostra do agregado miúdo natural utilizado



Fonte: próprio autor

3.2.3 Agregado graúdo natural (brita)

O agregado graúdo natural utilizado na pesquisa foi uma brita granítica comercialmente conhecida como brita 01 proveniente dos silos de armazenagem do próprio Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará – (UFPA), de fácil obtenção no mercado da região metropolitana da cidade de Belém/PA. Para o agregado graúdo natural foram realizados ensaios de composição granulométrica (NBR NM 248, ABNT, 2003), determinação de massa unitária (NBR NM 45, ABNT, 2003) e massa específica (NBR NM 53, ABNT, 2009). A figura 16 a seguir demonstra o material utilizado.

Figura 16 - Detalhe do silo e da amostra do agregado graúdo natural utilizado



Fonte: próprio autor

3.2.4 Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)

O agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) utilizado na pesquisa foi produzido a partir da britagem de corpos-de-prova de dimensões de 10 cm x 20 cm, coletados nas dependências do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (LEC/UFPA). As matrizes dos corpos-de-prova foram selecionadas aleatoriamente, sem prévio conhecimento das propriedades físicas e mecânicas.

Após a coleta das amostras de resíduos, iniciou-se o processo de beneficiamento do material para a produção dos agregados. Para tanto os corpos-de-prova de concreto foram inicialmente fragmentados em partes menores e em seguida cominuídos em um britador de mandíbulas do próprio Laboratório de Engenharia Civil (LEC/UFPA).

Para a conferência das dimensões dos grãos utilizou-se uma peneira mecânica vibratória, sendo a faixa granulométrica do material limitada em passante na peneira # 25 mm e retido na peneira # 4,8 mm. Ao final do processo, obteve-se agregados graúdos reciclados de concreto na granulometria semelhante ao da brita 01 natural.

Para a amostra beneficiada de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) foram realizados ensaios de composição granulométrica (NBR NM 248, ABNT, 2003), determinação de massa unitária (NBR NM 45, ABNT, 2003), massa específica (NBR NM 53, ABNT, 2009) e abrasão Los Angeles (NBR NM 51, ABNT, 2001). A figura 17 a seguir demonstra as etapas de produção do agregado graúdo reciclado de concreto utilizado.

Figura 17 - a) corpos-de-prova; b) britador de martelo; c) peneirador mecânico; d) amostra de AGRC; e) Máquina de abrasão Los Angeles.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Próprio autor

3.2.5 Água

A água utilizada na pesquisa é proveniente da estação de tratamento da rede de abastecimento da própria Universidade Federal do Pará (UFPA), na qual atende aos requisitos da NBR (ABNT) 15.900-1.

3.3 DOSAGEM, PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CONCRETOS

3.3.1 Dosagem experimental dos concretos

Para a dosagem dos concretos foi adotado o método IPT/EPUSP proposto por Helene e Terzian (1992). Este método baseia na determinação equilibrada entre teor de argamassa e relação água/cimento, permitindo às misturas, condições de homogeneidade, coesão, consistência e trabalhabilidade adequadas. A escolha do método de dosagem decorre de sua versatilidade, podendo ser usado para diversas situações comuns em canteiro de obras, sendo considerado de relativa facilidade tanto para dosagem dos materiais quanto para controle da mistura.

Este método de dosagem adota a utilização de um traço de referência intermediário, permitindo uma proporção de utilização entre materiais com consumo de cimento mais econômico e conseqüentemente a produção de concretos a um menor custo.

Para a dosagem dos materiais foi definido um traço intermediário em que foi mantida fixa a relação entre aglomerante:agregados secos de (1:5), este valor foi escolhido por ser considerado um traço usual na cidade de Belém. Para os teores de argamassa (α) e relação água/cimento, foram admitidas variações

conforme o tipo e teor de mistura entre agregados graúdos, uma vez que os agregados graúdos reciclados utilizados apresentarem-se na condição de saturação natural. Para a avaliação da consistência das misturas, foi mantido também fixo um abatimento no valor de 70 ± 20 mm, por apresentar a trabalhabilidade usual em obras civis.

Ressalta-se que tendo em vista o método IPT/EPUSP admitir a dosagem dos agregados em massa, e que os agregados graúdos naturais e reciclados utilizados nas misturas apresentarem valores de massas específicas diferentes, houve a necessidade de compensação de massa entre as amostras de agregados graúdos utilizadas nas misturas de concreto.

Para os traços de concreto propostos foram dosados inicialmente dois traços sem mistura, o primeiro considerando 100% de agregado graúdo reciclado de (AGRC) e o segundo 100% de agregado graúdo natural (AGN), sendo este último considerado o traço de referência, para fins de comparação com os demais traços.

Em seguida, foram dosadas outras três misturas, considerando os teores de substituição de 10%, 20% e 30% de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) por agregado graúdo natural (AGN). A Figura 18 apresenta a dosagem dos materiais utilizados para a produção dos concretos.

Figura 18 - Detalhe da pesagem e dosagem dos materiais para produção dos concretos



Fonte: Próprio autor

A identificação dos corpos-de-prova confeccionados no programa experimental, de acordo com o traço do concreto, tipo ou mistura de agregado graúdo e o teor de substituição de agregado graúdo reciclado de concreto por agregado graúdo natural são apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Identificação dos corpos de prova do programa experimental

Traço Concreto	Tipo/Mistura Agregado graúdo	Teor de substituição	Identificação
1 : 5,0	AGN	100%AGN	MAGN100%
	AGRC	100%AGRC	MAGRC100%
	AGRC+AGN	90%AGRC+10%AGN	MAGN10%
	AGRC+AGN	80%AGRC+20%AGN	MAGN20%
	AGRC+AGN	70%AGRC+30%AGN	MAGN30%

A Tabela 4 a seguir apresenta o resumo das dosagens experimentais dos materiais para todos os teores de substituição de agregados considerados.

Tabela 4 - Resumo das dosagens experimentais para os concretos

MAGN100%			Traço Unitário				Consumo Kg/m ³			
α	m	c	a	p	a/c	Cc	Ca	Cp	Cágua	
0,53	5	1	2,18	2,82	0,50	363,24	791,87	1.024,34	181,62	
MAGRC100%			Traço Unitário				Consumo Kg/m ³			
α	m	c	a	p	a/c	Cc	Ca	Cp	Cágua	
0,56	5	1	2,36	2,64	0,62	337,34	796,13	890,59	209,15	
MAGN10%			Traço Unitário				Consumo Kg/m ³			
α	m	c	a	p	a/c	Cc	Ca	Cp	Cágua	
0,55	5	1	2,30	2,70	0,60	340,47	783,09	919,28	204,28	
MAGN20%			Traço Unitário				Consumo Kg/m ³			
α	m	c	a	p	a/c	Cc	Ca	Cp	Cágua	
0,54	5	1	2,24	2,76	0,57	344,88	772,52	951,86	196,58	
MAGN30%			Traço Unitário				Consumo Kg/m ³			
α	m	c	a	p	a/c	Cc	Ca	Cp	Cágua	
0,54	5	1	2,24	2,76	0,54	350,13	784,29	966,35	189,07	

* α : teor de argamassa; a/c: relação água/cimento; m: materiais secos; c: cimento; a: areia; p: agregado graúdo; Cc: consumo de cimento; Ca: consumo de agregado miúdo (areia); Cp: consumo de agregado graúdo.

3.3.2 Produção dos concretos

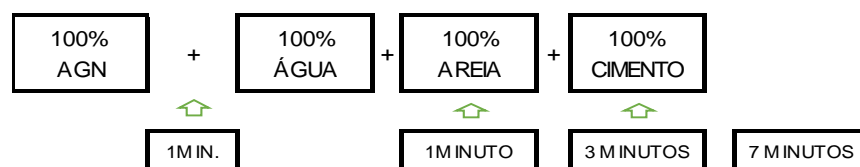
Para a produção dos concretos foram levados em consideração fatores como a seqüência dos materiais no misturador e o tempo de mistura, pois a eficiência na mistura dos concretos influenciam no comportamento e nas

propriedades do concreto, uma vez que distribuem melhor as partículas de cimento, água e agregado.

Para o traço de referência (MAGN), foi utilizado o processo de mistura convencional, onde com a betoneira já funcionando, adicionou-se inicialmente 100% do agregado graúdo (AGN) e mais 100% da água, misturando-se por um minuto. Em seguida, adicionou-se 100% do agregado miúdo (areia), misturando-se por mais um minuto e por fim adicionou-se 100% do cimento, misturando-se por mais três minutos.

Após os cinco minutos iniciais de mistura, houve uma parada no procedimento de mistura para a realização da limpeza das pás da betoneira. Logo em seguida, o concreto foi misturado por mais dois minutos, totalizando um tempo de sete minutos de mistura. Finalizado o processo de mistura, foi realizado o procedimento para a avaliação da consistência do concreto pelo método do abatimento do tronco de cone, conforme prescreve a norma NBR NM 67/1998. A seqüência de colocação dos materiais na betoneira e o tempo de mistura estão apresentados no fluxo da Figura 19 a seguir.

Figura 19 - Ordem de colocação dos materiais e tempo de mistura do concreto de referência



Conforme comentado na bibliografia de referência, em se tratando de produção de concretos para fins estruturais utilizando agregados graúdos reciclados de concreto, um dos grandes desafios está em justamente obter uma condição de saturação mais homogênea possível dos agregados reciclados para melhorar a aderência entre as partículas dos grãos e a pasta de cimento, possibilitando assim ajustar de forma satisfatória quantidades de argamassa a relações água/cimento de forma a garantir às misturas certa homogeneidade, consistência, coesão e trabalhabilidade, tendo em vista as características

intrínsecas do agregado reciclado relacionadas à sua forma, dimensão, textura, resistência e porosidade dos grãos.

Para reduzir as condições desfavoráveis das características físicas apresentadas pelo agregado graúdo reciclado de concreto utilizado nas dosagens, com vistas a garantir melhores condições de resistência dos concretos, sobretudo na zona de transição entre pasta de argamassa e agregado graúdo das misturas, optou-se em adotar uma seqüência de produção separando a ordem de colocação dos materiais, conforme sugere Salas et al (2010) citado por Cordeiro (2013).

Para o traço (MAGRC) e demais misturas (MAGN10%), (MAGN20%) e (MAGN30%), foi utilizado o processo de mistura em duas etapas, com o objetivo de permitir uma saturação mais homogênea dos agregados reciclados visando melhorar as condições de aderência entre as partículas dos agregados e a pasta de cimento.

Para este processo de mistura, com a betoneira já funcionando, colocaram-se inicialmente 100% do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), misturando-o por um minuto para promover a esfoliação de parte do material fino presente na argamassa antiga aderida ao agregado de origem. Em seguida adicionou-se 100% do cimento, misturando os materiais por mais um minuto, logo em seguida adicionou-se 50% da água, misturando-se tudo por mais um minuto para revestir previamente os agregados reciclados com pasta de cimento.

Na seqüência colocou-se 100% da areia mais o percentual definido da fração percentual de agregado graúdo natural (AGN), mais os 50% restante da água, misturando-se tudo por mais dois minutos.

Após os cinco minutos iniciais de mistura, houve uma parada no procedimento de mistura para a realização da limpeza das pás da betoneira. Logo em seguida, o concreto foi misturado por mais dois minutos, totalizando um tempo de sete minutos de mistura. Finalizado o processo de mistura, foi realizado o procedimento para a avaliação da consistência do concreto pelo método do abatimento do tronco de cone, conforme prescreve a norma NBR NM 67/1998. A seqüência de colocação dos materiais na betoneira e o tempo de

mistura para produção dos concretos reciclados estão apresentadas na Figura 20 seguir.

Figura 20 - Ordem de colocação dos materiais e tempo de mistura dos concretos reciclados

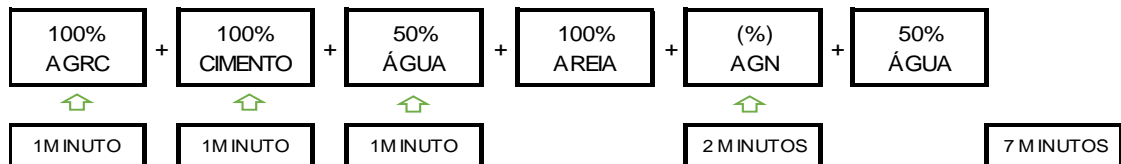
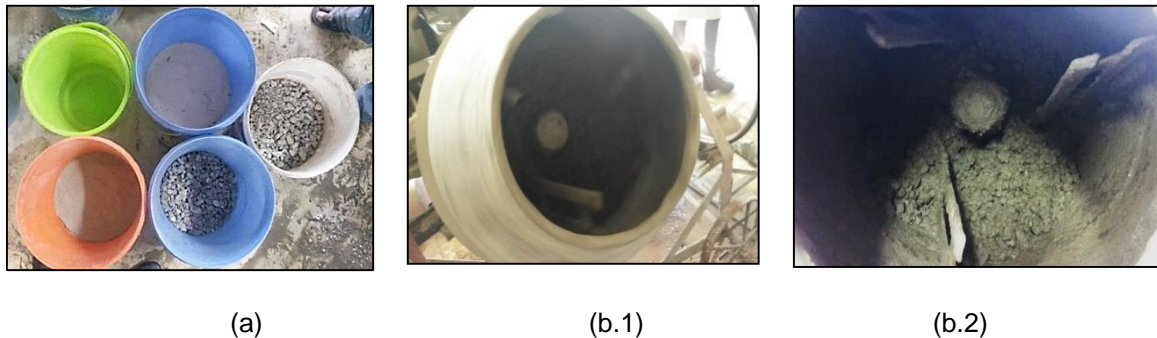


Figura 21 - a) Dosagem dos materiais; b.1) e b.2) Produção dos concretos em betoneira com eixo inclinado.



Fonte: Próprio autor

3.3.3 Moldagem e cura dos concretos

Após a produção dos concretos foram moldados 30 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm. A moldagem foi realizada conforme a prescrição da NBR 5738 (ABNT, 2003). Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos com filme plástico e mantidos no local de ensaio durante as primeiras 24 horas. Posteriormente, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida para realização do processo da cura. Nas idades de 7 e 28 dias, 20 corpos-de-prova foram ensaiados para determinação da resistência à compressão simples, e aos 28 dias, outros 10 corpos-de-prova foram ensaiados para determinação do módulo de elasticidade estático. A Figura 21 apresenta as etapas do processo de moldagem dos corpos-de-prova logo após a realização

do ensaio de consistência e o detalhe de corpos-de-prova armazenados em câmara úmida sofrendo processo de cura.

Figura 22 - Etapas do processo de moldagem e cura dos corpos-de-prova



(a)



(b)



(c)



(d)

a) e b) Moldagem dos corpos-de-prova; c) Proteção dos corpos-de-prova com filme plástico;
d) Detalhe dos corpos-de-prova armazenados em câmara úmida para processo de cura

Fonte: Próprio autor

3.4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os métodos empregados para o estudo das propriedades mecânicas dos concretos confeccionados são os apresentados na seqüência, sendo todos os ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará, com matrizes de concretos somente com agregado graúdo reciclado (M_{AGRC}), somente com agregado graúdo natural (M_{AGN}) e nos teores de 10%, 20% e 30% de substituição de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) por agregado graúdo natural (AGN).

Para a condução da pesquisa, foram realizados ensaios mecânicos nos corpos-de-prova tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, conforme mostra a Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Ensaios mecânicos realizados nos corpos-de-prova de concreto

Ensaio Realizado	Estado (Concreto)	Idade (dias)	Norma Utilizada
Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	fresco	moldagem	ABNT NBR NM 67/1998
Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos	endurecido	7 e 28	ABNT NBR 5739/2007
Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão	endurecido	28	ABNT NBR 8522/2008

3.4.1 Ensaio de consistência do concreto

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR NM 67/2008. Neste ensaio, foi colocada uma amostra de concreto dentro de uma forma tronco-cônica, apoiada sobre uma placa metálica, em três camadas igualmente adensadas com uma haste metálica, cada camada recebendo 25 golpes. Após esse processo retirou-se o molde lentamente, levantando-o verticalmente, onde em seguida foi medida com uma trena a diferença entre a altura do molde invertido e a altura da massa de concreto depois de assentada. A figura 22 mostra a seqüência de procedimentos do ensaio.

Figura 23 - Etapas do ensaio de consistência do concreto



(a)



(b)



(c)



(d)

a) Moldagem do corpo-de-prova; b) Adensamento da amostra de concreto;
c) Desfôrma do molde cônico metálico; d) Medida do abatimento da amostra de concreto.

Fonte: Próprio autor

3.4.2 Ensaio de resistência à compressão simples

Os corpos-de-prova de concreto foram ensaiados de acordo com a norma NBR 5739 (2007) – “Concretos – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio” nas idades de 7 e 28 dias. Antes da execução dos ensaios as bases dos corpos-de-prova foram preparadas de acordo com o estabelecido na norma ABNT NBR 5738/2015. Para cada idade foram ensaiados 2 exemplares por traço de concreto, totalizando 20 (vinte) ensaios. A figura 24 apresenta a realização dos ensaios de compressão simples.

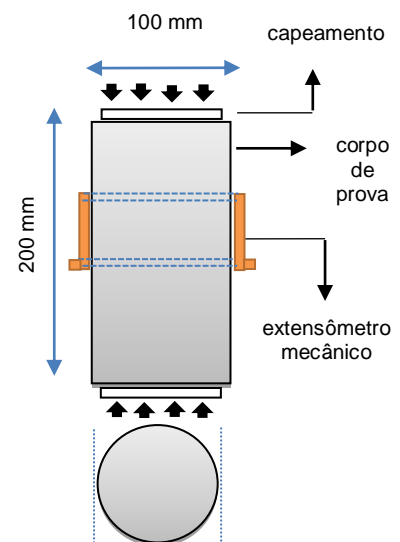
Figura 24 - a) Ensaio de resistência à compressão; b) Detalhe das dimensões dos corpos-de-prova



(a.1)



(a.2)



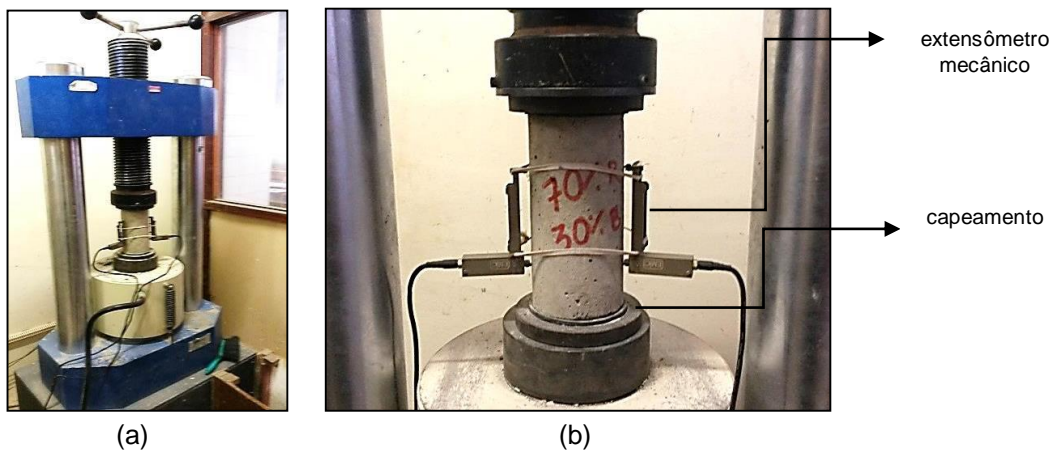
(b)

Fonte: Próprio autor

3.4.3 Ensaio do módulo de elasticidade estático

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade dos concretos foi realizado conforme prescreve a norma NBR 8522 (2008) – “Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama – tensão-deformação – Método de ensaio”, para corpos-de-prova na idade de 28 dias. Para a realização do ensaio, foi adotado o plano de carga III, sendo que para a aplicação da carga e leitura das deformações, a tensão foi aumentada de forma regular à velocidade de $0,25 \pm 0,05$ Mpa/s, até que fosse alcançada uma tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto, sendo a leitura dos resultados aferida utilizando o método com o extensômetro mecânico, adotando-se um intervalo de tempo de 60 segundos para a realização das medidas de deformação. Foram ensaiados 2 corpos-de-prova por traço de concreto, totalizando 10 (dez) ensaios. A figura 25 apresenta a realização dos ensaios do módulo de deformação estático.

Figura 25 - a) Ensaio do módulo de elasticidade dos concretos;
b) detalhe da instalação do extensômetro mecânico no corpo-de-prova



Fonte: Próprio autor

4.0 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa sobre a aplicação do agregado graúdo reciclado de concreto em concretos estruturais. Para tanto, serão avaliados e interpretados os resultados obtidos dos ensaios de caracterização física dos agregados, consistência pelo abatimento do tronco de cone, de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade estático.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Para a análise da caracterização física dos agregados, foi determinada a composição granulométrica, módulo de finura, abrasão Los Angeles, massa específica e massa unitária dos agregados miúdo natural e graúdos naturais e reciclados de concreto, pois segundo a bibliografia consultada, tais propriedades influenciam diretamente na trabalhabilidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade e consumo de cimento das misturas de concreto.

4.1.1 Aglomerante (cimento)

O cimento utilizado para a realização da pesquisa foi o cimento Portland pozolânico (CP-IV), de baixo calor de hidratação, de alta impermeabilidade, sendo resistente e ideal para ambientes sujeitos a ataques por sulfatos. Este cimento apresenta-se mais fino que os demais pozolânicos, proporciona maior viscosidade da pasta nas misturas de concreto, melhorando o arranjo físico dos grãos de agregado, garantindo melhores condições de trabalhabilidade. As propriedades do cimento CP-IV, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 6 e de maneira geral, atendem às especificações da NBR ABNT 5736/1991, exigidas para produção de concretos.

Tabela 6 - Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP - IV

Propriedades	Resultados
Óxido de Magnésio (MgO)	(3,15) ≤ 6,5
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	(2,23) ≤ 4,0
Perda ao fogo	(3,33) ≤ 4,5
Expansibilidade a quente (mm)	(0,14) ≤ 5,0
Tempo de pega (min)	início (4,25) ≥ 1 fim (5,03) ≤ 12,0
Retido # 75 mm (Módulo de Finura) NBR NM 11.579/1990	≤ 8,0
Massa Específica média (g/cm ³)	2,83
Resistência à compressão (Mpa)	7 dias ≥ 20,0 28 dias ≥ 32,0

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante

4.1.2 Agregado miúdo natural

A Tabela 7 e a Figura 25 apresentam respectivamente as características físicas e a curva da composição granulométrica do agregado miúdo natural utilizado nas amostras de concreto.

Tabela 7 - Composição granulométrica e características físicas do agregado miúdo natural

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR ABNT 7211 (2009)			
	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
			zona util.	zona ótima	zona util.	zona ótima
4,80	-	-	0	0	5	10
2,40	5,03	5,03	0	10	20	25
1,20	12,03	17,06	5	20	30	50
0,60	22,86	39,92	15	35	55	70
0,30	31,80	71,72	50	65	85	95
0,15	19,01	90,73	85	90	95	100
Fundo	9,27	100,00	100	100	100	100
Módulo de Finura		2,24	1,55 - 2,2	2,2	2,9 - 3,5	2,9
Diâmetro Máximo (mm)		2,40				
Massa Específica (g/cm³)		2,62		ABNT NBR 52/2009		
Massa Unitária (g/cm³)		1,39		ABNT NBR 45/2006		

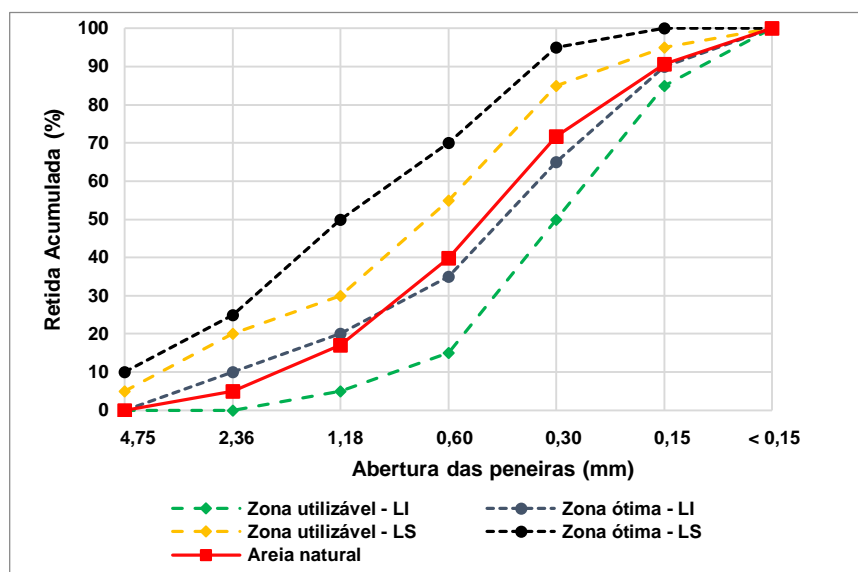


Figura 26 - Curvas granulométricas do agregado miúdo natural

Analisando os dados obtidos da Tabela 7 e da Figura 26, observa-se que o agregado miúdo natural possui granulometria fina, entretanto não se enquadra numa zona apenas, transita pelo limite inferior entre as zonas utilizável e ótima. No geral o agregado miúdo atende as recomendações para seu emprego na produção de concretos.

O agregado miúdo apresentou uma distribuição irregular de massa retida individual em cada uma das peneiras da faixa # 2,4 a 0,15 mm (Tabela 7) e a julgar pelo valor do módulo de finura, o agregado miúdo mostrou-se realmente de granulometria fina, pois seu teor de grãos retidos nas peneiras de maior abertura (# 2,4 a 1,2 mm) por exemplo, foi menor. Apresenta também valor de massa específica elevada, que associado ao valor da massa unitária, confirma a menor porosidade da mesma.

4.1.3 Agregado graúdo natural (AGN)

A Tabela 8 e a Figura 27 apresentam as características físicas e as curvas de composição granulométrica dos agregados graúdos naturais e reciclados utilizados nas amostras de concreto.

Tabela 8 - Composição granulométrica e características físicas dos agregados graúdos naturais (AGN) e reciclados de concreto (AGRC)

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA (AGN)		AMOSTRA (AGRC)		NBR ABNT 7211 (2009)			
	Massa (média)		Massa (média)		Retida Acumulada (% em massa)			
	Retida (%)	Acumulada (%)	Retida (%)	Acumulada (%)	Zona Granulométrica d/D^a			
					4,75 / 12,5	9,5 / 25	19 / 31,5	25 / 50
19,00	7,50	7,50	5,04	5,04	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100
12,50	82,51	90,01	71,34	76,38	-	-	-	-
9,50	5,51	95,52	13,02	89,40	2 - 15	80 - 100	95 - 100	-
4,80	4,48	100,00	10,60	100,00	80 - 100	95 - 100	-	-
2,40	-	100,00	-	100,00	95 - 100	-	-	-
1,20	-	100,00	-	100,00	-	-	-	-
0,60	-	100,00	-	100,00	-	-	-	-
0,30	-	100,00	-	100,00	-	-	-	-
0,15	-	100,00	-	100,00	-	-	-	-
Fundo	-		1,73					
Módulo de Finura		6,93		6,71	a - zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo. b - em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5% em apenas um dos limites marcados com 2.			
Diâmetro Máximo (mm)		25		19				
Massa Específica (g/cm ³)		2,64		2,42				
Massa Unitária (g/cm ³)		1,42		1,12				
Abrasão Los Angeles (%)		-		42,7				

Analisando os dados obtidos da Tabela 8 e Figura 27 respectivamente, observa-se pelo valor do módulo de finura que o agregado graúdo natural apresenta-se com granulometria ligeiramente mais grossa que o agregado graúdo reciclado. Os grãos de ambos os agregados apresentam-se predominantemente na forma lamelar. O agregado natural apresenta-se com superfície mais regular e lisa, enquanto que o agregado reciclado apresenta-se com superfície mais irregular e rugosa. A julgar pelo formato da superfície, o agregado reciclado apresenta maior área superficial que o agregado natural, o que certamente pode ocasionar em maior necessidade de pasta para recobrimento e lubrificação dos grãos.

Também pode ser observado da Tabela 8 que o valor da massa específica do agregado graúdo reciclado de concreto apresenta-se menor que a do agregado graúdo natural. Tal indício revela que o agregado graúdo reciclado possui maior porosidade, o que pode ser atribuída a presença de argamassa antiga aderida ao seu agregado de origem. Segundo a bibliografia de referência, essa maior porosidade indica menor resistência, que pode contribuir

negativamente para a diminuição das resistências mecânicas dos concretos reciclados.

Quanto aos valores de massa unitária, o agregado graúdo natural apresenta valor menor em relação ao agregado graúdo reciclado, indicando que o agregado reciclado apresenta maior índice de vazios por unidade de volume em relação ao agregado natural. A bibliografia de referência comenta que essa diferença deve-se ao formato mais irregular dos grãos, onde as partículas chatas e alongadas têm uma tendência maior de reter água no instante em que o concreto está sendo adensado, tornando a zona de transição mais porosa e propensa à fissuração. Além disso, as partículas angulosas exigem mais água de amassamento, pois apresentam áreas superficiais maiores para mesmo volume, e necessitam de mais água de molhagem.

Os agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) apresentaram valores elevados de perda por abrasão, superiores a 40%, e se mostraram mais suscetíveis a esse tipo de desgaste. De acordo com a bibliografia de referência, esse maior desgaste deve-se a quantidade de argamassa antiga aderida aos grãos do (AGRC). Apesar deste resultado, os agregados reciclados de concreto foram considerados aptos a serem utilizados na fabricação de concretos, tendo em vista que as normas NBR 6465/1984 e a ASTM C33 somente consideram inadequados para esse fim, os agregados que apresentam perdas por abrasão superiores a 50% em massa.

A Figura 27 compara graficamente também as distribuições granulométricas dos agregados graúdos naturais, reciclados e respectivos teores de misturas, enquanto que as propriedades granulométricas e físicas detalhadas das misturas são comparadas na Tabela 9 a seguir.

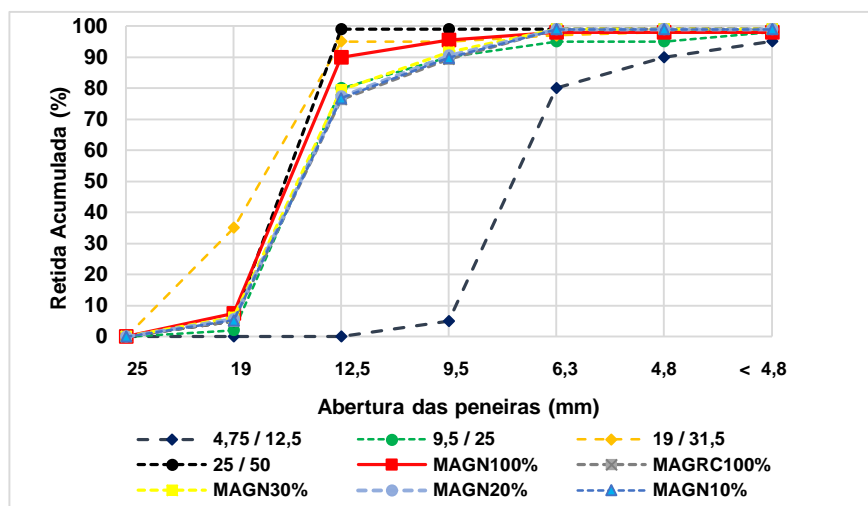


Figura 27 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclados

A Tabela 8 mostra que os agregados graúdos naturais e reciclados de concreto têm granulométricas ligeiramente diferentes, mas que se enquadram nas zonas granulométricas especificadas na NBR 7211(2009). O agregado graúdo natural encaixa-se na zona utilizável 19/31,5, enquanto que o agregado graúdo reciclado de concreto na zona utilizável 19/25,0. O módulo de finura e a distribuição granulométrica mostram que os agregados graúdos reciclados são ligeiramente mais finos que os agregados graúdos naturais.

Pelos dados obtidos da Tabela 8, observa-se que os resultados de massa específica e massa unitária mostram que o agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) é mais leve que o agregado graúdo natural (AGN). Este comportamento mostra-se compatível com o encontrado na bibliografia de referência e ocorre basicamente devido ao tipo de agregado constituinte do agregado de origem e a porosidade da argamassa antiga aderida ao agregado reciclado.

Tabela 9 - Composição granulométrica e características físicas das misturas otimizadas de agregados graúdos naturais e reciclados de concreto

Abertura das peneiras (mm)	(MAGN10%)		(MAGN20%)		(MAGN30%)	
	Massa (Média)		Massa (Média)		Massa (Média)	
	Retida (%)	Acumulada (%)	Retida (%)	Acumulada (%)	Retida (%)	Acumulada (%)
19,00	5,24	5,24	5,65	5,65	6,15	6,15
12,50	71,60	76,84	71,63	77,28	73,22	79,37
9,50	12,92	89,76	13,26	90,54	12,12	91,49
4,80	10,24	100,00	9,46	100,00	8,51	100,00
2,40	-	100,00	-	100,00	-	100,00
1,20	-	100,00	-	100,00	-	100,00
0,60	-	100,00	-	100,00	-	100,00
0,30	-	100,00	-	100,00	-	100,00
0,15	-	100,00	-	100,00	-	100,00
Fundo	-		-		-	
Módulo de Finura		6,72		6,73		6,77
Diâmetro Máximo (mm)		19		19		25
Massa Específica (g/cm³)		2,44		2,46		2,49
Massa Unitária (g/cm³)		1,15		1,18		1,21

Pelos dados obtidos da Tabela 9, observa-se que conforme se aumenta os teores de substituição de (AGRC) por (AGN), as massas específica e unitária de cada mistura também aumentam, tendo em vista o agregado graúdo natural apresentar maiores valores para tais propriedades mecânicas.

Analisando a Figura 27, observa-se pouca variação granulométrica das misturas MAGN10%, MAGN20% e MAGN30%, em relação à composição granulometria dos agregados totalmente reciclados (MAGRC). As curvas granulométricas apresentaram pequena tendência de aproximação com a curva granulométrica do agregado graúdo natural. Entretanto esta tendência de aproximação indica que conforme os teores de substituição aumentam, as misturas vão ficando gradativamente mais densas e com menos espaços vazios, melhorando as características físicas e mecânicas das misturas, o que pode ser fator positivo para a produção de concretos.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados nos concretos, correlacionando a influência dos teores de substituição de 10%, 20% e 30% de (AGRC) por (AGN) nas propriedades mecânicas de consistência, resistência à compressão simples e módulo de elasticidade estático dos concretos produzidos.

4.2.1 Consistência

Para a avaliação da consistência do concreto foi utilizado o ensaio pelo abatimento do tronco de cone descrito na NBR NM 67/2008, que é um método prático, rápido e fácil de usar, tanto em laboratório quanto em obra. Este ensaio informa em termos relativos sobre a relação água/materiais secos e permite determinar de maneira indireta, a variação da relação água/cimento.

A Tabela 10 mostra a relação dos abatimentos obtidos nos concretos em função do teor de argamassa e do fator água/cimento utilizado nas dosagens.

Tabela 10 - Relação do abatimento dos concretos em função do teor de argamassa e do fator água/cimento das misturas

Teor de argamassa (α)	Mistura Agregado	Relação (a/c)	1º Abatimento (mm)	Ajuste
0,56	MAGRC 100%	0,62	40	70
0,55	MAGN 10%	0,60	50	70
0,54	MAGN 20%	0,57	60	70
0,54	MAGN 30%	0,54	70	-
0,53	MAGN 100%	0,50	70	-

Analisando os dados da Tabela 10 observa-se que para manter os valores de abatimento dos concretos reciclados nas mesmas condições de consistência e trabalhabilidade que a do concreto de referência, houve a necessidade de ajustes no teor de argamassa e na relação água/cimento das misturas dos compósitos. Os concretos reciclados apresentaram abatimentos iniciais mais

baixos que o concreto de referência, mesmo assim as misturas apresentaram-se relativamente moldáveis.

Foi constatado que à medida que os agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) foram sendo substituídos por agregados graúdos naturais (AGN), a teores crescentes de 10%, 20% e 30%, possibilitou a diminuição gradativa da porcentagem ideal de argamassa das misturas, de modo a se manter as mesmas condições de consistência e coesão previamente atingidas pelo concreto de referência.

Os valores iniciais relativamente menores de abatimento para os concretos reciclados deve-se segundo a bibliografia de referência, a maior absorção de água, forma mais irregular e heterogênea e textura superficial mais áspera e porosa dos grãos de (AGRC), atribuindo a essas misturas maior aspereza em consequência da menor quantidade de cimento presentes nas maiores relações de a/c, características essas que acabam reduzindo a água livre da pasta, proporcionando maior travamento nas misturas dos concretos.

Para os concretos reciclados, verifica-se relativa melhora de trabalhabilidade das misturas conforme se aumenta o teor de substituição de (AGRC) por (AGN). À medida que os teores aumentam, sobretudo a partir de 20% de substituição, ocorre uma tendência de diminuição do efeito de aspereza, rugosidade e porosidade, característicos dos agregados reciclados. A diminuição desta tendência permitiu a utilização de menor quantidade de argamassa para os traços com maior incorporação de agregados naturais.

Outro fator que permitiu melhorar as condições de consistência e trabalhabilidade das misturas de concretos reciclados foi a adoção do processo de mistura da água em duas etapas e a mudança da ordem de colocação dos materiais na betoneira. A aplicação da sequência de mistura com a colocação de (AGRC) mais 50% de água e 100% do cimento permitiu aumentar a viscosidade e coesão da pasta.

Esse procedimento apenas confirma os comentários da bibliografia de referência, pois gerou uma fina camada de pasta de cimento sobre a superfície dos (AGRC), reduzindo assim a porosidade presente na argamassa antiga aderida, bem como os espaços vazios existentes no agregado de origem,

reduzindo a profundidade de penetração da água nos poros dos grãos para melhorar as condições de resistência da zona de transição da mistura.

De um modo geral, foi mais difícil obter valor fixo de abatimento para os concretos reciclados que para o concreto de referência. Essa dificuldade está relacionada principalmente as características físicas dos agregados reciclados, tais como forma irregular, aspereza e porosidade dos grãos.

A forma e a textura superficial dos agregados são basicamente os fatores que podem alterar a trabalhabilidade de misturas de concreto com traços iguais. Portanto, o aumento da necessidade de argamassa está relacionado com a maior quantidade de AGRC nas misturas e pode ser atribuído basicamente à textura superficial dos agregados reciclados, muito mais rugosa, que faz com que haja a necessidade de adição de maior quantidade de materiais finos para envolver completamente os grãos e proporcionar a mesma interação entre os materiais, de modo a se obter uma trabalhabilidade equivalente.

O teor crescente de substituição de (AGRC) por (AGN), a partir de 20% e 30%, também afetou a obtenção de abatimento dos concretos, de forma que quanto maior foi esse teor, mais facilmente trabalháveis ficaram as misturas, facilitando a fixação dos abatimentos.

4.2.2 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples do concreto é uma das propriedades mecânicas mais importantes em termos de desempenho estrutural. A resistência está ligada diretamente à capacidade dos materiais do concreto de resistir a tensões sem que ocorra ruptura. Quando se estuda concretos reciclados, de uma forma geral, a resistência está relacionada além do fator água/cimento, também à porosidade dos agregados, da matriz de cimento e da zona de transição entre matriz e agregado, sendo que quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende a ser sua resistência.

Para este trabalho os resultados médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples para as idades de cura de 7 e 28 dias estão

expressos em (Mpa) e são apresentados na Tabela 11 e na Figura 28 a seguir. Os valores individualizados são apresentados nos apêndices.

Tabela 11 - Valores médios das resistências à compressão dos concretos aos 7 e 28 dias

Teor arg. (%) (α)	Traços Unitários			Identificação	Resistência à compressão (Mpa)		
	1	a	p		a/c	7 dias	28 dias
56	1	2,36	2,64	0,62	MAGRC 100%	10,03	18,38
55	1	2,30	2,70	0,60	MAGN 10%	11,76	19,74
54	1	2,24	2,76	0,57	MAGN 20%	12,05	21,30
54	1	2,24	2,76	0,54	MAGN 30%	15,20	23,47
53	1	2,18	2,82	0,50	MAGN 100%	14,94	24,76

Onde: α = teor de argamassa; a/c = relação água/cimento; MAGRC = mistura 100% AGRC; MAGN = mistura 100% AGN

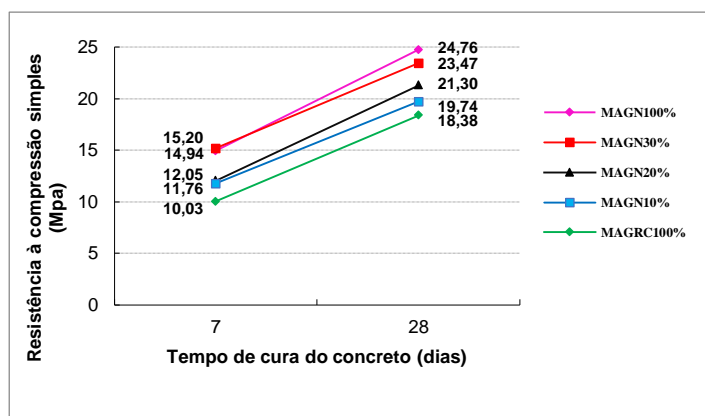


Figura 28 - Variação da resistência à compressão dos concretos aos 7 e 28 dias

Analisando os dados da Tabela 11 e da Figura 28 respectivamente, observa-se que todas as misturas de concretos reciclados apresentaram valores médios de resistência à compressão simples menores que as do concreto de referência. Entretanto, conforme os teores de substituição foram crescendo, sobretudo a partir de 20% e 30% nas misturas com a incorporação de agregado graúdo natural (AGN), os concretos já apresentaram tendência de crescimento, enquadrando-se dentro de valores de resistência aceitáveis para concretos estruturais.

Percebe-se também o desenvolvimento de resistência à compressão mais tardia para todos os concretos aos 7 dias de cura, resultado esse já esperado, pois o aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP IV, rico em material pozolânico. A reação pozolânica por ser mais lenta faz com que o concreto desenvolva a resistência mais tardiamente, entre 7 e 15 dias após a mistura.

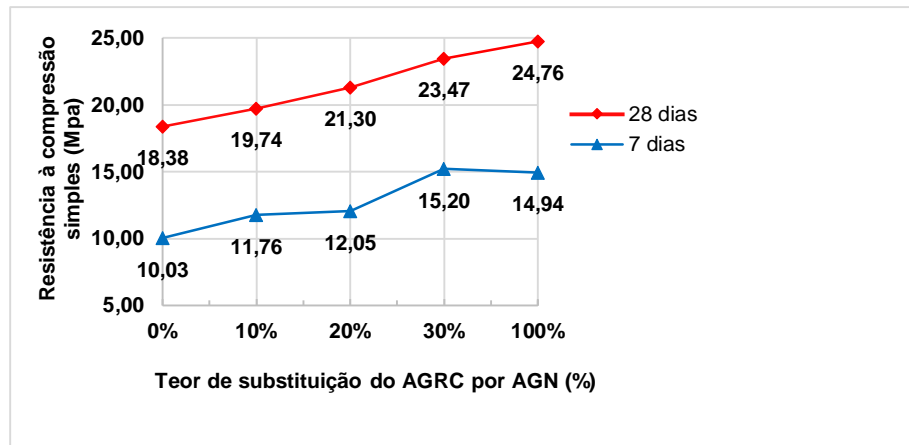


Figura 29 - Variação da resistência à compressão dos concretos em função dos teores de substituição de AGRC por AGN aos 7 e 28 dias

Pelos dados da Figura 29, constata-se tendência de crescimento de resistência à compressão dos concretos reciclados a partir do aumento crescente do teor de substituição de (AGRC) por (AGN). A explicação mais provável, baseado na bibliografia de referência, é que com a substituição crescente de (AGRC) por (AGN) nas misturas de concreto, ocorra uma perda gradativa da porosidade entre os grãos de agregados (reciclados e naturais), na pasta de cimento, em função da redução gradual da relação água/cimento nas misturas, bem como na zona de transição, melhorando as condições de resistências dos compósitos.

Observa-se também pela Figura 29, que em relação a mistura somente com AGRC (MAGRC), na medida em que se aumenta os teores de substituição de 10%, 20% e 30%, os concretos apresentam ganho de resistência à compressão de 17,24%, 20,14% e 51,54% para os 7 dias e de 7,40%, 15,89% e 27,69% para os 28 dias, confirmando que a incorporação de (AGN) em misturas

de concretos totalmente reciclados, melhora satisfatoriamente a resistência à compressão dos concretos.

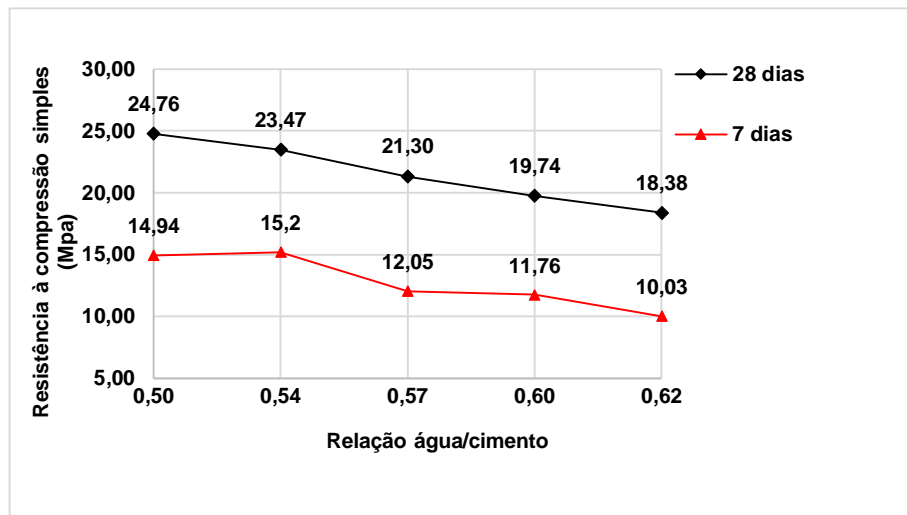


Figura 30 - Variação da resistência à compressão dos concretos em função da relação a/c aos 7 e 28 dias

A Figura 30 apresenta a variação da resistência à compressão dos concretos em função da relação água/cimento aos 7 e 28 dias. Pelos dados obtidos, percebe-se que na medida em que a relação água/cimento diminui maiores são os resultados dos valores de resistência à compressão dos concretos, significando que tanto o concreto de referência quanto os concretos reciclados obedecem à Lei de Abrams para fins de dosagens.

Ressalta-se que a redução da relação água/cimento nas misturas está diretamente relacionada ao aumento dos teores de substituição de (AGRC) por (AGN), tendo em vista o (AGN) apresentar maior valor de massa específica, o que de certa forma contribui para a redução do efeito negativo de porosidade entre os grãos de agregados em si, na pasta de cimento e na zona de transição.

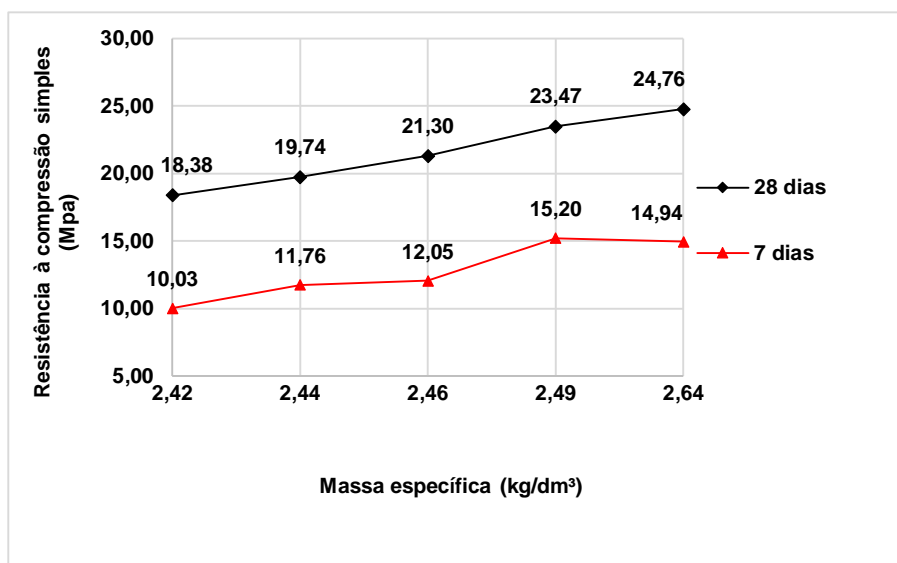


Figura 31 - Variação da resistência à compressão dos concretos em função das massas específicas das misturas de AGRC e AGN

A Figura 31 apresenta as variações de resistência à compressão em função das massas específicas das misturas de (AGRC) e (AGN) aos 7 e 28 dias.

Avaliando os dados obtidos percebe-se que as resistências à compressão dos concretos reciclados apresentaram crescimento conforme se aumentou as massas específicas das misturas entre agregados reciclados e naturais. Com o crescente aumento dos teores de substituição de (AGRC) por (AGN), houve uma diminuição da fração de grãos reciclados de menor massa específica e crescimento da fração de grãos naturais de maior massa específica.

Tal ganho de massa específica nas misturas de agregados graúdos contribuiu para a diminuição tanto do teor de argamassa ideal quanto da relação água/cimento dos concretos reciclados, o que segundo a bibliografia de referência, provoca a redução do fator porosidade entre os agregados, na pasta de cimento e na zona de transição, melhorando as condições de resistência dos concretos.

4.2.3 Módulo de elasticidade estático

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o comportamento elástico do concreto depende das condições de porosidade do agregado graúdo, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição, da massa específica e do módulo de deformação dos principais constituintes e as características da zona de transição. A porosidade do agregado determina a rigidez e esta, por sua vez, restringe a deformação da matriz. O módulo de elasticidade do concreto determina o valor da sua rigidez, ou seja, avalia sua resistência, sendo que quanto maior é o seu valor, maior é o esforço a ser feito para deformá-lo.

A Tabela 12 apresenta os resultados médios dos módulos de elasticidade estático dos corpos-de-prova ensaiados. Os valores individualizados encontram-se demonstrados nos apêndices.

Tabela 12 - Valores médios dos módulos de elasticidade dos concretos aos 28 dias

Valores médios dos módulos de elasticidade estáticos em (Gpa)		
Misturas Agregados	Idade (28 dias)	Relação água/cimento
MAGRC 100%	21,61	0,62
MAGN 10%	21,85	0,60
MAGN 20%	22,32	0,57
MAGN 30%	24,42	0,54
MAGN 100%	31,09	0,50

Analisando os dados da Tabela 12 e da Figura 32, observa-se que os concretos reciclados apresentaram módulos de elasticidade menores que o do concreto de referência, a bibliografia de referência atribui este fato às características do agregado reciclado, tais como massa específica mais baixa, maior porosidade, presença de argamassa antiga aderida à superfície do agregado de origem e a menor rigidez, sendo assim os concretos reciclados apresentam-se mais deformáveis que o concreto de referência.

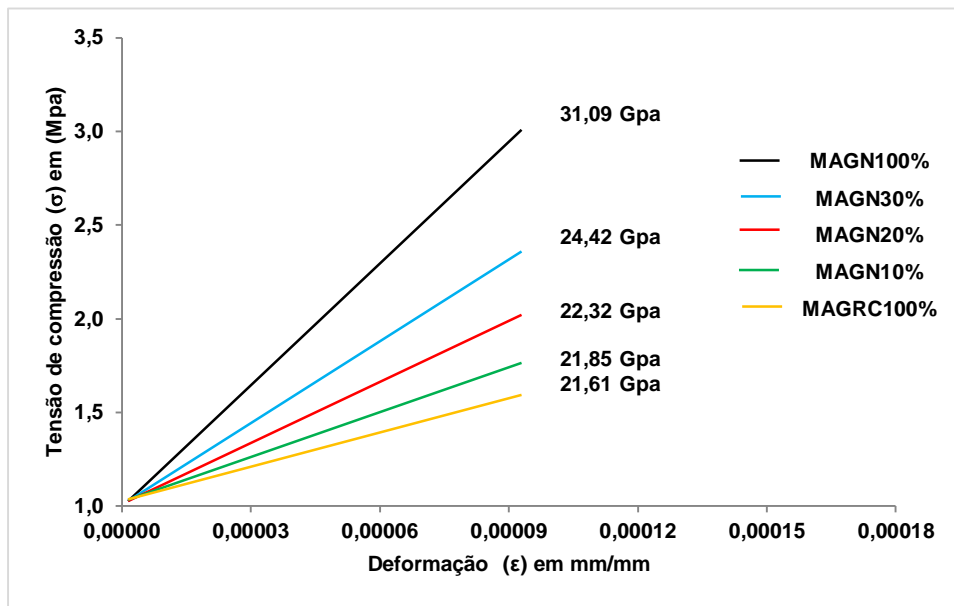


Figura 32 - Variação média dos módulos de elasticidade dos concretos

Também pode ser observado que em relação ao concreto totalmente reciclado (MAGRC), conforme cresce os teores de substituição de (AGRC) por (AGN), os valores dos módulos de elasticidade das misturas (MAGN10%), (MAGN20%) e (MAGN30%) crescem de 1,11%, 3,29% e 13,00% respectivamente.

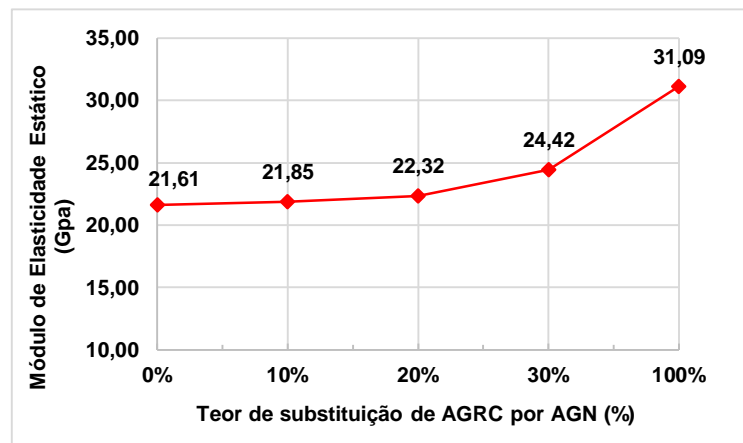


Figura 33 - Variação dos módulos de elasticidade em função dos teores de substituição de AGRC por AGN aos 28 dias

A Figura 33 apresenta a variação dos módulos de elasticidade estático em função dos teores de substituição de (AGRC) por (AGN) aos 28 dias. Pelos dados obtidos, constata-se que na medida em que cresce os teores de

substituição de (AGRC) por (AGN) nas misturas, aumenta os valores dos módulos de elasticidade dos concretos reciclados.

A explicação segundo a bibliografia de referência, é que com o aumento dos teores de substituição de (AGRC) por (AGN), ocorre um ganho gradual de massa específica em função da maior quantidade de agregados naturais sendo incorporados nas misturas. Tal ganho de massa específica nas misturas diminui o fator porosidade entre os agregados reciclados e naturais, na pasta de cimento, bem como na zona de transição, contribuindo para a redução tanto do teor de argamassa quanto da relação água/cimento, melhorando gradativamente as condições de resistência e rigidez dos concretos reciclados.

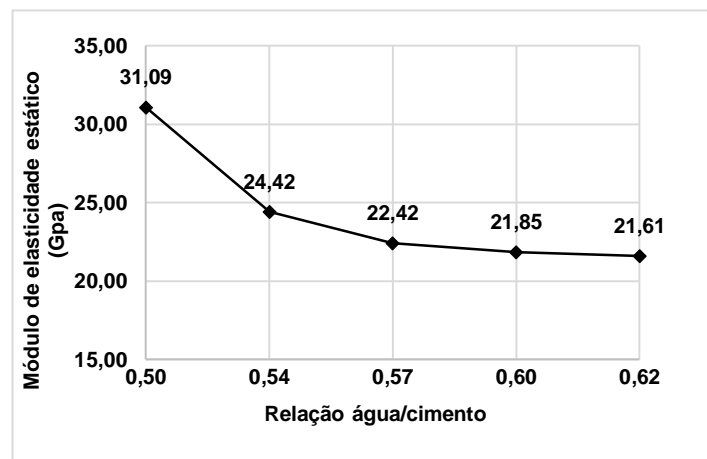


Figura 34 - Variação dos módulos de elasticidade em função da relação a/c aos 28 dias

A Figura 34 mostra a variação dos módulos de elasticidade estáticos em função da relação água/cimento aos 28 dias. Analisando os dados obtidos percebe-se que na medida em que a relação água/cimento aumenta, diminui-se os valores dos módulos de elasticidade estático dos concretos reciclados.

Na medida em que a relação água/cimento aumenta, o módulo de elasticidade dos concretos reciclados tende a uma diminuição, isto porque tal propriedade está ligada às condições de porosidade da pasta de cimento, e esta porosidade aumenta com o aumento da relação a/c, ocorrendo uma maior dispersão entre os grãos de cimento, tornando as ligações da estrutura de concreto endurecido mais frágeis.

5.0 CONCLUSÃO

Nos próximos itens são realizadas as considerações finais a respeito do trabalho e as sugestões de desenvolvimento de trabalhos futuros.

É importante ressaltar que todas as conclusões apresentadas neste capítulo restringem-se ao universo dos materiais utilizados e das condições pesquisadas.

O presente trabalho buscou analisar a possibilidade de aplicação de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) na produção de concretos para fins estruturais, avaliando para tanto, as características físicas e mecânicas dos agregados naturais e reciclados utilizados, bem como as propriedades mecânicas de consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos produzidos, a partir dos teores de substituição de 10%, 20% e 30% de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) por agregado graúdo natural (AGN).

A partir da análise dos resultados obtidos no programa experimental deste trabalho, as seguintes conclusões foram obtidas:

O agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) apresentou-se com formato mais irregular, áspero e poroso em comparação com o agregado graúdo natural (AGN). Também apresentou menor valor de massa específica e conseqüentemente com maior porosidade que o agregado graúdo natural (AGN). Tais características podem está associadas à camada de argamassa antiga aderida aos grãos de origem dos agregados reciclados;

A areia fina pode ter melhorado a zona de transição entre pasta de cimento e agregados. A fração mais fina da areia pode ter contribuído para o fechamento dos poros, melhorando a as condições de aderência entre os grãos rugosos e porosos do agregado graúdo reciclado com a pasta de cimento, o que pode ter provocado um aumento no módulo de elasticidade do concreto pela diminuição da porosidade da matriz e da zona de transição;

Na medida em que foram aumentando de 10%, 20% e 30% os teores de substituição de AGRC por AGN nas misturas de concreto, constatou-se uma diminuição gradual tanto do teor de argamassa quanto da relação água/cimento

nas dosagens dos concretos. O aumento dos teores de AGN nas misturas diminuíram gradualmente os efeitos combinados de aspereza e porosidade, característicos dos AGRC, permitindo uma melhora gradual de coesão, consistência e trabalhabilidade nos concretos produzidos;

A trabalhabilidade dos concretos com agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) foi menor que a do concreto com agregado natural (AGN) e, isso pode ser explicado pela alta taxa de absorção do agregado reciclado de concreto;

Na medida em que foram aumentando de 10%, 20% e 30% os teores de substituição de AGRC por AGN nas misturas de concreto, constatou-se um aumento gradual tanto de resistência à compressão quanto de módulo de elasticidade dos concretos. O aumento dos teores de AGN aumentou a massa específica relativa entre os agregados, diminuindo o efeito da porosidade entre os grãos, na pasta de cimento e na zona de transição entre pasta e agregados. O efeito combinado de ganho de massa específica, redução da porosidade, que contribui também para a diminuição da relação água/cimento, garantiu à pasta de cimento e a zona de transição melhores condições de resistência e rigidez aos concretos produzidos;

A produção dos concretos reciclados em duas etapas pode ter contribuído para o aumento da resistência à compressão dos concretos reciclados, pois permitiu o preenchimento dos poros dos agregados com uma fina camada de nata formada na primeira etapa da mistura, tornando a zona de transição mais forte, proporcionando um aumento da resistência à compressão.

Para a produção de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), a condição ideal é conseguir que na mistura prevaleça uma quantidade em massa de agregado graúdo cujo teor determine uma massa específica maior, com quantidade de agregados reciclados em proporção adequada, com um percentual de porosidade também adequado, para proporcionar as condições de aderência entre a pasta e os agregados a uma adequada relação a/c.

De uma maneira geral, diante dos resultados deste trabalho, pode-se afirmar que as propriedades físicas e mecânicas avaliadas nos agregados

gráudos reciclados de concreto (AGRC) utilizados, influenciaram consideravelmente nos resultados das propriedades mecânicas dos concretos reciclados produzidos.

Pela análise dos resultados obtidos, considerando as condições de dosagens e as características dos agregados reciclados utilizados, pôde-se concluir que a partir de 20% e 30% de substituição de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) por agregado graúdo natural (AGN), torna-se possível produzir concretos estruturais com consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade em condições satisfatórias.

Os resultados deste trabalho indicam que a aplicação dos agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) para produção de concretos estruturais pode ser uma alternativa interessante e viável sob o ponto de vista técnico e ambiental. De certo, esta forma de reciclagem para os resíduos sólidos pode estender a vida útil dos aterros pela diminuição dos resíduos de construção civil e das jazidas minerais pela substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, mitigando os impactos ambientais, e conseqüentemente, promovendo o desenvolvimento sustentável.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do programa experimental, percebeu-se que para uma única pesquisa tornou-se difícil avaliar todas as variáveis que influenciam nas propriedades físicas e mecânicas de consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos reciclados, tendo em vista tais propriedades serem sensíveis a diferentes fatores. Diante dos questionamentos surgidos a partir deste estudo, e que não puderam ser contemplados, outros trabalhos podem contribuir para o aprofundamento nessa temática. Sendo assim, apresentam-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar as propriedades mecânicas de consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade de novos concretos considerando outros teores de substituição de AGRC por AGN, admitindo o AGRC na condição de saturação com superfície seca e/ou totalmente saturada;
- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à tração e durabilidade de novos concretos considerando os teores de substituição de 10%, 20% e 30% de AGRC por AGN;
- Realizar a continuidade a esta pesquisa analisando as propriedades de resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade e microestrutura para idades de cura superiores a 28 dias;
- Analisar o comportamento mecânico de concretos com substituição total e parcial de AGRC por AGN utilizando outros tipos de cimento no estudo;
- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos a partir de outros teores de substituição parcial de AGRC por AGN, admitindo condições de igualdade de resistência aos AGRC;
- Verificar a microestrutura dos concretos produzidos a partir dos teores de 10%, 20% e 30% de substituição de AGRC por AGN através da realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com diafractograma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRECON – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. Curso de Gestão Integrada – Resíduos da Construção Civil e Operação de Usina de Reciclagem de Entulho, 10ª edição. São Paulo, 2015. 109p.

ABRECON – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. Seminário Nacional da Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015, 31p. São Paulo, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201. Guide to Durable Concrete. Detroit 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo: Abrelpe, 2014.<www.abrelpe.org.br/panoramaresiduossolidos> acesso em: 20 ago. 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto – Especificação. NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – Determinação da massa unitária. NBR NM 45. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. NBR 8953. Rio de Janeiro, 2015.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de Compressão de corpos cilíndricos – Métodos de Ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Projeto de Estruturas de Concreto. Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Concreto de cimento Portland. Procedimento para preparo, controle, recebimento e aceitação. NBR 12.655. Rio de Janeiro, 2015.

BENETTI, J.K. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio Sinos, São Leopoldo – Rio Grande do Sul, 2012.

BUTTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto- influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânica e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CARRIJO, Priscila Meireles. 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.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução 01/1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acesso em: 20 agosto de 2015.

_____. Resolução n°. 307, de 5 de julho de 2002. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

_____. Resolução n°. 307, de 5 de julho de 2002. Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União. Poder Executivo. Brasília, 2002.

CORDEIRO, L. de N.P. Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto. Porto Alegre, 2013. 114p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DAMINELI, B. L. Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição (Dissertação em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

FONSECA, F. B. Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregado reciclados de rejeitos de construção e demolição. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GONÇALVES, M.S. Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos. São Leopoldo, 2011. 112p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

HELENE, P. R. L. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Editora Pini, 1992. 349p

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008. www.ibge.gov.br/home/estatistica/.../pnsb2008/PNSB_2008.pdf.

Acesso em: 20 ago. 2015

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre, 2001. 290p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª edição, São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1994.

NAGALLI, André. Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2014.

NUNES, W. C. Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos de construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

PADOVAN, R. G. Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo – Rio Grande do Sul, 2013.

PINTO, T.P.P. Metodologia para a Gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo, 1999. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

TENÓRIO, J.J.L. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais. Maceió, 2007. 138p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas.

APÊNDICES

Tabela 13 - Resumo do ensaio de granulometria do AGN


 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	BRITA NATURAL		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 248/2003		
QUANTIDADE DE AGREGADO GRAÚDO			
PARA DIÂM. MÁX. = 25 MM : 10 KG			
Abertura das peneiras (mm)	Peso Retido (g)	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)
19	750,00	7,50	7,5
12	8.251,00	82,51	90,01
9,5	551,00	5,51	95,52
4,8	448,00	4,48	100,00
2,4	-	-	100,00
1,2	-	-	100,00
0,6	-	-	100,00
0,3	-	-	100,00
0,15	-	-	100,00
Fundo			
Total	10.000,00	100,00	6,93
Diâm. Máx			25
Módulo de Finura			6,93
Observação:			
Tecnologista:			

Tabela 14 - Determinação da massa específica do AGN


 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	BRITA NATURAL		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 53/2002		
MASSA ESPECÍFICA REAL - MÉTODO DO PICNÔMETRO			
DETERMINAÇÕES	1ª	2ª	3ª
Peso da Amostra (g)	500,23	500,32	500,27
Peso do Picnômetro + Água (g)	890,52	890,52	890,52
Peso Pic. + Água + Brita (g)	1201,21	1201,12	1201,17
Massa Específica Real (g/cm³)	2,64	2,64	2,64
Massa Específica Média (g/cm³)		2,64	
Observações:			

Tabela 15 - Resumo do ensaio de granulometria do agregado miúdo natural

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ			
INSTITUTO DE TECNOLOGIA			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL			
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	AREIA NATURAL		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 248/2003		
QUANTIDADE DE AGREGADO MIÚDO			
PARA DIÂM. MÁX. = 2,4 MM : 1KG			
Abertura das peneiras (mm)	Peso Retido (g)	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)
4,8	-	-	
2,4	50,30	5,03	5,03
1,2	120,30	12,03	17,06
0,6	228,60	22,86	39,92
0,3	318,00	31,80	71,72
0,15	190,10	19,01	90,73
Fundo	92,70	9,27	100,00
Total	1000,00	100,00	
Diâm. Máx			2,40
Módulo de Finura			2,24
Observação:			
Tecnologista:			

Tabela 16 - Determinação da massa específica do agregado miúdo natural

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ			
INSTITUTO DE TECNOLOGIA			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL			
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	AREIA NATURAL		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 52/2009		
MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm³)			
DETERMINAÇÕES	1ª	2ª	3ª
Peso da Amostra (g)	500,00	500,00	500,00
Volume Final (cm³)	390,50	391,00	391,50
Volume Inicial (cm³)	200,00	200,00	200,00
Variação de Volume (cm³)	190,50	191,00	191,50
Massa Específica Real (g/cm³)	2,62	2,62	2,61
Massa Específica Média (g/cm³)		2,62	
Observações:			

Tabela 17 - Resumo do ensaio de granulometria do AGRC


 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 248/2006		
QUANTIDADE DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO			
PARA DIÂM. MÁX. = 25 MM : 10 KG			
Abertura das peneiras (mm)	Peso Retido (g)	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem Retida Acumulada (%)
19	504	5,04	5,04
12	7134	71,34	76,38
9,5	1302	13,02	89,40
4,8	1060	10,60	100,00
2,4		-	100,00
1,2		-	100,00
0,6		-	100,00
0,3		-	100,00
0,15		-	100,00
Fundo	173	-	
Total	10.000,00	100,00	
Diâm. Máx			19
Módulo de Finura			6,71
Observação:			
Tecnologista:			

Tabela 18 - Determinação da massa específica do AGRC

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 53/2002		
MASSA ESPECÍFICA REAL - MÉTODO DO PICNÔMETRO			
DETERMINAÇÕES	1ª	2ª	3ª
Peso da Amostra (g)	501,26	501,33	501,29
Peso do Picnômetro + Água (g)	890,52	890,52	890,52
Peso Pic. + Água + AGRC (g)	1.184,55	1.184,48	1.184,52
Massa Específica Real (g/cm³)	2,42	2,42	2,42
Massa Específica Média (g/cm³)		2,42	
Observações:			

Tabela 19 - Determinação da massa unitária do agregado miúdo natural

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ			
INSTITUTO DE TECNOLOGIA			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL			
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	AGREGADO MIÚDO NATURAL		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 45/2003		
MASSA UNITÁRIA SOLTA			
DETERMINAÇÕES	1ª	2ª	3ª
Peso do recipiente + Areia (kg)	16,00	16,20	16,10
Peso do recipiente (kg)	4,67	4,67	4,67
Peso da Areia (kg)	11,33	11,53	11,43
Volume do recipiente (dm ³)	8,20	8,20	8,20
Peso Unitário Solto (kg/dm ³)	1,38	1,41	1,39
Peso Unitário Médio (kg/dm³)		1,39	
Observações:			

Tabela 20 - Determinação da massa unitária do AGN

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ			
INSTITUTO DE TECNOLOGIA			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL			
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	AGREGADO GRAÚDO NATURAL		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 45/2003		
MASSA UNITÁRIA SOLTA			
DETERMINAÇÕES	1ª	2ª	3ª
Peso do recipiente + Brita (kg)	32,94	32,93	32,95
Peso do recipiente (kg)	4,48	4,48	4,48
Peso da Brita (kg)	28,46	28,45	28,47
Volume do recipiente (dm ³)	20,00	20,00	20,00
Peso Unitário Solto (kg/dm ³)	1,42	1,42	1,42
Peso Unitário Médio (kg/dm³)		1,42	
Observações:			

Tabela 21 - Determinação da massa unitária do AGRC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ			
INSTITUTO DE TECNOLOGIA			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL			
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL			
INTERESSADO:	PAULO LOUREIRO BITENCOURT		
PROCEDÊNCIA:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA		
AMOSTRA:	AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO		
DATA:	27/05/2015		
NORMA:	NBR ABNT NM 45/2003		
MASSA UNITÁRIA SOLTA			
DETERMINAÇÕES	1ª	2ª	3ª
Peso do recipiente + AGRC (kg)	26,82	26,93	26,98
Peso do recipiente (kg)	4,48	4,48	4,48
Peso do AGRC (kg)	22,34	22,45	22,50
Volume do recipiente (dm ³)	20,00	20,00	20,00
Peso Unitário Solto (kg/dm ³)	1,12	1,12	1,13
Peso Unitário Médio (kg/dm³)	1,12		
Observações:			

Tabela 22 - Determinação do desgaste por abrasão Los Angeles do AGRC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ				
INSTITUTO DE TECNOLOGIA				
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL				
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL				
INTERESSADO: PAULO LOUREIRO BITENCOURT				
PROCEDÊNCIA: UFPA				
AMOSTRA: AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO				
DATA: 27/05/2015				
NORMA: NBR ABNT NM 51/2001				
DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES - AGRC (%)				
Abertura das Peneiras (mm)		Amostra - massa parcial (g)		
Material		Graduação		
Passa	Retido	A	B	C
19,00	12,50		2500 ±10	
12,50	9,50		2500 ±10	
Massa Total (g)		5.000		
Nº. de rot. da máquina		500		
Material Retido na # 12		2.865,00		
Material Passando na # 12		2.135,00		
Desgaste (%)		42,70%		

Tabela 23 - Valores individualizados de resistência à compressão dos concretos aos 7 dias

Identificação Corpo-de- Prova	Mistura (% teor) agregado graúdo	Área da seção corpo- de-prova (mm ²)	Força Máxima (kgf)	Resistência obtida (Mpa)
CP1	MAGRC100%	0,7853979	8.246,03	10,30
CP2	MAGRC100%	0,7853979	7.819,47	9,77
CP3	MAGN10%	0,7853979	9.506,68	11,87
CP4	MAGN10%	0,7853979	9.318,42	11,64
CP5	MAGN20%	0,7853979	9.554,79	11,93
CP6	MAGN20%	0,7853979	9.738,80	12,16
CP7	MAGN30%	0,7853979	12.206,10	15,25
CP8	MAGN30%	0,7853979	12.135,13	15,16
CP9	MAGN100%	0,7853979	11.997,56	14,99
CP10	MAGN100%	0,7853979	11.925,17	14,90
Nº (CP'S)	10	10	10	10
Média	-	-	10.245	12,80
Desv. Padrão	-	-	1.591	1,988
Coef. Var. (%)	-	-	15,53	15,53
Mínimo	-	-	7.819	9,77
Máximo	-	-	12.206	15,25

Tabela 24 - Valores individualizados de resistência à compressão dos concretos aos 28 dias

Identificação Corpo-de- Prova	Mistura (% teor) agregado graúdo	Área da seção corpo- de-prova (mm ²)	Força Máxima (kgf)	Resistência obtida (Mpa)
CP1	MAGRC100%	0,7853979	14.321,54	17,89
CP2	MAGRC100%	0,7853979	15.103,50	18,87
CP3	MAGN10%	0,7853979	16.696,08	20,85
CP4	MAGN10%	0,7853979	14.907,91	18,62
CP5	MAGN20%	0,7853979	17.199,29	21,48
CP6	MAGN20%	0,7853979	16.912,14	21,12
CP7	MAGN30%	0,7853979	18.826,01	23,52
CP8	MAGN30%	0,7853979	18.752,99	23,42
CP9	MAGN100%	0,7853979	19.848,90	24,79
CP10	MAGN100%	0,7853979	19.791,27	24,72
Nº (CP'S)	10	10	10	10
Média	-	-	17.236	21,53
Desv. Padrão	-	-	1.925	2,404
Coef. Var. (%)	-	-	11,17	11,17
Mínimo	-	-	14.321	17,89
Máximo	-	-	19.849	24,79

Figura 35 - Valores individualizados dos módulos de elasticidade dos concretos aos 28 dias

