



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

CAMILA BORBA RODRIGUES

**BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS
MISTOS: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E
TÉRMICAS**

Recife, PE

2015



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

CAMILA BORBA RODRIGUES

**BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS
MISTOS: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E
TÉRMICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Co-orientador: Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva

Recife, PE

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

R696b Rodrigues, Camila Borba
Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados mistos: avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas / Camila Borba Rodrigues – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2015.

141 f.: il.

Orientador: Dra. Stela Fucale Sukar

Co-orientador: Dr. Ângelo Just da Costa e Silva

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

1. Construção Civil 2. Blocos de Concreto 3. Resíduos 4. Agregado Reciclado I. Engenharia Civil - Dissertação II. Sukar, Stela Fucale (orient.) III. Costa e Silva, Ângelo Just da (co-orient.) IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD 624

CAMILA BORBA RODRIGUES

**BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM AGREGADOS
RECICLADOS MISTOS: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES
FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora:



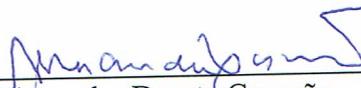
Prof. Dra. Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco - UPE

Co-orientador:

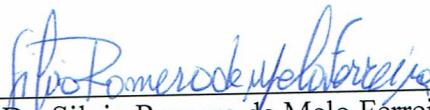


Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

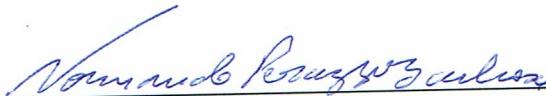
Examinadores:



Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco - UPE



Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE



Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Recife, PE
2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
a Deus e à minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por este trabalho. Em todos os momentos Ele se fez presente me orientando e me confortando nos momentos difíceis e me dando sabedoria para seguir em frente.

À minha família. Aos meus pais, Francisco e Betânia pelo amor e incentivo. Ao meu irmão, Diogo, pelo exemplo.

À Ivson Emanuel pelo companheirismo, carinho e paciência. Seu apoio foi muito importante, inclusive nas coletas dos materiais usados na pesquisa e na execução dos ensaios.

À minha orientadora Stela Fucale, pela atenção e disponibilidade, que sempre se mostrou disposta a ajudar me incentivando sempre a melhorar o meu trabalho.

Ao meu co-orientador Angelo Just pelo apoio na firmação da parceria com a ConcrEpoxi e na realização dos ensaios na Tecomat.

À Camilla Laís, aluna da graduação, pela amizade e colaboração nos ensaios.

Aos professores Normando Perazzo e Aluísio Braz da Universidade Federal da Paraíba -UFPB, pela oportunidade de realizar os ensaios térmicos nas instalações do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas - LABEME. Agradeço também a Pablo Lacerda, discente que me ajudou com a realização dos ensaios.

À Ciclo Ambiental por ceder os agregados reciclados para a pesquisa.

À ConcrEpoxi Artefatos, nas pessoas de Renata Gaudêncio e Leonardo Miranda, pelo interesse e disponibilidade em produzir os blocos de concreto.

À Tecomat Engenharia pela realização dos ensaios de resistência à compressão dos blocos.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PEC. Agradeço em especial aos professores pelo conhecimento transmitido, ao laboratorista Fábio Ferreira pela ajuda esclarecimento dos ensaios, aos estagiários e à secretária Dona Lúcia Rosani.

Aos amigos do Mestrado em Engenharia Civil: Andréa Nunes, Alexandre Leão, Daniela Albuquerque, Demócrito Neto, Diego Viegas, Diogo Paz, Felipe Salomão, Francisco Cardoso,

Frederico Barros, Humberto Barbosa, Ingrid Pereira, João Ribeiro e Rafael Felipe, pela troca de conhecimentos, apoio durante as disciplinas, pelos momentos de lazer e pelos lanches no Carlitos. Em especial, agradeço a Francisco e a Humberto, que juntamente com Ivson tiveram a dura missão de peneirar os agregados na Ciclo Ambiental.

Aos amigos e professores do curso de graduação em Engenharia Civil da Escola politécnica de Pernambuco. Amigos que compartilharam momentos entre aulas, momentos de descanso e discussão de ideias e professores que me inspiraram com seu prazer em lecionar.

Aos meus amigos da Igreja Batista da Capunga, pelas orações.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

“Não basta ensinar ao homem uma especialidade. Porque se tornará assim uma máquina utilizável, mas não uma personalidade. É necessário que adquira um assentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto. A não ser assim, ele se assemelhará, com seus conhecimentos profissionais, mais a um cão ensinado que a uma criatura harmoniosamente desenvolvida. Deve aprender a compreender as motivações dos homens, suas quimeras e suas angústias para determinar com exatidão seu lugar exato em relação a seus próximos e à comunidade”.

Albert Einstein

RODRIGUES, Camila Borba. **Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados mistos: avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas.** 2015. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2015.

RESUMO

Na indústria da construção civil é preciso atentar para aspectos relativos a todo o processo construtivo, uma vez que a escolha dos materiais e métodos construtivos interferem na relação do edifício com o usuário e o meio ambiente. Desta forma, assuntos como eficiência energética e reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) têm se tornado cada vez mais presentes na indústria da construção civil. A presente pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade técnica do uso de RCD mistos em substituição aos agregados naturais na produção de blocos de concreto, comparando-os com blocos de concreto convencionais em termos dimensionais, físicos, mecânicos e térmicos. Para tanto foram coletadas amostras de agregados naturais e reciclados, realizados ensaios de caracterização (granulometria, teor de materiais pulverulentos, absorção de água e massa específica); definidas as substituições dos agregados naturais por reciclados em 0, 30, 50 e 100%; produzidos os blocos numa empresa de artefatos de concreto localizada na Região Metropolitana do Recife (RMR) e realizados ensaios físicos e mecânicos nos blocos produzidos (análise dimensional, área líquida, massa específica, resistência à compressão e absorção de água). Ainda, foram construídas duas paredes com os blocos de concreto convencional e os blocos com 100% de substituição e comparadas suas características térmicas. Foi observado que os agregados reciclados têm maior teor de materiais pulverulentos e absorção de água que os agregados naturais. Com relação aos blocos produzidos com agregados reciclados, foi observado que estes apresentaram menor massa específica, sendo até 15 % inferior ao bloco convencional, maior absorção de água, sendo até 110% superior ao bloco convencional, e menor resistência à compressão, sendo até 24% inferior ao bloco produzido com agregados naturais. Com relação à caracterização térmica, foi observado que a parede construída com blocos com substituição de 100% dos agregados naturais por reciclados tem menor condutividade térmica que a parede de blocos convencionais. Desta forma, concluiu-se que é possível a utilização de agregados reciclados para a produção de blocos de concreto, sendo necessários estudos complementares para avaliar a possibilidade de seu uso estrutural e ainda que, o uso de blocos com agregados reciclados pode proporcionar a melhoria da condição térmica dos ambientes construídos.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição. Bloco de alvenaria com agregado reciclado. Conforto térmico. Eficiência energética.

RODRIGUES, Camila Borba. **Concrete blocks produced with mixed recycled aggregates: assessment of physical, mechanical and thermal properties.** 2015. 141 p. Master in Civil Engineering – Polytechnic School of Pernambuco, Pernambuco University. Recife, 2015.

ABSTRACT

In the construction industry, it is necessary to consider all aspects of the construction process, since the choice of materials and construction methods interfere with the building's relationship with the user and the environment. Thus, issues such as energy efficiency and recycling of construction and demolition waste (CDW) have become increasingly present in the construction industry. This research aims to analyze the technical feasibility of using RCD mixed in replace for natural aggregates in the production of concrete blocks, comparing them with conventional concrete blocks in terms dimensional, physical, mechanical and thermal. For this, were collected and characterized tests performed (fines fraction content, water absorption and density) in natural samples and recycled aggregates; certain of the replacements for natural aggregates recycled at 0, 30, 50 and 100%; produced the blocks in a concrete artifacts plant located in the Metropolitan Region of Recife (RMR) and conducted physical and mechanical tests produced in blocks (dimensional analysis, area, density, compressive strength and water absorption). In addition, two walls were built with conventional concrete blocks and blocks with 100% substitution and compared its thermal characteristics. It was observed that recycled aggregates have a higher content of fines fraction and water absorption than natural aggregate. With respect to blocks produced with recycled aggregates, was found that it had a lower density, around 15 % lower than the conventional block, greater water absorption, around 110% higher than conventional block, and lower compressive strength, around 24% below the block produced with natural aggregates. With respect to thermal characterization, it was observed that the wall built with blocks with 100% natural replacement of recycled aggregate has a lower thermal conductivity that conventional wall blocks. Thus, it was concluded that it is possible to use recycled aggregates for the production of concrete blocks but additional studies are needed to evaluate the possibility of its structural use and that, the use of recycled aggregate blocks can provide improved the thermal condition of the built.

Keywords: Construction and demolition waste. Masonry block with recycled aggregate. Thermal comfort. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Trocas de calor por condução. | 26 |
| Figura 2 - Comparação da resistência térmica média de diferentes tipos de blocos. | 29 |
| Figura 3 - Correlação de acréscimo de resistência térmica com o número de furos de bloco de alvenaria..... | 29 |
| Figura 4 - Exemplos de etiquetas de eficiência energética: (a) Edificações comerciais, de serviço e públicas; (b) Edificações habitacionais..... | 33 |
| Figura 5 - RCD coletado nas regiões (t/dia)..... | 35 |
| Figura 6 - Valor das incorporações, obras e/ou serviços da indústria da construção: Ano 2012 (%). | 35 |
| Figura 7 - Porcentagem da geração de RCD por fase da obra. | 37 |
| Figura 8 - Usinas de reciclagem de RCD classe A inauguradas ao longo dos anos..... | 41 |
| Figura 9 - Aspecto superficial dos blocos produzidos por Patto (2006): (a) Bloco reciclado; (b) Bloco convencional. | 62 |
| Figura 10 - Aspecto superficial dos blocos produzidos por Castro (2012): (a) 100% de agregados naturais; (b) 75% RCD e 25% resíduo de gesso; (c) 50% RCD e 50% resíduo de gesso; (d) 25% RCD e 75% resíduo de gesso. | 62 |
| Figura 11 - Uso de blocos com agregados reciclados: (a) Beneficiamento do resíduo em obra; (b) Edificação construída com blocos com agregados reciclados. | 68 |
| Figura 12 - Empresa de artefatos de concreto: (a) Pátio da fábrica; (b) Galpão de produção; (c) Pátio de estocagem de artefatos de concreto. | 69 |
| Figura 13 - Fluxograma do programa experimental..... | 70 |
| Figura 14 - Agregados naturais: (a) Baía de armazenamento de areia fina; (b) Baía de armazenamento de pó de pedra; (c) Baía de armazenamento de brita 0. | 71 |
| Figura 15 - Amostras de agregados naturais: (a) Areia fina; (b) Pó de pedra; (c) Brita 0..... | 72 |
| Figura 16 - Coleta dos agregados reciclados: (a) Areia reciclada; (b) Brita reciclada. | 74 |
| Figura 17 - Amostras de agregados reciclados: (a) Areia reciclada; (b) Brita reciclada..... | 74 |
| Figura 18 - Planta da empresa de artefatos de concreto. | 77 |
| Figura 19 - Seleção dos agregados: (a) Silos de armazenamento dos agregados naturais; (b) Deposição dos agregados na esteira; (c) Caçamba de recebimento dos agregados previamente pesados; (d) Transporte dos agregados até o misturador..... | 79 |

| | |
|--|-----|
| Figura 20 - Produção dos blocos convencionais: (a) Mistura dos agregados, cimento, água e aditivo; (b) Transporte do concreto até a vibroprensa; (c) Conferência da altura do primeiro bloco. | 80 |
| Figura 21 - Produção dos blocos com agregados reciclados: (a) Transporte do agregado reciclado até a esteira; (b) Adição do material reciclado na mistura; (c) Blocos com agregados reciclados após a moldagem. | 81 |
| Figura 22 - Cura dos blocos de concreto: (a) Equipamento para transporte dos blocos até a câmara de cura; (b) Câmara de cura da empresa de artefatos de concreto. | 82 |
| Figura 23 - Determinação de área líquida: pesagem do bloco submerso. | 83 |
| Figura 24 - Ensaio de absorção de água: (a) Blocos em estufa; (b) Blocos submersos em água. | 84 |
| Figura 25 - Retificação dos blocos: (a) Retífica via úmida para blocos de concreto; (b) Aparência do bloco após retificação. | 85 |
| Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão simples: (a) Prensa utilizada; (b) Resultados obtidos em software. | 86 |
| Figura 27 - Paredes construídas com blocos produzidos na pesquisa, pintadas com cal para o ensaio de análise térmica. | 87 |
| Figura 28 - Câmara térmica: (a) Vista externa; (b) Aparelho de aquecimento; (c) Aparelho de resfriamento. | 88 |
| Figura 29 - Ensaio de caracterização térmica: (a) Posicionamento no centro da câmara térmica; (b) Vedação com isopor e massa acrílica. | 89 |
| Figura 30 - Posicionamento dos termopares: (a) Desenho esquemático; (b) Detalhe do posicionamento dos termopares na parede do lado oposto; (c) Detalhe do posicionamento dos termopares no ambiente. | 89 |
| Figura 31 - Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados para composição dos blocos. | 92 |
| Figura 32 - Curva granulométrica dos agregados graúdos utilizados para composição dos blocos. | 93 |
| Figura 33 - Curva granulométrica dos agregados por família de blocos. | 94 |
| Figura 34 – Aparência dos blocos de concreto: (a) BR100; (b) BR50; (c) BR30; (d) BC. | 99 |
| Figura 35 - Coloração dos blocos de concreto: (a) BR100; (b) BR50; (c) BR30; (d) BC. | 99 |
| Figura 36 – Aspecto superficial dos blocos de concreto: (a) BR100; (b) BR50; (c) BR30; (d) BC. | 100 |
| Figura 37 - Relação absorção de água média x massa específica seca do bloco de concreto. | 105 |

| | |
|--|-----|
| Figura 38 - Ruptura do bloco 9 da Família BC: (a) Aparência lateral; (b) Vista frontal. | 109 |
| Figura 39 - Ruptura de blocos da Família BR30: (a) Tendência vertical e deslocamento observados no bloco 8; (b) Ruptura vertical observada no bloco 11..... | 109 |
| Figura 40 - Ruptura de blocos da Família BR50: (a) Ruptura com tendência vertical e escamação das paredes do bloco 11; (b) Ruptura do bloco 12 apresentando grandes fraturas. | 110 |
| Figura 41 - Ruptura de blocos da Família BR100: (a) Ruptura com tendência horizontal observada no bloco 5; (b) Deslocamento das paredes do bloco após ruptura observado no bloco 9..... | 110 |
| Figura 42 - Relação resistência à compressão média x massa específica seca do bloco de concreto. | 111 |
| Figura 43 - Variação das temperaturas entre os lados neutro e aquecido..... | 114 |
| Figura 44 - Variação de temperatura entre as faces das paredes. | 114 |
| Figura 45 - Comparação entre os ganhos de calor nas primeiras quatro horas de ensaio nas paredes BC e BR100: (a) Parede exposta à fonte de calor; (b) Parede oposta à fonte de calor. | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Absortividade (α) e emissividade (ϵ) de alguns materiais e cores. | 25 |
| Tabela 2 - Condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de elementos de cerâmica e concreto. | 27 |
| Tabela 3 - Consumo total por classe (GWh). | 31 |
| Tabela 4 - Composição do RCD no Brasil. | 38 |
| Tabela 5 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural. | 43 |
| Tabela 6 - Dimensões nominais de blocos de concreto. | 49 |
| Tabela 7 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração. | 49 |
| Tabela 8 - Dimensões de blocos de concreto segundo classificação. | 50 |
| Tabela 9 - Traços sugeridos em função da resistência média desejada aos 28 dias. | 51 |
| Tabela 10 - Características dos blocos em função do tipo de cura utilizados por Celestino (2013). | 55 |
| Tabela 11 - Origem dos agregados usados na produção de blocos de concreto produzidos com resíduos. | 57 |
| Tabela 12 - Teor de materiais pulverulentos de agregados usados para a produção de blocos. | 58 |
| Tabela 13 - Massa específica dos agregados usados para a produção de blocos. | 59 |
| Tabela 14 - Absorção média de água dos agregados usados para a produção de blocos. | 60 |
| Tabela 15 - Massa específica dos blocos produzidos por Sousa (2001). | 63 |
| Tabela 16 - Absorção de água dos blocos com agregados reciclados. | 64 |
| Tabela 17 - Resistência à compressão simples em corpos de prova de concreto produzidos com agregados reciclados. | 65 |
| Tabela 18 - Resistência à compressão simples dos blocos produzidos com agregados reciclados. | 66 |
| Tabela 19 - Valores de resistência à compressão do aglomerante de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). | 75 |
| Tabela 20 - Propriedades químicas do aglomerante. | 75 |
| Tabela 21 - Propriedades físicas e mecânicas do aglomerante. | 76 |
| Tabela 22 - Ensaio de caracterização dos agregados. | 76 |
| Tabela 23 - Nomenclatura e traços dos blocos produzidos. | 78 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 24 - Valores de ψ em função da quantidade de blocos..... | 87 |
| Tabela 25 - Teores de materiais pulverulentos dos agregados miúdos usados na produção dos blocos de concreto. | 95 |
| Tabela 26 - Teores de materiais pulverulentos dos agregados graúdos usados na produção dos blocos de concreto. | 95 |
| Tabela 27 - Valores de massa específica aparente do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica dos agregados miúdos usados na produção dos blocos de concreto..... | 96 |
| Tabela 28 - Valores de massa específica aparente do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica dos agregados graúdos usados na produção dos blocos de concreto..... | 97 |
| Tabela 29 - Valores de absorção de água dos agregados miúdos usados para a produção dos blocos de concreto. | 97 |
| Tabela 30 - Valores de absorção de água dos agregados graúdos usados para a produção dos blocos de concreto. | 98 |
| Tabela 31 - Valores médios das dimensões dos blocos..... | 102 |
| Tabela 32 - Valores médios de massa específica seca e saturada dos blocos. | 103 |
| Tabela 33 - Resultados médios de absorção de água dos blocos..... | 104 |
| Tabela 34 - Resultados médios de resistência à compressão simples dos blocos. | 106 |
| Tabela 35 - Análise comparativa entre as resistências características dos blocos de concreto. | 107 |
| Tabela 36 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 1º ensaio com a parede de blocos BC. | 111 |
| Tabela 37 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 2º ensaio com a parede de blocos BC. | 111 |
| Tabela 38 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 1º ensaio com a parede de blocos BR100. | 112 |
| Tabela 39 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 2º ensaio com a parede de blocos BR100. | 113 |
| Tabela 40 - Composição granulométrica da areia fina. | 128 |
| Tabela 41 - Composição granulométrica do pó de pedra. | 128 |
| Tabela 42 - Composição granulométrica da areia reciclada..... | 128 |
| Tabela 43 - Composição granulométrica da brita 0..... | 129 |
| Tabela 44 - Composição granulométrica da brita reciclada. | 129 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 45 - Análise dimensional dos blocos da família BC..... | 131 |
| Tabela 46 - Análise dimensional dos blocos da família BR30..... | 131 |
| Tabela 47 - Análise dimensional dos blocos da família BR50..... | 132 |
| Tabela 48 - Análise dimensional dos blocos da família BR100..... | 132 |
| Tabela 49 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BC..... | 134 |
| Tabela 50 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BR30..... | 134 |
| Tabela 51 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BR50..... | 134 |
| Tabela 52 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BR100..... | 134 |
| Tabela 53 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BC..... | 136 |
| Tabela 54 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BR30..... | 136 |
| Tabela 55 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BR50..... | 136 |
| Tabela 56 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BR100..... | 136 |
| Tabela 57 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BC..... | 138 |
| Tabela 58 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BR30..... | 138 |
| Tabela 59 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BR50..... | 138 |
| Tabela 60 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BR100..... | 138 |
| Tabela 61 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BC..... | 140 |
| Tabela 62 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BR30..... | 140 |
| Tabela 63 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BR50..... | 141 |
| Tabela 64 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BR100..... | 141 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 1.1 | Considerações iniciais..... | 19 |
| 1.2 | Objetivos..... | 21 |
| 1.2.1 | Objetivo geral..... | 21 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos..... | 21 |
| 1.3 | Metodologia..... | 21 |
| 1.4 | Estrutura da dissertação..... | 22 |
| 2 | O CONFORTO TÉRMICO E O USO RACIONAL DE ENERGIA..... | 24 |
| 2.1 | Introdução..... | 24 |
| 2.2 | Propriedades térmicas dos materiais..... | 26 |
| 2.2.1 | Condutividade térmica (λ)..... | 26 |
| 2.2.2 | Resistência térmica (R)..... | 28 |
| 2.2.3 | Transmitância térmica (U)..... | 29 |
| 2.2.4 | Capacidade térmica de componentes (C_T)..... | 30 |
| 2.2.5 | Atraso térmico (ϕ)..... | 30 |
| 2.3 | Caracterização do uso de energia elétrica em edificações..... | 30 |
| 2.4 | Propostas para o uso racional de energia em edificações: etiquetagem de edifícios | 32 |
| 3 | RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO..... | 34 |
| 3.1 | Introdução..... | 34 |
| 3.2 | Gestão de RCD..... | 38 |
| 3.2.1 | Reciclagem de RCD..... | 40 |
| 3.3 | Concretos produzidos com agregados reciclados..... | 42 |
| 3.3.1 | Influência dos agregados no desempenho do concreto..... | 43 |
| 3.3.2 | Propriedades de concretos produzidos com resíduos reciclados mistos..... | 44 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.3.2.1 | <i>Trabalhabilidade</i> | 45 |
| 3.3.2.2 | <i>Resistência à compressão simples</i> | 45 |
| 3.3.2.3 | <i>Módulo de elasticidade</i> | 46 |
| 3.3.2.4 | <i>Durabilidade</i> | 46 |
| 3.4 | Blocos de concreto | 47 |
| 3.4.1 | Legislação vigente acerca da produção de blocos de concreto | 48 |
| 3.4.2 | Produção de blocos de concreto | 50 |
| 3.4.2.1 | <i>Métodos de dosagem</i> | 50 |
| 3.4.2.1.1 | Método da <i>Besser Company</i> (MEDEIROS, 1993 apud BUTTLER 2007) | 51 |
| 3.4.2.1.2 | Método ABCP (FERREIRA, 1990 apud BUTTLER 2007)..... | 51 |
| 3.4.2.1.3 | Método IPT/EPUSP (TANGO, 1994 apud BUTTLER, 2007)..... | 52 |
| 3.4.2.1.4 | Método proposto pela <i>Columbia</i> (FRASSON JÚNIOR, 2000)..... | 52 |
| 3.4.2.1.5 | Método proposto por Frasson Júnior (2000)..... | 52 |
| 3.4.2.1.6 | Método proposto por Fernandes (2013)..... | 53 |
| 3.4.2.2 | <i>Cura</i> | 54 |
| 3.4.3 | Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados | 56 |
| 3.4.3.1 | <i>Propriedades de agregados reciclados utilizados para a produção de blocos</i> | 56 |
| 3.4.3.1.1 | Materiais pulverulentos..... | 57 |
| 3.4.3.1.2 | Massa específica | 58 |
| 3.4.3.1.3 | Absorção média de água | 60 |
| 3.4.3.2 | <i>Propriedades de blocos produzidos com agregados reciclados</i> | 60 |
| 3.4.3.2.1 | Aspecto superficial e análise dimensional | 61 |
| 3.4.3.2.2 | Massa específica | 63 |
| 3.4.3.2.3 | Absorção de água..... | 63 |
| 3.4.3.2.4 | Resistencia à compressão simples | 64 |
| 3.4.4 | Exemplos de uso de blocos com agregados reciclados no Brasil | 67 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 70 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 4.1 | Introdução | 70 |
| 4.2 | Coleta de materiais | 71 |
| 4.2.1 | Agregados | 71 |
| 4.2.1.1 | <i>Agregado natural.....</i> | 71 |
| 4.2.1.2 | <i>Agregado reciclado.....</i> | 72 |
| 4.2.2 | Aglomerante | 75 |
| 4.2.3 | Aditivo..... | 76 |
| 4.3 | Ensaio de caracterização dos agregados | 76 |
| 4.4 | Produção dos blocos de concreto | 77 |
| 4.4.1 | Famílias de blocos de concreto estudadas..... | 77 |
| 4.4.2 | Método de dosagem..... | 78 |
| 4.4.3 | Moldagem | 79 |
| 4.4.4 | Cura..... | 82 |
| 4.4.5 | Ensaio para caracterização física, mecânica e térmica dos blocos..... | 82 |
| 4.4.5.1 | <i>Ensaio físicos-mecânicos</i> | 82 |
| 4.4.5.1.1 | <i>Análise dimensional.....</i> | 82 |
| 4.4.5.1.2 | <i>Área líquida e massa específica</i> | 83 |
| 4.4.5.1.3 | <i>Absorção de água.....</i> | 84 |
| 4.4.5.1.4 | <i>Resistência à compressão simples</i> | 85 |
| 4.4.5.2 | <i>Caracterização térmica do bloco.....</i> | 87 |
| 5 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 91 |
| 5.1 | Caracterização dos agregados | 91 |
| 5.1.1 | Composição granulométrica | 91 |
| 5.1.1.1 | <i>Agregado miúdo.....</i> | 91 |
| 5.1.1.2 | <i>Agregado Graúdo</i> | 92 |
| 5.1.2 | Material Pulverulento..... | 94 |
| 5.1.2.1 | <i>Agregado miúdo.....</i> | 94 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 5.1.2.2 | <i>Agregado graúdo</i> | 95 |
| 5.1.3 | Massa específica e massa específica aparente | 96 |
| 5.1.3.1 | <i>Agregado miúdo</i> | 96 |
| 5.1.3.2 | <i>Agregado graúdo</i> | 96 |
| 5.1.4 | Absorção de água | 97 |
| 5.1.4.1 | <i>Agregado miúdo</i> | 97 |
| 5.1.4.2 | <i>Agregado graúdo</i> | 98 |
| 5.2 | Caracterização do bloco | 99 |
| 5.2.1 | Inspeção visual | 99 |
| 5.2.2 | Análise dimensional | 100 |
| 5.2.3 | Área líquida e massa específica | 102 |
| 5.2.4 | Absorção de água | 103 |
| 5.2.5 | Resistência à compressão | 106 |
| 5.2.6 | Caracterização térmica | 111 |
| 6 | CONCLUSÕES | 116 |
| 6.1 | Principais conclusões | 116 |
| 6.2 | Sugestões para futuras pesquisas | 118 |
| | REFERÊNCIAS | 119 |
| | APÊNDICE A - Caracterização granulométrica dos agregados | 127 |
| | APÊNDICE B – Análise dimensional dos blocos de concreto | 130 |
| | APÊNDICE C – Resultados individuais de área líquida dos blocos de concreto | 133 |
| | APÊNDICE D – Resultados individuais de massa específica dos blocos de concreto | 135 |
| | APÊNDICE E – Resultados individuais de absorção de água dos blocos de concreto .. | 137 |
| | APÊNDICE F – Resultados individuais de resistência à compressão dos blocos de concreto | 139 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Na indústria da construção civil é preciso atentar para aspectos relativos a todo o processo construtivo, começando pela concepção do projeto, passando pela etapa de obra e continuando pela vida útil do edifício. Questões quanto à definição do espaço e dos materiais empregados podem ter consequências significativas em termos econômicos, sociais e ambientais.

A correta modulação e o conhecimento dos materiais utilizados, por exemplo, podem reduzir o alto índice de perdas e desperdícios contemplado atualmente na indústria da construção. A geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) tem se mostrado um problema que requer reflexão e atitudes para sua redução e controle.

Os RCD são resíduos volumosos e, em geral, pesados, por outro lado, são potencialmente recicláveis e, em sua maioria, inertes, isto é, não reagem quimicamente causando contaminação. Porém, quando depositados em condições irregulares – beiras de rios, encostas, terrenos baldios – causam sérios prejuízos ambientais e sociais, além de acarretar o ônus da coleta ao poder público (SILVA e FERNANDES, 2012).

Apesar de não requererem tratamentos específicos, quando da deposição irregular do RCD, ele acaba por criar espaços favoráveis à deposição de outros tipos de resíduos, causando a proliferação de vetores, odores e prejuízos, especialmente à comunidade em seu entorno. Portanto, para a redução dos resíduos de construção, primeiramente, é fundamental a sua redução na fonte, evitar desperdícios e perdas. Quando não é possível, é uma opção a reutilização desse resíduo na própria obra, sem a necessidade de um processo de beneficiamento. Se o reuso for inviável, opta-se pela reciclagem do material, que é quando o material passa por um processo de beneficiamento antes de retornar ao ciclo produtivo. Por último, deve-se optar pela destinação em aterros, que não se apresenta uma decisão eficiente uma vez que, por serem resíduos volumosos e não necessitarem de tratamento específico, reduzem a vida útil do aterro e acabam por ocupar o espaço que seria destinado a outros tipos de resíduos.

Tam e Tam (2006) afirmam que a primeira medida a ser tomada a fim de reduzir o impacto ambiental causado pelo RCD é de fato a sua redução, porém, que a reciclagem de materiais de

construção como asfalto, blocos, concreto, ferro, vidro, madeira, entre outros, é não só viável como pode resultar no desenvolvimento de materiais competitivos.

Dessa forma, a reciclagem do RCD é uma alternativa viável e importante do ponto de vista ambiental. Além de evitar a deposição inadequada do material, evita a retirada de matéria prima da natureza para a produção de insumos.

Entretanto, é importante atentar para a origem do RCD. A qualidade do material reciclado depende principalmente dos cuidados tomados na obra, sendo os resíduos de construção mais fáceis de reciclar por estarem pouco contaminados. Atualmente, os produtos de reciclagem de RCD são, em sua maioria, provenientes de materiais cimentícios e estão destinados, principalmente, à produção de insumos para obras de pavimentação, sendo necessário o desenvolvimento de outras tecnologias para esse produto (ULSEN et al., 2010).

Os prejuízos ambientais causados pelas edificações não se resumem à etapa de obra. A elaboração do projeto arquitetônico pode interferir no consumo de energia de um determinado edifício, uma vez que algumas decisões projetuais como o posicionamento das aberturas, elementos arquitetônicos, tais como brises e beirais, além da escolha do material de construção, contribuem para o conforto térmico do ambiente sem precisar recorrer a alternativas artificiais.

Em função da crise energética, estudos têm sido feitos em prol da conservação e o uso racional de energia, atendendo a crescente demanda sem comprometer os recursos naturais. Neste aspecto, no setor de edificações, é imprescindível atentar para a elaboração do projeto, uma vez que o consumo de energia elétrica é maior ao longo da vida útil da edificação que na etapa de obra (MASCARÓ e MASCARÓ, 1992).

O consumo de energia em edifícios está ligado, principalmente, ao consumo de equipamentos, iluminação e condicionamento ambiental, sendo a incidência solar nas cobertas e paredes a principal causa do aumento da temperatura na parte interna da edificação. Dessa forma, a redução da propriedade de condutividade térmica das paredes de vedação de um edifício tende a proporcionar a melhora da condição ambiental em seu interior e, conseqüentemente, a redução do consumo energético.

Assim, é imprescindível o desenvolvimento de materiais que não só minimizem os impactos ambientais, evitando o uso de matéria prima natural e reduzindo a geração de resíduos, como que sejam adequados a uso da edificação.

O uso de agregados provenientes de RCD para produção de blocos de concreto é um tema discutido por diversos autores (SOUSA, 2001; CARNEIRO, 2005; PATTO, 2006; BUTTLER, 2007; PAULA, 2010; MATAR e DALATI, 2011; SOUTSOS, TANG e MILARD, 2011; CASTRO, 2012; LINTZ et al., 2012; SABAI et al. 2013; CELESTINO, 2013), porém, do ponto de vista da eficiência energética, não há estudos que avaliem suas propriedades térmicas. Uma vez que a cerâmica tem coeficientes de condutividade térmica menor que o concreto natural e que as propriedades do concreto estão relacionadas às características de seus agregados, é possível supor que o com uso de RCD misto, isto é, RCD com mais de 10% de cerâmica, solo, entre outros (ABNT, 2004e), na composição do bloco, pode-se reduzir a sua condutividade térmica, colaborando, não só para a destinação correta do resíduo de construção, como também para a melhoria térmica da edificação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica do uso de agregados oriundos de resíduos de construção e demolição mistos em substituição aos agregados naturais na produção de blocos de concreto, comparando-os com blocos de concreto convencionais em termos dimensionais, físicos, mecânicos e térmicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar as propriedades de agregados naturais e reciclados na produção de concreto seco;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do bloco de concreto em função do percentual de agregado natural substituído por RCD;
- Realizar uma análise comparativa entre as propriedades físicas e mecânicas de blocos produzidos com agregados reciclados e com agregados naturais;
- Comparar e analisar termicamente paredes construídas com blocos de agregados reciclados e blocos convencionais de concreto.

1.3 Metodologia

A metodologia adotada nesta pesquisa a fim de atingir os objetivos supracitados pode ser resumida nos seguintes itens:

- i. Revisão bibliográfica acerca dos temas envolvidos por meio de manuais, cartilhas, dissertações, teses, notícias e periódicos nacionais e internacionais;
- ii. Coleta de amostras de agregados reciclados em usina de beneficiamento de RCD localizada na Região Metropolitana do Recife (RMR);
- iii. Coleta de amostras de agregados naturais em uma empresa de artefatos de concreto localizada na RMR;
- iv. Caracterização dos agregados naturais e reciclados por meio de ensaios de laboratório a fim de conhecer as suas propriedades físicas, tais como, granulometria, teor de materiais pulverulentos, absorção de água e massa específica;
- v. Definição do percentual de substituição de agregados naturais por reciclados na produção dos blocos de concreto;
- vi. Produção dos blocos de concreto em uma empresa de artefatos de concreto localizada na RMR;
- vii. Realização de ensaios físicos e mecânicos nos blocos de concreto produzidos a fim de conhecer suas características dimensionais e de aspecto superficial, e determinar suas propriedades de área líquida, massa específica, absorção de água e resistência à compressão;
- viii. Realização de ensaio de caracterização térmica a fim de comparar as propriedades térmicas de parede construída com blocos convencionais e blocos com substituição dos agregados naturais por RCD;
- ix. Análise e interpretação dos resultados obtidos.

1.4 Estrutura da dissertação

O primeiro Capítulo dessa dissertação traz uma breve introdução acerca dos resíduos gerados pela atividade da construção e suas consequências no meio urbano, além de apresentar alternativas e os possíveis benefícios da destinação adequada desses resíduos. Apresenta ainda os objetivos, metodologia e estrutura do trabalho.

O segundo Capítulo objetiva situar o consumo de energia elétrica condicionando-o aos processos construtivos empregados. Aborda quais fatores devem ser observados na escolha dos materiais de construção a fim de que sejam adequados às condições climáticas locais e aos critérios de conservação de energia.

O terceiro Capítulo apresenta um panorama do acerca da geração e gestão de RCD, observando seu caráter histórico–legal. Neste mesmo capítulo são abordadas as formas de reciclagem do RCD, destacando sua aplicação para a produção de concreto. Aborda ainda o uso de blocos de concreto para alvenaria apresentando as vantagens do método construtivo da alvenaria racionalizada, além de um levantamento bibliográfico acerca da produção de blocos de concreto com agregados reciclados. Quando da abordagem dos blocos com RCD é apresentada uma relação das propriedades apresentadas nos blocos em função dos agregados reciclados e das interferências dos métodos de dosagem, moldagem e cura nas propriedades do elemento, observando os critérios para a produção de um bloco que seja tecnicamente viável.

No quarto Capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados para a produção dos blocos. São relatados a aquisição e os ensaios para caracterização dos agregados, o método de dosagem empregado, o processo de mistura dos materiais, o processo de cura e armazenagem, para enfim serem descritos os ensaios com os blocos de concreto.

O quinto Capítulo apresenta os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e térmicos bem como suas análises.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as principais conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

2 O CONFORTO TÉRMICO E O USO RACIONAL DE ENERGIA

2.1 Introdução

Segundo Frota e Schiffer (2001) “o homem tem melhores condições de vida e saúde quando seu organismo pode funcionar sem ser submetido à fadiga ou estresse, inclusive térmico”. Desta forma, a edificação precisa proporcionar condições próprias ao conforto térmico humano independente das condições climáticas externas.

O conforto térmico depende de vários parâmetros. Mallick (1996) afirma que este fator pode estar associado a condições ambientais, tais como, temperatura do ar, insolação, umidade, ventilação, além de depender de fatores particulares, tais como vestimenta e atividade que se está desempenhando.

As condições ambientais no interior da edificação dependem das atividades desempenhadas no local, dos equipamentos em funcionamento e de suas trocas térmicas com o exterior. Para haver troca térmica é necessário apenas que existam dois corpos em temperaturas diferentes. Nos edifícios, o sol incide sobre a sua superfície representando, sempre, ganho de calor por parte da edificação, que será em função da intensidade da radiação e das características térmicas dos paramentos do edifício (FROTA e SCHIFFER, 2001).

As trocas de calor entre o meio externo e o interior do edifício sempre ocorrem da zona mais quente para a mais fria, sendo as trocas térmicas que envolvem variação de calor denominadas trocas secas. As trocas secas podem se dar por:

- Convecção: troca de calor entre dois corpos sendo um deles sólido e outro, fluido, que pode ser o ar. É o que acontece quando a temperatura do ar do ambiente interfere na temperatura da superfície da edificação, por exemplo. Em superfícies verticais as trocas de calor por convecção são ativadas pela velocidade do ar, crescendo em função da velocidade desta.
- Radiação: troca de calor entre dois corpos a uma determinada distância em função das suas capacidades de transmitir e receber calor. Varia de acordo com a emissividade do material e absorvidade do material. A NBR 15220-2 (ABNT, 2005) apresenta as absorvidades (α) e emissividades (ϵ) de algumas superfícies. A partir da Tabela 1, é possível perceber que a capacidade de absorção do material está relacionada à sua cor. Quanto mais claro o material, maior a sua capacidade de refletir a luz solar, reduzindo

a capacidade de o material absorver calor. Esse tipo de troca de calor acontece nas edificações quando a luz solar incide sobre sua superfície, sendo o material de fechamento responsável por absorver, ou não, o calor e transmiti-lo para dentro do ambiente.

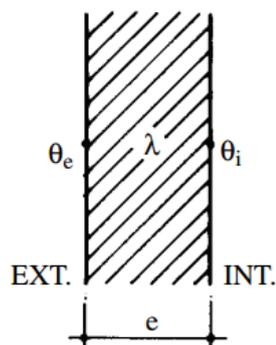
Tabela 1 - Absortividade (α) e emissividade (ϵ) de alguns materiais e cores.

| Tipo de superfície | α | ϵ |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Chapa de alumínio (nova e brilhante) | 0,05 | 0,05 |
| Chapa de alumínio (nova e brilhante) | 0,15 | 0,12 |
| Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante) | 0,25 | 0,25 |
| Caiação nova | 0,12/0,15 | 0,9 |
| Concreto aparente | 0,65/0,80 | 0,85/0,95 |
| Telha de barro | 0,75/0,80 | 0,85/0,95 |
| Tijolo aparente | 0,65/0,80 | 0,85/0,95 |
| Reboco claro | 0,30/0,50 | 0,85/0,95 |
| Revestimento asfáltico | 0,85/0,98 | 0,90/0,98 |
| Vidro comum de janela | Transparente | 0,90/0,95 |
| Pintura: Branca | 0,20 | 0,90 |
| Amarela | 0,30 | 0,90 |
| Verde clara | 0,40 | 0,90 |
| "Alumínio" | 0,40 | 0,50 |
| Verde escura | 0,70 | 0,90 |
| Vermelha | 0,74 | 0,90 |
| Preta | 0,97 | 0,90 |

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

- **Condução:** se dá quando um mesmo elemento apresenta temperaturas diferentes em suas superfícies. É o que ocorre quando há transmissão de calor da superfície da parede externa da edificação para a parede interna, por exemplo. Esse tipo de troca de calor depende do coeficiente de condutibilidade térmica do material (λ), que é o fluxo de calor que passa por uma determinada espessura da parede em unidade de tempo. O λ é um fator característico de cada material e depende da densidade, natureza química e umidade do material. A Figura 1 ilustra esse mecanismo.

Figura 1 - Trocas de calor por condução.



Onde: θ_e : temperatura da superfície externa;
 θ_i : temperatura da superfície interna;
 λ : coeficiente de condutibilidade térmica do material;
 e : espessura da parede.

Fonte: Frota e Schiffer (2001).

Um dia comum apresenta a menor temperatura do ar nas primeiras horas da manhã, após o nascer do sol. Essa temperatura tende a aumentar chegando ao seu máximo em torno das 14h, quando torna a reduzir. Essa diferença entre a menor e maior temperatura do dia é denominada amplitude térmica, que depende também do clima do local em estudo (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Em média o tempo de aquecimento do ar pelo sol durante um dia é de 08 (oito) horas, sendo a temperatura amenizada ao longo das 16 (dezesesseis) horas seguintes.

2.2 Propriedades térmicas dos materiais

As trocas de energia entre o meio externo e o edifício são as principais causas de aumento da temperatura interna do ambiente e o invólucro da edificação, paredes e cobertas, é responsável por evitar que parte dessa energia se converta em calor no interior do edifício.

A Eletrobrás (2008) constatou que cerca de 50% da carga térmica do edifício se devem ao invólucro. Nesse aspecto, a qualidade da solução das envolventes precisa atentar para características tais como: condutividade térmica, resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico.

2.2.1 Condutividade térmica (λ)

A condutividade térmica (λ) é a propriedade física de um material homogêneo e isótropo, que define a maior ou menor capacidade do material transmitir calor por unidade de tempo. Sua unidade é W/(m.K) (watt por metro kelvin), sendo diretamente proporcional à área da superfície

e inversamente proporcional a sua espessura, segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Essa propriedade depende da densidade do material estudado.

Edifícios com fechamentos opacos construídos com elementos que sejam porosos, como concreto celular, por exemplo, criam no interior de suas paredes espaços vazios que atrasam a passagem de calor de fora para dentro do ambiente, uma vez que o ar contido nesses vazios tem baixa condutividade térmica.

A norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005) indica as propriedades térmicas dos materiais de construção em função de sua densidade de massa aparente (ρ). Na Tabela 2 há dados acerca da condutividade térmica (λ) e o calor específico (c) de alguns materiais. Pode-se observar que, elementos cerâmicos conduzem menos calor que elementos de concreto, o que está relacionado à sua massa específica, mas também às propriedades do material em si. Pelos dados da Tabela 2, nota-se que, mesmo o material cerâmico com massa específica próxima ao do concreto cavernoso, isto é, concreto com baixa massa específica e alta permeabilidade, apresenta menor condutividade térmica.

Tabela 2 - Condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de elementos de cerâmica e concreto.

| Material | ρ (kg/m³) | λ (W/(m.K)) | c (kJ/(kg.K)) |
|--|---|---|---------------------------------------|
| Cerâmica | | | |
| Tijolos e telhas de barro | 1000-1300 | 0,70 | 0,92 |
| | 1300-1600 | 0,90 | 0,92 |
| | 1600-1800 | 1,00 | 0,92 |
| | 1800-2000 | 1,05 | 0,92 |
| Concreto (com agregados de pedra) | | | |
| Concreto normal | 2200-2400 | 1,75 | 1,00 |
| Concreto cavernoso | 1700-2100 | 1,40 | 1,00 |

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

A geometria do bloco também exerce influência em sua condutividade térmica. Al-Jabri et al. (2005) afirmam que, blocos de concreto com furos alternados têm condutividade térmica de 1,5 a 2,6 maiores que os blocos convencionais, com apenas dois furos alinhados e que, em blocos maciços, essa relação fica entre 2,1 e 3,9. Além disso, os autores ainda afirmam que o comportamento térmico do elemento está associado à sua densidade, isto é, quanto menos denso o bloco, menor sua condutividade térmica.

Contudo, a condutividade térmica de um material depende principalmente de sua composição e por esse motivo suas propriedades precisam ser conhecidas. No estudo feito por Al-Hadhrani e Ahmad (2009), onde foram analisados 09 (nove) tipos de blocos e avaliadas suas resistências

térmicas, ingredientes isolantes térmicos foram misturados na composição do bloco ou inseridos em seus vazios. “O propósito de misturar materiais de isolamento com o tijolo foi fazer tijolos mais leves e mais resistentes termicamente comparados aos tijolos normais” (AL-HADHRAMI e AHMAD, 2009).

2.2.2 Resistência térmica (R)

A resistência térmica (R) é a capacidade de o material resistir à passagem de calor de uma superfície a outra de um elemento ou componente. É dado em $m^2.K/W$ (metro quadrado kelvin por watt), sendo usado para se conhecer o quanto de um material será usado para isolar termicamente um ambiente. No caso de uma parede, irá depender de sua espessura e da condutividade térmica do material que a compõe.

No caso de um material homogêneo, R pode ser calculado a partir da Equação (1):

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

R: resistência térmica ($m^2.K/W$);

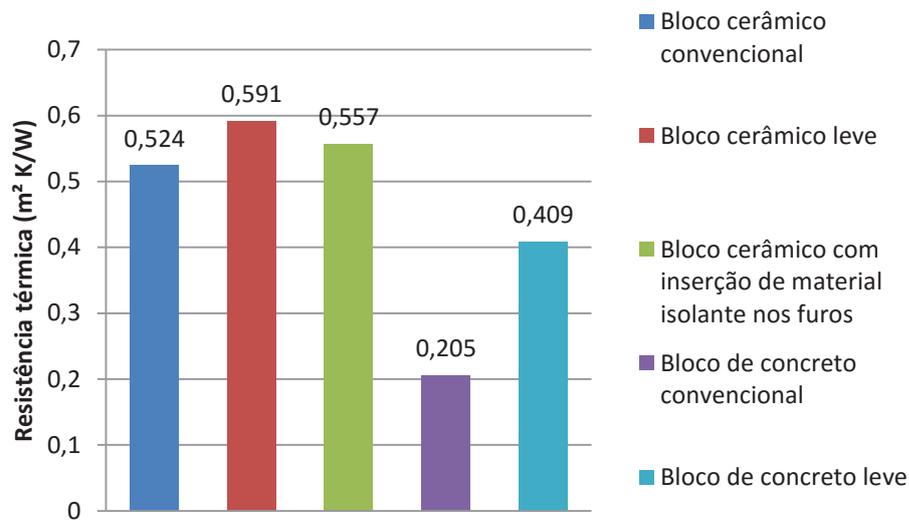
L: espessura da parede (m);

λ : condutividade térmica da parede ($W/m.K$).

Em se tratando de um elemento heterogêneo, como uma parede composta por blocos, assentados com argamassa e revestido com cerâmica, por exemplo, essa relação é feita em função da resistência térmica de cada um dos elementos componentes.

Al-Hadhrami e Ahmad (2009) afirmam que os blocos cerâmicos com ou sem adição de material isolante e o bloco de concreto leve têm resistência térmicas consideravelmente maiores que os blocos convencionais de concreto (Figura 2). A adição de materiais isolantes na composição dos blocos ou em seus furos resulta em um acréscimo significativo de sua resistência térmica.

Figura 2 - Comparação da resistência térmica média de diferentes tipos de blocos.



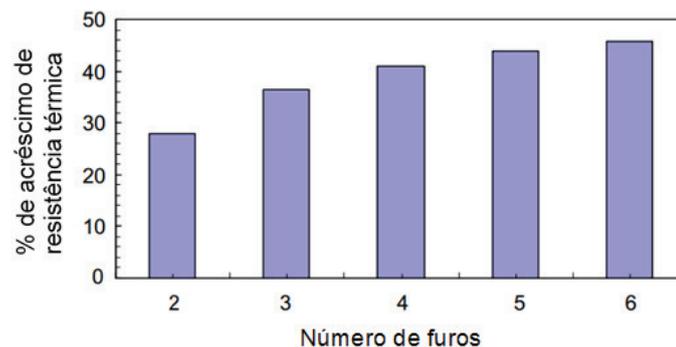
Fonte: Al-Hadhrami e Ahamad (2009).

2.2.3 Transmitância térmica (U)

A transmitância térmica (U) é a capacidade do material de transmitir calor de uma superfície para a outra, logo, é o inverso da resistência térmica. Sua unidade é $W/m^2.K$ (watt por metro quadrado Kelvin). Um dos principais fatores que definem U é a característica do material em ser opaco ou translúcido. Num material opaco, o fluxo de calor transmitido ao ambiente é bem menor que em um material translúcido, por exemplo.

Segundo Antar e Baig (2009), em blocos de alvenaria, o coeficiente de transmitância térmica depende da largura da cavidade, isto é, da distância entre as faces internas do bloco. Quanto maior a cavidade, menor a transmitância. Além disso, os autores também afirmam que há acréscimo da resistência térmica de acordo com o número de furos do bloco (Figura 3).

Figura 3 - Correlação de acréscimo de resistência térmica com o número de furos de bloco de alvenaria.



Fonte: Antar e Baig (2009).

2.2.4 Capacidade térmica de componentes (C_T)

É a quantidade de calor por unidade de área que um determinado material precisa para variar em uma unidade de temperatura do sistema. Quanto maior a capacidade térmica, mais calor o material pode reter antes de variar a sua temperatura.

2.2.5 Atraso térmico (ϕ)

O atraso térmico é uma propriedade que estima a percepção da mudança de temperatura no ambiente interno em função do tempo depois que essa variação acontece no meio externo. Essa propriedade tem relação com a espessura das paredes e suas componentes. Al-Hadhrami e Ahmad (2009) afirmam que quanto menor o bloco pior é o desempenho térmico da parede, o que é devido à quantidade de argamassa usada em sua construção, uma vez que a argamassa possui alta condutividade térmica.

O conhecimento das condições climáticas da região é fundamental para a escolha do material adequado. Assim, é preciso relacionar as propriedades dos materiais escolhidos para determinado fim às reais necessidades dos usuários e às condições climáticas às quais será exposto. Dessa forma, é possível reduzir o consumo de energia que seria despendido com o objetivo de proporcionar o conforto térmico desejado.

2.3 Caracterização do uso de energia elétrica em edificações

O consumo de energia de uma sociedade é diretamente proporcional à sua qualidade de vida, o que indica que, à medida que o padrão de vida humano sobe, o seu consumo também irá aumentar, implicando na necessidade de controle e uso racional dos recursos energéticos.

No setor residencial, por exemplo, o número de domicílios e a posse de equipamentos estão diretamente relacionados com a renda *per capita* da população. Estima-se que em 2050, este índice será 3,5 vezes a renda *per capita* atual, acompanhado da queda da desigualdade social no país, que vem acontecendo desde 2001, aumentando assim o poder de compra do brasileiro e mudando seus padrões de consumo energético (MME; EPE, 2014).

Atualmente no Brasil cerca de 52% da energia elétrica é destinada para os setores residencial, comercial e público, como é apresentado na Tabela 3 (EPE, 2012), sendo cerca de 20% da energia empregada em residências destinadas ao uso de ar-condicionado. Esse índice sobe para 47% em se tratando do setor comercial (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

Tabela 3 - Consumo total por classe (GWh).

| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | Part. % (2011) |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Brasil | 377.030 | 388.472 | 384.306 | 415.683 | 433.034 | 100,0 |
| Residencial | 89.885 | 94.746 | 100.776 | 107.215 | 111.971 | 25,9 |
| Industrial | 174.369 | 175.834 | 161.799 | 179.478 | 183.576 | 42,4 |
| Comercial | 58.647 | 61.813 | 65.255 | 69.170 | 73.482 | 17,0 |
| Rural | 17.269 | 17.941 | 17.304 | 18.906 | 21.027 | 4,9 |
| Poder público | 11.178 | 11.585 | 12.176 | 12.817 | 13.222 | 3,1 |
| Iluminação pública | 11.083 | 11.429 | 11.782 | 12.051 | 12.478 | 2,9 |
| Serviço público | 12.441 | 12.853 | 12.898 | 13.589 | 13.983 | 3,2 |
| Próprio | 2.158 | 2.270 | 2.319 | 2.456 | 3.295 | 0,8 |

Fonte: EPE (2012).

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), estes valores poderiam ser reduzidos se houvesse conhecimento, por parte de engenheiros e arquitetos, acerca de conceitos de eficiência energética aplicada ao projeto arquitetônico e a especificação de equipamentos.

Braga (2005) afirma que:

Uma saída para a crise de energia é a conservação. Isso significa desenvolver meios de utilizar mais eficientemente as fontes hoje disponíveis. Os benefícios da conservação são enormes, prolongam o uso das fontes finitas e, principalmente, minimizam os impactos ambientais decorrentes da geração de energia.

Assim, há a necessidade e expectativa da criação de alternativas que reduzam o consumo energético em todos os setores da sociedade.

A opção estratégica de investir em eficiência energética é a que menos agride o meio ambiente, gera empregos e apresenta uma expectativa de crescente aumento de sua competitividade comparada às outras opções da expansão da oferta de energia (BRASIL, 2008).

Segundo Mascaró e Mascaró (1992), o consumo energético na construção edilícia é baixo e não cria problemas maiores no balanço energético brasileiro. Porém, como sua vida útil é longa, o consumo médio durante sua utilização chega a ser duas vezes o consumo na etapa de obra em edifícios residenciais e pode chegar a vinte e seis vezes nos edifícios de escritórios. Esse alto índice deve-se principalmente a fatores como erros de projeto. “Os erros de projeto são frequentes na forma e disposição dos locais, na altura dos edifícios, na sua orientação, na composição de sua envolvente e, sobretudo, nas suas coberturas” (MASCARÓ e MASCARÓ 1992).

Segundo o Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 (BRASIL, 2008), instrumento de planejamento em longo prazo para orientação estratégica e expansão da oferta energética no Brasil, há uma estimativa de crescimento da demanda da energia elétrica nacional de 4% ao ano até 2030. Essa previsão contempla investimentos em equipamentos eficientes, disseminação de boas práticas e etiquetagem de edifícios, classificados segundo critérios de iluminação, condicionamento e envoltória.

2.4 Propostas para o uso racional de energia em edificações: etiquetagem de edifícios

Dentre as estratégias para fomentar o de uso racional de energia está a etiquetagem de edifícios. No Brasil, essa ação está sendo realizada a partir do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL EDIFICA), que tem como objetivo incentivar o uso racional de recursos naturais nas edificações, reduzindo desperdícios e impactos ambientais (PROCEL INFO, 2014).

A etiquetagem de edifícios se dá em dois momentos: na concepção do projeto e após a construção da edificação. As unidades comerciais e públicas e as unidades residenciais são avaliadas de formas diferentes, sendo que em ambos os casos, é contemplada a eficiência das envoltórias (Figura 4).

Os requisitos técnicos e os critérios de avaliação são dados pela Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010 (INMETRO, 2010), para edifícios comerciais e públicos, e pela Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012 para edifícios residenciais (INMETRO, 2012). Os critérios variam de “A” a “E” sendo o nível A classificado como mais eficiente e o E, menos eficiente.

Infelizmente, a classificação de eficiência energética em edifícios ainda é realizada de forma voluntária no país. Apenas, desde agosto de 2014, as construções públicas federais com mais de 500 m² têm obrigação de possuir a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) classe A, tanto para reformas quanto para novas edificações (PORTAL PINIWEB, 2014). Dentre outros fatores, essa não obrigatoriedade, colocou o Brasil na 15^a posição no estudo de eficiência energética do Conselho Americano para uma Economia de Energia Eficiente (*American Council for an Energy-Efficient Economy - Aceee*), que avaliou a eficiência energética em termos de edificações, indústrias e transportes das 16 mais importantes economias mundiais (YOUNG et al., 2014).

Além do PROCEL EDIFICA, existem outros programas que pontuam as edificações no âmbito da eficiência energética. O selo “Casa Azul” da Caixa Econômica Federal pontua edifícios que tem, por exemplo, paredes compostas de materiais coerentes com o clima da região, proporcionando, assim, o conforto do usuário.

Figura 4 - Exemplos de etiquetas de eficiência energética: (a) Edificações comerciais, de serviço e públicas; (b) Edificações habitacionais.

(a)



Fonte: PROCEL INFO (2014)

(b)



Fonte: PROCEL INFO (2014)

3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO

3.1 Introdução

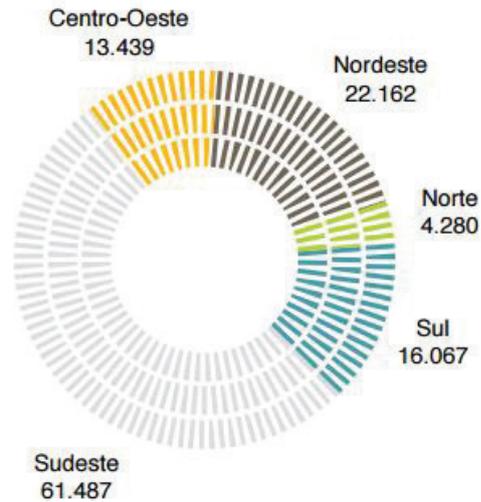
O aumento do produto interno bruto (PIB) brasileiro foi impulsionado em meados de 2010, principalmente pela elevação da renda familiar e pela maior oferta de crédito (IBGE, 2010). Este cenário favoreceu também um aumento da participação das atividades de construção civil que, atualmente, representam 10,1% do PIB, indicando uma participação expressiva da atividade para o crescimento do país (FIESP, 2015).

Ao mesmo tempo em que a indústria de construção cresceu, aumentou também a geração de resíduos frutos desta atividade. Atualmente, o Resíduo de Construção e Demolição (RCD) compõe de 41% a 70% em volume do resíduo sólido urbano sendo seu estudo, fundamental para o desenvolvimento da sociedade (MESQUITA, 2012).

A ABRELPE (2013) apresenta dados de geração de resíduos sólidos no Brasil, a partir de números fornecidos pelos serviços de coleta. Com relação à geração de RCD, a ABRELPE mostra que os municípios coletaram mais de 117 mil toneladas/dia em 2013, o que implica no aumento de 4,6% em relação ao ano anterior. É importante salientar que os dados se referem apenas a resíduos coletados pelos municípios e que o valor real é ainda maior, uma vez que os municípios apenas coletam os resíduos deixados em locais públicos.

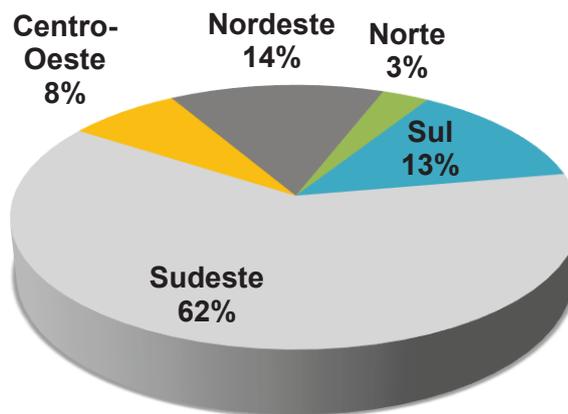
Uma visão da quantidade de RCD (t/dia) coletadas nas regiões do Brasil está indicada na Figura 5. É possível perceber que a maior parte do RCD coletado no Brasil provém da região sudeste, contudo, o relatório da ABRELPE (2013) aponta que a região com a maior taxa de geração por habitante é a região Centro-Oeste, correspondendo a 0,896 kg/hab./dia, seguido da região Sudeste com 0,728 kg/hab./dia; Sul, 0,558 kg/hab./dia; Nordeste, 0,397 kg/hab./dia e Norte, 0,252 kg/hab./dia. A região Sudeste tem a maior participação, como apresentado na Figura 6, justificando sua maior geração de resíduos em relação às demais, sendo a região Nordeste a segunda maior responsável pela geração deste tipo de resíduo no país (IBGE, 2012).

Figura 5 - RCD coletado nas regiões (t/dia).



Fonte: ABRELPE (2013).

Figura 6 - Valor das incorporações, obras e/ou serviços da indústria da construção: Ano 2012 (%).



Fonte: Adaptado de IBGE (2012).

A legislação acerca de resíduos sólidos no Brasil, regulamentada pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), classifica os resíduos em:

a) resíduos Classe I - Perigosos: apresentam características tais como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade entre outros, que possam representar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, quando gerenciado de forma inadequada;

b) resíduos Classe II – Não perigosos. São divididos em:

- resíduos classe II A – Não inertes. São aqueles que não se enquadram nem nos resíduos de classe I, tampouco no de classe II B. Podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- resíduos classe II B – Inertes. Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004c), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004b), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Nesta classe se enquadra a maioria dos RCD gerados no país.

Também há, no Brasil, uma legislação específica para gestão do RCD, que é regulamentada pela Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002). A resolução define os resíduos de construção como aqueles gerados na construção civil, provenientes de atividades de construção, reformas, reparos, demolição, escavação, divididos em classes, a saber:

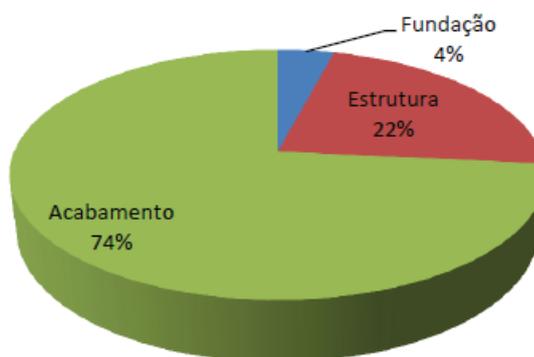
- I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a. de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b. de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c. de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso; (redação dada pela Resolução nº 431/11).
- III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; (redação dada pela Resolução nº 431/11).
- IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (Redação dada pela Resolução nº 348/04).

O Ministério do Meio Ambiente afirma que entre os resíduos de construção, cerca de 80% correspondem a resíduos de Classe A, 20% de classe B, principalmente restos de madeira e, a pequena parcela restante, a resíduos de classe C e D (MME; ICLEI, 2012). Contudo, segundo Gusmão (2008), apesar de cerca de 90% dos RCD serem recicláveis, a falta de uma política de gerenciamento tem ocasionado um consumo cada vez maior de recursos naturais bem como a disposição irregular de resíduos, causando sérios impactos ambientais e econômicos.

A composição do RCD depende de fatores diversos, tais como: origem, etapa da obra e fatores geográficos (TCHOBANGLIOUS e KREITH, 2002). Em relação à sua origem, os RCD podem ser provenientes de construção, reforma ou demolição. No caso de resíduos de construção, estes têm sua segregação mais fácil do que os resíduos de demolição, por exemplo. Outra consideração é que enquanto a construção gera, em média, 150 kg/m² de resíduo, na fase de demolição chegam a ser produzidos 900 kg/m², principalmente de RCD classes A (GUSMÃO, 2008).

Com relação à etapa da obra, Paz (2014) afirma que a fase mais crítica em termos de geração de resíduos é a de acabamento, seguida das fases de estrutura e fundação (Figura 7). O autor associa esta característica ao tempo de duração da fase, que é a mais longa do processo construtivo, além de envolver serviços tais como instalações elétricas e hidrossanitárias e ter um alto índice de desperdício. Além disso, por se tratar da fase final da obra, o cronograma geralmente se encontra comprometido, resultando, portanto, em atividades mal planejadas.

Figura 7 - Porcentagem da geração de RCD por fase da obra.



Fonte: Paz (2014).

A Tabela 4 apresenta a composição do RCD em algumas cidades do Brasil. A maior parte dos RCD encontrados no Brasil é composta de material cerâmico, argamassas e concreto, além de material misto, o qual não tem possibilidade de separação entre dois ou mais materiais.

Tabela 4 - Composição do RCD no Brasil.

| Composição do RCD | Participação (%) | | | | | | | | |
|----------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------|------------------|---------------|--------------------------|-----------------------|------------------|
| | Blumenau (1) | Brasília (2) | Vitória (3) | Passo fundo (4) | Petrolina (5) | Olinda (6) | Belo Horizonte (7) | Santa Maria (8) | Fortaleza (9) |
| Pedras | 0,8 | 5,9 | 3,4 | 1,1 | - | - | - | - | - |
| Concreto | 7,7 | 9,7 | 10,1 | 13,8 | 14,1 | 32,0 | 25,0 | - | 26,0 |
| Material Cerâmico | 20,8 | 12,3 | 8,5 | 26,9 | 45,5 | 43,0 | 51,0 | - | 20,6 |
| Solo | 5,3 | - | 31,9 | 0,7 | 8,0 | - | - | 11,3 | 24,6 |
| Argamassa | 10,8 | 27,7 | 18,0 | 37,4 | 23,6 | 23,0 | - | - | 22,0 |
| Orgânico | 2,5 | - | - | 0,1 | - | - | - | 14,9 | - |
| Misto | 39,9 | - | - | 12,6 | - | - | 24,0 | 41,6 | - |
| Classe B | 9,5 | 0,2 | 6,5 | 4,8 | - | 1,0 | - | 18,0 | 6,4 |
| Outros | 2,9 | 0,5 | 9,0 | 0,6 | 8,0 | 1,0 | - | 9,5 | 0,2 |

Fonte: ⁽¹⁾Sardá (2003); ⁽²⁾Rocha (2006); ⁽³⁾Ramos (2007); ⁽⁴⁾Bernardes et al. (2008); ⁽⁵⁾Santos (2008); ⁽⁶⁾Farias et al. (2011); ⁽⁷⁾Carmo, Maia e César (2012); ⁽⁸⁾Delongui (2012); ⁽⁹⁾Lima e Cabral (2013).

Angulo (2000) atenta para a importância do conhecimento da origem e composição do resíduo, principalmente em se tratando do resíduo de demolição. Apesar da parcela mineral do RCD ser predominante pode ser influenciada pela presença de materiais orgânicos e contaminantes, tais como gesso e madeira, que irá interferir nas propriedades dos agregados reciclados. O autor afirma ainda, que a heterogeneidade do material reciclado pelas usinas gera uma grande variabilidade nas curvas granulométricas, massa específica e absorção de água dos agregados.

3.2 Gestão de RCD

Concomitantemente ao volume expressivo representado pelo RCD no total dos resíduos sólidos urbanos, há a dificuldade de gerir esse resíduo de forma adequada. Segundo Tchobanglous e Kreith (2002), as soluções encontradas para a redução dos problemas criados pelo RCD são:

- Redução na fonte: é possível reduzir a geração de RCD evitando erros de projeto e de execução e racionalizando a construção através de projetos de alvenaria, modulação projetual, entre outros;
- Reutilização: Alguns resíduos gerados na construção podem ser reutilizados na própria obra sem necessidade de beneficiamento;
- Reciclagem: Na impossibilidade de reaproveitamento do resíduo como gerado em obra, é possível reciclá-lo através de beneficiamento. O material deve ser segregado segundo sua composição predominante e encaminhado a uma planta de reciclagem. Os investimentos

em reciclagem dependem do mercado de compra de cada material e da capacidade do gerador de segregar os resíduos.

- Disposição final: Quando a segregação do material é ineficiente, não há tecnologia para reciclagem ou não existem plantas de reciclagem disponíveis nas imediações, o material deve ser encaminhado para a disposição final. De 35 a 45% dos resíduos são dispostos em aterros, o que é uma prática insustentável uma vez que a maior parte dos resíduos de construção é inerte não requerendo um tratamento específico, além disso, são resíduos volumosos ocupando, nos aterros, grandes espaços que dantes poderia servir à destinação de resíduos que necessitassem de tratamento. Outra consideração importante é que o RCD se torna lixo comum quando associado a este, necessitando haver cuidado em seu manejo a fim de que não haja contaminação.

No Brasil, a destinação incorreta de resíduos de construção e demolição tem causado danos ambientais, sociais e econômicos à sociedade. A deposição irregular é feita em leitos de rios, beiras de estradas e terrenos baldios, sem qualquer cuidado, podendo ocasionar o aparecimento de vetores, gerando doenças, além de contaminar rios e lençóis freáticos. Apesar de o RCD ser um material inerte, a formação de pontos de disposição irregular na malha urbana, oportuniza o depósito de outros tipos de resíduos, criando mini lixões, agravando a situação.

Como forma de amenizar esse problema, existem no Brasil algumas legislações que tratam de resíduos de construção e demolição. A primeira foi a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), que aborda a gestão de RCD, classificando os resíduos e instituindo responsabilidades. Segundo a resolução, o gerador é responsável pela destinação e gerenciamentos dos seus resíduos.

Em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Nº 12.305 (BRASIL, 2010), apresentou instrumentos para a gestão de resíduos sólidos delegando responsabilidades a níveis federal, estadual e municipal. A PNRS tem como principal objetivo a não geração de resíduos e, quando isto não for possível, sua redução, reutilização, reciclagem e tratamento, sendo proposta em último caso, a sua destinação final adequada. Ela reúne os princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações que, em parcerias com os governos dos Estados e Municípios e particulares visam a gestão integrada e o gerenciamento ambiental adequado dos resíduos sólidos, apresentando a ideia de responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida do produto.

Um dos pontos abordados na supracitada lei é em relação à obrigatoriedade das empresas de construção civil de elaborarem um plano de gerenciamento de resíduos sólidos. Este plano precisa contemplar a previsão da quantidade e classificação dos resíduos a serem gerados, além de estabelecer o local de deposição. Posteriormente, esses dados precisam ser confirmados pela empresa responsável pela limpeza urbana, e verificado o que havia sido previsto no plano.

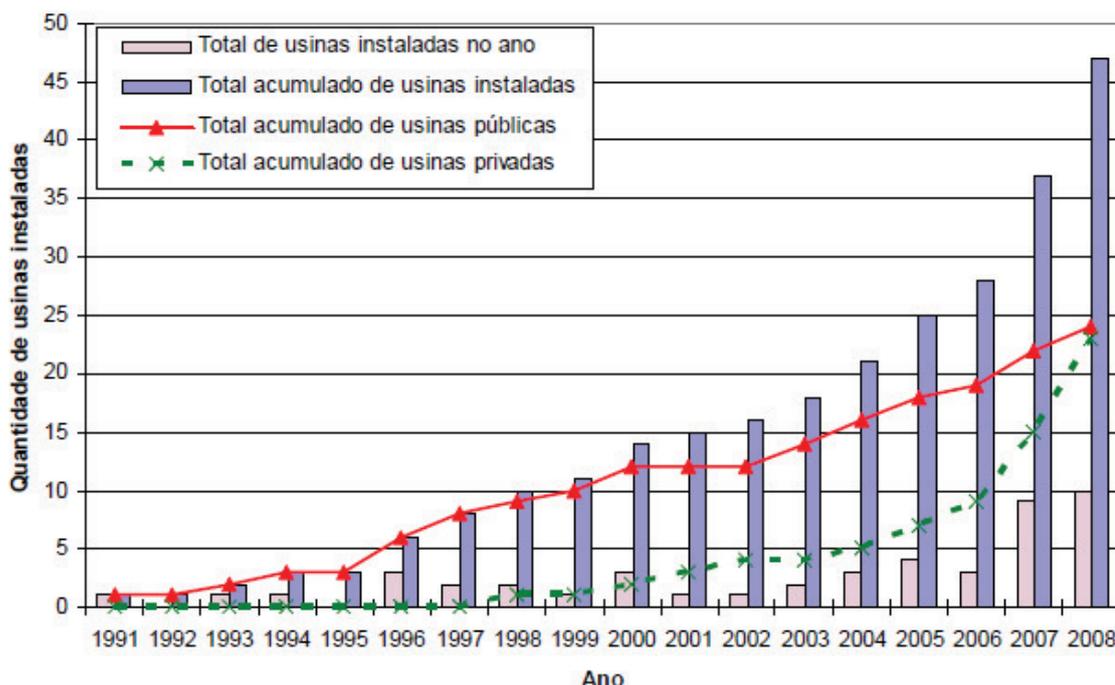
3.2.1 Reciclagem de RCD

Uma das formas de destinação correta dos resíduos de construção é por meio de sua reciclagem. Os resíduos de Classe A, quando devidamente segregados, podem ser beneficiados e reaproveitados para fins geotécnicos ou reinserção na indústria da construção em forma de agregados.

O beneficiamento de RCD classe A pode ser feito em plantas móveis, onde o material é reciclado na própria obra, podendo ser incorporado à produção, ou em usinas de reciclagem, que são áreas regulamentadas pela NBR 15114 (ABNT, 2004d).

Miranda, Angulo e Careli (2009) observaram o crescimento do número de usinas de reciclagem de RCD no Brasil, destacando o interesse privado na construção destes equipamentos (Figura 8). O autor afirma que das 47 usinas instaladas no país até 2008, 24 (51%) são públicas e 23, privadas, sendo que, apenas 36 estão em operação ou instalação, sendo 15 (42%) públicas e 21 (58%), privadas. O autor destaca ainda que, apesar da vantagem econômica que obteria a gestão pública com a coleta e reciclagem de RCD (uma vez que os agregados reciclados são em média 40% mais baratos que os naturais), existem dificuldades administrativas tais como falta de interesse no assunto, questões políticas e dificuldade na operação e manutenção da planta de reciclagem.

Figura 8 - Usinas de reciclagem de RCD classe A inauguradas ao longo dos anos.



Fonte: Miranda, Angulo e Careli (2009).

A legislação brasileira, NBR 15116 (ABNT, 2004e), regulamenta duas destinações para agregados reciclados de resíduos de construção: para obras de pavimentação viária (em camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentação ou revestimento primário de vias não pavimentadas) e para produção de concreto sem função estrutural. Segundo a norma supracitada, este agregado pode ser classificado da seguinte forma:

- Agregado de resíduo de concreto (ARC): agregado reciclado de concreto, proveniente de material de classe A, composto de, no mínimo, 90% de materiais à base de cimento Portland e rochas;
- Agregado de resíduo misto (ARM): agregado reciclado de concreto, proveniente de material de classe A, com menos de 90% de materiais à base de cimento Portland e rochas.

De acordo com Bazaz e Khayati (2012), enquanto cerca de 90% dos resíduos de concreto é reciclado, apenas 5% do material cerâmico é reciclado em todo o mundo. Dessa forma, no Brasil, onde uma grande parte do resíduo gerado provém de material cerâmico, como observado anteriormente na Tabela 4, é necessário o desenvolvimento de pesquisas para que o resíduo de cerâmica seja reciclado e inserido no mercado.

Além destes, os resíduos mistos, por não apresentar regularidade em sua composição, também têm seu reaproveitamento reduzido. Grande parte do resíduo misto provém de atividades de demolição, o que representa sérios problemas devidos à sua possível contaminação por outros materiais. Os resíduos de alvenaria cerâmica, por exemplo, geralmente possuem frações de argamassa, o que pode comprometer a resistência e durabilidade com concreto produzido com esse material (KHALAF e DEVENNY, 2004).

Dessa forma, por enquanto no Brasil, resíduos mistos têm sido, em sua maioria, utilizados na composição de base e sub-base de pavimentação, devido a seus parâmetros pouco exigentes, de forma que algumas pesquisas relacionadas à incorporação destes para produção de concretos têm sido desenvolvidas (ULSEN et al., 2010).

Conforme Khalaf e DeVenny (2004) é preciso atentar para a real necessidade de reciclagem de RCD. É importante avaliar os custos e os impactos ambientais provocados em relação com o uso de agregados convencionais. No caso do agregado natural, existem os custos de escavação, transporte e produção, enquanto os reciclados necessitam de, no caso de resíduos de demolição, um processo adicional de quebra dos resíduos, custos com a usina de reciclagem, com o transporte até a usina e com o transporte até o consumidor.

Os agregados naturais envolvem a exploração das jazidas, ruído, vibração, poeira e fatores associados ao transporte. Da mesma forma, os resíduos reciclados também provocam ruído, vibração, poeira e fatores associados ao transporte. Logo, o uso de RCD reciclado só é aconselhável do ponto de vista ambiental, se houver limitação de exploração de recursos naturais, não houver matéria prima disponível ou se a legislação do país impuser barreiras ao consumo de agregados naturais (CAVALLINE e WEGGEL, 2013).

3.3 Concretos produzidos com agregados reciclados

O concreto é o segundo material mais consumido pela sociedade (IBRACON, 2005), ficando atrás apenas da água, e seu processo de produção compromete significativamente o meio ambiente. O concreto é composto basicamente de cimento, agregados e água. Durante a produção do cimento, fabrica-se o clínquer, composto de argila e calcário, cuja calcinação libera dióxido de carbono comprometendo a camada de ozônio. Além disso, a retirada de matéria prima em abundância para uso como agregados afeta as jazidas e outras fontes.

A fim de reduzir este impacto ambiental, tem-se buscado substituir alguns desses materiais por produtos alternativos, dentre estes, agregados reciclados provenientes de construção e demolição. Além da redução da quantidade de recursos naturais utilizados, a reciclagem RCD, evita a disposição ineficiente destes. Porém, é preciso atentar para as características dos agregados reciclados, uma vez que muitas das propriedades do concreto são influenciadas por estas, tais como resistência mecânica, durabilidade e estabilidade.

O concreto produzido pode utilizar tanto Agregado Reciclado de Concreto (ARC) quanto Agregado Reciclado Misto (ARM), desde que obedeça aos seguintes requisitos presentes na Tabela 5, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004e).

Tabela 5 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.

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

⁽¹⁾ Para os efeitos desta norma, são exemplos de materiais não minerais: madeiras, plástico, betume, materiais carbonizados vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: NBR 15116 (ABNT, 2004e).

3.3.1 Influência dos agregados no desempenho do concreto

Os agregados utilizados para a produção de concreto representam cerca de 80% do seu volume e 20% do seu custo (em concretos sem aditivos com resistência de 15MPa), devendo ter algumas propriedades de forma a não prejudicar o desempenho do material (FALCÃO BAUER, 2000).

O autor ainda afirma que, em primeiro lugar, a resistência mecânica do agregado deve ser maior que a da pasta. Uma vez que o agregado é mais frágil que a pasta, pode haver ruptura da peça em função do agregado. Outro fator é a forma e textura dos grãos, que irá interferir diretamente na trabalhabilidade do concreto. Uma baixa trabalhabilidade implica na necessidade da adição

de finos e conseqüentemente de água e cimento, aumentando o custo do concreto. Por outro lado, os grãos irregulares e ásperos, colaboram com a aderência da pasta.

Ainda segundo Falcão Bauer (2000), o índice de vazios e a porosidade do agregado irão interferir em sua absorção de água, que implicará na quantidade de água de amassamento a ser utilizada. Essa propriedade do agregado deve ser verificada a fim de que haja a correção da quantidade de água a ser empregada na produção do concreto, logo, o aumento da compacidade dos grãos está associado ao aumento da resistência do concreto

As impurezas presentes nos agregados podem modificar as propriedades do concreto a partir da presença de material deletério, orgânico ou até mesmo de material pulverulento. O excesso de material pulverulento pode recobrir os agregados, impedindo sua aderência à argamassa, alterando a distribuição granulométrica, alterando a trabalhabilidade e resistência do concreto (FALCÃO BAUER, 2000).

No caso dos agregados reciclados, a NBR 15116 (ABNT, 2004e) afirma que, para produção de concreto, estes precisam ser previamente lavados, pois caso contrário, podem apresentar partículas soltas e impurezas em sua superfície prejudicando a aderência da pasta. Além disso, quando a correção da quantidade de água é feita durante a mistura, pode haver perturbação do processo de hidratação do cimento e atraso no seu endurecimento. No caso da produção de concretos estruturais, isto pode vir a ser um problema grave, não compensando a facilitação no processo industrial de correção da água na mistura.

3.3.2 Propriedades de concretos produzidos com resíduos reciclados mistos

A partir de pesquisas realizadas com substituição parcial ou total dos agregados convencionais por agregados reciclados na produção de concreto (CABRAL et al., 2009; AGRELA et al., 2011; BAZAZ e KHAYATI, 2012; GE et al., 2012; MARTINEZ-LAGE et al., 2012; MAS et al., 2012; CAVALLINE e WEGGEL, 2013; SHEEN et al., 2013), foi possível descrever propriedades comuns entre eles, de forma a caracterizar o concreto produzido com resíduos mistos. Os itens seguintes apresentam algumas discussões sobre os parâmetros estudados por estes autores.

3.3.2.1 *Trabalhabilidade*

Os resultados obtidos nos ensaios de abatimento pelos citados autores identificaram uma menor trabalhabilidade nos concretos produzidos com agregados reciclados mistos em relação às amostras de referências. Esses resultados foram devidos à absorção de água do agregado reciclado ser maior que a do agregado convencional, chegando a ser quase o dobro, assim como em função do formato e da superfície dos grãos (CAVALLINE e WEGGEL, 2013). Além disso, a presença de materiais cerâmicos também teve influência sobre os resultados, uma vez que a absorção dos agregados de cerâmica é maior que os de concreto.

Constatou-se também, que para todos os ensaios de abatimento a alteração foi menor na substituição dos agregados miúdos. Apesar da maior absorção média dos agregados miúdos em relação aos graúdos, esse fator pode ser corrigido com o aumento da relação água–cimento (relação a/c) e do uso de aditivos superplastificantes. Em relação aos agregados graúdos mistos reciclados, a trabalhabilidade da mistura foi prejudicada em função da sua forma angular que dificulta a coesão da pasta.

Os resultados de trabalhabilidade de Mas et al. (2012) se apresentaram variáveis de acordo com o tipo de cimento usado, a relação a/c, a quantidade de aditivo superplastificante usado na mistura, além da quantidade dos agregados utilizados. A variabilidade dos resultados representou para o autor a dificuldade de se trabalhar com materiais heterogêneos, com alta absorção e formatos angulosos, principalmente em relação ao agregado miúdo.

3.3.2.2 *Resistência à compressão simples*

Foi observado que, em todas as amostras analisadas pelos autores citados no item 3.3.2, a Resistência à Compressão Simples foi alterada pelo uso de agregados reciclados, chegando a ser até 44% menor em relação à amostra de referência. Além disso, os testes feitos com agregados não lavados tiveram resultados piores que os previamente lavados, tanto para efeito de correção na relação a/c, quanto para eliminação de materiais pulverulentos e contaminantes.

Outro fator importante é a interferência do tipo do agregado no desempenho do concreto. Sheen et al. (2013) afirmam que a proporção entre agregados reciclados de cerâmica e de concreto na mistura altera a resistência, sendo as amostras com mais resíduos de concreto, mais resistentes que as com o percentual de cerâmica maior. Contudo, quando dos ensaios feitos por Cabral et al. (2009), que utilizou apenas resíduos cerâmicos, da substituição dos agregados miúdos

convencionais por agregados miúdos de cerâmica houve um acréscimo de 14% na resistência, devido às propriedades pozolânicas da cerâmica. Em comparação entre granulometrias usadas, Bazaz e Khayati (2012) e Mas et al. (2012) verificaram que há redução da resistência à compressão quando da substituição dos agregados miúdos foi menor que dos graúdos. É importante salientar, ainda, que a porosidade do agregado demanda mais água e o aumento da relação a/c reduz a resistência de todos os concretos produzindo nos ensaios apresentados.

Também, o tipo de cimento utilizado interfere na resistência do concreto e na sua permeabilidade. O uso de cimentos com adição de escória granulada de alto forno proporcionou uma menor redução da resistência que o uso de cimentos simples (MAS et al. 2012). O uso de resíduo de cerâmica em substituição parcial do cimento, também provoca um decréscimo na resistência do concreto, porém, se usado na proporção correta (0,26 de relação a/c, taxa de agregado miúdo de 33% e 25% de substituição do cimento por pó de tijolo cerâmico), pode atingir até 50 MPa ou mais, aos 28 dias, que a amostra de referência (GE et al., 2012).

Ainda, a presença de materiais betuminosos altera a resistência do concreto, propriedade verificada por Agrela et al. (2011), que observou que pode haver o decréscimo entre 16% e 37% para concretos que incorporam mais de 20% de asfalto.

3.3.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade importante, principalmente para produção de concretos estruturais. Sheen et al. (2013) observou que quanto maior a porosidade do agregado, menor será sua rigidez e menor o seu módulo de elasticidade.

O uso de resíduos de tijolo cerâmico reduz o módulo de elasticidade do concreto devido ao baixo módulo de elasticidade da cerâmica. Segundo Cabral et al. (2009), essa redução se dá tanto para substituição dos agregados graúdos quanto miúdos, sendo os graúdos mais influentes sobre esta propriedade.

3.3.2.4 Durabilidade

A durabilidade do concreto está diretamente relacionada com sua permeabilidade, que, por sua vez, está principalmente ligada à sua porosidade (BAZAZ E KHAYATI, 2012). Assim, quando da composição da pasta de cimento, uma baixa relação a/c pode reduzir a permeabilidade do concreto.

Outro fator associado à durabilidade do concreto é a sua resistência a sulfatos. Agrela et al. (2011) observou que das 35 amostras estudadas, 9 possuíam a presença de mais de 2% de gesso e que essa quantidade não pode ser maior que 1,5%. Além disso, a resistência a cloretos observada por Cavalline e Weggel (2013) também depende da qualidade da pasta.

Dessa forma, observando-se as propriedades mencionadas, compreende-se a possibilidade do uso do RCD misto reciclado para a produção de concreto, necessitando, contudo, de um controle rigoroso na seleção dos materiais a serem utilizados. O aproveitamento de resíduos de demolição, por exemplo, pode conter uma quantidade considerável de contaminantes o que vai prejudicar a pasta e, conseqüentemente, a segurança da estrutura.

É necessário investigar as propriedades dos materiais reciclados para fins de substituição dos convencionais. A análise das propriedades do agregado é fundamental para o bom desempenho do concreto. Bazaz e Khayati (2012) observam que a resistência e a durabilidade do concreto dependem de vários fatores, entre os quais os mais importantes são a qualidade e propriedades do agregado, tais como a porosidade, absorção de água, peso específico, dureza, resistência e força de compressão.

Dentre os benefícios do uso do agregado misto reciclado está a redução do peso específico do concreto produzido. Uma vez que a massa específica da cerâmica é menor e sua porosidade maior que a do agregado convencional, é possível produzir um concreto mais leve. Além disso, a utilização deste tipo de concreto pode ser suficiente em funções não estruturais, tomados os devidos cuidados, principalmente relacionados à sua durabilidade.

3.4 Blocos de concreto

O bloco de concreto é parte do método da alvenaria racionalizada, que é caracterizada pelo uso de blocos de melhor qualidade, em relação aos blocos cerâmicos utilizados na alvenaria tradicional. Uma de suas principais características é a possibilidade da redução do desperdício a partir da elaboração de um projeto de alvenaria e planejamento da produção, além de evitar quebras de blocos por meio do uso de blocos compensadores (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2008).

Os blocos de concreto podem ter função estrutural, quando suportam o seu próprio peso e as cargas às quais são submetidos, ou podem ser de vedação, quando sua função é apenas de separar ambientes e servir de fechamento para o edifício.

Lordsleem Júnior (2012) afirma que o método construtivo da alvenaria racionalizada pode representar um grande diferencial na construção, tanto em função de custos quanto em termos de sustentabilidade. A racionalização da alvenaria contempla alguns aspectos que podem reduzir o desperdício em obra, uma vez que a execução da alvenaria ocupa um percentual expressivo de material e mão de obra empregados no edifício, podendo influir de 20 a 40% do custo da obra, além de exercer um papel fundamental durante a sua vida útil em termos de conforto, segurança, saúde entre outros.

Com relação às propriedades do elemento bloco, é importante salientar que o concreto usado para sua produção difere do concreto plástico amplamente usado em estruturas. O concreto seco, como é chamado, tem particularidades relativas à sua dosagem e produção que irão interferir nas suas propriedades, tais como resistência e aspecto superficial.

Andolfato, Camacho e Maurício (2002) afirmam que a resistência à compressão de blocos de concreto está diretamente ligada à compactidade destes, sendo pouco influenciada pela quantidade de água, como acontece nos concretos plásticos. A compactidade de um bloco, isto é, sua relação peso-volume se dá da mesma forma que a compactação de solos, aumentando quando a umidade está próxima da ótima. A quantidade de cimento usada para a produção de blocos é de fundamental importância uma vez que representa o teor de finos da mistura, ocupando os vazios entre os grãos, tendo um bloco com mais cimento uma maior compactidade em relação ao bloco com menos cimento. Porém, após o preenchimento desses vazios, o aumento da quantidade de cimento não altera a compactidade do bloco.

Fernandes (2013), explica que a compactidade do bloco é determinada quando da prensagem e vibração do artefato, que evita a presença de vazios no elemento. Afirma ainda, que algo em comum entre os concretos fresco e seco é a necessidade de controle dos agregados, pois isso também determinará a qualidade do bloco.

3.4.1 Legislação vigente acerca da produção de blocos de concreto

Atualmente, no Brasil, não há norma específica para a produção de blocos de concreto com agregados reciclados. Logo, para a produção de blocos de alvenaria se utiliza a norma referente a blocos convencionais.

Os blocos vazados de concreto simples para alvenaria devem atender aos requisitos presentes na NBR 6136 (ABNT, 2014), não apresentando tricas, fraturas, ou qualquer outro defeito que

possam prejudicar seu assentamento ou afetar a durabilidade da edificação. Por se tratar de blocos produzidos com agregados reciclados, devem ser limitados a blocos não estruturais, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004e).

Os blocos de concreto são classificados de acordo com famílias (aspectos relacionados às dimensões e modulações dos blocos) e de acordo com classes (relativo às propriedades físicas dos blocos) (Tabelas 6, 7 e 8). Os blocos utilizados para os experimentos do presente trabalho são da família 15x40.

Tabela 6 - Dimensões nominais de blocos de concreto.

| Família | | 20 x 40 | 15 x 40 | 15 x 30 | 12,5 x 40 | 12,5 x 25 | 12,5 x 37,5 | 10 x 40 | 10 x 30 | 7,5 x 40 | |
|---------------------|-------------|------------------|---------|---------|-----------|-----------|-------------|---------|---------|----------|-----|
| Medida Nominal (mm) | Largura | 190 | 140 | | 115 | | | 90 | | 65 | |
| | Altura | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | |
| | Comprimento | Inteiro | 390 | 390 | 290 | 390 | 240 | 365 | 390 | 290 | 390 |
| | | Meio | 190 | 190 | 140 | 190 | 115 | - | 190 | 140 | 190 |
| | | 2/3 | - | - | - | - | - | 240 | - | 190 | - |
| | | 1/3 | - | - | - | - | - | 240 | - | 90 | - |
| | | Amarração "L" | - | 340 | - | - | - | - | - | - | - |
| | | Amarração "T" | - | 540 | 440 | - | 365 | - | - | 290 | - |
| | | Compensador A | 90 | 90 | - | 90 | - | - | 90 | - | 90 |
| | | Compensador B | 40 | 40 | - | 40 | - | - | 40 | - | 40 |
| | | Canaleta inteira | 390 | 390 | 290 | 390 | 240 | 365 | 390 | 290 | - |
| | | Meia Canaleta | 190 | 190 | 140 | 190 | 115 | - | 190 | 140 | - |

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2014).

Tabela 7 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração

| Classificação | Classe | Resistência característica à compressão axial (MPa) | Absorção (%) | | | | Retração (%) |
|------------------------------|--------|---|-----------------|-------------|---------------|-------------|--------------|
| | | | Agregado normal | | Agregado leve | | |
| | | | Individual | Média | Individual | Média | |
| Com função estrutural | A | $fbk \geq 8,0$ | $\leq 8,0$ | $\leq 6,0$ | $\leq 16,0$ | $\leq 13,0$ | $\leq 0,065$ |
| | B | $4,0 \leq fbk \leq 8,0$ | $\leq 10,0$ | $\leq 8,0$ | | | |
| Com ou sem função estrutural | C | $fbk \geq 3,0$ | $\leq 12,0$ | $\leq 10,0$ | | | |

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2014).

Tabela 8 - Dimensões de blocos de concreto segundo classificação.

| Classe | Largura nominal (mm) | Paredes longitudinais (mm) | Paredes transversais | |
|--------|-------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | | | Paredes (mm) | Espessura equivalente (mm/m) |
| A | 190 | 32 | 25 | 188 |
| | 140 | 25 | 25 | 188 |
| B | 190 | 32 | 25 | 188 |
| | 140 | 25 | 25 | 188 |
| C | 190 | 18 | 18 | 135 |
| | 140 | 18 | 18 | 135 |
| | 115 | 18 | 18 | 135 |
| | 90 | 18 | 18 | 135 |
| | 65 | 15 | 15 | 135 |

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2014).

Segundo a NBR 6136 (ABNT, 2014) o bloco deve ser fabricado com cimento, água e agregados, sendo opcional o uso de aditivos e adições, e devem ser produzidos de acordo com processos que assegurem a homogeneidade e compacidade do bloco.

3.4.2 *Produção de blocos de concreto*

3.4.2.1 *Métodos de dosagem*

Buttler (2007) apresenta diversos métodos de dosagem para blocos de concreto. É importante salientar que a qualidade do bloco produzido é definida por sua compacidade e energia de compactação na hora da prensagem do bloco, além das características dos materiais utilizados. A melhor forma de garantir a compacidade do bloco é atentando para sua composição granulométrica. Em blocos cuja distribuição granulométrica é adequada, há aumento da resistência à compressão, redução da absorção de água além de evitar a retração por secagem e, conseqüentemente, fissuras.

A presença de finos nos blocos é fundamental para que haja envolvimento dos agregados graúdos e se evite a presença excessiva de vazios. Porém, quando do alto teor de finos, há o aumento do consumo de cimento, que além de provocar o acréscimo da retração por secagem, aumenta o custo de produção.

Em se tratando de RCD, há ainda outros complicadores na definição da granulometria. O fato de o agregado reciclado ser mais poroso ocasiona uma absorção rápida da água da argamassa

por este, resultando numa adesão pobre da argamassa aos agregados e um endurecimento acelerado da pasta.

Nesse caso, muitos autores (CABRAL et al., 2009; AGRELA et al., 2011; SHEEN et al., 2013), consideram a pré-saturação do agregado fundamental para um melhor desempenho do concreto, uma vez que saturado, evita-se que haja uma absorção rápida da água da mistura pelo agregado, prevenindo-se de surpresas desagradáveis. Porém, Buttler (2007), acredita que essa prática dificulta a produção industrial.

3.4.2.1.1 Método da *Besser Company* (MEDEIROS, 1993 apud BUTTLER 2007)

A metodologia para produção de blocos proposta pela *Besser Company* estabelece uma composição granulométrica de aproximadamente 40% de pedrisco e 60% de areia média, variando-se as porcentagens de acordo com a análise granulométrica dos materiais, contanto que o módulo de finura fique entre 3,6 e 3,75.

Em relação à quantidade de água, o método propõe que umidade varie de 6 a 7,5% dependendo das propriedades dos agregados. A relação cimento:agregado varia com a resistência desejada, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Traços sugeridos em função da resistência média desejada aos 28 dias.

| Resistência à compressão média (MPa) | 4,5 | 6,0 | 8,0 | 9,0 |
|---|------------|------------|------------|------------|
| Traço seco (cimento: agregado) | 1:9-1:12 | 1:8-1:10 | 1:7-1:9 | 1:6-1:8 |

Fonte: Manual Poli-Encol (1991) apud Buttler (2007)

Porém, para ajustar a curva granulométrica são necessários agregados de granulometria específica, o que o torna um método de difícil repetição, podendo ter como resultado a produção de concretos ásperos.

3.4.2.1.2 Método ABCP (FERREIRA, 1990 apud BUTTLER 2007)

O método ABCP baseia-se na busca do menor volume de vazios. Utilizando-se diversas misturas com diferentes composições granulométricas, pesa-se o material seco em um recipiente de volume conhecido, até que se encontre o maior peso, o que corresponde ao menor volume de vazios.

Contudo, o método não considera o teor de finos dos agregados, sequer o de cimento, o que, por fim, pode gerar uma mistura sem coesão, causando trincas nos blocos. Com relação à quantidade de cimento, admite traços entre 1:6 e 1:15.

3.4.2.1.3 Método IPT/EPUSP (TANGO, 1994 apud BUTTLER, 2007)

O método IPT/EPUSP tem como objetivo alcançar a compactidade máxima da mistura seca em função do equipamento utilizado, do processo de moldagem e do teor água:agregados. Não há muita preocupação com a composição granulométrica, o que pode ser um facilitador no caso da produção de blocos no próprio canteiro de obras, sendo estabelecidos traços teóricos. Cada composição granulométrica tem seu teor de água adequado. É um método composto de seis etapas:

1. Ajustes dos agregados;
2. Determinação da resistência média;
3. Determinação dos teores de cimento:agregado com 3 (três) traços de referência;
4. Determinação da umidade ótima;
5. Confecção das misturas experimentais;
6. Traçado de diagramas de dosagem.

Apesar de ser criterioso quanto aos diversos aspectos importantes para a produção do bloco, o método desconsidera a energia de adensamento empregada, que como visto é um fator importante para a sua resistência.

3.4.2.1.4 Método proposto pela *Columbia* (FRASSON JÚNIOR, 2000)

O Método proposto pela *Columbia*, fabricante de vibro prensas, tem como característica a preocupação com as propriedades dos agregados e com o teor de finos da mistura. O método propõe que 100% dos agregados sejam passantes na peneira 9,5 mm e que de 20 a 30% fiquem retidos na peneira 4,8 mm. Em relação à quantidade de finos, a mistura deve ter entre 12% a 15% (incluindo o cimento), passantes na peneira 0,3 mm, admitindo traços entre 1:6 e 1:11.

3.4.2.1.5 Método proposto por Frasson Júnior (2000)

No método proposto por Frasson Júnior (2000) são moldados corpos de prova de 5cmx10cm com relação cimento:agregado de 1:9, variando a porcentagem de agregados graúdos de 10 a 50%, acrescentando 10% a cada mistura. Esse traço vai definir a coesão da mistura. Após o estabelecimento da proporção ideal, fazem-se mais duas misturas com um traço mais pobre

(1:13 a 1:15), a fim de conhecer o estado de coesão crítica do concreto. Com relação ao teor de água, a umidade ótima varia de 5,5 a 8%.

Após o estabelecimento da coesão, são estabelecidos mais dois traços (1:7 e 1:11) para estabelecer a influência do consumo de cimento.

Com as resistências dos corpos de prova é possível prever, através da Equação (2), a resistências dos blocos.

$$f_{bm} = \frac{f_{cp}}{0,8} \cdot \frac{A_{liq}}{A_{brut}} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

f_{bm} = resistência dos blocos a serem moldados (MPa);

f_{cp} = resistência média dos corpos de prova cilíndricos de 5x10cm (MPa);

A_{liq} = área líquida dos blocos (mm²);

A_{brut} = área bruta dos blocos (mm²).

O método proposto por Frasson Júnior (2000) tem como vantagem a não realização de ensaios em escala real, sendo os ensaios realizados com os corpos de prova produzidos. Em função da resistência desejada, é possível realizar os ensaios com os próprios blocos, em escala real.

3.4.2.1.6 Método proposto por Fernandes (2013)

Segundo Fernandes (2013), ao contrário do concreto plástico, o concreto seco não possui uma forma segura de dosagem, uma vez que a qualidade do bloco depende também da sua compactação, que é uma variável determinada pelo tipo de vibro prensa utilizada.

O autor propõe uma sequência de procedimentos a serem adotados para atingir as proporções ideais para cada material componente na mistura em função da granulometria dos agregados e do seu teor de finos. Contudo, os blocos provenientes desses traços devem ser produzidos na própria empresa que os fabrica tendo em vista ajustes em função do equipamento usado na prensagem.

Inicialmente é construída uma curva de umidade, onde mantém-se um traço fixo e são produzidos blocos com quantidades de água variáveis, realizados ensaios de resistência à compressão e assim correlaciona-se a umidade da mistura à resistência desejada.

Após a curva de umidade e conhecida a granulometria dos agregados a serem usados na produção dos blocos, é definida curva de consumo, que irá definir, desta vez, a quantidade de cimento necessária para uma determinada resistência. Para a curva de consumo é montada uma tabela com as porcentagens dos agregados obtidas no ensaio de granulometria (ABNT, 2003d) e definidos possíveis traços com relação cimento:agregado, que resultarão em resistências diferentes. Dessa forma, são moldados os blocos e conferidas as resistências que foram propostas na curva. A curva de consumo permite obter o traço para qualquer resistência desejada dentro do intervalo em estudo. Este método foi adotado para a produção dos blocos da presente pesquisa.

3.4.2.2 *Cura*

O processo de cura do concreto é fundamental para a qualidade do bloco. Durante a cura, ocorre a hidratação do cimento, o que lhe conferirá resistência e evitará a falta de coesão entre as partículas. Existem diversos tipos de cura para concreto, e a escolha de um deles irá depender do tempo e espaço disponível, da necessidade do produtor e da qualidade do bloco.

Alguns tipos de cura são mais adequados para concretos secos ou com abatimento nulo, como descrito no Quadro 1.

A cura com membrana se dá quando se evita a perda de umidade dos blocos para o exterior por meio de uma membrana, o que também pode ser feito por meio da colocação de uma lona. Os melhores resultados encontrados por Celestino (2013), que comparou os blocos produzidos com resíduos provenientes de material cimentício e os submeteu a três tipos de cura, se deram para blocos que cuja cura foi dada por esse processo. Os blocos obtiveram os mesmos resultados para absorção e aspecto visual que os blocos submetidos a outros tipos de cura, porém, alcançaram resistência à compressão superior aos demais (Tabela 10).

A cura natural ou cura ao ar do concreto consiste em deixar o concreto sujeito às condições do ambiente, sem controle ou cuidados específicos. Mehta e Monteiro (1994) apresentam estudos que afirmam que, ao final de 180 dias, concretos com determinada relação a/c curados sobre condições úmidas apresentaram resistência média três vezes maior que concretos curados ao ar, provavelmente devido à microfissurações causadas pela retração por secagem.

A cura úmida consiste em submeter o concreto à molhagem a fim de que ele não perca a água de hidratação do cimento para o meio, controlando a umidade do ambiente e a mantendo

constante. Em se tratando de peças pré-moldadas, a temperatura desempenha um papel fundamental na cura do concreto. A cura térmica é um tipo de cura úmida que acelera as reações de hidratação do cimento, conferindo maior resistência aos concretos curados a maiores temperaturas que aos curados à baixa temperatura. Segundo Buttler (2007), esse tipo de cura ainda desempenha um papel fundamental para reduzir as deformações causadas pela retração por secagem.

Quadro 1 - Processos de cura para concretos com abatimento nulo.

| Tipo de cura | Utilização | Vantagem | Desvantagem |
|---------------------|--|---|--|
| Membrana | <ul style="list-style-type: none"> Misturas plásticas e com baixa área superficial em contato com o meio externo; Concreto compactado a rolo. | <ul style="list-style-type: none"> Impede a perda de água para o exterior da peça. | <ul style="list-style-type: none"> Dissolve-se em contato com a água. |
| Cura natural | <ul style="list-style-type: none"> Concretos com relação água:cimento inferior a 0,5; Concreto compactado a rolo; Blocos e adoquines. | <ul style="list-style-type: none"> Eliminação de custo de aquisição de equipamento, manutenção e operação. | <ul style="list-style-type: none"> Grandes perdas por queda e transporte; Maior potencial de retração na secagem dos blocos. |
| Cura térmica | <ul style="list-style-type: none"> Blocos e adoquines. | <ul style="list-style-type: none"> Redução do potencial de retração na secagem dos blocos; Redução na quantidade do estoque pela relação do processo de hidratação devido à alta temperatura; Boa produtividade. | <ul style="list-style-type: none"> Surgimento de retração térmica; Descontinuidade dos microporos, impedindo a continuidade da hidratação. |

Fonte: Adaptado de Fonseca (2002).

Tabela 10 - Características dos blocos em função do tipo de cura utilizados por Celestino (2013).

| Tipo de cura | Idade (dias) | Absorção média (%) | Resistência à compressão simples média (MPa) |
|---------------------|---------------------|---------------------------|---|
| Cura úmida | 7 | 13 | 2 |
| | 28 | 12 | 2,4 |
| Cura natural | 7 | 14 | 1,9 |
| | 28 | 13 | 1,9 |
| Cura com lona | 7 | 13 | 2,7 |

Fonte: Celestino (2013).

3.4.3 Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados

Para a composição de blocos de concreto, os agregados reciclados usados em sua produção precisam estar de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004e), sendo exclusivamente resultantes de material de classe A e para uso em produção de concreto não estrutural, podendo substituir parcialmente ou totalmente os agregados naturais. Além disso, os agregados precisam obedecer à norma NBR 7211 (ABNT, 2009a) para verificação de sua composição granulométrica.

3.4.3.1 Propriedades de agregados reciclados utilizados para a produção de blocos

Como foi visto anteriormente, os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição têm sua composição bastante variável, que pode modificar de acordo com o espaço geográfico, época do ano, etapa de obra, entre outros. Além disso, o nível do processo de gestão de resíduos no canteiro de obras influencia a pureza deste material, sendo necessária a análise das características do material reciclado para o seu aproveitamento em forma de agregado para a produção de artefatos de concreto.

Os agregados reciclados utilizados na produção de blocos abrangem uma grande variedade de materiais a começar de sua origem. Sejam eles coletados em canteiros de construção, demolição ou em usinas de reciclagem, os agregados reciclados podem ser utilizados em sua fração miúda ou graúda, apresentando formas, cores e composições diferenciadas, irregulares e variáveis em função de aspectos regionais. As características dos agregados, associadas ao método de produção e aos outros elementos incorporados (aglomerantes e aditivos, por exemplo) irão interferir na qualidade do bloco.

Diversos autores buscaram a utilização de agregados reciclados para a produção de blocos de alvenaria, encontrando estes materiais em origens diversas e utilizando métodos de dosagem próprios ou já reconhecidos (Tabela 11).

Dentre as propriedades dos agregados relevantes à produção dos blocos estão: massa específica, teor de materiais pulverulentos e capacidade de absorção de água.

Tabela 11 - Origem dos agregados usados na produção de blocos de concreto produzidos com resíduos.

| Referência | Origem dos agregados |
|---------------------------------------|--|
| Sousa (2001) | Resíduos de construção obtidos em canteiro de obras nas fases de alvenaria e acabamento. |
| Carneiro (2005) | Resíduos de construção obtidos em canteiro de obras com predominância de material proveniente de concreto. |
| Patto (2006) | Agregados reciclados obtidos em usina de reciclagem na cidade de São Paulo-SP. |
| Paula (2010) | Agregado reciclado adquirido uma usina de beneficiamento da cidade de Petrolina-PE. |
| Matar e Dalati (2011) | Agregados reciclados de concreto. |
| Soutsos, Tang e Millard (2011) | Resíduos de cerâmica e concreto provenientes de demolição. |
| Castro (2012) | Resíduos de concreto obtidos em fábricas de pré-moldados e resíduos de gesso adquiridos em gesseiras. |
| Lintz et al. (2012) | Agregados de concreto e argamassa obtidos em usina de reciclagem. |
| Sabai et al. (2013) | Resíduos de construção e demolição obtidos em canteiro de obras. |

3.4.3.1.1 Materiais pulverulentos

Os materiais pulverulentos são aqueles de diâmetro inferior a 0,075 mm. Estes materiais presentes no agregado, juntamente com o cimento, compõem o teor de finos da mistura, que é responsável pela coesão do concreto (MARCHIONI, 2012).

Para produção de concreto, o teor de materiais pulverulentos presentes no agregado é um fator prejudicial, além de requerer mais água na mistura e, conseqüentemente mais cimento, colaborando para a redução da sua resistência à compressão e aumento do custo do material em função do uso excessivo de cimento.

Os valores de teor de materiais pulverulentos de agregados usados para a produção de blocos em algumas pesquisas são apresentados na Tabela 12.

Em geral, o teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados é superior ao dos agregados naturais. Este fator pode ser associado à composição do material e ao processo de britagem ao qual o resíduo é submetido.

Sousa (2001) encontrou os maiores valores entre os autores citados para o teor de materiais pulverulentos. O índice de 14,23% para agregados reciclado se apresentou bem superior aos

índices dos agregados naturais usados na produção do bloco de referência e nas substituições parciais, que foi de 2,4 e 6,72%, para os agregados miúdo (composição entre areia fina lavada e areia rosa) e graúdo (Brita 0 com pó de pedra). Segundo Sousa (2001) o alto teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados comprometeu o adensamento do concreto usado na moldagem dos corpos de prova e dos blocos de concreto, quando usada a mesma energia de adensamento dos elementos produzidos com agregados convencionais.

Tabela 12 - Teor de materiais pulverulentos de agregados usados para a produção de blocos.

| Referência | Agregado natural (%) | | Agregado Reciclado (%) | | Comentários |
|-----------------|----------------------|--------|------------------------|----------------------|---|
| | Miúdo | Graúdo | Miúdo | Graúdo | |
| Sousa (2001) | 2,40 | 6,72 | - | 14,23 ⁽¹⁾ | ⁽¹⁾ Módulo de finura igual a 3,47 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| Carneiro (2005) | 1,88 | - | - | 6,00 ⁽²⁾ | ⁽²⁾ Módulo de finura igual a 4,84 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| Paula (2010) | 0,08 | - | 10,09 ⁽³⁾ | - | ⁽³⁾ Módulo de finura igual a 2,08 e diâmetro máximo característico igual a 2,4 mm. |
| Castro (2012) | 5,70 | 0,81 | - | 6,30 ⁽⁴⁾ | ⁽⁴⁾ Agregados reciclados provenientes de concreto com módulo de finura igual a 3,53 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |

3.4.3.1.2 Massa específica

A massa específica dos agregados tem relação direta com a massa específica do bloco, que por sua vez, interfere nos parâmetros de resistência à compressão. A Tabela 13 apresenta valores deste parâmetro obtidos por diferentes autores.

De acordo com a literatura pesquisada, foi verificado que os agregados de maior massa específica são os provenientes de concreto, sendo os maiores valores encontrados por Castro (2012), 2,60 g/cm³, e por Lintz et al. (2012), 2,55 g/cm³. Esse fator, provavelmente, está relacionado à massa específica do concreto ser maior que a massa específica da cerâmica, por exemplo, que é encontrada nos resíduos de origem mista.

Os menores valores foram encontrados nos agregados miúdos de Patto (2006), 2,04 g/cm³, e nos agregados de Sabai et al. (2013), 2,23 g/cm³. No caso de Sabai et al. (2013), o material foi adquirido em canteiros de construção e demolição, coletado em três cidades. As amostras consistiram em 60% de demolição, 20% de construção e 20% recursos naturais. A composição dos RCD encontrada por Sabai et al. (2013) tem predominância de resíduos de materiais cimentícios, isto é, argamassas de cimento e areia, representando cerca de 60% do material coletado.

Tabela 13 - Massa específica dos agregados usados para a produção de blocos.

| Referência | Agregado natural (g/cm ³) | | Agregado Reciclado (g/cm ³) | | Comentários |
|--------------------------------|---------------------------------------|--------|---|----------------------|---|
| | Miúdo | Graúdo | Miúdo | Graúdo | |
| Sousa (2001) | 2,61 | 2,77 | - | 2,48 ⁽¹⁾ | ⁽¹⁾ Módulo de finura igual a 3,47 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| Carneiro (2005) | 2,62 | 2,71 | 2,34 ⁽²⁾ | 2,02 ⁽³⁾ | ⁽²⁾ Fração miúda com módulo de finura igual a 4,84 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. ⁽³⁾ Fração graúda do mesmo agregado. |
| Patto (2006) | 2,62 | 2,68 | 2,42 ⁽⁴⁾ | 2,04 ⁽⁵⁾ | ⁽⁴⁾ Módulo de finura igual a 2,63 e diâmetro máximo característico igual a 4,8 mm. ⁽⁵⁾ Módulo de finura igual a 6,14 e diâmetro máximo característico igual a 12,7 mm. |
| Paula (2010) | 2,88 | - | 2,52 ⁽⁶⁾ | - | ⁽⁶⁾ Módulo de finura igual a 2,08 e diâmetro máximo característico igual a 2,4 mm. |
| Matar e Dalati (2011) | - | - | 2,14 | 2,28 | - |
| Soutsos, Tang e Millard (2011) | 2,3 | 2,69 | 2,24 ⁽⁷⁾ | 2,30 ⁽⁷⁾ | ⁽⁷⁾ Agregados reciclados provenientes de alvenaria. ⁽⁸⁾ Agregados reciclados provenientes de concreto. |
| Castro (2012) | 2,69 | 2,73 | - | 2,6 ⁽⁹⁾ | ⁽⁹⁾ Agregados reciclados provenientes de concreto com módulo de finura igual a 3,53 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. ⁽¹⁰⁾ Agregados reciclados provenientes de gesso com módulo de finura igual a 3,3 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| Lintz et al. (2012) | 2,62 | 2,9 | 2,34 ⁽¹¹⁾ | 2,55 ⁽¹²⁾ | ⁽¹¹⁾ Módulo de finura igual a 2,38 e diâmetro máximo característico igual a 4,8 mm. ⁽¹²⁾ Módulo de finura igual a 3,36 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| Sabai et al. (2013) | 2,5 | 2,4 | 2,46 | 2,23 | - |

Sousa (2001) encontrou o valor de 2,48 g/cm³ para agregados reciclados enquanto os agregados miúdo e graúdo, relacionados em sua pesquisa tiveram massa específica de 2,61 e 2,77 g/cm³, respectivamente. Castro (2012) encontrou valores de 2,60 g/cm³ para agregados reciclados de concreto e 2,57 g/cm³ para agregados reciclados de gesso, ambos valores menores que os agregados relacionados da citada pesquisa, que obteve valores de 2,69 g/cm³ para agregados miúdos naturais e 2,73 g/cm³ para graúdos.

Da mesma forma, Lintz et al. (2012) encontrou valores de massa específica para agregados reciclados (2,34 g/cm³, agregados miúdos e 2,55 g/cm³, para graúdos) menores que dos agregados naturais (2,90 g/cm³ para agregados miúdos e 2,87 g/cm³ para agregados graúdos).

3.4.3.1.3 Absorção média de água

A absorção de água do agregado interfere, principalmente, no consumo de argamassa para a produção do concreto. Por sua vez, o teor de argamassa aderida irá influenciar o comportamento do concreto nos critérios de retração por secagem e durabilidade (BUTTLER, 2007).

Os valores de absorção média de água de agregados usados para a produção de blocos de alguns autores da literatura são apresentados na Tabela 14.

Para todos os autores citados, a absorção média de água dos agregados reciclados é maior que a absorção dos agregados naturais. Este fato se deve a variedade de materiais encontrados no agregado reciclado, tal como resíduos de argamassa, solo, entre outros.

Sousa (2001) destaca que a absorção de água do agregado reciclado é maior que a do natural devido a sua maior porosidade de ao alto teor de finos presentes no material.

Tabela 14 - Absorção média de água dos agregados usados para a produção de blocos.

| Referência | Agregado natural (%) | | Agregado Reciclado (%) | | Comentários |
|--------------------------------|----------------------|--------|------------------------|---------------------|---|
| | Miúdo | Graúdo | Miúdo | Graúdo | |
| Sousa (2001) | 5,9 | 2,5 | - | 13,2 ⁽¹⁾ | ⁽¹⁾ Módulo de finura igual a 3,47 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| Patto (2006) | - | 0,96 | - | 8,9 ⁽²⁾ | ⁽²⁾ Módulo de finura igual a 6,14 e diâmetro máximo característico igual a 12,7 mm. |
| Matar e Dalati (2011) | - | - | 6,0 | 5,0 | - |
| Soutsos, Tang e Millard (2011) | 2,5 | 0,65 | 18 ⁽³⁾ | 17,5 ⁽³⁾ | ⁽³⁾ Agregados reciclados provenientes de alvenaria. |
| | - | - | 9,15 ⁽⁴⁾ | 8,5 ⁽⁴⁾ | ⁽⁴⁾ Agregados reciclados provenientes de concreto. |
| Castro (2012) | 0,48 | 0,82 | 4,9 ⁽⁵⁾ | - | ⁽⁵⁾ Agregados reciclados provenientes de concreto com módulo de finura igual a 3,53 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| | - | - | 13,8 ⁽⁶⁾ | - | ⁽⁶⁾ Agregados reciclados provenientes de gesso com módulo de finura igual a 3,3 e diâmetro máximo característico igual a 9,5 mm. |
| Sabai et al. (2013) | - | 1,8 | 8,4 | | - |

3.4.3.2 Propriedades de blocos produzidos com agregados reciclados

Algumas propriedades dos blocos de concreto são fundamentais para sua aceitação segundo as NBR 6136 (ABNT, 2014). Esses parâmetros foram descritos no item 3.4.1, e se referem à sua aparência, a presença de arestas vivas, não apresentar trincas ou fraturas ou qualquer defeito

que possa prejudicar sua resistência, durabilidade ou assentamento; à regularidade de suas dimensões, aos limites de absorção de água e à sua resistência à compressão simples.

As pesquisas relacionadas nos itens seguintes apresentam algumas propriedades dos blocos produzidos com agregados reciclados, relacionando-os com blocos de concreto convencional.

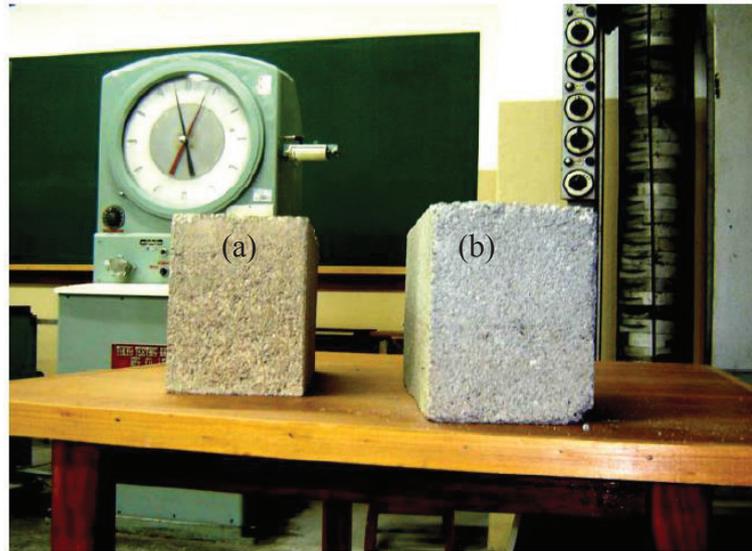
3.4.3.2.1 Aspecto superficial e análise dimensional

A verificação do aspecto superficial do bloco é fundamental para garantir a integridade e uniformidade do bloco. A presença de falhas, trincas, vazios, ou até mesmo manchas que indiquem variação de materiais dentro de um mesmo bloco, pode comprometer a resistência do elemento e, conseqüentemente, a segurança do edifício construído com estes.

A análise dimensional é imprescindível ao controle de qualidade dos elementos e pode indicar falhas de moldagem, por exemplo. Em geral, as dimensões de largura, comprimento e espessura de paredes de um bloco são determinadas pela fôrma usada no processo de moldagem, logo, variações dessas dimensões, podem indicar problemas com a fôrma, que necessita ser substituída. A altura dos blocos é determinada pela alimentação da fôrma pelo concreto, logo, excesso ou falta de altura, aponta falhas no tempo de alimentação da forma. A alteração de qualquer destas dimensões abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 6136 (2014) podem afetar a resistência do bloco ou prejudicar seu assentamento e o acabamento do edifício.

Patto (2006) observou que em comparação aos blocos tradicionais, os blocos reciclados não apresentaram nenhuma deficiência em relação ao seu aspecto ou textura, notando-se, apenas, variações nos blocos de acordo com a quantidade de cimento usada na mistura, onde os blocos com mais cimento se apresentaram visualmente mais coesos que os com menos cimento. O autor ainda destacou que a diferença de aparência entre os blocos convencionais e os que usam agregados reciclados se confere na cor do elemento, onde o bloco reciclado tem um aspecto avermelhado, que está associado à variedade dos agregados usados na sua produção (Figura 9).

Figura 9 - Aspecto superficial dos blocos produzidos por Patto (2006): (a) Bloco reciclado; (b) Bloco convencional.



Fonte: Patto (2006)

Castro (2012) verificou que o aspecto superficial do bloco muda de acordo com o teor de incorporação de agregados reciclados. Observou-se que há aumento da porosidade e coesão das partículas com a adição de agregados reciclados. Além disso, o bloco reciclado adquiriu uma cor mais clara em função da incorporação de resíduos de gesso (Figura 10).

Figura 10 - Aspecto superficial dos blocos produzidos por Castro (2012): (a) 100% de agregados naturais; (b) 75% RCD e 25% resíduo de gesso; (c) 50% RCD e 50% resíduo de gesso; (d) 25% RCD e 75% resíduo de gesso.



Fonte: Castro (2012)

3.4.3.2.2 Massa específica

A massa específica de um bloco é a sua massa dividida por seu volume. Essa propriedade do bloco irá interferir na sobrecarga atuante na edificação, implicando inclusive nos cálculos de estruturas e de fundações.

Sousa (2001) correlacionou a substituição dos agregados naturais por reciclados com as massas específicas dos blocos produzidos em sua pesquisa como apresentado na Tabela 15. O autor associou a redução das massas específicas dos blocos à massa específica do agregado reciclado, que é menor que a do agregado natural. O autor ainda relacionou as massas específicas dos blocos de concreto, bem como dos corpos de prova cilíndricos produzidos por ele, aos valores de resistência à compressão e absorção de água, sendo que, quanto maior a massa específica, maior a resistência e menor a absorção.

Tabela 15 - Massa específica dos blocos produzidos por Sousa (2001).

| Autor | Sousa (2001) | | |
|---|---------------------|--------|--------|
| Traço | | 1:10 | |
| Substituição | 30 | 40 | 50 |
| Massa específica (Rec.) (kg/m³) | 1,931 | 2,009 | 1,89 |
| Massa específica (Ref.) (kg/m³) | | 2,355 | |
| Variação (%) | 21,96% | 17,22% | 24,60% |

Rec.- bloco produzido com agregados reciclados; Ref.: bloco de concreto de referência.

Matar e Dalati (2011) também observaram um decréscimo da massa específica do bloco em função da substituição dos agregados naturais por reciclados. Os blocos de concreto com 30% de substituição obtiveram massa específica de 2,201kg/m³, os com 50% 2,184 kg/m³, os com 70%, 2,109 kg/m³, e os com 100% de substituição, 2,060kg/m³.

Os resultados da massa específica do bloco produzido por Soutsos, Tang e Millard (2011), para o traço 1:10 com 20% de substituição dos agregados naturais por reciclados foi de 1,89kg/m³.

3.4.3.2.3 Absorção de água

A absorção de água está relacionada à porosidade do bloco e sua conseqüente capacidade de reter água em seu interior (FERNANDES, 2013). O autor afirma também que a baixa absorção não é sinônima de qualidade do elemento, uma vez que os blocos de má qualidade apresentam um grande número de vazios em seu interior sendo incapazes de reter água.

A Tabela 16 apresenta valores de absorção de água de blocos produzidos com agregados reciclados, em diversos traços, obtidos da literatura.

Tabela 16 - Absorção de água dos blocos com agregados reciclados.

| Autor | Sousa (2001) | | | Patto (2006) | Paula (2010) | | | | Lintz et al. (2012) | | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|------|------|---------------------|---------------------|------|------|------|----------------------------|------|-------|-------|-----|------|------|-----|
| Traço | 1:10 | | | 1:6,5 | 1:6 | | | | 1:9 | | | | | | | |
| Substituição | 30 | 40 | 50 | 100 | 25 | 50 | 75 | 100 | 20 | 50 | 80 | 100 | | | | |
| Absorção (Rec.) (%) | 13,1 | 10,3 | 14,5 | 16,2 | 10,5 | 12,3 | 15,4 | 15,5 | 2 | 2 | 4 | 9 | 6,4 | 7,95 | 9,25 | 9,2 |
| Absorção (Ref.) (%) | 8,9 | | | 7,3 | 8,08 | | | | 4,05 | | | | | | | |
| Acréscimo (%) | 47,2 | 15,7 | 62,9 | 121,9 | 30,2 | 52,5 | 91,1 | 92,9 | 58,0 | 96,3 | 128,4 | 127,2 | | | | |

Rec.- bloco produzido com agregados reciclados; Ref.: bloco de concreto de referência.

Sousa (2001) investigou corpos de prova cilíndricos de concreto com mais de 50% de incorporação de agregados reciclados em substituição aos naturais, contudo, os resultados obtidos foram insatisfatórios. Assim, optou por produzir blocos de concreto usando porcentagens inferiores a 50%. O autor observou que a absorção de água foi crescente em função do aumento da quantidade de agregado reciclado (Tabela 16). Já o bloco produzido com 40% de substituição do agregado natural teve resultados destoantes dos demais, uma vez que toda a parcela fina do agregado reciclado (inferior a 2,4 mm) foi substituída por agregado natural com a mesma granulometria, afirmando com esse resultado que os agregados miúdos têm mais influência sobre o teor de absorção que os grãos.

Paula (2010) e Lintz et al. (2012) também demonstram um aumento da absorção de água pelo bloco em função do aumento da quantidade de agregados reciclados adicionados. Foi visto que a absorção não reduziu com o aumento da quantidade de cimento na mistura e que, apesar do traço usado por Lintz et al. (2012) ser superior aos adotado por Patto (2006) e de Paula (2010), o valor da absorção para blocos com 100% de substituição dos agregados foi menor que os dos demais autores. A alta absorção de Patto (2006) e Paula (2010) pode ter se devido à absorção do agregado utilizado ou do processo de cura dos blocos.

3.4.3.2.4 Resistência à compressão simples

Para a produção de blocos de concreto, alguns autores realizaram primeiramente ensaios de resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos de concreto de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura a fim de correlacionar as propriedades do concreto plástico

produzido com as devidas substituições dos agregados naturais por agregados reciclados (Tabela 17).

Tabela 17 - Resistência à compressão simples em corpos de prova de concreto produzidos com agregados reciclados.

| Autor | Sousa (2001) | | | | | Patto (2006) | Lintz et al. (2012) | | | |
|---------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|----------------------------|-------|-------|-------|
| Traço | | | 1:10 | | | 1:6,5 | | 1:9 | | |
| Substituição | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 100 | 20 | 50 | 80 | 100 |
| Rcomp (Rec.) (MPa) | 13,1 | 12,5 | 11,8 | 5,7 | 2,9 | 2,53 | 23,5 | 14 | 2 | 1,5 |
| Rcomp (Ref.) (MPa) | | | 15,1 | | | 4,15 | | 25,5 | | |
| Varição (%) | -13,3 | -17,2 | -21,9 | -62,3 | -80,8 | -39,0 | -7,8 | -45,1 | -92,2 | -94,1 |

Rcomp: resistência à compressão média; Rec.: concreto produzido com agregados reciclados; Ref.: concreto de referência.

Pode-se observar que houve redução da resistência à compressão quando da substituição dos agregados naturais por agregados reciclados e ainda que, para todas as pesquisas relacionadas na Tabela 17, quanto maior a substituição, maior o decréscimo de resistência em relação à amostra de referência.

Sousa (2001) realizou ensaios com um maior número de famílias, verificando, porém que, após os 50% de agregados substituídos, a resistência à compressão das amostras reduziu significativamente. Patto (2006) obteve o melhor resultado em relação à substituição total dos agregados naturais, contudo precisou usar mais cimento na mistura, usando traço de 1:6,5 (cimento:materiais secos) enquanto, Sousa (2001) usou 1:10 e Lintz et al. 1:9. Os ensaios de Lintz et al. (2012) demonstraram que a substituição de 80 a 100% dos agregados naturais resulta na perda de mais de 90% da resistência em relação à amostra de referência, não sendo recomendável pelos autores.

A partir dos resultados dos experimentos com os corpos de prova de concreto (Tabela 17), os referidos autores definiram os traços a serem empregados na produção dos blocos. A Tabela 18 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples realizados em blocos de concreto. Também são apresentados nesta tabela os resultados obtidos por Paula (2010) em blocos de concreto, apesar de não terem sido realizados estudos prévios em concreto plástico.

Tabela 18 - Resistência à compressão simples dos blocos produzidos com agregados reciclados.

| Autor | Sousa (2001) | | | Patto (2006) | | Paula (2010) | | | Lintz et al. (2012) | | | |
|---------------------------|---------------------|-------|-------|---------------------|------|---------------------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|-------|
| Traço | 1:10 | | | 1:6,5 | | 1:6 | | | 1:9 | | | |
| Substituição | 30 | 40 | 50 | 100 | 25 | 50 | 75 | 100 | 20 | 50 | 80 | 100 |
| Rcomp (Rec.) (MPa) | 1,9 | 2,6 | 2,2 | 3,24 | 3,67 | 2,63 | 2,44 | 2,03 | 7,18 | 5,24 | 4,94 | 4,78 |
| Rcomp (Ref.) (MPa) | 3,4 | | | 2,87 | | 3,78 | | | 8,75 | | | |
| Variação (%) | -44,1 | -23,5 | -35,3 | +12,9 | -2,9 | -30,4 | -35,5 | -46,3 | -17,9 | -40,1 | -43,5 | -45,4 |

Rcomp: resistência à compressão média; Rec.: bloco produzido com agregados reciclados; Ref.: bloco de concreto de referência.

Em relação à resistência à compressão simples de blocos produzidos com RCD, Sousa (2001) percebeu que houve decréscimo neste parâmetro em todas as famílias produzidas quando comparado com o bloco convencional. Esta redução foi menos evidenciada na família de 40%, que substituiu apenas os agregados graúdos convencionais por reciclados, chegando a ter a maior resistência entre as três famílias, com 2,6MPa.

A pesquisa de Patto (2010) considerou três traços para a produção de blocos de concreto, variando a quantidade de cimento, ou seja, um traço “rico” com relação cimento:agregado igual a 1:5,5, um traço “básico”, 1:6,5 e um traço “pobre”, 1:7,5. O autor verificou que houve redução da resistência à compressão do bloco de acordo com a quantidade de cimento utilizada, tendo o bloco referente ao traço “rico” valor de 6,4MPa, o “básico” 3,24MPa e o “pobre”, 1,71MPa. Analisando-se as propriedades referentes aos blocos produzidos com o traço “básico” (Tabela18), a resistência à compressão do bloco com agregado reciclado aumentou 13% em relação ao bloco convencional.

Matar e Dalati (2011) produziram blocos com agregados reciclados, acrescentando cimento aos traços usuais para verificar alterações na qualidade do bloco. O maior valor de resistência à compressão se deu no bloco que substituiu 100% dos agregados miúdos e 30% dos agregados graúdos naturais por agregados reciclados e utilizou 10% a mais da quantidade de cimento na mistura, chegando a 9,21 MPa aos 28 dias. O menor valor de resistência média à compressão foi verificado na amostra que teve 100% dos agregados naturais substituídos por agregados reciclados, com acréscimo de 10% de cimento. A amostra com menor resistência à compressão, também foi a amostra que apresentou a menor densidade, 2060 kg/m³, e o bloco mais resistente foi o que apresentou maior densidade, 2201 kg/m³. Os autores recomendam o acréscimo de

cimento para traços com agregados reciclados além de sugerir que a substituição seja de, no máximo, 50% dos agregados naturais.

Lintz et al. (2012) identificaram que a resistência à compressão simples dos blocos reduziu na medida em que se aumentou a proporção de agregados reciclados na mistura (Tabela 18), contudo, após 50% de substituição essa variação não foi significativa.

3.4.4 Exemplos de uso de blocos com agregados reciclados no Brasil

Apesar da variabilidade em sua composição e da falta de uma norma específica para sua produção em larga escala, o bloco de concreto com agregados reciclados tem sido usado em alguns casos no Brasil.

Em 2003, uma construtora paulista implantou o projeto “Reciclar é construir um futuro melhor”. O projeto previa a demolição de um edifício no centro do Rio de Janeiro que geraria cerca de 5000m³ de entulho. Objetivando reduzir o impacto ambiental provocado pela deposição destes resíduos, a empresa optou por montar uma central de reciclagem em Guaratiba – RJ, onde o material de demolição passou por um processo de triagem, britagem e foi transformado em blocos de concreto, que foram doados à prefeitura da cidade para a construção de casas populares (AGÊNCIA ESTADO, 2003). O responsável pelo projeto afirma que o custo do agregado reciclado foi apenas 10 a 15% menor que o convencional, mas que o benefício real foi no aspecto ambiental.

Da mesma forma, em 2006, uma outra construtora, precisou demolir um piso de concreto para a construção de um condomínio em Guarulhos - SP, gerando 12.500m³ de entulho. Em vista da dificuldade do transporte do material para uma usina de beneficiamento, que previa cerca de 1200 viagens, foi adquirida uma planta de reciclagem móvel e, a partir do resíduo reciclado, foram produzidos blocos de fundação, blocos de concreto, lajes, muros, entre outros, como pode ser visto na Figura 11 (CAPELLO, 2006).

Figura 11 - Uso de blocos com agregados reciclados: (a) Beneficiamento do resíduo em obra; (b) Edificação construída com blocos com agregados reciclados.



Fonte: Capello (2006).



Fonte: Capello (2006).

Na Região metropolitana do Recife-PE, já há uma empresa que produz blocos com agregados reciclados. A empresa, localizada em Jaboatão dos Guararapes-PE, que está no mercado desde 1981, atua em setores da construção civil, como recuperação e reforço de estrutura, restauro de patrimônio histórico e produção de artefatos de concreto. Em relação à produção de artefatos, este processo é automatizado, permitindo a regularidade dos elementos produzidos, tais como, pavimentos (*pavers*), meios-fios e blocos de concreto (Figura 12).

O interesse pelo desenvolvimento de artefatos sustentáveis surgiu da proposta de suprir as empresas construtoras que buscam algum tipo de certificação ambiental, sendo, deste modo, o bloco de concreto ecológico, como foi denominado pela empresa, o intérprete desta necessidade.

O bloco ecológico tem em sua composição 30% de agregados reciclados de classe A, adquiridos em uma usina de beneficiamento de RCD, em Camaragibe-PE. Conforme representante comercial da empresa, foi estabelecido este limite de substituição ao agregado convencional em função da variabilidade do resíduo que é recebido (informação verbal)¹. Afirma ainda que, a maior dificuldade encontrada está na determinação da umidade ótima da mistura, já que a absorção de água pelos agregados é determinada de acordo com sua composição. Os blocos ecológicos fazem parte do portfólio da empresa e são vendidos por encomenda.

¹ Informações fornecidas em conversa com a representante comercial da empresa de artefatos de concreto, em Jaboatão dos Guararapes, em abril de 2014.

Figura 12 - Empresa de artefatos de concreto: (a) Pátio da fábrica; (b) Galpão de produção; (c) Pátio de estocagem de artefatos de concreto.

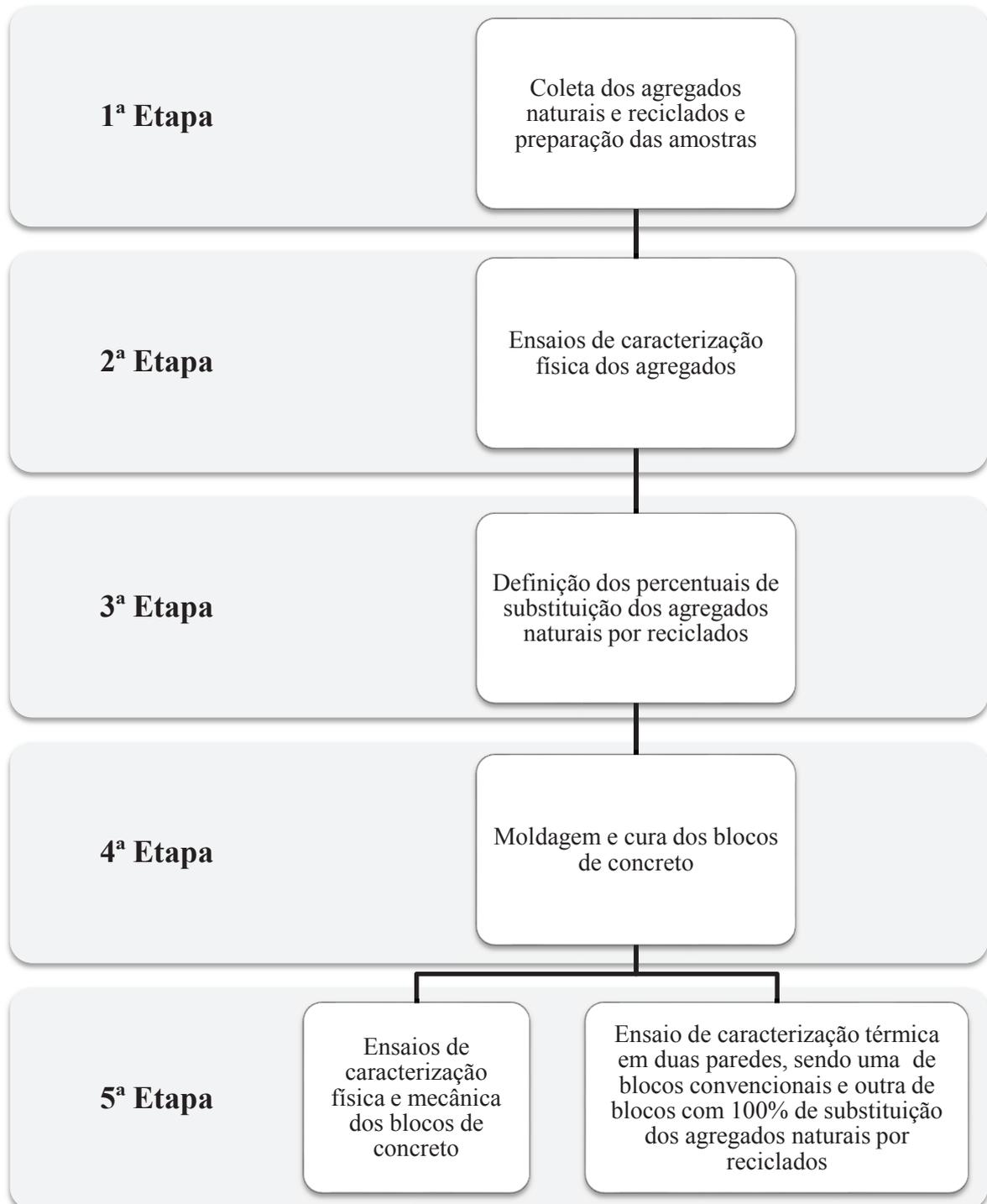


4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

O programa de investigação experimental da pesquisa é constituído de cinco etapas conforme Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma do programa experimental.



4.2 Coleta de materiais

4.2.1 Agregados

Os agregados graúdos e miúdos utilizados na produção do bloco tiveram como referência as condições dispostas na NBR 7211 (ABNT, 2009a), contudo, a própria norma admite o uso de agregados que não estejam plenamente de acordo com a norma, desde que os estudos experimentais os considerem adequados à produção de concreto.

4.2.1.1 Agregado natural

Foram empregados 03 (três) tipos de agregados naturais para a produção dos blocos de referência, ou seja, areia fina, adquirida em jazida localizada no município de Caporã-PB; pó de pedra e brita 0, com material predominante de granito, obtidos em pedreira no Estado de Pernambuco. A areia fina e o pó de pedra foram os agregados miúdos naturais usados na pesquisa e a brita 0, o agregado graúdo natural. Os agregados foram armazenados em baias descobertas até sua utilização (Figura 14).

Figura 14 - Agregados naturais: (a) Baia de armazenamento de areia fina; (b) Baia de armazenamento de pó de pedra; (c) Baia de armazenamento de brita 0.



Para caracterização dos agregados naturais, foram coletados 10kg de cada tipo de agregados e encaminhados ao Laboratório Avançado de Construção Civil – LACC, da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – POLI/UPE. Uma visualização das amostras dos agregados naturais empregados nesta pesquisa está apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Amostras de agregados naturais: (a) Areia fina; (b) Pó de pedra; (c) Brita 0.



4.2.1.2 Agregado reciclado

A presença de contaminantes nos agregados pode alterar a composição do concreto, além de inviabilizar a repetição do método para possível experiência posterior. Em se tratando de resíduos de demolição, esse material pode variar de acordo com diversos fatores, como etapa de obra, tipologia, época do ano, entre outros. Assim, de modo a não limitar a origem do resíduo a determinada obra ou serviço, optou-se pela aquisição dos agregados reciclados numa usina de beneficiamento de Resíduos de Construção e Demolição, localizada no município de Camaragibe – PE.

A usina de beneficiamento recebe RCD provenientes de obras da Região Metropolitana do Recife, os quais são transformados em agregados. Ao chegar à usina, o resíduo enviado pelo gerador passa por um processo de triagem visual, onde a caçamba pode ser aceita ou não para

a pesagem, dependendo do grau de contaminação presente. Caso apto, o material é recebido e estocado para posterior britagem. A usina recebe resíduos provenientes de construção e demolição, podendo ter presença de resíduos de concreto, cerâmica, gesso, solo, ferro e madeira, mas apenas os resíduos de concreto, cerâmica e solo são beneficiados para reinserção na indústria da construção (Quadro 2).

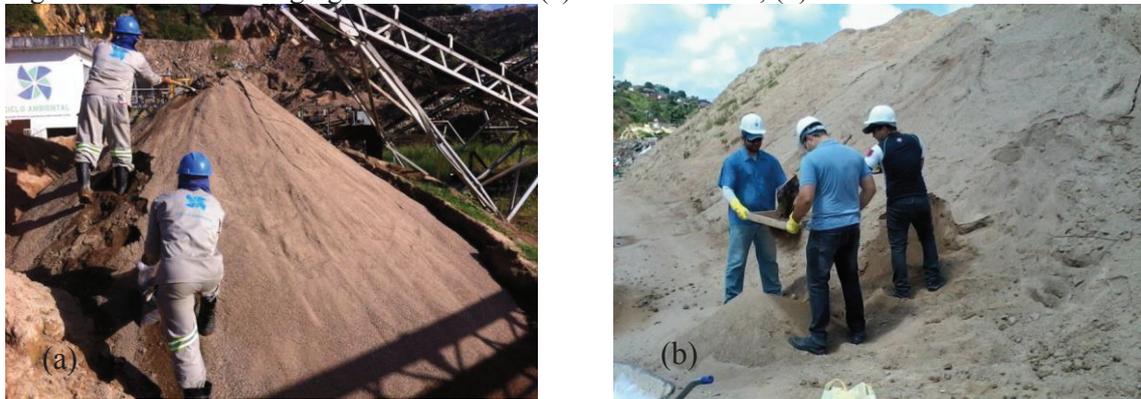
Quadro 2 - Características dos agregados reciclados comercializados pela usina de beneficiamento (Camaragibe-PE).

| | |
|---|--|
|  | <p><i>Areia Reciclada</i></p> <p>Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm. Agregado reciclado proveniente de solo, concreto e cerâmica;</p> |
|  | <p><i>Brita Cascalhinho ou Pedrisco Reciclado</i></p> <p>Material com dimensão máxima característica de 6,3 mm Agregado reciclado proveniente concreto e cerâmica;</p> |
|  | <p><i>Brita Reciclada 19</i></p> <p>Material com dimensão máxima característica inferior a 20 mm, proveniente da reciclagem de concreto, blocos de concreto e cerâmica.</p> |
|  | <p><i>Brita Reciclada 25</i></p> <p>Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, proveniente da reciclagem de concreto, blocos de concreto e cerâmica.</p> |

Tendo em vista as dimensões dos blocos investigados nessa pesquisa, foram coletados agregados miúdos e graúdos, especificados como brita cascalhinho e areia grossa, segundo o Quadro 2, para fins de substituição dos agregados convencionais. Para fins de identificação dos agregados reciclados usados na pesquisa e de modo a facilitar a diferenciação destes dos agregados naturais, a areia grossa reciclada foi denominada de areia reciclada e a brita cascalhinho, de brita reciclada.

Foram coletados 800 kg de areia reciclada e 800 kg de brita reciclada. Por não haver estoque de brita reciclada disponível, foi necessário peneirar a areia reciclada até chegar à granulometria desejada (Figura 16).

Figura 16 - Coleta dos agregados reciclados: (a) Areia reciclada; (b) Brita reciclada.



Para fins de caracterização dos agregados reciclados foram encaminhados 10 kg de cada ao Laboratório Avançado de Construção Civil – LACC, da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – POLI/UPE, enquanto o restante dos materiais foi encaminhado à empresa de artefatos de concreto para serem utilizados na produção dos blocos. Uma visualização das amostras dos agregados reciclados empregados nesta pesquisa está apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Amostras de agregados reciclados: (a) Areia reciclada; (b) Brita reciclada.



4.2.2 Aglomerante

O cimento indicado para a produção de artefatos e peças pré-moldadas de concreto é o cimento Portland CPV ARI, que tem como principal característica alcançar altas resistências iniciais e ter um menor tempo de pega. Esse produto é utilizado, principalmente em função da necessidade de cura rápida tanto para reuso das formas quanto para facilitar a rápida produção e venda das peças.

O aglomerante utilizado foi o cimento CPV de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CPV ARI-RS). O cimento é fornecido a granel para a empresa de artefatos de concreto e armazenado em silo para a fabricação dos elementos. Para a produção dos blocos produzidos nesta pesquisa, foram usados 420 kg de cimento.

As propriedades do aglomerante foram obtidas com o fabricante e estão apresentadas nas Tabelas 19, 20 e 21.

Tabela 19 - Valores de resistência à compressão do aglomerante de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996).

| Resistencia à compressão (MPa) | | | |
|---------------------------------------|-------|--------|---------------------------------------|
| Idade (dias) | Média | Desvio | Especificação NBR 11578 (ABNT, 1991a) |
| 1 | 21,9 | 0,97 | ≥ 14,0 |
| 3 | 29,6 | 1,82 | ≥ 24,0 |
| 7 | 37,2 | 1,78 | ≥ 34,0 |
| 28 | 49,0 | 1,39 | Não aplicável |

Tabela 20 - Propriedades químicas do aglomerante.

| Ensaio químico | | | |
|--|---------------------------|-----------|---------------------------------------|
| Ensaio | Norma técnica | Resultado | Especificação NBR 11578 (ABNT, 1991a) |
| Perda ao Fogo – PF (%) | NBR NM 18 (ABNT, 2004j) | 0,87 | ≤ 4,5 |
| Óxido de Magnésio – MgO (%) | NBR NM 11-2 (ABNT, 2004f) | 3,75 | ≤ 6,5 |
| Anidrido Sulfúrico - SO ₃ (%) | NBR NM 16 (ABNT, 2004i) | 2,62 | ≤ 3,5 |
| Resíduo Insolúvel – RI (%) | NBR NM 15 (ABNT, 2004h) | 1,18 | ≤ 1,0 |
| Óxido de Cálcio Livre – CaO (Livre) (%) | NBR NM 13 (ABNT, 2004g) | 1,75 | Não aplicável |
| Anidrido Carbônico - CO ₂ (%) | - | 1,83 | ≤ 3,0 |

Tabela 21 - Propriedades físicas e mecânicas do aglomerante.

| Ensaio físico e mecânico | | | |
|--|-------------------------|-----------|---------------------------------------|
| Ensaio | Norma técnica | Resultado | Especificação NBR 11578 (ABNT, 1991a) |
| Área Específica (Blaine) (cm ² /g) | NBR NM 76 (ABNT, 1998) | 4280 | ≥ 3000 |
| Massa Específica (g/cm ³) | NBR NM 23 (ABNT, 2001a) | 3,05 | Não aplicável |
| Densidade aparente | - | 1,1 | Não aplicável |
| Finura - Resíduo na Peneira de 0,075 mm (#200) (%) | NBR 11579 (ABNT, 1991b) | 0,6 | ≤ 6,0 |
| Finura - Resíduo na Peneira de 0,044 mm (#325) (%) | NBR 12826 (ABNT, 1993) | 3,07 | Não aplicável |
| Água da Pasta de Consistência Normal (%) | NBR NM 43 (ABNT, 2003a) | 28,9 | Não aplicável |
| Início de Pega (h:min) | NBR NM 65 (ABNT, 2003c) | 2:30 | ≥ 1:00 |
| Fim de Pega (h:min) | NBR NM 65 (ABNT, 2003c) | 3:15 | ≤ 10:00 |
| Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente (mm) | NBR 11582 (ABNT, 1991c) | 0,00 | ≤ 5 |

4.2.3 Aditivo

Para a produção dos blocos de concreto foi usado um aditivo plastificante multifuncional retardador de pega para concreto sem *slump* – Murasan BWA da MC - Bauchemie Brasil. Trata-se de um aditivo líquido de cor azul e densidade de 1,0 g/cm³. Esse tipo de aditivo é usado a fim de melhorar a compactação na moldagem e a superfície do elemento de concreto. O produto é fornecido em embalagens de 1000 kg, tendo sido utilizados 1,2 L de aditivos para a produção dos blocos de concreto usados nesta pesquisa.

4.3 Ensaio de caracterização dos agregados

Os agregados foram caracterizados a partir de ensaios previstos na NBR 7211 (ABNT, 2009a) a fim de investigar suas propriedades físicas e mecânicas. Não existem normas de caracterização para agregados reciclados, sendo indicado o uso de normas referentes a agregados convencionais. A Tabela 22 indica um resumo dos ensaios conduzidos no programa de investigação experimental para os agregados.

Tabela 22 - Ensaio de caracterização dos agregados.

| Ensaio | Norma Técnica |
|---------------------------------|--------------------------|
| Granulometria | NBR NM 248 (ABNT, 2003d) |
| Massa Específica | NBR NM 52 (ABNT, 2009b) |
| Teor de Materiais Pulverulentos | NBR NM 46 (ABNT, 2003b) |
| Absorção de água | NBR NM 30 (ABNT, 2001b) |

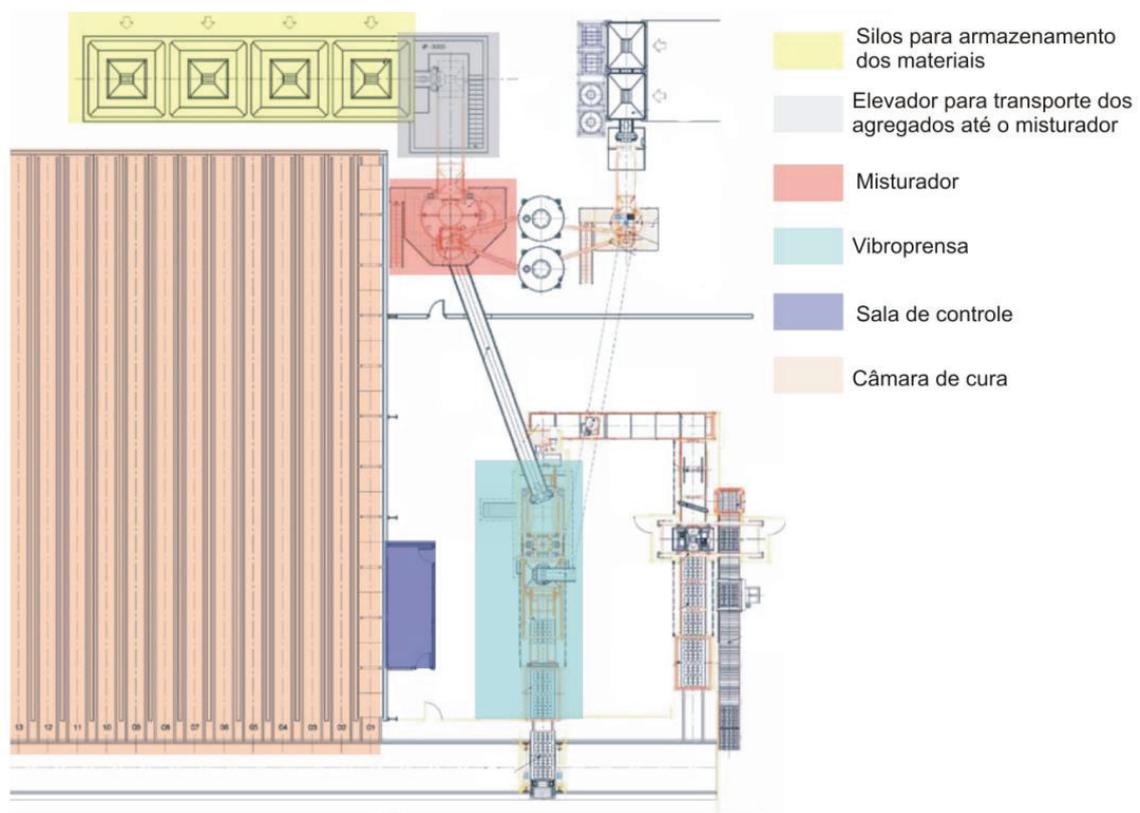
4.4 Produção dos blocos de concreto

4.4.1 Famílias de blocos de concreto estudadas

Foram produzidas nesta pesquisa 04 (quatro) famílias de blocos utilizando-se diferentes proporções (0, 30, 50 e 100%) entre agregados convencionais e reciclados, denominadas na pesquisa de BC, BR30, BR50 E BR100, respectivamente. Para todos os traços com substituição de agregados naturais por agregados reciclados, foi substituído o agregado gráúdo natural pelo agregado gráúdo reciclado e, no caso dos agregados miúdos, foi substituído o pó de pedra pela areia reciclada, uma vez que os dois materiais apresentaram granulometrias semelhantes, como será demonstrado no Capítulo 5.

Para a produção e armazenamento provisório dos blocos foram usadas as instalações de uma empresa de artefatos de concreto, localizada no município de Jaboatão dos Guararapes-PE. A planta da empresa com as locações dos equipamentos encontra-se na Figura 18.

Figura 18 - Planta da empresa de artefatos de concreto.



4.4.2 Método de dosagem

A proporção dos insumos empregados na produção do bloco obedeceu a um traço comum comercial de modo a comparar a qualidade dos blocos produzidos em função apenas dos agregados utilizados. O traço usado foi de 1:10 (cimento: material seco).

O traço de 1:10 é usado pela empresa de artefatos de concreto, determinado segundo a metodologia proposta por Fernandes (2013), estabelecido pelo consultor da empresa².

Para determinação de traços ideais com outros tipos de agregados é fundamental executar experimentos com diferentes proporções de agregados, cimento e água. Contudo, a elaboração destes traços em laboratório se dá de maneira ineficiente, uma vez que as condições de mistura, alimentação da vibroprensa e, principalmente, da prensagem do bloco não são passíveis de reprodução em laboratório (FERNANDES, 2013).

Desta forma, os traços referentes às quatro famílias propostas (BC, BR30, BR50 e BR100), foram similares, sendo os agregados correlatos medidos em massa (kg), havendo uma substituição proporcional dos agregados naturais por reciclados e mantendo as mesmas quantidades de cimento, aditivo e água na mistura.

Foi usado o traço 1:10 (cimento: materiais secos) e as proporções de agregados utilizadas em cada família encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23 - Nomenclatura e traços dos blocos produzidos.

| Famílias de blocos | Materiais (%) | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------|---------|----------------------|-----------------|
| | Aglomerante Cimento ARI CPV-RS | Agregados naturais | | | Agregados reciclados | |
| | | Areia fina | Pó de pedra | Brita 0 | Areia reciclada | Brita reciclada |
| BC ⁽¹⁾ | 1 | 1 | 5,71 | 2,86 | - | - |
| BR30 ⁽²⁾ | 1 | 1 | 4 | 1,91 | 1,03 | 0,86 |
| BR50 ⁽³⁾ | 1 | 1 | 2,86 | 1,43 | 2,86 | 1,43 |
| BR100 ⁽⁴⁾ | 1 | 1 | - | - | 5,71 | 2,86 |

⁽¹⁾ BC: Bloco de concreto convencional;

⁽²⁾ BR30: Bloco com substituição de 30% de agregados naturais por reciclados;

⁽³⁾ BR50: Bloco com substituição de 50% de agregados naturais por reciclados;

⁽⁴⁾ BR100: Bloco com substituição de 100% de agregados naturais por reciclados.

² Idário Fernandes, consultor em tecnologia do concreto e sistemas construtivos à base de cimento, com especialidade em blocos, pisos intertravados e outros produtos vibro prensados.

O uso do mesmo traço para todas as famílias de blocos produzidas facilita a reprodução dos blocos em escala industrial, logo, optou-se por esta manutenção em função de motivos operacionais e de logística da empresa de artefatos de concreto.

4.4.3 Moldagem

Inicialmente, foram produzidos os blocos convencionais, prevendo a regulagem da máquina para a prensagem adequada e correta altura dos blocos (Figura 19). Os agregados naturais foram transportados das baias até os silos para a produção dos artefatos de concreto.

O traço predeterminado é informado ao programa de computador responsável por pesar e selecionar os agregados necessários à produção. Desta forma, para o bloco convencional, família BC, composto apenas com materiais convencionais, os agregados foram liberados pelo silo e dispostos numa esteira, que também é uma balança, e pesados até atingirem o seu peso previsto.

Figura 19 - Seleção dos agregados: (a) Silos de armazenamento dos agregados naturais; (b) Deposição dos agregados na esteira; (c) Caçamba de recebimento dos agregados previamente pesados; (d) Transporte dos agregados até o misturador.



Os materiais pesados foram colocados em um recipiente de forma aleatória, para enfim, serem colocados no misturador. Buttler (2007) afirma que a ordem de lançamento dos materiais no misturador não tem muita interferência no concreto.

No misturador de eixo vertical foram adicionados o cimento, o aditivo superplastificante e a água, até atingir a umidade ótima que vai de 7 a 11%. Para este processo da empresa, não há como determinar a umidade ótima antes da água ser adicionada à mistura. Fatores como umidade inicial do agregado e sua absorção acabam por alterar a umidade do concreto a cada mistura (Figura 20).

A verificação da umidade ótima é realizada por um operário com prévio conhecimento da aparência e textura do concreto com quantidade de água suficiente, mas só é comprovada após a moldagem dos blocos, quando estes apresentam ranhuras na sua superfície. Essa conferência da água é feita a cada nova mistura.

Figura 20 - Produção dos blocos convencionais: (a) Mistura dos agregados, cimento, água e aditivo; (b) Transporte do concreto até a vibroprensa; (c) Conferência da altura do primeiro bloco.



Contudo, a fim de evitar necessidade de ajustes a cada produção, a umidade ótima foi ajustada para a produção dos blocos BC e repetido para as demais famílias. O teor de água ideal foi de 8,28%, correspondente a 83,2 L de água a cada família de blocos produzida. O concreto foi transportado por uma esteira até a vibroprensa que é capaz de produzir 24 (dezesesseis) blocos por ciclo.

Após a prensagem dos blocos, foram conferidas as alturas dos blocos do início e final da fôrma com uma trena. Dessa forma, quando o bloco atingiu 190 ± 3 mm, altura prevista para os elementos experimentais, a prensa estava calibrada e procedeu-se a moldagem dos traços seguintes.

Para os demais traços, a quantidade de material reciclado previsto para substituição foi adicionada diretamente na esteira, subtraída da massa dos materiais provenientes dos silos. Dessa forma, se procedeu para as 03 (três) famílias com adição de material reciclado (Figura 21).

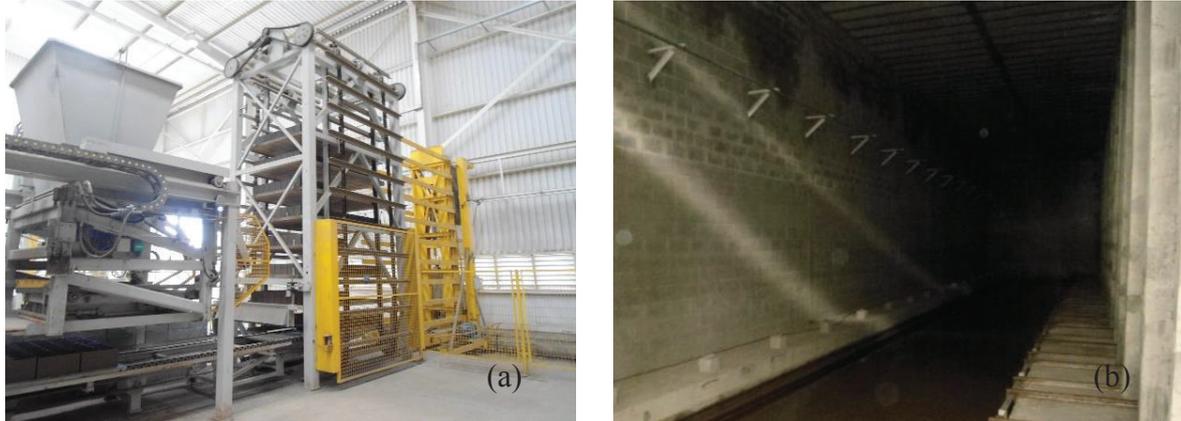
Figura 21 - Produção dos blocos com agregados reciclados: (a) Transporte do agregado reciclado até a esteira; (b) Adição do material reciclado na mistura; (c) Blocos com agregados reciclados após a moldagem.



4.4.4 Cura

Os blocos produzidos foram colocados de forma mecânica na câmara de cura e submetidos à cura úmida. Devido ao clima quente e úmido da cidade do Recife, não foi necessário o aumento da temperatura no processo de cura dos blocos (Figura 22).

Figura 22 - Cura dos blocos de concreto: (a) Equipamento para transporte dos blocos até a câmara de cura; (b) Câmara de cura da empresa de artefatos de concreto.



Os elementos permaneceram por 28 dias em cura e após esse período foram colocados no pátio de estocagem da empresa até serem transportados para o Laboratório Avançado de Construção Civil – LACC, da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – POLI/UPE para a realização dos ensaios de caracterização física e mecânica. Posteriormente, 48 blocos foram transportados ao Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), na cidade de João Pessoa-PB, para a construção das paredes do ensaio de caracterização térmica.

4.4.5 Ensaio para caracterização física, mecânica e térmica dos blocos

4.4.5.1 Ensaios físicos-mecânicos

Os blocos produzidos foram submetidos à análise dimensional e a ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água conforme as NBR 6136 (ABNT, 2014) e NBR 12118 (ABNT, 2013).

4.4.5.1.1 Análise dimensional

Para análise dimensional, foram medidos 12 (doze) blocos de cada família, sendo verificadas suas dimensões longitudinal e transversal, espessura das paredes e dimensões dos furos.

Para cada dimensão, foram feitas 3 (três) aferições, sendo a média usada na identificação da dimensão do bloco. Foram feitas duas medições para cada parede longitudinal e uma para cada parede transversal. Os furos dos blocos foram medidos longitudinalmente e transversalmente, uma vez para cada furo.

Para a medição das dimensões dos blocos, foi usado um paquímetro metálico para medição de largura, altura, espessura das paredes e dimensão dos furos e uma régua metálica para medir o comprimento. As tolerâncias permitidas para aceitação dos blocos é de ± 2 mm para largura, ± 3 mm para altura e comprimento e -1 mm para as paredes, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2014).

4.4.5.1.2 Área líquida e massa específica

Para determinação da área líquida dos blocos foram ensaiados 06 (seis) blocos de cada família, segundo a NBR 12118 (ABNT, 2013). Inicialmente, os blocos foram secos em estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingirem massa constante, numerados e pesados. Em seguida, foram submersos em água por 24 (vinte e quatro) horas, e posteriormente secos com toalha a fim de obter a condição saturada superfície seca e, novamente pesados. Os dois valores de massa obtidos foram utilizados para a determinação das massas específicas seca e saturada dos blocos.

Para obtenção da área líquida foi necessária a determinação da massa aparente dos blocos, ou seja, a massa dos blocos saturados submersos em água à temperatura de $23\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 23).

Figura 23 - Determinação de área líquida: pesagem do bloco submerso.



De posse da área líquida dos blocos de concreto foi possível determinar o volume destes e calcular suas massas específicas. A massa específica do bloco seco é igual à massa do bloco

seco em estufa dividido pelo volume do bloco, e a massa específica do bloco saturado superfície seca, a massa do bloco saturado dividido pelo volume do bloco.

A área líquida é dada em função da Equação (3):

$$Aliq = \frac{m_2 - m_3}{h \times \gamma} \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde,

Aliq: é a área líquida, expressa em milímetros quadrados;

m₂: é a massa do corpo de prova saturado, em gramas;

m₃: é a massa aparente do corpo de prova, em gramas;

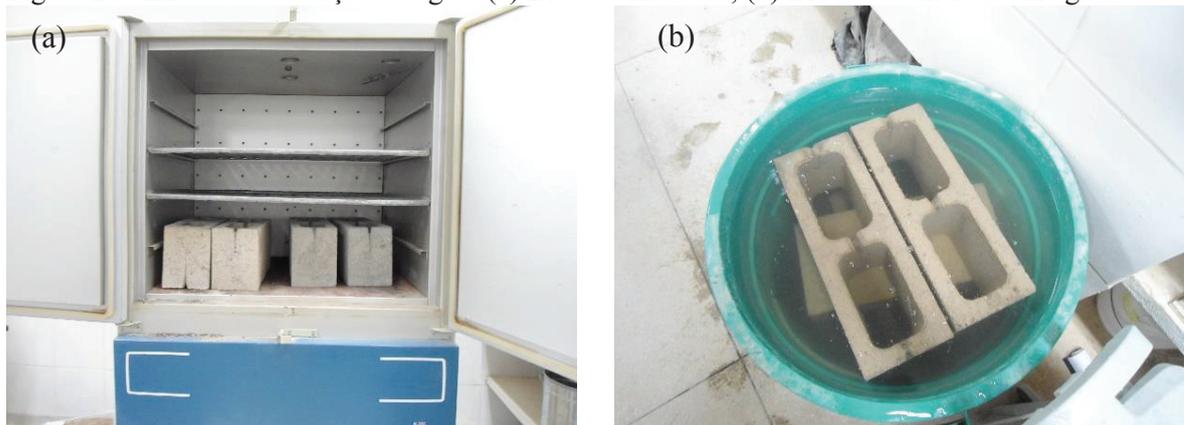
h: é a altura média do corpo de prova, em milímetros;

γ: é a massa específica da água usada no ensaio, em gramas por centímetro cúbico.

4.4.5.1.3 Absorção de água

Para determinação da absorção de água dos blocos, foram ensaiados 06 (seis) blocos por família, segundo a NBR 12118 (2013). Foram repetidos os procedimentos para obtenção da massa seca em estufa e da massa saturada com superfície seca, realizados no ensaio de área líquida e massa específica (Figura 24).

Figura 24 - Ensaio de absorção de água: (a) Blocos em estufa; (b) Blocos submersos em água.



A absorção de água é dada em função da Equação (4):

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Equação (4)}$$

Onde,

a: é a absorção dada em porcentagem;

m2: é a massa do corpo de prova saturado, em gramas;

m1: é a massa do corpo de prova seco em estufa, em gramas.

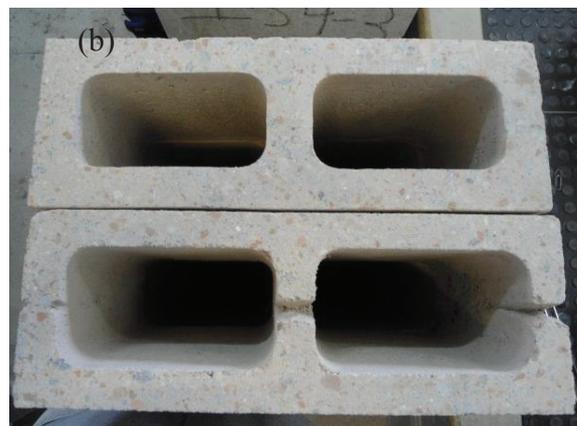
4.4.5.1.4 Resistência à compressão simples

Para o ensaio de resistência à compressão simples foram utilizados 12 (doze) blocos de cada família, segundo a NBR 12118 (ABNT, 2013), os quais foram encaminhados a uma empresa especializada em consultoria técnica e ensaios de materiais para a indústria da construção civil, localizada na cidade do Recife – PE.

Antes de submeter os blocos à prensa, foi necessário regularizar suas superfícies. Essa regularização pode ser dada com capeamento ou por meio de retífica por processo de via úmida. O segundo processo foi escolhido por sua facilidade, além de não haver problemas relacionados a possíveis quebras ou falhas na pasta de capeamento (Figura 25).

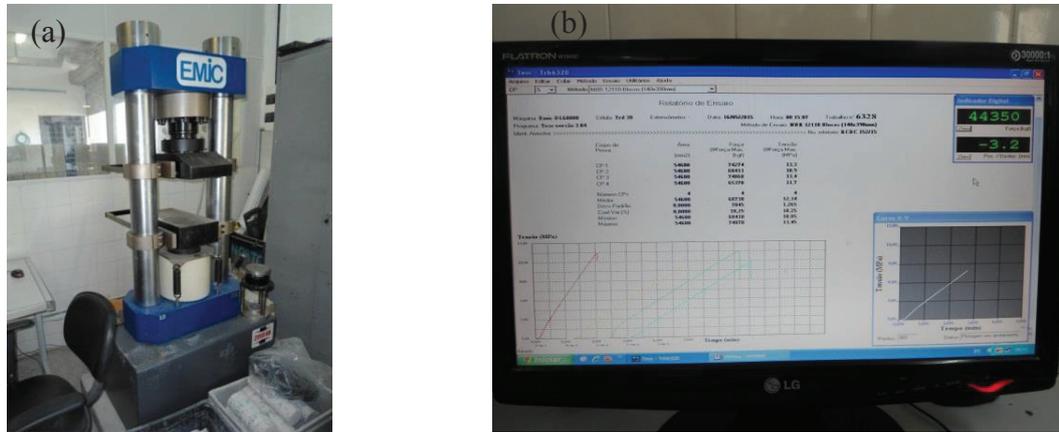
Os blocos foram retificados e levados à estufa por 24 (vinte e quatro) horas. Após a saída da estufa, os blocos foram novamente medidos em largura e comprimento, a fim de que, caso houvesse alguma alteração na área da superfície após a retificação dos blocos, esta pudesse ser verificada e corrigida para a determinação da resistência do bloco.

Figura 25 - Retificação dos blocos: (a) Retífica via úmida para blocos de concreto; (b) Aparência do bloco após retificação.



As amostras foram submetidas à ruptura em prensa Emic DL60000 com Célula Trd 30 e seus resultados apresentados no programa Tesc versão 3.04 (Figura 26).

Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão simples: (a) Prensa utilizada; (b) Resultados obtidos em software.



Os valores médios de resistência à compressão simples são dados pela soma das resistências individuais dos blocos dividida pelo número de amostras. Contudo, o fato de apresentar uma média dos valores, pode ocasionar um erro de interpretação dos resultados evitando que sejam avaliadas as reais condições dos blocos. Dessa forma, a NBR 6136 (ABNT, 2013) apresenta o chamado “valor estimado de resistência característica à compressão do bloco” ($f_{bk,est}$). O $f_{bk,est}$ pode ser calculado a partir da Equação (5).

$$f_{bk,est} = 2 \left[\frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i-n)}}{i - 1} \right] - f_{bi} \quad \text{Equação (5)}$$

Sendo,

$i = n/2$, se n for par;

$i = (n-1)/2$, se n for ímpar;

Onde,

$f_{bk,est}$: Resistência característica estimada da amostra (MPa);

$f_{b(1)}, f_{b(2)} \dots f_{b(i)}$: valores de resistência à compressão individuais dos corpos de prova da amostra em ordem crescente;

n : quantidade de blocos da amostra.

Esse valor não deve ser menor que $\psi \cdot f_{b(1)}$, sendo os valores de ψ em função da quantidade de blocos da amostra, 12 (doze) no caso desta pesquisa, como é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Valores de ψ em função da quantidade de blocos.

| Quantidade de blocos | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 18 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ψ | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 1,01 | 10,2 | 1,04 |

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2013).

Para análise dos resultados da pesquisa foram utilizados tanto os valores médios quanto os valores característicos de resistência à compressão.

4.4.5.2 Caracterização térmica do bloco

Os ensaios de análise térmica dos blocos de concreto foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), na cidade de João Pessoa-PB.

Para tanto, foram selecionados os blocos BC e BR100, de modo a verificar a influência no comportamento térmico da parede em função do uso de agregados reciclados na composição do bloco.

O ensaio consistiu na construção de duas paredes medindo 1,00 m x 1,20 m, sendo com blocos da família BC e outra da família BR 100. Após a cura da argamassa de assentamento, em 03 (três) dias, a parede foi pintada com cal de modo a ficar na cor branca, a fim de que não houvesse interferência da cor do elemento no ensaio (Figura 27). A secagem da cal teve duração de 24 (vinte e quatro) horas. Ambas as paredes ensaiadas foram construídas da mesma forma e não receberam revestimento uma vez que o foco do ensaio estava no elemento bloco.

Figura 27 - Paredes construídas com blocos produzidos na pesquisa, pintadas com cal para o ensaio de análise térmica.



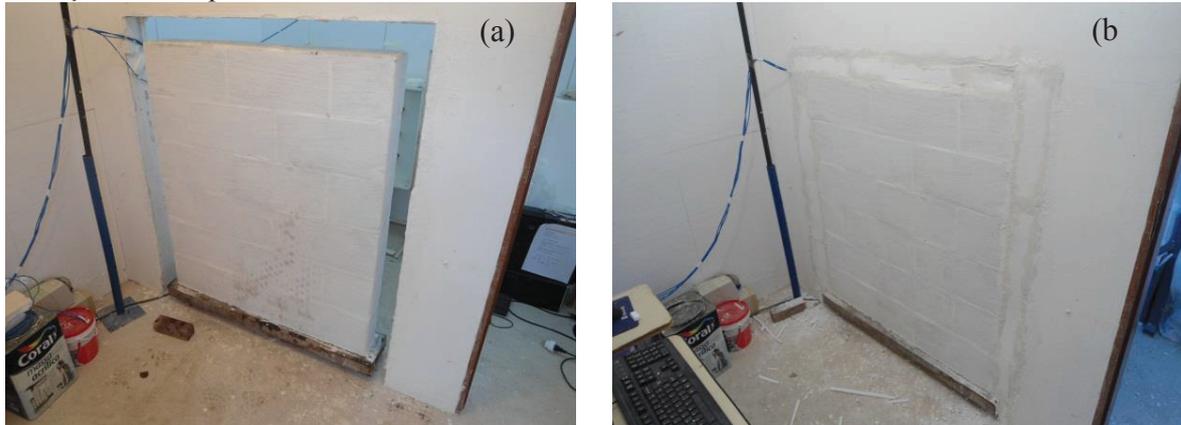
A câmara térmica é uma edificação constituída de duas salas onde uma delas representa o exterior da edificação, submetendo a parede a ciclos de aquecimento e resfriamento e o outro, o interior. Os ciclos de aquecimento são obtidos por meio de um conjunto com 12 (doze) lâmpadas incandescentes de 150 W e os de resfriamento, por um ar condicionado de 12.000 BTU (Figura 28).

Figura 28 - Câmara térmica: (a) Vista externa; (b) Aparelho de aquecimento; (c) Aparelho de resfriamento.



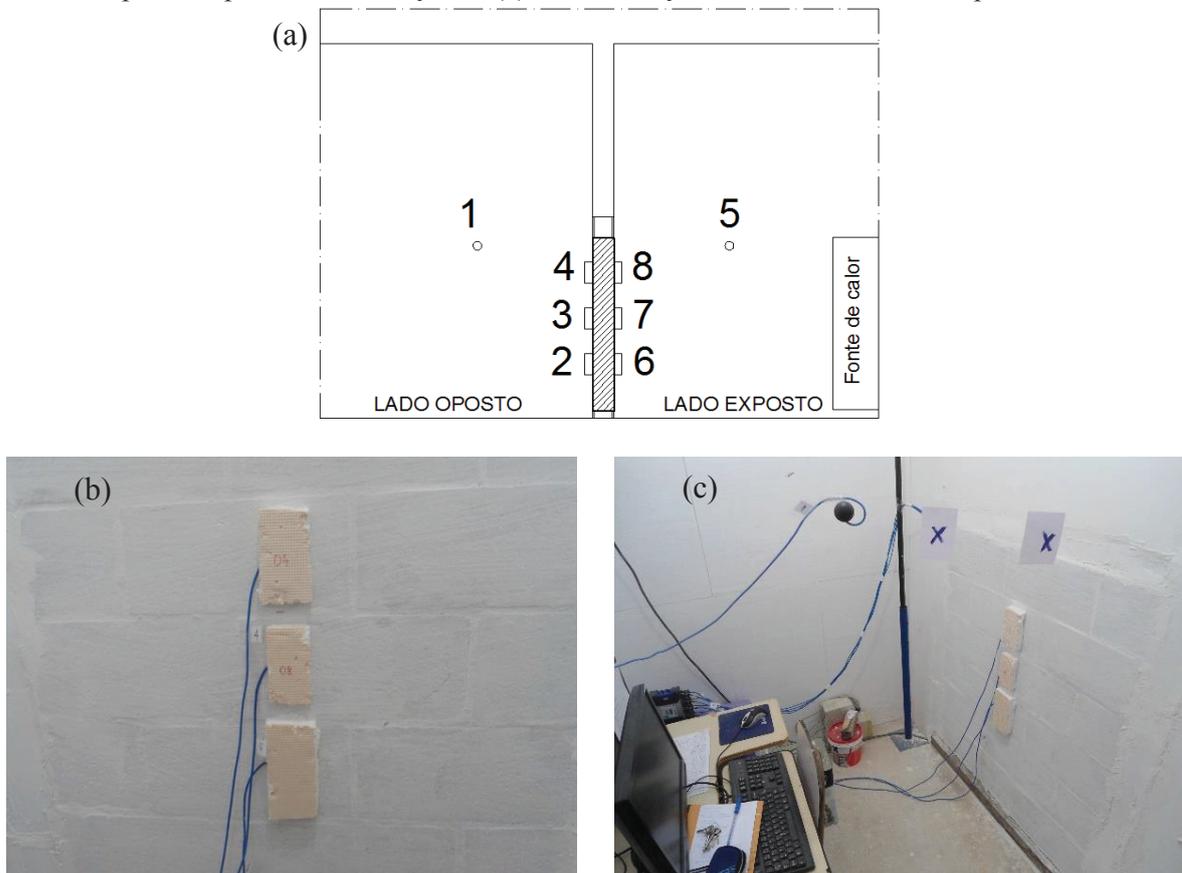
Inicialmente, as paredes de blocos BC e BR100 foram transferidas para a câmara térmica, centralizada na parede de ensaio e todos os espaços não ocupados pela parede foram vedados com isopor e massa acrílica (Figura 29).

Figura 29 - Ensaio de caracterização térmica: (a) Posicionamento no centro da câmara térmica; (b) Vedação com isopor e massa acrílica.



Foram utilizados 08 (oito) termopares tipo T, dos quais 03 (três) foram colocados na face exposta ao calor, alinhados verticalmente, 03 (três) foram colocados na outra face da parede de modo a ficarem na posição oposta aos primeiros, e 02 (dois) termopares foram colocados nos globos negros posicionados a 1,5 m do piso e centralizados nos dois ambientes, como mostra a Figura 30.

Figura 30 - Posicionamento dos termopares: (a) Desenho esquemático; (b) Detalhe do posicionamento dos termopares na parede do lado oposto; (c) Detalhe do posicionamento dos termopares no ambiente.



Os termopares foram ligados a um sistema de aquisição de dados (MX840A da HMB) que é capaz de registrar as temperaturas a cada segundo. Deste modo, a partir da média aritmética dos valores, foram calculadas as temperaturas resultantes a cada hora.

O ensaio foi realizado duas vezes com cada parede, sendo as paredes expostas à fonte de calor durante 04 (quatro) horas e à refrigeração por 08 (oito) horas, proporcional a um ciclo comum de um dia.

Dessa forma, foi possível comparar os resultados das duas paredes a fim de relacionar os valores obtidos à composição dos blocos.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Caracterização dos agregados

5.1.1 *Composição granulométrica*

Foram realizados ensaios de determinação da composição granulométrica dos agregados naturais e reciclados de acordo com a NBR 248 (ABNT, 2003d).

5.1.1.1 *Agregado miúdo*

As composições granulométricas dos agregados miúdos utilizados na presente pesquisa encontram-se no Apêndice A.

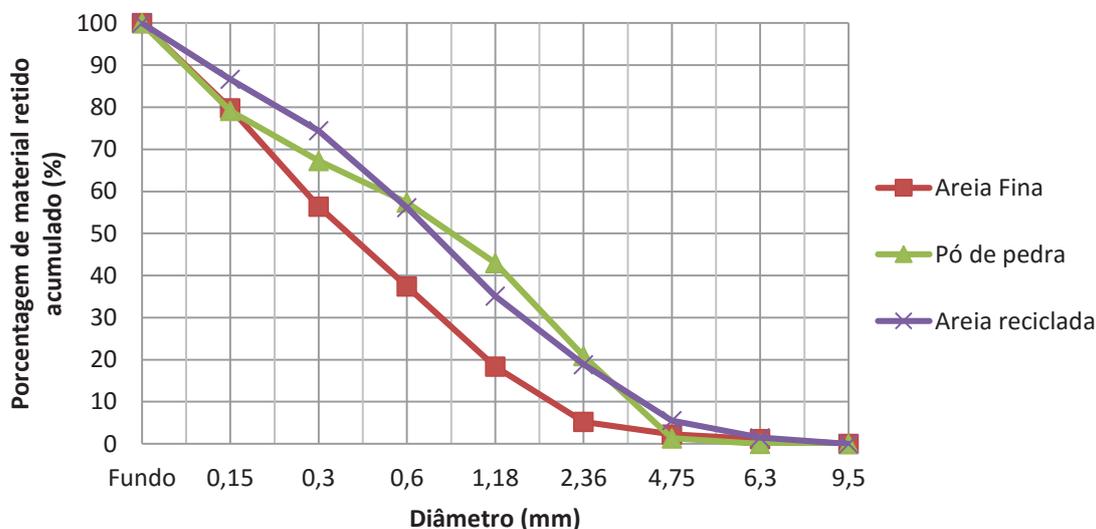
O diâmetro máximo da areia fina foi igual ao do pó de pedra, 4,75 mm, e menor que o da areia reciclada, 6,3 mm, entretanto, o pó de pedra e areia reciclada tiveram características semelhantes em termos de granulometria, tendo módulos de finura com valores próximos. Apesar disso, o maior percentual retido no caso do pó de pedra foi na peneira 1,18 mm e o da areia reciclada 0,6 mm.

Em relação ao agregado miúdo reciclado, o módulo de finura encontrado foi superior aos das pesquisas de Patto (2006) que usou um agregado com módulo de finura igual 2,63 e de Paula (2010), com 2,08. Da mesma forma, o diâmetro máximo do agregado miúdo reciclado foi superior aos mencionados na bibliografia, tendo Patto (2006) e Lintz et al. (2012), apresentado valor igual a 4,75 mm e Paula (2010), 2,36 mm de diâmetro máximo.

Observou-se também que o módulo de finura dos agregados miúdos reciclados foi superior aos naturais, questão relatada também por Patto (2006) e Paula (2010), que apresentaram módulos de finura para agregados miúdos naturais iguais a 2,2 e 0,93, respectivamente.

As curvas granulométricas dos agregados miúdos usados para a produção dos blocos de concreto produzidos nesta pesquisa encontram-se na Figura 31. Observou-se que as características granulométricas do pó de pedra e da areia reciclada estão bem próximas, sendo esse fator responsável pela escolha de ser este, o pó de pedra, o agregado miúdo substituído por RCD no proporcionamento dos blocos.

Figura 31 - Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados para composição dos blocos.



5.1.1.2 Agregado Graúdo

As composições granulométricas dos agregados graúdos usados para a presente pesquisa encontram-se no Apêndice A.

A partir da análise de composição granulométrica, foi possível perceber que os diâmetros máximos encontrados para os agregados naturais e reciclados foram os mesmos, 9,5 mm, o que é importante, uma vez que para a produção de blocos de concreto a dimensão máxima característica do agregado deve ser inferior à metade da menor espessura da parede do bloco, que fica entre 25 mm \pm 1 mm, para blocos Classes A ou B e 18 \pm 1 mm, para blocos de Classe C, segundo as normas da NBR 6136 (ABNT, 2014), como visto na Tabela 8.

Observou-se, também, que o módulo de finura do agregado graúdo reciclado é maior que o do natural, sendo este fato observado por Patto (2006), que obteve valor igual a 2,62 para natural e 6,14 para reciclado. Sousa (2001), Carneiro (2005) e Castro (2012) obtiveram módulos de finura dos agregados reciclados inferiores aos dos agregados naturais.

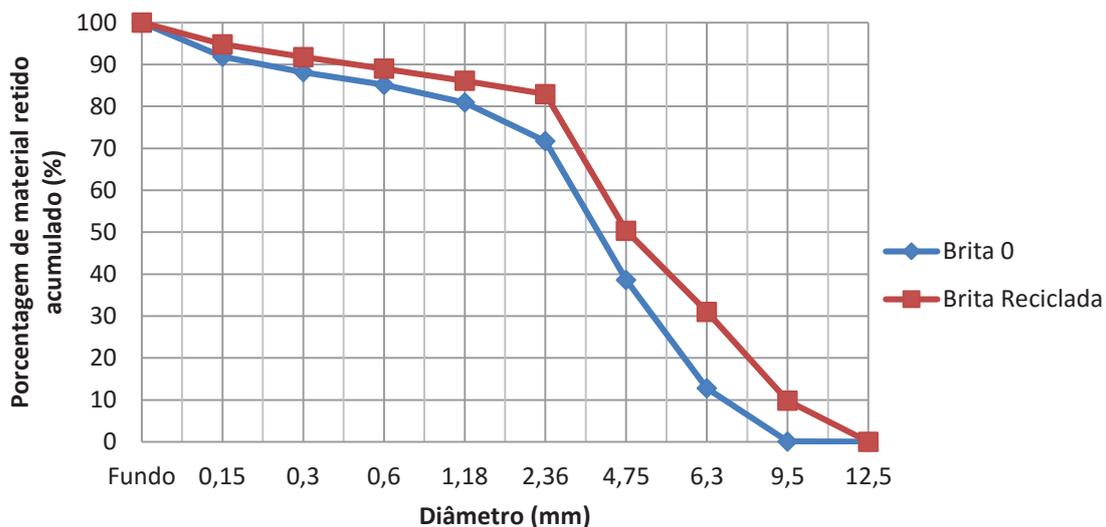
Sousa (2001), Carneiro (2005), Castro (2012) e Lintz et al. (2012) obtiveram valores de diâmetro máximo igual a 9,5, como os encontrados a partir da composição granulométrica da brita reciclada. Já Patto (2006), encontrou diâmetro máximo igual a 12,5.

Apesar do diâmetro máximo característico encontrado por Patto (2006) ser igual a 12,5 mm e os experimentos conduzidos por ele resultarem em blocos com aproximadamente 15 mm de espessura, o autor não relatou nenhuma dificuldade relacionada ao tamanho do agregado.

A Figura 32 apresenta as curvas granulométricas dos agregados graúdos utilizados para a produção dos blocos de concreto.

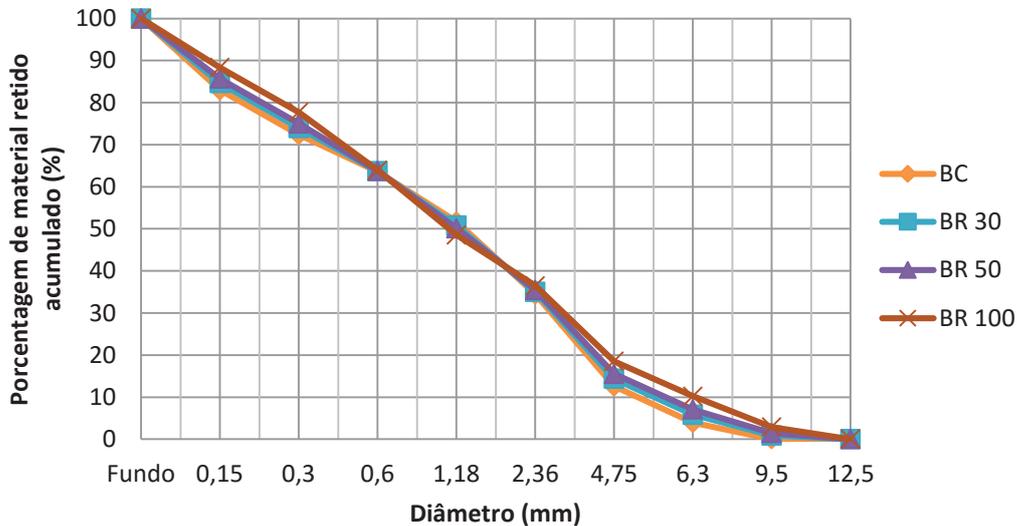
Pode-se verificar que as curvas granulométricas dos agregados graúdos são semelhantes, tendo o maior percentual de material retido na peneira 2,36 mm. É possível notar também que, a brita reciclada apresenta grãos maiores, uma vez que cerca da metade da amostra foi retida na peneira de 4,75 mm e também que tem um percentual de material retido na peneira 9,5 mm superior ao da brita 0.

Figura 32 - Curva granulométrica dos agregados graúdos utilizados para composição dos blocos.



A Figura 33 apresenta a curva granulométrica para cada família de bloco, considerando as porcentagens de cada agregado e suas propriedades de granulometria. É possível observar que as curvas estão bem próximas mesmo considerando as particularidades de cada tipo de agregado.

Figura 33 - Curva granulométrica dos agregados por família de blocos.



5.1.2 Material Pulverulento

O ensaio para determinação do teor de materiais pulverulentos dos agregados naturais e reciclados foi realizado de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003b).

5.1.2.1 Agregado miúdo

Os resultados de teor de materiais pulverulentos dos agregados miúdos são apresentados na Tabela 30.

Para todos os agregados miúdos naturais utilizados, o teor de materiais pulverulentos esteve acima do limite máximo aceitável proposto pela NBR 7211 (ABNT, 2009a). Esse fator deve estar relacionado ao fato da supracitada norma ser referente a agregados para produção de concreto, sendo o teor de finos presentes no concreto plástico, fator prejudicial uma vez que aumenta o consumo de água e o fator água:cimento e reduz a resistência do concreto. Para blocos, o teor de finos é algo necessário à redução do índice de vazios e a melhor compactação do elemento.

O processo de britagem e armazenamento do agregado reciclado facilita a formação de partículas finas incorporadas ao agregado, aumentando, desta forma, o seu teor de materiais pulverulentos em relação aos agregados naturais. Para a areia reciclada, o valor de 17,92%,

conforme Tabela 25, é aceitável pela norma para ARM miúdos, proposto pela NBR 15116 (ABNT, 2004e).

Tabela 25 - Teores de materiais pulverulentos dos agregados miúdos usados na produção dos blocos de concreto.

| Agregado | Teor de materiais pulverulentos (%) – NBR NM 46 (ABNT, 2003b) | Limite máximo aceitável relativo à massa do agregado miúdo (%) – NBR 7211 (ABNT, 2009a) | | Limite para ARM (%) – NBR 15116 (ABNT, 2004e) |
|-----------------|---|---|--|---|
| | | Concreto submetido a desgaste superficial | Concreto protegido do desgaste superficial | |
| Areia fina | 9,39 | 3,0 | 5,0 | ≤20 |
| Pó de pedra | 15,74 | | | |
| Areia reciclada | 17,92 | | | |

O teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados miúdos apresentado por Paula (2010) tem valor igual a 10,09%, sendo inferior ao da presente pesquisa e dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 15116 (ABNT, 2004e).

5.1.2.2 Agregado graúdo

Os resultados de teor de materiais pulverulentos dos agregados graúdos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Teores de materiais pulverulentos dos agregados graúdos usados na produção dos blocos de concreto.

| Agregado | Teor de materiais pulverulentos (%) – NBR NM 46 (ABNT, 2003b) | Limite máximo aceitável relativo à massa do agregado graúdo (%) – NBR 7211 (ABNT, 2009a) | Limite para ARM (%) – NBR 15116 (ABNT, 2004e) |
|-----------------|---|--|---|
| Brita 0 | 5,86 | 1,0 | ≤10 |
| Brita reciclada | 14,9 | | |

Da mesma forma que os agregados miúdos, o agregado graúdo natural usado para a produção dos blocos da presente pesquisa foi superior aos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a). A brita reciclada também tem o teor de finos acima do limite permitido para ARM, o que pode ser esperado uma vez que cerca da metade do material passa pela peneira 4,75 mm, representando a fração miúda do agregado.

Sousa (2001) encontrou 6,72% de materiais finos em seu agregado gráudo natural e 14,23% em seu agregado gráudo reciclado, valores semelhantes aos obtidos na presente pesquisa. Carneiro (2005) e Castro (2012) apresentaram 6,0% e 6,3% de materiais pulverulentos em seus agregados gráudos reciclados, valores inferiores aos obtidos na pesquisa. Contudo, o teor de materiais pulverulentos presente no material é relativo à composição do RCD e aos processos de britagem e armazenagem do agregado, o que justifica a variação dos valores.

5.1.3 *Massa específica e massa específica aparente*

5.1.3.1 *Agregado miúdo*

A Tabela 27 apresenta os resultados de massa específica aparente do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica dos agregados miúdos.

Tabela 27 - Valores de massa específica aparente do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica dos agregados miúdos usados na produção dos blocos de concreto.

| Agregado | Massa específica aparente do agregado seco (g/cm³) | Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³) | Massa específica do agregado (g/cm³) |
|-----------------|--|---|--|
| Areia fina | 2,62 | 2,62 | 2,63 |
| Pó de pedra | 2,66 | 2,67 | 2,68 |
| Areia reciclada | 2,28 | 2,43 | 2,64 |

O valor encontrado para massa específica da areia, 2,63 g/cm³, é semelhante aos encontrados por Sousa (2001), 2,61 g/cm³ e Carneiro (2005), Patto (2006) e Lintz et al. (2012), 2,62 g/cm³; e o de pó de pedra, 2,68 g/cm³, se aproxima do valor encontrado por Castro (2012).

Com relação à areia reciclada, o valor 2,64 g/cm³, foi superior aos valores encontrados por todos os autores da literatura consultados nessa pesquisa, sendo o menor valor igual a 2,14 g/cm³ (MATAR e DALATI, 2011) e o maior, 2,52 g/cm³ (PAULA, 2010). A variação dos valores de massa específica observada está relacionada à composição do agregado reciclado.

5.1.3.2 *Agregado gráudo*

A Tabela 28 apresenta os resultados de massa específica aparente do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica dos agregados gráudos.

Observou-se que a massa específica da brita reciclada é inferior à da brita 0, sendo essa característica observada em todos os autores, relacionados na revisão bibliográfica, que utilizaram agregados graúdos reciclados em suas pesquisas.

O valor de massa específica da brita 0, 2,78 g/cm³, se situou entre os valores estudados na bibliografia, que ficaram entre 2,40 g/cm³ (SABAI et al. 2013) e 2,86 g/cm³ (LINTZ et al. 2012). No caso da brita reciclada, o valor de massa específica ficou acima dos valores encontrados nas referências que tiveram como mínimo 2,04 g/cm³ (PATTO, 2006) e máximo 2,60 g/cm³ (CASTRO, 2012), o que pode ser justificado pela variabilidade do agregado reciclado.

Tabela 28 - Valores de massa específica aparente do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e massa específica dos agregados graúdos usados na produção dos blocos de concreto.

| Agregado | Massa específica aparente do agregado seco (g/cm³) | Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³) | Massa específica do agregado (g/cm³) |
|-----------------|--|---|--|
| Brita 0 | 2,71 | 2,75 | 2,78 |
| Brita reciclada | 2,18 | 2,37 | 2,66 |

5.1.4 Absorção de água

5.1.4.1 Agregado miúdo

Os resultados de absorção de água para os agregados miúdos naturais e reciclados estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Valores de absorção de água dos agregados miúdos usados para a produção dos blocos de concreto.

| Agregado | Absorção de água (%) – NBR NM 30 (ABNT, 2001b) | Limite para ARM (%) – NBR 15116 (ABNT, 2004e) |
|-----------------|---|--|
| Areia fina | 0,16 | |
| Pó de pedra | 0,51 | ≤17 |
| Areia reciclada | 6,02 | |

Segundo o ensaio de absorção dos agregados naturais, a absorção do pó de pedra é maior que a da areia fina. Este fato é devido a maior quantidade de materiais pulverulentos presentes no pó de pedra. Também se verificou que, a absorção de água da areia reciclada é bem superior às dos

agregados miúdos naturais, uma vez que, além do alto teor de materiais pulverulentos, ainda é causado pela porosidade do material que compõe o agregado, que contém argamassa aderida, resíduos de cerâmica, entre outros.

Apesar da alta absorção em relação aos agregados naturais, 6,02%, a areia reciclada está em conformidade com a norma NBR 15116 (ABNT, 2004e) que permite até 17% de absorção nos ARM miúdos.

O resultado de absorção do pó de pedra foi semelhante ao encontrado para o agregado natural de Castro (2012), 0,49%, e o da areia reciclada foi próximo ao encontrado por Matar e Dalati (2011), 6,0% para o agregado miúdo reciclado. O maior valor de absorção dado pelas referências foi o de Soutsos, Tang e Millard (2011), 18%, contudo, os autores citados não apresentaram valores de materiais pulverulentos que pudessem ser relacionados a esse fator.

5.1.4.2 Agregado graúdo

Os resultados de absorção de água para os agregados graúdos naturais e reciclados estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores de absorção de água dos agregados graúdos usados para a produção dos blocos de concreto.

| Agregado | Absorção de água (%) – NBR NM 30 (ABNT, 2001b) | Limite para ARM (%) – NBR 15116 (ABNT, 2004e) |
|-----------------|---|--|
| Brita 0 | 1,31 | |
| Brita reciclada | 8,01 | ≤12 |

A brita reciclada apresentou um valor de absorção maior que o da brita 0, devido ao maior teor de materiais pulverulentos e à composição do agregado. Entretanto, o valor de 8,01% para o agregado graúdo reciclado está em conformidade com a norma NBR 15116 (ABNT, 2004e) que permite até 12% para agregados graúdos reciclados mistos.

O valor encontrado para brita 0 se situa entre os valores dados pelo referencial teórico, cujo mínimo foi de 0,65% (SOUTSOS, TANG e MILLARD, 2011) e o máximo, 2,5% (SOUSA, 2001). Com relação ao agregado graúdo reciclado, Patto (2006), Soutsos, Tang e Millard (2011) e Sabai et al. (2013) encontraram valores próximos a 8%, como o valor encontrado na presente pesquisa.

5.2 Caracterização do bloco

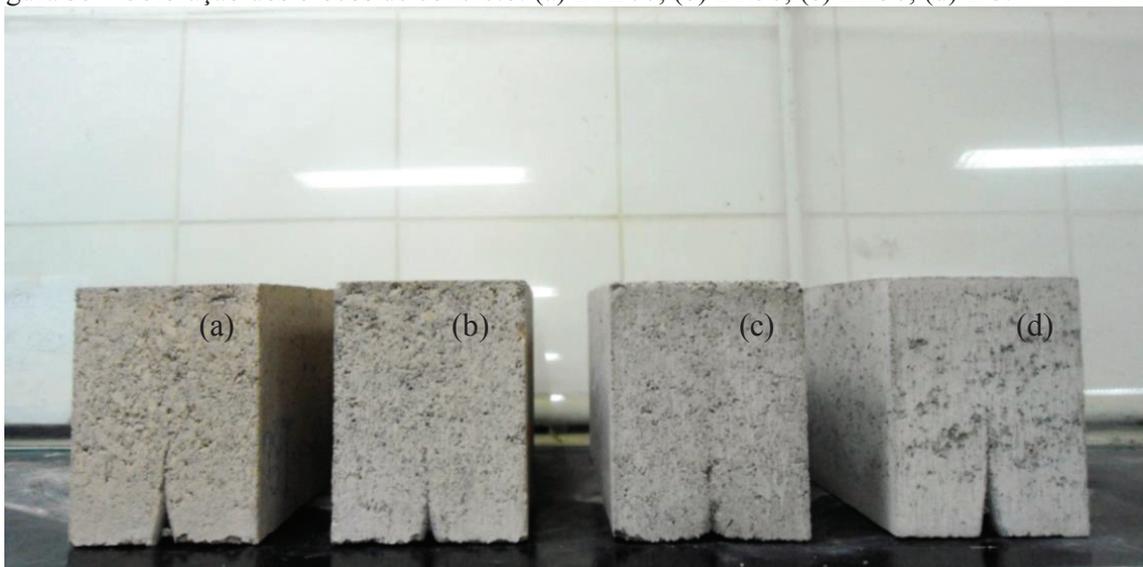
5.2.1 Inspeção visual

Todos os blocos produzidos possuíam aparência uniforme, arestas vivas e podiam ser diferenciados a partir de sua coloração (Figuras 33 e 34). À semelhança de Patto (2006) e Castro (2012), os blocos produzidos apresentaram variação de cor, se tornando mais claros e amarelados quanto mais material reciclado incorporado ao bloco.

Figura 34 – Aparência dos blocos de concreto: (a) BR100; (b) BR50; (c) BR30; (d) BC.



Figura 35 - Coloração dos blocos de concreto: (a) BR100; (b) BR50; (c) BR30; (d) BC.

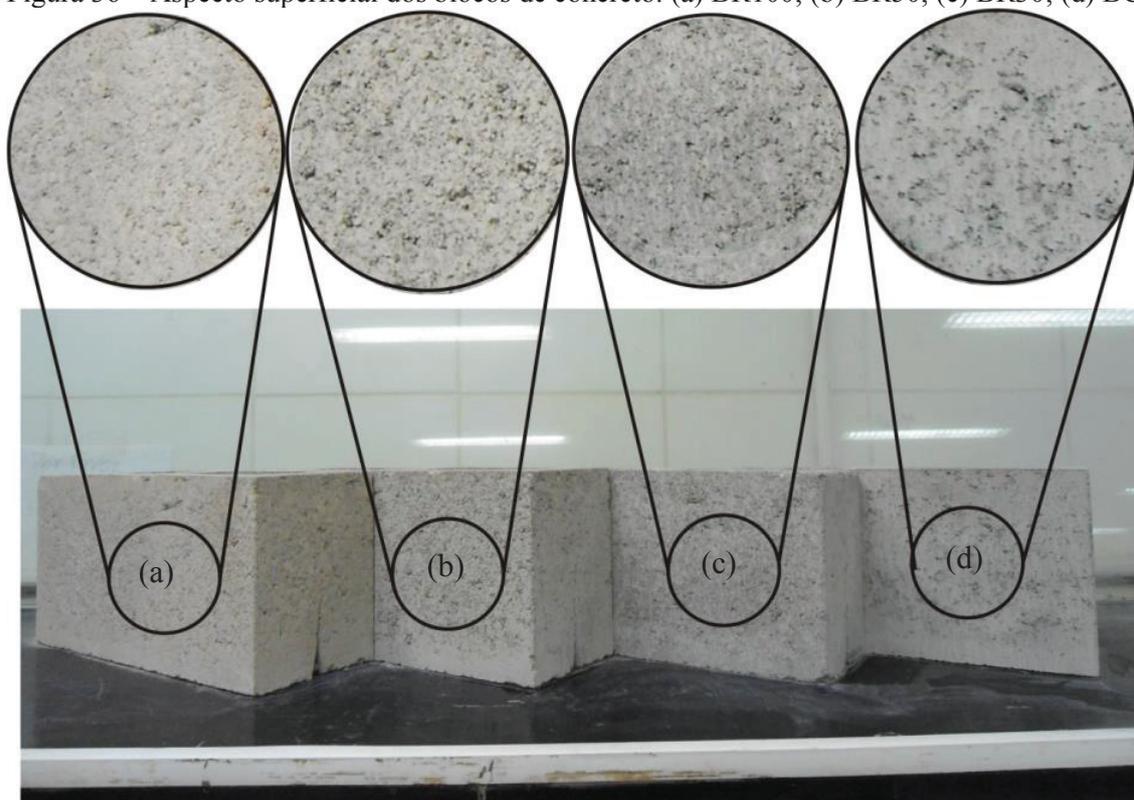


Outro aspecto identificado foi que, como a quantidade de água usada na mistura foi a mesma para todos os traços, percebeu-se que quanto maior o teor de agregado reciclado, mais porosa a

superfície do bloco, revelando necessidade de adição de água na produção. Castro (2012) observou, de semelhante forma, que a porosidade do bloco aumenta de acordo com o percentual de resíduo adicionado.

Porém, as superfícies das amostras de BR 100, se apresentaram bastante uniformes, sem reentrâncias, o que deve ser estar associado ao teor de materiais pulverulentos presente nos agregados reciclados. O teor de finos preencheu os espaços vazios entre os grãos que, compensou a ausência de água na mistura. A quantidade ideal de água reduz a formação de vazios nos blocos, e após a moldagem é caracterizada pela formação de marcas nas paredes externas dos blocos (FERNANDES, 2013). Essa marca deixada pela água é visível no bloco BC, sendo o único, dentre dos tipos produzidos que a apresentou (Figura 36).

Figura 36 – Aspecto superficial dos blocos de concreto: (a) BR100; (b) BR50; (c) BR30; (d) BC.



5.2.2 Análise dimensional

Os valores individuais das dimensões dos blocos estudados na pesquisa encontram-se no Apêndice B.

A NBR 6136 (ABNT, 2014) determina as dimensões para blocos em estudo em 140 mm de largura, 190 mm de altura e 390 mm de comprimento, podendo haver variação de ± 2 mm para

largura e ± 3 mm para altura e comprimento. Para todos os blocos ensaiados, os limites estabelecidos na supracitada norma foram obedecidos, sendo a variação sempre negativa para largura e comprimento e positiva ou negativa para altura. A determinação da altura é dada em função da compactação impressa no bloco no momento da moldagem. Desta forma, o arranjo dos agregados na forma pode interferir na compressão dos blocos. O que, contudo, não ultrapassou o limite de 3 mm estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2014).

Em relação à espessura das paredes, foi verificado que todos os blocos ensaiados apresentaram espessura superiores à mínima conforme a NBR 6136 (ABNT, 2014), que é de 25 mm para blocos de Classes A e B e 18 mm para blocos de Classe C, podendo haver variação de até -1 mm. A espessura das paredes com dimensões superiores ao mínimo não é algo que comprometa a qualidade do bloco, mas pode influenciar na quantidade de argamassa empregada na montagem de paredes.

A espessura equivalente também é um critério estabelecido por norma (ABNT, 2014), sendo a soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos, em milímetros, dividida pelo comprimento nominal do bloco, em metros. Uma vez que as espessuras das paredes são maiores que o mínimo estabelecido em norma, as espessuras equivalentes também se apresentaram superiores aos valores mínimos que são de 188 mm/m, para Classes A e B e 135 mm/m para Classe C.

A Tabela 31 apresenta os valores médios das dimensões dos blocos de cada família a fim de comparar os resultados entre as famílias.

Por meio da análise dimensional dos blocos, foi possível perceber que houve uma regularidade das dimensões dos elementos a despeito da inclusão de agregados reciclados. Dessa forma, pode-se afirmar que, neste caso, a manutenção de constantes tais como: quantidades de água, aglomerante e aditivo na moldagem dos blocos, não acarretou prejuízos nas formas dos elementos produzidos.

Tabela 31 - Valores médios das dimensões dos blocos.

| Família | Parâmetros | Largura (mm) | Altura (mm) | Comprimento (mm) | Paredes (mm) | |
|---------|------------------------------|-----------------|----------------|---------------------|--------------|--------------|
| | | | | | Transversal | Longitudinal |
| BC | Média | 139 | 188 | 389 | 28 | 28 |
| | Máximo | 141 | 189 | 390 | 29 | 29 |
| | Mínimo | 138 | 187 | 378 | 27 | 27 |
| | Desvio Padrão | 0,868 | 0,863 | 3,332 | 0,457 | 0,626 |
| | Coefficiente de variação (%) | 0,62 | 0,46 | 0,86 | 1,63 | 2,27 |
| BR30 | Média | 139 | 189 | 389 | 28 | 27 |
| | Máximo | 140 | 189 | 390 | 28 | 28 |
| | Mínimo | 138 | 188 | 388 | 27 | 27 |
| | Desvio Padrão | 0,796 | 0,541 | 0,627 | 0,332 | 0,528 |
| | Coefficiente de variação (%) | 0,57 | 0,29 | 0,16 | 1,19 | 1,93 |
| BR50 | Média | 140 | 190 | 389 | 28 | 28 |
| | Máximo | 141 | 191 | 390 | 29 | 29 |
| | Mínimo | 139 | 189 | 389 | 28 | 27 |
| | Desvio Padrão | 0,656 | 0,6 | 0,502 | 0,296 | 0,396 |
| | Coefficiente de variação (%) | 0,47 | 0,32 | 0,13 | 1,04 | 1,43 |
| BR100 | Média | 139 | 189 | 389 | 28 | 28 |
| | Máximo | 140 | 189 | 392 | 29 | 28 |
| | Mínimo | 138 | 188 | 387 | 28 | 27 |
| | Desvio Padrão | 0,569 | 0,644 | 1,167 | 0,266 | 0,343 |
| | Coefficiente de variação (%) | 0,41 | 0,34 | 0,30 | 0,94 | 1,24 |

5.2.3 Área líquida e massa específica

O Apêndice C apresenta os valores individuais e médios de área líquida, massa aparente e massa saturada para cada família de blocos de concreto em estudo.

A área líquida do bloco corresponde à área da sua superfície descontando as dimensões dos furos. Dessa forma, observou-se durante os ensaios a mesma regularidade de resultados que foi verificada nos ensaios de análise dimensional, sendo as variações devidas às peculiaridades das dimensões de cada bloco.

A partir dos resultados de área líquida foi possível determinar o volume de cada bloco ensaiado de modo a calcular as respectivas massas específicas, que estão apresentadas no Apêndice D.

A Tabela 32 apresenta os valores médios de massa específica seca e saturada dos blocos. É possível observar a redução da massa específica do bloco em função da substituição dos agregados naturais por reciclados, sendo reduzido até 15% da massa específica do bloco seco, se comparadas às massas dos blocos BC e BR100. Da mesma forma, este comportamento foi observado por Sousa (2001), Matar e Dalati (2011) e Soutsos, Tang e Millard (2011) em suas correspondentes pesquisas.

Tabela 32 - Valores médios de massa específica seca e saturada dos blocos.

| Massa específica (kg/dm ³) | BC | | BR30 | | BR50 | | BR100 | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ds | dssd | ds | dssd | ds | dssd | ds | dssd |
| Média | 2,265 | 2,379 | 2,124 | 2,273 | 2,035 | 2,209 | 1,925 | 2,164 |
| Máximo | 2,312 | 2,428 | 2,152 | 2,292 | 2,050 | 2,224 | 1,943 | 2,184 |
| Mínimo | 2,232 | 2,344 | 2,076 | 2,224 | 2,021 | 2,198 | 1,905 | 2,143 |
| Desvio Padrão | 0,036 | 0,034 | 0,025 | 0,024 | 0,013 | 0,011 | 0,016 | 0,015 |
| Coef. de variação (%) | 1,58 | 1,43 | 1,19 | 1,04 | 0,63 | 0,51 | 0,84 | 0,71 |

ds: massa específica do bloco seco; dssd: massa específica do bloco saturado.

5.2.4 Absorção de água

A Tabela 33 apresenta uma análise dos valores médios de massa seca, massa saturada e absorção de água para cada família de blocos de concreto em estudo. Os resultados individuais podem ser observados no Apêndice E.

Os valores limites estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2014) apresentados na Tabela 7 determinam o percentual de absorção individual igual a 12% e médio, 10%, para blocos produzidos com agregados normais, isto é, de densidade compreendida entre 2000kg/m³ e 3000kg/m³.

A amostra da família BC apresentou a menor média dos valores de absorção, com 5,31%. A absorção média dos blocos de concreto é crescente em função da adição de agregados reciclados no traço. Os blocos da família BR30 apresentaram absorção média 33,71% acima dos blocos BC, os blocos BR50, 62,15% e os blocos BR100 109,98%. Esta característica se deve ao fato do agregado reciclado ser mais poroso, logo absorver mais água que o agregado natural, como apresentado nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 33 - Resultados médios de absorção de água dos blocos.

| Família | Parâmetros | Absorção média de água (%) | Massa seca (g) | Massa Saturada (g) |
|---------|-----------------------|----------------------------|----------------|--------------------|
| BC | Média | 5,31 | 12340 | 12980 |
| | Máximo | 5,45 | 12600 | 13280 |
| | Mínimo | 5,03 | 12120 | 12780 |
| | Desvio. Padrão | 0,148 | 176 | 184 |
| | Coef. de variação (%) | 2,80 | 1,43 | 1,42 |
| BR30 | Média | 7,10 | 11890 | 12710 |
| | Máximo | 7,35 | 12040 | 12900 |
| | Mínimo | 6,89 | 11700 | 12560 |
| | Desvio Padrão | 0,174 | 125 | 126 |
| | Coef. de variação (%) | 2,45 | 1,05 | 0,99 |
| BR50 | Média | 8,61 | 11530 | 12530 |
| | Máximo | 8,84 | 11720 | 12720 |
| | Mínimo | 8,36 | 11440 | 12440 |
| | Desvio Padrão | 0,173 | 97 | 105 |
| | Coef. de variação (%) | 2,01 | 0,84 | 0,84 |
| BR100 | Média | 11,15 | 11050 | 12290 |
| | Máximo | 11,34 | 11260 | 12520 |
| | Mínimo | 10,77 | 10760 | 11980 |
| | Desvio Padrão | 0,198 | 174 | 184 |
| | Coef. de variação (%) | 1,77 | 1,58 | 1,50 |

Segundo os parâmetros de absorção de água da NBR 6136 (ABNT, 2014), podem ser feitas as seguintes observações:

- O bloco BC faz parte da Classe A, possuindo absorção média de até 6,0%. Os valores individuais também estão de acordo com a Classe A, uma vez que o valor individual máximo de absorção é de 8,0% e o máximo encontrado é de 5,45%;
- O bloco BR30 pertence à classe B uma vez que o valor médio de absorção é menor que 8,0%. O bloco também atende aos critérios individuais de absorção máxima, que é de 10,0%, sendo seu maior valor individual igual a 7,35%.
- O bloco BR50 pertence à classe C, já que seu valor médio de absorção é superior a 8,0% e menor que 10,0%, atendendo também ao critério de absorção máxima individual da classe que é de 12,0%.
- O bloco BR100 não atende ao requisito de absorção média de água que tem como máximo para agregado normal 10,0%, sendo o valor encontrado 11,15%. Contudo, todos os blocos

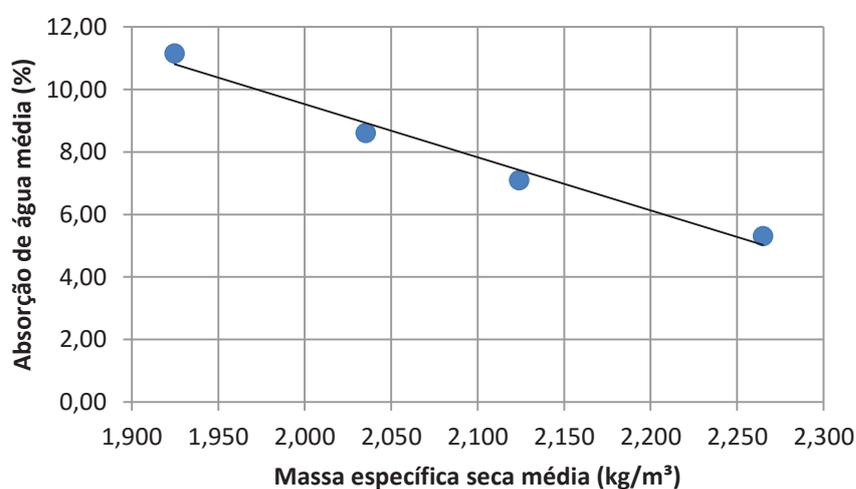
desta família obedecem ao critério de avaliação individual cujo máximo de absorção é igual a 12,0%, sendo o valor máximo encontrado igual a 11,34%.

Os blocos produzidos por Sousa (2001) com substituição de 30% de agregados naturais por reciclados apresentou absorção igual a 13,1%, e com substituição de 50%, 14,5% de absorção de água, utilizando o traço 1:10. Apesar do material apresentado pelo referido autor ter um menor percentual de materiais pulverulentos e seus agregados, uma menor absorção de água, os valores correlatos de absorção do BR30 foram inferiores aos seus e os do BR50 equivalentes quando relacionados a uma amostra de referência com 100% de agregados naturais. Este fator pode estar relacionado à presença de aditivos na mistura, o que reduz o índice de vazios dos elementos de concreto.

Os valores relativos, em percentuais de aumento de absorção, encontrados para o BR50 foram superiores ao de Paula (2010). O autor utilizou o traço 1:6, com mais cimento que a presente pesquisa, sendo este aglomerante responsável por envolver os agregados não permitindo que a característica de absorção deste tenha tanta influência na mistura. O mesmo aconteceu com os resultados dos blocos com 100% de substituição do autor, cujo valor relativo encontrado foi de 92,9% a mais de absorção em relação ao bloco de referência, percentual inferior ao encontrado para os blocos BR100.

A Figura 37 apresenta uma relação entre os valores de absorção de água média e de massa específica dos blocos de concreto. Observa-se que há uma relação inversamente proporcional, sendo que, quanto menor a densidade do bloco, maior sua absorção de água, fato também verificado por Sousa (2001).

Figura 37 - Relação absorção de água média x massa específica seca do bloco de concreto.



5.2.5 Resistência à compressão

A Tabela 34 apresenta a análise dos valores médios de resistência à compressão dos blocos de concreto. Os valores individuais do ensaio de resistência à compressão de cada família de blocos de concreto encontram-se no Apêndice F.

Tabela 34 - Resultados médios de resistência à compressão simples dos blocos.

| Família | Parâmetros | Massa (g) | Área (mm ²) | Força (N) | Resistência à compressão média (MPa) | Resistência Característica do bloco (fbk) (MPa) |
|--------------|-----------------------|-----------|-------------------------|-----------|--------------------------------------|---|
| BC | Média | 12628 | 54322 | 662480 | 12,2 | 10,23 |
| | Máximo | 13000 | 54777 | 734204 | 13,5 | |
| | Mínimo | 12210 | 53736 | 555674 | 10,3 | |
| | Desv. Padrão | 228,467 | 299,625 | 59593,687 | 1,1 | |
| | Coef. de variação (%) | 1,81 | 0,55 | 9,00 | 8,81 | |
| BR30 | Média | 12160 | 54159 | 492231 | 9,1 | 7,32 |
| | Máximo | 12510 | 54730 | 579848 | 10,8 | |
| | Mínimo | 11800 | 53300 | 366063 | 6,9 | |
| | Desv. Padrão | 180,806 | 406,851 | 67402,750 | 1,2 | |
| | Coef. de variação (%) | 1,49 | 0,75 | 13,69 | 13,61 | |
| BR50 | Média | 12103 | 54342 | 555776 | 10,2 | 8,48 |
| | Máximo | 12520 | 54526 | 684720 | 12,7 | |
| | Mínimo | 11800 | 53904 | 446624 | 8,2 | |
| | Desv. Padrão | 210,657 | 227,258 | 66293,104 | 1,2 | |
| | Coef. de variação (%) | 1,74 | 0,42 | 11,93 | 12,16 | |
| BR100 | Média | 11427 | 54264 | 503942 | 9,3 | 8,44 |
| | Máximo | 11640 | 54488 | 573513 | 10,6 | |
| | Mínimo | 11060 | 53636 | 448134 | 8,4 | |
| | Desv. Padrão | 206,060 | 239,083 | 36213,462 | 0,661 | |
| | Coef. de variação (%) | 1,80 | 0,44 | 7,19 | 7,12 | |

A partir dos ensaios de resistência à compressão simples foi possível observar que os resultados se apresentaram, geralmente, com um baixo desvio padrão, isto é, com pouca variação de

resultados dentro de uma mesma família, sendo o maior deles encontrado na família BR30. Os resultados de resistência à compressão de menor variação foram encontrados na família BR100.

Com relação à substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, observou-se que houve redução da resistência à compressão, contudo, não se deu em função da quantidade de RCD de forma linear, uma vez que a resistência à compressão média dos blocos BR30 foi menor que as dos blocos BR50.

Os blocos BC possuem resistências associadas ao cimento e aos agregados convencionais, logo, essa resistência é transmitida ao bloco de concreto. No caso do BR30, a quantidade de finos pode ter sido responsável por absorver uma parte da água de amassamento, prejudicando a ação da pasta. Dessa forma, os espaços vazios deixados pela ausência de água ou pelo cimento não hidratado fragilizaram a pasta criando caminhos preferenciais à ruptura. Nos blocos BR50, esse material pulverulento ocupou esses espaços vazios, misturado com o cimento e a água absorvida pelos finos, proporcionando uma uniformidade da pasta não vista em BR30, o que causou um aumento da resistência do bloco. Em BR100, essa quantidade de finos foi superior à necessitada pela pasta, retirando água da mistura e dificultando a hidratação do cimento. Uma vez que pasta e agregado são frágeis, houve a facilitação da ruptura do bloco produzido com estes.

A Tabela 35 apresenta uma análise comparativa entre a resistência à compressão média do bloco produzido com agregados convencionais e o decréscimo de resistência observado nos blocos com percentuais de agregados reciclados.

Tabela 35 - Análise comparativa entre as resistências características dos blocos de concreto.

| Traço | 1:10 | | |
|---------------------------|-------------|-------|-------|
| Substituição (%) | 30 | 50 | 100 |
| Rcomp (Rec.) (MPa) | 9,5 | 10,2 | 9,3 |
| Rcomp (Ref.) (MPa) | | 12,2 | |
| Variação (%) | -22,1 | -16,4 | -23,8 |

Rcomp: resistência à compressão média; Rec.: concreto produzido com agregados reciclados; Ref.: concreto de referência.

Segundo os parâmetros de resistência à compressão da NBR 6136 (ABNT, 2014), podem ser feitas as seguintes observações:

- O bloco BC faz parte da classe A, possuindo resistência característica acima de 8,0 MPa.

- O bloco BR30 pertence à classe B uma vez que sua resistência característica está entre 4,0 e 8,0 MPa.
- O bloco BR50 pertence à classe A, possuindo resistência característica acima de 8,0 MPa.
- O bloco BR100, segundo os critérios de resistência pertence à classe A, com resistência característica acima de 8,0 MPa, entretanto, ele não atende aos requisitos de absorção média.

Os blocos produzidos por Sousa (2001), que utilizou traço 1:10, apresentaram valores relativos de resistência à compressão abaixo dos obtidos na presente pesquisa. Enquanto o bloco BR30 apresentou um decréscimo de 22,1% da resistência à compressão em relação ao bloco BC, as amostras de Sousa (2001) com a substituição de 30% dos agregados naturais por reciclados, apresentaram redução de 44,12% em relação à amostra de referência.

Quando da substituição de 50% dos agregados naturais por reciclados, Sousa (2001) relatou que os blocos ensaiados tiveram resistência à compressão 35,29% abaixo que os blocos de referência, enquanto, na presente pesquisa, a família BR50 apresentou decréscimo 16,4% em relação à BC.

Sousa (2001) também observou que os blocos com 30% de substituição tiveram resultados de resistência à compressão inferiores aos de 50%.

Os blocos da família BR100 apresentaram redução de 23,8% da resistência à compressão em relação aos blocos BC. Quando da substituição de 100% dos agregados naturais por reciclados, os blocos produzidos por Paula (2010) e Lintz et al. (2012) apresentaram decréscimos em torno de 45% em relação aos blocos de referência. O maior decréscimo de resistência observado pelos autores supracitados em relação aos blocos da presente pesquisa deve estar associado à moldagem dos elementos.

As características de ruptura dos blocos de cada família estão apresentadas nas Figuras 38 a 41.

Com relação à ruptura, os blocos da família BC apresentaram características de ruptura na vertical como pode ser observado na Figura 38.

Os blocos da família BR30 ainda apresentaram ruptura predominantemente na vertical, porém, apresentaram deslocamentos das paredes, observada com menos frequência nos blocos da família BC (Figura 39).

Figura 38 - Ruptura do bloco 9 da Família BC: (a) Aparência lateral; (b) Vista frontal.



Figura 39 - Ruptura de blocos da Família BR30: (a) Tendência vertical e deslocamento observados no bloco 8; (b) Ruptura vertical observada no bloco 11.



A tendência dos blocos da família BR50 ruptura se apresentou semelhante ao caso observado em BR30, com escamação das paredes externas e ruptura na vertical. Foram observadas fraturas maiores que as presentes nas famílias dos blocos rompidos anteriormente, o que pode ser relacionado ao aumento do teor de finos na mistura (Figura 40).

Uma peculiaridade observada na ruptura dos blocos da família BR100 foi a tendência de ruptura na horizontal, o que indica que a fragilidade do bloco está, primeiramente, na pasta de concreto e não seguindo a tendência de ruptura à flexão das paredes. Essa característica da pasta está associada ao teor de finos, que uniformiza o bloco, criando caminhos preferenciais à ruptura do elemento. Os blocos também apresentaram escamações nas paredes mais evidentes que as observadas nas famílias anteriores, fator que também está relacionado ao teor de finos (Figura 41).

Figura 40 - Ruptura de blocos da Família BR50: (a) Ruptura com tendência vertical e escamação das paredes do bloco 11; (b) Ruptura do bloco 12 apresentando grandes fraturas.

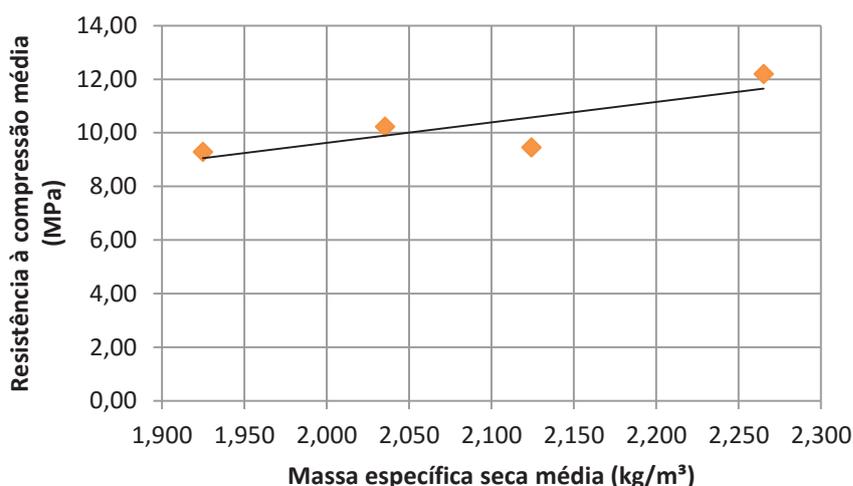


Figura 41 - Ruptura de blocos da Família BR100: (a) Ruptura com tendência horizontal observada no bloco 5; (b) Desplacamento das paredes do bloco após ruptura observado no bloco 9.



A Figura 42 apresenta uma relação entre os valores de resistência à compressão média e as massas específicas dos blocos de concreto. Observa-se que há uma relação diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a densidade do bloco, maior sua resistência à compressão, fato também verificado por Sousa (2001).

Figura 42 - Relação resistência à compressão média x massa específica seca do bloco de concreto.



5.2.6 Caracterização térmica

Cada parede foi submetida a duas medições sendo os valores individuais apresentados nas Tabelas 36 a 39, onde os canais correspondem aos termopares e a numeração segue o desenho esquemático apresentado na Figura 30(a).

Tabela 36 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 1º ensaio com a parede de blocos BC.

| Tempo | Canal 1 | Canal 2 | Canal 3 | Canal 4 | Canal 5 | Canal 6 | Canal 7 | Canal 8 | Parede de blocos BC | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|------------------------|
| | T (°C) | Médias | |
| Horas | T (°C) | BC (1) Face oposta | BC (1) Face exposta |
| 0 | 25,8 | 24,1 | 24,0 | 24,2 | 24,6 | 23,9 | 24,0 | 23,8 | 24,1 | 23,9 |
| 1 | 25,8 | 24,6 | 24,5 | 24,7 | 43,3 | 28,5 | 28,4 | 27,9 | 24,6 | 28,2 |
| 2 | 27,5 | 26,5 | 26,3 | 26,8 | 50,0 | 33,5 | 33,0 | 33,0 | 26,5 | 33,2 |
| 3 | 28,7 | 28,8 | 28,7 | 29,3 | 52,8 | 37,0 | 36,4 | 36,7 | 28,9 | 36,7 |
| 4 | 29,5 | 31,0 | 31,0 | 31,5 | 54,7 | 39,8 | 39,2 | 39,6 | 31,1 | 39,5 |
| 5 | 29,4 | 32,5 | 32,5 | 33,0 | 25,7 | 35,6 | 35,0 | 36,5 | 32,7 | 35,7 |
| 6 | 27,7 | 31,5 | 31,6 | 31,9 | 14,3 | 29,0 | 29,3 | 30,2 | 31,7 | 29,5 |
| 7 | 27,1 | 29,4 | 29,5 | 29,8 | 17,3 | 26,4 | 27,1 | 27,1 | 29,5 | 26,9 |
| 8 | 27,1 | 27,8 | 27,9 | 28,2 | 20,9 | 25,7 | 26,3 | 26,2 | 28,0 | 26,1 |
| 9 | 27,2 | 26,9 | 27,0 | 27,2 | 21,7 | 25,3 | 25,8 | 25,6 | 27,0 | 25,6 |
| 10 | 27,0 | 26,3 | 26,4 | 26,7 | 21,6 | 24,9 | 25,3 | 25,2 | 26,5 | 25,1 |
| 11 | 26,8 | 25,9 | 26,0 | 26,2 | 21,5 | 24,6 | 24,9 | 24,9 | 26,0 | 24,8 |
| 12 | 26,6 | 25,6 | 25,6 | 25,9 | 21,5 | 24,4 | 24,6 | 24,6 | 25,7 | 24,5 |

Tabela 37 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 2º ensaio com a parede de blocos BC.

| Tempo | Canal 1 | Canal 2 | Canal 3 | Canal 4 | Canal 5 | Canal 6 | Canal 7 | Canal 8 | Parede de blocos BC | |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|--------------|
| Horas | T (°C) | Médias | |
| | | | | | | | | | BC (2) | BC (2) |
| | | | | | | | | | Face oposta | Face exposta |
| 0 | 27,1 | 25,2 | 25,2 | 25,4 | 24,8 | 24,7 | 25,1 | 24,9 | 25,3 | 24,9 |
| 1 | 26,3 | 25,7 | 25,6 | 25,7 | 43,6 | 29,5 | 29,6 | 28,9 | 25,7 | 29,3 |
| 2 | 27,6 | 27,3 | 27,2 | 27,6 | 50,3 | 34,3 | 34,0 | 33,9 | 27,3 | 34,1 |
| 3 | 28,6 | 29,4 | 29,4 | 29,8 | 52,7 | 37,7 | 37,2 | 37,4 | 29,5 | 37,4 |
| 4 | 29,6 | 31,5 | 31,5 | 32,0 | 54,5 | 40,3 | 39,8 | 40,2 | 31,7 | 40,1 |
| 5 | 29,7 | 33,0 | 33,0 | 33,4 | 24,3 | 35,6 | 35,2 | 36,7 | 33,1 | 35,8 |
| 6 | 28,5 | 32,0 | 32,2 | 32,4 | 14,6 | 29,3 | 29,8 | 30,5 | 32,2 | 29,9 |
| 7 | 27,9 | 29,9 | 30,1 | 30,3 | 16,7 | 26,6 | 27,4 | 27,3 | 30,1 | 27,1 |
| 8 | 27,7 | 28,3 | 28,4 | 28,6 | 20,7 | 25,9 | 26,6 | 26,4 | 28,4 | 26,3 |
| 9 | 27,6 | 27,3 | 27,4 | 27,7 | 21,8 | 25,5 | 26,0 | 25,9 | 27,5 | 25,8 |
| 10 | 27,4 | 26,7 | 26,8 | 27,0 | 21,7 | 25,2 | 25,6 | 25,5 | 26,8 | 25,4 |
| 11 | 27,2 | 26,3 | 26,3 | 26,6 | 21,7 | 24,9 | 25,2 | 25,2 | 26,4 | 25,1 |
| 12 | 26,9 | 26,0 | 26,0 | 26,2 | 21,6 | 24,6 | 24,9 | 24,9 | 26,1 | 24,8 |

Tabela 38 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 1º ensaio com a parede de blocos BR100.

| Tempo | Canal 1 | Canal 2 | Canal 3 | Canal 4 | Canal 5 | Canal 6 | Canal 7 | Canal 8 | Parede de blocos BR100 | |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|--------------|
| Horas | T (°C) | Médias | |
| | | | | | | | | | BR100 (1) | BR100 (1) |
| | | | | | | | | | Face oposta | Face exposta |
| 0 | 26,2 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 24,5 | 24,7 | 25,0 | 24,7 | 25,0 | 24,8 |
| 1 | 25,5 | 25,4 | 25,3 | 25,4 | 42,0 | 28,3 | 28,5 | 28,1 | 25,3 | 28,3 |
| 2 | 27,0 | 26,7 | 26,6 | 26,9 | 48,2 | 32,3 | 32,7 | 32,5 | 26,8 | 32,5 |
| 3 | 28,2 | 28,6 | 28,6 | 29,0 | 50,5 | 35,1 | 35,7 | 35,6 | 28,7 | 35,5 |
| 4 | 29,1 | 30,5 | 30,5 | 31,0 | 52,6 | 37,5 | 38,2 | 38,1 | 30,7 | 37,9 |
| 5 | 29,5 | 31,9 | 31,9 | 32,4 | 23,6 | 34,5 | 34,8 | 35,1 | 32,1 | 34,8 |
| 6 | 28,1 | 31,1 | 31,1 | 31,4 | 14,4 | 29,5 | 29,2 | 29,3 | 31,2 | 29,3 |
| 7 | 27,4 | 29,2 | 29,2 | 29,5 | 17,9 | 27,0 | 26,8 | 26,7 | 29,3 | 26,8 |
| 8 | 27,3 | 27,7 | 27,8 | 28,1 | 20,9 | 26,1 | 26,0 | 26,0 | 27,9 | 26,0 |
| 9 | 27,1 | 26,9 | 26,9 | 27,2 | 21,4 | 25,5 | 25,5 | 25,5 | 27,0 | 25,5 |
| 10 | 26,9 | 26,3 | 26,3 | 26,6 | 21,4 | 25,1 | 25,1 | 25,1 | 26,4 | 25,1 |
| 11 | 26,6 | 25,9 | 25,9 | 26,1 | 21,3 | 24,8 | 24,8 | 24,8 | 26,0 | 24,8 |
| 12 | 26,4 | 25,6 | 25,5 | 25,8 | 21,2 | 24,5 | 24,5 | 24,5 | 25,6 | 24,5 |

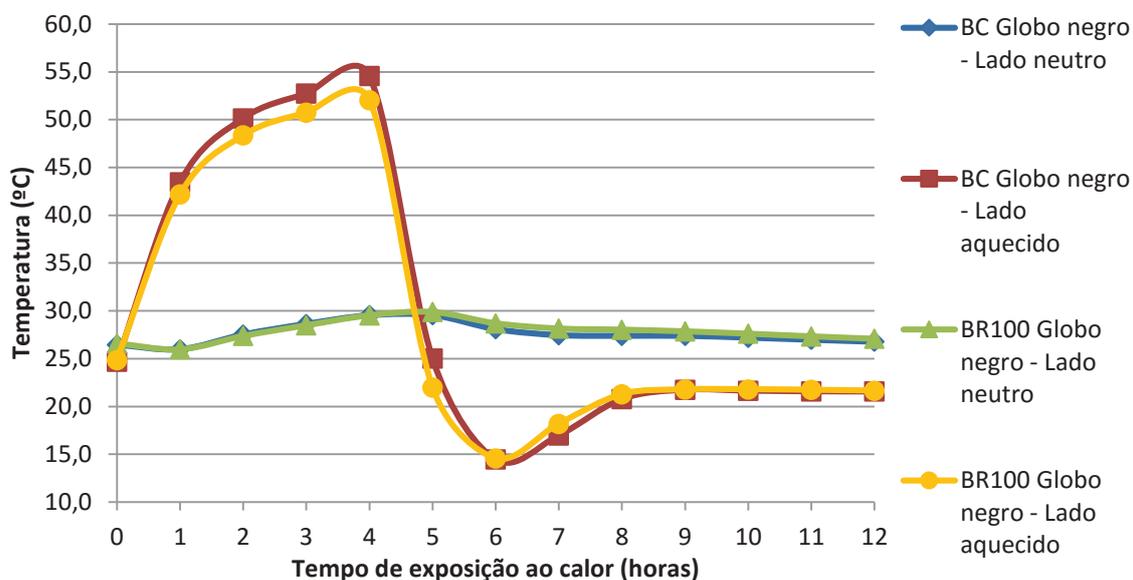
Tabela 39 - Resultados obtidos pelos termopares a cada hora no 2º ensaio com a parede de blocos BR100.

| Tempo | Canal 1 | Canal 2 | Canal 3 | Canal 4 | Canal 5 | Canal 6 | Canal 7 | Canal 8 | Parede de blocos BR100 | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------------|--------------|
| | T (°C) | Médias | |
| Horas | T (°C) | BR100 (2) | BR100 (2) |
| | | | | | | | | | Face oposta | Face exposta |
| 0 | 27,0 | 25,4 | 25,4 | 25,5 | 25,3 | 25,2 | 25,4 | 25,2 | 25,4 | 25,3 |
| 1 | 26,4 | 25,9 | 25,8 | 25,9 | 42,3 | 28,6 | 28,9 | 28,5 | 25,9 | 28,7 |
| 2 | 27,8 | 27,2 | 27,2 | 27,5 | 48,5 | 32,5 | 33,1 | 32,9 | 27,3 | 32,8 |
| 3 | 28,8 | 29,1 | 29,1 | 29,5 | 51,0 | 35,5 | 36,1 | 36,0 | 29,2 | 35,9 |
| 4 | 30,0 | 31,0 | 31,1 | 31,5 | 51,5 | 37,8 | 38,5 | 38,4 | 31,2 | 38,2 |
| 5 | 30,3 | 32,2 | 32,3 | 32,7 | 20,4 | 33,9 | 34,0 | 34,4 | 32,4 | 34,1 |
| 6 | 29,3 | 31,3 | 31,3 | 31,7 | 14,7 | 29,2 | 28,9 | 29,1 | 31,4 | 29,0 |
| 7 | 28,9 | 29,5 | 29,6 | 30,0 | 18,5 | 27,0 | 26,8 | 26,8 | 29,7 | 26,8 |
| 8 | 28,8 | 28,2 | 28,3 | 28,7 | 21,6 | 26,3 | 26,3 | 26,3 | 28,4 | 26,3 |
| 9 | 28,6 | 27,5 | 27,6 | 27,9 | 22,1 | 25,9 | 26,0 | 26,0 | 27,7 | 26,0 |
| 10 | 28,4 | 27,0 | 27,1 | 27,4 | 22,2 | 25,6 | 25,7 | 25,8 | 27,2 | 25,7 |
| 11 | 28,1 | 26,7 | 26,8 | 27,0 | 22,1 | 25,4 | 25,5 | 25,5 | 26,8 | 25,5 |
| 12 | 27,8 | 26,4 | 26,5 | 26,7 | 22,1 | 25,2 | 25,3 | 25,3 | 26,5 | 25,3 |

Para todas as paredes, observou-se que houve aumento da temperatura nas primeiras 04 (quatro) horas, sendo as variações entres paredes de blocos da mesma família ocasionados pela diferença de temperatura no início do ensaio.

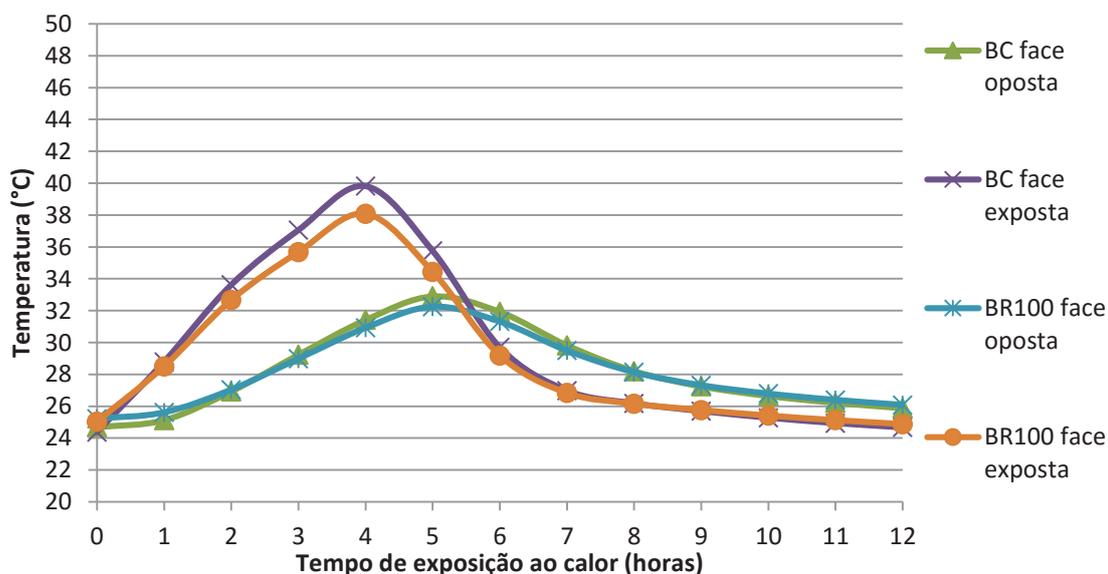
A Figura 43 apresenta a variação de calor nos ambientes montados com os blocos em seus lados neutro e aquecido. De acordo com o gráfico apresentado, é possível perceber que, submetido à mesma fonte de calor no mesmo período de tempo, o ambiente BC neutro apresenta uma variação de temperatura, nas primeiras quatro horas, 13,94% maior que a registrada no ambiente BR100. Uma vez que as duas paredes usadas no ensaio têm a mesma espessura e foram construídas da mesma forma, pode-se afirmar que a resistência térmica da parede BR100 é maior que a da parede BC.

Figura 43 - Variação das temperaturas entre os lados neutro e aquecido.



A Figura 44 apresenta a variação das temperaturas nas duas faces das paredes durante o ensaio. É possível observar que para a parede de blocos BR100, a variação de temperatura nas primeiras quatro horas é menor que na parede de blocos BC, tanto para a face interna quanto para a face externa, denotando que a parede de blocos BR100 tem uma menor amplitude térmica.

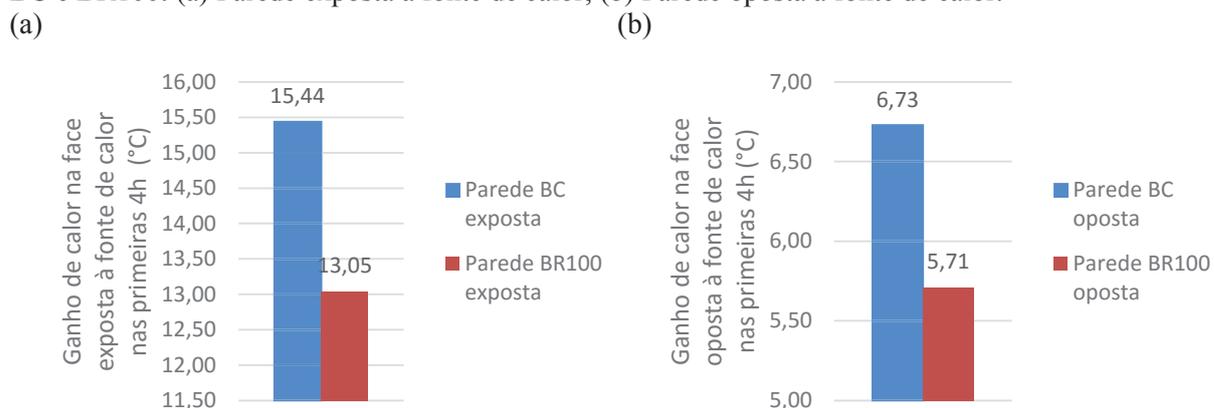
Figura 44 - Variação de temperatura entre as faces das paredes.



Em termos de variação de temperatura nas faces das paredes, comparando-se o ganho de calor nas primeiras quatro horas de aquecimento é possível observar que essa variação é cerca de 15% menor para a parede de bloco BR100 em relação a parede BC, tanto para a face exposta quanto para a face oposta. A parede BC, quando submetida à fonte de calor, tem uma maior

capacidade de receber esse calor e transmiti-lo para o interior do ambiente que a parede BR100. Essa propriedade indica que, a parede BC tem uma menor capacidade térmica, isto é, retém calor por menos tempo em seu interior antes de variar de temperatura. Além disso, é possível afirmar também que, uma vez que a variação de temperatura foi menor para a parede de bloco BR100, logo, o bloco BR100 têm menor condutividade térmica que o bloco BC. A Figura 45 apresenta esta relação em termos de variação de temperatura.

Figura 45 - Comparação entre os ganhos de calor nas primeiras quatro horas de ensaio nas paredes BC e BR100: (a) Parede exposta à fonte de calor; (b) Parede oposta à fonte de calor.



As diferenças observadas podem estar associadas à massa específica do bloco, uma vez que o bloco BR100 tem menor massa específica que o bloco BC. Além disso, a composição do agregado reciclado pode interferir nos resultados de caracterização térmica uma vez que possui natureza química diferente do agregado natural.

6 CONCLUSÕES

6.1 Principais conclusões

Com relação aos agregados usados para a produção de blocos, foi verificado que, a granulometria da areia reciclada tem propriedades semelhantes ao pó de pedra usado para produção de concreto seco, sendo o material um bom substituinte do agregado natural em termos granulométricos. Com relação à brita reciclada, observou-se que suas propriedades de granulometria foram semelhantes à da brita 0, tendo o mesmo diâmetro máximo, porém, com um maior módulo de finura, isto é, presença de grãos maiores.

O teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados foi superior ao dos agregados naturais, sendo cerca de 14% maior para a fração miúda e 150% para a fração graúda. Foi observado que, na produção dos blocos, o teor de materiais pulverulentos foi um fator importante tanto para a uniformidade da superfície do bloco, quanto para o preenchimento dos vazios deixados pelos agregados. Contudo, favoreceu o enfraquecimento da pasta, reduzindo a resistência à compressão dos blocos com substituição dos agregados naturais por reciclados.

A massa específica da areia reciclada estudada nessa pesquisa foi semelhante à dos agregados naturais, enquanto a brita reciclada teve massa específica cerca de 5% inferior à brita 0. Foi observado também que as massas seca e saturada dos agregados reciclados foram inferiores às massas específicas dos agregados naturais, sendo esse um fator importante para a redução das massas específicas dos blocos de concreto produzidos.

Ainda com relação aos agregados, foi observado que a absorção de água dos agregados reciclados foi superior à dos agregados naturais, sendo cerca de 12 (doze) vezes maior para a areia reciclada e 08 (oito) vezes a da brita 0. Contudo, a maior absorção do agregado reciclado não causou má conformação dos blocos em nenhuma das famílias estudadas.

Com relação aos blocos de concreto produzidos, foi verificado que os blocos de todas as famílias estudadas apresentaram aspecto uniforme e arestas vivas a despeito da alta absorção dos agregados reciclados, que poderiam ocasionar vazios nos blocos pela ausência de trabalhabilidade da pasta. Observou-se que a presença do aditivo superplastificante e a adequada compactação do bloco foram suficientes para alcançar a regularidade das superfícies, das paredes e das dimensões dos blocos de concreto, independentemente do teor de substituição de agregados naturais por reciclados.

A massa específica dos blocos de concreto foi influenciada pela substituição dos agregados naturais por reciclados, tendo a família BR100 cerca de 85% da massa da família BC.

A absorção de água dos blocos aumentou em função da substituição dos agregados naturais por reciclados. Este fato deve-se ao agregado reciclado ser mais poroso, mais leve e ter maior absorção de água. O bloco BR100 não atende o requisito de absorção média de água que tem como máximo para agregado normal 10,0%, sendo o valor encontrado 11,15%, o que, contudo, não invalida os resultados, antes reafirma a necessidade da criação de normas específicas para elementos de concreto produzidos com agregados reciclados. Foi observado também que a absorção de água aumentou nos blocos de concreto, sendo inversamente proporcional à massa específica destes.

Houve redução resistência à compressão dos blocos de concreto quando da substituição dos agregados naturais por reciclados, sendo cerca de 20% inferior ao bloco de referência. Esta redução não foi linear, tendo a família BR50 resistência à compressão superior à BR30. Constatou-se, então, que houve influência do teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados na resistência, sendo a quantidade de finos insuficiente no bloco BR30 de substituição, próxima do ideal para os blocos BR50, e excessiva para os blocos BR100.

A legislação brasileira limita o uso de agregados reciclados a produção de elementos não estruturais, entretanto, foi verificado na presente pesquisa que, segundo os requisitos de resistência à compressão, todas as famílias produzidas são passíveis de uso estrutural. Observou-se que a produção dada de forma industrial dos blocos de concreto possibilitou a uniformidade dos resultados e baixas reduções de resistência à compressão em relação aos blocos convencionais, o que indica que a qualidade do bloco produzido está intimamente relacionada ao processo de fabricação. Logo, as dificuldades encontradas na produção de concreto plástico produzidos com agregados reciclados, tal como trabalhabilidade, pode ser contornado com o uso de aditivos e uma boa compactação durante a moldagem, no caso de elementos de concreto.

Sobre a caracterização térmica das paredes construídas com blocos da família BC e com os blocos da família BR100, foi observado que as propriedades dos agregados reciclados tiveram influência positiva nas propriedades térmicas da parede. A redução da massa específica do bloco e a natureza química dos agregados reciclados foram determinantes para redução da condutividade térmica da parede produzidas com blocos com agregados reciclados quando

comparadas à parede de blocos convencionais. Com isso, é possível reduzir a temperatura dos ambientes internos colaborando para o conforto do usuário e a economia de energia para fins de condicionamento de ar. É preciso, contudo, avaliar a propriedade térmica do material, isto é, do concreto com o qual foram produzidos os blocos para se obter dados mais precisos quanto às propriedades térmicas deste.

Dessa forma, a partir da pesquisa realizada, pode-se afirmar que produção e comercialização de blocos com agregados reciclados são viáveis do ponto de vista físico, mecânico e térmico. Contudo, a substituição parcial dos agregados naturais por reciclados apresentou melhores resultados físicos e mecânicos que a substituição total, sendo a de 50% significativa do ponto de vista ambiental e com pouca interferência em suas propriedades físicas e mecânicas em relação ao bloco de referência.

Apesar da variabilidade do agregado reciclado, é possível produzir elementos de concreto estrutural com qualidade aceitável. Contudo, ainda é necessária a verificação dos critérios de durabilidade destes blocos uma vez que a presença de contaminantes pode interferir na qualidade dos artefatos de concreto. Além disso, é preciso que haja o enquadramento dos critérios de agregados reciclados passíveis de uso em concreto estrutural de modo que esses materiais sejam mais bem aproveitados.

Concluiu-se, então, que o uso de agregados reciclados mistos para a produção de blocos de concreto, além de evitar o uso de matéria prima natural, pode também auxiliar na correta destinação de RCD, e proporcionar a melhoria térmica da edificação, favorecendo não só o conforto do usuário, mas também o meio ambiente.

6.2 Sugestões para futuras pesquisas

- Avaliar propriedades relativas à durabilidade dos blocos de concreto produzidos com agregados reciclados;
- Caracterizar termicamente paredes construídas com blocos produzidos com agregados reciclados, verificando influência do percentual de material reciclado incorporado na caracterização térmica da parede;
- Verificar as propriedades térmicas do material usado para a produção de blocos com agregados reciclados;
- Analisar a viabilidade econômica da produção e comercialização de blocos com substituição de agregados naturais por reciclados em escala industrial.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11578:** Cimento Portland Composto: Especificação. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. **NBR 11579:** Cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 1991b.

_____. **NBR 11582:** cimento Portland: determinação da expansibilidade de Le Chatelier - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991c.

_____. **NBR 12826:** Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 7215:** cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland: determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. **NBR NM 43:** Cimento Portland: Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003a.

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

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland: determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. **NBR NM 248:** agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003d.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 10006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projetos, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.

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

_____. **NBR NM 11-2:** Cimento Portland: análise química - método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT Rio de Janeiro, 2004f.

_____. **NBR NM 13:** Cimento Portland: análise química - determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004g.

_____. **NBR NM 15:** Cimento Portland: análise química - determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004h.

_____. **NBR NM 16:** Cimento Portland: análise química - determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004i.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland: análise química - determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004j.

_____. **NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 12118:** blocos vazados de concreto simples para alvenaria: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria: requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013.** São Paulo, 2013

AGÊNCIA ESTADO. Construtora transforma entulho em blocos de concreto. **O Estado de São Paulo**, jul. 2003. Disponível em:

<<http://ciencia.estadao.com.br/noticias/geral,construtora-transforma-entulho-em-blocos-de-concreto,20030702p73266>>. Acesso em: 11 jul. 2014.

AGRELA, F.; DE JUAN, M. S.; AYUSO, J.; GERALDES, V. L.; JIMENEZ, J. R. Limiting properties in the characterization of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**, v.25, n.10, p.3950-3955, maio 2011.

AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. **Applied Thermal Engineering**, v.29, n.5, p.1123-1130, jun. 2009.

AL-JABRI, K. S.; HAGO, A. W.; AL-NUAIMI, A. S.; AL-SAIDY, A. H. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. **Cement and Concrete Research**, v.35, n.8, p. 1472-1479, 2005.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; MAURÍCIO, R. M. Blocos de concreto: A busca de um traço otimizado. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 10, n. 29, p. 32-39, abr./jun. 2002.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANTAR, M. A.; BAIG, H. Conjugate conduction-natural convection heat transfer in a hollow building block. **Applied thermal engineering**. v. 29, p. 3716-3720, dez. 2009.

BAZAZ, J. B.; KHAYATI, M. Properties and Performance of Concrete Made with Recycled Low-Quality Crushed Brick. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 4, p. 330-338, abr. 2012.

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

BRAGA, B. **Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2004.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de energia 2030**. Brasília: MME: EPE, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 431, de 24 de maio de 2011. Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2011.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 535 f. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH, R. S. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v.55, n. 336, p. 448-460, 2009.

CAPELLO, G. Entulho vira matéria-prima: Agregados reciclados chegam aos canteiros das construtoras, adquiridos de empresas especializadas ou gerados na própria obra. *Téchne*, São Paulo: Pini, ano 14, n. 112, p. 32-35, jul. 2006.

CARMO, D. S.; MAIA, N. S.; CESAR, C. G. Avaliação da tipologia dos resíduos de construção civil entregues nas usinas de beneficiamento de Belo Horizonte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 187-192, abr./jun. 2012.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

CASTRO, R. A. F. R. de. **Blocos para vedação a partir de resíduos de construção de gesso e de concreto**. 2012. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

CAVALLINE, T. L.; WEGGEL, D. C. Recycled brick masonry aggregate concrete: Use of brick masonry from construction and demolition waste as recycled aggregate in concrete. *Structural Survey*, v.31, n.3, p.160-180, 2013.

CELESTINO P. H. M. **Produção de blocos de concreto em obra com utilização de resíduo cimentício como agregado**. 2013. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. **Alvenaria de vedação com blocos de concreto**: cartilha - capacitação de equipes de produção. Recife, 2008.

DELONGUI, L. **Caracterização e adequação dos resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria-RS para aplicação em pavimentação**. 2012. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

ELETROBRÁS. **Boas Práticas em Arquitetura**: Eficiência Energética nas Edificações: Edificações Multifamiliares. Rio de Janeiro: IAB, 2008.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica 2012. EPE, Rio de Janeiro, 2012.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**. v. 1, 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 471 p.

FARIAS, A. B.; FALCÃO, N. C. B.; FUCALE, S. P.; GUSMÃO, A. D. **Diagnóstico da gestão de resíduos da construção civil no município de Olinda-PE**. In: VI ENCONTRO NACIONAL E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E

COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS (ENECS e ELECS), 2011, Vitória. Anais...Vitória, 2011

FERNANDES, I. D. **Blocos e Pavers: produção e controle de qualidade**. 4. ed. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2013. 200 p.

FERREIRA, S. **Produção de blocos de concreto para alvenaria: Prática recomendada**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1990. (Boletim Técnico 107).

FIESP- Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Cadeia Produtiva da Construção: Estimativas do Investimento em Obras, do PIB e do Emprego**. Departamento da Indústria da Construção. FIESP, 2015.

FONSECA, F. B. **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição**. 2002. 141 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FRASSON JÚNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FROTA, A. B., SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001, 243 p.

GE, Z.; GAO, Z.; SUN, R.; ZHENG, L. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. **Construction and Building Materials**, v.31, p.289 -293, jun. 2012.

GUSMÃO, A. D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Camaragibe, PE: CCS Gráfica, 2008. 140 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa anual da indústria da construção**. v. 20. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa anual da indústria da construção**. v. 22. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBRACON. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. v. 1, São Paulo: IBRACON, 2005. 1600 p.

INMETRO - Instituto nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial. **Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010**.

_____. **Portaria n.º18, de 16 de janeiro de 2012**.

KHALAF F. M.; DEVENNY A. S. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v.16, n. 4, p.331–430, ago. 2004.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA F. O. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014, 382 p.

LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 169-176, abr./jun. 2013.

LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; GACHET-BARBOSA, L. A. Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 166-181, 2012.

LORDSLEEM JÚNIOR, A. C. **Alvenaria de vedação com blocos de concreto: Melhores práticas**. São Paulo: ABCP, 2012. 61 p.

MALLICK, F. H. Thermal comfort and building design in the tropical climates. **Energy and Buildings**, v.23, n.3, p. 161–167, mar. 1996.

MANUAL POLI-ENCOL. **Manual do processo construtivo: Blocos e pré-moldados**. São Paulo: EPUSP-ENCOL, 1991. (Relatório técnico R5-26/91).

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2012. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MARTÍNEZ-LAGE, I.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. ; VÁZQUEZ-HERRERO, C. ; PÉREZ-ORDÓÑEZ, J. L. Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. **Construction and building materials**, v.37, p.171 -176, dez. 2012.

MAS, B.; CLADERA, A.; BESTARD, J.; MUNTANER, D.; LÓPEZ, C. E.; PIÑA, S.; PRADES, J. s **Construction and Building Materials**, v.34, p.430-441, set. 2012.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. A. R. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios: relatório de pesquisa**. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzato, 1992. 134 p.

MATAR, P.; DALATI, R. E. Strength of masonry blocks made with recycled concrete aggregates. **Physics Procedia**, v. 21, p. 180–186, 2011.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto**. 1993. 449 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MESQUITA, A. S. G. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina, Piauí. *Revista Holos*, v.2, p.58-65, 2012.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v.9, n.1, p. 57-71, jan./ mar. 2009.

MME - Ministério do Meio Ambiente; ICLEI – Brasil. **Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação**. Brasília, 2012.

MME - Ministério de Minas e Energia; EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica DEA 13/14: Demanda de Energia 2050**. Estudos da demanda de energia. Rio de Janeiro, 2014.

PATTO, A. L. B. **Minimização de impactos ambientais com a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados na fabricação de concreto**. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2006.

PAULA, P. R. F. **Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural**. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2010.

PAZ, D. H. F. **Desenvolvimento de um sistema de apoio ao gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil em canteiros de obras de edificações urbanas**. 2014. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, 2014.

PORTAL PINIWEB. **Etiqueta de eficiência energética passa a ser obrigatória em reformas e novas obras de edifícios públicos federais**. 14 de junho de 2014. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/equipamentos-publicos/etiqueta-de-eficiencia-energetica-passa-a-ser-obrigatoria-em-reformas-319386-1.aspx>>. Acesso em 19 nov. 2014.

PROCEL INFO. **Etiquetagem em Edificações**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={89E211C6-61C2-499A-A791-DACD33A348F3}>>>. Acesso em 19 nov. 2014.

RAMOS, B. F. **Indicadores de qualidade dos resíduos da construção civil do município de Vitória-ES**. 2007. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

ROCHA, E. G. A. **Os resíduos sólidos de construção e demolição: gerenciamento, quantificação e caracterização: um estudo de caso no Distrito Federal**. 2006. 174 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) -Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SABAI, M. M.; COX, M. G. D. M.; MATO, R. R.; EGMOND, E. L. C.; Lichtenberg, J. J. N. Concrete block production from construction and demolition waste in Tanzania. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 72, n.11, p. 9-19, mar. 2013.

SANTOS, A. N. **Diagnóstico da situação dos resíduos de construção e demolição do Município de Petrolina – PE**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

SARDÁ, M. C. **Diagnóstico do resíduo da construção civil gerado no município de Blumenau-SC: potencialidades de uso em obras públicas.** 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SILVA, V. A.; FERNANDES, A. L. T. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Revista Sociedade & Natureza**, ano 24, n. 2, p. 333-344, maio/ago. 2012.

SHEEN, Y.; WANG, H.; JUANG, Y.; LE, D. Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 298-305, ago. 2013.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado.** 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SOUTSOS, M.N.; TANG, K.; MILLARD, S. G. Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. **Construction and Building Materials**. v.25, n. 2, p.726-735, 2011.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management.** 2ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 950 p.

TAM, V.; TAM, C. A review on the viable technology for construction waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**. v 47, n. 3, p 209- 221, 2006.

TANGO, C. E. **Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais.** In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., 1994, Florianópolis. Anais...Santa Catarina, 1994.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 339-346, jun. 2010.

YOUNG, R. HAYES, S. KELLY, M., VAIDYANATHAN, S. **The 2014 International Energy Efficiency Scorecard.** Jul. 2014. Disponível em: <<http://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/e1402.pdf>>. Acesso em: 19 de nov. 2014.

APÊNDICE A - Caracterização granulométrica dos agregados

Tabela 40 - Composição granulométrica da areia fina.

| Peneiras ABNT (mm) | Massa retida (g) | | % retida individual | | | % retida acumulada |
|--------------------------|------------------|-------|---------------------|-------|-------|-----------------------|
| | M1 | M2 | M1 | M2 | Md | |
| 0,15 | 69,98 | 70,1 | 23,33 | 23,38 | 23,35 | 79,77 |
| 0,3 | 57,74 | 56,18 | 19,25 | 18,74 | 18,99 | 56,41 |
| 0,6 | 57,09 | 57,15 | 19,03 | 19,06 | 19,05 | 37,42 |
| 1,18 | 38,94 | 39,86 | 12,98 | 13,29 | 13,14 | 18,37 |
| 2,36 | 9,53 | 8,5 | 3,18 | 2,83 | 3,01 | 5,24 |
| 4,75 | 3,89 | 2,65 | 1,30 | 0,88 | 1,09 | 2,23 |
| 6,3 | 2,13 | 4,71 | 0,71 | 1,57 | 1,14 | 1,14 |
| Fundo | 60,65 | 60,71 | 20,22 | 20,25 | 20,23 | |
| Diâmetro máximo (mm) | | | | | | 4,75 |
| Módulo de finura | | | | | | 1,99 |

M1: massa em gramas e percentual da Amostra 1; M2: massa em gramas e percentual da Amostra 2; Md: Média das massas M1 e M2 em percentual.

Tabela 41 - Composição granulométrica do pó de pedra.

| Peneiras ABNT (mm) | Massa retida (g) | | % retida individual | | | % retida acumulada |
|--------------------------|------------------|-------|---------------------|-------|-------|-----------------------|
| | M1 | M2 | M1 | M2 | Md | |
| 0,15 | 37,59 | 33,67 | 12,54 | 11,22 | 11,88 | 79,14 |
| 0,3 | 29,65 | 29,77 | 9,89 | 9,92 | 9,91 | 67,26 |
| 0,6 | 42,92 | 43,35 | 14,32 | 14,45 | 14,38 | 57,36 |
| 1,18 | 66,42 | 66,25 | 22,15 | 22,08 | 22,12 | 42,97 |
| 2,36 | 57,76 | 59,45 | 19,27 | 19,82 | 19,54 | 20,86 |
| 4,75 | 4,75 | 3,13 | 1,58 | 1,04 | 1,31 | 1,31 |
| Fundo | 60,71 | 64,38 | 20,25 | 21,46 | 20,86 | |
| Diâmetro máximo (mm) | | | | | | 4,75 |
| Módulo de finura | | | | | | 2,69 |

M1: massa em gramas e percentual da Amostra 1; M2: massa em gramas e percentual da Amostra 2; Md: Média das massas M1 e M2 em percentual.

Tabela 42 - Composição granulométrica da areia reciclada.

| Peneiras ABNT (mm) | Massa retida (g) | | % retida individual | | | % retida acumulada |
|--------------------------|------------------|-------|---------------------|-------|-------|-----------------------|
| | M1 | M2 | M1 | M2 | Md | |
| 0,15 | 34,77 | 38,64 | 11,57 | 12,85 | 12,21 | 86,64 |
| 0,3 | 54,34 | 55,57 | 18,09 | 18,49 | 18,29 | 74,42 |
| 0,6 | 63,47 | 62,75 | 21,12 | 20,87 | 21,00 | 56,14 |
| 1,18 | 50,4 | 47,48 | 16,77 | 15,80 | 16,28 | 35,14 |
| 2,36 | 40,46 | 39,62 | 13,47 | 13,18 | 13,32 | 18,85 |
| 4,75 | 13,52 | 10,74 | 4,50 | 3,57 | 4,04 | 5,53 |
| 6,3 | 5,46 | 3,52 | 1,82 | 1,17 | 1,49 | 1,49 |
| Fundo | 38,03 | 42,28 | 12,66 | 14,07 | 13,36 | |
| Diâmetro máximo (mm) | | | | | | 6,3 |
| Módulo de finura | | | | | | 2,77 |

M1: massa em gramas e percentual da Amostra 1; M2: massa em gramas e percentual da Amostra 2; Md: Média das massas M1 e M2 em percentual.

Tabela 43 - Composição granulométrica da brita 0.

| Peneiras ABNT (mm) | Massa retida (g) | | % retida individual | | | % retida acumulada |
|--------------------------|------------------|--------|---------------------|-------|-------|-----------------------|
| | M1 | M2 | M1 | M2 | Md | |
| 0,15 | 43,18 | 30,79 | 4,32 | 3,07 | 3,70 | 91,84 |
| 0,3 | 35,41 | 25,11 | 3,54 | 2,51 | 3,02 | 88,15 |
| 0,6 | 47,47 | 36,46 | 4,75 | 3,64 | 4,19 | 85,12 |
| 1,18 | 96,91 | 87,76 | 9,69 | 8,76 | 9,23 | 80,93 |
| 2,36 | 322,04 | 340,14 | 32,21 | 33,97 | 33,09 | 71,70 |
| 4,75 | 247,64 | 269,82 | 24,77 | 26,95 | 25,86 | 38,61 |
| 6,3 | 113,87 | 139,91 | 11,39 | 13,97 | 12,68 | 12,76 |
| 9,5 | 1,53 | 0 | 0,15 | 0,00 | 0,08 | 0,08 |
| Fundo | 91,89 | 71,37 | 9,19 | 7,13 | 8,16 | |
| Diâmetro máximo (mm) | | | | | | 9,5 |
| Módulo de finura | | | | | | 4,56 |

M1: massa em gramas e percentual da Amostra 1; M2: massa em gramas e percentual da Amostra 2; Md: Média das massas M1 e M2 em percentual.

Tabela 44 - Composição granulométrica da brita reciclada.

| Peneiras ABNT (mm) | Massa retida (g) | | % retida individual | | | % retida acumulada |
|--------------------------|------------------|--------|---------------------|-------|-------|-----------------------|
| | M1 | M2 | M1 | M2 | Md | |
| 0,15 | 25,99 | 34,59 | 2,62 | 3,46 | 3,04 | 94,81 |
| 0,3 | 22,44 | 32,88 | 2,26 | 3,29 | 2,78 | 91,77 |
| 0,6 | 23,58 | 33,86 | 2,38 | 3,39 | 2,88 | 88,99 |
| 1,18 | 29,22 | 33,63 | 2,95 | 3,36 | 3,16 | 86,10 |
| 2,36 | 322,43 | 327,11 | 32,51 | 32,71 | 32,61 | 82,95 |
| 4,75 | 201,49 | 183,67 | 20,32 | 18,37 | 19,34 | 50,34 |
| 6,3 | 227,97 | 194,49 | 22,99 | 19,45 | 21,21 | 31,00 |
| 9,5 | 97,98 | 97 | 9,88 | 9,70 | 9,79 | 9,79 |
| Fundo | 40,72 | 62,7 | 4,11 | 6,27 | 5,19 | |
| Diâmetro máximo (mm) | | | | | | 9,5 |
| Módulo de finura | | | | | | 5,05 |

M1: massa em gramas e percentual da Amostra 1; M2: massa em gramas e percentual da Amostra 2; Md: Média das massas M1 e M2 em percentual.

APÊNDICE B – Análise dimensional dos blocos de concreto

Tabela 45 - Análise dimensional dos blocos da família BC.

| Amostra | Largura (mm) | Altura (mm) | Comprimento (mm) | Espessura equivalente mínima (e_{eq}) (mm/m) | Área bruta (A_b) (mm ²) | Espessura mínima da parede longitudinal (e_l) (mm) |
|---------|--------------|-------------|------------------|--|---|--|
| 1 | 140 | 188 | 388 | 214 | 54367 | 28 |
| 2 | 140 | 189 | 390 | 213 | 54470 | 27 |
| 3 | 141 | 187 | 389 | 216 | 54719 | 28 |
| 4 | 139 | 187 | 389 | 214 | 54025 | 27 |
| 5 | 139 | 187 | 389 | 216 | 54117 | 27 |
| 6 | 141 | 187 | 390 | 218 | 55037 | 29 |
| 7 | 138 | 188 | 388 | 217 | 52210 | 28 |
| 8 | 140 | 188 | 390 | 221 | 54470 | 28 |
| 9 | 138 | 189 | 390 | 218 | 53950 | 27 |
| 10 | 140 | 189 | 390 | 220 | 54517 | 28 |
| 11 | 139 | 188 | 390 | 218 | 54164 | 27 |
| 12 | 139 | 188 | 390 | 220 | 54386 | 27 |

Tabela 46 - Análise dimensional dos blocos da família BR30.

| Amostra | Largura (mm) | Altura (mm) | Comprimento (mm) | Espessura equivalente mínima (e_{eq}) (mm/m) | Área bruta (A_b) (mm ²) | Espessura mínima da parede longitudinal (e_l) (mm) |
|---------|--------------|-------------|------------------|--|---|--|
| 1 | 138 | 189 | 389 | 213 | 53858 | 27 |
| 2 | 139 | 188 | 390 | 215 | 54340 | 27 |
| 3 | 139 | 189 | 389 | 218 | 53988 | 27 |
| 4 | 140 | 188 | 389 | 213 | 54460 | 28 |
| 5 | 139 | 189 | 389 | 213 | 54201 | 28 |
| 6 | 139 | 188 | 389 | 218 | 53988 | 28 |
| 7 | 138 | 188 | 388 | 214 | 53544 | 27 |
| 8 | 139 | 189 | 388 | 214 | 53978 | 28 |
| 9 | 138 | 188 | 389 | 216 | 53682 | 27 |
| 10 | 140 | 189 | 389 | 219 | 54284 | 28 |
| 11 | 140 | 189 | 390 | 213 | 54553 | 28 |
| 12 | 138 | 188 | 388 | 211 | 53415 | 27 |

Tabela 47 - Análise dimensional dos blocos da família BR50.

| Amostra | Largura (mm) | Altura (mm) | Comprimento (mm) | Espessura equivalente mínima (e_{eq}) (mm/m) | Área bruta (A_b) (mm ²) | Espessura mínima da parede longitudinal (e_l) (mm) |
|---------|--------------|-------------|------------------|--|---|--|
| 1 | 140 | 189 | 389 | 221 | 54377 | 28 |
| 2 | 139 | 190 | 389 | 219 | 54071 | 27 |
| 3 | 140 | 189 | 390 | 218 | 54470 | 28 |
| 4 | 140 | 190 | 389 | 219 | 54543 | 28 |
| 5 | 139 | 190 | 390 | 218 | 54034 | 28 |
| 6 | 141 | 190 | 390 | 223 | 54813 | 29 |
| 7 | 139 | 190 | 390 | 220 | 54256 | 28 |
| 8 | 139 | 191 | 389 | 216 | 54071 | 28 |
| 9 | 139 | 191 | 389 | 221 | 54201 | 28 |
| 10 | 140 | 190 | 390 | 218 | 54600 | 28 |
| 11 | 140 | 190 | 390 | 216 | 54683 | 28 |
| 12 | 139 | 191 | 389 | 221 | 54117 | 28 |

Tabela 48 - Análise dimensional dos blocos da família BR100.

| Amostra | Largura (mm) | Altura (mm) | Comprimento (mm) | Espessura equivalente mínima (e_{eq}) (mm/m) | Área bruta (A_b) (mm ²) | Espessura mínima da parede longitudinal (e_l) (mm) |
|---------|--------------|-------------|------------------|--|---|--|
| 1 | 138 | 188 | 389 | 216 | 53682 | 27 |
| 2 | 140 | 189 | 389 | 216 | 54330 | 28 |
| 3 | 139 | 188 | 388 | 219 | 54108 | 28 |
| 4 | 139 | 189 | 389 | 218 | 54247 | 28 |
| 5 | 140 | 188 | 389 | 219 | 54460 | 28 |
| 6 | 139 | 189 | 390 | 221 | 54294 | 28 |
| 7 | 140 | 188 | 389 | 216 | 54413 | 28 |
| 8 | 139 | 189 | 389 | 218 | 53988 | 27 |
| 9 | 140 | 188 | 392 | 217 | 54796 | 28 |
| 10 | 139 | 188 | 389 | 213 | 54071 | 27 |
| 11 | 140 | 189 | 387 | 217 | 54098 | 28 |
| 12 | 139 | 189 | 389 | 216 | 54154 | 28 |

APÊNDICE C – Resultados individuais de área líquida dos blocos de concreto

Tabela 49 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BC.

| Amostra | m2 (g) | m3 (g) | Altura média (mm) | Área líquida (mm²) | Área líquida média (mm²) |
|----------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 14 | 12940 | 7420 | 187 | 29519 | |
| 18 | 13280 | 7640 | 188 | 30000 | |
| 19 | 13040 | 7560 | 191 | 28691 | |
| 20 | 12140 | 7140 | 186 | 26882 | 28654 |
| 21 | 12300 | 7220 | 186 | 27312 | |
| 22 | 12800 | 7420 | 188 | 28617 | |

m2: massa do corpo de prova saturado; m3: massa aparente do corpo de prova.

Tabela 50 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BR30.

| Amostra | m2 (g) | m3 (g) | Altura média (mm) | Área líquida (mm²) | Área líquida média (mm²) |
|----------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 13 | 12900 | 7100 | 190 | 30526 | |
| 14 | 12700 | 7160 | 191 | 29005 | |
| 15 | 12720 | 7140 | 191 | 29215 | |
| 16 | 12560 | 7020 | 189 | 29312 | 29263 |
| 17 | 12700 | 7100 | 188 | 29787 | |
| 18 | 12580 | 7060 | 189 | 29206 | |

m2: massa do corpo de prova saturado; m3: massa aparente do corpo de prova.

Tabela 51 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BR50.

| Amostra | m2 (g) | m3 (g) | Altura média (mm) | Área líquida (mm²) | Área líquida média (mm²) |
|----------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 13 | 12720 | 7000 | 190 | 30105 | |
| 14 | 12440 | 6820 | 191 | 29424 | |
| 15 | 12560 | 6860 | 191 | 29843 | |
| 16 | 12560 | 6860 | 189 | 30159 | 29920 |
| 17 | 12500 | 6880 | 188 | 29894 | |
| 18 | 12440 | 6780 | 189 | 29947 | |

m2: massa do corpo de prova saturado; m3: massa aparente do corpo de prova.

Tabela 52 - Resultados individuais de área líquida dos blocos da família BR100.

| Amostra | m2 (g) | m3 (g) | Altura média (mm) | Área líquida (mm²) | Área líquida média (mm²) |
|----------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 19 | 12360 | 6700 | 188 | 30106 | |
| 20 | 12200 | 6520 | 188 | 30213 | |
| 21 | 12500 | 6720 | 188 | 30745 | |
| 22 | 12340 | 6660 | 187 | 30374 | 30294 |
| 23 | 12300 | 6560 | 188 | 30532 | |
| 24 | 12260 | 6600 | 188 | 30106 | |

m2: massa do corpo de prova saturado; m3: massa aparente do corpo de prova.

APÊNDICE D – Resultados individuais de massa específica dos blocos de concreto

Tabela 53 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BC.

| Amostra | m1 (g) | m2 (g) | ds (g/cm³) | dssd (g/cm³) |
|----------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| 14 | 12320 | 12940 | 2,232 | 2,344 |
| 18 | 12600 | 13280 | 2,234 | 2,355 |
| 19 | 12460 | 13040 | 2,274 | 2,380 |
| 20 | 11560 | 12140 | 2,312 | 2,428 |
| 21 | 11740 | 12300 | 2,311 | 2,421 |
| 22 | 12140 | 12800 | 2,257 | 2,379 |

m1: massa do bloco seco em estufa; m2: massa do corpo de prova saturado; ds: massa específica do bloco seco; dssd: massa específica do bloco saturado.

Tabela 54 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BR30.

| Amostra | m1 (g) | m2 (g) | ds (g/cm³) | dssd (g/cm³) |
|----------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| 13 | 12040 | 12900 | 2,076 | 2,224 |
| 14 | 11920 | 12700 | 2,152 | 2,292 |
| 15 | 11900 | 12720 | 2,133 | 2,280 |
| 16 | 11700 | 12560 | 2,112 | 2,267 |
| 17 | 11880 | 12700 | 2,121 | 2,268 |
| 18 | 11740 | 12580 | 2,127 | 2,279 |

m1: massa do bloco seco em estufa; m2: massa do corpo de prova saturado; ds: massa específica do bloco seco; dssd: massa específica do bloco saturado.

Tabela 55 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BR50.

| Amostra | m1 (g) | m2 (g) | ds (g/cm³) | dssd (g/cm³) |
|----------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| 13 | 11720 | 12720 | 2,049 | 2,224 |
| 14 | 11480 | 12440 | 2,043 | 2,214 |
| 15 | 11560 | 12560 | 2,028 | 2,204 |
| 16 | 11540 | 12560 | 2,025 | 2,204 |
| 17 | 11520 | 12500 | 2,050 | 2,224 |
| 18 | 11440 | 12440 | 2,021 | 2,198 |

m1: massa do bloco seco em estufa; m2: massa do corpo de prova saturado; ds: massa específica do bloco seco; dssd: massa específica do bloco saturado.

Tabela 56 - Resultados individuais de massa específica dos blocos em condição seca e saturada da família BR100.

| Amostra | m1 (g) | m2 (g) | ds (g/cm³) | dssd (g/cm³) |
|----------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| 13 | 11000 | 12360 | 1,943 | 2,184 |
| 14 | 10820 | 12200 | 1,905 | 2,148 |
| 15 | 11160 | 12500 | 1,931 | 2,163 |
| 16 | 11000 | 12340 | 1,937 | 2,173 |
| 17 | 10940 | 12300 | 1,906 | 2,143 |
| 18 | 10860 | 12260 | 1,919 | 2,166 |

m1: massa do bloco seco em estufa; m2: massa do corpo de prova saturado; ds: massa específica do bloco seco; dssd: massa específica do bloco saturado.

APÊNDICE E – Resultados individuais de absorção de água dos blocos de concreto

Tabela 57 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BC.

| Amostra | Massa seca em estufa (g) | Massa saturada com superfície seca (g) | Absorção (%) | Absorção Média (%) |
|----------------|---------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| 13 | 12280 | 12940 | 5,37 | 5,31 |
| 14 | 12320 | 12940 | 5,03 | |
| 15 | 12360 | 13020 | 5,34 | |
| 16 | 12120 | 12780 | 5,45 | |
| 17 | 12540 | 13200 | 5,26 | |
| 18 | 12600 | 13280 | 5,40 | |

Tabela 58 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BR30.

| Amostra | Massa seca em estufa (g) | Massa saturada com superfície seca (g) | Absorção (%) | Absorção Média (%) |
|----------------|---------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| 13 | 12040 | 12900 | 7,14 | 7,10 |
| 14 | 11920 | 12770 | 7,13 | |
| 15 | 11900 | 12720 | 6,89 | |
| 16 | 11700 | 12560 | 7,35 | |
| 17 | 11880 | 12700 | 6,90 | |
| 18 | 11740 | 12580 | 7,16 | |

Tabela 59 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BR50.

| Amostra | Massa seca em estufa (g) | Massa saturada com superfície seca (g) | Absorção (%) | Absorção Média (%) |
|----------------|---------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| 13 | 11720 | 12720 | 8,53 | 8,61 |
| 14 | 11480 | 12440 | 8,36 | |
| 15 | 11560 | 12560 | 8,65 | |
| 16 | 11540 | 12560 | 8,84 | |
| 17 | 11520 | 12500 | 8,51 | |
| 18 | 11440 | 12440 | 8,74 | |

Tabela 60 - Massas seca, saturada e absorção de água dos blocos da família BR100.

| Amostra | Massa seca em estufa (g) | Massa saturada com superfície seca (g) | Absorção (%) | Absorção Média (%) |
|----------------|---------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| 13 | 11260 | 12520 | 11,19 | 11,15 |
| 14 | 11100 | 12340 | 11,17 | |
| 15 | 11000 | 12240 | 11,27 | |
| 16 | 11140 | 12340 | 10,77 | |
| 17 | 10940 | 12160 | 11,15 | |
| 18 | 10760 | 11980 | 11,34 | |

APÊNDICE F – Resultados individuais de resistência à compressão dos blocos de concreto

Tabela 61 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BC.

| Amostra | Massa (g) | Área (mm²) | Leitura do manômetro (N) | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à compressão média (MPa) |
|----------------|------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| 1 | 12610 | 54034 | 555674 | 10,3 | |
| 2 | 12780 | 54294 | 617250 | 11,4 | |
| 3 | 12790 | 54777 | 609483 | 11,1 | |
| 4 | 12440 | 54386 | 704784 | 13,0 | |
| 5 | 12520 | 54386 | 652711 | 12,0 | |
| 6 | 13000 | 54126 | 721760 | 13,3 | |
| 7 | 12210 | 53736 | 592430 | 11,0 | 12,2 |
| 8 | 12820 | 54647 | 728379 | 13,3 | |
| 9 | 12290 | 54433 | 641061 | 11,8 | |
| 10 | 12690 | 54533 | 708315 | 13,0 | |
| 11 | 12710 | 53996 | 683710 | 12,7 | |
| 12 | 12680 | 54517 | 734204 | 13,5 | |

Tabela 62 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BR30.

| Amostra | Massa (g) | Área (mm²) | Leitura do manômetro (N) | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à compressão média (MPa) |
|----------------|------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| 1 | 11980 | 53560 | 491872 | 9,2 | |
| 2 | 12230 | 54210 | 500933 | 9,2 | |
| 3 | 12200 | 54247 | 528196 | 9,7 | |
| 4 | 12110 | 54340 | 421451 | 7,8 | |
| 5 | 12150 | 54256 | 481801 | 8,9 | |
| 6 | 12100 | 54164 | 492588 | 9,1 | 9,5 |
| 7 | 12080 | 54730 | 419293 | 12,1 | |
| 8 | 12280 | 54423 | 578406 | 10,6 | |
| 9 | 12120 | 53820 | 579848 | 10,8 | |
| 10 | 12510 | 54340 | 574307 | 10,6 | |
| 11 | 12360 | 54517 | 472014 | 8,7 | |
| 12 | 11800 | 53300 | 366063 | 6,9 | |

Tabela 63 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BR50.

| Amostra | Massa (g) | Área (mm²) | Leitura do manômetro (N) | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à compressão média (MPa) |
|----------------|------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| 1 | 12230 | 54507 | 557253 | 10,2 | |
| 2 | 11800 | 54517 | 545819 | 10,0 | |
| 3 | 12120 | 54210 | 540425 | 10,0 | |
| 4 | 11850 | 54265 | 515967 | 9,5 | |
| 5 | 12090 | 54386 | 650622 | 12,0 | |
| 6 | 12520 | 54517 | 596244 | 10,9 | |
| 7 | 12140 | 53912 | 684720 | 12,7 | 10,2 |
| 8 | 11920 | 54423 | 483958 | 8,9 | |
| 9 | 12220 | 54423 | 522802 | 9,6 | |
| 10 | 12132 | 54526 | 541072 | 9,9 | |
| 11 | 12320 | 53904 | 583800 | 10,8 | |
| 12 | 11890 | 54517 | 446624 | 8,2 | |

Tabela 64 - Dados individuais dos resultados de resistência à compressão dos blocos da família BR100.

| Amostra | Massa (g) | Área (mm²) | Leitura do manômetro (N) | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à compressão média (MPa) |
|----------------|------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| 1 | 11060 | 54377 | 485321 | 8,9 | |
| 2 | 11420 | 53636 | 448134 | 8,4 | |
| 3 | 11460 | 54488 | 494608 | 9,1 | |
| 4 | 11620 | 54164 | 479065 | 8,8 | |
| 5 | 11640 | 54247 | 489067 | 9,0 | |
| 6 | 11550 | 54237 | 536463 | 9,9 | |
| 7 | 11370 | 54479 | 476260 | 8,7 | 9,3 |
| 8 | 11560 | 54117 | 573513 | 10,6 | |
| 9 | 11630 | 54377 | 543945 | 10,0 | |
| 10 | 11250 | 54470 | 477917 | 8,8 | |
| 11 | 11060 | 54423 | 536973 | 9,9 | |
| 12 | 11500 | 54154 | 506043 | 9,3 | |