

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VIVIANE PELISSARI

**PROPRIEDADES DE CONCRETOS PRODUZIDOS ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

DISSERTAÇÃO

Curitiba
2016

VIVIANE PELISSARI

**PROPRIEDADES DE CONCRETOS PRODUZIDOS ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba. Área de concentração: Materiais e componentes da construção

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski

Curitiba
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P384p Pelissari, Viviane
2016 Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto / Viviane Pelissari.-- 2016.
122 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2016.
Bibliografia: p. 113-122.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Concreto. 4. Concreto - Reciclagem. 5. Água - Absorção. 6. Resistência à compressão. I. Matoski, Adalberto. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba



TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO N.º 084

PROPRIEDADES DE CONCRETOS PRODUZIDOS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

POR

VIVIANE PELISSARI

Esta dissertação foi apresentada às 14h30min do dia 09 de março de 2016, como requisito parcial para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, área de Construção Civil, linha de pesquisa Materiais e Componentes de Construção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____.
(aprovado / reprovado)

Prof. Dr. Adalberto Matoski
(Orientador - UTFPR)

Prof.ª Dr.ª Nayara Soares Klein
(UFPR)

Prof.ª Dr.ª Eliane Betânia Carvalho Costa
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo
Coordenador do PPGEC

AGRADECIMENTOS

A escolha pelo mestrado foi uma etapa marcante em minha vida acadêmica e um fator de total mudança em minha vida pessoal. Apesar das dificuldades, a volta para os estudos e pesquisa foi fonte de satisfação e realização. Durante esses dois anos, foi possível perceber que a conclusão de um trabalho acadêmico é resultado não somente de dedicação pessoal, esforço e trabalho, mas também da colaboração de muitas pessoas. Assim, tenho muito a agradecer a todos que apoiaram a concretização de mais esta etapa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realizar o mestrado.

Ao professor Adalberto, pela orientação, auxílio e compreensão.

À professora Eliane pelas considerações feitas durante a defesa, por toda a atenção, paciência e disponibilidade em contribuir nas correções finais do trabalho.

À professora Nayara pelas sugestões e correções feitas durante a defesa, que contribuíram para melhorar o trabalho.

Ao professor Wellington pelo apoio e sugestões.

Aos professores Seva e Juliana pelo auxílio com o ensaio de microscopia.

Aos responsáveis pelo laboratório de materiais, Felipe e Gustavo, pelo auxílio. Em especial ao Felipe, que muito ajudou na trabalhosa etapa de produção dos concretos.

Às empresas Itambé e Soliforte, pela doação do cimento e do agregado reciclado.

Às colegas de mestrado pelo apoio, amizade e pelas horas agradáveis que passamos.

A minha mãe Sonia, não tenho palavras para expressar tanto amor e gratidão. Pela atenção e paciência, por rir e chorar junto. Por entender que deixar livre é talvez a forma mais nobre de amar. Por seu apoio incondicional em minha mudança para Curitiba, mesmo sabendo que isso implicaria em muitos quilômetros de distância e em uma enorme saudade. Minha melhor professora e meu orgulho, sou muito feliz por ser sua filha.

Ao meu namorado e companheiro Flávio, que vivenciou comigo grande parte desta fase. Palavras são pouco para agradecer sua paciência infinita comigo nas horas difíceis em que estive insegura e ansiosa. Por aproveitar comigo cada momento. Obrigada por valorizar minhas conquistas, pelo incentivo e pelo carinho.

A todos os familiares que torceram pela realização deste sonho, em especial às minhas irmãs Daniele e Tatiane.

RESUMO

PELLISSARI, Viviane. Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto. 2016. 122 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A reciclagem de resíduos constitui uma opção para amenizar o impacto ambiental resultante da quantidade expressiva de detritos gerados pelas atividades produtivas do segmento da construção. Deste modo, o objetivo deste estudo é avaliar a utilização de agregados graúdos reciclados de concreto (ARC) em substituição ao agregado graúdo natural (AGN) para a produção de concretos com resistência à compressão de 30 MPa. O programa experimental iniciou-se com a caracterização física e granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto (ARC), e posterior comparação com as propriedades do agregado graúdo natural (AGN). Com base no conhecimento dessas propriedades, deu-se início a etapa de produção dos concretos. Foram estudados diferentes procedimentos de forma a reduzir o efeito da absorção de água do concreto pelo agregado reciclado durante o estado fresco. Também foi avaliada a influência da utilização de diferentes teores (0, 10%, 20%, 50% e 100%) de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto nas propriedades do estado fresco e do estado endurecido do concreto. Embora tenha se verificado uma redução nos valores de resistência em relação ao concreto de referência (sem a presença de ARC), os concretos alcançaram o valor especificado de resistência à compressão (30 MPa) para todas as porcentagens de substituição de AGN por ARC. Com relação às propriedades de módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral, verificou-se que a redução nos resultados se intensifica conforme aumenta a porcentagem de ARC incorporado à mistura. Os valores registrados para absorção de água, por sua vez, aumentavam gradativamente de forma proporcional à quantidade de ARC no concreto.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto. Concreto com agregados reciclados. Resistência à compressão. Absorção de água.

ABSTRACT

PELLISSARI, Viviane. Properties of concrete produced by using recycled concrete aggregate. 2016. 122 f. Dissertation. Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2016.

The recycling of waste is an option to minimize the environmental impact of the significant amount of waste generated by production activities in the construction segment. Thus, the aim of this study is to evaluate the use of recycled coarse aggregate concrete (ARC) to replace the natural coarse aggregate (AGN) for the production of concrete with compressive strength of 30 MPa. The experimental program began with physical and particle size characterization of the recycled coarse aggregate concrete (ARC), and for comparison with the properties of natural coarse aggregate (AGN). Based on the knowledge of these properties, the next step was the production of concrete. Different procedures to reduce the effect of absorption of water by recycled concrete aggregate at the fresh state were studied. Also it was evaluated the effect of using different amounts (0, 10%, 20%, 50% and 100%) replacement of the natural coarse aggregate for concrete recycled coarse aggregate in to the properties of concrete at the fresh state and at the hardened state. Although it has been verified a decrease in the compressive strength values in relation to the reference concrete (without the presence of ARC), for all AGN replacement percentages by ARC was reached the value specified compressive strength (30 MPa). With regard to the modulus of elasticity and splitting tensile strength, it was found that the reduction in results intensifies with increasing percentage of ARC incorporated into the mixture. The values recorded for water absorption, in turn, gradually increased in proportion to the amount of the ARC.

Key-words: Recycled aggregate concrete. Concrete with recycled aggregates. Compressive strength. Absorption of water.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AGN – Agregado Graúdo Natural

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas

BSI – British Standards Institution

BCSJ – Building Contractors Society of Japan

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CUR – Commissie voor Uitvoering van Research

DafStB – German committee for reinforced concrete

f_{ck} – Resistência característica do concreto à compressão (MPa)

f_{cj} – Resistência média de dosagem do concreto à compressão (MPa)

RILEM – International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures

NBR – Norma Brasileira

WTBC – Works Bureau Technical Circular

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Exigências para os agregados reciclados em aplicações não estruturais | 22 |
| Tabela 2 – Requisitos para os agregados reciclados em aplicações estruturais | 23 |
| Tabela 3 – Recomendações normativas para utilização de agregados reciclados | 25 |
| Tabela 4 – Influência dos agregados reciclados na resistência à compressão dos concretos ... | 41 |
| Tabela 5 – Propriedades do cimento utilizado no trabalho | 52 |
| Tabela 6 – Características dos aditivos | 55 |
| Tabela 7 – Dados obtidos para os traços rico, intermediário e pobre..... | 59 |
| Tabela 8 – Cálculos para obtenção do traço final..... | 60 |
| Tabela 9 – Traço e materiais para produção do traço de referência | 61 |
| Tabela 10 – Nomenclaturas dos concretos (1ª Fase) | 65 |
| Tabela 11 – Nomenclaturas dos concretos (2ª Fase) | 67 |
| Tabela 12 – Ensaio do ensaio endurecido (2ª Fase) e número de corpos de prova | 70 |
| Tabela 13 – Características dos <i>strain gages</i> | 72 |
| Tabela 14 – Granulometria do agregado miúdo natural | 77 |
| Tabela 15 – Propriedades da areia natural..... | 78 |
| Tabela 16 – Granulometria dos agregados graúdos..... | 79 |
| Tabela 17 – Propriedades dos agregados graúdos AGN e ARC | 80 |
| Tabela 18 – Propriedades dos agregados graúdos reciclados..... | 81 |
| Tabela 19 – Valores normativos de massa específica e absorção | 82 |
| Tabela 20 – ANOVA para resultados de resistência à compressão (1ª Fase) | 88 |
| Tabela 21 – Comparações realizadas pelo teste Tukey (Resistência – 1ª Fase)..... | 89 |
| Tabela 22 – Porcentagens retidas acumuladas reais e calculadas, para os agregados graúdos | 90 |
| Tabela 23 – Porcentagens retidas acumuladas - composições AGN x ARC..... | 91 |
| Tabela 24 – Propriedades estado fresco (2ª Fase) | 93 |
| Tabela 25 – ANOVA para resultados de resistência à compressão | 96 |
| Tabela 26 – Comparações realizadas pelo teste Tukey (Resistência à compressão – 2ª Fase) | 96 |
| Tabela 27 – ANOVA para resultados do módulo de elasticidade (<i>strain gages</i>)..... | 101 |
| Tabela 28 – Comparações realizadas pelo teste Tukey (Módulo de elasticidade – 2ª Fase).. | 101 |
| Tabela 29 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral | 103 |
| Tabela 30 – ANOVA para resultados de resistência à tração..... | 103 |
| Tabela 31 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão | 104 |
| Tabela 32 – ANOVA para resultados de absorção de água | 105 |
| Tabela 33 – Resultados ensaio de absorção de água por capilaridade | 107 |
| Tabela 34 – ANOVA para resultados de ascensão capilar | 108 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 – Correlação entre quantidade de argamassa aderida e massa específica..... | 33 |
| Figura 2 – Correlação entre quantidade de argamassa aderida e absorção de água | 34 |
| Figura 3 – Agregado reciclado com zonas de transição interna | 35 |
| Figura 4 – Módulo de elasticidade de concretos que contém ARC..... | 46 |
| Figura 5 – Exemplo de curva de empacotamento ideal, calculada pelo modelo de Alfred..... | 50 |
| Figura 6 – Representação esquemática dos procedimentos experimentais | 51 |
| Figura 7 – ARC com camada de argamassa aderida | 53 |
| Figura 8 – Representação esquemática das fases da produção dos concretos..... | 57 |
| Figura 9 – Resistências dos concretos mais vendidos durante período 03/13 a 03/14..... | 58 |
| Figura 10 – Diagrama de dosagem pelo método IPT/EPUSP | 59 |
| Figura 11 – Medidor elétrico de deformação – <i>Strain gage</i> | 71 |
| Figura 12 – Compressômetro analógico..... | 72 |
| Figura 13 – Ensaio de tração por compressão diametral | 73 |
| Figura 14 – Ensaio de absorção de água por capilaridade..... | 74 |
| Figura 15 – Composição granulométrica do agregado miúdo..... | 78 |
| Figura 16 – Composição granulométrica dos agregados graúdos AGN e ARC | 79 |
| Figura 17 – Imagens de microscopia para AGN e ARC (100 X e 1000 X) | 80 |
| Figura 18 – Absorção de água do agregado graúdo reciclado conforme o tempo | 82 |
| Figura 19 – Propriedades estado fresco (1ª Fase)..... | 83 |
| Figura 20 – Concretos ARC1–REF e ARC1–AAG: aumento na fluidez após adição de água | 85 |
| Figura 21 – Resistência à compressão (1ª Fase)..... | 86 |
| Figura 22 – Percentuais de variação nos valores de resistência (1ª Fase) | 87 |
| Figura 23 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos, curva teórica para Modelo de Alfred e curvas de diferentes composições entre AGN x ARC. | 91 |
| Figura 24 – Curva modelo de Alfred e Curvas granulométricas das composições entre areia, AGN e ARC. | 92 |
| Figura 25 – Diagrama de dispersão (substituição do AGN pelo ARC x Quantidade de aditivo) | 94 |
| Figura 26 – Resultados de resistência à compressão (2ª Fase)..... | 95 |
| Figura 27 – Resistência à compressão e índice de vazios dos concretos | 97 |
| Figura 28 – Porcentagens de perda de resistência conforme a utilização de ARC | 98 |
| Figura 29 – Fragmento de um dos concretos do trabalho após ensaio de determinação da resistência. | 99 |
| Figura 30 – Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade..... | 100 |
| Figura 31 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade | 102 |
| Figura 32 – Resultados de resistência à tração e à compressão..... | 104 |
| Figura 33 – Absorção de água dos corpos de prova e suas massas específicas | 105 |
| Figura 34 – Absorção por capilaridade ao longo do tempo..... | 108 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 13 |
| 1.2 | IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO..... | 14 |
| 1.3 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... | 15 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 2.1 | AGREGADOS RECICLADOS..... | 16 |
| 2.1.1 | Panorama da reciclagem de resíduos..... | 16 |
| 2.1.2 | Recomendações normativas | 20 |
| 2.1.3 | Propriedades dos agregados reciclados de concreto (ARC)..... | 32 |
| 2.1.4 | Zona de transição interna..... | 34 |
| 2.1.5 | Propriedades dos concretos com agregados reciclados no estado fresco | 35 |
| 2.1.6 | Propriedades dos concretos com agregados reciclados no estado endurecido ... | 39 |
| 2.1.7 | Porosidade dos concretos com agregados reciclados | 47 |
| 2.2 | EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS | 48 |
| 2.2.1 | Modelo de Alfred | 49 |
| 3 | METODOLOGIA | 51 |
| 3.1 | MATERIAIS | 51 |
| 3.1.1 | Cimento | 52 |
| 3.1.2 | Agregado miúdo natural | 52 |
| 3.1.3 | Agregados graúdos: natural (AGN) e reciclado de concreto (ARC)..... | 53 |
| 3.1.4 | Aditivos | 55 |
| 3.2 | MÉTODO | 56 |
| 3.2.1 | Determinação dos parâmetros referentes ao concreto | 57 |
| 3.2.2 | Dosagem dos concretos e traço de referência..... | 58 |
| 3.2.3 | Primeira Fase de produção dos concretos: Procedimentos estudados de forma a minimizar o efeito da absorção de água do agregado reciclado no estado fresco..... | 62 |
| 3.2.4 | Segunda Fase de produção dos concretos: Diferentes porcentagens de substituição do AGN pelo ARC | 66 |
| 3.2.4.1 | Teor de substituição de 10% - Traço determinado pelo modelo de Alfred (ARC2-10)..... | 67 |
| 3.2.4.2 | Teor de substituição de 20% do AGN pelo ARC (ARC2-20)..... | 69 |
| 3.2.4.3 | Teor de substituição de 50%do AGN pelo ARC (ARC2-50)..... | 69 |
| 3.2.5 | Ensaio no estado fresco..... | 69 |
| 3.2.5.1 | Abatimento pelo tronco de cone..... | 69 |
| 3.2.5.2 | Massa específica | 69 |
| 3.2.6 | Ensaio no estado endurecido..... | 70 |
| 3.2.6.1 | Resistência à compressão | 71 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.2.6.2 | Módulo estático de elasticidade..... | 71 |
| 3.2.6.3 | Resistência à tração por compressão diametral | 73 |
| 3.2.6.4 | Absorção de água por imersão..... | 73 |
| 3.2.6.5 | Absorção de água por capilaridade..... | 74 |
| 3.2.7 | Análise de Variância – ANOVA | 75 |
| 4 | RESULTADOS | 77 |
| 4.1 | PROPRIEDADES DOS AGREGADOS – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .. | 77 |
| 4.1.1 | Areia natural | 77 |
| 4.1.2 | Agregado graúdos: natural (AGN) e reciclado de concreto (ARC) | 79 |
| 4.2 | PRIMEIRA FASE DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS | 83 |
| 4.2.1 | Estado fresco do concreto..... | 83 |
| 4.2.2 | Estado endurecido do concreto..... | 86 |
| 4.3 | SEGUNDA FASE DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS | 90 |
| 4.3.1 | Proporcionamento entre os agregados graúdos pelo Modelo de Alfred..... | 90 |
| 4.3.2 | Estado fresco do concreto..... | 93 |
| 4.3.3 | Estado endurecido do concreto..... | 94 |
| 4.3.3.1 | Resistência à compressão | 94 |
| 4.3.3.2 | Módulo de elasticidade..... | 99 |
| 4.3.3.3 | Resistência à Tração por compressão diametral..... | 102 |
| 4.3.3.4 | Absorção de água por imersão..... | 104 |
| 4.3.3.5 | Absorção de água por capilaridade..... | 107 |
| 5 | CONCLUSÃO | 110 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 113 |

1 INTRODUÇÃO

Os agregados reciclados são materiais obtidos através da reciclagem de resíduos minerais provenientes das atividades do setor da construção. Após passar pelo processo de reciclagem, o material que se apresentava como detrito toma forma de agregado e adquire potencial de reaproveitamento.

A prática da reciclagem de resíduos da construção começou a se desenvolver após o fim da Segunda Guerra Mundial, na Alemanha. Os escombros provenientes de edificações demolidas nas cidades foram britados e utilizados para suprir a demanda por agregados. Aos poucos, a reciclagem de resíduos mostrou-se bastante promissora e a técnica difundiu-se por vários países (LEVY e HELENE, 2002).

Os agregados reciclados podem ser utilizados em substituição aos agregados naturais. Esta prática é adotada principalmente em locais com escassez de agregados naturais, e se mostra válida para reduzir o impacto ambiental gerado pela extração de matérias-primas. Além disso, a reciclagem diminui os espaços necessários para a disposição destes resíduos em aterros (SPADOTTO, VECCHIA e CARLI, 2012, MOREIRA, 2010; CORINALDESI, 2010; ISMAIL e RAMLI, 2014).

Diante disso, a utilização de agregados reciclados para a produção de novos concretos é uma forma de inserir novamente este material na cadeia produtiva. Os agregados reciclados de concreto possuem grande potencial de serem reaproveitados. Provenientes principalmente de rejeitos de fábricas de pré-moldados e centrais de concreto usinado, estes materiais possuem maior homogeneidade e menor grau de contaminação, quando comparados aos demais tipos de resíduos gerados pelas atividades da construção civil (BUTTLER, 2003).

No entanto, é um material que possui características distintas daquelas apresentadas pelos agregados naturais. São constituídos basicamente pelos agregados do concreto reciclado e por uma camada de argamassa original que permanece aderida a ele. Além disso, os agregados reciclados geralmente apresentam elevado teor de material fino (passante pela peneira 75 μm), menor massa específica e principalmente, maior porosidade. Quando utilizado em concretos, verifica-se que o abatimento registrado geralmente é mais baixo do que o apresentado pelo concreto convencional, devido à alta capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, maior que a dos agregados naturais. (RAO *et al.*, 2010; MEFTEH *et al.*, 2013).

No estado endurecido verifica-se uma nova zona de transição entre o agregado reciclado e a matriz do novo concreto (FOLINO e XARGAY, 2014; LI *et al.*, 2012). Caso tenha resistência menor que a camada de argamassa aderida ao agregado reciclado, a nova zona de transição pode ser um ponto fraco do conjunto (CABRAL, 2007).

Alguns estudos afirmam que a substituição de agregados naturais pelos reciclados no concreto tem efeito prejudicial em seu comportamento mecânico, já que diminui os valores de propriedades como resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração (KATZ, 2003; CABRAL *et al.*, 2010; MEDINA *et al.*, 2014; MARINKOVIĆ *et al.*, 2010; AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002). No entanto, não se deve estabelecer essa redução como um resultado inevitável da utilização de agregados reciclados para a produção de concretos. Os valores registrados para as propriedades do estado endurecido de concretos produzidos com agregados reciclados dependem de vários fatores, entre eles: a origem e a qualidade do agregado reciclado, o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado (KWAN *et al.*, 2011; DILBAS *et al.*, 2014; ZEGA e DI MAIO, 2011), a condição de umidade do agregado reciclado no momento da produção do concreto (DE BRITO, BARRA e FERREIRA, 2011), bem como as condições de cura (GAYARRE *et al.*, 2014).

Quando são utilizados agregados reciclados de boa qualidade, e em quantidades limitadas, o comportamento mecânico é similar ao apresentado pelo concreto convencional (MEFTEH *et al.*, 2013; BARBUDO *et al.*, 2013, ETXEBERRIA *et al.*, 2007).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo geral*

Avaliar a utilização de agregados graúdos reciclados de concreto (ARC) em substituição ao agregado natural (AGN) para a produção de concretos com resistência à compressão de 30 MPa.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Analisar a eficiência de diferentes procedimentos adotados de forma a reduzir a absorção de água de amassamento do concreto pelo agregado reciclado durante a mistura;

- Analisar as propriedades dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição de AGN por ARC no estado fresco pelo método de abatimento pelo tronco de cone e massa específica;
- Avaliar a influência de diferentes proporções de substituição do AGN por ARC nas propriedades mecânicas do concreto por ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e na absorção de água por imersão e capilaridade.

1.2 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Apesar de sua grande importância no desenvolvimento econômico e social, quando postas em evidência questões relativas à preservação ambiental, o setor da construção civil tem uma imagem bastante negativa. Este setor gera impactos ambientais durante todas as etapas de sua cadeia produtiva: desde a extração de matérias-primas, fabricação e transporte dos materiais, até a destinação final dos resíduos gerados durante a execução das obras, ou dos detritos provenientes de edificações demolidas ao final de sua vida útil.

Assim, é crescente a pressão exercida para que este setor incorpore práticas mais sustentáveis no desenvolvimento de suas atividades, não somente por órgãos fiscalizadores, mas também por parte de um consumidor cada vez mais exigente e esclarecido com relação às questões ambientais. Nesse contexto, criou-se no Brasil a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), bem como as normas técnicas NBR 15112 a NBR 15116 (ABNT, 2004) que estabelecem diretrizes para a gestão de resíduos sólidos. Em alguns países da Europa, os valores de multas em caso de despejo ilegal de resíduos, juntamente com as altas taxas cobradas para depositar esses materiais em aterros, acabam por incentivar a reciclagem dos detritos da construção.

A reciclagem dos resíduos de concreto e sua reutilização em novos concretos é uma alternativa para oferecer uma destinação a estes resíduos. No entanto, trata-se de um material com propriedades diferentes das apresentadas pelo agregado natural. Como consequência, a utilização deste tipo de agregado tem impacto direto sobre determinadas propriedades do concreto. Por tratar-se de um material cuja prática de utilização é relativamente nova, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias para sua aplicação (BEHERA *et al.*, 2014; XIAO *et al.*, 2013; SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco capítulos:

No primeiro capítulo, estão inseridos a introdução, a justificativa e os objetivos a serem alcançados.

No capítulo 2 é apresentada a revisão de literatura realizada sobre aspectos inerentes ao tema, como o panorama da reciclagem, recomendações normativas sobre a utilização de agregados reciclados, propriedades dos agregados reciclados e os efeitos da sua utilização na produção de concretos.

O capítulo 3 descreve o programa experimental, onde são determinadas as variáveis a serem estudadas, bem como os procedimentos necessários para obtenção dos resultados. Também são apresentadas propriedades e características dos materiais utilizados.

No capítulo 4 são contemplados os resultados encontrados na etapa experimental, assim como as análises referentes a eles.

No Capítulo 5 está escrita a conclusão desenvolvida a partir dos resultados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 AGREGADOS RECICLADOS

2.1.1 *Panorama da reciclagem de resíduos*

A produção de resíduos é um estágio inevitável de todos os processos industriais e nas atividades humanas. Por falta de reaproveitamento ou de tecnologias de reciclagem, grande parte destes resíduos certamente terá uma disposição inadequada na natureza, fato que resulta em grandes problemas ambientais ao redor de todo o mundo (DE BRITO e SAIKIA, 2013). Entre vários setores da economia, a construção civil encontra-se em uma posição bastante incômoda com relação às questões ambientais, não somente pela grande quantidade de resíduos produzidos e despejados na natureza, mas também pelo grande consumo de matérias-primas (PACHECO-TORGAL, 2013; PEC e MILOVANOVIC, 2014; TAM, 2008). Na União Europeia, a construção civil contribui com 821 milhões de toneladas, aproximadamente 33% do total de resíduos gerados no ano de 2012 (EUROSTAT, 2015). Neste mesmo ano, 480 milhões de toneladas de material foram resultantes das atividades produtivas do setor, nos Estados Unidos (TOWNSEND *et al.*, 2014). No Brasil, os resíduos da construção civil constituem uma sobrecarga nos sistemas de limpeza pública municipais, com quantidades que representam de 50% a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2005).

A cadeia produtiva da construção civil é responsável pela transformação do ambiente natural no ambiente construído, que precisa ser permanentemente atualizado e mantido (AGOPYAN e JOHN, 2011). É uma atividade de grande importância social e econômica, e como os demais setores industriais, passa atualmente por pressões sociais e de órgãos fiscalizadores para adoção de posturas mais sustentáveis. Portanto, o tripé ambiente–economia–sociedade deve ser considerado de uma maneira integrada, pois, do contrário, não teremos um desenvolvimento sustentável: o desafio é fazer a economia evoluir, atendendo às expectativas da sociedade e mantendo o ambiente sadio para esta e para as futuras gerações. O aumento da sustentabilidade do setor depende de soluções em vários níveis de sua cadeia produtiva, articuladas dentro de uma visão sistêmica.

Redução, reuso e reciclagem são princípios chave da recuperação do meio ambiente e dos materiais de construção sustentáveis (MARIE e QUIASRAWI, 2012). Neste contexto, a

reciclagem dos resíduos de construção e demolição aparece como uma medida mitigadora do impacto ambiental resultante da disposição final de detritos, gerados durante as etapas de execução das obras, bem como da demolição de uma edificação ao final da sua vida útil.

A reciclagem tem potencial de reduzir os volumes de resíduos depositados em aterros, diminuir custos e preservar os recursos naturais, que são limitados, através da redução da quantidade de matéria prima extraída do meio ambiente (MARINKOVIC, 2010). Além disso, os resíduos de construção e demolição são acompanhados de materiais indesejáveis, tais como cimento amianto, gesso de construção e alguns resíduos químicos. Esses resíduos, quando depositados clandestinamente em terrenos baldios e taludes de cursos de água, provocam impactos ao meio ambiente possibilitando propagação de vetores de contaminação. Quando levados pelas águas superficiais, estes obstruem as canalizações de drenagem, ocasionando enchentes e prejuízos para a sociedade (MOREIRA, 2010).

A transferência de tecnologia, através da difusão dos conhecimentos por documentação e publicações, é uma etapa essencial do processo de aplicação de agregados reciclados. O sucesso da reciclagem vai depender também da colaboração entre os diversos atores do processo: geradores do resíduo, potenciais consumidores, agências governamentais e instituições de pesquisa. É necessário convencer os consumidores finais de que o novo produto apresenta alguma vantagem competitiva e baixos riscos técnicos e ambientais (ANGULO *et al.*, 2003).

A reciclagem se tornou uma medida constantemente defendida por ambientalistas, e está prestes a se tornar opção tecnológica e até financeira dentro do processo construtivo. Diversas ações do poder público e de entidades empresariais já buscam regulamentar e induzir o processamento de resíduos de construção e demolição e a reutilização do material. Os principais usos atuais, como pavimentação e cobertura de aterros, demandam agregados com baixos requisitos de qualidade, mas para outras aplicações, como concretos e argamassas, ainda falta conhecimento técnico científico que dê segurança quanto a aplicações práticas (CARRIJO, 2005).

Na comunidade europeia, as ações relativas ao reaproveitamento de resíduos da construção começaram a se disseminar graças às experiências de reconstrução de algumas cidades após o fim da Segunda Guerra Mundial. Atualmente, vários países da Europa reciclam parte predominante dos resíduos que geram e existe um esforço para consolidação de uma recomendação normativa única para toda a comunidade. A falta de espaço para disposição final em aterros, bem como a escassez de agregados naturais são fatores que contribuem para a concretização dos processos de reciclagem. A diretiva No. 2008/98/CE da

União Europeia propõe que haja reuso, reaproveitamento e reciclagem de pelo menos 70% dos resíduos de construção e demolição, em todos os países membros, até o ano de 2020. Também se espera que neste prazo as novas edificações incluam pelo menos 5% de materiais reciclados (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014; HIETE, 2013).

Na Bélgica, pesquisas sobre reciclagem de resíduos de construção e demolição começaram a ser desenvolvidas no início da década de 70 (VYNCKE e VRIJDERS, 2010). Até o ano de 2011, havia cerca de 150 usinas de reciclagem fixas no país. Por ano, são produzidas aproximadamente 14,5 milhões de toneladas de agregados reciclados, dos quais se estima que 90% são utilizados como base e sub-base de estradas, outros 10% em outras aplicações rodoviárias. Apenas 1% é utilizado para produção de concretos (VRIJDERS e DESMYTER, 2013). Na Bélgica, encontram-se exemplos de obras pioneiras na utilização de agregados reciclados, como a Eclusa de Berendrecht (construída durante a ampliação do Porto da Antuérpia, onde um total de 650.000 m³ de concreto foi lançado, contendo 80.000 m³ de agregados reciclados provenientes de demolição das paredes da antiga eclusa) e demonstrações na estação experimental do Instituto de Pesquisa Construção Belga (BBRI), como a obra *RecyHouse* – um dos primeiros casos de concreto pré-misturado com 100% de agregados graúdos reciclados: 20% de fração vermelha (agregados reciclados de tijolos) e 80% de concreto (VYNCKE e VRIJDERS, 2010).

A Alemanha foi um dos países precursores na prática da reciclagem. No ano de 2008, 56% dos agregados reciclados foram utilizados como base e sub-base na construção de rodovias, e cerca de 30% para obras de terraplanagem. O uso destes materiais como agregados para aplicações estruturais ainda é baixo, aproximadamente 0,8% (HIETE, 2013). Este dado talvez aponte que a imposição de taxas para disposição destes materiais em aterros mostra-se um instrumento eficiente em termos de custos, para aumentar as taxas de reciclagem, porém, aparentemente não é capaz de promover a geração de materiais reciclados de alta qualidade. Na Alemanha também existem obras com utilização de concretos com agregados reciclados, como o *Vilbeler Weg Office Building*, com um total de 461 m³ de concreto com agregados reciclados de concreto (KOSTER e RÜHL, 2001), e o *Waldspirale Residential Building*, onde foram utilizados 12000 m³ de concreto com agregados reciclados em paredes internas e pisos (ACES WORKSHOP, 2010; BIM, 2014).

A Holanda tem uma das mais altas taxas de reciclagem de resíduos de construção civil entre os países da União Europeia. Além disso, impõe um valor mínimo de 10% de materiais reciclados na produção de cimento e asfalto (HIETE, 2013). Os produtores de agregados reciclados, tanto de concreto quanto de resíduos de construção e demolição

misturados, vendem seu produto com certificado de qualidade e suas usinas de reciclagem passam por constantes auditorias dos institutos de certificação (VAZQUEZ, 2013). A construção da Eclusa da Hidrovia de Haandrik é um exemplo de aplicação de agregados reciclados. Nesta obra, foram utilizados 2000 m³ de concreto com agregados reciclados (LEVY e HELENE, 2002).

No Reino Unido, a imposição de taxas para disposição dos resíduos incentiva, por exemplo, as usinas de concreto a diminuir a quantidade de resíduos gerados. Como exemplo de obra com utilização de agregados reciclados, pode-se citar a construção do Prédio 16 do BRE (*Building Research Establishment* – escritório de baixo consumo de energia). Os agregados utilizados no concreto aplicado usado na construção vieram de um prédio comercial de 12 andares demolido na região central de Londres, a 20 quilômetros dali. Ele foi triturado em duas etapas para fornecer agregado na faixa de 5 a 20 mm e entregue a uma empresa local de mistura de concreto (foi o primeiro edifício do Reino Unido a incorporar a tecnologia de concreto usinado com a utilização de agregados reciclados). Essa fonte forneceu todo o agregado graúdo para 1500 m³ de concreto, especificado como mistura C25 ou C35 e usado nas fundações, no piso, nos pilares de sustentação e nos pisos de lajes. Todas as misturas – exceto aquelas colocadas por misturadoras de concreto – continham 985 kg/m³ de agregado triturado (COLLINS, 1997; ADDIS, 2010).

Os valores das taxas de reciclagem tem grande variação entre os países da comunidade europeia. Enquanto no Reino Unido, Holanda, Dinamarca, Alemanha e Irlanda a taxa de reciclagem de resíduos da construção ultrapassa 75%, em outros países como Espanha, Portugal e Itália a taxa de reciclagem fica em torno de 15% a 20%. A taxa média de reciclagem de resíduos da construção na EU é estimada em 46% (DG ENV, 2011).

A variação da porcentagem de reciclagem dos resíduos se dá em função da disponibilidade de recursos naturais, da distância de transporte entre reciclados e materiais naturais, situação econômica e tecnológica do país e densidade populacional. O que contribui para que alguns países tenham maior controle sobre os resíduos produzidos é a legislação mais fundamentada, com punições mais severas e a cobrança de taxas sobre a deposição irregular (SPADOTTO, VECCHIA e CARLI, 2012).

O Japão é reconhecido como um dos países mais adiantados com relação às técnicas de reciclagem. Neste país, foi proposta uma das normas mais antigas sobre o assunto, a “*Proposed standard for the use of recycled aggregates and RAC*”, pela BCSJ (*The Building Contractors Society of Japan*), no ano de 1977. Em 2005 foi criada a norma JIS A5021, que estabelece parâmetros para a utilização de agregados reciclados na produção de concretos.

Os Estados Unidos, por sua vez, possuem um elevado número de instalações de usinas de reciclagem distribuídas em todo o país (MAGALHÃES *et al.*, 2010). Os principais usos são aplicações não estruturais, como materiais de aterro, sistemas de drenagem, base e sub-base de rodovias, blocos de concreto, entre outras (VAZQUEZ, 2013).

No Brasil a reciclagem dos resíduos de construção e demolição é recente e bastante tímida se comparada a países de primeiro mundo. Porém, possui grande potencial de ampliação. Esse atraso em relação a outros países se dá por diversos fatores. Um deles é a questão ambiental ainda vista como um problema de preservação da natureza, focado principalmente nas florestas e animais em extinção, deposição de materiais em aterros controlados e controle da poluição do ar, com o estado exercendo o papel de polícia (LÔRDELO e FERRAZ, 2007). Existe também a concepção de que um produto confeccionado com a utilização de resíduos possuirá qualidade inferior àqueles produzidos com matérias primas virgens, a sensação de risco de baixo desempenho com relação ao uso de novas tecnologias, o baixo custo dos agregados naturais e a falta de cultura para segregação de resíduos, que constituem outras barreiras para a reciclagem e reutilização dos resíduos da construção civil.

As iniciativas com relação à reciclagem dos resíduos da construção partem principalmente do poder público. São Paulo, Santo André, Londrina, Curitiba, Belo Horizonte, São José dos Campos, São Carlos e Ribeirão Preto, são exemplos de cidades que já contam com usinas de reciclagem de resíduos (CABRAL, 2007).

2.1.2 Recomendações normativas

Com relação aos resíduos da construção civil, a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), adota as seguintes classificações:

Resíduos da construção civil

São os provenientes das construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de aterros.

Agregado reciclado

Material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

Segundo essa resolução, os resíduos da construção se enquadram na Classe A¹. Com relação à destinação, estes resíduos deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Outra norma que trata da classificação de resíduos sólidos é a NBR 10004 (ABNT, 2004). Esta norma classifica os resíduos quanto aos seus potenciais riscos ambientais em Classe I – perigosos, Classe II A – não perigosos e não inertes, e Classe II B – não perigosos e inertes. Por ser usualmente considerado inerte, o RCD já é bastante utilizado como agregado reciclado em obras de pavimentação e na construção de casas populares por prefeituras de cidades brasileiras. A classificação dos resíduos como II A ou II B deve ser feita após sua análise química.

A norma NBR 15116 (ABNT, 2004), permite o emprego de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em pavimentos e preparação de concreto sem função estrutural nas classes de resistência à compressão C10 e C15. Conforme esta norma, os agregados reciclados são classificados em dois tipos:

- a) ARC (agregado reciclado de concreto) – agregados reciclados obtidos do beneficiamento de resíduos da Classe A, constituídos de uma fração gráuda mínima de 90%, em massa, de fragmentos compostos por cimento Portland e rochas;
- b) ARM (agregado reciclado misto) – agregados reciclados obtidos do beneficiamento de resíduos da Classe A, constituídos de uma fração gráuda, em massa, inferior a 90% de fragmentos compostos por cimento Portland e rochas.

Ainda conforme a norma NBR 15116 (ABNT, 2004), para o preparo de concreto reciclado sem função estrutural deve ser realizada a pré-saturação do agregado reciclado, considerando-se valores próximos a 80% da absorção total do agregado. As principais exigências para os agregados reciclados destinados a produção de concreto sem função estrutural estão especificadas na Tabela 1.

¹ Definição de resíduos Classe A conforme Artigo 3º da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002)

Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Tabela 1 – Exigências para os agregados reciclados em aplicações não estruturais

| Propriedades | Agregado reciclado – Classe A | | | | Normas | |
|---|--|--------|-------|--------|-----------|-----------|
| | ARC | | ARM | | Agr. | Agr. |
| | Miúdo | Graúdo | Miúdo | Graúdo | Graúdo | miúdo |
| Proporção de fragmentos compostos por cimento e rochas | - | ≥ 90% | - | ≤ 90% | - | - |
| Absorção (%) | ≤ 12% | ≤ 7% | ≤ 17% | ≤ 12% | NBR NM 30 | NBR NM 53 |
| Contaminantes (proporção máxima em relação a massa de agregado reciclado) | Cloretos | | ≤ 1% | | NBR 9917 | |
| | Sulfatos | | ≤ 1% | | NBR 9917 | |
| | Materiais não-minerais (madeira, plástico, betume, vidro e materiais carbonizados) | | ≤ 2% | | - | - |
| | Partículas de argila | | ≤ 2% | | NBR 7218 | |
| | Máxima proporção de contaminantes | | ≤ 3% | | - | |
| Materiais passando na peneira 0,075mm | ≤ 15% | ≤ 10% | ≤ 20% | ≤ 10% | NBR NM 46 | |

Fonte: NBR 15116 (ABNT, 2004)

Pelo fato de estabelecer parâmetros apenas para aplicações não estruturais, a norma é menos rigorosa com relação a alguns requisitos. A norma não impõe valores de massa específica mínima para os agregados. Estabelece uma porcentagem de cloretos solúveis em água, diferente de outras normas, que recomendam a limitação de cloretos solúveis em ácidos. É bastante permissiva com relação aos os valores máximos de material passante na peneira 0,075 mm. Este material fino pode influenciar propriedades dos agregados como resistência à compressão ou o módulo de elasticidade, pois é possível que contenha partículas contaminantes, como argila. De Brito e Saikia (2013) sugerem que especificar valores mais restritivos para as propriedades destes materiais seja algo na direção de permitir a utilização dos agregados reciclados em aplicações estruturais.

Com relação ao ARC, a posição da norma é bastante conservadora, considerando que este tipo de agregados reciclados é constituído fundamentalmente por fragmentos de concreto ou rochas. Conforme De Brito e Saikia (2013), estes agregados poderiam ser utilizados em aplicações mais nobres, com classes de resistência mais altas. Os autores sustentam esta afirmação com base na comparação com outras regulamentações, como a especificação TC 121 DRG (RILEM, 1994) ou a norma britânica BS 8500-2 (BSI, 2015).

No trabalho de Oliveira *et al.* (2004) estão propostos alguns parâmetros para um possível texto-base normativo, o qual permitiria a utilização de agregados reciclados de concreto em dosagens para aplicações estruturais. Na Tabela 2 estão relacionados os valores recomendados por estes autores:

Tabela 2 – Requisitos para os agregados reciclados em aplicações estruturais

| | |
|--|-----------------------|
| Porcentagem máxima de agregados reciclados | 20% |
| Resistência à compressão média limite aos 28 dias | 40 MPa |
| Absorção máxima do agregado reciclado | |
| Agregado graúdo | 7% |
| Agregado miúdo | 12% |
| Massa específica do agregado reciclado – RCA | 2300kg/m ³ |
| Proporção máxima de contaminantes relacionadas à massa de agregado reciclado | |
| Materiais carbonáceos | 1% |
| Cloretos | 0,35% |
| Sulfatos | 1% |
| Betuminosos | 1% |
| Materiais não-minerais | 0,5% |
| Solo e plantas | 0% |
| O somatório dos contaminantes não deve ser maior que 2% | |

Fonte: Oliveira *et al.* (2004)

Os valores propostos são mais rigorosos que os da norma NBR 15116 (ABNT, 2004), principalmente com relação aos materiais contaminantes. A proporção de substituição máxima dos agregados naturais pelos reciclados é semelhante à de algumas normas internacionais (DafStB (1998) citado por GRÜBL e RÜHL (1998) (Alemanha); WBTC No.12; 2002 (Hong Kong); BS 8500-2, 2006 (Reino Unido)).

A classe de resistência sugerida corresponde a um alto valor de solicitação estrutural. Concretos produzidos com essa resistência normalmente serão destinados à moldagem de peças essenciais para a estabilidade e segurança de uma obra. Ou, conforme a norma NBR 12655 (ABNT, 2015), para peças submetidas às condições de exposição severas de congelamento/descongelamento, ataque de agentes químicos e sulfatos. A determinação da classe de resistência deve ser feita cautelosamente, após o desenvolvimento de pesquisas e estudos sobre o material a ser empregado, principalmente quando se trata da utilização de agregados reciclados.

Mesmo se for proveniente somente de resíduos de concreto, o agregado reciclado possui maior heterogeneidade das suas propriedades em relação ao agregado natural. Essa variabilidade torna complicado prever o comportamento de tal concreto. Portanto, devem ser analisadas as propriedades do agregado reciclado, em conjunto com a quantidade que será incorporada ao novo concreto. Uma maneira de utilizar o agregado reciclado com relativa

segurança na produção de concretos é através do uso de resíduos britados provenientes de peças estruturais demolidas e de resistência conhecida, que deve ser maior que a do concreto a ser produzido.

A Tabela 3 foi adaptada do trabalho de Angulo (2005) em conjunto com dados obtidos pelos autores De Brito e Saikia (2013), Gonçalves e De Brito (2008) e Leite (2001). Apresenta uma síntese de diferentes parâmetros e recomendações normativas para a utilização de agregados reciclados.

Tabela 3 – Recomendações normativas para utilização de agregados reciclados

(continua)

| Exigências | Holanda (C.U.R, 1994) (Commissie voor Uitvoering van Research) | Alemanha (DIN 4226-100) (DafStB, 1998) | Brasil (NBR 15116) | Reino Unido BS 8500 (BSI, 2015, 2006) | RILEM Recommendati on TC 121 DRG (1994) | Hong Kong: WBTC (Works Bureau Technical Circular) No. 12/2002 | Japão JIS 5021 BCSJ (1977) |
|----------------------|---|--|---|---|---|---|--|
| Natureza do agregado | Concreto, alvenaria, argamassas, concreto leve, produtos cerâmicos, rochas naturais | Resíduos de concreto, resíduos de alvenaria, resíduos de construção e demolição | Resíduos de concreto, resíduos de alvenaria | Resíduos de concreto, resíduos de alvenaria, resíduos de construção e demolição | Resíduos de concreto, resíduos de alvenaria | Não definida | Concreto |
| Granulometria | Miúdo e Graúdo | Miúdo e Graúdo | Miúdo e graúdo Granulometria de acordo com ANBT NBR 7211(2009) | Apenas agregados graúdos | Fração de agregados reciclados maior que 4mm | Apenas graúdo | Agregados miúdos e graúdos de concreto |
| Classificações | CUR (1984) Agregado reciclado de concreto, deve possuir massa específica superior a 2100 kg/m ³ e porcentagem de resíduos de concreto superior a 95%. CUR (1986) Agregado reciclado de alvenaria, com pelo menos 65% de resíduos de alvenaria. CUR (1994) Agregados de argamassa britada | Tipo 1: resíduos de concreto; Tipo 2: resíduos de construção e demolição; Tipo 3: resíduos de alvenaria; Tipo 4: mistura de material. | a) ARC (agregado reciclado de concreto) – fração graúda mínima de 90%, em massa, de fragmentos compostos por cimento Portland e rochas; b) ARM (agregado reciclado –fração graúda, em massa, inferior a 90% de fragmentos compostos por cimento Portland e rochas. | ARC (Agregados Reciclados de Concreto) - compreendem mais de 95% de sua composição de concreto britado AR (Agregados Reciclados) - agregados que contem menos que essa proporção de concreto britado | I - Agregados provenientes de materiais cerâmicos II - Agregados provenientes de concreto III - Agregados provenientes da mistura de agregados naturais (>80%) e dos outros dois grupos (quantidade de materiais do Grupo I <10%) | Não definida | BCSJ (1977) classifica em três tipos: I – Fração graúda reciclada e fração miúda natural II – Fração graúda reciclada e fração miúda é uma mistura de natural e reciclado III – Fração graúda e miúda reciclada Conforme a norma JIS A 5021 (2005), os agregados são classificados conforme seu tamanho e reatividade álcali-sílica. |

Tabela 3 – Recomendações normativas para utilização de agregados reciclados

(continua)

| Exigências | Holanda (C.U.R, 1994) (Commissie voor Uitvoering van Research) | Alemanha (DIN 4226-100) (DafStB, 1998) | Brasil (NBR 15116) | Reino Unido BS 8500 (BSI, 2015, 2006) | RILEM Recommendati on TC 121 DRG (1994) | Hong Kong: WBTC (Works Bureau Technical Circular) No. 12/2002 | Japão JIS 5021 BCSJ (1977) |
|-----------------------|--|--|--|---|---|---|--|
| Aplicação | Produção de concreto simples, armado ou protendido. Se o percentual de substituição for inferior a 20%, o concreto pode ser considerado como convencional. Caso o concreto a ser produzido seja utilizado em elementos estruturais, e sua composição possua mais de 20 % em massa de agregados reciclados, a altura ou espessura das peças devem ser aumentadas em 10 % para garantir sua rigidez. | Para uso em concretos, permite-se o uso de agregados reciclados de concreto limitado à classe C30/37, e em ambientes interiores. Para concretos expostos à ambientes mais severos, as proporções variam entre 20% e 30%. | Produção de concretos sem fins estruturais | Para concretos com classes de resistências compreendidas entre C20/25 e C40/50, a porcentagem de utilização de RCA não deve exceder 20%. Contudo, para classes de resistências inferiores, pode ser feita a substituição total de agregados naturais por reciclados | A norma permite a utilização de ARC para produção de concretos estruturais, quando limitado às resistências e classes de exposição especificadas. | O concreto produzido com 100% de substituição de agregados naturais por reciclados, deve ser utilizado apenas para finalidades não estruturais. Para concreto de comportamento especificado, podem ser substituídos 20% dos agregados, para resistências compreendidas entre 25-35 MPa. | Tipo I - Fundações de prédios em geral, fundações de edifícios de apartamentos, edificações residenciais unifamiliares, edificações familiares de um pavimento, fundações pesadas, etc. Tipo II – Fundações para construções de bloco de concreto pré-fabricado, construções leves não residenciais, fundações de máquinas. Tipo III – Fundações de edifícios de madeira, portões, cercas, fundações de máquinas simples, lajes em declive, etc. |
| Máx f_{ck} (MPa) | Limite não definido | Classe C30/37 Não são permitidos resíduos das classes 3 e 4 no concreto estrutural | Classes C10 e C15 sem fins estruturais | Classe C40/50 | Tipo I – C16/20 Tipo II – C50/60 Tipo III – Sem limite | 25-35MPa (até 20% de substituição) até 20 MPa (substituição de 100%) | Tipo I – 18 (projeto) e 30 (dosagem) Tipo II – 15 (projeto) e 27 (dosagem) Tipo III – 12 (projeto) e 24 (dosagem) |

Tabela 3 – Recomendações normativas para utilização de agregados reciclados

(continua)

| Exigências | Holanda (C.U.R, 1994) (Commissie voor Uitvoering van Research) | Alemanha (DIN 4226-100) (DafStB, 1998) | Brasil (NBR 15116) | Reino Unido BS 8500 (BSI, 2015, 2006) | RILEM Recommendati on TC 121 DRG (1994) | Hong Kong: WBTC (Works Bureau Technical Circular) No. 12/2002 | Japão JIS 5021 BCSJ (1977) |
|--|---|---|--|--|---|---|---|
| Classes de exposição | Não definidas | XC1(Carbonat.) X0 (Sem ataque) XC1 a XC4 (Carbonat.) XF1 e XF3 (Gelo- degelo sem sais) XA 1 (Ataque químico) | Não definidas | X0 (sem ataque) , XC1, XC2, XC3 e XC4 (carbonatação), XF1 (gelo-degelo), DC-1 | 2a e 4a; 2b e 4b e 3 | Não definidas | Limite não definido |
| Sulfatos (% em massa) | < 1,0%, para agregados de concreto e alvenaria | Tipos 1, 2, 3 < 0,8% Tipo 4 n.d. | < 1,0%, para agregados de concreto e alvenaria | Sulfatos solúveis em ácidos (SO ₃) < 1% | Sulfatos solúveis em água (SO ₃) Tipos I, II e III ≤ 1% | < 1,0% | Limite não definido |
| Cloretos (% em massa) | Porcentagens variam, conforme o tipo de agregado e a aplicação | Tipos 1, 2, 3 < 0,04% Tipo 4 < 0,15% | < 1,0%, para agregados de concreto e alvenaria | BS EM 1744-1 | Limite definido | não < 0,05% | ≤ 0,04% (JIS A 5021) |
| Passante # 0,075 µm < (% em massa) | 0,1% para ARC e 2% para agregado reciclado de alvenaria | Limite definido | não ARC graúdo ≤ 10% ARC miúdo ≤ 15% ARM graúdo ≤ 10% ARM miúdo ≤ 20% | Limite não definido | Material fino > 0.063mm Tipo I ≤ 3% Tipo II ≤ 2% Tipo III ≤ 2% | Material fino > 0.063mm < 4% | ≤ 1,0% para agregados graúdos ≤ 7,0% para agregados miúdos |
| Materiais não minerais (madeira, plástico, vidros e cerâmicas) | 0,5% para fração ARC < 4mm 0,1% para fração ARC > 4mm 1% para as frações de agregado reciclado de alvenaria | Limite não definido | 2% para todas as frações de agregados de ARC e ARM | < 1% | Tipo I ≤ 5% Tipos II e III ≤ 1% | < 0,5% | ≤ 0,5% |

Tabela 3 – Recomendações normativas para utilização de agregados reciclados

(continua)

| Exigências | Holanda (C.U.R, 1994) (Commissie voor Uitvoering van Research) | Alemanha (DIN 4226-100) (DafStB, 1998) | Brasil (NBR 15116) | Reino Unido BS 8500 (BSI, 2015, 2006) | RILEM Recommendati on TC 121 DRG (1994) | Hong Kong: WBTC (Works Bureau Technical Circular) No. 12/2002 | Japão JIS 5021 BCSJ (1977) |
|-----------------|---|---|--|---|---|---|---|
| Densidade | Massa específica > 2100 kg/m ³ (ARC) | Massa específica aparentes Tipo 1 e 2 – 2000 kg/m ³ Tipo 3 – 1800 kg/m ³ Tipo 4 – 1500 kg/m ³ | Limite não definido | Limite não definido | Massa específica agregado saturado superfície seca Tipo I ≥ 1500 kg/m ³ Tipo II ≥ 2000 kg/m ³ Tipo III ≥ 2400 kg/m ³ | 2000 kg/m ³ | Estado seco em estufa ≥ 2500kg/m ³ |
| Absorção (%) | Limite não definido | Absorção de água máxima após 10 minutos Tipo 1 – 10% Tipo 2 – 15% Tipo 3 – 20% Tipo 4 – n.d. | ARC graúdo ≤ 7% ARC miúdo ≤ 12% ARM graúdo ≤ 12% ARM miúdo ≤ 17% | Limite não definido | Tipo I ≤ 20% Tipo II ≤ 10% Tipo III ≤ 3% | 10% | ≤ 3,0% para agregados graúdos ≤ 3,5% para agregados miúdos |
| Retração | Coefficiente de retração, agregados reciclados de concreto: Classes C15/20 e C20/25 = 1,35 Classes C25/30 e C40/50 = 1,55 Agregados reciclados de alvenaria, Classes C15/20 e C20/25 = 1,25 | Limite não definido | Limite não definido | Máximo de 0,075% de retração por secagem. | Coefficiente de retração de Tipo I – 2 Tipo II – 1,5 Tipo III – 1 | Limite não definido | Limite não definido |

Tabela 3 – Recomendações normativas para utilização de agregados reciclados

(conclusão)

| Exigências | Holanda (C.U.R, 1994) (Commissie voor Uitvoering van Research) | Alemanha (DIN 4226-100) (DafStB, 1998) | Brasil (NBR 15116) | Reino Unido BS 8500 (BSI, 2015, 2006) | RILEM Recommendati on TC 121 DRG (1994) | Hong Kong: WBTC (Works Bureau Technical Circular) No. 12/2002 | Japão JIS 5021 BCSJ (1977) | |
|------------------------------------|---|--|-----------------------|---|---|--|-------------------------------|--|
| Fluência | Coefficiente de fluência, agregados reciclados de concreto: Classes C15/20 e C20/25 = 1,45 Classes C25/30 e C40/50 = 1,25 Agregados reciclados de alvenaria, Classes C15/20 e C20/25 = 1,15 | Limite definido | não | Limite não definido | Limite não definido | Coefficiente de fluência Tipo I – 1 Tipo II – 1 Tipo III – 1 | Limite não definido | Limite não definido |
| Reatividade álcali- agregado | Limite não definido | Limite definido | não | Limite não definido | A contribuição de álcalis dos ARC terá de cumprir as seguintes exigências: - 0,20 kg Na ₂ O por 100 kg de RCA; - quando a composição dos RCA for conhecida o teor de álcalis deve ser calculado para o concreto original. | A norma exige que se realize ensaio de expansão para avaliar a reatividade álcali-sílica, nas classes 2a,4a e 2b, 4b | Limite não definido | Os agregados reciclados miúdos e graúdos devem ser avaliados conforme a reatividade álcali-sílica de acordo com as normas JIS A 1145 (2007), JIS A 1146 (2007) ou JIS A 1804 (2009). |

Fonte: Angulo (2005); De Brito e Saikia (2013); Gonçalves e De Brito (2008); Gonçalves (2007) e Leite (2001)

Considerações quanto à classificação dos agregados

Apesar de cada norma ter uma nomenclatura própria, a constituição dos diferentes tipos de agregados reciclados é comparável, pois eles geralmente têm como constituintes principais o concreto e a alvenaria.

As normas inicialmente especificam a porcentagem necessária de resíduo de concreto, para que um agregado seja considerado como ARC (Agregado Reciclado de Concreto). A maior parte das normas especifica este valor em torno de 90% ou mais, como a norma BS 8500 (BSI, 2015), na qual é estipulado o valor de 95% de resíduos de concreto britado. Com relação ao resíduo de alvenaria, as especificações são mais variadas, algumas normas especificam porcentagens mínimas, outras classificam como ARM (Agregado Reciclado Misto) ou ARA (Agregado Reciclado de Alvenaria) aqueles agregados cuja porcentagem de resíduos de concreto não foi suficiente para classificar o agregado com sendo ARC. Verifica-se que, quanto mais nobre é a finalidade a qual o concreto será aplicado, as normas ficam mais restritivas, não permitindo a fração miúda, ou o ARM, ou ainda, exigindo que o agregado se enquadre em determinados parâmetros que impossibilitam sua aplicação. O Japão, por exemplo, tanto na recomendação BCSJ (1977) quanto na norma JIS A 5021 (2005), permite apenas o uso de agregados provenientes de resíduos de concreto, para utilização em concretos. A recomendação TC 121 DRG (RILEM, 1994), permite apenas o uso da fração de agregados reciclados maior do que quatro milímetros.

Considerações quanto aos requisitos dos agregados reciclados

Ao analisar os limites de materiais não minerais, percebe-se que algumas restringem os teores em torno de 0,1%, 0,5% (C.U.R, 1994; WBTC No. 12, 2002). A norma brasileira admite um valor igual a 2%, pelo fato de permitir apenas usos não estruturais. Os valores de teor de cloretos e sulfatos variam, mas no geral não passam de 1%. Algumas normas adotam a solubilidade em água – TC 121 DRG (RILEM, 1994), outras em ácido – BS 8500 (BSI, 2015). Com relação à porcentagem de materiais finos, passantes na peneira 0,075mm, os valores impostos pelas normas são bastante variados, com o menor valor de 0,1% para a ARC na Holanda até 20% para ARM miúdo, pela norma brasileira. Normalmente as normas propõem valores diferenciados conforme a granulometria do agregado ou sua composição. Novamente, verificam-se exigências mais rígidas naqueles países que permitem uso de agregados reciclados para fins estruturais.

Quanto à densidade, a maioria das normas especifica valores em função da massa específica. As recomendações do C.U.R (*Commissie voor Uitvoering van Research*) e TC 121 DRG (RILEM, 1994) apresentam valores próximos, para ARC, de 2100 kg/m³ e 2000 kg/m³, respectivamente. A especificação WBTC No. 12 (2002), por sua vez, propõe um valor único de 2100 kg/m³. A norma DIN 4226-100 (2002) da Alemanha propõe valores em função da massa específica aparente, provavelmente para levar em consideração a porosidade interna do agregado. Ainda existe divergência entre as normas quanto à umidade do agregado para determinar a massa específica: A TC 121 DRG (RILEM, 1994), determina no estado saturado superfície seca e a norma JIS A 5021 (2005) determina o uso do agregado seco em estufa. Os valores variam em função da composição dos agregados. Para ARM e ARA, os valores normalmente situam-se entre 1500 kg/m³ e 1800 kg/m³.

Com relação à absorção de água, como acontece com os demais parâmetros, seus valores variam em função da composição do agregado, da granulometria e também do uso que a norma lhes permite. Na norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004), onde não é permitido o uso de concreto com agregados reciclados em peças estruturais, os valores variam de 7% a 17%. As normas japonesas, por sua vez, limitam os teores em 3% para os agregados graúdos e 3,5% para os agregados miúdos.

Considerações quanto à aplicação em concretos

No geral, a porcentagem de substituição de agregados naturais por agregados reciclados na produção de concretos é restrita na maioria das normas. São permitidos apenas baixos teores de substituição, geralmente no máximo 20%, para concretos com classes superiores de resistência. Quando se permite que sejam maiores que isso o concreto produzido será destinado a finalidades não estruturais, podendo nesse caso chegar a 100% de substituição. A recomendação holandesa C.U.R. prevê aumento na espessura ou altura das peças estruturais produzidas com concretos contendo mais de 20% de agregados reciclados. Com relação às normas DIN 4226-100 (2002) e BS 8500 (BSI, 2015) o uso de agregados reciclados é limitado em função das classes de resistência do concreto, no máximo C30/37 e C40/50, respectivamente. A recomendação BCSJ (1977) especifica os tipos de estrutura que poderão ser executados com os concretos produzidos com agregados reciclados, por exemplo, fundações, lajes, blocos, entre outros, dependendo da quantidade de agregado miúdo reciclado existente nos tipo I, II e III. A TC 121 DRG (RILEM, 1994), chega a permitir que os ARC sejam utilizados na classe C50/60.

Quanto ao ambiente de exposição, as normas DIN 4226-100 (2002), TC 121 DRG (RILEM, 1994) e BS 8500 (BSI, 2015) propõem restrições para a utilização de agregados reciclados em concretos que ficarão expostos a ambientes agressivos, sujeitos à carbonatação, penetração de cloretos, ciclos de gelo-degelo e outros ataques químicos.

Poucas normas consideram a durabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados. Quando o fazem, os principais parâmetros utilizados são: retração, fluência e reatividade álcali-sílica. E dificilmente estes parâmetros são contemplados simultaneamente por uma única norma. A recomendação holandesa C.U.R. e a TC 121 DRG (RILEM, 1994), consideram os parâmetros de durabilidade em função dos coeficientes de retração e fluência. Elas consideram esses coeficientes respectivamente por classe de resistência do concreto e pela composição do agregado. Tanto os valores do coeficiente de retração como o de fluência são bastante distintos entre as duas recomendações. A recomendação TC 121 DRG (RILEM, 1994) exige que seja feito o ensaio de expansão para avaliar a reatividade álcali-sílica em algumas classes de exposição ambientais. Além da recomendação RILEM, a BS 8500 (BSI, 2015) e a JIS A 5021 (2005) também consideram a reatividade álcali-sílica. A BS 8500 (BSI, 2015) limita o teor de álcalis no agregado reciclado. Ao analisar JIS A 5021 (2005), verifica-se que nesta norma a reatividade álcali-sílica é um parâmetro de grande importância, pois além de exigir que se façam os ensaios de acordo com normas JIS A 1145 (2007), JIS A 1146 (2007) ou JIS A 1804 (2009), este é um parâmetro utilizado juntamente com a granulometria para classificar o agregado.

2.1.3 Propriedades dos agregados reciclados de concreto (ARC)

Em termos físicos, a principal diferença entre o agregado reciclado de concreto e o agregado natural é a camada de argamassa original aderida à superfície do agregado reciclado, responsável por tornar suas propriedades tão diferentes dos agregados convencionais (DE BRITO *et al.*, 2011, FOLINO e XARGAY, 2014; PEDRO *et al.*, 2014). Há uma relação recíproca entre a quantidade de argamassa aderida e a qualidade do agregado. Trata-se de um material poroso, com grande capacidade de absorção de água (MARI, 2006). Além disso, estes agregados apresentam menor massa específica e massa unitária, maior porosidade e menor resistência a ataques químicos e ações mecânicas (BEHERA *et al.*, 2014).

Em um estudo sobre o comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados, Huda e Alam (2014) atribuíram os menores resultados encontrados para os ensaios de massa específica e massa unitária à presença da camada de argamassa aderida ao agregado reciclado. Os agregados reciclados utilizados por estes autores também apresentaram maior capacidade de absorção de água.

Conforme Saikia e De Brito (2013), os agregados reciclados podem ter diferentes valores de massa específica, dependendo da quantidade de argamassa aderida a eles. Duan e Poon (2014) verificaram o efeito da quantidade de argamassa aderida nas propriedades de agregados reciclados (RA1, RA2 e RA3). Conforme aumentava a porcentagem de argamassa aderida (RC1 – 24,3%; RC2 – 34% e RC3 – 61,1%) havia redução no valor da massa específica (RC1 – 2,45 g/cm³; RC2 – 2,37 g/cm³ e RC3 – 2,36 g/cm³) e aumento na capacidade de absorção (RC1 – 3,47%; RC2 – 5,66% e RC3 – 5,77%). Essa relação inversamente proporcional entre quantidade de argamassa aderida e redução da massa específica também foi observada por De Juan e Gutierrez (2009). Os valores de massa específica determinados por estes autores para o agregado reciclado, bem como sua capacidade de absorção podem ser visualizados nos gráficos da Figura 1 e da Figura 2.

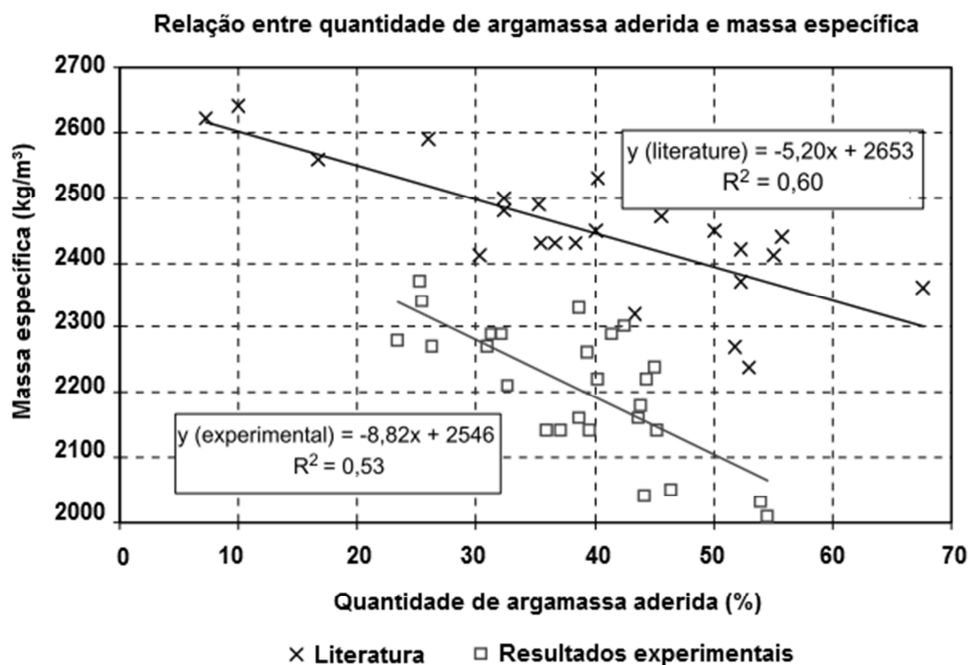


Figura 1 – Correlação entre quantidade de argamassa aderida e massa específica
 Fonte: DE JUAN e GUTIERREZ (2009)

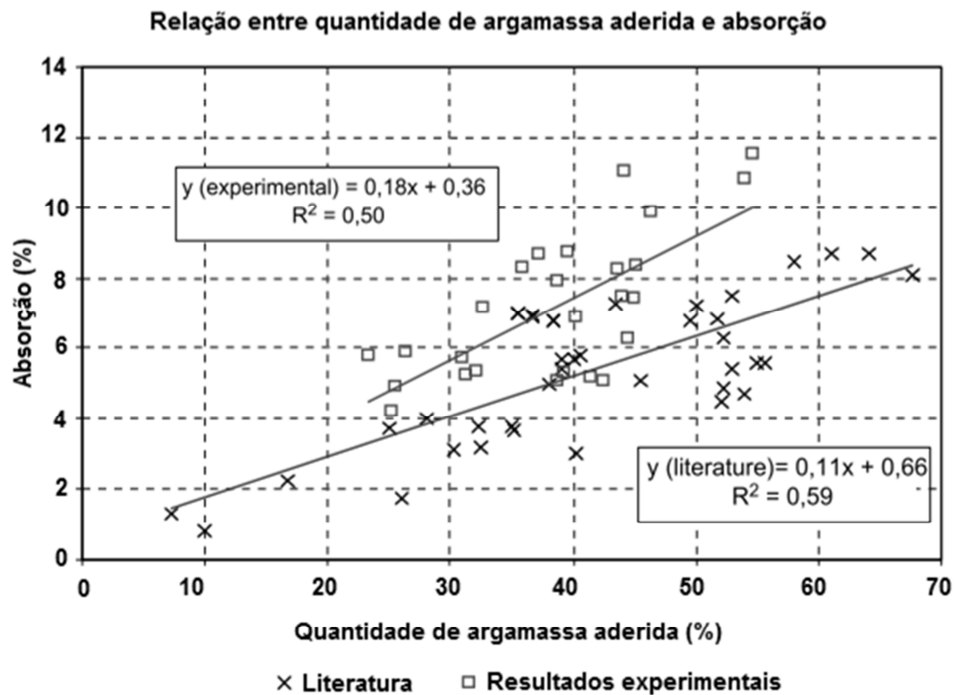


Figura 2 – Correlação entre quantidade de argamassa aderida e absorção de água
 Fonte: DE JUAN e GUTIERREZ (2009)

As variabilidades das características dos agregados reciclados dependem da composição do resíduo e do equipamento de britagem adotado (LEITE, 2001). Conforme Behera *et al.*, (2014), outro fator que interfere nas propriedades do agregado reciclado é a relação água/cimento do concreto que deu origem a ele. Agregados originados de concretos com baixa relação a/c, com baixa porosidade e alta resistência mecânica apresentarão menor taxa de absorção (DE BRITO, BARRA e FERREIRA, 2011).

2.1.4 Zona de transição interna

A zona de transição entre o agregado reciclado e sua camada de argamassa original aderida é bastante fraca, pois durante o processo de britagem, formam-se poros minúsculos e inúmeras fissuras na argamassa original (OTSUKI *et al.*, 2003). Logo, a estrutura do concreto com agregados reciclados é mais complexa do que a dos concretos produzidos somente com agregados naturais, que possui apenas uma zona de transição interna. No concreto com agregados reciclados, há duas zonas de transição: uma localizada entre o agregado e a argamassa original aderida e outra entre a camada de argamassa original e a pasta de cimento do concreto novo (LI *et al.*, 2012), como mostra a Figura 3. A resistência do concreto com

agregados reciclados é determinada pela zona de transição mais fraca (SILVA *et al.*, 2014; ZHANG e INGHAM, 2010). A argamassa aderida ao agregado original pode representar o elo mais fraco da mistura, quando sua resistência for menor que a resistência da nova zona de transição; especialmente devido à sua maior porosidade (BUTTNER, 2003).

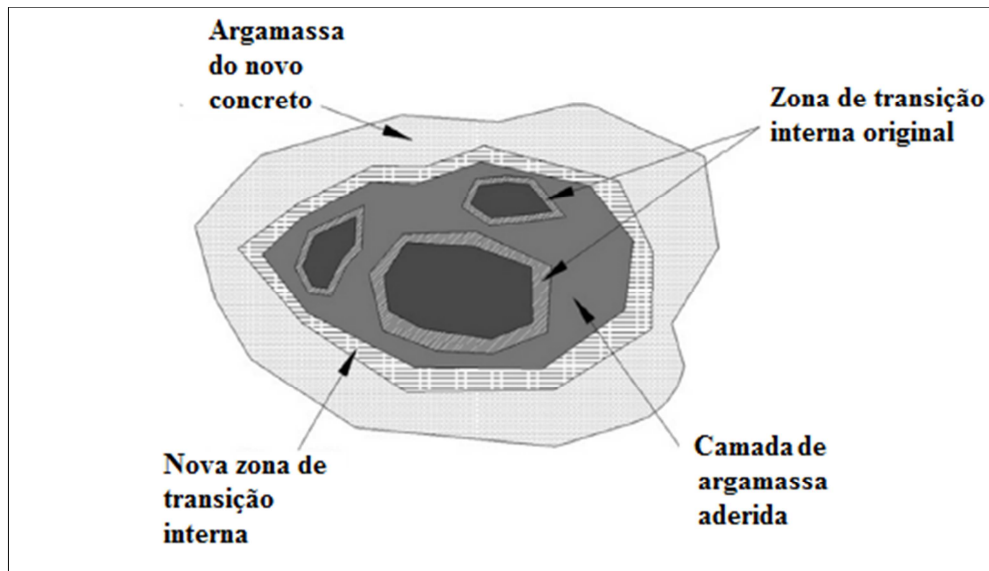


Figura 3 – Agregado reciclado com zonas de transição interna
 Fonte: Khoshkenari *et al.* (2014)

2.1.5 Propriedades dos concretos com agregados reciclados no estado fresco

Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto fresco é uma importante propriedade que influencia várias outras propriedades do estado fresco e também do estado endurecido, tais como densidade, teor de vazios e resistência. A trabalhabilidade do concreto depende de várias propriedades dos seus componentes (DE BRITO e SAIKIA, 2013). O método mais versátil para determinação da trabalhabilidade é através do ensaio de abatimento pelo tronco de cone.

Dentre as propriedades dos agregados reciclados que possuem influência na trabalhabilidade, destaca-se a alta absorção de água por parte destes agregados, responsável pela redução da água livre da mistura e consequente perda de consistência (ISMAIL e RAMLI, 2014).

Devido à alta capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, superior à dos agregados naturais, o abatimento de concretos que contém algum tipo de agregado

reciclado geralmente é mais baixo do que o do concreto convencional, mantendo-se a mesma demanda de água (ÇAKIR, 2014; DE BRITO *et al.*, 2011; MEFTEH *et al.*, 2013). A textura da superfície e a angularidade dos agregados reciclados também tem uma influência considerável na trabalhabilidade do concreto (BEHERA *et al.*, 2014; DOMINGO-CABO *et al.*, 2009). São características que proporcionam ao concreto um maior travamento durante a mistura, dificultando a movimentação entre as partículas, desta maneira necessitarão de maior quantidade de pasta para promover esta mobilidade (MOREIRA, 2010).

TOPÇU (1997) observou valores de abatimento iguais a 75 mm em concretos contendo agregados graúdos provenientes de resíduos de concretos britados, enquanto que o concreto convencional equivalente apresentava o valor de 100 mm.

A redução no abatimento do concreto acentua-se conforme o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. No trabalho de Ismail e Ramli (2014) foram constatados valores de abatimento aproximadamente 17% menores quando se substituiu 60% de agregados naturais por agregados reciclados, mesmo quando estes passaram por tratamento com ácido clorídrico para remover a camada de argamassa aderida (a mesma relação água/cimento foi utilizada para o concreto produzido com agregado natural e com agregado reciclado). Matias *et al.* (2013) verificaram menores valores de abatimento (90 mm, 78 mm e 75 mm) conforme aumentava a quantidade de agregado reciclado ao concreto (25%, 50% e 100%, respectivamente), apesar da utilização conjunta de aditivo superplastificante.

Por outro lado, a textura mais rugosa, o tamanho das partículas e a forma dos agregados reciclados promovem uma boa aderência entre o agregado e a pasta da matriz (SAGOE-CRENTSIL, 2001). Esse fato está relacionado às condições adequadas de mistura para recobrir os agregados.

A significativa e rápida absorção de água dos agregados reciclados afeta diretamente a demanda de água do concreto. A influência é pequena quando se limitam as quantidades de agregados graúdos reciclados de concreto (20% – 30%). Nos demais casos, é necessária uma demanda extra de água na produção dos concretos (DE BRITO e SAIKIA, 2013). Existem alternativas para resolver o problema:

- *Aumentar a quantidade de água da mistura*

Esse procedimento consiste na adição suplementar de água à mistura para aumentar a fluidez do concreto, e resulta em um aumento da sua relação água/cimento. Soluciona

momentaneamente um problema do estado fresco, porém resulta em problemas no estado endurecido. A quantidade de água em excesso não será aproveitada nas reações de hidratação, vai evaporar e gerar vazios no interior do concreto. A presença destes vazios faz com que o concreto gerado seja mais poroso, mais suscetível à ação de agentes nocivos, além de prejudicar sua resistência.

- *Utilização de aditivos químicos (plastificantes e superplastificantes)*

Essa alternativa resulta em uma mistura com uma relação água/cimento mais baixa e uma conseqüentemente melhora da durabilidade e das propriedades mecânicas do concreto. A quantidade de aditivo químico necessário para compensar o efeito da absorção do agregado reciclado na trabalhabilidade aumenta conforme o aumento de sua incorporação (DE BRITO E SAIKIA, 2013).

Agrela e Alaejos (2013) produziram concretos com diferentes classes de resistência e valores de abatimento, por meio da utilização de agregado graúdo reciclado cujo valor da absorção era igual a 5,1%. Quando o teor de substituição foi de até 20% de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto, foi obtido o mesmo valor de abatimento do concreto convencional, sem aumentar a quantidade de aditivo superplastificante utilizado. No entanto, quando foi feita a substituição total do agregado natural pelo reciclado, foi necessário utilizar o dobro da quantidade de aditivo para obter o mesmo valor de abatimento. Chakradhara *et al.* (2011) encontraram menores valores de abatimento, quando houve a utilização de agregados reciclados. Com proporções de substituição de 50% e 100% dos agregados naturais por reciclados foi necessária a utilização de aditivo superplastificante para manter o valor do abatimento entre 50 e 60 mm.

Em estudo sobre utilização de aditivo superplastificante na produção de concretos com agregados reciclados, Matias *et al.* (2013) constataram que era necessário aumentar o teor de aditivo sobre o peso de cimento (0,42%, 0,45% e 0,48%) para substituições de 25%, 50% e 100%, respectivamente. Mesmo assim, o valor do abatimento para a substituição de 25% (88 mm) não foi alcançado pelos demais teores de substituição, de 50% (77 mm) e 100% (78 mm).

Ao adotar-se a utilização de aditivos como forma de melhorar a consistência, deve-se considerar o fator econômico. Se o objetivo da utilização dos agregados reciclados é a redução de custos, o gasto adicional com aditivos químicos pode não compensar a economia gerada pelo seu menor preço.

- Pré-molhagem do agregado reciclado

A pré-molhagem dos agregados reciclados é uma alternativa que tem se mostrado viável para reduzir a perda de consistência dos concretos devido à sua alta absorção. Conforme Cabral *et al.* (2010), estima-se que após dez minutos imerso, o agregado reciclado absorverá cerca de 80% da água referente a vinte e quatro horas de submersão.

Mefteh *et al.* (2013) constataram que a utilização de agregados reciclados de concreto no estado saturado superfície seca ou após serem submetidos ao procedimento de pré-molhagem melhora a trabalhabilidade dos concretos. Os autores não verificaram a ocorrência de segregação ou exsudação nas misturas de concreto testadas.

Padovan (2013) verificou a influência de diferentes teores de pré-molhagem na trabalhabilidade do concreto. Anteriormente à utilização do agregado reciclado, realizou-se a pré-molhagem do material com percentuais na ordem de 40, 60, 80 e 100% da água relativa à absorção total do resíduo. Conforme a autora, os concretos produzidos com 80% de pré-molhagem dos agregados e uso de aditivo foram os que apresentaram os menores valores de perda de abatimento, até o tempo final de ensaio. Aqueles concretos produzidos com agregados reciclados e sem a utilização de aditivos necessitam de aumentos de até 10% na quantidade de água para que atingissem o abatimento estabelecido, quando comparados aos concretos de referência.

Quando o agregado reciclado é colocado em contato com a água para a realização de sua pré-molhagem (seja ela considerando sua absorção total o parcial) e em seguida é adicionado ao concreto, sem que seja descontada a quantidade de água de pré-molhagem que já está presente nele, ocorre um aumento na relação água/cimento do concreto. Esse aumento acaba por influenciar os resultados de resistência à compressão no estado endurecido. Outra alternativa é realizar a imersão prévia do agregado em parte da água de amassamento da mistura. Dessa forma não haverá alteração na relação água/cimento do concreto.

Massa específica

A massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e de sua porosidade, bem como de sua textura, forma e tamanho das partículas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

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 (BUTTLER, 2003; CARRIJO, 2005; 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 diminuição da massa específica. Além disso, 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 (LATTERZA, 1998; LEITE, 2001).

2.1.6 Propriedades dos concretos com agregados reciclados no estado endurecido

Resistência à compressão

Os agregados, por não entrarem em reações químicas complexas com a água, são frequentemente tratados como material inerte, presentes no concreto apenas para função de preenchimento. No entanto, existem características dos agregados (porosidade, presença de substâncias deletérias, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial) que exercem influência sobre as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Os agregados naturais são geralmente densos e resistentes; portanto, a porosidade da matriz, bem como a zona de transição entre a matriz e o agregado gráudo é que normalmente determinam características de resistência dos concretos convencionais (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Diante disso, e ao considerar-se também a parcela significativa do volume do concreto ocupado pelos agregados – cerca de 70% a 80% (MEFTEH *et al.*, 2013; NEVILLE, 2016), parece razoável que as propriedades se modifiquem quando se substituem os agregados naturais por reciclados (CARRIJO, 2005; LEITE, 2001).

Alguns autores afirmam que a substituição de agregados naturais pelos reciclados no concreto diminui sua resistência, para uma mesma relação água/cimento (KWAN *et al.*, 2011; MARINKOVIĆ *et al.*, 2010; PENG *et al.*, 2013). A resistência à compressão do concreto diminui conforme aumenta o teor de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados (DILBAS *et al.*, 2014; FOLINO e XARGAY, 2014; LI, 2008).

No entanto, não se deve estabelecer a perda de resistência à compressão como um resultado inevitável da utilização de agregados reciclados para a produção de concretos. Existem trabalhos em que não houve perda de resistência do concreto produzido com agregados reciclados em relação ao concreto de referência (AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002) ou foi verificado até mesmo um acréscimo na resistência em relação ao concreto produzido somente com agregados naturais (BUTTLER, 2003). Em estudo realizado por Buttler (2003) houve um ligeiro aumento no valor da resistência à compressão do concreto produzido com agregado reciclado em relação ao concreto com agregados naturais. Esse fato foi atribuído ao processo de cura úmida interna, a grande quantidade de partículas não hidratadas de cimento presentes no agregado reciclado e à qualidade do agregado reciclado. Para Buttler (2003) os agregados reciclados provenientes de concretos com elevado consumo de cimento possuem propriedades aglomerantes, fato pode ser importante do ponto de vista econômico devido à redução no consumo de cimento. No estudo realizado por Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), os agregados reciclados foram provenientes da britagem de estruturas demolidas, cujas principais características já haviam sido investigadas pelos autores. O conhecimento de propriedades inerentes aos concretos utilizados na execução dessas estruturas, como: idade, tipo de agregado utilizado na execução, e a resistência do concreto original (concretos com resistência entre 35 MPa e 70 MPa) foi um fator determinante na qualidade dos novos concretos produzidos com o agregado reciclado. Os resultados de resistência à compressão estavam condicionados à qualidade do agregado reciclado e às condições de mistura. Para alguns tipos de agregado reciclado foram obtidos valores de resistência superiores ao valor especificado, quando empregados juntamente com sílica ativa e aditivo superplastificante e utilizando menor relação água/cimento.

A intensidade na perda da resistência cresce conforme o aumento da quantidade de agregado reciclado incorporada ao concreto. Conforme Barbudo *et al.* (2013), teores de substituição de até 20% resultam em comportamentos mecânicos similares ao concreto de referência. Em compensação, foram verificadas perdas de resistência com teores de substituição de 50% e 100%. Segundo Etxeberria *et al.* (2007) concretos com resistência entre 30 e 45 MPa produzidos com 25% de agregados reciclados de concreto não apresentam redução no valor de resistência, quando produzidos com o mesmo consumo de cimento e mesma relação a/c. Ainda conforme esse autor, com teores de substituição de 50% e 100%, é necessário diminuir a relação a/c em 4% e 10%, respectivamente, para que alcancem a mesma resistência à compressão do concreto de referência aos 28 dias.

Essa discordância é causada em função de variáveis intervenientes, tais como o tipo de britadores utilizados na produção dos agregados reciclados, os quais influenciam na forma dos agregados reciclados e conseqüentemente no teor de vazios do concreto produzido, o tipo de cimento utilizado, a composição do resíduo utilizado, a metodologia de substituição utilizada, dentre outros fatores (CABRAL, 2007).

A utilização de aditivos químicos capazes de reduzir a demanda de água no concreto, também contribui para resultados positivos (AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002; BARBUDO *et al.*, 2013). A incorporação de adições minerais como a cinza volante também melhora o desempenho mecânico do concreto, como resultado da redução do volume de macro poros (CORINALDESI e MORICONI, 2009). Outro exemplo é a sílica ativa que além de exercer uma função de preenchimento contribui para melhora da aderência na interface entre a antiga camada de argamassa e a matriz do novo concreto (WAGIH *et al.* 2013)

Como a destinação final dos resíduos da construção civil é um problema ambiental verificado em diferentes países, vários estudos foram realizados com objetivo de aproveitar estes resíduos na produção de concretos. Os valores indicados na Tabela 4 são resultados de trabalhos de diversos pesquisadores sobre a influência da substituição de agregados naturais pelos reciclados na resistência à compressão do concreto.

Tabela 4 – Influência dos agregados reciclados na resistência à compressão dos concretos

(continua)

| Autores | Tipo de agregado reciclado | Modelo de estudo | Influência na resistência |
|------------------|---|---|--|
| GONÇALVES (2000) | Agregados graúdos e miúdos reciclados de concreto | Foram definidos três tipos de composições de agregados reciclados nas dosagens, utilizando-se a fração miúda ou graúda, ou ambas. O traço utilizado foi o mesmo. | - Concreto de referência: 48 MPa - Concreto 100% areia natural + 100% ARC: 49 MPa - Concreto 50% areia natural + 50% areia reciclada + ARC: 46 MPa - Concreto 50% areia natural + 50% areia reciclada + AGN: 43 MPa Não houve redução na resistência quando utilizado somente ARC. |
| BUTTLER (2003) | Agregados graúdos reciclados de concreto | Foram definidas cinco dosagens, quatro delas com agregados graúdos reciclados. As dosagens com agregados graúdos reciclados diferiam entre si pela idade de reciclagem. | - Concreto de referência: 44,5 MPa - Concreto 100% areia natural + 100% ARC (01 dia): 47,8 MPa - Concreto 100% areia natural + 100% ARC (07 dias): 45,3 MPa - Concreto 100% areia natural + 100% ARC (28dias): 49,2 MPa - Concreto 100% areia natural + 100% ARC (28 dias – Não adensado): 42,5 MPa Resultados superiores ao concreto de referência, na maioria dos casos (a) |

Tabela 4 – Influência dos agregados reciclados na resistência à compressão dos concretos

(conclusão)

| Autores | Tipo de agregado reciclado | Modelo de estudo | Influência na resistência |
|-------------------------------|--|---|---|
| TABSH e ABDELFATAH (2008) | Agregados graúdos reciclados de concreto e agregados reciclados de origem desconhecida | Desenvolveram duas resistências de dosagens: 30 MPa e 50 MPa. Produziram o concreto de referência, concreto com agregado reciclado de origem desconhecida e concretos com agregados reciclados de concretos de 30 MPa e 50 MPa britados. | <p><u>Mistura 1</u> (30 MPa) Referência: 35 MPa Agregado do concreto 50 MPa: 35 MPa Agregado do concreto 30 MPa: 25 MPa Agregado origem desconhecida: 22 MPa</p> <p><u>Mistura 2</u> (50 MPa) Referência: 53 MPa Agregado do concreto 50 MPa: 50 MPa Agregado do concreto 30 MPa: 48 MPa Agregado origem desconhecida: 47 MPa</p> |
| CORINALDESI (2010) | Agregados graúdos e miúdos reciclados de concreto | Foram produzidos: concreto de referência, concreto com substituição de 30% dos agregados miúdos naturais e concreto com 30% de substituição dos agregados graúdos naturais pelos agregados reciclados. Utilizaram-se várias relações a/c. | <p>Referência – a/c 0.40 – 58,6 MPa Referência – a/c 0.45 – 56,1 MPa Referência – a/c 0.50 – 51,2 MPa Referência – a/c 0.55 – 47,1 MPa Referência – a/c 0.60 – 43,9 MPa</p> <p>Concreto 30% ARC – a/c 0.40 – 46,1 MPa Concreto 30% ARC – a/c 0.45 – 45,8 MPa Concreto 30% ARC – a/c 0.50 – 39,9 MPa Concreto 30% ARC – a/c 0.55 – 36,3 MPa Concreto 30% ARC – a/c 0.60 – 34,7 MPa</p> |
| BARBUDO <i>et al.</i> (2013) | Agregados graúdos reciclados de concreto | Foram produzidas três séries de concretos, com os seguintes teores de substituição: 0, 20, 50 e 100%, uma sem aditivo, outra com aditivo plastificante e a terceira com aditivo superplastificante. | <p>Referência: 50 MPa Concreto 20% ARC: 51 MPa Concreto 50% ARC: 48 MPa Concreto 100% ARC: 45 MPa</p> <p>Com teor de substituição de 20%, não houve redução no valor da resistência.</p> |
| FOLINO e XARGAY (2014) | Agregados graúdos reciclados de concreto | Foram produzidos quatro tipos de concreto: referência, com 30% de agregado reciclado, com 60% de agregado reciclado e 100% de agregado reciclado | <p>Referência – a/c 0.498 – 36,5 MPa Concreto 30% – a/c 0.498 – 33,6 MPa Concreto 60% – a/c 0.498 – 30,4 MPa Concreto 100% – a/c 0.498 – 29,1 MPa Verificou que a perda de resistência se intensificava conforme o aumento da quantidade de agregados reciclados.</p> |
| DE BRITO e EVANGELISTA (2014) | Agregados graúdos reciclados de concreto | Foram produzidos concretos de três classes de resistência: 20 MPa, 45 MPa e 65 MPa. Foi escolhida a substituição total do AGN por ARC proveniente de duas fontes: rejeitos de pré-moldados de concreto e concretos produzidos em laboratório. | Nas classes de 45 MPa e 65 MPa houve perda de 3% no valor da resistência. Na classe 20 MPa a perda foi igual a 14%. |

- (a) Apenas o concreto com agregado graúdo reciclado obtido de um concreto não adensado apresentou resistência à compressão inferior à do concreto de referência. Nas demais dosagens, os resultados de resistência à compressão foram superiores aos do concreto de referência. Podem ser enumeradas duas justificativas para este fato: a existência de grande quantidade de partículas de cimento não-hidratadas aderidas à superfície do agregado que se hidratam na nova mistura com agregados reciclados; apesar das maiores relações água/cimento para os concretos reciclados, pode ocorrer a migração da água do agregado para a pasta logo após seu endurecimento; nestas condições, a água presente no interior do agregado promoverá uma “cura interna” na zona de transição melhorando suas propriedades.

Quando a matriz do concreto produzido com agregados reciclados for menos resistente que o próprio agregado reciclado, este último não exercerá grande influência na resistência mecânica do concreto, uma vez que a matriz será o elo mais fraco do mesmo e o rompimento se dará através dela. Entretanto, quando a matriz do concreto for mais resistente que o agregado reciclado, este último passará a ter substancial influência na resistência do concreto, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado (CABRAL, 2007).

De maneira geral, quando são utilizadas quantidades limitadas de agregados graúdos reciclados, as propriedades mecânicas e de durabilidade são pouco afetadas. Todavia, um aspecto adicional importante a considerar é a qualidade do resíduo utilizado, pois podem ser obtidos agregados resistentes provenientes, por exemplo, da britagem dos resíduos de um concreto de boa qualidade (AGRELA e ALAEJOS, 2013).

Resistência à tração

A resistência à tração dos concretos geralmente se apresenta como uma característica mecânica secundária, visto que é sabido que o concreto não se apresenta como bom material para resistir aos esforços de tração das estruturas. Porém, quando se faz um estudo criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada (LEITE, 2001).

Para a resistência à tração, a substituição dos agregados naturais pelos reciclados também provoca uma redução na mesma, embora esta pareça ser menos intensa que as reduções provocadas na resistência à compressão (CABRAL, 2007). Todavia, é possível minimizar esse efeito através do controle de alguns parâmetros referentes ao agregado reciclado. Certamente há uma relação entre a quantidade, o tamanho, a qualidade e o tipo do agregado reciclado e a redução nos resultados de resistência à tração (SILVA, DE BRITO, e DHIR, 2014).

No entanto, em estudos realizados por Ravindrarajah e Tam (1985); Mukai *et al.*, (1978) citados por Hansen (1992), concretos com agregados graúdos de concreto não apresentaram diferenças significativas nos resultados de resistência à tração, em relação aos concretos produzidos com agregados naturais. Kou *et al.* (2011) estudaram algumas propriedades dos concretos com agregados reciclados que tiveram sua cura em água durante cinco anos. Após esse período, notaram que os resultados de resistência à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados de concreto foram superiores aos registrados para o concreto de referência, produzido somente com agregados naturais. Além do tempo de cura de cinco anos, os autores Kou *et al.* (2011) atribuem esse comportamento à interação entre a nova pasta de cimento e a antiga camada de argamassa. Conforme Cabral (2007), esses pequenos acréscimos são explicados como um efeito do aumento do teor de pasta de cimento a uma constante relação água/cimento, uma vez que a resistência da ligação pasta/agregado exerce maior influência na resistência à tração que na resistência à compressão. Portanto, concretos confeccionados com agregados reciclados com elevado teor de pasta terão grandes chances de apresentar uma elevada resistência à tração.

A resistência do concreto de origem é uma característica que influencia nos resultados de resistência à tração dos concretos com agregados reciclados. Tabsh e Abdelfatah (2008), verificaram o efeito da substituição de agregados naturais pelos reciclados provenientes da britagem de diferentes concretos: o primeiro de origem desconhecida, os demais com resistências conhecidas de 30 MPa e 50 MPa. Para os concretos produzidos com agregados britados do concreto de 50 MPa, a resistência à tração é semelhante a verificada para o concreto de referência, produzido somente com agregados naturais. No entanto, notou-se que quando houve utilização dos agregados originados do concreto de 30 MPa, houve queda nos valores de resistência. Naqueles concretos produzidos com agregados reciclados de origem desconhecida, a redução no valor da resistência foi ainda mais acentuada que nos demais. A observação desse comportamento evidencia que, assim como no caso da resistência à compressão, há influência da qualidade do agregado reciclado nos resultados de resistência à tração.

Módulo de elasticidade

O concreto apresenta um comportamento não linear quando submetido a tensões de certa magnitude. Esse comportamento é decorrente da micro fissuração progressiva que ocorre na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento. O módulo de deformação

longitudinal do concreto depende de diversos fatores, sendo a resistência à compressão apenas um deles. As propriedades elásticas dos agregados, por exemplo, têm uma grande influência sobre o módulo de deformação do concreto (ARAÚJO, 2014).

O conhecimento do módulo de elasticidade do concreto é extremamente importante, uma vez que o mesmo é utilizado no cálculo estrutural para prever as flechas máximas admissíveis e assim, conseqüentemente, o grau de fissuração das peças (CABRAL, 2007).

De modo similar às propriedades de resistência, o módulo de elasticidade dos concretos contendo agregados reciclados é normalmente mais baixo do que o apresentado pelo concreto convencional, e diminui conforme o conteúdo de agregados reciclados no concreto aumenta (DE BRITO e SAIKIA, 2013).

O módulo de elasticidade do concreto está intrinsecamente ligado à fração volumétrica, à massa específica, ao módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento e às características da zona de transição. O módulo de deformação do agregado está ligado principalmente à sua porosidade e, em grau um pouco menor, ao diâmetro máximo do agregado, forma, textura, granulometria e composição mineralógica. A rigidez do agregado controla a capacidade de restrição da deformação da matriz e esta rigidez é determinada pela sua porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008; BEHERA *et al.*, 2014).

Pode-se afirmar que o módulo de elasticidade dos agregados reciclados está bem próximo dos valores de módulo apresentados pela matriz da pasta de cimento, visto que a composição dos resíduos de construção e demolição se dá basicamente a partir de materiais de base cimentícia (argamassas de concreto, de revestimento e de execução de alvenaria) e componentes cerâmicos muito porosos. Desta forma, como a porosidade do agregado é que controla a restrição da deformação da matriz, no caso do agregado reciclado o concreto produzido será mais deformável, pois esse controle é incipiente. Matriz e agregado do concreto reciclado são muito mais porosos quando comparados aos concretos produzidos com agregados naturais. A diminuição da massa específica dos concretos reciclados também leva a reduções nos valores de módulo (LEITE, 2001).

O módulo de elasticidade do concreto sofre reduções ainda maiores, quando em sua composição granular são utilizados em conjunto agregados reciclados miúdos e graúdos (HANSEN, 1992). Segundo Ujike (2000) *apud* Cabral (2007), essa redução ocorre basicamente porque ao se substituir os agregados naturais pelos reciclados de concreto, está se inserindo mais argamassa na massa de concreto, sendo que esta propicia maiores deformações, conseqüentemente, menores módulos.

Para os concretos confeccionados com agregados reciclados, vários autores apontam que os mesmos geralmente apresentam módulo de elasticidade menor que o dos concretos convencionais.

Através de dados coletados no livro de Saikia e de Brito foi delineado o gráfico da Figura 4. Os valores são referentes a trabalhos de diferentes autores sobre módulo de elasticidade de concretos que contém agregados graúdos reciclados de concreto.

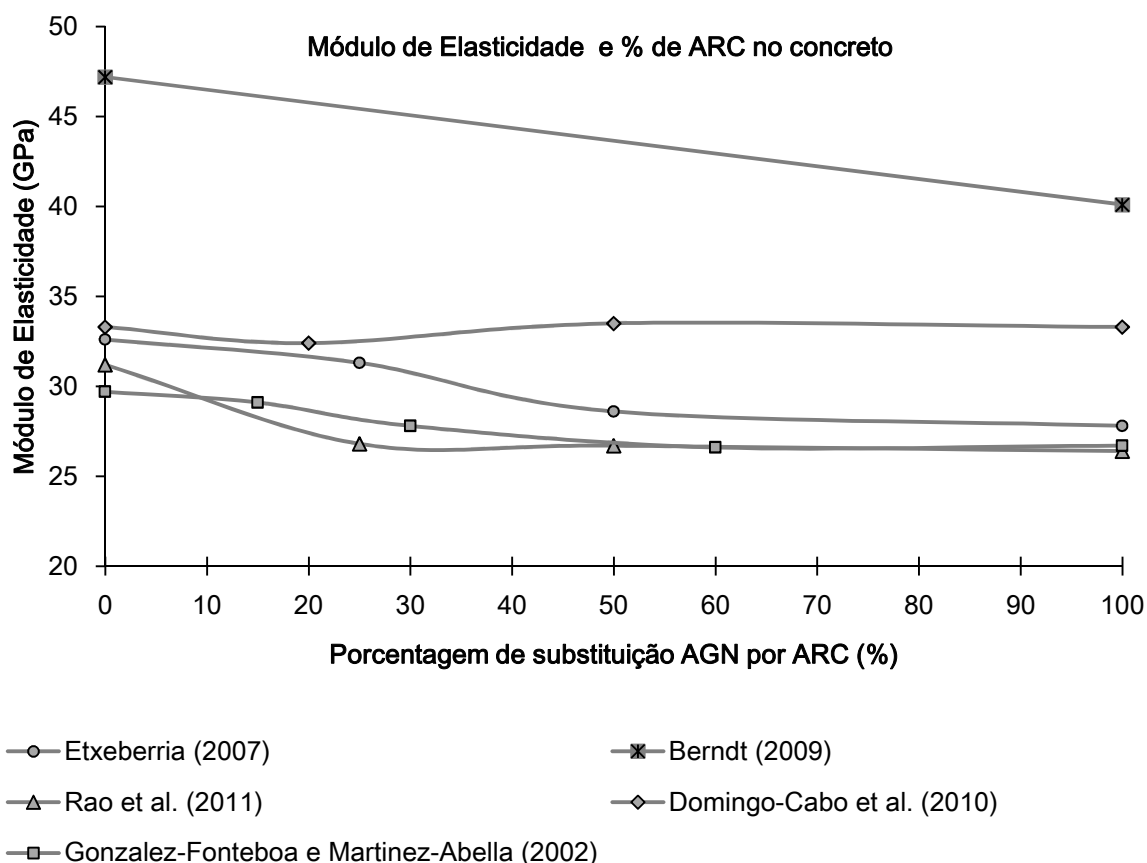


Figura 4 – Módulo de elasticidade de concretos que contém ARC.

Fonte: DE BRITO E SAIKIA (2013)

Conforme Cabral (2007), como o agregado reciclado é mais deformável que o agregado natural, o concreto produzido com este é mais deformável que o concreto produzido com agregados naturais. E de acordo com os valores apresentados pela Figura 4, verifica-se que o módulo de elasticidade diminui conforme o aumento da porcentagem de substituição de agregados naturais pelos reciclados no concreto.

No ensaio para determinação do módulo de elasticidade, diversos tipos de medidores de deformação podem ser utilizados e a escolha entre eles é um parâmetro que pode influenciar significativamente os resultados (CUPERTINO *et al.*, 2007). A

NBR 8522 (ABNT, 2008) recomenda medidores do tipo elétricos e mecânicos. Conforme Guimarães, Araújo e Geyer (2012), no geral, os medidores de deformação elétricos têm leituras mais consistentes e menores coeficientes de variação que os medidores mecânicos. Ainda conforme esses autores, uma importante vantagem da utilização de extensômetros elétricos é a menor necessidade de influência externa no decorrer do ensaio e minimização da possibilidade de erro por parte do operador.

2.1.7 Porosidade dos concretos com agregados reciclados

Nos sólidos existe uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência (CALLISTER, 2012). Conforme Mehta e Monteiro (2008), essa relação é de forma exponencial.

No concreto, material com diferentes fases constituintes, a porosidade de cada fase influencia muito a resistência final do material. Como os agregados são normalmente densos e resistentes, e o maior grau de porosidade fica na matriz de argamassa e na zona de transição, a resistência do concreto é mais influenciada pelas características destas últimas fases. Além do mais, na zona de transição existem microfissuras que também condicionam o valor da resistência (GONÇALVES, 2000).

Embora a relação água/cimento seja o fator condicionante para a porosidade da matriz de argamassa e da zona de transição, existem outros fatores que também influenciam esta propriedade, como: grau de adensamento, condições de cura e características físicas do agregado (GONÇALVES, 2000).

Diversas propriedades do concreto como, resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção, entre outras, são influenciadas pela porosidade e absorção dos agregados. A porosidade influencia a massa específica aparente dos agregados e, como consequência, também o volume de concreto para uma dada massa de agregado (DE LARRARD, 1999). A intercomunicabilidade dos poros presentes na pasta de cimento, nos agregados e na interface entre a pasta de cimento e os agregados tem influência sobre várias propriedades do concreto (CARRIJO, 2005). A durabilidade é uma propriedade do concreto que está diretamente relacionada à porosidade e permeabilidade desse material. Helene (1983) propôs a seguinte classificação dos concretos, conforme a absorção de água: concretos duráveis (absorção < 4,2 %), concretos normais (4,2 % < absorção < 6,3 %) e concretos deficientes (absorção > 6,3 %).

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Nos últimos anos, o interesse pelo empacotamento das partículas aumentou em diferentes áreas da engenharia. Esse interesse pode ser explicado pelo fato de que uma grande parte dos materiais naturais ou industriais com os quais lidamos diariamente são - ou contém - partículas de diferentes formas e tamanhos. Nesse campo de ação, as partículas são consideradas como os grãos de agregados, minerais, metais ou pós químicos, solos, moléculas, poros ou rochas. Assim, o comportamento de tais materiais depende parcialmente das propriedades das partes que o compõem e parcialmente das interações entre elas (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

O empacotamento de partículas é quantificado matematicamente por meio da densidade de empacotamento (MEHTA e MONTEIRO, 2008). McGeary (1961) *apud* Castro e Pandolfelli (2009), definiu o estudo de empacotamento de partículas como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente.

Encontrar uma proporção ótima entre os constituintes do esqueleto granular terá como resultado uma mistura com maior densidade de empacotamento (RAJ *et al.*, 2014).

Considerando-se a quantidade de água em pastas/argamassas/concretos, é o excesso de água (a quantidade de água além da necessária para preencher os espaços vazios no sistema de granular), que lubrifica as partículas. Portanto, um sistema de partículas com maior densidade de empacotamento terá, para a mesma quantidade de água, uma maior fluidez. Ou ainda, a mesma fluidez pode ser obtida com uma menor relação água/cimento. Em argamassas e concretos, o efeito ocorre de forma análoga, porém considera-se que o excesso de pasta é responsável por lubrificar as partículas de agregados. Assim, a otimização da densidade de empacotamento leva à produção de argamassas e concretos com menores quantidades de pasta, para uma mesma trabalhabilidade, o que resulta em um menor consumo de cimento (LI e KWAN, 2013; WONG *et al.*, 2010; WONG e KWAN, 2008).

Se o volume de pasta é fixo no concreto, o aumento na densidade de empacotamento dos agregados pode proporcionar maior trabalhabilidade à mistura, para a mesma relação água/cimento. Ou, mantendo-se a mesma trabalhabilidade, é possível reduzir a relação água/cimento e aumentar a resistência do concreto. Assim, a densidade de empacotamento tem um efeito direto em algumas características do concreto, como porosidade e

permeabilidade, e um efeito indireto sobre outras propriedades como resistência à compressão e trabalhabilidade do concreto (MOSTOFINEJAD e REISI, 2012).

A influência da distribuição granulométrica dos materiais cimentantes (aglomerantes) e agregados no desempenho de concretos é conhecida na área de construção civil desde o início do século passado. Houve uma evolução desde então passando de métodos empíricos a modelos matemáticos simplificados chegando a modelos matemáticos mais complexos na década de 90. Muitos dos modelos consideram os materiais como monodispersos ou caracterizam cada material por um só diâmetro, como por exemplo, o diâmetro médio, sem considerar toda a distribuição granulométrica (MIRANDA, 2008).

Os estudos teóricos e experimentais relacionados ao empacotamento de partículas resultaram de duas abordagens básicas: uma discreta, que considera as partículas individualmente; e outra contínua, que trata as partículas como distribuições granulométricas contínuas (OLIVEIRA *et al.*, 2000 *apud* OLIVEIRA, 2013).

Existem vários modelos de empacotamento de partículas, tanto discretos como contínuos, entretanto, os modelos de Furnas (abordagem discreta) e Andreasen (abordagem contínua) são considerados como os mais consistentes e fundamentais. O modelo de Alfred é um aprimoramento dos modelos citados anteriormente, o qual mostra que, na realidade os modelos de Furnas e Andreasen, podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar a mesma coisa (OLIVEIRA *et al.*, 2000 *apud* OLIVEIRA, 2013). A seguir é apresentado o modelo de empacotamento de partículas a ser utilizado no presente trabalho.

2.2.1 Modelo de Alfred

O modelo de Alfred surgiu após diversas análises de modelos anteriores. Neste modelo, o principal parâmetro considerado nos cálculos é o tamanho das partículas. Através de cálculos, é obtém-se a porcentagem passante acumulada de cada tamanho, necessária para obter a maior densidade de empacotamento (OLIVEIRA, 2000).

As porcentagens passantes acumuladas são obtidas através da Equação 1:

$$P(d) = \frac{d^q - d_{mín}^q}{d_{máx}^q - d_{mín}^q} \quad (1)$$

Onde:

$P(d)$ = Porcentagem passante acumulada

d = diâmetro da peneira em questão

$d_{\text{mín}}$ = diâmetro da menor partícula em uma mistura

$d_{\text{máx}}$ = diâmetro da maior partícula em uma mistura

q = fator ajuste para empacotamento ótimo do modelo de Funk e Dinger ($q = 0,37$)

Este modelo foi obtido através da análise de modelos que surgiram anteriormente, e leva em consideração nos cálculos o diâmetro apresentado pelas menores partículas ($d_{\text{mín}}$).

O fator q é resultado de ajustes à curvas experimentais e varia conforme as características das partículas e do tipo de mistura. Pode assumir valores que variam de 0,25 para concretos auto adensáveis, até 0,37; proposto para empacotamento ótimo dos concretos convencionais (OLIVEIRA, 2013).

Após calcular as porcentagens passantes acumuladas, é possível obter a curva de empacotamento ideal para as partículas que irão compor o esqueleto granular da mistura. Na Figura 5 é possível observar um exemplo de curva calculada pelo modelo de Alfred:

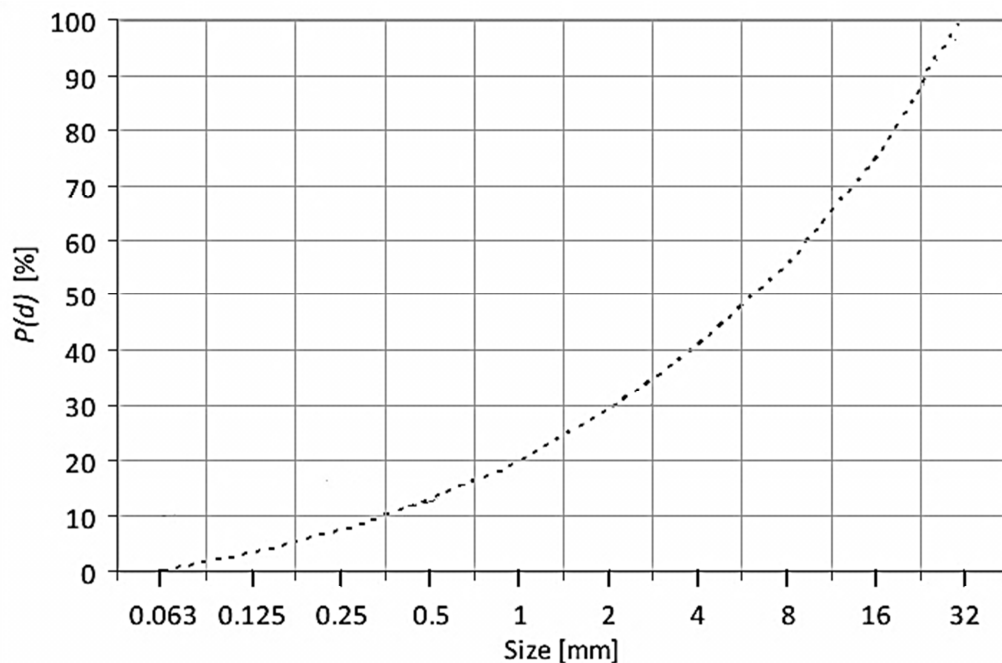


Figura 5 – Exemplo de curva de empacotamento ideal, calculada pelo modelo de Alfred. Fonte: Fennis, 2011.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos experimentais desenvolvidos de modo a atingir os objetivos estabelecidos. Consiste na escolha e caracterização dos materiais utilizados, parâmetros para dosagem dos concretos, definição dos traços, bem como a realização dos ensaios no estado fresco e endurecido dos concretos. As etapas do programa experimental podem ser visualizadas na Figura 6.

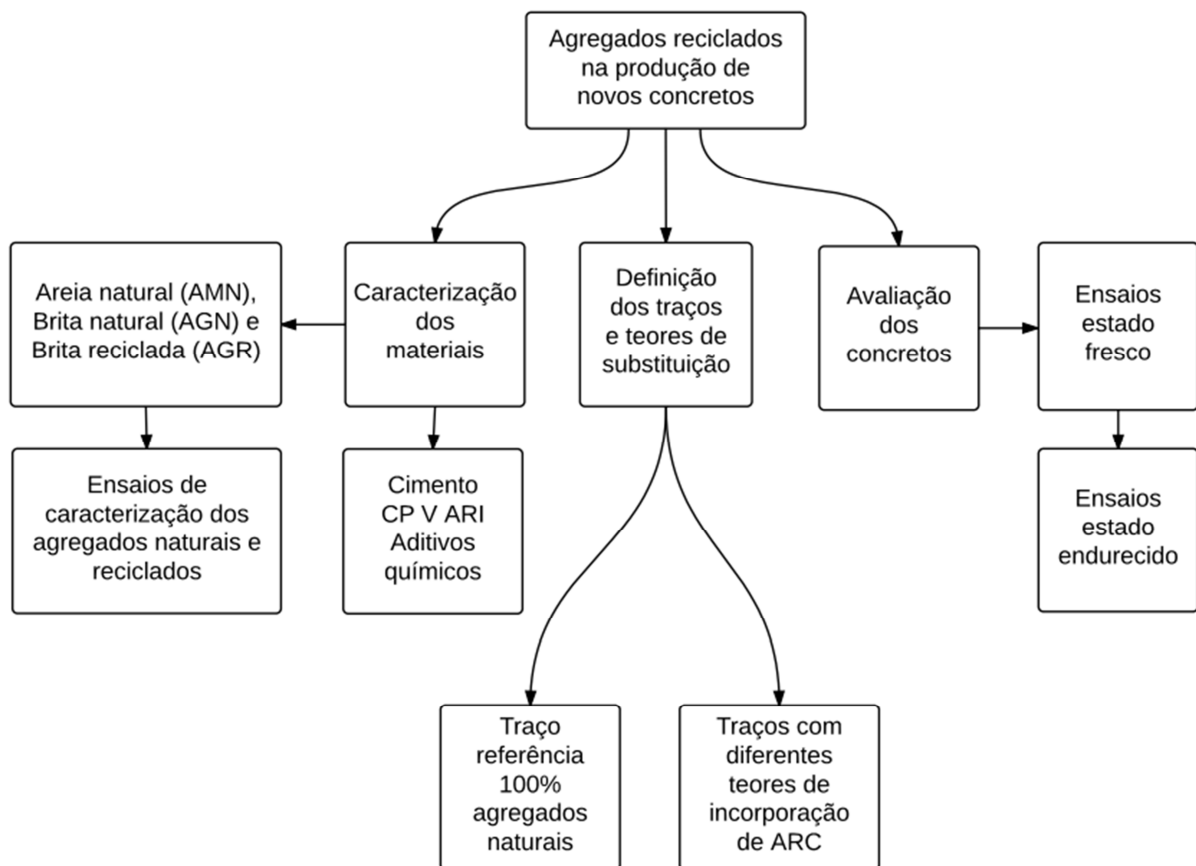


Figura 6 – Representação esquemática dos procedimentos experimentais

3.1 MATERIAIS

A caracterização dos materiais possibilita obter informações para o desenvolvimento dos traços. Foram utilizados os seguintes materiais: cimento CP V ARI, agregado miúdo natural, agregado graúdo natural, agregado graúdo reciclado de concreto (ARC), aditivos químicos e água. Com relação aos agregados, a coleta das amostras foi feita conforme a norma NBR NM 26 (ABNT, 2009) e sua redução para ensaio seguiu o que está estabelecido na norma NBR NM 27 (ABNT, 2001).

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado é classificado como CP V-ARI e regulamentado pela norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Este tipo de cimento proporciona desforma mais rápida e maiores resistências nos primeiros dias de idade. Os parâmetros de análises químicas e físicas foram obtidos junto ao fabricante e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades do cimento utilizado no trabalho

| Ensaio Cimento CP V ARI – Alta Resistência Inicial | | |
|---|--------------------------|--|
| Parâmetros Químicos | | |
| Teores | Resultados | Limites Norma NBR 5733 (ABNT, 1991) |
| Resíduo Insolúvel – RI | 0,76 % | ≤ 1,0 % |
| Perda ao fogo – PF | 3,05 % | ≤ 4,5 % |
| Óxido de magnésio (MgO) | 4,33 % | ≤ 6,5 % |
| Trióxido de enxofre (SO ₃) | 2,59 % | ≤ 3,5 % |
| Parâmetros físicos e mecânicos | | |
| Características e Propriedades | Resultados | Limites Norma NBR 5733 (ABNT, 1991) |
| Resistência à compressão – 1 dia | 21,5 MPa | ≥ 14 MPa |
| Resistência à compressão – 3 dias | 37,2 MPa | ≥ 24 MPa |
| Resistência à compressão – 7 dias | 43,2 MPa | ≥ 34 MPa |
| Resistência à compressão – 28 dias | 51,1 MPa | - |
| Finura - Resíduo na peneira 75 µm | 0,15 % | ≤ 6,0 % |
| Área específica | 398,9 m ² /kg | ≥ 300 m ² /kg |
| Massa específica | 3,09 g/cm ³ | - |
| Tempo de início de pega (h:min) | 03:29 | ≥ 1 h |
| Tempo de fim de pega (h:min) | 04:05 | - |
| Expansibilidade a quente | 0,10 mm | ≤ 5 mm |

Fontes: Fabricante e norma NBR 5733 (ABNT, 1991).

3.1.2 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural obtida na região de Curitiba – PR. A composição granulométrica foi determinada conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram realizados ensaios referentes às propriedades de massa específica, massa unitária, absorção de água e determinação da quantidade de materiais finos passantes na peneira 75 µm, de acordo com as normas: NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 30 (ABNT, 2001) e NBR NM 46 (ABNT, 2003), respectivamente.

3.1.3 Agregados graúdos: natural (AGN) e reciclado de concreto (ARC)

Como agregado graúdo natural, foi empregada a brita de origem granítica disponível na região de Curitiba – PR.

Já o agregado graúdo reciclado de concreto empregado nas misturas é proveniente da britagem de resíduos de concreto no estado endurecido. Este resíduo é constituído principalmente de material rejeitado pelas centrais de concreto usinado. O material reciclado utilizado no trabalho foi obtido através de doação, realizada por uma empresa de britagem de resíduos da construção. Nota-se que o ARC a ser utilizado na produção dos concretos da presente pesquisa apresenta a existência de uma camada de argamassa do concreto original. Esta permanece aderida aos agregados reciclados após o processo de britagem, conforme apresentado na Figura 7.



Figura 7 – ARC com camada de argamassa aderida

Para os dois tipos de agregado graúdo a composição granulométrica foi determinada conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Também foram determinadas as seguintes propriedades, para o AGN e para o ARC: massa específica e absorção de água, especificadas na NBR NM 53 (ABNT, 2009); massa unitária e índice de vazios, descritos na NBR NM 45 (ABNT, 2006) e quantidade de materiais finos passantes na peneira 75 μm conforme a NBR NM 46 (ABNT, 2003). Também foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em partículas do AGN e do ARC, para obtenção de microfotografias de sua superfície.

Durante a realização dos ensaios de caracterização dos agregados, verificou-se que o ARC apresenta uma capacidade de absorção de água superior ao AGN. Dessa forma, visto que o ARC é responsável por absorver parte da água de amassamento do concreto, o efeito mais notável durante o estado fresco dos concretos produzidos com este tipo de agregado é a redução em sua fluidez. Uma alternativa para reduzir esse efeito negativo é fazer com que este agregado já tenha absorvido certa quantidade de água antes da sua utilização na mistura. De forma a colocar em prática esta alternativa, o primeiro passo consistiu em determinar o intervalo de tempo no qual o ARC deve permanecer imerso antes de ser misturado aos demais constituintes do concreto. De acordo com Cabral *et al.* (2010), após dez minutos imerso, estima-se que o agregado reciclado é capaz de absorver cerca de 80% da água referente a vinte e quatro horas de imersão. Para o ARC utilizado no presente trabalho, foi estudada a absorção de água em diferentes intervalos de tempo. A ideia foi adaptada do trabalho de Carrijo (2005).

Para a determinação da absorção de água ao longo do tempo foi utilizado o ensaio normatizado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). A absorção foi determinada para os seguintes intervalos de tempo: 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min, 40 min, 50 min, 60 minutos e por fim para vinte e quatro horas. Utilizar a mesma amostra de ARC para realizar o ensaio de absorção em intervalos de cinco minutos não foi viável, portanto a absorção em cada intervalo de tempo foi determinada separadamente. Foram utilizados vários recipientes, um para cada intervalo de tempo citado acima, contendo um quilo de ARC. O ensaio foi repetido duas vezes para cada intervalo de tempo, com amostras diferentes de agregado graúdo reciclado.

Ensaio de MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizado com objetivo de evidenciar diferenças entre as superfícies do AGN e do ARC, em escala microscópica. O ensaio foi executado no Laboratório de Materiais e Análises da UTFPR, campus Curitiba. As amostras coletadas dos dois tipos de agregado graúdo foram mantidas a 50°C durante vinte e quatro horas de modo a facilitar a execução de vácuo no ensaio. Foi realizado o recobrimento das amostras com ouro (metalizador e evaporador Quorun, modelo Q150R ES). O ensaio tem como resultados imagens, obtidas por meio de um microscópio ZEISS, modelo EVO-MA15.

3.1.4 Aditivos

Dois tipos de aditivos químicos foram utilizados na produção dos concretos do presente trabalho: um plastificante e outro do tipo superplastificante. Na Tabela 6 estão apresentadas as principais características dos aditivos empregados, obtidas junto ao fabricante.

Tabela 6 – Características dos aditivos

| Características | Aditivo 1 | Aditivo 2 |
|---------------------|---|---|
| Tipo do produto | Plastificante multifuncional de pega normal | Superplastificante de alto desempenho |
| Estado | Líquido | Líquido |
| Cor | Marrom | Amarelo claro |
| Armazenagem | Pode ser armazenado nas embalagens fechadas por 12 meses. Armazenar em local seco, coberto e arejado. | Pode ser armazenado nas embalagens fechadas por 12 meses. Armazenar em local seco, coberto e arejado. |
| Densidade | 1,20 g/cm ³ | 1,07 g/cm ³ |
| Dosagem recomendada | 0,2 a 1,0% sobre o peso do cimento. | 0,2 a 5,0% sobre o peso do cimento. |

Conforme especificações do fabricante, o aditivo plastificante atua como um agente dispersor das partículas de cimento, evitando sua aglomeração e reduzindo a tensão superficial da água da mistura. Como consequência da melhor distribuição das partículas de cimento e do agregado, obtêm-se uma melhora na coesão e trabalhabilidade do concreto. Através da possibilidade de redução do volume de água da mistura, mantendo-se a mesma consistência e consumo de cimento, obtêm-se uma mistura com uma relação água/cimento menor, portanto com maiores resistências. Caso o volume de água não seja reduzido, obtêm-se uma melhora da trabalhabilidade do concreto, o que reduzirá a necessidade de adensamento.

Por sua vez, o aditivo superplastificante é produzido com base na tecnologia de polímeros policarboxilatos desenvolvida pelo fabricante e possui uma combinação especial de diversos agentes ativos. Seu mecanismo de funcionamento torna possível a produção de concretos com quantidades de água extremamente baixas e com dosagens econômicas.

Como o comportamento do agregado reciclado em conjunto com aditivos químicos em concretos era desconhecido, ensaios com o emprego de dois tipos diferentes de aditivo possibilitam, numa primeira fase de produção dos concretos com ARC, conhecer qual deles apresenta o desempenho mais adequado.

3.2 MÉTODO

Após a determinação das propriedades físicas dos agregados, os procedimentos metodológicos do trabalho seguem com a produção das misturas de concreto. Inicialmente foram definidos os parâmetros de abatimento e resistência desejados para os concretos. Com base nesses parâmetros, foi determinada a curva de dosagem dos concretos de acordo com o método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Definido o traço a ser utilizado, prosseguiu-se com a realização dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido dos concretos contendo ARC. Esta avaliação foi dividida em duas fases, de modo a avaliar os seguintes parâmetros:

- Primeira Fase: A eficiência de diferentes procedimentos adotados para minimizar o efeito da alta absorção de água característica do agregado reciclado no abatimento do concreto. Foram estudados os seguintes procedimentos: saturação do agregado reciclado durante 10 minutos, retirada de partículas menores por meio de peneiramento prévio (peneira 2,36 mm), utilização de aditivo químico e adição suplementar de água até obter o abatimento especificado.
- Segunda Fase: O efeito da inclusão de diferentes teores de agregados reciclados (ARC). Após a produção do concreto de referência, somente com agregados naturais, foram avaliadas as seguintes porcentagens de substituição do AGN pelo ARC: 10%, 20%, 50% e 100%.

Os procedimentos de ensaios referentes à produção das misturas de concreto estão apresentados na Figura 8.

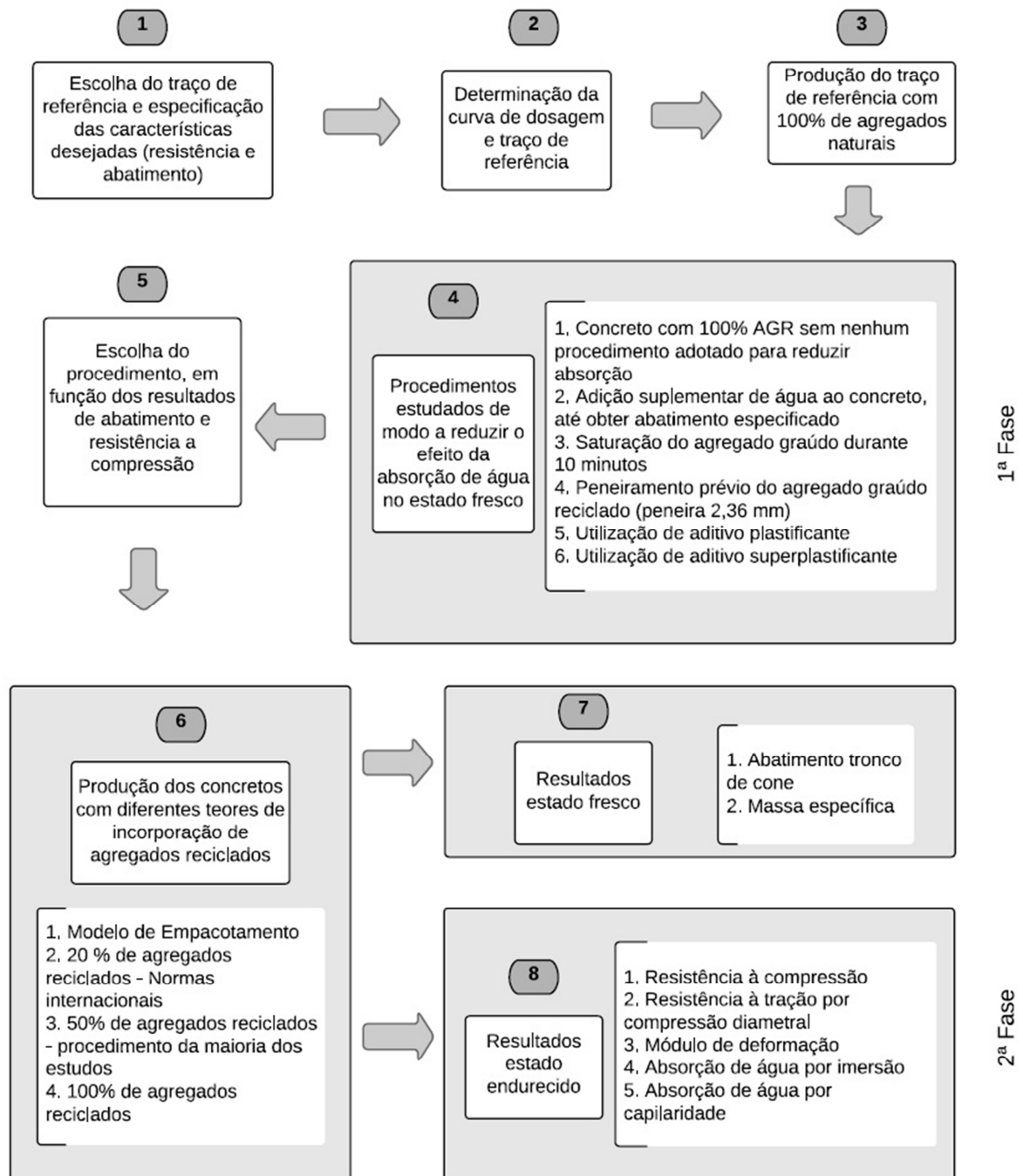


Figura 8 – Representação esquemática das fases da produção dos concretos

3.2.1 Determinação dos parâmetros referentes ao concreto

O mesmo traço foi utilizado para a produção dos concretos com agregados naturais e agregados reciclados. Este possui f_{ck} 30 MPa e abatimento de 10 ± 2 cm. Estes parâmetros foram escolhidos após uma pesquisa realizada junto a uma empresa produtora de concreto

usinado. Desejava-se produzir misturas com a mesma resistência à compressão e mesmo abatimento do traço mais procurado pelo consumidor.

Os dados são provenientes de uma central de concreto atuante em diversas cidades dos estados do Paraná e Santa Catarina. Foram avaliadas informações referentes a doze unidades produtoras de concretos desta empresa, durante o período correspondente a março de 2013 a março de 2014. Optou-se por não divulgar o nome da empresa, que foi designada por “Empresa A”. Conforme a Figura 9, o traço de resistência de 30 MPa com abatimento de 10 ± 2 cm foi o tipo de concreto com maior número de vendas.

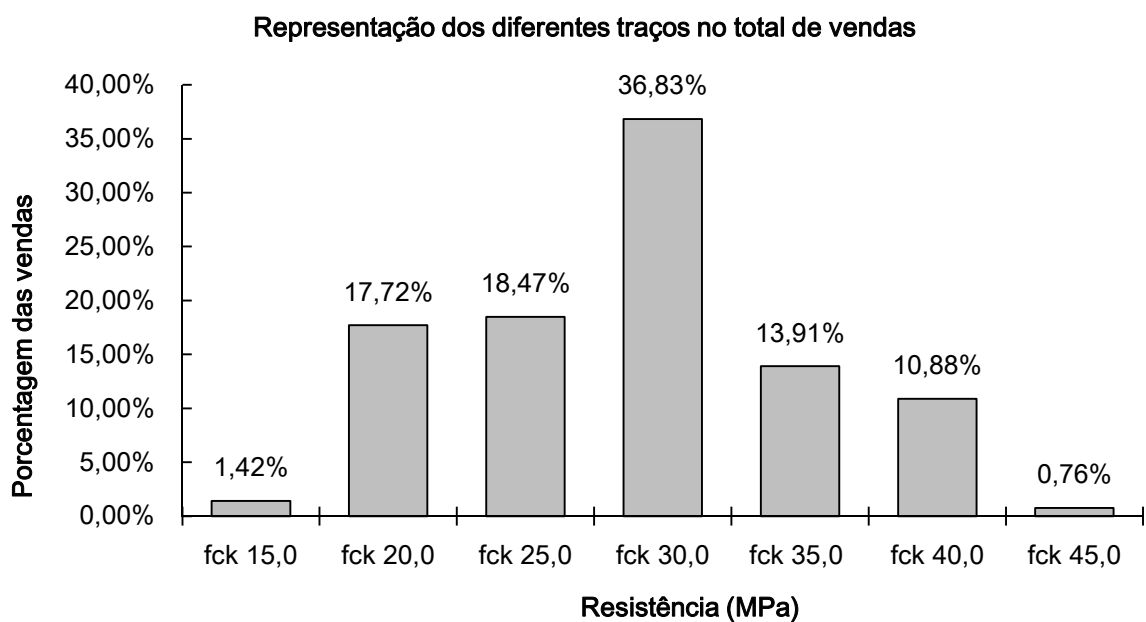


Figura 9 – Resistências dos concretos mais vendidos durante período 03/13 a 03/14
Fonte: Empresa A

Com base nestes parâmetros, a próxima etapa foi determinar o traço a ser utilizado para a produção dos concretos.

3.2.2 Dosagem dos concretos e traço de referência

A dosagem experimental dos concretos foi determinada conforme o método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), com o abatimento de 10 ± 2 cm como parâmetro de controle. Iniciou-se o método a partir do traço intermediário de 1:5 em massa para o ajuste do teor de argamassa. Após vários ajustes, determinou-se o teor de argamassa ideal como 54%, com relação água/materiais secos igual a 9,13%. Foram moldados seis corpos de prova para ensaio de resistência à compressão na idade de 07 dias, mais seis para a idade de 28 dias.

Posteriormente, foram produzidos os traços auxiliares mais rico (1:3,5) e mais pobre (1:6,5) em consumo de cimento. A mesma quantidade de corpos de prova foi moldada para estes traços, para serem rompidos com a mesma idade daqueles do traço intermediário. Os parâmetros referentes à curva de dosagem dos concretos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados obtidos para os traços rico, intermediário e pobre

| Traço em massa | Número | Rico | Intermediário | Pobre |
|---|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 1 : m | 1 : 3,5 | 1 : 5 | 1 : 6,5 |
| | 1 : a : b | 1 : 1,43 : 2,07 | 1 : 2,24 : 2,76 | 1 : 3,05 : 3,45 |
| Relação a/c | | 0,472 | 0,548 | 0,704 |
| Teor de argamassa | | 54% | 54% | 54% |
| Consumo cimento por m ³ (kg/m ³) | | 473,9 | 361,1 | 285,5 |
| Resistência à compressão 07 dias (MPa) | | 33,6 | 26,5 | 17,2 |
| Resistência à compressão 28 dias (MPa) | | 46,1 | 33,4 | 26,3 |

Os resultados apresentados na Tabela 7 constituem os pontos para o traçado do diagrama de dosagem dos concretos, conforme a Figura 10.

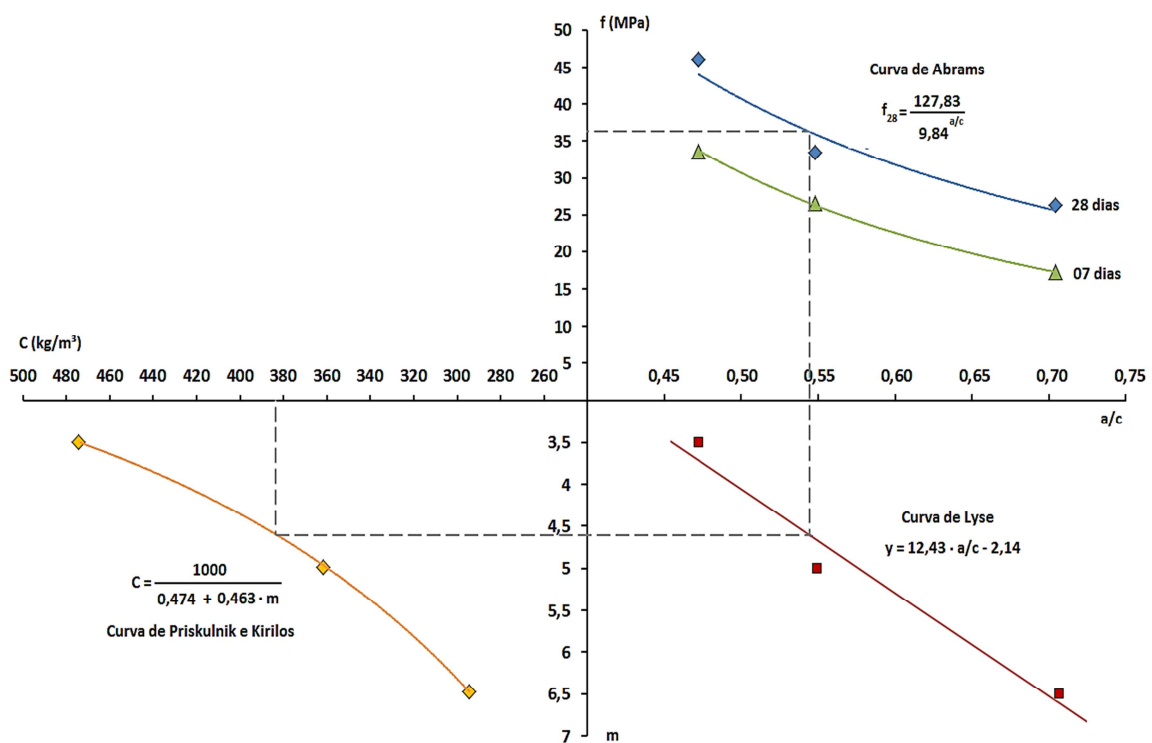


Figura 10 – Diagrama de dosagem pelo método IPT/EPUSP

Os parâmetros necessários para obtenção do traço final obtidos de forma gráfica através da curva foram confirmados através do cálculo proveniente das equações da Tabela 8.

Tabela 8 – Cálculos para obtenção do traço final

Curva de Abrams obtida através dos dados experimentais:

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad k_2 = 10^{-b} \quad k_1 = 10^{\frac{1}{3} \left(\log f_{cj1} + \log f_{cj2} + \log f_{cj3} - b \cdot \frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3} \right)}$$

$$b = \frac{\log f_{cj1} \left(2 \cdot \frac{a}{c_1} - \frac{a}{c_2} - \frac{a}{c_3} \right) + \log f_{cj2} \left(2 \cdot \frac{a}{c_2} - \frac{a}{c_1} - \frac{a}{c_3} \right) + \log f_{cj3} \left(2 \cdot \frac{a}{c_3} - \frac{a}{c_1} - \frac{a}{c_2} \right)}{2 \cdot \left(\left(\frac{a}{c_1} \right)^2 + \left(\frac{a}{c_2} \right)^2 + \left(\frac{a}{c_3} \right)^2 \right) - 2 \cdot \left(\left(\frac{a}{c_1} \cdot \frac{a}{c_2} \right) + \left(\frac{a}{c_1} \cdot \frac{a}{c_3} \right) + \left(\frac{a}{c_2} \cdot \frac{a}{c_3} \right) \right)}$$

$$f_{cj} = \frac{127,83}{9,84^{a/c}}$$

$$\log f_{cj} = \log 127,83 - \frac{a}{c} \cdot \log 9,84 \rightarrow \frac{a}{c} = -0,99334 \cdot \log \left(\frac{127,83}{36,6} \right) \rightarrow \frac{a}{c} = 0,539$$

Coeficientes da curva de Lyse:

$$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c}$$

$$k_4 = \frac{\left(3,5 \cdot \frac{a}{c_1} + 5 \cdot \frac{a}{c_2} + 6,5 \cdot \frac{a}{c_3} \right) - 5 \cdot \left(\frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3} \right)}{\left(\frac{a}{c_1} \right)^2 + \left(\frac{a}{c_2} \right)^2 + \left(\frac{a}{c_3} \right)^2 - \frac{\frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3}}{3}}$$

$$k_3 = 5 - k_4 \left(\frac{\frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3}}{3} \right) \quad m = -2,14773 + 12,43805 \frac{a}{c} \rightarrow m = 4,56 \cong 4,6$$

Desdobramento do traço

$$a = \left(\frac{\alpha(1+m)}{100} \right) - 1 \rightarrow a = \left(\frac{54(1+4,6)}{100} \right) - 1 \rightarrow a = 2,02$$

$$p = m - a \rightarrow p = 4,6 - 2,02 \rightarrow p = 2,58$$

Traço Final Desdobrado

1 : 2,02 : 2,58 : 0,54

1 : agregado miúdo : agregado graúdo : relação a/c

Coeficientes da curva Priskulnik e Kirilos

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m}$$

$$k_6 = \frac{1000 \cdot 3 \cdot \left(\frac{m_1}{C_1} + \frac{m_2}{C_2} + \frac{m_3}{C_3} \right) - 1000 \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) \cdot (m_1 + m_2 + m_3)}{3 \cdot (m_1^2 + m_2^2 + m_3^2) - (m_1 + m_2 + m_3)^2}$$

$$k_5 = \frac{1}{3} \cdot \left(1000 \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) - k_6 (m_1 + m_2 + m_3) \right)$$

$$C = \frac{1000}{0,474071 + 0,463913 \cdot 4,6} \rightarrow C = 383,6473$$

Com o valor de f_{cj} fixado em 36,6 MPa, o traço obtido graficamente através do diagrama, e confirmado por meio de cálculo pelas equações da Tabela 8, foi de 1:4,6.

O consumo teórico de cimento foi determinado de acordo com a Equação 2:

$$C = \frac{1000}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + \frac{a}{c} \right)} \quad (2)$$

Onde:

a = proporção em massa de agregado miúdo em relação à massa de cimento do traço

p = proporção em massa de agregado graúdo em relação à massa de cimento do traço

γ_c = massa específica do cimento (kg/m^3)

γ_a = massa específica do agregado miúdo (kg/m^3)

γ_p = massa específica do agregado graúdo (kg/m^3)

a/c = relação água/cimento do concreto

Na Tabela 9 estão apresentados o traço em massa, bem como a quantidade de materiais necessária para produzir 1m^3 de concreto (referência – 100% AGN).

Tabela 9 – Traço e materiais para produção do traço de referência

| Materiais | Cimento | Agregado Miúdo | Agregado Graúdo Natural | Relação a/c |
|--|----------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|
| Traço | 1 | 2,02 | 2,58 | 0,539 |
| Massa específica (kg/dm^3) | 3,09 | 2,43 | 2,83 | 1 |
| Consumo para um metro cúbico (kg/m^3) | 383,64 | 774,96 | 989,81 | 207,16 |

De modo a possibilitar a comparação entre propriedades dos concretos produzidos com AGN e ARC, foi utilizado o mesmo traço para todos os concretos do trabalho. Com relação aos concretos produzidos com agregados reciclados, o consumo teórico de cimento foi calculado considerando-se a massa específica do ARC, em conjunto com seus diferentes teores incorporados ao concreto.

3.2.3 Primeira Fase de produção dos concretos: Procedimentos estudados de forma a minimizar o efeito da absorção de água do agregado reciclado no estado fresco

Conforme verificado em diferentes trabalhos² bem como durante a execução dos ensaios de caracterização do agregado reciclado, notou-se que este apresenta maior valor de absorção de água do que aquele determinado para o agregado natural.

Quando utilizado em concretos, o agregado reciclado acaba por absorver parte da água de amassamento da mistura. Deste modo, seu uso em concretos terá influência direta sobre sua consistência, resultando em um material com menor valor de abatimento de tronco de cone.

Optou-se, para a produção do primeiro traço de concreto reciclado, pela substituição total do AGN por ARC. Por tratar-se de um material cujo comportamento em conjunto com os demais componentes do concreto era desconhecido, por meio da substituição total (que corresponde a maior quantidade de material reciclado na mistura) seria possível conhecer o pior caso em termos de absorção de água pelo agregado.

Durante o processo produtivo, foi utilizada a seguinte ordem de colocação dos materiais na betoneira (capacidade igual a 120 litros):

- 1) Agregado graúdo + 80% da água
- 2) Cimento
- 3) Areia + restante da água (misturado aos aditivos, nos concretos em que houve sua utilização).

A mistura inicial tinha a mesma relação água/cimento do traço de referência, e o agregado reciclado seco em estufa. No momento da produção deste concreto, já foi possível notar diferenças significativas em termos de consistência do material, menos fluida e trabalhável do que aquela produzida somente com agregados naturais. Apesar dessa diferença, foram moldados doze corpos de prova para essa mistura (seis para rompimento aos 07 dias e seis para a idade de 28 dias), com objetivo de comparar seus resultados com os obtidos para os demais concretos.

² Domingo–Cabo *et al.* (2009); Faiz e Ahmed (2014); Katz (2003); Silva, De Brito e Dhir (2014); Tabsh e Abdelfatah (2008) .

Cada procedimento empregado para reduzir o efeito da absorção de água de amassamento do concreto pelo agregado reciclado está explicado a seguir:

1. Adição suplementar de água à mistura

Foi acrescentada uma quantidade de água de modo a obter um concreto com a mesma consistência do concreto de referência, o que resultou no aumento da relação a/c. A quantidade de água a ser adicionada foi determinada com base no valor da absorção do agregado graúdo, correspondente ao total de ARC a ser utilizado na produção do concreto.

Quantidade de ARC necessário para produção de 12 corpos de prova: 24500 gramas

Absorção do agregado graúdo reciclado de concreto: 3,22%

Quantidade aproximada de água a ser absorvida: $24500 \times 3,22\% = 788,9$ gramas

Essa quantidade de água foi pesada e adicionada gradualmente à mistura. Após cada uma dessas adições era realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone. Não foi necessário adicionar toda a quantidade de água calculada acima. Com 0,7 L, alcançou-se o abatimento especificado. Considerando-se essa quantidade adicional de água, a relação a/c da mistura passou de 0,54 para 0,64.

2. Saturação do ARC durante 10 minutos

Durante a realização do ensaio de massa específica e absorção do agregado graúdo, verificou-se que a maior parte da água é absorvida pelo agregado durante os primeiros dez minutos. Desta verificação, surgiu a ideia de saturar o ARC neste mesmo intervalo de tempo, como forma de compensar a absorção de água do agregado reciclado.

Colocou-se inicialmente todo o agregado graúdo na betoneira, junto com 80% da água de amassamento. Ligou-se a betoneira, de forma que todo o agregado graúdo fosse umedecido. A cuba da betoneira foi tampada, para evitar a evaporação de água da mistura. Após dez minutos a betoneira foi novamente ligada e foram colocados os demais materiais constituintes do concreto.

3. Peneiramento do agregado graúdo reciclado

O processo de peneiramento foi feito de forma semelhante à realizada no ensaio de granulometria NBR NM 248 (ABNT, 2003), porém em agitador de peneiras com maior capacidade.

Sabe-se que grande parte da absorção de água apresentada pelos agregados reciclados se deve a camada de argamassa do concreto original que permanece aderida a ele. Além disso, essa camada de argamassa torna o agregado mais frágil e suscetível à desagregação. No momento da mistura do concreto, as partículas de agregado chocam-se umas contra as outras, o que resulta em sua fragmentação. Outra característica desfavorável do agregado reciclado é a maior quantidade de material fino que ele apresenta, em relação ao agregado natural. Assim, o peneiramento foi utilizado como forma de amenizar o efeito dessas desvantagens do agregado reciclado.

Durante o processo de peneiramento parte do agregado sofre fragmentação. Deste modo, as partículas maiores correspondentes ao agregado do concreto original ficam retidas nas peneiras de maior abertura. A fração argamassa se desprende e gera partículas passantes, de menor diâmetro. Com isso é obtido um material com menor presença de argamassa original aderida, e menor quantidade de finos, visto que toda a quantidade passante na peneira de abertura 2,36 mm foi descartada. As frações retidas nas demais peneiras foram misturadas novamente entre si, para a produção do concreto.

4. Utilização de aditivo químico

Esse é um procedimento que apresenta resultados positivos em relação à trabalhabilidade do concreto. Sua utilização proporciona dois mecanismos benéficos aos concretos: o primeiro é a redução do volume de água da mistura, mantendo-se a mesma consistência e consumo de cimento, com uma menor relação água/cimento. O segundo é a melhora da trabalhabilidade mantendo-se o mesmo volume de água.

Este segundo aspecto foi considerado na confecção dos concretos com agregado reciclado. Foi adotado o mesmo processo de produção dos demais concretos, porém acrescentando-se os aditivos plastificante ou superplastificante misturados com 20% da água de amassamento, último item na ordem de colocação dos materiais na betoneira. Para que não fosse ultrapassado o abatimento estabelecido, iniciou-se com a quantidade mínima de 0,2%

pela massa de cimento determinada pelo fabricante, no caso do aditivo plastificante. O aditivo superplastificante, por sua vez, trata-se de um produto desenvolvido para a produção de concretos com conteúdos de água extremamente baixos e concretos de alto desempenho com dosagens econômicas. Considerando essa informação, iniciou-se a mistura do concreto com uma quantidade inferior aos 0,2% estabelecidos pelo fabricante, igual a 0,1%. As propriedades dos aditivos químicos utilizados foram mostradas na Tabela 6.

Na Tabela 10 constam as nomenclaturas utilizadas para os concretos da primeira fase do trabalho e seus significados. Nesta etapa todos os concretos foram produzidos com substituição total do agregado graúdo natural por ARC.

Tabela 10 – Nomenclaturas dos concretos (1ª Fase)

| Nome | Característica |
|----------|--|
| ARC-0 | <i>Concreto sem inclusão de ARC.</i> Trata-se do concreto de referência, produzido com 100% de agregados naturais. |
| ARC1-REF | <i>Concreto com Agregado Reciclado - 1ª Fase - sem nenhum procedimento para reduzir efeito da absorção</i> O primeiro concreto foi produzido de modo a avaliar as propriedades no estado fresco, desconhecidas quando era utilizado ARC. Também havia o objetivo de que seus resultados servissem de parâmetro de comparação com os obtidos para os demais concretos. |
| ARC1-AAG | <i>Concreto com Agregado Reciclado - 1ª Fase – Adição de água suplementar</i> Neste concreto houve um acréscimo de água até que a mistura apresentasse o abatimento especificado de 10 ± 2 cm. |
| ARC1-APL | <i>Concreto com Agregado Reciclado - 1ª Fase – utilização de aditivo plastificante</i> Concreto cujo abatimento foi corrigido através da utilização de aditivo plastificante. |
| ARC1-ASP | <i>Concreto com Agregado Reciclado - 1ª Fase – utilização de aditivo superplastificante</i> Concreto cujo abatimento foi corrigido através da utilização de aditivo superplastificante. |
| ARC1-I10 | <i>Concreto com Agregado Reciclado - 1ª Fase – Imersão prévia do ARC por 10 minutos</i> O ARC utilizado neste concreto foi misturado com parte da água de amassamento do concreto, e permaneceu imerso durante dez minutos antes de ser misturado aos demais materiais. |
| ARC1-PEN | <i>Concreto com Agregado Reciclado - 1ª Fase – Peneiramento prévio do ARC</i> O ARC foi previamente submetido a um processo de peneiramento, semelhante ao recomendado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). |

Para cada concreto apresentado na Tabela 10 foram registrados os valores de abatimento e massa específica no estado fresco. Posteriormente foram moldados doze corpos

de prova para verificar a influência de cada um dos procedimentos na resistência à compressão (seis para rompimento aos sete dias e seis para 28 dias). A seguir estes resultados foram comparados com os valores obtidos para o concreto produzido sem adoção de nenhum procedimento para reduzir o efeito da absorção de água do concreto pelo ARC. A comparação entre os resultados registrados no estado fresco e no estado endurecido por todos os concretos testados possibilita a escolha daqueles que apresentaram desempenho mais adequado e que podem ser utilizados na produção dos concretos da etapa seguinte.

3.2.4 Segunda Fase de produção dos concretos: Diferentes porcentagens de substituição do AGN pelo ARC

Após a análise dos resultados obtidos para os concretos da primeira fase foram escolhidos os seguintes procedimentos a serem adotados na segunda fase de produção dos concretos:

- Peneiramento prévio do agregado graúdo: os agregados graúdos naturais e reciclados passaram por peneiramento prévio, que propicia a desagregação de parte da argamassa aderida e remoção desta juntamente com as partículas menores que 2,36 mm (as partículas dessa dimensão foram provenientes da areia).
- Saturação prévia dos agregados graúdos durante dez minutos: para que parte do potencial de absorção do ARC seja atingida antes da mistura com os demais componentes do concreto.
- Utilização do aditivo superplastificante, de modo alcançar a consistência especificada sem alterar as demais propriedades do concreto.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira também sofreu algumas modificações:

Segunda Fase:

- 1) Agregado graúdo + 80% da água (misturados 1 minuto, em repouso por dez minutos)
- 2) Cimento (2 minutos)
- 3) Areia + restante da água (2 minutos)
- 4) Aditivo superplastificante (quando necessário)

Em todos os concretos foi executado o ensaio de abatimento pelo tronco de cone, antes que fosse acrescentado o aditivo superplastificante à mistura. Este era adicionado caso o concreto apresentasse valor do abatimento inferior a 10 ± 2 cm. A quantidade de aditivo para cada concreto foi determinada com base naquela utilizada para o concreto ARC1–ASP. Os concretos referentes à segunda etapa do trabalho foram produzidos com pré-saturação dos agregados graúdos, que passaram previamente por peneiramento. Dessa forma, já possuíam um abatimento superior aos concretos da primeira fase logo no início da mistura. Além disso, o abatimento de tronco de cone registrado aumentava conforme diminuía a quantidade de ARC incorporado ao concreto. Portanto, a quantidade de aditivo deveria ser inferior àquela utilizada na primeira fase, e diminuir gradativamente conforme a redução na quantidade de ARC utilizado na mistura.

Foram estabelecidos diferentes teores de substituição com objetivo de estudar a influência de cada um deles nas propriedades do concreto e ao mesmo tempo verificar se a intensidade desse efeito está associada à quantidade de agregado reciclado empregada em cada mistura, conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11 – Nomenclaturas dos concretos (2ª Fase)

| Nome | Característica |
|----------|--|
| ARC–0 | Concreto sem ARC. Trata-se do concreto de referência, produzido com 100% de agregados naturais. |
| ARC2–10 | Concreto com agregado reciclado – 2ª Fase – Substituição de 10% do AGN por ARC |
| ARC2–20 | Concreto com agregado reciclado – 2ª Fase – Substituição de 20% do AGN por ARC |
| ARC2–50 | Concreto com agregado reciclado – 2ª Fase – Substituição de 50% do AGN por ARC |
| ARC2–100 | Concreto com agregado reciclado – 2ª Fase – Concreto com 100% de ARC incorporado em substituição ao agregado graúdo natural. |

Cada porcentagem de substituição de agregado graúdo natural por reciclado constituiu uma mistura de concreto diferente, definidos com base nos critérios a seguir:

3.2.4.1 Teor de substituição de 10% - Traço determinado pelo modelo de Alfred (ARC2–10)

De acordo com este procedimento, é necessário primeiramente calcular as quantidades de material passante em cada peneira para obter uma curva ideal de empacotamento dos agregados. Teoricamente, ao se utilizar as quantidades determinadas de

acordo com o modelo, as proporções entre os materiais constituintes estariam o mais próximo possível de uma mistura com maior densidade de empacotamento, portanto, com menor índice de vazios.

No entanto, separar exatamente as quantidades de cada material necessárias por diâmetro é uma prática trabalhosa e inviável, principalmente em escala industrial. Deste modo, foram determinadas as proporções entre o agregado graúdo natural e reciclado que apresentassem curva granulométrica mais próxima da curva calculada pelo modelo. A ideia foi adaptada do trabalho de Oliveira (2013).

Após analisar as porcentagens acumuladas reais dos agregados e comparar com as porcentagens ideais calculadas, percebeu-se que havia excesso de material em algumas peneiras e falta de material em outras. As porcentagens passantes foram determinadas conforme a Equação 1 (página 49). Foram inseridos em programa computacional os valores de distribuição granulométrica de todos os materiais. Através do coeficiente $q = 0,37$, foram calculadas as porcentagens ideais conforme o modelo, para a composição entre AGN e ARC.

Foram estabelecidas diferentes composições entre AGN e ARC, de forma a avaliar qual proporção entre os agregados resultaria em porcentagens retidas acumuladas mais próximas daquela determinada pelo modelo de Alfred. O teste entre as diferentes composições iniciou-se com 10% ARC x 90% AGN, com variações de 5% até chegar em 90% ARC x 10% AGN. Todas as composições testadas, as curvas granulométricas do ARC e do AGN e também a curva calculada pelo modelo foram colocadas em um gráfico. Dessa forma foi possível comparar todas elas e verificar quais estavam mais próximas à curva ideal. Também foi avaliada qual composição apresentava valor do módulo de finura mais próximo àquele calculado para a curva ideal.

Através da análise comparativa entre as diferentes porcentagens de AGN e ARC na mistura de concreto, optou-se pela composta por 10% de ARC e 90% de AGN. É a proporção cujas porcentagens retidas acumuladas e o módulo de finura mais se aproximam dos calculados pelo modelo. Apresenta um teor de agregado reciclado menor do que 20%, determinado por algumas normas. Desta maneira, é possível avaliar o efeito de uma quantidade intermediária (10%) de substituição de agregados naturais por reciclados, entre o que algumas normas permitem (20%) e a total restrição da utilização de agregados reciclados.

Para possibilitar a comparação dos resultados foi mantido o mesmo traço utilizado para o concreto de referência, com a mesma proporção entre agregado graúdo e miúdo. Apesar de haver falta de material em alguns diâmetros e excesso de material em outros, foi

testada essa proporção entre ARC e AGN, para verificar a influência desse tipo de mudança no esqueleto granular nas propriedades do concreto.

3.2.4.2 Teor de substituição de 20% do AGN pelo ARC (ARC2–20)

Em alguns estudos verificou-se que teores de substituição de até 20% do agregado graúdo natural pelo reciclado não influenciavam de forma negativa os resultados de resistência à compressão (ETXEBERRIA, 2007; BARBUDO *et al.*, 2013).

Optou-se por utilizar essa proporção de substituição de agregados naturais por reciclados, pelo fato de ser permitida por recomendações normativas em concretos com aplicações estruturais (DafStB, 1998 (Alemanha); WBTC No.12, 2002 (Hong Kong); BS 8500-2, 2002 (Reino Unido)).

Com base nessas informações, busca-se avaliar o comportamento dos concretos produzidos com ARC local em relação a uma porcentagem permitida por normas estrangeiras.

3.2.4.3 Teor de substituição de 50% do AGN pelo ARC (ARC2–50)

De modo a estudar a intensidade dos efeitos da substituição do material natural pelo reciclado nas propriedades do concreto, conforme o aumento de sua quantidade, essa porcentagem foi escolhida pelo fato de representar um valor intermediário de substituição de agregados naturais por reciclados, comparado com os demais (0, 10%, 20% e 100%).

3.2.5 Ensaios no estado fresco

3.2.5.1 Abatimento pelo tronco de cone

A determinação da consistência do concreto foi feita de acordo com a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). Optou-se pela utilização desse ensaio pelo fato dele ser um método largamente utilizado para recepção do concreto em obra, e também pela sua facilidade de execução. Procedeu-se então à moldagem dos corpos de prova NBR 5738 (ABNT, 2015).

3.2.5.2 Massa específica

A massa específica e o teor de ar incorporado no estado fresco foram determinados de acordo com a norma NBR 9833 (ABNT, 2008).

3.2.6 Ensaios no estado endurecido

Os corpos de prova foram retirados dos moldes 24 horas após a produção do concreto. Permaneceram armazenados em câmara úmida até a idade de ensaio, quando foram submetidos ao processo de retificação (corte do topo dos corpos de prova para o nivelamento de sua superfície). Não houve secagem prévia dos corpos de prova em estufa, exceto naqueles ensaios em que esse procedimento é especificado nas normas. No restante dos ensaios os corpos de prova foram submetidos aos procedimentos na condição de umidade do ambiente.

Na primeira fase de produção dos concretos do trabalho foram moldados doze corpos de prova para cada tipo de concreto, pois a única propriedade do estado endurecido estudada foi a resistência à compressão. Foram rompidos seis corpos de prova aos sete dias de idade, e mais seis aos 28 dias, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007).

Na segunda fase de produção dos concretos outras propriedades do estado endurecido foram estudadas. A quantidade de corpos de prova produzida para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foi definida com base nas normas vigentes. Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e absorção de água, o número de corpos de prova foi determinado com base na quantidade utilizada em trabalhos semelhantes, ou seja, estudos que também consideravam a substituição de agregados naturais por reciclados na produção de novos concretos (BUTTLER, 2003; CARRIJO, 2005; GONÇALVES, 2001; MOREIRA, 2010). O número de corpos de prova utilizados está indicado na Tabela 12.

Tabela 12 – Ensaios do ensaio endurecido (2ª Fase) e número de corpos de prova

| Ensaio | Norma | Número de corpos de prova |
|---|-----------------------|---|
| Resistência à compressão | NBR 5739 (ABNT, 2007) | 06 (idade 07 dias) |
| | | 06 (idade 28 dias) |
| Resistência à tração por compressão diametral | NBR 7222 (ABNT, 2011) | 03 (idade 28 dias) |
| Módulo estático de elasticidade | NBR 8522 (ABNT, 2008) | 02 (leitura com <i>strain gages</i>) |
| | | 03 (leitura com compressômetro) (idade 28 dias) |
| Absorção de água por imersão | NBR 9778 (ABNT, 2009) | 03 (idade 28 dias) |
| Absorção de água por capilaridade | NBR 9779 (ABNT, 2012) | 03 (idade 28 dias) |
| TOTAL | | 26 |

3.2.6.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão aos 28 dias foi determinada através do ensaio padrão de compressão uniaxial, normalizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007). Trata-se de um ensaio de fácil execução, aceito universalmente como um índice de resistência do concreto. Além da importância inerente a resistência à compressão em elementos de concreto, outras propriedades do material estão associadas a ela.

3.2.6.2 Módulo estático de elasticidade

Este ensaio foi realizado conforme especificações da norma NBR 8522 (ABNT, 2008), de determinação do módulo de elasticidade à compressão do concreto. Foi escolhida a metodologia A desta norma, com tensão σ_a (tensão básica igual a 0,5 MPa) constante. Foram utilizados medidores de deformação elétricos e mecânicos.

Os medidores de deformação elétricos resistivos utilizados são do tipo *strain gages*, fixados diretamente nas faces dos corpos de prova para medição das deformações (Figura 11).



Figura 11 – Medidor elétrico de deformação – *Strain gage*

Os corpos de prova foram retirados da câmara úmida 24 horas antes do ensaio, e tiveram sua superfície lixada para que houvesse melhor aderência dos *strain gages*. Este medidor consiste em uma fina folha de metal que é colada em forma de grade sobre um

suporte, no qual são fixados dois fios condutores. Os fios, por sua vez, são conectados a um sistema de aquisição de dados, que fornece como resultado a deformação em função do tempo. A Tabela 13 apresenta os valores fornecidos pelo fabricante de algumas características apresentadas pelos *strain gages*:

Tabela 13 – Características dos *strain gages*

| Característica | Valores |
|---------------------------|-------------------------|
| Resistência | 120 $\Omega \pm 0,35\%$ |
| Fator de sensibilidade | 2,08 $\pm 1,0\%$ |
| Sensibilidade transversal | 0,2% |

Fonte: Fabricante

O ensaio de módulo também foi realizado através da utilização de um compressômetro analógico de bases independentes (Figura 12), um dos tipos de medidor de deformação mecânico especificado na NBR 8522 (ABNT, 2008). Tal compressômetro destina-se a medição de módulo de elasticidade de corpos de prova de concreto cilíndricos com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Possui dois extensômetros analógicos com resolução de 0,001mm para leitura direta no ensaio e suportes para facilitar a colocação e regulagem no corpo de prova.



Figura 12 – Compressômetro analógico

Fonte: <http://www.petrodidatica.com.br/produto/105126>

Algumas características desse ensaio, como a leitura de cada relógio depender de um operador diferente, fazem com que seus resultados estejam sujeitos a uma maior variabilidade do que leituras realizadas através dos medidores elétricos. A medição através do compressômetro foi realizada em três corpos de prova provenientes dos diferentes concretos produzidos na segunda fase.

3.2.6.3 Resistência à tração por compressão diametral

Após 28 dias de cura foi realizado o ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral (Figura 13), de acordo com a norma NBR 7222 (ABNT, 2010). Foram rompidos três corpos de prova de cada mistura pertencente à segunda fase de produção dos concretos do trabalho.



Figura 13 – Ensaio de tração por compressão diametral

3.2.6.4 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2009). Através desse ensaio, é possível analisar o volume de poros permeáveis do concreto, a partir da quantidade de água absorvida pelo material. Por meio da avaliação desta propriedade, pode-se verificar a influência da utilização do agregado reciclado sobre a porosidade e absorção do concreto em comparação com os resultados do concreto de referência.

3.2.6.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio foi realizado conforme recomendação da norma NBR 9779 (ABNT, 2012). O concreto foi avaliado na idade de 28 dias, por meio da utilização de três corpos de prova cilíndricos, para cada uma das misturas produzidas. Foi utilizado um recipiente específico para este ensaio, no qual poderiam ser posicionados até três corpos de prova (Figura 14). Havia um suporte para posicionar os corpos de prova, de maneira que sua base em contato com a água não ficasse apoiada no fundo do recipiente. Também foi utilizado um aparelho gotejador, para manter o nível de água constante em 5 ± 1 mm. O excesso de água saía por uma abertura no recipiente.



Figura 14 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

Durante o ensaio, a massa dos corpos de prova foi determinada após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h após o contato destes com a água. Estes valores foram utilizados no cálculo da absorção de água por capilaridade.

3.2.7 Análise de Variância – ANOVA

A análise de variância é uma ferramenta utilizada para avaliar afirmações sobre as médias de populações. A análise consiste fundamentalmente em verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Essa técnica é utilizada quando é necessário decidir se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas nas populações observadas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral). Nessa análise, parte-se do pressuposto que o acaso produz somente pequenos desvios e são as causas reais que geram as maiores diferenças (MILONE, 2009).

A ANOVA é utilizada para comparar três ou mais tratamentos e possui diversas variações decorrentes dos diferentes tipos de experimentos que podem ser realizados. O objetivo consiste em testar se há diferenças entre as médias dos tratamentos, o que equivale a testar hipóteses (ANJOS, 2009):

Hipótese nula (H_0): as médias populacionais são iguais.

Hipótese alternativa (H_1): as médias populacionais são diferentes, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente das demais.

Existem dois métodos para calcular-se a variância: dentro de grupos (MQG) e a variância das médias (MQR). Na ANOVA são calculados esses dois componentes de variância. Se a variância calculada usando a média (MQR) for maior do que a calculada (MQG) usando os dados pertencentes a cada grupo individual então existe uma diferença significativa entre os grupos. No presente trabalho foi utilizada somente a análise de variância com um fator, cujos cálculos foram realizados através da utilização do *Action Stat*, uma extensão do programa Excel específica para análises estatísticas.

As hipóteses nula e alternativa são testadas por meio da comparação entre os parâmetros F e $F_{crítico}$, ou P-valor e α . Os valores dos três primeiros são provenientes dos cálculos do *Action Stat*, e α é nível de significância da análise determinado pelo usuário, sendo adotado o valor de 5% no caso das análises do presente trabalho.

No caso da primeira comparação, se F é maior que F crítico, é rejeitada a hipótese nula H_0 . Isto é, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos no nível α de significância escolhido. Se F for menor que F crítico, não é possível rejeitar a hipótese nula H_0 . Já a segunda comparação é realizada por meio da avaliação entre os valores de P-valor e α . Se P-valor é menor que α , pode-se rejeitar a hipótese nula H_0 . Caso contrário, não se rejeita a hipótese nula H_0 , ou seja, não há evidências de

diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível α de significância escolhido (ANJOS, 2009).

Um tratamento é uma condição imposta ou objeto que se deseja medir ou avaliar em um experimento. Normalmente, em um experimento é utilizado mais de um tratamento. Cada tipo de tratamento também pode ser chamado de fator. No caso dos concretos avaliados no presente trabalho, foram utilizados fatores diferentes em cada etapa de produção. Na primeira etapa, o fator avaliado foi o procedimento utilizado para mitigação do efeito da alta absorção de água decorrente do ARC no estado fresco do concreto, com seis tipos de tratamento: sem correção, saturação prévia durante 10 minutos, peneiramento prévio do ARC, adição suplementar de água à mistura, utilização de aditivo plastificante, utilização de aditivo superplastificante. A variável resposta é a influência do procedimento adotado no estado fresco em propriedade do estado endurecido (no caso da primeira etapa de produção dos concretos, a única propriedade do estado endurecido avaliada foi a resistência). Na segunda etapa o fator estudado foi a porcentagem de substituição do AGN pelo ARC, com cinco tratamentos testados: 0, 10%, 20%, 50% e 100% de substituição do AGN por ARC. Foram avaliadas diferentes propriedades do estado endurecido nessa etapa, e para cada uma delas foi feita uma análise de variância, cuja variável resposta foi a influência da substituição do AGN pelo ARC, em diferentes porcentagens. As unidades experimentais em ambas as etapas foram os corpos de prova.

Em conjunto com a ANOVA, o *Action Stat* fornece os resultados de comparações múltiplas realizadas através do teste Tukey. No caso dos resultados da primeira etapa esse teste torna-se interessante, pois complementa a ANOVA e permite avaliar qual dos tratamentos exerce alguma influência nos resultados; isto é, possibilita saber qual dos procedimentos utilizados no estado fresco do concreto de forma a minimizar a absorção decorrente do ARC teve diferença significativa nos resultados do estado endurecido.

4 RESULTADOS

A análise e discussão dos resultados segue a mesma ordem em que foram realizados os procedimentos experimentais. O primeiro tópico trata dos resultados referentes a caracterização dos agregados. O segundo tópico diz respeito aos resultados obtidos na primeira fase de produção dos concretos. Já o terceiro tópico abrange os resultados provenientes da segunda fase de produção dos concretos.

4.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1 Areia natural

As porcentagens retidas e acumuladas obtidas para a areia natural podem ser visualizadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Granulometria do agregado miúdo natural

| Peneiras (mm) | % Retida | % Retida acumulada |
|--|-----------------|-------------------------------|
| 6,3 | 0 | 0 |
| 4,75 | 2,93 | 2,93 |
| 2,36 | 8,83 | 11,77 |
| 1,18 | 13,39 | 25,16 |
| 0,6 | 20,98 | 46,14 |
| 0,3 | 32,64 | 78,78 |
| 0,15 | 16,52 | 95,30 |
| 0,075 | 3,49 | 98,79 |
| Fundo | 1,21 | 100,00 |
| Dimensão Máxima Característica = 4,75 mm | | |
| Módulo de Finura = 2,53 | | |

A curva granulométrica da areia está apresentada na Figura 15, em conjunto com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).

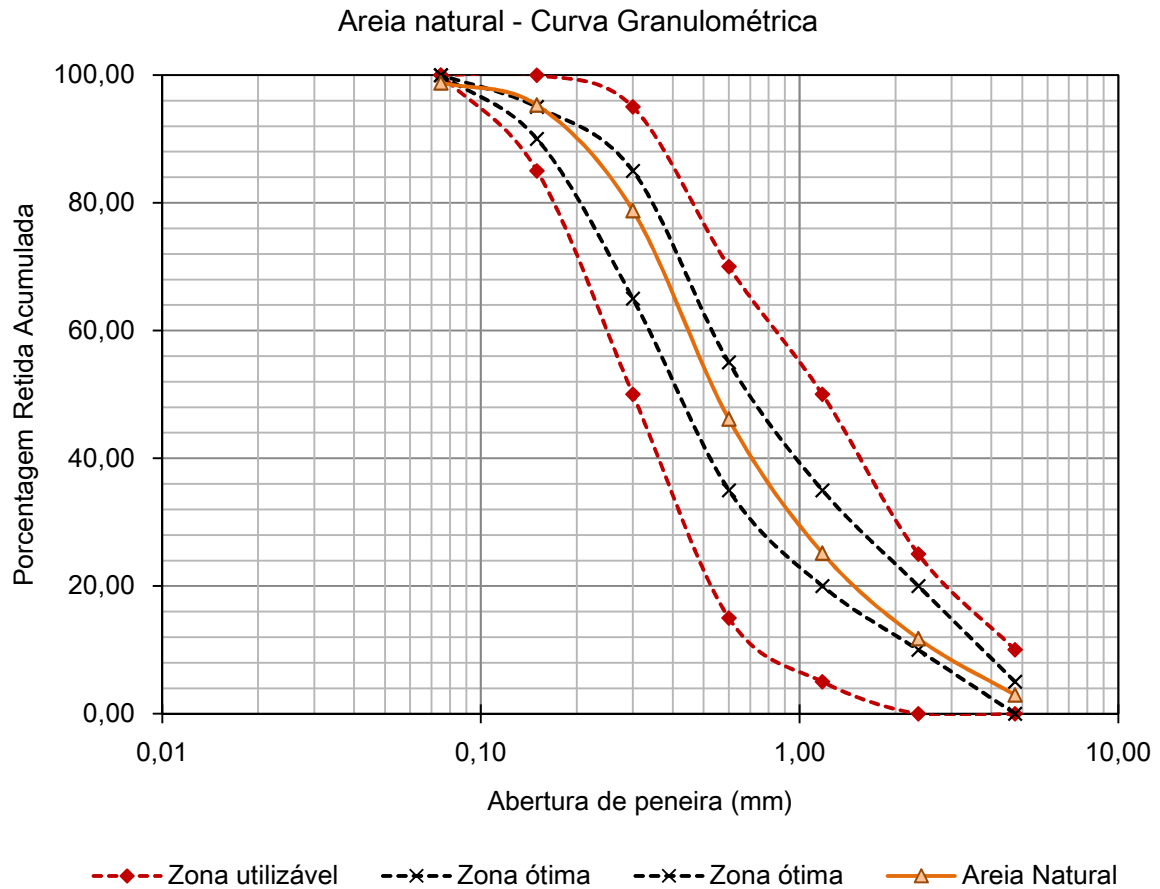


Figura 15 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Verifica-se que a curva granulométrica da areia avaliada enquadra-se nos limites da zona ótima proposta pela NBR 7211 (ABNT, 2009). A continuidade apresentada pela curva é um indicativo de que suas partículas são distribuídas de maneira uniforme, isto é, não há ausência ou excesso de partículas de determinado tamanho. As demais propriedades físicas da areia natural determinadas encontram-se na Tabela 15:

Tabela 15 – Propriedades da areia natural

| Propriedade | Resultado | Norma |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Massa específica aparente | 2,427 g/cm ³ | NBR NM 52 (ABNT, 2009) |
| Massa específica S.S.S | 2,437 g/cm ³ | NBR NM 52 (ABNT, 2009) |
| Massa específica | 2,431 g/cm ³ | NBR NM 52 (ABNT, 2009) |
| Massa unitária estado solto | 1181 kg/m ³ | NBR NM 45 (ABNT, 2006) |
| Massa unitária compactada | 1371 kg/m ³ | NBR NM 45 (ABNT, 2006) |
| Índice de vazios | 43,67% | NBR NM 45 (ABNT, 2006) |
| Absorção | 1,7% | NBR NM 30 (ABNT, 2001) |
| Material passante na peneira #75µm | 2,3% | NBR NM 46 (ABNT, 2003) |

4.1.2 Agregado graúdos: natural (AGN) e reciclado de concreto (ARC)

Na Tabela 16 são apresentados os valores de porcentagem retida e porcentagem retida acumulada do agregado gráudo natural e do agregado gráudo reciclado de concreto.

Tabela 16 – Granulometria dos agregados graúdos

| Peneiras (mm) | AGN | | ARC | |
|------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|
| | % Retida | % Retida acumulada | % Retida | % Retida acumulada |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 13,13 | 13,13 |
| 12,5 | 37,99 | 37,99 | 52,57 | 65,70 |
| 9,5 | 34,02 | 72,02 | 27,22 | 92,91 |
| 6,3 | 24,24 | 96,25 | 5,03 | 97,94 |
| 4,75 | 2,69 | 98,94 | 0,11 | 98,05 |
| Fundo | 1,06 | 100,00 | 1,95 | 100,00 |

Dimensão Máxima Característica = 19 mm Dimensão Máxima Característica = 25 mm
 Módulo de Finura = 6,71 Módulo de Finura = 7,04

As curvas granulométricas do AGN e do ARC, com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009) encontram-se na Figura 16.

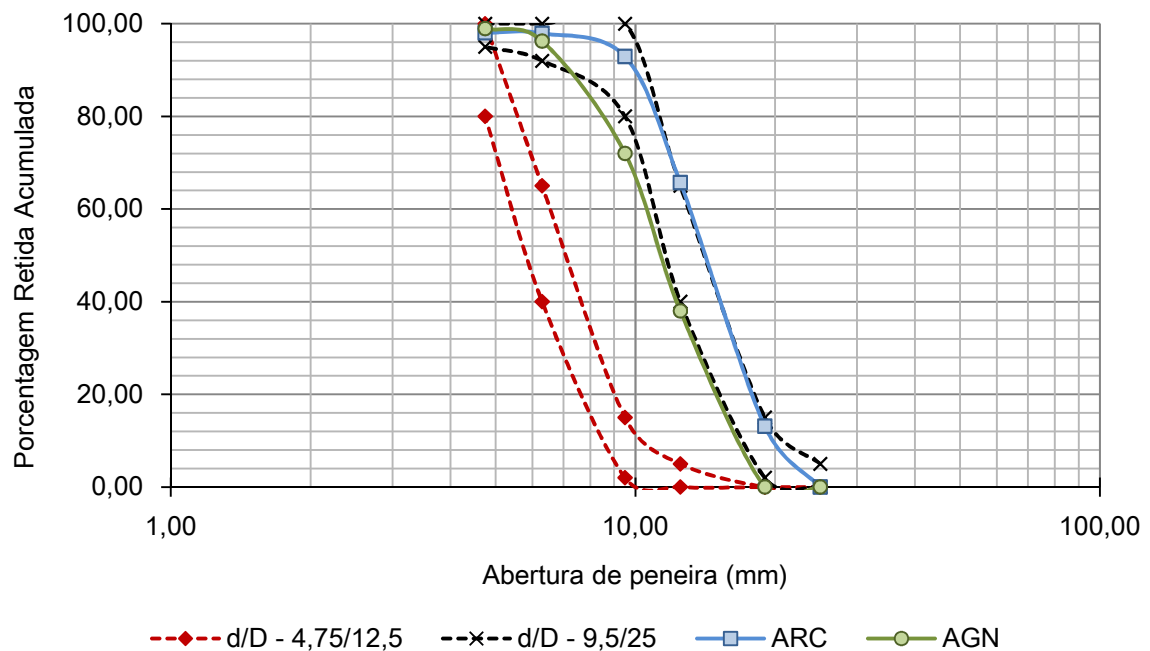


Figura 16 – Composição granulométrica dos agregados graúdos AGN e ARC

Na Tabela 17 constam os resultados obtidos experimentalmente para os ensaios de caracterização do AGN e do ARC:

Tabela 17 – Propriedades dos agregados graúdos AGN e ARC

| Propriedade | AGN | ARC | Norma |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| Massa específica | 2,821 kg/dm ³ | 2,515 kg/dm ³ | NBR NM 53 (ABNT, 2009) |
| Massa unitária estado solto | 1,471 kg/dm ³ | 1,290 kg/dm ³ | NBR NM 45 (ABNT, 2006) |
| Massa unitária compactada | 1,570 kg/dm ³ | 1,390 kg/dm ³ | NBR NM 45 (ABNT, 2006) |
| Índice de vazios | 44,34% | 44,73% | NBR NM 45 (ABNT, 2006) |
| Material passante na peneira #75µm | 0,52% | 2,09% | NBR NM 46 (ABNT, 2003) |
| Absorção | | | |
| 10 minutos | 0,31% | 2,59% | NBR NM 53 (ABNT, 2009) |
| 30 minutos | 0,34% | 2,73% | |
| 24 horas | 0,53% | 3,22% | |

Os ensaios de caracterização confirmam que os agregados reciclados possuem propriedades diferentes dos agregados naturais, entre elas: menor massa específica, menor massa unitária, maior índice de vazios e maior absorção de água. A existência da camada de argamassa aderida ao agregado reciclado é uma explicação para esses dados.

As diferenças entre o AGN e o ARC também são perceptíveis em escala microscópica. Na Figura 17 são mostradas imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o agregado graúdo natural (parte superior) e para o agregado reciclado de concreto (parte inferior).

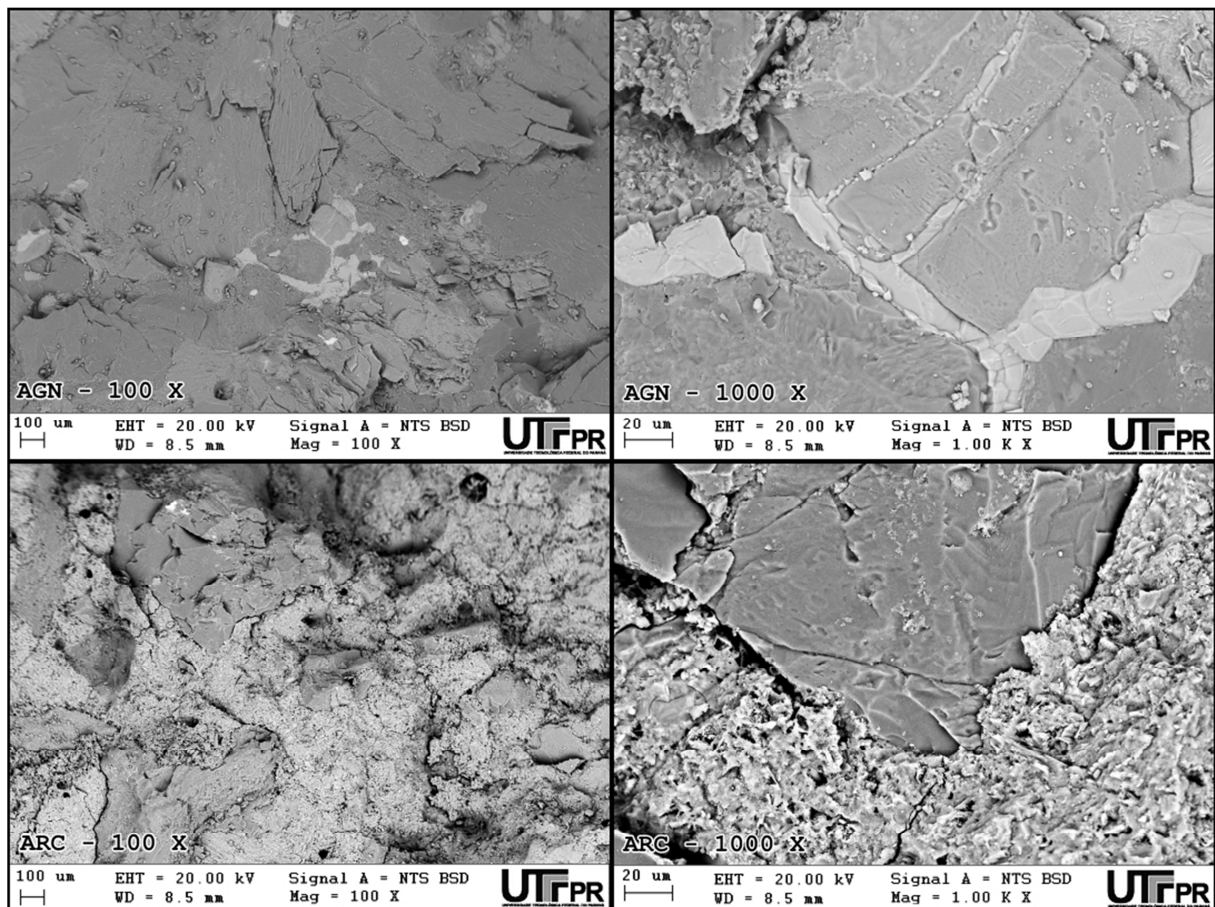


Figura 17 – Imagens de microscopia para AGN e ARC (100 X e 1000 X)

É possível visualizar que o ARC possui uma textura mais rugosa que a apresentada pelo AGN, que aparenta ser mais plana e lisa. Além disso, a textura do ARC é mais porosa e com maior ocorrência de fissuras. A maior porosidade se deve à camada de argamassa original que permanece aderida ao agregado. As fissuras normalmente são provenientes do processo de britagem do resíduo de concreto para que este possa adquirir dimensões de agregado.

Análises referentes ao ARC

Na Tabela 18 são transcritos os parâmetros da norma NBR 15116 (ABNT, 2004), para produção de concretos com agregados reciclados.

Tabela 18 – Propriedades dos agregados graúdos reciclados

| Propriedades | ABNT NBR 15116 (2004) | Agregados reciclados de concreto |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Teor de fragmentos a base de cimento e rochas (%) | ≥ 90% | > 90% * |
| Absorção de água | ≤ 7% | 3,22% |
| Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%) | Cloretos | 1 |
| | Sulfatos | 1 |
| | Materiais não minerais ** | 2 |
| | Torrões de argila | 2 |
| | Teor total máximo de contaminantes | 3 |
| Teor de material passante na malha 75 µm (%) | ≤ 10% | 2,09% |

* Valores fornecidos pela usina de reciclagem
 ** Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicas.

Verifica-se que as propriedades apresentadas pelos agregados reciclados enquadram-se nos parâmetros da norma. Algumas características, inclusive, mostram valores inferiores ao determinado para agregados reciclados de concreto, como o teor de material passante na peneira 75 µm e a absorção de água.

Foi realizada uma comparação entre os resultados de massa específica e absorção do agregado graúdo reciclado de concreto com os valores determinados pelas normas apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores normativos de massa específica e absorção

| Propriedade | ARC | NBR 15116 (ABNT, 2004) | RILEM TC 121 DRG (1994) | Hong Kong: WBTC No. 12/2002 | Japão JIS 5021 BCSJ (1977) | China Technical Code DG/TJ07-008 |
|---|------|------------------------------|---|-----------------------------------|---|---|
| Massa específica (kg/m ³) | 2515 | Valor não especificado | T I ≥ 1500 T II ≥ 2000 T III ≥ 2400 | 2000 | JIS 5021 ≥ 2500 BCSJ (1977) ≥ 2200 | T I ≥ 2400 T II ≥ 2200 |
| Absorção (%) | 3,22 | ≤ 7 | T I ≤ 20 T II ≤ 10 T III ≤ 3 | 10 | JIS 5021 ≤ 3,0 BCSJ (1977) ≤ 7,0 | Tipo I ≤ 7 Tipo II ≤ 10 |

Fontes: TC 121 DRG (RILEM, 1994), WBTC No. 12/2002, JIS 5021, BCSJ (1977), Technical Code DG/TJ07-008 (citado em Li, 2008)

Nota-se que o valor de massa específica apresentado pelo ARC atende as exigências das normas, sendo maior inclusive que alguns valores determinados para aplicações estruturais. A norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004) não estabelece valores para massa específica. Com relação ao valor de absorção, é superior ao estabelecido pela norma japonesa JIS 5021, para agregado graúdo e inferior ao determinado na BCSJ (1977). Conforme a norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004) o valor é inferior ao valor especificado. De acordo com a recomendação TC 121 DRG (RILEM, 1994), o resultado de absorção do agregado reciclado do trabalho é inferior ao valor normatizado para o Tipo II, classificação correspondente somente a agregados reciclados de concreto. Com exceção da especificação JIS 5021, nota-se que o agregado reciclado atende os demais requisitos e possui potencial para ser utilizado na produção de concretos.

Também foi estudada a absorção de água do ARC ao longo do tempo (Figura 18).

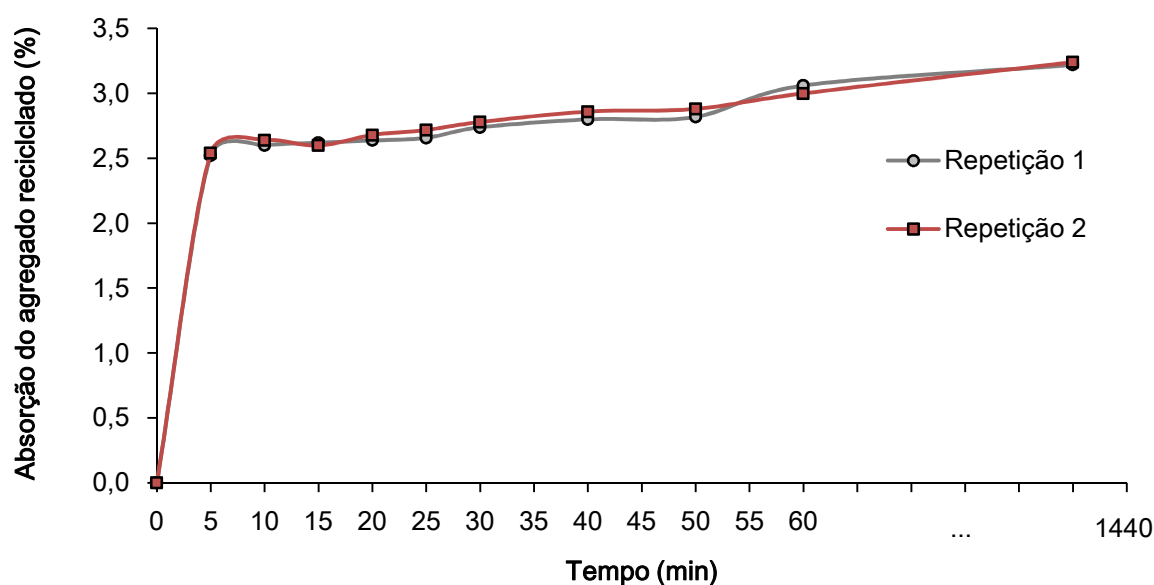


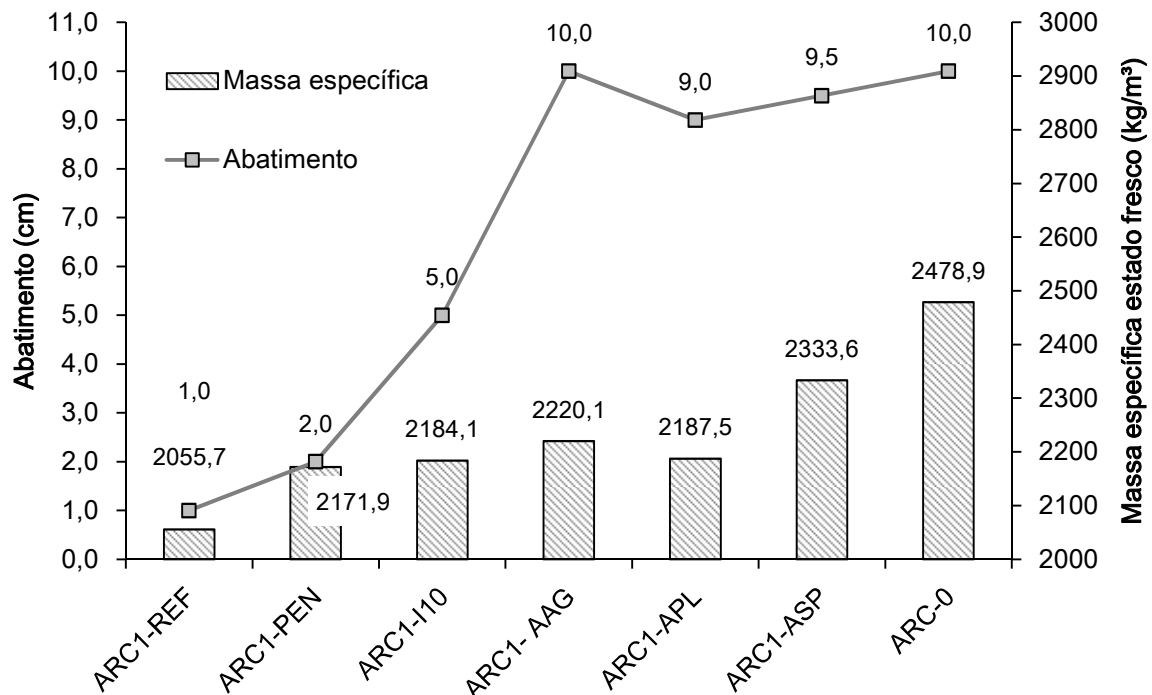
Figura 18 – Absorção de água do agregado graúdo reciclado conforme o tempo

Constatou-se que aos dez minutos o valor determinado para absorção do ARC era equivalente a 81% do total que foi absorvido após 24 horas. Após esse intervalo de tempo, a absorção torna-se mais lenta.

4.2 PRIMEIRA FASE DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

4.2.1 Estado fresco do concreto

Na Figura 19 são mostrados os resultados de abatimento pelo tronco de cone e massa específica, registrados para os concretos produzidos na primeira fase.



ARC-0: Concreto sem incorporação de ARC, produzido com 100% de agregados naturais.

ARC1-REF: sem nenhum procedimento para reduzir efeito da absorção

ARC1-AAG: adição de água suplementar

ARC1-APL: utilização de aditivo plastificante

ARC1-ASP: utilização de aditivo superplastificante

ARC1-I10: imersão prévia do ARC por 10 minutos

ARC1-PEN: peneiramento prévio do ARC

Figura 19 – Propriedades estado fresco (1ª Fase)

O menor valor de abatimento foi registrado para o concreto ARC1-REF, que apresentou uma consistência bastante seca e com reduzida fluidez. Esse fato vem de encontro ao que diz a literatura: o uso de agregados reciclados resulta em menor abatimento, devido à

absorção mais alta desses agregados. Além da absorção, a superfície mais rugosa e áspera do agregado reciclado (conforme mostrado no ensaio de MEV) também possui influência na trabalhabilidade, pois grãos com essas características tendem a um maior travamento entre si. A consequência desse travamento é uma menor mobilidade entre as partículas, que passam a apresentar maior dificuldade para deslizar entre si no momento da mistura. Este concreto também apresentou o menor valor de massa específica no estado fresco (redução de 17,07% em relação ao concreto de referência ARC-0), o que pode ser explicado em função da menor massa específica do ARC e também devido à sua fluidez reduzida, que dificultou o manuseio e o preenchimento do recipiente de ensaio. Desta forma, os espaços que deveriam ser preenchidos por concreto acabaram ficando vazios, e conseqüentemente o concreto com menor massa específica.

O abatimento registrado para o concreto ARC1-PEN ficou bastante próximo ao do concreto ARC1-REF e não foi verificada melhora significativa em sua trabalhabilidade. No entanto, foi verificado um aumento no valor da massa específica deste concreto em relação ao concreto ARC1-REF. Uma possível explicação é o desprendimento da camada de argamassa aderida do agregado devido à agitação mecânica. Enquanto o agregado fica retido na peneira, a argamassa desprendida possui menor diâmetro e passa pela abertura, juntamente com as partículas mais finas que estavam presentes no ARC. Desta forma, como a argamassa aderida e os finos possuem menor massa específica que o agregado, retirá-los através do peneiramento contribui para que a parcela de ARC com maior massa específica (agregado do concreto original) seja incorporada à mistura. Em relação ao concreto de referência ARC-0, verificou-se uma redução igual a 12,38% no valor da massa específica no estado fresco.

A influência da condição de umidade do agregado reciclado no momento da mistura (pré-saturação com a água de amassamento) é confirmada pelo resultado de abatimento registrado para o concreto ARC1-I10, igual a cinco centímetros. Apesar de não ter alcançado o valor especificado (10 ± 2 cm), verificou-se que a mistura apresentava fluidez superior aos concretos ARC1-REF e ARC1-PEN. A absorção de água do ARC já havia sido monitorada em função do tempo, e constatou-se que aos dez minutos era equivalente a 81% do total que foi absorvido após 24 horas. Diante disso, a imersão prévia do agregado em parte da água de amassamento mostrou-se uma alternativa para melhorar a consistência do material sem a necessidade de alterar a relação água/cimento do concreto. Com relação ao valor da massa específica, houve uma redução de 11,89% em comparação ao concreto de referência ARC-0.

No caso do concreto ARC1-AAG, a correção do abatimento foi feita através da adição de água suplementar a mistura. Foi necessário adicionar 0,7 L para alcançar o

abatimento de (10 ± 2) cm, o que resultou em um aumento na relação água/cimento de 0,54 para 0,64. Com relação à massa específica foi registrado um aumento de 7,99% em seu valor em relação ao concreto ARC1-REF e uma redução igual a 10,44% em relação ao concreto ARC-0. Esse acréscimo pode ser explicado em função da maior fluidez e mobilidade alcançadas pelo concreto ARC1-AAG (Figura 20). Essa mudança na consistência após a adição suplementar de água possivelmente auxiliou na redução dos vazios ao facilitar adensamento da mistura fresca.

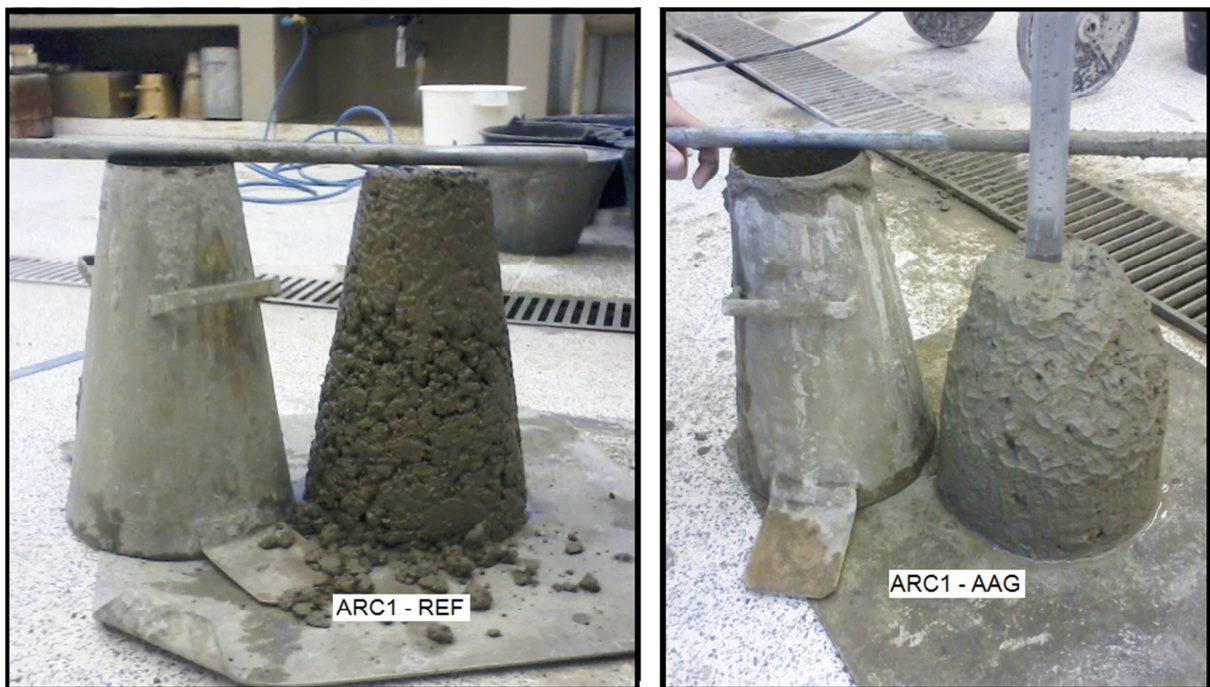


Figura 20 – Concretos ARC1-REF e ARC1-AAG: aumento na fluidez após adição de água

Por fim, procedeu-se a utilização de aditivos químicos para ajuste do abatimento dos concretos com ARC. Foram testados dois tipos de aditivo – plastificante (ARC1-APL) e superplastificante (ARC1-ASP). No caso do concreto ARC1-APL foi alcançado o valor de abatimento desejado (9,0 cm). Em termos qualitativos, no entanto, a trabalhabilidade desse concreto não foi adequada, pois durante sua mistura verificou-se que o emprego do aditivo plastificante aumentou de forma excessiva a coesão do concreto, de tal forma que este passou a apresentar dificuldade de escoamento. Esse efeito pode ter ocorrido devido à formulação desse aditivo, que conforme o fabricante possui agentes que evitam a segregação dos componentes do concreto. No caso do concreto ARC1-APL possivelmente os finos presentes no ARC colaboraram para o aumento da coesão, tendo por resultado uma mistura com maior viscosidade. Foi necessário trabalhar com 1,027% de aditivo sobre a massa de cimento

(quantidade superior à máxima recomendada pelo fabricante, igual a 1%) para alcançar o abatimento de tronco de cone desejado. Desta forma, o aditivo plastificante não teve desempenho satisfatório para emprego em concretos contendo ARC. Com relação aos resultados de massa específica, houve um aumento de 6,41% comparado ao concreto ARC1-REF e uma redução igual a 11,75% comparado ao resultado do concreto ARC-0.

No concreto em que foi testado o aditivo superplastificante (ARC1-ASP) alcançou-se o abatimento desejado, igual a 10 cm. Notou-se uma melhora significativa na trabalhabilidade do concreto pouco tempo após sua aplicação. O aumento verificado no valor da massa específica em relação ao concreto ARC1-REF (13,51%) provavelmente se deve à maior fluidez proporcionada pela utilização do aditivo. Esta facilita a saída do ar presente na mistura através do adensamento, assim como no caso do concreto ARC1-AAG. Com menos espaços vazios, ocorre o aumento da massa específica no estado fresco. Em relação ao concreto de referência ARC-0 verificou-se uma redução igual a 5,86%. A porcentagem de aditivo sobre a massa de cimento (0,167%) foi bem inferior àquela utilizada no concreto ARC1-APL (1,027%), o que indica o desempenho satisfatório em comparação à utilização do aditivo plastificante nas dosagens de concretos contendo agregados reciclados de concreto.

4.2.2 Estado endurecido do concreto

Nesta primeira fase de produção dos concretos a única propriedade do estado endurecido avaliada foi a resistência à compressão – NBR 5739 (ABNT, 2007). Os resultados estão indicados Figura 21.

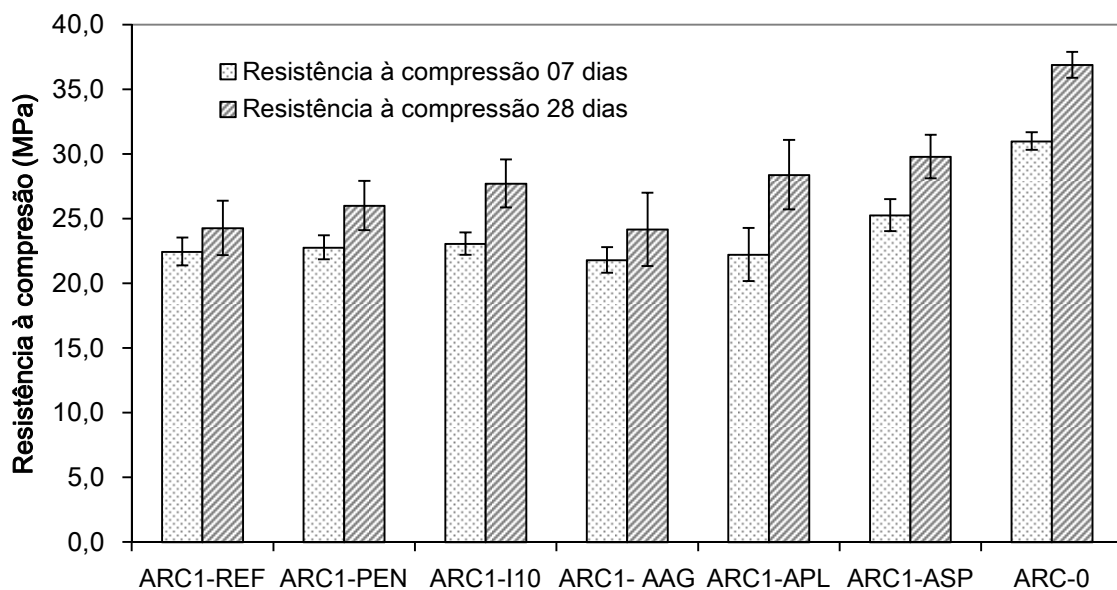


Figura 21 – Resistência à compressão (1ª Fase)

Foram calculados os percentuais de variação na resistência em relação ao concreto de referência ARC-0 e também em relação ao concreto produzido sem nenhum tipo de procedimento adotado para reduzir o efeito da absorção de água pelo agregado reciclado ARC1-REF.

As porcentagens de aumento/redução no valor da resistência para os concretos produzidos na primeira fase podem ser visualizadas na Figura 22.

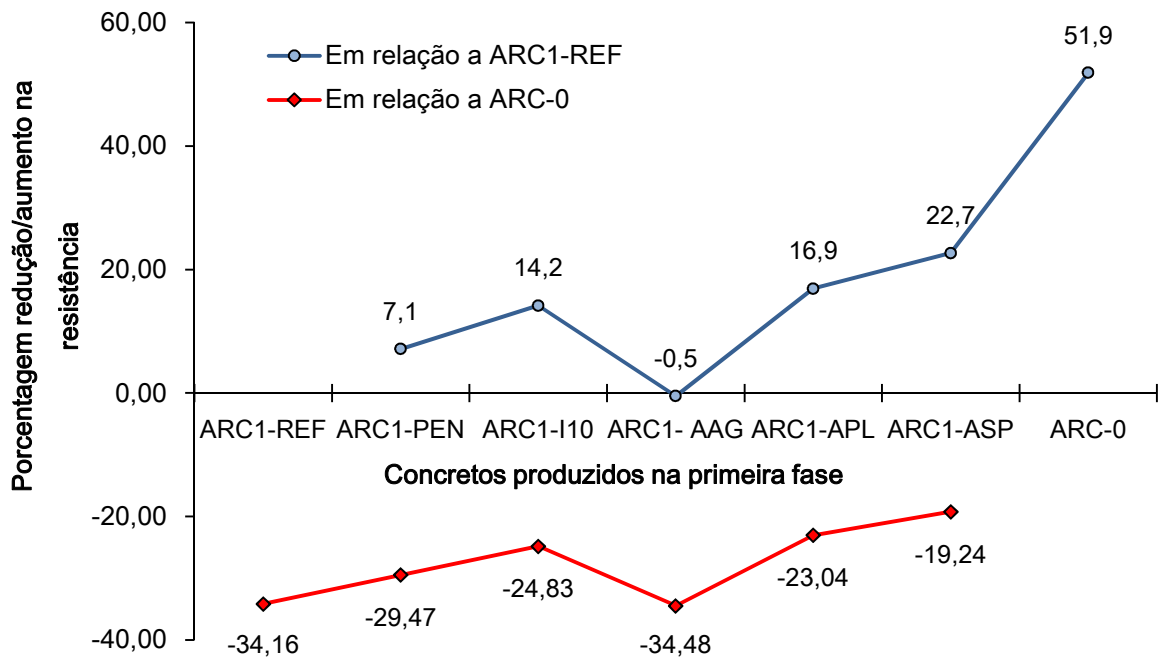


Figura 22 – Percentuais de variação nos valores de resistência (1ª Fase)

Notam-se reduções nos resultados de resistência à compressão de todos os concretos em relação ao concreto produzido somente com agregados naturais (ARC-0). Esse fato confirma dados da literatura, em que a inclusão de ARC no concreto reduz sua resistência. Não foi alcançado o valor especificado de 30 MPa em nenhum dos concretos estudados. A diminuição no valor da resistência se apresenta mais intensa no concreto ARC1-AAG. Nesse concreto, além da redução referente ao uso do ARC ainda há aquela proveniente do aumento na relação a/c, de 0,54 para 0,64.

Quando comparados aos resultados do concreto ARC1-REF verificam-se aumentos em todos os concretos estudados, com exceção de ARC1-AAG. Os maiores valores de aumento na resistência à compressão são verificados nos concretos em que foram utilizados aditivos plastificante (ARC1-APL) e superplastificante (ARC1-ASP).

Além do cálculo em termos de porcentagem de perda/ganho (Figura 22), a interação entre os resultados de resistência à compressão aos 28 dias e o tipo de procedimento adotado para correção do abatimento também foi verificada através de uma análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 20. Foram considerados os resultados obtidos para todos os corpos de prova utilizados no ensaio. Não foram inclusos os valores referentes ao concreto ARC-0 na ANOVA, pois a intenção era avaliar apenas o efeito referente aos procedimentos estudados. Como na produção do concreto ARC-0 foi empregado outro tipo de agregado graúdo, a inclusão de seus resultados implicaria em um novo tratamento na ANOVA, isto é, além do tratamento do tipo de procedimento teria de ser considerado o tratamento de tipo de agregado utilizado na produção dos concretos (AGN ou ARC).

Tabela 20 – ANOVA para resultados de resistência à compressão (1ª Fase)

| Fator: procedimento adotado para correção do abatimento | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Níveis do fator: 06 tipos de tratamento | | | | | | |
| Tratamentos: sem correção, saturação prévia durante 10 minutos, peneiramento prévio do ARC, adição suplementar de água à mistura, utilização de aditivo plastificante, utilização de aditivo superplastificante. | | | | | | |
| Variável resposta: influência do procedimento adotado no estado fresco em propriedade do estado endurecido (resistência à compressão) | | | | | | |
| Número total de parcelas: 36 | | | | | | |
| Número de repetições por tratamento: 06 corpos de prova para cada tipo de concreto. | | | | | | |
| Corpos de prova/Procedimento | ARC1 REF | ARC1 AAG | ARC1 APL | ARC1 ASP | ARC1 I10 | ARC1 PEN |
| CP 01 | 21,97 | 23,84 | 34,13 | 24,83 | 24,23 | 24,26 |
| CP 02 | 22,61 | 21,54 | 31,03 | 31,51 | 31,19 | 26,91 |
| CP 03 | 23,26 | 22,90 | 29,75 | 33,03 | 26,48 | 24,85 |
| CP 04 | 26,48 | 25,90 | 29,34 | 30,89 | 26,60 | 25,42 |
| CP 05 | 27,13 | 26,73 | 23,89 | 29,11 | 30,67 | 28,92 |
| CP 06 | 24,31 | 24,15 | 22,03 | 29,35 | 27,25 | 25,79 |
| Média | 24,29 | 24,18 | 28,36 | 29,79 | 27,74 | 26,03 |
| Desvio P | 2,10 | 1,91 | 4,55 | 2,83 | 2,68 | 1,68 |
| ANOVA | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | GL | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 155,84 | 5 | 31,17 | 4,00 | 0,0067 | 2,53 |
| Dentro dos grupos | 233,62 | 30 | 7,79 | | | |
| Total | 389,45 | 35 | | | | |

Diante dos valores encontrados para $F (4,00) > F \text{ crítico } (2,53)$ e $P\text{-valor } (0,0067) < \alpha (0,05)$, é possível afirmar que existe efeito de pelo menos um dos procedimentos utilizados na produção na resistência à compressão aos 28 dias.

Os valores de P-valor obtidos por meio do teste Tukey estão mostrados na Tabela 21:

Tabela 21 – Comparações realizadas pelo teste Tukey (Resistência – 1ª Fase)

| | ARC1-REF | ARC1-AAG | ARC1-APL | ARC1-ASP | ARC1-I10 | ARC1-PEN |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ARC1-REF | | 1 | 0,1489 | 0,02108 | 0,2964 | 0,8875 |
| ARC1-AAG | 0,1024 | | 0,1292 | 0,01767 | 0,2632 | 0,8576 |
| ARC1-APL | 3,571 | 3,673 | | 0,9474 | 0,9988 | 0,697 |
| ARC1-ASP | 4,822 | 4,924 | 1,251 | | 0,7973 | 0,2121 |
| ARC1-I10 | 3,022 | 3,125 | 0,5486 | 1,799 | | 0,8923 |
| ARC1-PEN | 1,52 | 1,622 | 2,051 | 3,302 | 1,502 | |

Entre todas as comparações par a par, as únicas em que foi possível rejeitar a hipótese de igualdade de acordo com o teste Tukey ($P\text{-valor} < \alpha (0,05)$) foram as comparações ARC1-REF x ARC1-ASP e ARC1-AAG x ARC1-ASP, ou seja, apenas entre estes tratamentos houve diferenças significativas. Isso indica que houve efeito do tratamento com aditivo superplastificante.

De fato, o maior percentual de aumento na resistência foi registrado para o concreto ARC1-ASP, enquanto os concretos ARC1-REF e ARC1-AAG foram os que apresentaram os menores valores. Possivelmente, a menor resistência à compressão verificada nestes dois concretos está associada à maior quantidade de vazios que estava presente na mistura durante o estado fresco e permaneceu no estado endurecido. No caso do concreto ARC1-REF estes vazios são decorrentes do ar que não foi eliminado durante o adensamento dos corpos de prova. Com relação ao concreto ARC1-AAG, os vazios são provenientes da água em excesso que havia na mistura, adicionada de forma a melhorar sua trabalhabilidade. A água adicional não foi totalmente consumida nas reações de hidratação, irá evaporar e deixar vazios que permanecem no concreto após seu endurecimento.

O peneiramento prévio do agregado graúdo empregado em ARC1-PEN, colaborou para redução de fatores responsáveis pelas características inferiores do ARC em relação ao AGN: houve a eliminação dos finos juntamente com parte da camada de argamassa aderida. Através da redução nestes fatores, é possível obter uma melhora na qualidade do ARC.

Embora não tenha sido suficiente para que o concreto alcançasse o abatimento especificado, o procedimento de imersão prévia do agregado graúdo em parte da água de amassamento durante 10 minutos (concreto ARC1-I10) colaborou para uma melhora na fluidez do concreto produzido com ARC. A utilização deste procedimento mostra-se mais benéfica durante o estado fresco (melhora da fluidez) do que no endurecido (resultado de resistência à compressão). Notou-se um maior valor de abatimento de tronco de cone em

ARC1–I10 (5 cm) em relação ao concreto ARC1–REF (1 cm), onde nenhum procedimento foi empregado para reduzir o efeito da absorção de água pelo ARC. Desta forma, a utilização deste procedimento colabora na manutenção da trabalhabilidade e implica em um consumo inferior de aditivo superplastificante.

A utilização do aditivo superplastificante mostrou-se uma alternativa adequada para o uso em concretos contendo ARC, como foi o caso do concreto ARC1–ASP. Ao aumentar a fluidez do concreto fresco o aditivo superplastificante mostra uma atuação na redução de vazios que permanecerão até o estado endurecido, tanto por facilitar a operação de adensamento quanto por evitar uma possível alteração na relação água/cimento, necessária para que o concreto alcance a consistência desejada.

4.3 SEGUNDA FASE DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

4.3.1 *Proporcionamento entre os agregados graúdos pelo Modelo de Alfred*

Na Tabela 22 são apresentadas as porcentagens retidas acumuladas reais do AGN e do ARC, bem como as porcentagens calculadas pelo modelo:

Tabela 22 – Porcentagens retidas acumuladas reais e calculadas, para os agregados graúdos

| Peneiras | Porcentagens retidas acumuladas reais | | Porcentagens para o modelo Alfred |
|----------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| | Natural | Reciclada | |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,0 |
| 19 | 0,00 | 13,13 | 21,0 |
| 12,5 | 37,99 | 65,69 | 49,3 |
| 9,5 | 72,02 | 92,91 | 65,6 |
| 6,3 | 96,25 | 97,94 | 87,0 |
| 4,75 | 98,94 | 98,04 | 100,0 |

Considerando as porcentagens determinadas pelo Modelo de Alfred, nota-se que há excesso de partículas em algumas peneiras e falta de partículas em outras, tanto no caso do AGN quanto no caso do ARC. Faz-se necessário encontrar qual a proporção entre os dois tipos de agregado graúdo que tem as porcentagens retidas acumuladas que mais se aproximam das porcentagens da curva calculada.

Foram testadas diferentes composições entre os dois tipos de agregado graúdo. Através da Tabela 23 é possível observar as porcentagens retidas acumuladas calculadas para as composições, bem como os valores de módulo de finura:

Tabela 23 – Percentagens retidas acumuladas - composições AGN x ARC

| Peneira (mm) | % retidas acm para o modelo Alfred | Composições entre brita natural e brita reciclada e % retidas acumuladas | | | | | | | | |
|--------------|------------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 10% ARC | 20% ARC | 30% ARC | 40% ARC | 50% ARC | 60% ARC | 70% ARC | 80% ARC | 90% ARC |
| | | + 90% AGN | + 80% AGN | + 70% AGN | + 60% AGN | + 50% AGN | + 40% AGN | + 30% AGN | + 20% AGN | + 10% AGN |
| 25 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 19 | 21,0 | 1,3 | 2,6 | 3,9 | 5,3 | 6,6 | 7,9 | 9,2 | 10,5 | 11,8 |
| 12,5 | 49,3 | 40,8 | 43,5 | 46,3 | 49,1 | 51,8 | 54,6 | 57,4 | 60,2 | 62,9 |
| 9,5 | 65,6 | 74,1 | 76,2 | 78,3 | 80,4 | 82,5 | 84,6 | 86,6 | 88,7 | 90,8 |
| 6,3 | 87,0 | 96,4 | 96,6 | 96,8 | 96,9 | 97,1 | 97,3 | 97,4 | 97,6 | 97,8 |
| 4,75 | 100,0 | 98,8 | 98,8 | 98,7 | 98,6 | 98,5 | 98,4 | 98,3 | 98,2 | 98,1 |
| Fundo | 100,0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| MF | 6,66 | 6,73 | 6,75 | 6,77 | 6,79 | 6,81 | 6,83 | 6,85 | 6,87 | 6,89 |

As curvas granulométricas traçadas para as composições em conjunto com a curva ideal estão apresentadas na Figura 23.

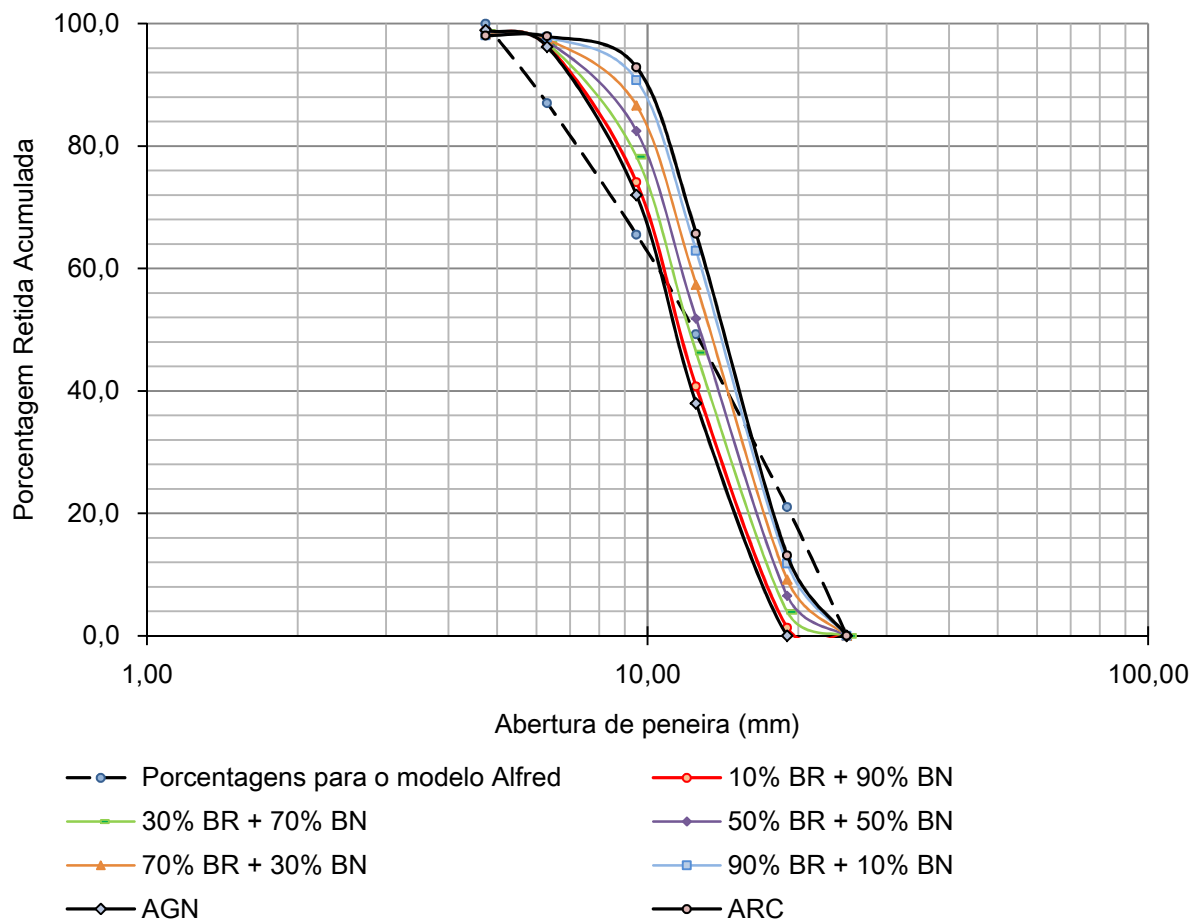


Figura 23 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos, curva teórica para Modelo de Alfred e curvas de diferentes composições entre AGN x ARC.

Verifica-se que as porcentagens retidas acumuladas de algumas das composições apresentam valores maiores do que os determinados pelo modelo de Alfred, ou há falta de partículas. No entanto, nota-se que a composição que apresenta as porcentagens retidas acumuladas mais próximas da estabelecida pelo modelo é a que contém 10% de ARC e 90% de AGN. Também é a composição cujo módulo de finura está mais próximo daquele teórico determinado pelo modelo de Alfred.

Com relação à quantidade areia, foi adotada a mesma proporção entre agregados graúdos e miúdos dos demais concretos, de forma a possibilitar a comparação dos resultados. As composições entre AGN e ARC foram testadas novamente, dessa vez em conjunto com o agregado miúdo. No gráfico da Figura 24 podem ser observadas duas curvas granulométricas para a utilização em conjunto da areia, do AGN e do ARC. Uma curva corresponde à teórica calculada de acordo com o modelo e a outra curva trata-se da composição real dos agregados, feita conforme o traço.

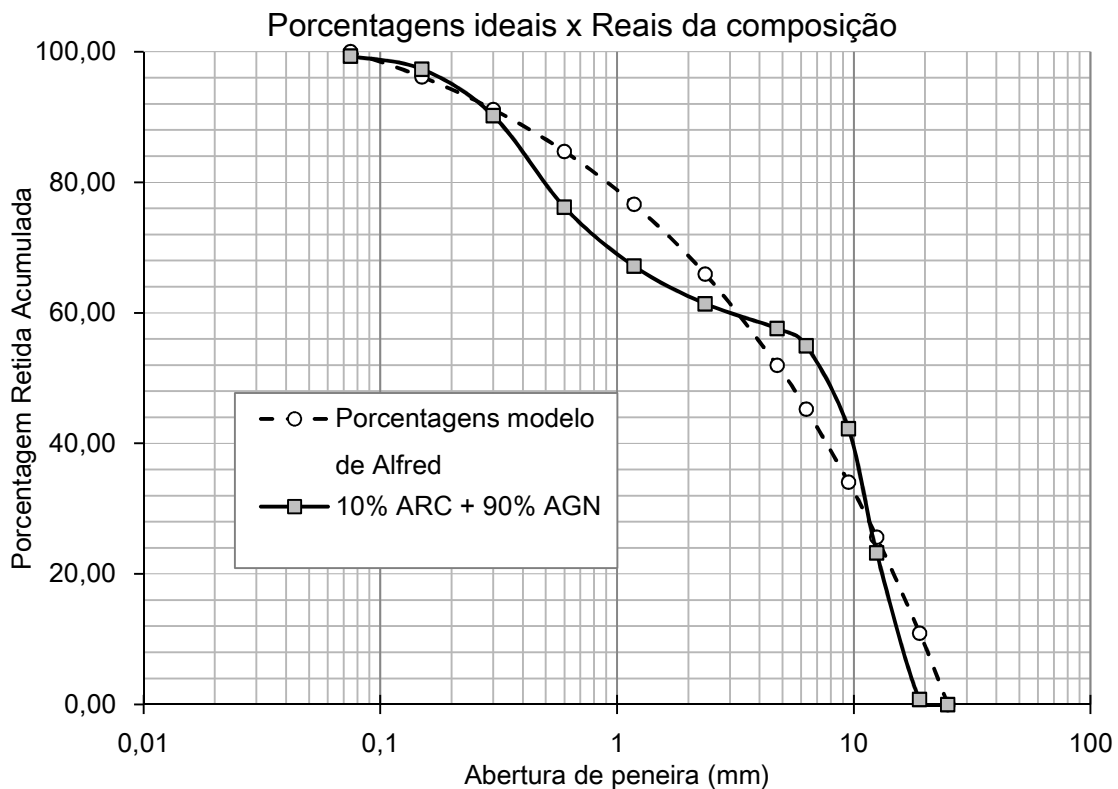


Figura 24 – Curva modelo de Alfred e Curvas granulométricas das composições entre areia, AGN e ARC.

Nota-se que existe falta de material em algumas peneiras, e excesso de material em outras. Porém, adotar essa proporção entre ARC e ARN possibilita verificar na prática da produção do concreto a eficiência dos cálculos aproximados por meio do modelo, na melhora das propriedades do concreto produzido com ARC.

4.3.2 Estado fresco do concreto

Na Tabela 24 estão sintetizados os resultados registrados durante o estado fresco dos concretos.

Tabela 24 – Propriedades estado fresco (2ª Fase)

| Concreto | ARC-0 | ARC2-10 | ARC2-20 | ARC2-50 | ARC2-100 |
|--|---------|---------|---------|---------|----------|
| Substituição AGN por ARC (%) | 0 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| Abatimento inicial (cm) | 10 | 10 | 7 | 6 | 5 |
| Quantidade de aditivo (% massa de cimento) | 0 | 0 | 0,0237 | 0,0372 | 0,1134 |
| Abatimento final (cm) | 10 | 10 | 10,5 | 10 | 10,5 |
| Massa específica (kg/m ³) | 2478,94 | 2440,22 | 2426,63 | 2387,91 | 2349,86 |

Nota-se que no caso dos concretos ARC-0 e ARC2-10 já foram registrados os valores de abatimento de tronco de cone especificado, igual a 10 cm. Para o concreto ARC-0 isso já era esperado, visto que a dosagem deste concreto já contemplava todos os parâmetros para que fosse atingido esse valor, de acordo com o método IPT. Com relação ao concreto ARC2-10, o abatimento ideal alcançado sem a utilização de aditivo pode ser explicado em função da melhoria do esqueleto granular dos materiais constituintes do concreto, determinado através do modelo de Alfred. Já era esperado que essa proporção entre ARC e AGN resultasse em um sistema com maior densidade de empacotamento que os demais, e por consequência, uma maior fluidez do concreto para a mesma quantidade de água. Além disso, mais três fatores podem ter contribuído para obter a trabalhabilidade desejada: o peneiramento prévio dos agregados graúdos, a condição de umidade do ARC que permaneceu imerso durante dez minutos e a pequena quantidade de ARC utilizada que não chegou a afetar a trabalhabilidade do concreto.

No caso dos concretos ARC2-20, ARC2-50 e ARC2-100, mesmo com o peneiramento prévio dos agregados graúdos e sua imersão durante dez minutos, não foi possível alcançar o abatimento de tronco de cone especificado. O abatimento de tronco de cone diminui com o aumento da porcentagem de ARC incorporada. Isso mostra que maiores quantidades de ARC na mistura correspondem a maiores taxas de absorção da água de amassamento pelo agregado, o que afeta sua trabalhabilidade. Procedeu-se, então, à utilização do aditivo superplastificante. As porcentagens de aditivo utilizadas sobre a massa de cimento estão apresentadas na mesma Tabela 24. Nota-se que a quantidade de aditivo aumenta conforme a porcentagem de substituição do AGN pelo ARC no concreto.

Com objetivo de verificar uma possível tendência entre a quantidade de aditivo necessária e a porcentagem de substituição do AGN pelo ARC, foi traçado o diagrama de dispersão mostrado na Figura 25.

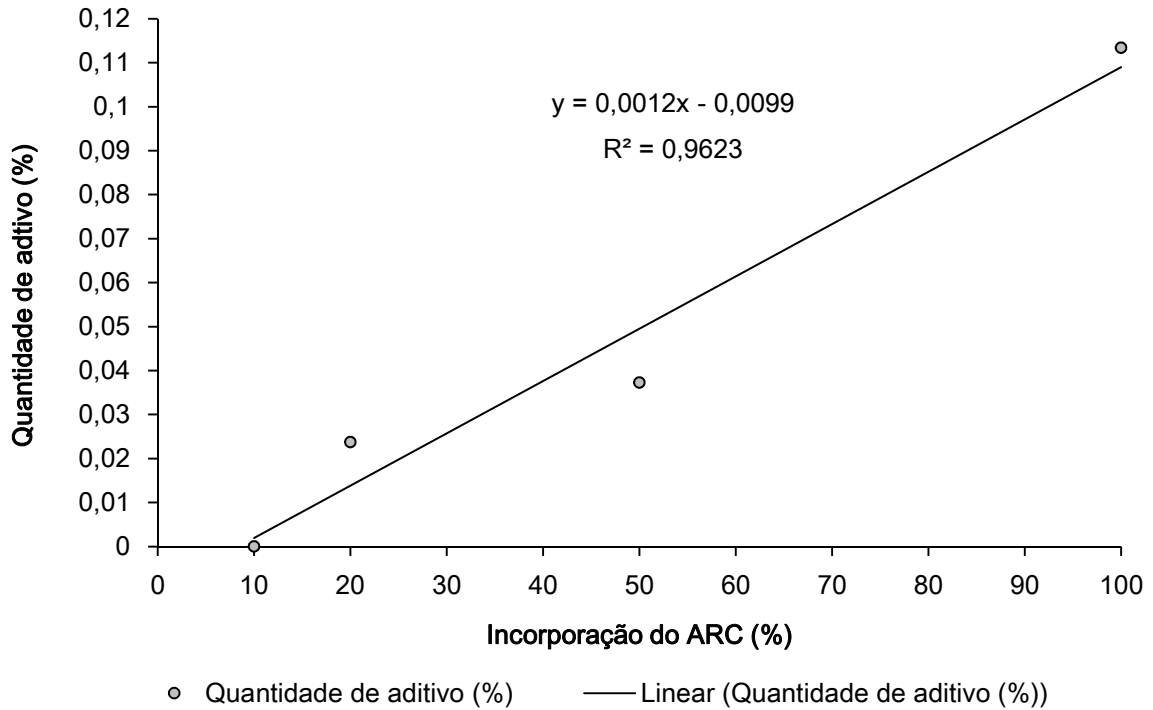


Figura 25 – Diagrama de dispersão (substituição do AGN pelo ARC x Quantidade de aditivo)

O coeficiente de determinação da regressão linear é igual a 0,9623, o que indica forte correlação entre as variáveis. A porcentagem de ARC incorporada explica 96,23 % da variância registrada pelos valores da quantidade de aditivo. Assim, 3,79 % dependem de outras variáveis. A equação poderá ser útil quando se deseja apenas estimar a quantidade de aditivo necessária em misturas produzidas em condições semelhantes às desse trabalho, porém com porcentagens de ARC diferentes.

4.3.3 Estado endurecido do concreto

4.3.3.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Os valores obtidos para este ensaio estão relacionados na Figura 26.

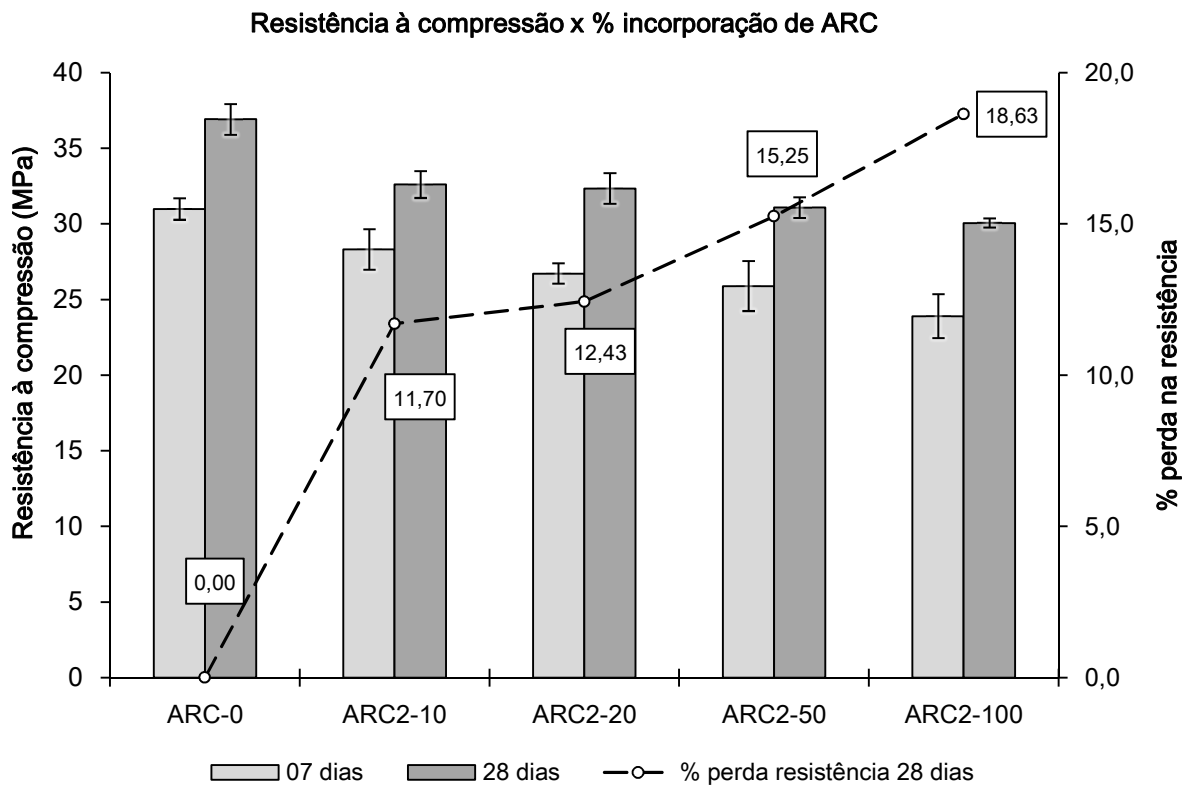


Figura 26 – Resultados de resistência à compressão (2ª Fase)

Nota-se que aos sete dias já havia sido alcançada a resistência de 30 MPa para o concreto de referência ARC-0. Nessa idade, já foi possível observar que os menores valores de resistência estavam relacionados aos maiores teores de substituição do AGN pelo ARC. Aos vinte oito dias, o comportamento se manteve. Apesar da diminuição na resistência, para todas as porcentagens de substituição foi alcançado o valor de 30 MPa. A redução nos valores de resistência é mais acentuada conforme se aumenta a quantidade de ARC incorporada ao concreto. Há uma redução na resistência à compressão de 11,69%; 12,41%; 15,78% e 18,63% para 10%, 20%, 50% e 100% de ARC incorporado, respectivamente.

Para avaliar a interação entre a substituição de agregado graúdo natural (AGN) por agregado graúdo reciclado de concreto (ARC) e a redução nos valores de resistência foi feita uma análise de variância (ANOVA). Nesta análise foram considerados os valores de resistência obtidos através do rompimento de todos os corpos de prova, conforme especificado na Tabela 25.

Tabela 25 – ANOVA para resultados de resistência à compressão

| Fator: substituição do AGN pelo ARC | | | | | | |
|--|----------|----|----------|----------|----------|-----------|
| Níveis do fator: 05 porcentagens de substituição | | | | | | |
| Tratamentos: 0,10%, 20%, 50% e 100% | | | | | | |
| Variável resposta: influência da substituição de agregado natural por ARC, na resistência à compressão dos concretos, em MPa | | | | | | |
| Número total de parcelas: 30 | | | | | | |
| Número de repetições por tratamento: 06 corpos de prova para cada tipo de concreto. | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | GL | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 165,3925 | 4 | 41,34811 | 63,32069 | 1,03E-12 | 2,75871 |
| Dentro dos grupos | 16,32488 | 25 | 0,652995 | | | |
| Total | 181,7173 | 29 | | | | |

Com base nos valores de $F (63,32) > F \text{ crítico } (2,75)$ e $P\text{-valor } (1,03E-12) < \alpha (0,05)$, pode-se afirmar que existe efeito de pelo menos uma das porcentagens de substituição do agregado natural por ARC na redução da resistência à compressão dos concretos. De forma a verificar entre quais tratamentos há diferenças significativas, foi realizado o teste Tukey, conforme Tabela 26.

Tabela 26 – Comparações realizadas pelo teste Tukey (Resistência à compressão – 2ª Fase)

| Níveis | Comparações Múltiplas | | | P-valor |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| | Centro | Limite Inferior | Limite Superior | |
| ARC2-10/ARC-0 | -2,670 | -4,713 | -0,626 | 0,006157199 |
| ARC2-20/ARC-0 | -4,266 | -6,310 | -2,223 | 1,91553E-05 |
| ARC2-50/ARC-0 | -5,088 | -7,131 | -3,044 | 1,09540E-06 |
| ARC2-100/ARC-0 | -7,083 | -9,126 | -5,039 | 2,15276E-09 |
| ARC2-20/ARC2-10 | -1,596 | -3,640 | 0,446 | 0,179887876 |
| ARC2-50/ARC2-10 | -2,418 | -4,461 | -0,374 | 0,014703970 |
| ARC2-100/ARC2-10 | -4,413 | -6,456 | -2,369 | 1,13716E-05 |
| ARC2-50/ARC2-20 | -0,821 | -2,865 | 1,221 | 0,761939181 |
| ARC2-100/ARC2-20 | -2,816 | -4,860 | -0,773 | 0,003662763 |
| ARC2-100/ARC2-50 | -1,995 | -4,038 | 0,0485 | 0,058089036 |

Em relação ao concreto de referência, todas as porcentagens testadas apresentaram diferenças significativas, segundo o teste Tukey. Notam-se diferenças significativas também entre os resultados daqueles concretos em que há grandes variações entre os teores de substituição do AGN pelo ARC, como ARC2-100 x ARC2-10 ou ARC2-100 x ARC2-20. Já entre aqueles que apresentam pequena variação, como ARC2-20 x ARC2-10 ou ARC2-50 x ARC2-20 não houve diferenças significativas. Os resultados obtidos para ARC2-10 e ARC2-20 foram relativamente próximos, o que explica por que não se observou

diferença significativa no teste Tukey. Já no caso da comparação entre o valor do concreto ARC-0 com os demais, as diferenças significativas confirmam a maior variação já notada entre os resultados obtidos em termos percentuais.

Verificou-se também que os concretos produzidos com ARC apresentaram menor massa específica e maior índice de vazios que o concreto convencional. Na Figura 27, são mostrados os valores obtidos para essas propriedades juntamente com os resultados de resistência à compressão.

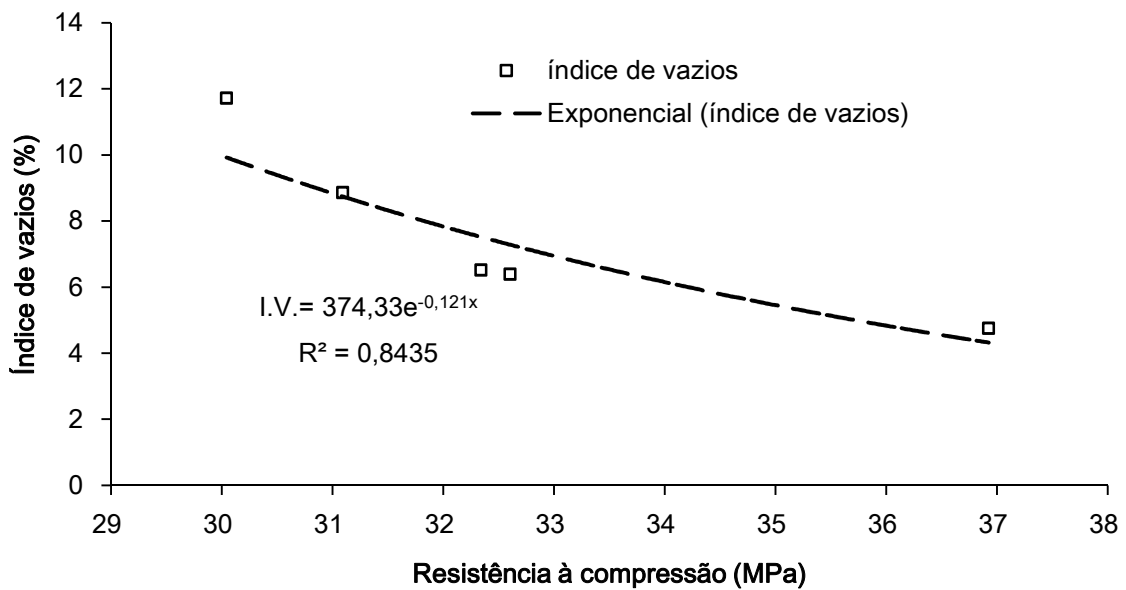


Figura 27 – Resistência à compressão e índice de vazios dos concretos

De forma geral, existe uma relação fundamental inversa entre a resistência de um material e sua porosidade. Essa afirmação também se aplica aos resultados obtidos no presente trabalho. Nota-se que a resistência à compressão se reduz gradativamente conforme o aumento do índice de vazios do concreto. Conforme Mehta e Monteiro (2008) essa relação inversa pode ser descrita na forma exponencial, como a linha de tendência que está adicionada entre os resultados do trabalho (Figura 27).

A influência de fatores como a quantidade de agregado reciclado incorporada ao concreto, bem como a condição de umidade que o mesmo se encontra no momento da mistura já foi verificada em diferentes investigações experimentais. Na Figura 28 é possível visualizar os valores de perda de resistência em termos percentuais, conforme o aumento da quantidade de ARC incorporado ao concreto. Também é possível comparar estes valores com resultados obtidos em alguns trabalhos semelhantes:

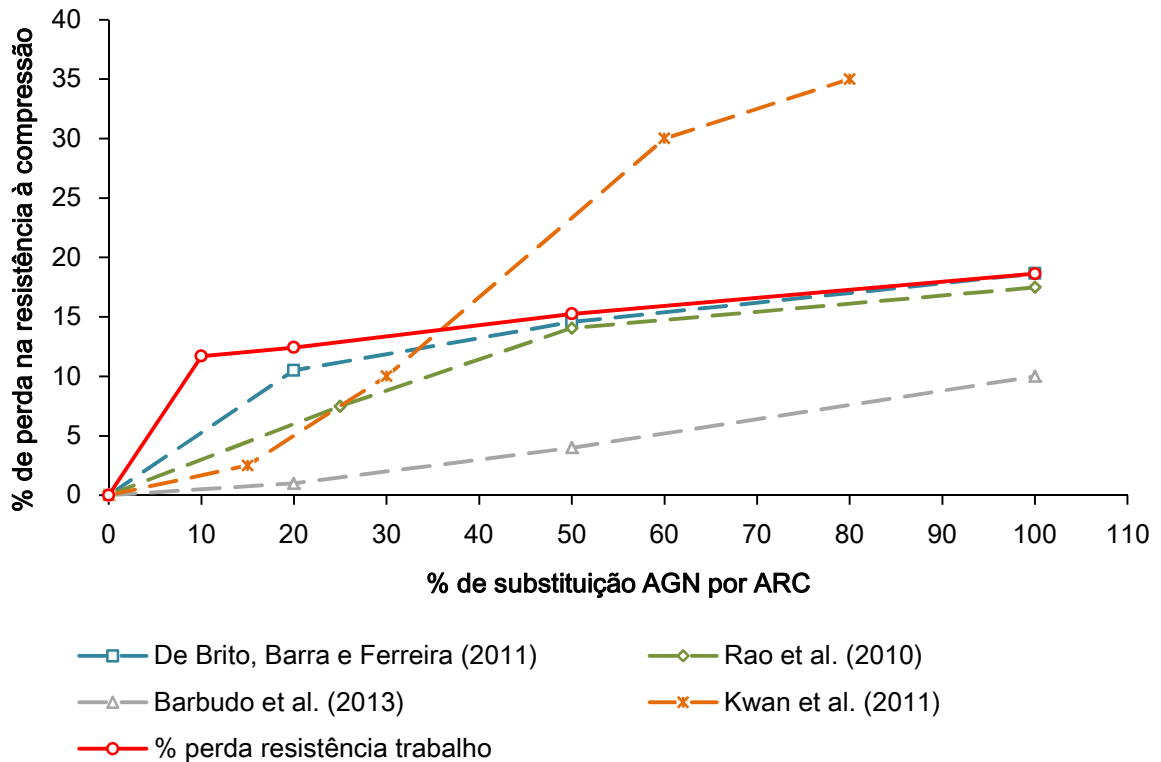


Figura 28 – Porcentagens de perda de resistência conforme a utilização de ARC

Nota-se que os valores de perda de resistência são relativamente próximos aos obtidos por Rao *et. al* (2011) e De Brito, Barra e Ferreira (2011) que utilizaram quantidades semelhantes de ARC na produção dos concretos. Diversos fatores contribuem para essa redução nos valores, alguns deles inerentes ao próprio agregado reciclado. Como as propriedades do concreto também são relacionadas às características do agregado, é de se esperar que este possua propriedades diferentes do concreto de referência. Parâmetros como a resistência e a relação a/c do concreto que deu origem ao ARC podem auxiliar na explicação de resultados inferiores de resistência. Provavelmente o concreto original possuía uma relação a/c mais alta e uma resistência mais baixa do que o novo concreto produzido. A qualidade da nova pasta de cimento era superior à da antiga, e a ligação entre o agregado reciclado e sua argamassa original é mais fraca do que aquela existente entre a nova matriz e os agregados. Deste modo o agregado reciclado constitui o elo mais fraco do compósito e a falha ocorre através dele.

Outro fator responsável por esse tipo de comportamento é a camada de argamassa original que permanece aderida ao agregado após o processo de britagem (Figura 29). Esta camada possui fissuras que acabam por enfraquecer a aderência entre o agregado reciclado e a matriz do novo concreto, o que contribui para o decréscimo de sua resistência.

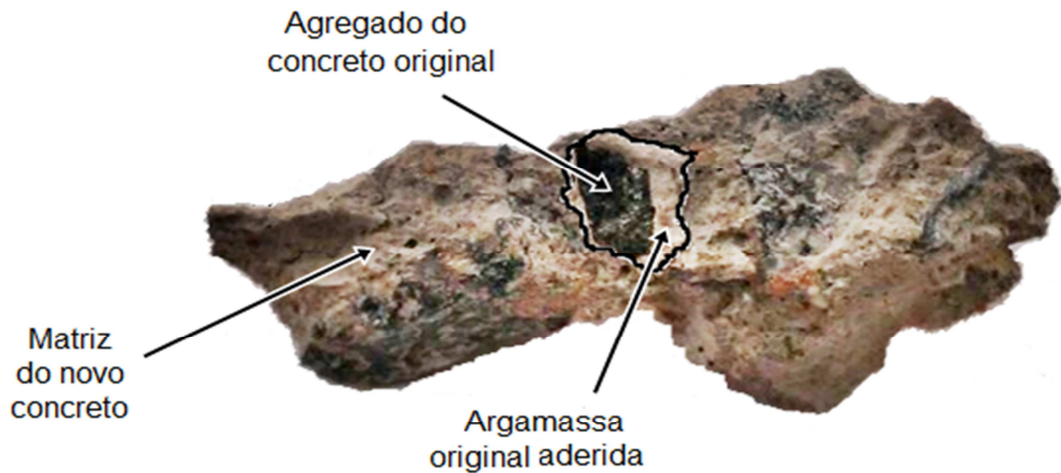


Figura 29 – Fragmento de um dos concretos do trabalho após ensaio de determinação da resistência.

A análise dos resultados de resistência à compressão mostra que o valor médio aos 28 dias foi superior a 30 MPa, em todos os concretos estudados. No caso do concreto ARC2-100, o valor da resistência média foi ligeiramente superior (30,04 MPa) aquela especificada. O concreto ARC2-100 foi produzido em laboratório, com todas as condições de controle. Os materiais foram todos secos em estufa e proporcionados em massa. Todos os concretos (ARC-0, ARC2-10, ARC2-20, ARC2-50 e ARC2-100) foram confeccionados nas mesmas condições, com a mesma relação a/c, portanto pode-se afirmar que essa redução na resistência de ARC2-100 se deve às características do agregado. Diante desse fato, a substituição total do agregado natural pelo ARC pode não ser uma escolha segura, principalmente em obras cujo controle de qualidade do concreto é ineficiente e não há fiscalização.

4.3.3.2 Módulo de elasticidade

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade foi realizado conforme a norma NBR 8522 (ABNT, 2008). Foram utilizados três corpos de prova para ensaio com medidor de deformação mecânico e dois corpos de prova para ensaio com medidor de deformação elétrico. Os resultados encontrados nestes ensaios estão mostrados na Figura 30.

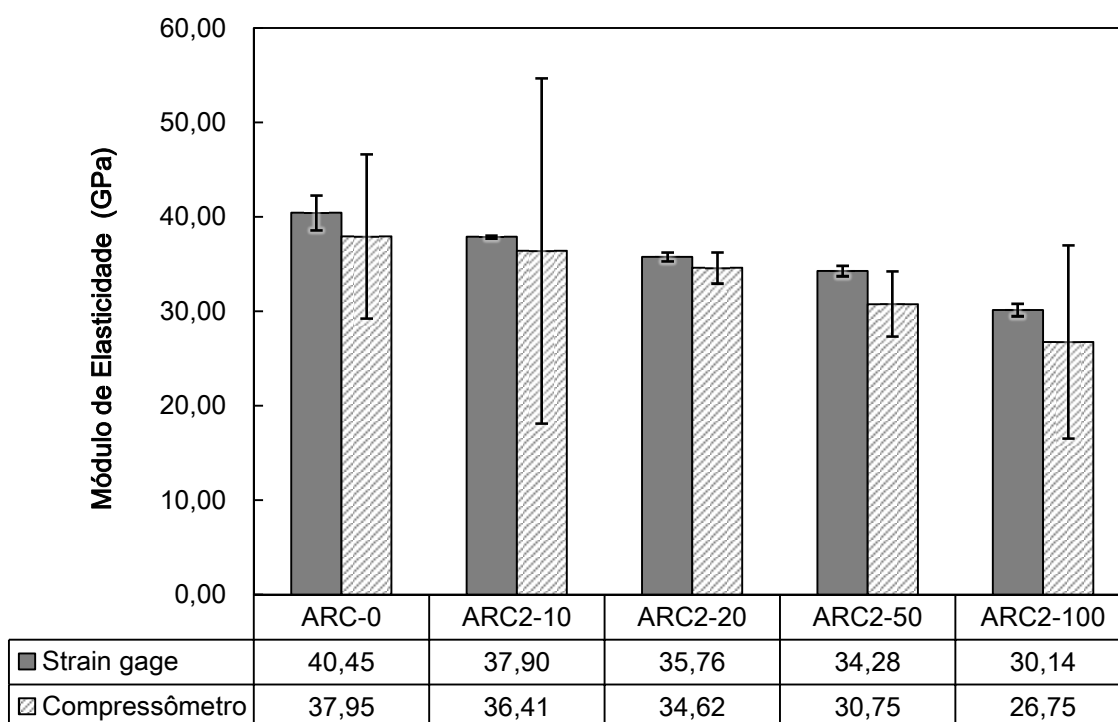


Figura 30 – Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade

Nota-se que os resultados provenientes do ensaio realizado com medidor de deformação mecânico (compressômetro) são ligeiramente inferiores aos originados pelos medidores elétricos e possuem uma grande variação entre as leituras feitas para um mesmo concreto. Em alguns concretos, as medições realizadas em um mesmo corpo de prova apresentaram valores bastante distintos em cada relógio. Os resultados originados por este ensaio dependem da visualização de um operador em cada relógio, o que também se constitui em uma fonte de variabilidade dos dados. Essa elevação no desvio padrão já era esperada, por isso também foi realizada a leitura das deformações através de medidores elétricos. Isso possibilitou uma comparação entre os resultados obtidos por cada tipo de medidor. A leitura de deformação resultante dos *strain gages* é pontual e proveniente de um sistema de aquisição de dados, portanto a variabilidade em seus resultados é inferior àquela obtida através do compressômetro.

Com base nos valores registrados na leitura dos *strain gages* foi realizada uma análise de variância, conforme a Tabela 27.

Tabela 27 – ANOVA para resultados do módulo de elasticidade (*strain gages*)

| Fator: substituição do AGN pelo ARC | | | | | | |
|---|----------|----|----------|----------|---------|-----------|
| Níveis do fator: 05 porcentagens de substituição | | | | | | |
| Tratamentos: 0,10%, 20%, 50% e 100% | | | | | | |
| Variável resposta: influência da substituição de agregado natural por ARC, no módulo de elasticidade dos concretos em GPa | | | | | | |
| Número total de parcelas: 10 | | | | | | |
| Número de repetições por tratamento: 02 corpos de prova para cada tipo de concreto. | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | GL | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 120,6883 | 4 | 30,17209 | 36,99826 | 0,00066 | 5,192168 |
| Dentro dos grupos | 4,0775 | 5 | 0,8155 | | | |
| Total | 124,7658 | 9 | | | | |

Nota-se que o valor de F (36,99826) é maior que F crítico (5,192168) e P-valor (0,00066) é menor que α (0,05). Deste modo, pelo menos um dos tratamentos apresentou diferença significativa, isto é, houve efeito de pelo menos uma das porcentagens de substituição do agregado natural por ARC na redução do módulo de elasticidade do concreto, em relação ao concreto de referência. De forma a verificar em qual dos tratamentos verificou-se essa diferença realizou-se o teste Tukey, conforme Tabela 28.

Tabela 28 – Comparações realizadas pelo teste Tukey (Módulo de elasticidade – 2ª Fase)

| Comparações Múltiplas | | | | |
|-----------------------|---------|-----------------|-----------------|----------|
| Níveis | Centro | Limite Inferior | Limite Superior | P-valor |
| ARC2-100/ARC2-50 | -4,145 | -7,768 | -0,522 | 0,029692 |
| ARC2-100/ARC2-20 | -5,625 | -9,248 | -2,002 | 0,008213 |
| ARC2-50/ARC2-20 | -1,480 | -5,103 | 2,143 | 0,534808 |
| ARC2-100/ARC2-10 | -7,765 | -11,388 | -4,142 | 0,001896 |
| ARC2-50/ARC2-10 | -3,620 | -7,243 | 0,003 | 0,050134 |
| ARC2-20/ARC2-10 | -2,140 | -5,763 | 1,483 | 0,260741 |
| ARC2-100/ARC-0 | -10,310 | -13,933 | -6,687 | 0,000494 |
| ARC2-50/ARC-0 | -6,165 | -9,788 | -2,542 | 0,005463 |
| ARC2-20/ARC-0 | -4,685 | -8,308 | -1,062 | 0,018007 |
| ARC2-10/ARC-0 | -2,545 | -6,168 | 1,078 | 0,163458 |

Os concretos ARC2-20, ARC2-50 e ARC2-100 apresentaram diferenças significativas em relação ao concreto de referência ARC-0. Isso possivelmente se deve ao maior teor de ARC incorporado nesses concretos. No caso do concreto ARC2-10, a quantidade de ARC utilizado não foi suficiente para que este apresentasse diferença significativa nos resultados, em relação ao concreto de referência.

No gráfico da Figura 31 foram inseridos os valores de módulo de elasticidade e de resistência à compressão de todos os concretos.

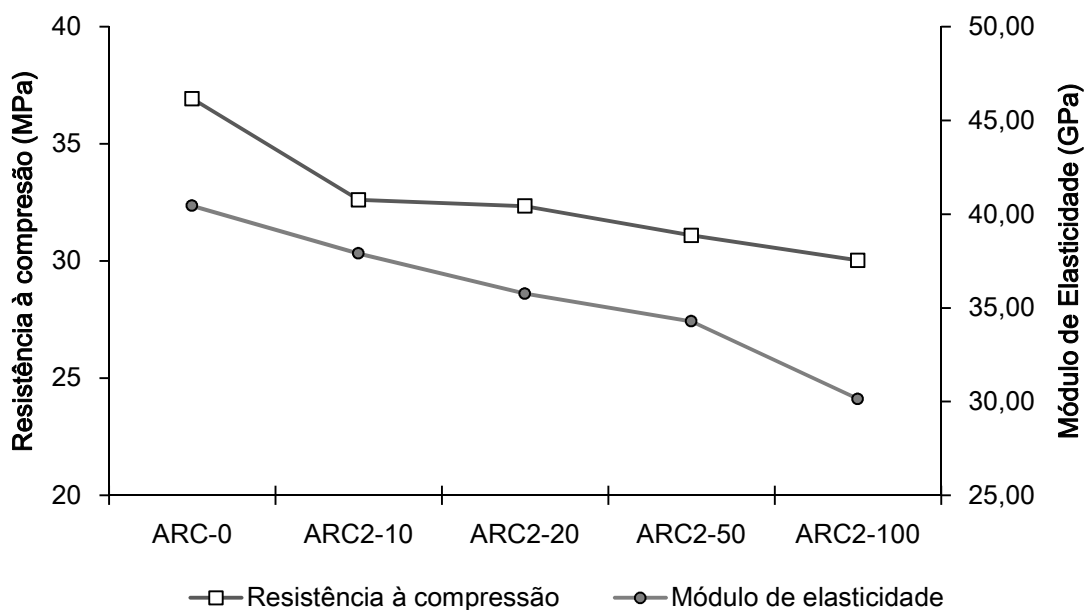


Figura 31 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade

De forma similar aos resultados obtidos para a resistência à compressão, houve uma redução nos valores encontrados para o módulo de elasticidade, conforme aumenta o teor de substituição do AGN pelo ARC. O agregado graúdo é um dos constituintes do concreto responsáveis pelos resultados do módulo. Como foram utilizados agregados diferentes em proporções variadas nos concretos, essa disparidade nos valores encontrados já era esperada. A forma, o volume, a porosidade e a dureza do agregado são fatores intervenientes na estabilidade dimensional dos concretos. Ao comparar os valores obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados nota-se a menor massa específica do ARC em relação ao agregado graúdo natural, que possui menor porosidade. Portanto, quanto maior a presença de agregado natural, maior será o valor do módulo, devido à sua capacidade superior de restringir as movimentações da matriz de concreto.

4.3.3.3 Resistência à Tração por compressão diametral

A resistência à tração foi determinada através do ensaio da NBR 7222 (ABNT, 2011). Na Tabela 29 estão relacionados os resultados obtidos para o ensaio de tração por compressão diametral dos concretos produzidos referentes a todos os corpos de prova.

Tabela 29 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

| Corpos de prova | Concretos | | | | |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|----------|
| | ARC-0 | ARC2-10 | ARC2-20 | ARC2-50 | ARC2-100 |
| CP01 | 3,555 | 3,544 | 3,317 | 2,583 | 2,500 |
| CP02 | 3,570 | 3,316 | 2,194 | 2,017 | 1,902 |
| CP03 | 3,5070 | 2,917 | 2,271 | 2,177 | 2,215 |
| Média | 3,544 | 3,259 | 2,594 | 2,259 | 2,206 |
| Desvio Padrão | 0,033 | 0,317 | 0,627 | 0,291 | 0,298 |

Da mesma forma que as demais propriedades estudadas, os resultados obtidos para resistência à tração dos concretos sofrem influência da substituição do AGN pelo ARC. Em termos percentuais, a redução nos valores de resistência é de 8,04%; 26,80%; 36,26% e 37,76% para ARC2-10, ARC2-20, ARC2-50 e ARC2-100, respectivamente. Os valores correspondentes a 50% e 100% de substituição apresentaram valores relativamente próximos, considerando-se que havia o dobro de ARC na mistura ARC2-100.

Através da análise de variância, pode-se confirmar que há a interferência da substituição do AGN pelo ARC na resistência à tração dos concretos. Conforme apresentado na Tabela 30, verifica-se que $F(8,11074) > F \text{ crítico}(3,47805)$ e $P\text{-valor}(5,38E-16) < \alpha(0,05)$.

Tabela 30 – ANOVA para resultados de resistência à tração

| Fator: substituição do AGN pelo ARC | | | | | | |
|---|---------|----|----------|---------|----------|-----------|
| Níveis do fator: 05 porcentagens de substituição | | | | | | |
| Tratamentos: 0,10%, 20%, 50% e 100% | | | | | | |
| Variável resposta: influência da substituição de agregado natural por ARC, na resistência à tração dos concretos em MPa | | | | | | |
| Número total de parcelas: 30 | | | | | | |
| Número de repetições por tratamento: 03 corpos de prova para cada tipo de concreto. | | | | | | |
| Fonte da variação | SQ | GL | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Entre grupos | 4,34807 | 4 | 1,087018 | 8,11074 | 0,003501 | 3,47805 |
| Dentro dos grupos | 1,34022 | 10 | 0,134022 | | | |
| Total | 5,68829 | 14 | | | | |

Os testes foram feitos através da utilização da análise com fator único (substituição do AGN pelo ARC) com nível de significância (alfa) igual a 0,05. Foram considerados os resultados obtidos para todos os corpos de prova utilizados no ensaio.

No gráfico da Figura 32 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral, em conjunto com os valores obtidos para a resistência à compressão.

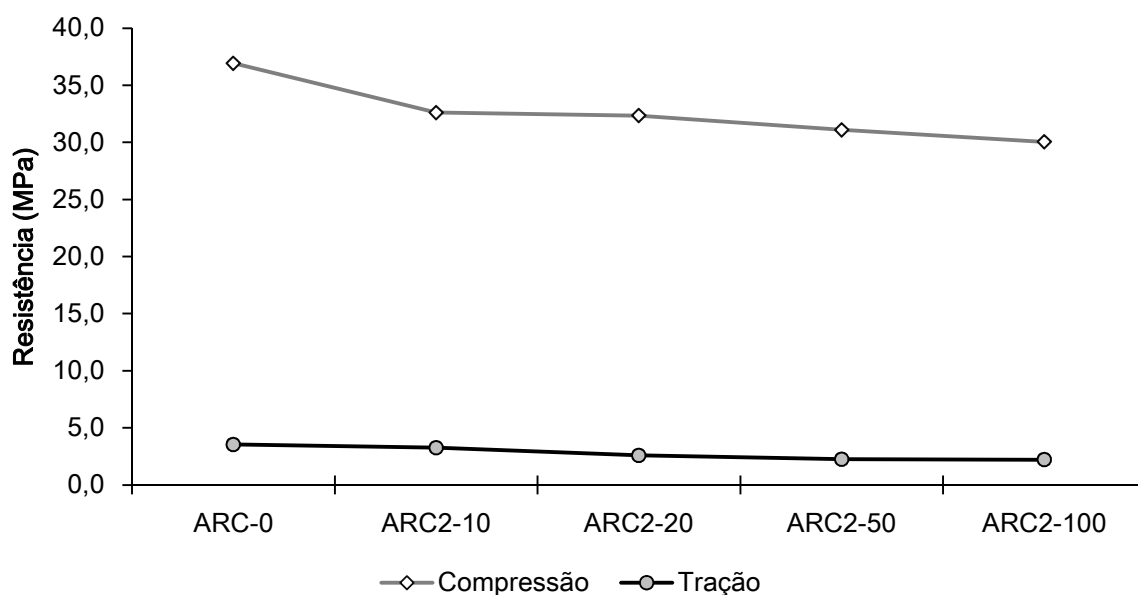


Figura 32 – Resultados de resistência à tração e à compressão

Nota-se que assim como no caso da resistência à compressão, há uma redução dos valores da resistência à tração, conforme o aumento da porcentagem de substituição do AGN pelo ARC nos concretos. Além do teor de substituição do AGN pelo ARC, outros fatores como o procedimento de mistura, a condição de umidade do agregado e a quantidade de argamassa aderida presente contribuem para a diminuição nos valores encontrados para resistência à tração. Assim como ocorre com a resistência à compressão, as falhas existentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento hidratada resultam em maior probabilidade de fratura.

4.3.3.4 Absorção de água por imersão

Na Tabela 31 é possível visualizar os resultados referentes à absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos. Os valores apresentados referem-se às médias calculadas entre os resultados provenientes dos corpos de prova.

Tabela 31 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

| Concreto/Ensaio | Absorção por imersão (%) | Índice de Vazios (%) | Massa específica real (g/cm ³) | Massa específica saturada (g/cm ³) | Massa específica seca (g/cm ³) |
|-----------------|--------------------------|----------------------|--|--|--|
| ARC-0 | 1,95 | 4,75 | 2,552 | 2,478 | 2,431 |
| ARC2-10 | 2,72 | 6,39 | 2,502 | 2,406 | 2,342 |
| ARC2-20 | 2,79 | 6,51 | 2,488 | 2,391 | 2,326 |
| ARC2-50 | 3,96 | 8,86 | 2,454 | 2,325 | 2,237 |
| ARC2-100 | 5,48 | 11,72 | 2,421 | 2,254 | 2,137 |

Verifica-se a influência da utilização do agregado reciclado em todas as propriedades relacionadas na Tabela 31. Com relação à massa específica observa-se uma redução nos valores, à medida que aumenta a quantidade de ARC empregado na mistura. Os resultados de absorção de água e índice de vazios, por sua vez, apresentam um aumento gradativo.

Para avaliar a interação entre substituição do AGN pelo ARC e seu impacto na propriedade de absorção de água, foi feita a análise de variância (ANOVA). Os resultados dos testes realizados estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – ANOVA para resultados de absorção de água

| Fonte da variação | SQ | GL | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|----------|----|----------|----------|----------|-----------|
| Entre grupos | 22,67766 | 4 | 5,669415 | 4047,344 | 5,38E-16 | 3,47805 |
| Dentro dos grupos | 0,014008 | 10 | 0,001401 | | | |
| Total | 22,69167 | 14 | | | | |

Fator: substituição do AGN pelo ARC
 Níveis do fator: 05 porcentagens de substituição
 Tratamentos: 0,10%, 20%, 50% e 100%
 Variável resposta: influência da substituição de AGN por ARC, na absorção de água dos concretos (%)
 Número total de parcelas: 15
 Número de repetições por tratamento: 03 corpos de prova para cada tipo de concreto.

Como $F (4047,344) > F \text{ crítico } (3,47805)$ pode-se afirmar que existe efeito de pelo menos uma das porcentagens de substituição do agregado natural por ARC na capacidade de absorção de água dos concretos.

Através da Figura 33 é possível visualizar os valores referentes às propriedades de massa específica e absorção de água, para todas as amostras dos concretos produzidos.

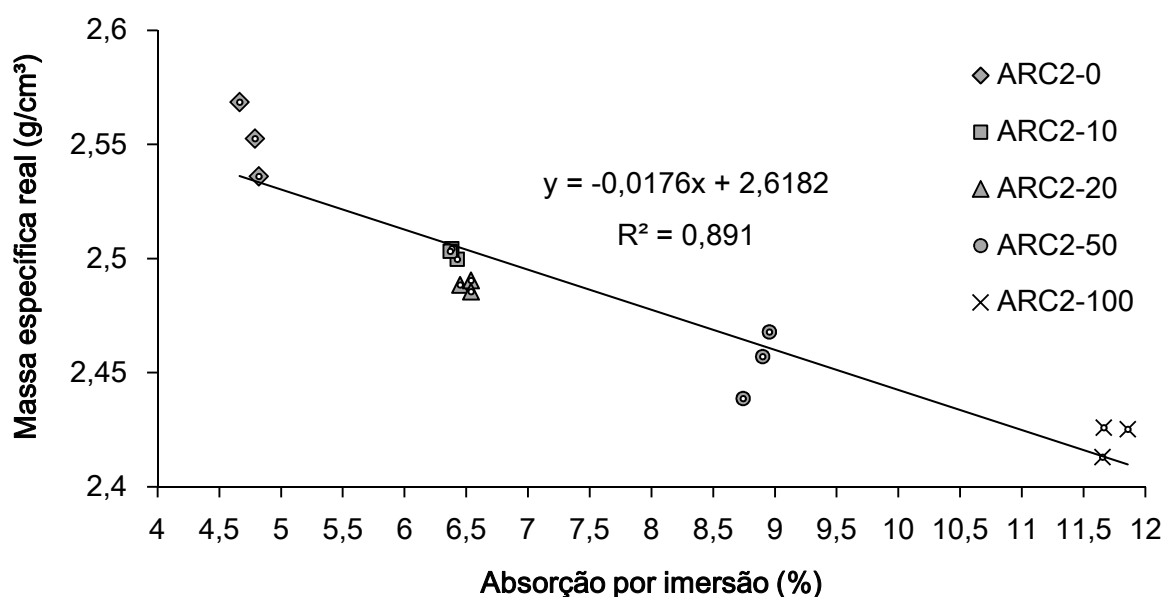


Figura 33 – Absorção de água dos corpos de prova e suas massas específicas

Nota-se que quanto maior a quantidade de ARC utilizado nas misturas, mais intenso se apresenta o efeito nos resultados obtidos para as propriedades de massa específica (redução), índice de vazios (aumento) e absorção de água (aumento), em relação ao concreto de referência ARC-0. Verifica-se também que massa específica e absorção de água apresentam resultados inversamente proporcionais.

Esse fenômeno pode ser explicado primeiramente com base nas características do agregado reciclado. Sabe-se que este material possui menor massa específica e maior capacidade de absorção de água, se comparado ao agregado natural. Estas características são fatores intervenientes nas propriedades do concreto. Portanto, os concretos produzidos com ARC apresentam variações nos resultados em relação ao concreto ARC-0.

O índice de vazios aumenta gradativamente conforme o teor de substituição do AGN pelo ARC, e tem como consequência a geração de concretos mais porosos. Os espaços não preenchidos no interior do concreto também são um fator fortemente relacionado à redução de sua massa específica, bem como ao aumento da capacidade de absorção de água. A porosidade inerente ao material reciclado, em conjunto com os vazios que já ocorrem naturalmente na mistura devido ao excesso de água ou ao ar aprisionado colabora na formação do sistema de poros do material. O diâmetro destes poros, bem como a intercomunicação entre eles definem a permeabilidade do concreto. Esse comportamento em relação à absorção também foi verificado em outros trabalhos (PENG *et al.*, 2013; RAO *et al.*, 2010 e DE BRITO *et al.*, 2011).

De acordo com a classificação proposta por Helene (1983), conforme a absorção de água, os concretos ARC-0, ARC2-10, ARC2-20 e ARC2-50 seriam enquadrados como concretos duráveis, com valor de absorção menor que 4,2%; enquanto ARC2-100 seria considerado como um concreto normal, com o valor de absorção maior que 4,2% e menor que 6,3%. Foi verificado que os concretos com maiores teores de substituição do AGN pelo ARC apresentaram maior porosidade, característica diretamente relacionada à sua permeabilidade. Como resultado, oferecem maior facilidade ao deslocamento de fluidos e outros agentes agressivos em seu interior. Desta forma, é válida a restrição da quantidade de agregado reciclado em certas condições de exposição, conforme recomendações normativas.

4.3.3.5 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é um dos mecanismos de transporte de fluídos através dos poros do concreto. Na Tabela 33 estão relacionados os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 33 – Resultados ensaio de absorção de água por capilaridade

| Concreto/Ensaio | Absorção por capilaridade (g/cm ²) | | | | | Ascensão capilar máxima (cm) | Resistência à tração por compressão diametral (MPa) |
|-----------------|--|---------|----------|----------|----------|------------------------------|---|
| | 3 horas | 6 horas | 24 horas | 48 horas | 72 horas | | |
| ARC-0 | 0,295 | 0,381 | 0,633 | 0,802 | 0,896 | 8,500 | 2,59 |
| ARC2-10 | 0,299 | 0,390 | 0,688 | 0,870 | 0,996 | 8,910 | 2,26 |
| ARC2-20 | 0,308 | 0,423 | 0,753 | 0,966 | 1,094 | 9,266 | 2,07 |
| ARC2-50 | 0,340 | 0,454 | 0,794 | 1,027 | 1,170 | 9,400 | 1,91 |
| ARC2-100 | 0,352 | 0,516 | 0,902 | 1,121 | 1,229 | 11,171 | 1,85 |

Nota-se que os valores da absorção de água por capilaridade aumentam proporcionalmente ao teor de substituição de agregado natural por ARC. Ao comparar os resultados dos demais concretos com ARC-0 notam-se diferenças consideráveis para um mesmo intervalo de tempo.

Durante três horas, o valor de absorção verificado aumentou 1,35% para ARC2-10 e 19,32% para ARC2-100. Em setenta e duas horas, o aumento foi de 11,16% e 37,16% para ARC2-10 e ARC2-100, respectivamente. Verificam-se valores intermediários de aumento percentual para ARC2-50 e ARC2-50 (4,41% e 15,25% em três horas; 22,09% e 30,58% em 72 horas). Já era esperado que esse aumento no valor de absorção ocorresse de forma gradual e que seu maior valor fosse para o maior teor de substituição do AGN pelo ARC.

O mesmo comportamento ocorre com os resultados de ascensão capilar, que aumentaram gradativamente com o teor de ARC na mistura. Em termos percentuais, para ARC2-10, ARC2-20, ARC2-50 e ARC2-100, os resultados para esse ensaio aumentam 4,82%; 9,05%; 10,58% e 31,41%, respectivamente.

A Tabela 34 mostra a análise de variância realizada com objetivo de avaliar a interação entre o teor de substituição do AGN pelo ARC e os valores de ascensão capilar. Foram considerados os resultados obtidos para todos os corpos de prova utilizados no ensaio, com nível de significância (alfa) igual a 0,05.

Tabela 34 – ANOVA para resultados de ascensão capilar

| Fonte da variação | SQ | GL | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|----------|----|----------|----------|---------|-----------|
| Entre grupos | 12,56583 | 4 | 3,141457 | 7,124346 | 0,00556 | 3,47805 |
| Dentro dos grupos | 4,409467 | 10 | 0,440947 | | | |
| Total | 16,97529 | 14 | | | | |

O valor de F (7,1243) é maior que F crítico (3,47805). P-valor (0,00556) é menor que α (0,05). Pode-se afirmar, portanto, que existe o efeito de pelo menos uma das substituições na ascensão capilar dos concretos.

Como já havia sido observado em relação ao aumento percentual dos valores, o resultado da análise apresentada na Tabela 34 confirma que a substituição do AGN pelo ARC no concreto influencia nos resultados de ascensão capilar. Na Figura 34 são mostradas as curvas de absorção por capilaridade para todos os concretos em função do tempo.

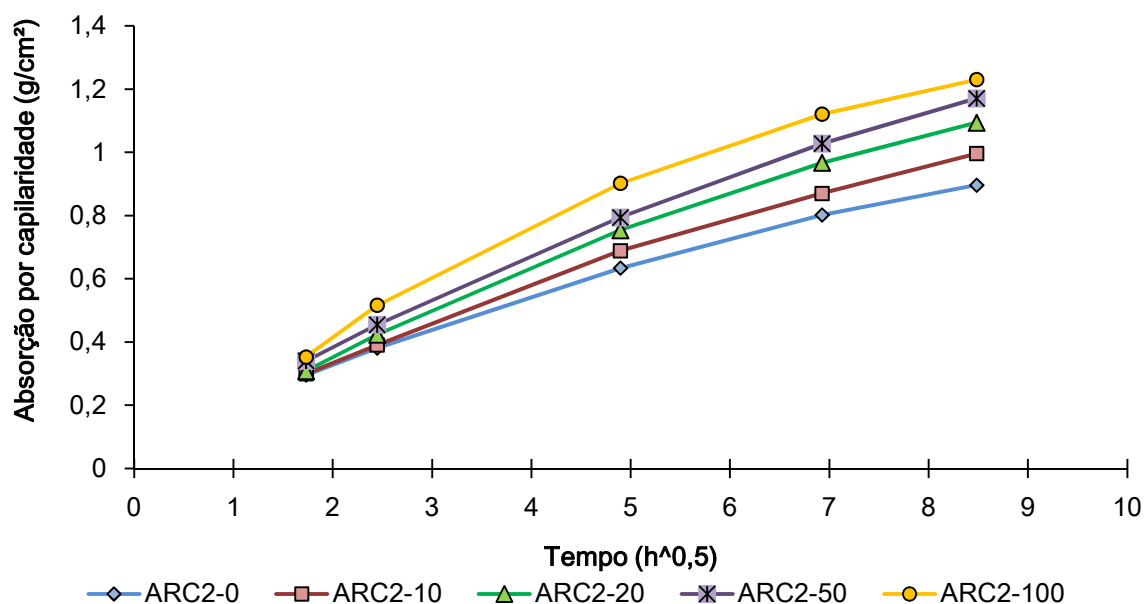


Figura 34 – Absorção por capilaridade ao longo do tempo

Nota-se que a absorção de água por capilaridade é mais intensa nas primeiras horas após o contato dos corpos de prova com a água, principalmente nos concretos com substituição do AGN pelo ARC. Após vinte e quatro horas, os corpos de prova continuam a

absorver água, porém com menor intensidade. O modo como ocorre a absorção de água pelo agregado reciclado é um dos fatores que explica esse comportamento. O ganho de massa é mais intenso nos primeiros minutos em contato com a água e atinge o valor mais alto aos dez minutos. Conforme ensaios realizados com o ARC, 81% do total de água a ser absorvida em vinte e quatro horas já se encontrava presente no ARC após dez minutos do início do ensaio.

Assim como ocorre no ensaio de absorção de água por imersão, os valores de absorção de água por capilaridade estão relacionados à porosidade dos concretos. Comportamentos semelhantes foram verificados nos estudos de Katz (2003), que atribuiu os resultados de absorção à rede de poros do concreto, seu diâmetro e as conexões entre os capilares.

Os procedimentos utilizados para estudo da absorção de água nos concretos são constituídos por diferentes metodologias. No caso do ensaio de absorção de água por imersão, seu resultado é dado em termos percentuais, enquanto no ensaio de absorção de água por capilaridade os resultados são expressos em quantidade de água absorvida por unidade de área. Apesar dessas diferenças, de maneira geral pode-se afirmar que houve influência da utilização do ARC nos resultados de absorção de água dos concretos, e em ambos os ensaios seu valor aumentava conforme o teor de substituição do agregado natural por ARC.

5 CONCLUSÃO

Propriedades dos agregados – Diferenças entre o AGN e o ARC

Os agregados graúdos reciclados de concreto apresentam propriedades diferentes dos agregados naturais. Entre elas, estão: menor massa específica, menor massa unitária, maior capacidade de absorção de água e maior índice de vazios. Também são notáveis as diferenças entre as superfícies do AGN e do ARC em escala microscópica. Verifica-se que o ARC apresenta uma textura mais rugosa que o AGN, com ocorrência de fissuras, característica que pode ser atribuída à presença da camada de argamassa aderida do concreto original.

Deste modo, os concretos produzidos com substituição dos agregados graúdos naturais pelos reciclados de concreto também apresentam características diferentes dos convencionais, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Primeira Fase de produção dos concretos: Procedimentos estudados de forma a minimizar o efeito da absorção de água do concreto pelo agregado reciclado no estado fresco

Com relação aos procedimentos de correção empregados de forma a reduzir o efeito da alta absorção de água do concreto pelo ARC, a utilização do aditivo superplastificante mostrou-se uma alternativa para tornar a trabalhabilidade do concreto adequada. Entre todos os procedimentos testados nos concretos contendo ARC, foi o que apresentou maior resultado de resistência à compressão. A imersão prévia do agregado reciclado na água de amassamento, embora não tenha sido suficiente para que o concreto atingisse o abatimento desejado, auxiliou para aumentar seu valor. O processo de peneiramento prévio do ARC contribuiu para a eliminação de parte da camada de argamassa aderida juntamente com os finos nele presentes, desta forma mostra-se uma alternativa para melhorar a qualidade do agregado reciclado.

Segunda Fase de produção dos concretos: Diferentes porcentagens de substituição do AGN pelo ARC

O teor de substituição do AGN pelo ARC de 10% não alterou o valor de abatimento de tronco de cone do concreto, que foi igual ao registrado para o concreto de referência. Possivelmente, no caso desse concreto, a imersão prévia do agregado foi suficiente para

compensar a absorção do ARC. Com 10% de substituição do AGN pelo ARC não foi necessário o emprego do aditivo superplastificante. Já no caso dos concretos com 20%, 50% e 100% de substituição do AGN pelo ARC, notou-se que o concreto apresentava uma consistência mais seca e com menor abatimento de tronco de cone, conforme aumentava o teor de substituição do AGN pelo ARC. Isso comprova que para quantidades maiores de ARC, os procedimentos de peneiramento prévio e imersão do agregado reciclado não foram suficientes para compensar a absorção do ARC. Foi necessária a utilização de aditivo superplastificante, cuja porcentagem por massa de cimento era maior conforme aumentava a substituição do agregado gráúdo natural pelo reciclado.

Com relação à resistência à compressão na segunda fase, todos os concretos alcançaram o valor especificado de 30 MPa, para todas as porcentagens de substituição do AGN pelo ARC. No entanto, verificou-se a ocorrência de redução nos resultados, que se intensificava nos concretos com maior porcentagem de ARC incorporado. Características do ARC como maior porosidade e a presença da camada de argamassa aderida contribuem para a geração de um concreto mais poroso, e por consequência, menos resistente. Provavelmente o concreto que deu origem ao ARC possuía uma relação a/c mais alta e uma resistência mais baixa do que o novo concreto produzido. Verificou-se um comportamento bastante similar com relação à resistência à tração.

O módulo de elasticidade estático foi outra propriedade em que se verificou a influência da utilização do ARC. Seu valor diminuiu de acordo com o aumento da porcentagem de substituição do AGN pelo ARC. O módulo de elasticidade de um concreto está associado à porosidade e à dureza do agregado gráúdo. Portanto, como o ARC se trata de um material mais poroso que o agregado natural, sua capacidade de restringir as deformações da matriz é mais limitada, por isso existe a redução no valor verificado para essa propriedade.

A capacidade superior de absorção de água inerente ao ARC influenciou também nos resultados de absorção dos concretos, que mostraram valores superiores aos do concreto de referência, tanto no procedimento por imersão quanto por capilaridade. Verificou-se que os concretos produzidos com ARC possuíam maior valor de índice de vazios.

Diante disso, verifica-se que a resistência à compressão não pode ser considerada isoladamente no estudo da incorporação de um novo material ao concreto. É necessário avaliar também seu comportamento em relação a outros aspectos. No estado fresco, é importante que possua a trabalhabilidade especificada. Como se trata de um estudo referente a um novo material, também se deve considerar o efeito observado em outras propriedades do estado endurecido. Se fosse analisada somente a resistência, embora tenha ocorrido uma

queda nos valores, todos os concretos registraram o valor especificado de 30 MPa. No entanto, verificou-se que nas demais propriedades a substituição do AGN pelo ARC prejudicou a qualidade do concreto. No estado fresco, o efeito da substituição do agregado natural pelo ARC foi a redução na fluidez do material, o que dificulta sua manipulação e adensamento. Já no estado endurecido, notou-se redução nos resultados de resistência à tração por compressão diametral e também no módulo de elasticidade. O aumento na capacidade de absorção de água dos concretos e no índice de vazios, quando empregadas maiores quantidades de ARC, indica que se deve avaliar cuidadosamente a classe de exposição do ambiente em que este concreto será utilizado.

6 REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. Versão corrigida 2014.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Versão Corrigida 2:2009. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9833:** Concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Versão corrigida: 2009. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento e aceitação – Procedimento. Versão Corrigida:2015.** Rio de Janeiro, 2015.

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

American Concrete Institute. **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-14).** Detroit, 2014.

American Concrete Institute. **State-of-the-Art Report on High-strength Concrete.** ACI Committee 363R-92 (Reapproved 1997). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1997.

AJDUKIEWICZ, Andrzej; KLISZCZEWICZ, Alina. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement and Concrete Composites.** Vol. 24, pg. 269-279, 2002.

ADDIS, Bill. **Reuso de Materiais e Elementos de Construção.** Oficina de textos. 368p. 2010.

AGOPYAN, Vahan.; JOHN, Vanderley Moacyr. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil - Série Sustentabilidade.** Volume 5. São Paulo: Blucher, 2011.

AGRELA, F.; ALAEJOS, P. Chapter 12 - Properties of concrete with recycled aggregates. p. 304-327. **Handbook of recycled concrete and demolition waste.** F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding and J. de Brito. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 47. Woodhead Publishing Limited, 2013.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Edurado; JOHN, Vanderley Moacyr. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** São Paulo, PCC – Departamento de Engenharia da construção civil da Escola Politécnica, 2007.

ANGULO, Sergio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr. **Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos.** Em: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Porto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitar, v. 4). p. 9-71.

ANJOS, A. dos. **Análise de Variância.** Notas de Aula, Capítulo 7, Disciplina: ce003, Curitiba, 2009. Disponível em: <http://www.est.ufpr.br/ce003/material/apostilace003.pdf> Acesso em: 05 nov.2015.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado / José Milton de Araújo.** - Rio Grande: Dunas, 2014. v.1, 4.ed.

ARAUJO, Suélio da Silva; GUIMARAES, Gilson; GEYER, André. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.** Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]. 2012, vol.5, n.5, pp. 555-575. ISSN 1983-4195.

BARBUDO, Auxi. *et al.* Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, 59, pp.93–98, 2013.

BEHERA, Monalisa *et al.* Recycled aggregate from CeD waste e its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, 68, pp.501–516, 2014.

BiM-Online Homepage. **Projetos de demonstração para pesquisa, produção e uso de concreto com agregados reciclados**. Projeto – Notas sobre o funcionamento. Disponível em <<http://www.b-i-m.de/projekte/projframe.htm>>. Acesso em: 15 de agosto de 2014.

BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos: orientação para o seu licenciamento e aplicação da Resolução Conama 307/2002**. 2005b.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION – BSI. **BS 8500-1**: Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206. Part 1. Method of specifying and guidance for the specifier. London, 2015.

_____. **BS 8500-2**: Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206. Part 2. Specification for constituent materials and concrete. London, 2015.

BUTTLE, Alexandre Marques. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BUTTLE, Alexandre Marques. **Uso de Agregados Reciclados de Concreto em Blocos de Alvenaria Estrutural**. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

ÇAKIR, Ö. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. **Construction and Building Materials**, 68, pp.17–25, 2014.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra *et al.* Shrinkage modeling for recycled aggregate concretes. In.: **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. Volume 3, p. 1 – 23. ISSN 1983-4195. Number 1, 2010

CALLISTER, Willian D., 1940. **Ciência e Engenharia dos materiais: uma introdução** / Willian D. Callister, Jr., David G Rethwish; tradução Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Moraes de Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

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.

CASTRO, L. A. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese (Doutorado). 302 f. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. *Cerâmica* vol.55 no. 333 São Paulo Jan./Mar. 2009

COLLINS, J. R. **Upgrading the use of recycled material UK Demonstration Project**. *Waste Materials in Construction: Putting Theory into Practice*. Elsevier Science, 1997.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 307/2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Data da legislação: 05/07/2002. Publicação DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96. Alterada pelas Resoluções nsº 348/2004, 431/2011, 448/2012 e 469/2015. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 08 maio. 2014.

CORINALDESI, Valeria. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, 24(9), pp.1616–1620, 2010.

CORINALDESI, Valeria e MORICONI, Giacomo. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 23(8), pp.2869–2876, 2009.

CUPERTINO, Marco Aurélio Lima; PEREIRA, Alexandre de Castro; INÁCIO, José Joilson; ANDRADE, Moacir Alexandre Souza Andrade. **Avaliação de Fatores de Ensaio que Interferem nos Resultados de Módulo de Elasticidade do Concreto**. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2007, Bento Gonçalves - RS. Anais 49º Congresso Brasileiro do Concreto. 2007. CD-ROM

DE BRITO, Jorge, BARRA, Marilda e FERREIRA, Luis. “Influence of the Pre-Saturation of Recycled Coarse Concrete Aggregates on Concrete Properties.” **Magazine of Concrete Research** 63 (8): p. 617–27, 2011.

DE BRITO, Jorge. SAIKIA, Nabajyoti. **Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste**. *Green Energy and Technology*. Springer, 2013.

DE JUAN, Marta Sánchez e GUTIÉRREZ, Pilar Alaejos. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, 23(2), 872–877. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012. 2009.

DILBAS, H., ŞİMŞEK, M. e ÇAKIR, Ö., 2014. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. **Construction and Building Materials**, 61(March 2006), pp.50–59, 2014.

DOMINGO-CABO, A. *et al.*, 2009. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 23(7), pp.2545–2553, 2009.

DUAN, Zhen Hua e POON, Chi Sun. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. **Materials e Design**, 58, 19–29. doi:10.1016/j.matdes.2014.01.044, 2014.

EUROSTAT. Statistics Explained. **Waste shipment statistics**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Waste_statistics>. Acesso em 20 de julho de 2015.

EUROPEAN COMMISSION (DG ENV). **Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste – SR1**. Final report task-2, management of CDW. A project under the Framework contract ENV.G.4/FRA/2008/0112. Paris – França, Fevereiro de 2011. Disponível em: http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf. Acesso em 21 de julho de 2015.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, 37 (2007) p. 735–742

FAIZ, Shaikh., e AHMED, Uddin. **Existence of Dividing Strength in Concrete Containing Recycled Coarse Aggregate**, (April), 784–788. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000864. 2014.

FENNIS, Sebastiana Antonia Adriana Maria. **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. Tesis doctoral. Delft: Delft University of Technology (2011).
fib COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. fib Model Code for Concrete Structures 2010. CEB-FIP model code. 2013

FOLINO, Paula. e XARGAY, Hernan. Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**, 56, pp.21–31, 2014.

GAYARRE, Fernando López; LÓPEZ-COLINA, Carlos Pérez; SERRANO LÓPEZ, Miguel A.; DOMINGO CABO, Alberto. The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 53, pp. 260–266, Feb. 2014.

GONÇALVES, Rodrigo Dantas. **Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto – Um novo Material para Dosagens Estruturais**. São Carlos, 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

GONÇALVES, Paulo; DE BRITO, Jorge. Utilização de agregados reciclados em betão. Análise comentada da regulamentação existente. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. **Revista Engenharia Civil Universidade do Minho**. Nº 32p. 73-86. Guimarães, Portugal. Setembro de 2008.

GRÜBL, P.; RÜHL, M. German committee for reinforced concrete (DafStb) – code: concrete with recycled aggregate. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 409-418.

GUIMARÃES, A. T. da C. **Propriedades do Concreto Fresco**. In: Concreto. Ensino, Pesquisa, e Realizações. São Paulo: Geraldo Cechella Isaia, 2005, p. 473-495.

HANSEN, Torben. C. **Recycled aggregates and recycled aggregate concrete: third state-of-the-art report 1945-1989**. In: Recycling of Demolished Concrete and Masonry, RILEM Technical Committee Report N. 6, Editor: T. C. HANSEN, E e FN SPON, London, p. 1-163, 1992.

HELENE, P. R.L. **La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón**. Hormigón, AATH, n. 10 p. 25-35, ago. 1983.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo. PINI; Brasília, DF : SENAI, 1992.

HIETE, M. Chapter 4. Waste management plants and technology for recycling construction and demolition (CeD) waste: state- of-the- art and future challenges. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Edited by F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding and J. de Brito. Woodhead Publishing Limited, 2013.

HUDA, S.B., ALAM, M.S. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials** 65 p.574–582, 2014.

ISMAIL, Sallehan. e RAMLI, Mahyuddin. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, 68, pp.726–739, 2014.

KANG, K. I., CHO, H. H., YI, C. K., e CHOI, H. B. Experimental study on the shear strength of recycled aggregate concrete beams. **Magazine of Concrete Research**, 62(2), 103–114. doi:10.1680/mac.2008.62.2.103, 2010.

KATZ, Amnon. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 33, no. 5, pp. 703–711, May 2003.

KOSTER, Gerhard e RÜHL, Marcus. Comparative long-term measurements on buildings made of normal concrete and concrete made of reprocessed aggregate. Reports in Applied Measurement – RAM. Disponível em: <http://www.disensors.com/downloads/products/Comparative%20longterm%20measurements%20on%20concrete%20buildings_1016.pdf>. Acesso em 20 de julho de 2015.

KOU, Shi-Cong, POON, Chi-Sun e ETXEABERRIA, Miren. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. **Cement and Concrete Composites**, 33(2), 286–291. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.10.003, 2011.

KHOSHKENARI, Adel Gorjinia *et al.* The role of 0–2mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. **Materials e Design**, 64, pp.345–354, 2014.

KWAN, Wai Hoe. *et al.* Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, 26(1), pp.565–573. 2011.

LATTERZA, Luciano de Mello. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. São Paulo: UFSCar, 1998, 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

LEITE, Monica Batista. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. 2001. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LEVY, Salomon Mony; HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry**. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil.

LEVY, Salomon Mony; HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção**. São Paulo : EPUSP, 2002. 12 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/318)

LIMA, Adriana Sampaio e CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE)**. Eng Sanit Ambient. v.18 n.2 – p.169-176. Abril/Junho, 2013.

LI, L.G. e KWAN, A. K.H. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. **Powder Technology**, 253, pp.514–521, 2013.

Li, Wengui; JIANZHUANG, Xiao; ZHIHUI, Sun; SHIHO, Kawashima; SURENDRA, Shah P. 2012. “Interfacial Transition Zones in Recycled Aggregate Concrete with Different Mixing Approaches.” **Construction and Building Materials** 35. Elsevier Ltd: 1045–55.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, 53(1-2), pp.36–44, 2008.

LÔRDELO, Patrícia Miranda; FERRAZ, Tatiana Gesteira de Almeida. **Gestão de Resíduos na Construção Civil: redução, reutilização e reciclagem**. Salvador: SENAI-BA, 2007. 86 p. ISBN 9788560771004

MACHADO Jr, Eloy. Ferraz.; LATTERZA, Luciano de Mello; MENDES, C. L. **Influência do agregado reciclado de rejeitos de construção e demolição nas propriedades do concreto fresco e endurecido**. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta del Este, Uruguai.

MARI, A. **Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete**. , 9831(10), pp.683–690. 2006

MARIE, Iqbal e QUIASRAWI, Hisham. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, 37, 243–248. Elsevier Ltd, 2012.

MARINKOVIC, S. *et al.* Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. In.: **Waste Management** 30 (2010) 2255–2264. Elsevier Ltd, 2010.

MATIAS, D. *et al.* Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Buildings Materials** 44, p. 101 – 109, 2013.

MEFTEH, H. *et al.* Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of Cleaner Production**, 54, pp.282–288, 2013.

MEHTA, P. Kumar. Reducing the Environmental Impact of Concrete. p.61–66. In.: **Concrete International**. October, 2001.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo. J. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3º ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILONE, Giuseppe. **Estatística geral e aplicada**. São Paulo: Centage Learning, 2009.

MIRANDA, Cristiane Richard de. **Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química**. Tese (doutorado) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

MOSTOFINEJAD, Davood; REISI, Mohammad. A new DEM-based method to predict packing density of coarse aggregates considering their grading and shapes. **Construction and Building Materials** 35 414–420, 2012

MOREIRA, Lucia Hiromi Higa. **Avaliação da Influência da Origem e do Tratamento dos Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto Estrutural**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazenda Arte, 2000. 195 p.

OLIVEIRA, Cristiane Oliveira. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, M. J.; ASSIS, C. S.; DE MATTOS, J. T. Recycled aggregate standardization in Brazil. In: **International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures**, 2004, Barcelona. Proceedings... França: Elsevier publications, 2004.

OTSUKI, Nobuaki., MIYAZATO, Shin-ichi. e YODSUDJAI, Wanchai. **Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone , Strength , Chloride Penetration and Carbonation of Concrete.** (October), pp.443–451. 2003.

PACHECO, Jéssika; BILESKY, Pedro; MORAIS, Tereza Rache; GRANDO, Fernanda; HELENE, Paulo. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto.** Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2014. Ibracon. Natal/RN, 2014.

PADOVAN, Rafaela Gava. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Leopoldo, 2013.

PEC, Ivana Banjad e MILOVANOVIC, Bojan. Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings. In.: **Magazine of Concrete Research.** ICE – Institution of Civil Engineers, 2014.

PENG, Gai-Fei. *et al.* Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete at Low and High Water/Binder Ratios. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2013, pp.1–6. 2013.

POON, Chi-Sun *et al.* Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials.** 16 p. 281–289. 2002

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K. BARAI, S. V. “Influence of Field Recycled Coarse Aggregate on Properties of Concrete.” **Materials and Structures** 44 (1): 205–20.2010.

RAJ, Narasimha, PATIL, Suresh G, S. e BHATTACHARJEE, B. Concrete Mix Design By Packing Density Method. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, 11(2), pp.34–46. 2014.

RAO, Chakradhara *et al.* Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. **Construction and Building Materials**, 25(1), pp.69–80, 2011.

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

SAGOE-CRENTSIL, K. K; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n.5, p. 707-712, 2001.

SILVA, R. V., DE BRITO, J., e DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, 65, 201–217. 2014.

SPADOTTO, Ariane; DALLA VECCHIA, Luísa Felix; DE CARLI, Cintia. **Avaliação dos resíduos da construção civil em Xanxerê: possibilidades para um fim mais sustentável.** VIII CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2012.

TABSH, W. Sami; ABDELFAH, S. Akmal. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. In.: **Construction and Building Material**. Elsevier, 2008.

TOPÇU, Ilker Bekir. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. **Cement and Concrete Research** 27(12):1817–1823. 1997.

TOWNSEND, Timothy *et al.* The Benefits of Construction and Demolition Materials Recycling in the United States. Disponível em: http://www.cdrecycling.org/assets/docs/exec%20summary_cd%20recycling%20impact%20white%20paper.pdf. Acesso em 20 de julho de 2015.

VAZQUEZ, Enric. **Progress of Recycling in the Built Environment**. Volume 8. Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE. Springer, 2013.

VYNCKE, Johan. e VRIJIDERS, Jeroen. **Recycling of C e D Waste in Belgium : State-of-the-Art and Opportunities for Technology Transfer**, 2010.

VRIJIDERS, Jeroen e DESMYTER. Recycling in Belgium: An Overview of the Present Situation in Belgium from the Recycling Industry and Research About CDW. Capítulo 3. **Recycled Aggregate in Concrete**, 2013.

WAGIH, Ashraf M. *et al.* Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **HBRC Journal**, 9(3), pp.193–200, 2013.

WORKS BUREAU TECHNICALCIRCULAR (2002). **Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates**. Disponível em: <http://www.devb.gov.hk/filemanager/technical_circulars/en/upload/138/1/wb1202.pdf>. Acesso em 15 set. 2014.

WONG, H.H.C., KWAN, A. K.H. e FUNG, W.W.S.C. Water film thickness, flowability and rheology of cement–sand mortar. **Advances in Cement Research**, 22(1), pp.3–14, 2010.

WONG, H.H.C. e KWAN, A.K.H. Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method. **Materials and Structures**, 41(4), pp.689–701. 2008.

XIAO, Jianzhuang; WENGUI, Li; ZHIHUI SUN, David A.; SHAH, Surendra P. Properties of Interfacial Transition Zones in Recycled Aggregate Concrete Tested by Nanoindentation. **Cement and Concrete Composites** 37: 276–92. 2013.

YANG, J; CHUNG, H; ASHOUR, A. F. **Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties**. ACI Mater J 105(3):289–296, 2008.

ZEGA, Claudio Javier e DI MAIO, Angel Antonio. Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 23, no. 3, pp. 281–286, Mar. 2011.

ZHANG, Wentao e INGHAM, Jason M. Using Recycled Concrete Aggregates in New Zealand Ready-Mix Concrete Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 22(5), pp.443–450, 2010.