

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA**

RÉGIA MARA PETITTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO CIVIL DA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS EM
ARGAMASSA DE USO GERAL POR MÉTODO MULTICRITÉRIOS**

CAMPINAS

2017

RÉGIA MARA PETITTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO CIVIL DA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS EM
ARGAMASSA DE USO GERAL POR MÉTODO MULTICRITÉRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientadora: Profa. Dra. Elizabeth Fátima de Souza

PUC-CAMPINAS

2017

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t690
P491a

Petitto, Régia Mara.

Análise da viabilidade de aplicação de resíduos de construção civil da Região Metropolitana de Campinas em argamassa de uso geral por método multicritérios / Régia Mara Petitto. – Campinas: PUC-Campinas, 2017.

170p.

Orientador: Elizabeth Fátima de Souza.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Inclui anexo e bibliografia.

1. Construção civil. 2. Resíduos. 3. Argamassa – Avaliação. 4. Ambientalismo. I. Souza, Elizabeth Fátima de. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

18.ed. CDD – t690

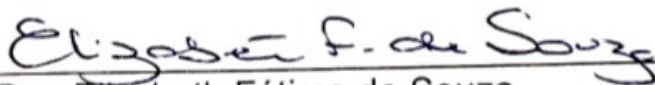
RÉGIA MARA PETITTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO CIVIL DA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS EM
ARGAMASSA DE USO GERAL POR MÉTODO MULTICRITÉRIOS**

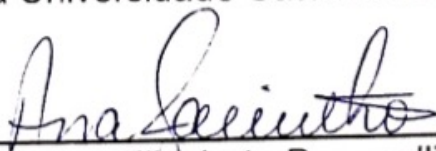
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof (a). Dr (a). Elizabeth Fátima de Souza

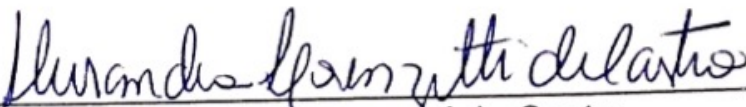
Dissertação defendida e aprovada em 21 de junho de 2017 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Elizabeth Fátima de Souza
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de A. Jacintho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

*À Deus que não só capacita os escolhidos, mas dá forças aos Seus
quando sentem não haver mais forças para continuar.*

Obrigada Senhor!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo o que tem me concedido e permitido realizar até aqui.

Aos meus familiares, que entendem a ausência física.

À minha orientadora que, usada por Deus, soube me dar forças, estimular, orientar a fazer o melhor, da melhor maneira.

Aos amigos que Deus me permitiu conhecer ao longo deste curso, sejam eles alunos, professores ou técnicos.

Aos técnicos do laboratório de material e estruturas e do laboratório de química que ajudaram sobremaneira na execução dos ensaios necessários.

Às empresas e instituições que cederam tempo, informação e material para a realização deste trabalho.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente ajudaram na elaboração deste trabalho, seja com apoio, orações, conselhos ou na execução de alguma tarefa.

“Como é feliz aquele cujo auxílio é o Deus de Jacó, cuja esperança está no Senhor, no seu Deus, que fez os céus e a terra, o mar e tudo o que neles há, e que mantém a sua fidelidade para sempre!”

Salmos 146:6 NVI

RESUMO

PETITTO, Régia Mara. *Análise da viabilidade de aplicação de resíduos da construção civil da Região Metropolitana de Campinas em argamassas de uso geral por método multicritérios*. 2017. 170f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar os agregados reciclados gerados na região metropolitana de Campinas e testar sua aplicação na produção de argamassas para uso geral. A partir de uma abordagem qualitativa, com objetivo exploratório, foram realizados os levantamentos da legislação vigente e exigências legais impostas à gestão dos resíduos sólidos e do panorama desta gestão na região metropolitana de Campinas. As seis usinas recicladoras para destinação dos resíduos de construção civil (RCC) gerados nos municípios implantadas foram identificadas e, a partir dos dados coletados, elaborou-se um mapa com a localização geográfica destas usinas. Após a coleta de amostras, com abordagem quantitativa de natureza aplicada e objetivo exploratório, foram realizadas análises das características físicas (composição granulométrica, teor de material passante na peneira de 75 μm , absorção de água, teor de torrões de argila e materiais friáveis, massa específica e impureza orgânica) e químicas (sais solúveis e teor de matéria orgânica por perda ao fogo) destes materiais. Todos os agregados analisados apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios de composição granulométrica e absorção de água. Já quanto ao teor de material fino (menor que 75 μm), teor de torrões de argila e materiais friáveis e impurezas orgânicas, foram poucas as amostras que poderiam ser aceitas para o emprego recomendado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A análise do teor de sais solúveis também inviabilizaria a aceitação do agregado de alguns fornecedores. Com a substituição de agregado natural pelos agregados reciclados foram preparadas argamassas com traço de 1:3 (cimento:agregado), e substituição de 20 e 40% do agregado natural. Foram determinadas as características das argamassas no estado fresco (retenção de água, teor de ar incorporado, densidade de massa) e endurecido (absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e massa específica aparente no estado endurecido). A partir dos resultados obtidos verificou-se, por aplicação do método de avaliação multicritérios, com a metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP), o teor de incorporação do agregado reciclado na produção de argamassas de uso geral compostas por cimento e areia. Para a aplicação deste método foram atribuídos pesos a critérios pontuados ligados ao desempenho físico e mecânico das argamassas e critérios ambientais ligados ao esgotamento dos recursos naturais e distância de transporte. O melhor resultado foi encontrado na argamassa com teor de substituição de 20% de agregado reciclado misto da unidade municipal de Campinas, mas não é possível observar tendência de obter melhores resultados em argamassas com menor teor de substituição, nem tão pouco exclusivamente por argamassas com agregados reciclados mistos.

Palavras-chave: Resíduo de construção civil. Caracterização física e química. Agregado reciclado. Argamassa. Avaliação multicritérios.

ABSTRACT

PETITTO, Régia Mara. *Analysis of the feasibility of applying construction waste from the Metropolitan Region of Campinas to mortars of general use by multi-criteria method*. 2017. 170p. Master Thesis (Master in Urban Infrastructure Systems) - Graduate Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas, 2017.

The objective of this work was to characterize the recycled aggregates generated in the metropolitan region of Campinas and to test its application in the production of mortars for general use. From a qualitative approach, with an exploratory objective, the surveys of the current legislation and legal requirements imposed to solid waste management and the panorama of this management in the metropolitan region of Campinas were carried out. The six recycling plants for the disposal of construction waste (RCC) generated in the implanted municipalities were identified and, based on the data collected, a map with the geographic location of these plants was elaborated. After the sample collection, with a quantitative approach of applied nature and exploratory objective, analyzes of the physical characteristics were made (grain size composition, 75 μm sieve material, water absorption, clay cladding content and friable materials, Specific mass and organic impurity) and chemical (soluble salts and organic matter content by fire loss) of these materials. All the analyzed aggregates presented satisfactory results in the granulometric composition and water absorption tests. Regarding the content of fine material (less than 75 μm), clay content and friable materials and organic impurities, few samples could be accepted for use recommended by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The analysis of the soluble salts content would also make it impossible to accept the aggregate of some suppliers. With the replacement of natural aggregate by the recycled aggregates, mortars with a 1: 3 dash (cement: aggregate) were prepared, and 20 and 40% of the natural aggregate were replaced. The characteristics of the mortars in the fresh state (water retention, incorporated air content, mass density) and hardened (water absorption by capillarity, capillary coefficient, compressive strength, flexural tensile strength and apparent specific mass in the Hardened state). From the results obtained, the analytical Hierarchy Process (AHP) methodology showed the content of incorporation of the recycled aggregate in the production of general purpose mortars composed of cement and sand. For the application of this method, weights were assigned to punctuated criteria related to the physical and mechanical performance of mortars and environmental criteria related to the exhaustion of natural resources and transport distance. The best result was found in mortar with a 20% substitute content of mixed recycled aggregate by municipal unit from Campinas, but it is not possible to observe a tendency to obtain better results in mortars with lower substitution content, nor exclusively by mortars with mixed recycled aggregates.

Keywords: *Civil construction waste. Physical and chemical characterization Recycled aggregate. Mortar. Multicriteria evaluation.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Gráfico da variação do crescimento populacional no meio urbano no Brasil..... | 1 |
| Figura 2 – Gráfico da variação da quantidade de resíduos recebidos em unidades de processamento no Brasil. | 3 |
| Figura 3 – Cronologia da legislação que trata a gestão dos resíduos sólidos da construção civil no Brasil..... | 4 |
| Figura 4 – Fotografia da triagem manual na usina recicladora de Pedreira/SP..... | 15 |
| Figura 5 – Fotografia da separação de material metálico na usina recicladora municipal de Campinas/SP..... | 15 |
| Figura 6 – Fotografia do classificador e esteiras de transporte com deposição de material britado na usina recicladora de Hortolândia/SP..... | 16 |
| Figura 7 - Fotografias da realização da determinação do teor de íons cloretos: (a) solução composta por amostra, água destilada e indicador; (b) resultado após precipitação do nitrato de prata; (c) resultado do ensaio em triplicata. | 25 |
| Figura 8 – Representação do ciclo de vida da argamassa. | 31 |
| Figura 9 – Imagem da calculadora desenvolvida e disponibilizada pelo Business Performance Management Singapore (BPMSG)..... | 37 |
| Figura 10 – Imagem da planilha eletrônica desenvolvida para a realização da análise multicritérios deste trabalho. | 38 |
| Figura 11 – Imagem da planilha eletrônica com o tratamento dos resultados e aplicação dos pesos para a realização da análise multicritérios..... | 39 |
| Figura 12 – Mapas temáticos com a situação da Região metropolitana de Campinas quanto a: (a) urbanização; (b) renda per capita; (c) IDH e (d) coleta de RCD. | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 13 – Mapa temático da existência de consórcio municipal e localização das UREs da região metropolitana de Campinas em 2013..... | 47 |
| Figura 14 – Fotografias da usina recicladora privada de Americana – SP: (a) vista do abastecimento do britador e correia transportadora do material processado para o classificador; (b) da pilha de entulho e (c) geral do classificador. | 48 |
| Figura 15 – Fotografias da usina recicladora municipal de Campinas – SP: (a) vista do abastecimento do britador; (b) geral do classificador e (c) geral do armazenamento e carregamento de agregado reciclado..... | 49 |
| Figura 16 – Fotografias da usina recicladora privada de Campinas – SP: (a) vista geral da área de transbordo; (b) do britador principal (britador de mandíbulas); (c) do britador secundário (britador hidráulico) e (d) do classificador e esteiras transportadoras. | 50 |
| Figura 17 – Fotografias da usina recicladora de parceria público-privada de Hortolândia – SP: (a) vista do britador; (b) da correia transportadora após classificação e (c) do classificador. | 51 |
| Figura 18 – Fotografias da usina recicladora privada de Paulínia – SP: (a) vista da correia transportadora após classificação; (b) do britador e (c) do material estocado para processamento. | 52 |
| Figura 19 – Fotografias da usina recicladora privada de Pedreira – SP: (a) vista do material recebido para processamento; (b) do processo de triagem; (c) do classificador e esteiras transportadoras de agregados e (d) do triturador de madeira... | 53 |
| Figura 20 – Fotografias das amostras de agregado miúdo reciclado misto coletadas nas usinas recicladoras de: (a) Americana; (b) Campinas (municipal); (c) Campinas (privada) e (d) Pedreira..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 – Fotografias das amostras de agregado miúdo reciclado de concreto coletadas nas usinas recicladoras de: (a) Americana; (b) Campinas (privada); (c) Hortolândia e (d) Pedreira. | 54 |
| Figura 22 – Fotografia da amostra de agregado miúdo natural de rio. | 54 |
| Figura 23 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados da RMC: (a) agregados reciclados de concreto; (b) agregados reciclados mistos..... | 63 |
| Figura 24 – Gráfico do teor de finos dos agregados miúdos reciclados da RMC e limites estabelecidos na NBR 15116:2004. | 65 |
| Figura 25 – Gráfico da absorção de água das amostras dos agregados reciclados..... | 67 |
| Figura 26 – Gráfico com o teor de torrões de argila e materiais friáveis das amostras dos agregados reciclados..... | 69 |
| Figura 27 – Gráfico da massa específica das amostras dos agregados reciclados..... | 71 |
| Figura 28 – Gráfico da massa específica aparente das amostras dos agregados reciclados. | 72 |
| Figura 29 – Fotografias dos resultados obtidos nos ensaios de impurezas orgânicas, com o padrão à esquerda e a amostra à direita do agregado miúdo natural de rio. | 73 |
| Figura 30 – Fotografias dos resultados obtidos nos ensaios de impurezas orgânicas, com o padrão à esquerda e a amostra à direita, dos agregados miúdos reciclados de concreto: (a) Americana; (b) Campinas (privada) e (c) Hortolândia; (d) Pedreira. | 73 |
| Figura 31 – Fotografias dos resultados obtidos nos ensaios de impurezas orgânicas, com o padrão à esquerda e a amostra à direita dos agregados miúdos reciclados mistos de: (a) Americana; (b) Campinas (municipal); (c) Campinas (privada); (d) Pedreira. | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 – Gráfico do teor de sais solúveis presentes nas amostras dos agregados reciclados..... | 74 |
| Figura 33 – Gráfico do teor de cloretos presentes nas amostras de agregados reciclados..... | 76 |
| Figura 34 – Gráfico do teor de íons sulfatos presentes nas amostras dos agregados reciclados..... | 78 |
| Figura 35 – Gráfico do teor de perda de massa nas temperaturas de 350 °C e 950 °C das amostras de agregados miúdos reciclados da RMC..... | 79 |
| Figura 36 – Fotografias das amostras do agregado miúdo natural de rio: (a) seco em estufa a 105 °C; (b) após calcinação a 350 °C e (c) após calcinação a 950 °C em mufla..... | 79 |
| Figura 37 – Fotografia das amostras dos agregados miúdos reciclados de concreto, antes e depois do ensaio de perda ao fogo, nas temperaturas de 350 °C e 950 °C: (a) Americana; (b) Campinas – privada; (c) Hortolândia; (d) Pedreira. | 80 |
| Figura 38 – Fotografia das amostras dos agregados miúdos reciclados mistos, antes e depois do ensaio de perda ao fogo, nas temperaturas de 350 °C e 950 °C: (a) Americana; (b) Campinas – municipal; (c) Campinas – privada; (d) Pedreira. | 80 |
| Figura 39 – Gráfico da densidade de massa apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | |

| | |
|---|----|
| Figura 40 – Fotografia da consistência da argamassa: (a) argamassa referência; (b) argamassa com 40% de substituição do agregado miúdo natural de rio por agregado miúdo reciclado. . | 87 |
|---|----|

| | |
|--|--|
| Figura 41 – Gráfico do índice de consistência apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | |
|--|--|

| | |
|---|-----|
| Figura 42 – Fotografia de uma argamassa sem aglomeração entre as partículas. | 88 |
| Figura 43 – Gráfico da retenção de água apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | 90 |
| Figura 44 – Gráfico do teor de ar incorporado apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | 91 |
| Figura 45 – Gráfico da massa específica no estado fresco (colunas) e da massa específica teórica (g/cm ³) (linhas) apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | 92 |
| Figura 46 – Gráfico da absorção de água por capilaridade, em 10 minutos, apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %..... | 95 |
| Figura 47 – Gráfico da absorção de água por capilaridade, em 90 minutos, apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %..... | 96 |
| Figura 48 – Gráfico do coeficiente de capilaridade apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | 97 |
| Figura 49 – Gráfico da massa específica aparente apresentado pelas argamassas, no estado endurecido, testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %..... | 98 |
| Figura 50 – Gráfico da resistência à tração na flexão apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | 99 |
| Figura 51 – Gráfico da resistência à compressão axial apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %. | 101 |
| Figura 52 – Gráfico com os resultados na análise multicritérios do desempenho físico e mecânico das argamassas. | 118 |

| | |
|---|-----|
| Figura 53 – Cenários de transporte dos agregados miúdos natural e reciclado..... | 119 |
| Figura 54 – Gráfico com os resultados na análise multicritérios da interferência dos fatores para a definição do teor de substituição..... | 125 |
| Figura 55 – Gráfico com os resultados na análise multicritérios para identificação do teor de substituição. | 127 |
| Figura 56 – Fotografia do quarteador mecânico utilizado no processo de redução das amostras de campo..... | 147 |
| Figura 57 – Fotografia do agitador eletromecânico e série de peneiras para determinação da composição granulométrica..... | 148 |
| Figura 58 – Fotografia da lavagem do agregado para determinação do teor de material fino. | 150 |
| Figura 59 – Fotografias (a) das peneiras utilizadas na classificação granulométrica da amostra segundo os intervalos prescritos; (b) amostra classificada para determinação do teor de torrões de argila e materiais friáveis. | 151 |
| Figura 60 – Fotografia da lavagem da amostra de agregados miúdos reciclados..... | 152 |
| Figura 61 – Fotografias das etapas para determinação das impurezas orgânicas: (a) 200 g de amostra e 100 mL de hidróxido de sódio; (b) amostra em solução de hidróxido de sódio; (c) hidróxido de sódio e ácido tânico para preparo da solução padrão..... | 154 |
| Figura 62 – Fotografias das etapas da obtenção da condição saturada com superfície seca em agregados miúdos: (a) e (b) material saturado espalhado e recebendo ar quente; (c) material recebendo golpes de haste normal no molde tronco cônico; (d) material no estado saturado com superfície seca. | 155 |
| Figura 63 – Fotografias das etapas para obtenção da solução dos sais solúveis: (a) amostra com 20 g; (b) amostra em 100 mL de | |

água destilada aquecida a $(80 \pm 5) ^\circ\text{C}$, no agitador magnético;
(c) recolhimento do filtrado em balão volumétrico de 500 mL... 158

Figura 64 – Fotografias da realização da determinação do teor de íons sulfato: (a) preparo da solução com vermelho de metila e ácido clorídrico; (b) teste com nitrato de prata; (c) cadinhos tarados com papel filtro e precipitados; (d) cadinhos de porcelana na mufla para calcinação do papel filtro..... 160

Figura 65 – Fotografias do ensaio para determinação do teor de matéria orgânica por perda ao fogo: (a) cadinhos na mufla a 350°C ; (b) cadinhos no dessecador até atingirem a temperatura ambiente; (c) amostra seca em estufa; (d) amostra após 50 minutos a $350 ^\circ\text{C}$; (e) amostra após 50 minutos a $950 ^\circ\text{C}$ 162

Figura 66 – Fotografias do ensaio para determinação da densidade de massa: (a) recipiente de ensaio com primeira camada de argamassa; (b) recipiente de ensaio com segunda camada e haste de adensamento; (c) recipiente de ensaio com última camada e haste de adensamento..... 163

Figura 67 – Fotografias do ensaio para determinação do índice de consistência da argamassa: (a) molde tronco-cônico e soquete normal na mesa de consistência; (b) determinação do espalhamento com paquímetro..... 165

Figura 68 – Fotografias do ensaio para determinação da capacidade de retenção de água da argamassa: (a) aparato com funil e bomba a vácuo; (b) sucção da água utilizada para umedecer o papel filtro; (c) determinação da massa do aparato; (d) determinação da massa inicial da argamassa analisada; (e) determinação da massa final da argamassa analisada..... 165

Figura 69 – Fotografia do ensaio para absorção de água por capilaridade: corpos de prova apresentando a face quadrada em contato com água. 167

- Figura 70 – Fotografias do ensaio para determinação da resistência à tração na flexão: (a) corpo de prova nos dispositivos de apoio e carregamento; (b) corpo de prova após o ensaio. 169
- Figura 71 – Fotografias do ensaio para determinação da resistência à compressão axial: (a) metade do corpo de prova prismático posicionado no aparato para determinação da resistência à compressão; (b) fratura do corpo de prova; (c) corpo de prova após ruptura..... 170

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Municípios, total e com Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, nos termos estabelecidos na Política Nacional de Resíduos Sólidos, na federação e por grandes regiões, em 2013..... | 4 |
| Tabela 2 – Estimativa de geração de resíduos de construção civil em alguns países..... | 5 |
| Tabela 3 – Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a ABNT NBR 10004:2004..... | 13 |
| Tabela 4 – Alguns estudos anteriores sobre a influência do uso de agregado reciclado sobre as propriedades do concreto. | 17 |
| Tabela 5 – Escala de importância para os critérios analisados, segundo o método de análise multicritérios..... | 20 |
| Tabela 6 – Ensaio e normas para caracterização física dos agregados e dos agregados reciclados. | 23 |
| Tabela 7 – Ensaio e normas para caracterização química de agregados reciclados..... | 24 |
| Tabela 8 – Identificação dos traços de argamassa para o estudo..... | 26 |
| Tabela 9 – Composição das argamassas para o estudo (traço em massa 1:3)..... | 27 |
| Tabela 10 – Ensaio e normas para caracterização física de argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos no estado fresco. | 30 |
| Tabela 11 – Ensaio e normas para caracterização física e mecânica de argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos no estado endurecido..... | 30 |
| Tabela 12 – Dados dos municípios pertencentes à região metropolitana de Campinas..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Tabela 13 – Dados da gestão dos resíduos sólidos da construção civil dos municípios pertencentes à região metropolitana de Campinas. (continua) | 44 |
| Tabela 14 - Siglas empregadas para a identificação das amostras. | 53 |
| Tabela 15 – Resultados obtidos na classificação granulométrica das amostras dos agregados miúdos da RMC. (continua) | 56 |
| Tabela 16 – Resultados do teor de finos das amostras dos agregados miúdos da RMC. | 64 |
| Tabela 17 – Resultados da absorção de água das amostras dos agregados miúdos da RMC. | 66 |
| Tabela 18 – Resultados do teor de torrões de argila e materiais friáveis das amostras dos agregados miúdos da RMC. | 68 |
| Tabela 19 – Resultados da massa específica e massa específica aparente das amostras dos agregados miúdos da RMC. | 70 |
| Tabela 20 – Resultados do teor de sais solúveis presentes nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC..... | 74 |
| Tabela 21 – Resultados do teor de íons cloretos presentes nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC..... | 75 |
| Tabela 22 – Resultados do teor de íons sulfatos presentes nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC..... | 77 |
| Tabela 23 – Resultados do teor de perda de massa nas temperaturas de 350 °C e 950 °C nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC..... | 78 |
| Tabela 24 – Síntese dos resultados da caracterização física e química dos agregados reciclados de concreto amostrados, em vermelho os resultados inadequados e em negrito os melhores resultados. 84 | |
| Tabela 25 – Síntese dos resultados da caracterização física e química dos agregados reciclados mistos amostrados, em vermelho os resultados inadequados e em negrito os melhores resultados. 85 | |

| | |
|---|-----|
| Tabela 26 – Resultados das características físicas, no estado fresco, apresentadas pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %..... | 94 |
| Tabela 27 – Resultados das características físicas e mecânicas em estado endurecido, após 30 dias de sua moldagem, apresentados pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %, em azul os melhores resultados. | 104 |
| Tabela 28 – Ensaio e normas para caracterização física de argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos no estado fresco. | 105 |
| Tabela 29 – Planilha eletrônica com a matriz de decisão para análise multicritérios do desempenho das argamassas. | 106 |
| Tabela 30 – Pesos atribuídos para cada característica analisada. | 107 |
| Tabela 31 – Percentual de contribuição das argamassas para o esgotamento dos recursos naturais. | 108 |
| Tabela 32 – Planilha eletrônica com a matriz de decisão para análise multicritérios da interferência dos fatores no resultado final. | 109 |
| Tabela 33 – Pesos atribuídos para cada característica analisada. | 110 |
| Tabela 34 – Planilha eletrônica com a matriz de decisão para análise multicritérios do teor de substituição. | 111 |
| Tabela 35 – Pesos atribuídos para cada característica analisada. | 112 |
| Tabela 36 - Siglas empregadas para a identificação das amostras. | 113 |
| Tabela 37 – Resultados dos ensaios para determinação das características físicas e mecânicas das argamassas..... | 114 |
| Tabela 38 – Harmonização dos resultados das características físicas e mecânicas das argamassas, considerados como atributos indiretos e identificados em vermelho. | 115 |
| Tabela 39 – Resultados normalizados dos ensaios para determinação das características físicas e mecânicas das argamassas..... | 116 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 40 – Resultados da análise multicritérios para determinação do desempenho das argamassas quanto as suas características físicas e mecânicas..... | 117 |
| Tabela 41 – Índice de desempenho das características físicas e mecânicas para cada traço de argamassa. | 118 |
| Tabela 42 – Distâncias de transporte. | 119 |
| Tabela 43 – Resultados das distâncias de transporte dos agregados para produção de argamassas..... | 120 |
| Tabela 44 – Características das argamassas quanto às funções-critérios analisadas, identificadas em vermelho as características consideradas como atributos indiretos..... | 122 |
| Tabela 45 – Harmonização dos resultados para análise da interferência dos fatores ambientais (atributos indiretos identificados em vermelho)..... | 123 |
| Tabela 46 – Resultados normalizados para análise da interferência dos fatores ambientais..... | 123 |
| Tabela 47 – Índice de desempenho da influência dos fatores ambientais.... | 124 |
| Tabela 48 – Resultados normalizados para análise para determinação do teor de substituição..... | 126 |
| Tabela 49 – Índice de desempenho dos teores de substituição. | 127 |
| Tabela 50 – Resultado comparativo das análises multicritérios realizadas, os números em negrito indicando da melhor para a pior alternativa. | 128 |
| Tabela 51 – Séries de peneiras para classificação granulométrica de agregados..... | 149 |
| Tabela 52 – Massa mínima da amostra para determinação do teor de material passante na peneira 75 μm | 149 |
| Tabela 53 – Intervalos granulométricos e massa mínima para amostra do ensaio. | 151 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 54 – Peneiras para remoção das partículas de argila e materiais friáveis..... | 152 |
|--|-----|

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SIGLAS

| | |
|------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | avaliação do ciclo de vida |
| AGEMCAMP | Agência Metropolitana de Campinas |
| AHP | <i>Analytic Hierarchy Process</i> |
| AMR | agregado miúdo reciclado |
| AN | agregado natural |
| ARC | agregado reciclado de concreto |
| ARM | agregado reciclado misto |
| BPMSG | <i>Business Performance Management</i> |
| C10 | classe de resistência de concreto com 10 MPa de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade |
| C15 | classe de resistência de concreto com 15 MPa de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade |
| CISBRA | Consórcio Intermunicipal de Saneamento Básico da Região do Circuito das Águas |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente |
| CONSAB | Consórcio Intermunicipal de Saneamento Ambiental |
| CONSIMARES | Consórcio Intermunicipal de Manejo de Resíduos Sólidos |
| f1 | Função critério 1: esgotamento dos recursos naturais |
| f2 | Função critério 2: distância de transporte |
| f3 | Função critério 3: desempenho físico e mecânico |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IDH | Índice de desenvolvimento humano municipal |
| INAC | Instituto Nova Agora De Cidadania |
| IPEA | Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada |

| | |
|--------------|---|
| NBR | Norma Brasileira |
| NM | Norma MERCOSUL |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| RCC | Resíduos de Construção Civil |
| RMC | Região Metropolitana de Campinas |
| SINDUSCON-SP | Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo |
| SINIC | Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento |
| URM | Unidade Recicladora Municipal |

SIGLAS DAS ARGAMASSAS

| | |
|-----|---|
| A0 | argamassa referência (0% de substituição) |
| A20 | argamassa com 20% de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado. |
| A40 | argamassa com 40% de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado. |

SIGLAS DAS UNIDADES RECICLADORAS E EXTRATORA

| | |
|-------|--|
| AMC | Unidade recicladora privada de Americana/SP. |
| CPS-M | Unidade recicladora municipal de Campinas/SP. |
| CPS-P | Unidade recicladora privada de Campinas/SP. |
| HTL | Unidade recicladora de parceria público-privada de Hortolândia/SP. |
| NAT | Unidade extratora de areia natural de rio de Aguaí/SP. |
| PED | Unidade recicladora privada de Pedreira/SP. |
| PLN | Unidade recicladora privada de Paulínia/SP. |

SÍMBOLOS

| | |
|--|---|
| % | por cento |
| ρ | massa específica |
| μm | micrometro |
| A | acidificação |
| cm | centímetro |
| cm^3 | centímetro cúbico |
| E | eutrofização |
| g | grama |
| g/cm^3 | gramas por centímetro cúbico |
| $\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{1/2}$ | gramas por decímetro quadrado vezes a raiz quadrada de minuto |
| GW | <i>global warming</i> (aquecimento global) |
| Kg | quilograma |
| L | litro |
| m | metro |
| MJ | megaJoule |
| mL | mililitro |
| mm | milímetro |
| MPa | megaPascal |
| N/s | Newton por segundo |
| n° | número |
| $^{\circ}\text{C}$ | graus Célsius |
| POC | oxidantes fotoquímicos |
| ppm | partes por milhão |
| s | segundo |
| t | tonelada |
| WG | <i>waste generation</i> (geração de resíduos) |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 10 |
| 2.1 | Objetivo geral | 10 |
| 2.2 | Objetivos específicos..... | 10 |
| 2.3 | Hipótese básica..... | 10 |
| 2.4 | Estrutura do trabalho | 10 |
| 3 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 12 |
| 3.1 | Resíduos da construção civil..... | 12 |
| 3.1.1 | Operação de uma usina recicladora de resíduos de construção civil | 13 |
| 3.1.2 | Importância da caracterização dos agregados reciclados | 16 |
| 3.2 | Argamassa | 18 |
| 3.3 | Análise multicritérios para tomada de decisões | 19 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS | 22 |
| 4.1 | Identificação geográfica..... | 22 |
| 4.2 | Seleção e amostragem dos agregados reciclados..... | 22 |
| 4.3 | Caracterização física dos agregados | 23 |
| 4.3.1 | Absorção de água..... | 23 |
| 4.3.2 | Massa específica e massa específica aparente | 24 |
| 4.4 | Caracterização química dos agregados | 24 |
| 4.4.1 | Determinação do teor de íons cloretos | 25 |
| 4.4.2 | Material orgânico: determinação do teor por perda ao fogo ... | 25 |
| 4.5 | Determinação do teor de incorporação dos agregados em argamassa | 26 |
| 4.6 | Material para preparo das argamassas estudadas | 27 |
| 4.6.1 | Cimento | 27 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.6.2 | Areia natural | 27 |
| 4.6.3 | Agregados miúdos reciclados..... | 28 |
| 4.6.4 | Água | 28 |
| 4.6.5 | Aditivo superplastificante | 28 |
| 4.7 | Preparo das argamassas | 29 |
| 4.8 | Preparo dos corpos de prova de argamassa..... | 29 |
| 4.9 | Análise das características físicas no estado fresco e endurecido e características mecânicas das argamassas | 29 |
| 4.10 | Análise da viabilidade de aplicação do agregado miúdo reciclado em argamassa de uso geral por método multicritérios | 30 |
| 4.10.1 | Critérios considerados na análise multicritérios..... | 33 |
| 4.10.2 | Aplicação na análise multicritérios | 34 |
| 4.10.3 | Proposição de alternativas..... | 39 |
| 5 | RESULTADOS | 41 |
| 5.1 | A situação da Região Metropolitana de Campinas com relação aos RCC..... | 41 |
| 5.2 | As usinas recicladoras da Região Metropolitana de Campinas..... | 46 |
| 5.2.1 | Usina recicladora privada no município de Americana/SP | 47 |
| 5.2.2 | Usina recicladora municipal do município de Campinas – SP | 48 |
| 5.2.3 | Usina recicladora privada no município de Campinas – SP ... | 49 |
| 5.2.4 | Usina recicladora público-privada no município de Hortolândia – SP..... | 50 |
| 5.2.5 | Usina recicladora privada no município de Paulínia – SP..... | 51 |
| 5.2.6 | Usina recicladora privada no município de Pedreira – SP | 52 |
| 5.3 | Seleção e amostragem dos agregados reciclados | 53 |
| 5.4 | Determinação das características físicas dos agregados reciclados amostrados..... | 55 |
| 5.4.1 | Composição granulométrica | 55 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.4.2 | Teor de material passante na peneira 75 μm | 64 |
| 5.4.3 | Absorção de água..... | 66 |
| 5.4.4 | Torrões de argila e materiais friáveis | 68 |
| 5.4.5 | Massa específica e massa específica aparente | 70 |
| 5.4.6 | Impurezas orgânicas..... | 72 |
| 5.5 | Determinação das características químicas dos agregados reciclados amostrados..... | 74 |
| 5.5.1 | Teor de sais solúveis | 74 |
| 5.5.2 | Teor de íons cloretos | 75 |
| 5.5.3 | Teor de sulfatos | 76 |
| 5.5.4 | Material orgânico: determinação do teor por perda ao fogo ... | 78 |
| 5.5.5 | Sumário dos resultados de caracterização física e química dos agregados miúdos reciclados da Região Metropolitana de Campinas..... | 82 |
| 5.6 | Análise das características físicas no estado fresco e endurecido e características mecânicas das argamassas | 86 |
| 5.6.1 | Densidade de massa da argamassa | 86 |
| 5.6.2 | Índice de consistência..... | 87 |
| 5.6.3 | Retenção de água | 90 |
| 5.6.4 | Teor de ar incorporado | 91 |
| 5.6.5 | Absorção de água por capilaridade | 95 |
| 5.6.6 | Coeficiente de capilaridade..... | 96 |
| 5.6.7 | Massa específica aparente no estado endurecido..... | 98 |
| 5.6.8 | Resistência à tração na flexão | 99 |
| 5.6.9 | Resistência à compressão axial | 100 |
| 5.6.10 | Sumário dos resultados de caracterização física e mecânica das argamassas produzidas com agregados miúdos reciclados da Região Metropolitana de Campinas em substituição parcial do agregado miúdo natural..... | 101 |

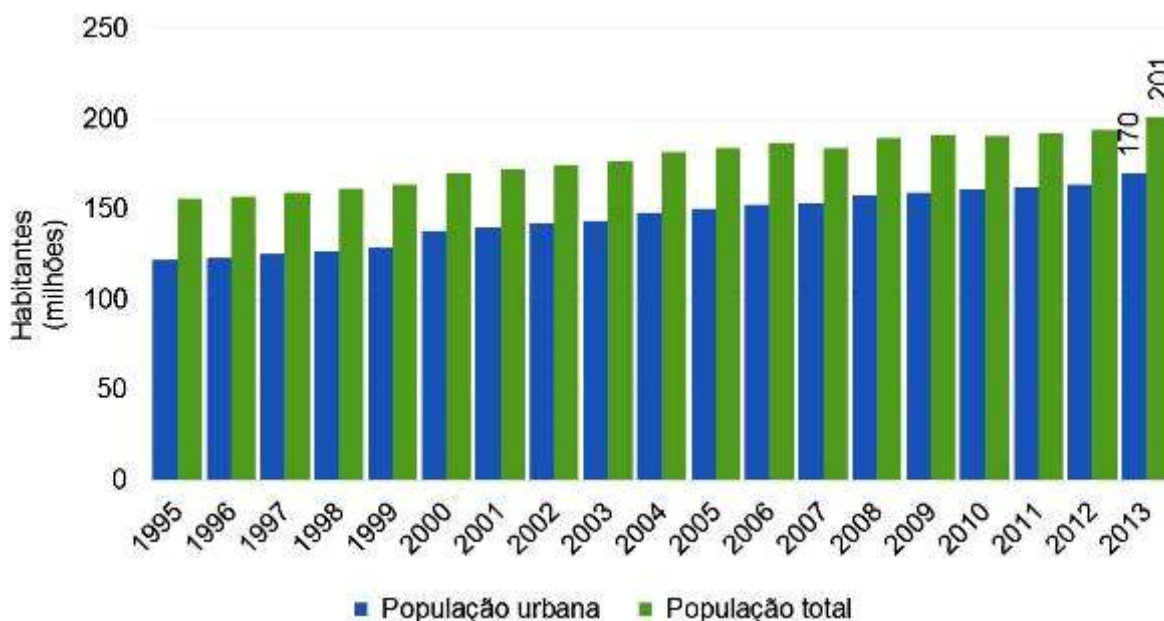
| | | |
|-------|---|-----|
| 5.7 | Análise da viabilidade de substituição do agregado natural por agregado reciclado pelo método de multicritérios | 105 |
| 5.7.1 | Análise multicritérios para avaliar o desempenho físico e mecânico das argamassas | 105 |
| 5.7.2 | Análise multicritérios para verificação da interferência dos fatores no resultado final para definição do teor de substituição..... | 107 |
| 5.7.3 | Análise multicritérios para definição do teor de substituição... | 110 |
| 5.7.4 | Desempenho físico e mecânico das argamassas..... | 112 |
| 5.7.5 | Distância de transporte | 119 |
| 5.7.1 | Interferência dos fatores no resultado final para definição do teor de substituição..... | 120 |
| 5.7.2 | Definição do teor de substituição..... | 125 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 129 |
| 6.1 | A situação da Região Metropolitana de Campinas com relação à reciclagem dos RCC..... | 129 |
| 6.2 | Características físicas e químicas dos agregados reciclados amostrados..... | 129 |
| 6.3 | Características físicas no estado fresco e endurecido e características mecânicas das argamassas obtidas..... | 131 |
| 6.4 | Viabilidade de substituição do agregado natural por agregado reciclado pelo método de multicritérios | 132 |
| 6.5 | Teor de substituição de agregado natural de rio por agregado reciclado | 132 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 133 |
| 8 | PUBLICAÇÕES DECORRENTES DO TRABALHO REALIZADO | 134 |
| 9 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 135 |

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento populacional nos centros urbanos, a população urbana já representa 75% da população brasileira. Observa-se, por consequência, o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos. Desta forma, a gestão dos resíduos sólidos passou a ser um problema ambiental, inicialmente de responsabilidade dos municípios (SÃO PAULO, 2012).

O estudo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), publicado em 2013, mostra que, nas últimas décadas, a população brasileira tem deixado o meio rural, aumentando o número de habitantes em áreas urbanizadas. A população urbana brasileira, em 2013, superou 84% da população total do país (Figura 1).

Figura 1 – Gráfico da variação do crescimento populacional no meio urbano no Brasil.



Fonte: IBGE, 2015.

Nas últimas décadas, há uma preocupação crescente da sociedade com as questões ambientais e as do desenvolvimento sustentável. Por isso, a partir de 1991, no Brasil, percebeu-se a necessidade de implantação de políticas públicas que definissem a forma com que deveriam ser tratados os resíduos sólidos gerados. Naquele ano, o Projeto de Lei nº 203 propôs a regulamentação do acondicionamento, coleta, tratamento e destinação final dos resíduos da área da saúde. Ao dar continuidade ao Projeto de Lei nº 203:1991, em 2001, a Câmara dos Deputados implementou a Comissão Especial da Política Nacional de Resíduos. O objetivo foi

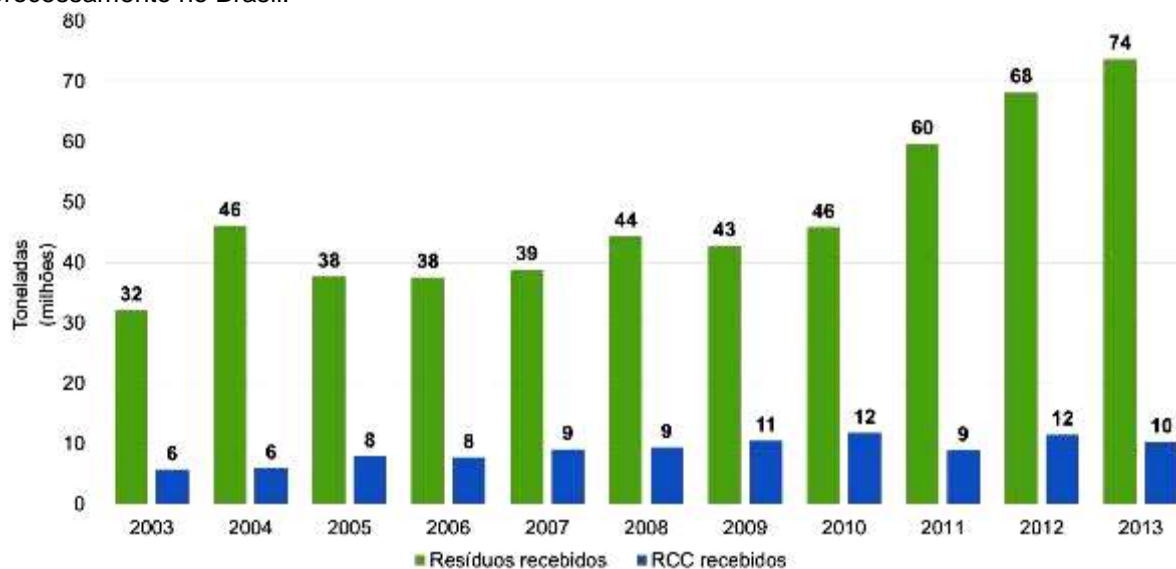
efetuar uma proposta global para tratamento dos resíduos sólidos. Mas com o encerramento da legislatura, a comissão foi extinta (BRASIL, s.d.).

Em 2003, no I Congresso Latino-Americano de Catadores, foram tratados entre outros temas a erradicação dos lixões e a responsabilização dos geradores de resíduos (BRASIL, s.d.). Neste mesmo ano, com a publicação da Resolução nº 307:2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) foram estabelecidas diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil, com a determinação de um prazo máximo de doze meses para que todos os municípios elaborassem seus Planos Municipais de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil. Sendo esse um passo importante no que tange à preservação ambiental, que pode ser considerado, de acordo com São Paulo (2012), um marco legal que colocou em evidência as questões dos resíduos da Construção Civil.

A partir de 2003, quando entrou em vigência a Resolução CONAMA nº 307:2002, a destinação correta dos resíduos passou a ser um problema que cada município deveria tratar de forma ambientalmente responsável. Desta forma, foi preciso conhecer de fato o tamanho desse problema, efetuando o levantamento da representatividade de cada tipo de resíduo, já que o resíduo urbano engloba os resíduos domésticos, os de saúde, os de varrição e poda, além dos resíduos de construção civil.

Este mesmo estudo, realizado pelo IBGE, em 2013, permitiu a análise do comportamento, ao longo dos anos, no que tange os resíduos gerados por essa população urbana, sejam eles resíduos domésticos, públicos, de saúde, industrial, provenientes de poda e os resíduos de construção civil. Apesar de relacionar apenas os resíduos recebidos por unidades de processamento, a quantidade de resíduos de construção civil (RCC) aparentemente não sofreu aumento que pudesse relacioná-lo ao crescimento da população urbana, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Gráfico da variação da quantidade de resíduos recebidos em unidades de processamento no Brasil.



Fonte: IBGE, 2015.

Em agosto de 2004, o CONAMA realizou o seminário “Contribuições à Política Nacional de Resíduos Sólidos”, com o objetivo de formular nova proposta de Lei, ouvindo representantes da sociedade. Para consolidar as contribuições do Seminário CONAMA, no ano seguinte, foi criado um grupo interno de trabalho na Secretaria de Qualidade Ambiental, que encaminhou um anteprojeto de lei para a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Em 2006, com algumas alterações, foi aprovado o relatório do Projeto de Lei 203:1991 (BRASIL, s.d.).

Em março de 2010, a Câmara dos Deputados e o Senado aprovaram um substituto ao Projeto de Lei 203:1991, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, impondo a responsabilidade dos resíduos aos seus geradores. Na sequência, tendo sido sancionada pelo Presidente da República, foi publicada no Diário Oficial da União como Lei nº 12.305.

Com a Política Nacional de Resíduos Sólidos que entrou em vigor em 2011 e as alterações sofridas na redação das Resoluções CONAMA, os municípios passaram então, a ter um prazo para que efetuassem o planejamento de como, cada um deles, de forma individualizada ou em conjunto, fariam a destinação final ambientalmente correta de todo o resíduo urbano gerado.

A partir da instituição da PNRS, em 2012, houve algumas alterações na redação da Resolução nº 307:2002, com a publicação da Resolução nº 448:2012, do CONAMA. Essa resolução, que entrou em vigor em 2 de janeiro de 2013, prorrogou o prazo

estabelecido para a elaboração dos planos de gestão de resíduos sólidos, permitindo que fossem elaborados de forma conjunta com outros municípios.

A cronologia do desenvolvimento de políticas públicas e da legislação pertinente à gestão dos resíduos sólidos pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Cronologia da legislação que trata a gestão dos resíduos sólidos da construção civil no Brasil.



Fonte: da autora, 2017.

Segundo a Pesquisa de Informação Básica dos Municípios, realizada pelo IBGE em 2012, e publicada em 2013, no que se refere ao levantamento da existência ou não do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, mostra que muitos municípios brasileiros ainda não cumpriram essa obrigação (Tabela 1).

Tabela 1 – Municípios, total e com Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, nos termos estabelecidos na Política Nacional de Resíduos Sólidos, na federação e por grandes regiões, em 2013.

| Federação e grandes regiões | Municípios | | |
|-----------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|
| | Número de municípios participantes | Com plano (%) | Sem plano (%) |
| Brasil | 5.570 | 33 | 67 |
| Norte | 450 | 34 | 66 |
| Nordeste | 1.794 | 24 | 76 |
| Sudeste | 1.668 | 29 | 71 |
| Sul | 1.191 | 54 | 46 |
| Centro-Oeste | 467 | 35 | 65 |

Fonte: IBGE, 2015.

Como mostra a Tabela 1, em 2013, apenas 33% dos municípios brasileiros já possuíam plano para gestão de seus resíduos. Nesta mesma tabela é possível observar

que os resultados das regiões Norte e Nordeste, não apresentam diferença significativa com relação aos da região Sudeste. Portanto, a questão econômica não parece ser um fator determinante para o cumprimento da exigência legal quanto ao que diz respeito à elaboração do plano de gestão integrada de resíduos sólidos nos municípios.

Devido à representatividade da quantidade de resíduos sólidos gerados pelo setor da construção civil, quando em comparação com as demais áreas, é necessário trata-los de forma isolada. De acordo com uma pesquisa realizada pelo Ministério das Cidades, este pode representar de 50 a 70% da massa total dos resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2005).

Para que se possa entender o cenário internacional da geração de resíduos de construção civil, e comparar os dados encontrados em outros países com os do Brasil, a Tabela 2 apresenta uma estimativa da geração desse tipo de resíduo em alguns países.

Tabela 2 – Estimativa de geração de resíduos de construção civil em alguns países.

| País | Quantidade anual | |
|----------------|------------------|------------------|
| | Milhões t/ano | Kg/habitante×ano |
| Suécia | 1,2 - 6 | 136 – 680 |
| Holanda | 12,8 - 20,2 | 820 - 1.300 |
| Estados Unidos | 136 - 171 | 463 – 584 |
| Reino Unido | 50 - 70 | 880 - 1.120 |
| Bélgica | 7,5 - 34,7 | 735 - 3.359 |
| Dinamarca | 2,3 - 10,7 | 440 - 2.010 |
| Itália | 35 - 40 | 600 – 690 |
| Alemanha | 79 - 300 | 963 - 3.658 |
| Japão | 99 | 785 |
| Portugal | 3,2 - 4,4 | 325 – 447 |
| Brasil | 31 | 230 – 760 |

Fonte: adaptado de IPEA, 2012.

As 31 milhões de toneladas de resíduos de construção civil no Brasil, apresentadas na Tabela 2, podem ter sido subestimados pelos autores. Isto porque, conforme dados disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2013, o país gerou 108 milhões de toneladas de RCC (BRASIL, 2015).

Já, na Região Metropolitana de Campinas, o diagnóstico feito para elaboração do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Campinas/SP, identificou que o município produz diariamente 4.685 toneladas de resíduos sólidos, gerados a partir de diversas fontes e com diversas tipologias. Desse total, três mil

toneladas são classificadas como resíduos de construção civil, contribuindo com 64 % de toda a massa de resíduos sólidos gerados no município (CAMPINAS, s.d.).

Os geradores de resíduo identificados como de pequeno porte são responsáveis por 70% dessa geração e, os de grande porte, responsáveis por 30%. Segundo São Paulo (2012), as empresas provadas de construção são consideradas grandes geradoras e por isso deverão elaborar projetos próprios para a o gerenciamento de seus resíduos. Mas, independente do porte, é preciso um esforço para utilizar agregados reciclados em serviços previstos pelas normas vigentes, ABNT NBR 15116:2004, visando a redução do consumo de recursos naturais (SÃO PAULO, 2012).

Para incentivar o setor da construção civil, que é o maior consumidor de matérias primas naturais, a utilizar-se de outras fontes de materiais, é preciso viabilizar a prática da reciclagem, não apenas implantando áreas de triagem, reciclagem e armazenamento para uso futuro, mas também disponibilizando dados de caracterização dos agregados produzidos a partir dos resíduos de construção, demolição e reformas, demonstrando, desta forma, o potencial desses materiais.

A preocupação crescente da sociedade é um dos motivos que impulsiona pesquisadores do tema do desenvolvimento sustentável a encontrarem soluções que, além de ambientalmente corretas, sejam tecnicamente viáveis para a destinação dos resíduos sólidos da construção civil.

Vários autores vêm trabalhando com a pesquisa da influência da incorporação de agregados reciclados miúdos na produção de argamassas. Por exemplo:

- Costa *et al.* (2005) trabalharam com argamassa para revestimento e assentamento, utilizando agregado reciclado misto proveniente de uma indústria de pisos cerâmicos. O estudo comparou resultados de argamassas mistas com traços 1:2:6, 1:2:9, 1:2:12 e 1:2:14 com substituição total do agregado natural quanto à resistência à compressão e a aderência ao substrato de bloco de concreto, obtendo resultados satisfatórios para todos os traços com agregado reciclado;
- Aguiar e Selmo (2006) avaliaram as alterações nas propriedades mecânicas e na microestrutura de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso. Neste estudo os autores perceberam que um menor teor de contaminação provoca alterações significativas em traços de 1:6 com substituição total do agregado natural;
- Silva *et al.* (2007) estudaram o comportamento das argamassas quanto à absorção de água por capilaridade, retenção de água e permeabilidade ao vapor e à água no

- estado líquido em argamassas de traço 1:4 a 1:6 produzidas com teores de substituição até 100%. Em seu trabalho, os autores observaram que a incorporação de finos dos agregados reciclados mistos trouxe melhorias no comportamento da argamassa em relação à água, com exceção apenas à permeabilidade ao vapor;
- Gomes *et al.* (2010), trabalharam com a substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado misto em traço de 1:7 e obtiveram resultados satisfatórios quanto ao desempenho de retenção de água, densidade de massa, teor de ar incorporado, resistência à tração e à flexão;
 - Calçado (2015) desenvolveu seu trabalho comparando os resultados de argamassas ricas, medianas e pobres, com substituições parciais do agregado natural e encontrou resultados satisfatórios para substituição de 25% em argamassas medianas e de até 50% em argamassas pobres e, de forma geral, não encontrou resultados satisfatórios nas substituições realizadas em traços ricos. As análises basearam-se no desempenho das argamassas nos ensaios de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e de absorção de água por capilaridade;
 - Marinho (2016) avaliou a influência do tipo de britador (impacto ou mandíbula) na produção de agregados reciclados mistos e de concreto. A análise foi baseada no resultado da densidade de massa, resistência à tração e à compressão e retração por secagem produzindo argamassas no traço 1:7, sendo encontradas resistências mecânicas superiores para os agregados produzidos com britador de mandíbula;
 - Pissolato Junior (2016) produziu argamassas hidráulicas (1:4:5) e mistas (1:3:8) com substituição parcial e total do agregado miúdo natural utilizando agregados reciclados de concreto. Para a análise do desempenho das argamassas com agregado reciclado, foram determinadas a massa específica, consistência, retenção de água e teor de ar incorporado no estado fresco e, massa específica aparente, resistência à tração na flexão e à compressão e o coeficiente de capilaridade no estado endurecido. O autor não conseguiu identificar melhorias no desempenho das argamassas;
 - Zhan *et al.* (2017) avaliaram o desempenho da resistência à compressão e absorção de água em argamassas com utilização de agregado miúdo reciclado. Os autores estudaram a relação entre o aumento do uso de agregados reciclados e o efeito de carbonatação.

Além disto, com a conscientização da sociedade dos custos ambientais gerados pela falta de gestão dos resíduos, bem como pelas imposições da legislação, o custo total dos produtos começa a aumentar, pois o custo da destinação final precisa passar a ser considerado no preço dos mesmos (FENKER, s.d.).

Como reflexos destes movimentos, foram criados mecanismos de incentivo às boas práticas empresariais para estimular a responsabilidade socioambiental. Neste sentido os instrumentos certificadores, dentre estes, destaca-se a ABNT NBR ISO 14001:2015, criada pela *International Organization for Standardization* (ISO). A série ISO 14000 tem por objetivo um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) que auxilie as empresas a cumprirem suas responsabilidades em relação ao meio ambiente.

A partir das normas ISO, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da ABNT NBR ISO 14001:1996, atualizada em 2015, definiu o conjunto de requisitos e princípios básicos que devem ser seguidos pelas empresas para a implantação do Sistema de Gestão Ambiental, incluindo a política ambiental, planejamento, implementação e operação, verificação e ação corretiva e análise crítica pela administração da empresa (FERREIRA, 2004, SOLEDADE *et al.*, 2007).

Como parte da série ISO 14000, a norma ISO 14040:2009 trata da Avaliação do Ciclo de Vida, especificando sua estrutura geral, bem como o desenvolvimento de cada uma de suas fases (SOLEDADE *et al.*, 2007).

Do ponto de vista metodológico, uma ACV apresenta quatro fases principais: o objetivo e definição do escopo, a análise de inventário, a avaliação de impactos e a interpretação (SOLEDADE *et al.*, 2007, ABNT, 2014).

Resumidamente, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) corresponde, portanto, a uma compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produção ou produto ao longo do seu ciclo de vida, incluindo: o impacto ecológico das matérias-primas e a energia usada na produção, incluindo a extração, transporte e os resíduos; o processo de fabricação e montagem; os sistemas de transporte e distribuição; os aspectos ambientais relacionados com o uso do produto; o potencial do produto para ser reutilizado e reciclado e os aspectos ambientais relacionados com a disposição final do produto (FERREIRA, 2004, SOLEDADE *et al.*, 2007).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) passou a ser uma ferramenta indispensável para a mensuração dos impactos, principalmente ambientais, causados pela fabricação e utilização de um produto, através de uma abordagem sistêmica (BRASIL, s.d.a).

Assim, fechar o ciclo tentando utilizar o resíduo gerado no processo produtivo é uma forma de minimizar os problemas gerados pelos resíduos e o custo de sua destinação final. A construção civil é um dos setores que vem realizando esforços para se aproximar do conceito de desenvolvimento sustentável, tanto por mudanças na exploração dos recursos naturais por meio de desenvolvimento tecnológico, como mudanças institucionais que levam em conta as necessidades presentes e futuras da sociedade (ÂNGULO *et al.*, 2010).

Neste sentido, este trabalho tem relevância, uma vez que propõe identificar a localização geográfica das usinas recicladoras de resíduos de construção civil da Região Metropolitana de Campinas/SP, bem como identificar as unidades que produzem agregado miúdo reciclado de acordo com os requisitos impostos pela ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), para o possível atendimento à demanda do setor de construção civil. Para a realização dessa análise, o trabalho propõe determinar um panorama das características físicas e químicas dos agregados reciclados destas usinas, bem como analisar a viabilidade do seu uso em argamassas com o uso de um método multicritérios.

A opção pelo estudo do uso dos agregados reciclados em argamassas se deve à sua ampla utilização no setor de construção civil, bem como por se tratar de um material que apresenta elevado consumo de agregado natural. Além disto, a argamassa também faz parte da constituição do concreto, mas apresenta um número menor de variáveis que interferem no resultado final obtido.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo identificar a localização das usinas recicladoras de entulhos existentes na Região Metropolitana de Campinas e, a partir de uma amostragem pontual dos agregados produzidos nas usinas encontradas, determinar a variação de suas características físicas e químicas e analisar com um método multicritérios a possibilidade de seu reaproveitamento em argamassas.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar a localização geográfica das usinas de reciclagem de entulho da Região Metropolitana de Campinas.
- Caracterizar os agregados reciclados, disponibilizados pelas recicladoras no momento da visita e entrevista, com análises físicas e químicas.
- Analisar as características físicas e mecânicas das argamassas produzidas com a substituição parcial e total do agregado natural pelo agregado reciclado.
- Utilizar uma técnica de análise por multicritérios, para identificar o teor e a viabilidade da incorporação de agregado miúdo reciclado em argamassas, a partir da análise dos resultados obtidos com diferentes teores de incorporação.

2.3 Hipótese básica

Existe variação das características físicas e químicas dos agregados reciclados produzidos em diversas unidades recicladoras de resíduos da construção civil, mas essa variação pode não inviabilizar a possibilidade de reaproveitamento do resíduo na preparação de argamassas.

2.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução ao tema dos resíduos sólidos, a legislação vigente e sua cronologia, bem como o cenário brasileiro apresentado por IBGE (2013). São apresentados alguns trabalhos desenvolvidos por outros autores e a justificativa para o desenvolvimento deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta os objetivos, a hipótese básica defendida pelo trabalho além de sua estrutura.

O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica para sustentação dos estudos realizados nesse trabalho, desde a definição dos resíduos de construção civil, da estrutura e da operação de uma usina recicladora, mostrando sua importância para a geração de agregados reciclados que possa atender às exigências normativas para o seu uso. Foram abordados também neste capítulo a definição de argamassa, material escolhido para a realização da análise multicritérios para definição do melhor teor de substituição dentre os estudados.

O Capítulo 4 é dedicado à descrição da metodologia, material e equipamentos empregados no desenvolvimento do trabalho.

Nele são relacionados os métodos empregados para o preparo e análise das amostras tanto para a caracterização os agregados reciclados, como para a determinação das características físicas e mecânicas das argamassas, utilizadas para a aplicação da técnica de análise multicritérios proposta para a determinação do melhor teor de substituição dentre os traços estudados.

O Capítulo 5 engloba os resultados obtidos nas análise física e química dos agregados, além do desempenho das argamassas quanto às características físicas e mecânicas analisadas. Também são apresentados os resultados na aplicação da análise multicritério proposta.

Os resultados são apresentados em tabelas, gráficos e fotografias.

Nos capítulos seguintes são apresentadas as conclusões (Capítulo 6), algumas sugestões para trabalhos futuros (Capítulo 7), as publicações já realizadas decorrentes do trabalho realizado (Capítulo 8) e as referências bibliográficas utilizadas (Capítulo 9).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Resíduos da construção civil

Para compreender a classificação dos resíduos sólidos, como os resíduos de construção civil, a ABNT NBR 15116:2004 apresenta as definições de alguns termos ligados ao tema como: resíduos de construção civil, agregados reciclados, dentre outros, respeitando as definições dispostas na Resolução CONAMA nº 307:2002, com as alterações indicadas na Resolução nº 448:2012, do mesmo conselho, a saber:

- Resíduos de construção civil são aqueles provenientes de obras de construção civil, sejam elas construções novas, reformas e demolições, assim como os resultantes da movimentação de terra. Como exemplos podem ser citados: tijolos e blocos cerâmicos, blocos de concreto e concreto em geral, solos e rochas, metais, madeiras etc., os quais comumente são denominados por entulho de obra (BRASIL, 2002).

- Agregados reciclados são o resultado do processo de beneficiamento dos resíduos de construção, os quais apresentam, além da forma granular, outras características técnicas que permitem sua utilização em obras sejam elas de edificação, infraestrutura ou outras (BRASIL, 2002).

- Reciclagem é o reaproveitamento do resíduo após este ter sido transformado (ABNT, 2004d). Já a reutilização é a reaplicação do resíduo sem este ter sido submetido à transformação (ABNT, 2004d).

- Beneficiamento é o processamento do resíduo por meio de operações que tenham o objetivo de transformá-lo de forma a se apresentarem com características que permitam sua utilização como matéria-prima ou produto final (ABNT, 2004d).

O concreto de cimento Portland sem fins estruturais é utilizado para enchimento, contrapiso, calçadas, recobrimento de valas, fabricação de peças pré-moldadas sem fins estruturais tais como blocos de vedação, meio-fio, sarjetas, mourões, etc. que terão classes de resistência C10 ou C15 de acordo com a ABNT NBR 8953:2011 (ABNT, 2011).

Para que se possa proceder corretamente com o processo de destinação do resíduo, é necessária a identificação da periculosidade do resíduo sólido de qualquer natureza (saúde, doméstico, industrial, de construção, varrição etc.), identificando a existência de risco à saúde e ao meio ambiente. A ABNT NBR 10004:2004 classifica os resíduos como perigosos e não perigosos, inertes e não inertes (Tabela 3).

Tabela 3 – Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a ABNT NBR 10004:2004.

| Classe | Tipologia | Características |
|--------|---------------|--|
| I | Perigosos | Apresentam risco à saúde e ao meio ambiente Inflamabilidade Corrosividade Reatividade Toxicidade Patogenicidade |
| II | Não perigosos | Os que não se enquadram na classificação de resíduos perigosos. |
| II A | Não inertes | Biodegradabilidade Combustibilidade Solubilidade em água |
| II B | Inertes | Materiais que não apresentam solubilização de seus constituintes a concentrações superiores ao padrão de potabilidade da água |

Fonte: ABNT, 2004a.

Para os resíduos gerados pela construção civil existe, além da classificação mencionada anteriormente, a Resolução CONAMA nº 307:2002, que os classifica em outras quatro classes (BRASIL, 2002, ABNT, 2004d).

- Classe A: são resíduos recicláveis ou reutilizáveis como resíduos gerados por construções, reformas, demolições, reparos de pavimentação, incluindo: materiais cerâmicos, resíduos de argamassa e concreto produzidos no canteiro de obras, e solos provenientes de obras de terraplanagem.

- Classe B: são resíduos recicláveis para outras destinações tais como papel e papelão, plásticos, metais, vidros, madeiras e gesso.

- Classe C: são aqueles para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias que permitam sua reutilização ou reciclagem de forma economicamente viável.

- Classe D: são aqueles perigosos, provenientes do processo de construção tais como óleos, solventes e tintas.

3.1.1 Operação de uma usina recicladora de resíduos de construção civil

Para que a geração dos agregados reciclados resulte em materiais de qualidade, permitindo seu uso não apenas na execução de pavimentação primária, é importante que a usina preze pela qualidade em todas as etapas do beneficiamento: recebimento, triagem, britagem e classificação.

3.1.1.1 Recebimento

A unidade de processamento deve controlar o processo de recebimento para que, além de receber apenas resíduos de construção civil que sejam da classe A, sejam conhecidas sua procedência e composição (ABNT, 2004c).

3.1.1.2 Triagem

É a triagem que torna possível a geração de agregados de resíduos de concreto (ARC), provenientes da britagem de resíduos de argamassa e concreto, já que, para receber essa classificação, o agregado deve possuir no mínimo 90%, em massa, da sua fração graúda composta por fragmentos à base de cimento Portland e rochas, possível apenas com uma boa classificação inicial do resíduo recebido (ABNT, 2004d).

Segundo a NBR ABNT 15112:2004 (ABNT, 2004b), o processo de triagem deve começar na fonte geradora do resíduo, mas também deve ser realizada nas áreas de transbordo e triagem das unidades recicladoras, nos aterros destinados para o RCC ou na área de reciclagem.

Nesse processo além de ser feito, inicialmente, uma análise visual da composição básica da carga de resíduo recebido (caçamba), algumas usinas possuem balança rodoviária na portaria, o que permite, analisando também o peso da carga, estimar sua composição uma vez que o peso de uma caçamba que contenha resíduos de concreto tem um peso maior que as com carregamento misto.

Nesta etapa é então feita, basicamente, a separação da composição básica do RCC: resíduos compostos por fragmentos de argamassa e concreto ou por fragmentos de materiais cerâmicos e solo.

A triagem também pode ser feita durante o processo de beneficiamento, antes de o material ser transferido para o britador, onde é feita a separação manual, com a retirada do material que não deve fazer parte da composição do agregado reciclado (Figura 4).

Figura 4 – Fotografia da triagem manual na usina recicladora de Pedreira/SP.



Fonte: da autora, 2017.

3.1.1.3 Processamento ou transformação

Utilizando britadores, as unidades então promovem a transformação dos fragmentos do RCC recebido, em fragmentos menores, possíveis de serem utilizados em serviços de pavimentação, ou produção de argamassas e concretos sem fins estruturais.

Os equipamentos são compostos por esteiras transportadoras para sua alimentação e para direcionamento do material processado ao equipamento classificador. Antes de o material entrar no britador, são instalados equipamentos que possuem ímãs para retirada de materiais metálicos que possam danificá-lo. Esse tipo de equipamento também é instalado na saída do britador, para retirada de fragmentos metálicos menores para que não sejam encaminhados ao classificador (Figura 5).

Figura 5 – Fotografia da separação de material metálico na usina recicladora municipal de Campinas/SP.



Fonte: da autora, 2017.

3.1.1.4 Classificação granulométrica

Para que possam ser utilizados na produção de concreto, os agregados reciclados também devem atender às especificações granulométricas dispostas na ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a). Por esse motivo, assim como nas mineradoras que produzem agregados naturais, há a necessidade do equipamento classificador. Esse equipamento possui um motor vibratório e o corpo receptor disposto de uma série de peneiras que farão a classificação da dimensão dos materiais.

O material retido em cada peneira é direcionado por esteiras transportadoras para a deposição em montes distintos (Figura 6). Normalmente, a separação é feita para os tamanhos mais utilizados: brita 3 (fragmentos com dimensões entre 25 mm e 50 mm); brita 2 (fragmentos dimensões entre 19 mm e 31,5 mm); brita 1 (fragmentos com dimensões entre 9,5 mm e 25 mm); pedrisco ou brita 0 (fragmentos com dimensões entre 4,75 mm e 12,5 mm) e areia (composta por fragmentos que passam pela peneira com malha de 4,75 mm de abertura) (ABNT, 2009a).

Figura 6 – Fotografia do classificador e esteiras de transporte com deposição de material britado na usina recicladora de Hortolândia/SP.



Fonte: da autora, 2017.

3.1.2 Importância da caracterização dos agregados reciclados

Para a proposição de traços de concreto e argamassas é imprescindível conhecer as características dos materiais que farão parte de sua composição.

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo estimado um consumo de até 21 bilhões de toneladas por ano (TOSIC *et al.*, 2015). Para a produção do concreto, o material mais consumido é o agregado graúdo, seguido do agregado miúdo.

A quantidade anual de produção de concreto apresentada por TOSIC *et al.* (2015) justifica os estudos que tratem da substituição, mesmo que parcial, dos agregados naturais por agregados reciclados. Isso por que, para que essa substituição se torne possível, é preciso conhecer características como densidade, absorção de água, entre outras. Por exemplo, o agregado reciclado pode apresentar uma densidade até 10% menor do que o de origem natural e sua absorção de água pode aumentar cerca de três vezes quando comparada com a de agregados naturais.

O conhecimento da localização geográfica das fontes de agregado reciclado é importante pois, quando aliado ao conhecimento das características do material por elas disponibilizado, viabiliza o uso deste material em substituição total ou parcial aos agregados naturais. Recentemente, métodos de otimização para identificar vantagens do uso do material reciclado, a partir de dados técnicos, econômicos e ambientais, passaram a ser usados para determinar a escolha do material e os teores ideais a serem empregados na produção de concretos utilizados para sub-bases de obras de pavimentação e em concretos sem fins estruturais (TOSIC *et al.*, 2015).

Muitos estudos neste sentido vêm sendo publicados, como mostram os dados do levantamento feito por Totic *et al.* (2015), apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Alguns estudos anteriores sobre a influência do uso de agregado reciclado sobre as propriedades do concreto.

| Estudo das propriedades | Propriedades analisadas | Pesquisadores |
|--------------------------|--|--|
| Em curto prazo | Resistência à compressão Resistência à tração Módulo de elasticidade Aderência Retração | Ajdukiewicz e Kliszczewicz, 2002. |
| Em longo prazo | Deformação | Domingo <i>et al.</i> , 2010; Fathifazl <i>et al.</i> , 2011. |
| Em elementos estruturais | Desempenho sísmico do concreto armado Resistência ao cisalhamento Resistência à tração na flexão de vigas reforçadas de agregados reciclados de concreto | Xiao <i>et al.</i> , 2006. Fathifazl <i>et al.</i> , 2009. Ignjatović <i>et al.</i> , 2013 |

Fonte: adaptado de Totic *et al.*, 2015.

Estas são algumas das investigações feitas a fim de verificar as propriedades mecânicas e de durabilidade em concretos com agregado reciclado de concreto. Os resultados obtidos pelos autores citados acima mostram desempenho um pouco inferior

em comparação ao concreto composto apenas por agregados naturais. A diferença não apresenta um padrão de comportamento principalmente devido à variabilidade encontrada na qualidade do agregado reciclado de concreto e do teor de substituição (TOSIC *et al.*, 2015).

3.2 Argamassa

Como definido por ABNT NBR 13281:2005 (ABNT,2005f), argamassa é uma mistura de um ou mais agregados miúdos, um ou mais aglomerantes inorgânicos e água, pode conter aditivo, que se apresente de forma homogênea e apresente propriedades de aderência e resistência.

Para Guimarães (2002), argamassa nada mais é que uma mistura plástica, com propriedades aglutinantes, composta principalmente por cal hidratada e cimento, areia e água, podendo ser incorporado em sua composição aditivos. Sua função é penetrar nas reentrâncias do substrato, aderindo-se a eles (argamassa de revestimento) ou aderindo-os (argamassa de assentamento) firmemente.

Além de sua composição, Cardoso (2010) destaca a importância do empacotamento das partículas de agregados miúdos pelo aglomerante, pois este preenche os vazios da mistura a partir da composição granulométrica apresentada pelo agregado utilizado. O empacotamento influencia as propriedades da argamassa no estado fresco (densidade da massa) e no endurecido (propriedades mecânicas).

Segundo ABNT NBR 13281:2005 (ABNT,2005f), emprega-se o termo de argamassa para uso geral para aquela mistura que pode ser empregada tanto para o assentamento em alvenaria sem função estrutural, quanto para o revestimento de paredes e tetos internos e externos.

A ABNT NBR 13529:2013 (ABNT, 2013) define argamassa para uso em revestimento como uma mistura homogênea composta por um ou mais tipos de agregado miúdo, um ou mais tipos de aglomerantes e água, podendo ou não conter aditivos e adições. Ainda pela mesma norma, a argamassa para revestimento deve possuir propriedades de aderência e endurecimento.

Quanto aos aglomerantes empregados é permitido o uso de aglomerantes aéreos ou hidráulicos, além do uso dos dois tipos ao mesmo tempo, obtendo-se o que é denominado por argamassa mista ou argamassa de cimento e cal, se esses forem os aglomerantes empregados (ABNT, 2013).

3.3 Análise multicritérios para tomada de decisões

A técnica de análise multicritérios vem sendo amplamente utilizada para a tomada de decisão em processos que envolvam várias alternativas. A partir do conhecimento de algumas informações, organiza-se uma estrutura lógica para que a partir da técnica de modelagem multicritérios seja possível apresentar a melhor solução possível (EHRLICH, 1996a).

Segundo Ehrlinch (1996a) a modelagem em questão é a representação simplificada da realidade destacando-se os elementos da realidade que se julgem importantes para a tomada de decisão. Para o autor, a utilização desses modelos traz benefícios como a identificação de elementos relevantes para a tomada de decisão, possibilidade de análise de situações complexas e com muitas variáveis, permitindo também a análise da estabilidade dos resultados encontrados.

A aplicação da metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP) procura uma maior simplicidade na modelagem do processo de tomada de decisão, permitindo total compreensão por parte daqueles que usarão o resultado como auxílio para a tomada de decisão. A melhor compreensão por parte do tomador de decisão torna o modelo bastante popular para uso nas decisões individuais e em grupo (EHRLICH, 1996b).

Para a aplicação da metodologia proposta é necessário atender às etapas que seguem:

- a) análise do objetivo e decomposição em estrutura hierárquica;
- b) listar alternativas para atendimento ao objetivo;
- c) comparar a alternativa de cada critério, em pares, obtendo-se as preferências;
- d) determinar pesos para os conjuntos de comparações;
- e) classificar as alternativas.

A decomposição hierárquica deve seguir uma escala, considerando-se que a percepção humana não distingue, de forma coerente, mais que sete níveis diferentes (EHRLICH, 1996b).

Para o desenvolvimento desse tipo de análise, adotou-se a escala de importância da norma ASTM E1765 (2002) para estimar o peso de cada critério adotado neste trabalho, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Escala de importância para os critérios analisados, segundo o método de análise multicritérios.

| Descrição | Atribuição numérica para o peso do fator |
|---|--|
| Os fatores comparados têm o mesmo grau de importância | 1 |
| Moderada importância de um fator em comparação com o outro | 3 |
| Um fator é mais importante em comparação ao outro | 5 |
| Um fator apresenta maior importância em comparação ao outro | 7 |
| Um fator é de extrema importância quando comparado ao outro | 9 |

Fonte: ASTM (2002).

Segundo estudos de Braunschweig *et al.* (2011) os impactos ambientais para produção de concretos de alta qualidade, comparando concreto com agregado graúdo natural e concreto com substituição parcial do agregado graúdo por agregado reciclado de concreto, são semelhantes desde que haja um pequeno aumento do consumo de cimento. Neste estudo os pesquisadores compararam os impactos do uso de energia, das mudanças climáticas que se relacionam com o aquecimento global, entre outros, e seus resultados mostraram que a contribuição da produção de agregado natural e agregado reciclado não é significativa, já que o problema maior está na produção de cimento. Weil *et al.* (2006) também encontraram resultados semelhantes estudando substituição do agregado natural em teores de 35 e 50% com diferentes consumos de cimento.

Para Marinković *et al.* (2010) os impactos ambientais para produção de concreto composto por agregado natural ou com agregado graúdo reciclado, mesmo que este apresente consumo de cimento até 3% maior que o primeiro, são semelhantes apenas quando as distâncias de transporte de agregados reciclados são menores do que as distâncias de transporte de agregados naturais.

Knoeri *et al.* (2013) concluíram que, quando o consumo adicional de cimento for inferior a 10%, e quando as distâncias de transporte estiverem dentro dos limites estudados, os impactos serão comparáveis. Esses autores, diferente de outros, também consideraram benefícios da sucata de aço recuperada, evitando impactos com o descarte desse tipo de resíduos na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), o que gerou resultados ainda melhores para o agregado reciclado de concreto.

Desta forma, verifica-se a necessidade de estudar o teor de incorporação do material reciclado com uma análise mais global do resultado desta substituição o que, pode resultar em vantagens, mesmo com desempenhos ligeiramente inferiores.

Os estudos de impacto ambiental relatados por Totic *et al.* (2015) mostram que a produção de concreto com diferentes tipos de agregados pode ser melhor, em alguns casos, do ponto de vista econômico, outros, do ponto de vista ambiental ou do ponto de vista tecnológico.

Assim, a decisão do melhor teor de substituição deveria envolver vários critérios que precisam ser levados em consideração ao mesmo tempo, o que exigiria a análise das decisões com métodos de múltiplos critérios. Esta forma de tomada de decisão é possível a partir de modelos analíticos, que auxiliam no processo de otimização da análise (TOSIC *et al.*, 2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Identificação geográfica

Com base no Plano Diretor de Gestão dos Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas/SP, publicado pela Agência Metropolitana de Campinas (AGEMCAMP), foram identificados os municípios pertencentes à Região Metropolitana de Campinas (RMC) que tratam os resíduos sólidos de construção civil neles gerados. A partir das informações coletadas, foram identificadas as localizações das áreas de reciclagem de resíduos de construção em cada município, usando o *software* ArcGIS© versão 10.2 para alocação destes postos de britagem no mapa da RMC.

4.2 Seleção e amostragem dos agregados reciclados

Após a localização das usinas recicladoras, foram agendadas visitas para obtenção de informações mais detalhadas tais como: origem do material recebido, método de triagem e principal área consumidora do agregado reciclado gerado.

A seleção das usinas das quais foram coletados materiais para análise, deu-se após a obtenção e análise das informações, identificando-se as que produzem material de forma contínua, permitindo, a partir das amostras coletadas, analisar a qualidade do material produzido, no momento da coleta.

As amostras de campo foram coletadas seguindo a definição de ABNT NBR NM26:2009 (ABNT, 2009c):

porção representativa de um lote de agregados, coletada nas condições prescritas nesta Norma, seja na fonte de produção, armazenamento ou transporte. A amostra de campo é formada reunindo-se várias amostras parciais em número suficiente para os ensaios de laboratório.

Foram coletadas amostras de campo de cada usina e tipo de agregado miúdo produzido na usina, considerados neste estudo. Cada amostra de campo foi composta por quatro amostras parciais de 40 Kg para garantir que tanto o agregado reciclado utilizado na caracterização, quanto para a produção das argamassas, pertencesse a uma mesma amostra de campo, já que pode haver variabilidade na matéria-prima utilizada para a produção do agregado reciclado. O procedimento realizado para a produção de amostras segue descrito em anexo.

4.3 Caracterização física dos agregados

A caracterização física dos agregados miúdos reciclados (AMR) foi feita a partir da execução dos ensaios requeridos pela ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) como: composição granulométrica; teor de material passante nas peneiras de 75 μm ; torrões de argila e materiais friáveis; absorção de água; determinação de massa específica e massa específica aparente e impurezas orgânicas, cujas normas seguem relacionadas na Tabela 6, apresentada a seguir.

Tabela 6 – Ensaios e normas para caracterização física dos agregados e dos agregados reciclados.

| Ensaio | Norma |
|---|----------------------|
| Composição granulométrica | ABNT NBR NM 248:2001 |
| Teor de material passante na peneira 75 μm | ABNT NBR NM 46:2001 |
| Torrões de argila e materiais friáveis | ABNT NBR 7218:2010 |
| Impurezas orgânicas | ABNT NBR NM 49:2001 |
| Absorção de água | ABNT NBR NM 30:2000* |
| Massa específica e massa específica aparente | ABNT NBR NM 52:2009* |

Fonte: adaptado de Rodrigues *et al.*, 2013.

A realização dos ensaios seguiu o método de ensaio previsto em cada norma vigente relacionada acima. A descrição dos procedimentos e equipamentos utilizados estão nos anexos apresentados ao final desse trabalho.

Para a determinação da absorção de água em agregados miúdos reciclados, a ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) indica o mesmo método de ensaio empregado aos agregados de origem natural em ABNT NBR NM30:2000 (ABNT, 2000b). Neste trabalho utilizou-se a metodologia proposta por Rodrigues *et al.* (2013) que segue justificada e detalhada a seguir.

4.3.1 Absorção de água

Para a determinação da absorção de água dos agregados reciclados, utilizou-se o método sugerido por Rodrigues *et al.* (2013), que se diferencia da ABNT NBR NM30:2000 (ABNT, 2000b) basicamente por propor a lavagem dos agregados miúdos reciclados (AMR) antes do procedimento para determinação da absorção. Rodrigues *et al.* (2013) demonstraram que a presença do material fino torna bem mais difícil a obtenção de resultados precisos. Isso por que as partículas finas falseiam a identificação da condição saturada superfície seca nos AMR. Assim, o

procedimento realizado neste trabalho seguiu as recomendações de Rodrigues *et al.* (2013), com apenas uma diferença, a lavagem dos AMR foi realizada utilizando-se as peneiras com abertura de 1,18 mm e de 75 μ m.

Após esse procedimento, o material ficou submerso em água por 24 horas para que, então, após a saturação definitiva do material, fosse obtida a amostra na condição saturada com superfície seca.

4.3.2 Massa específica e massa específica aparente

Conforme o método de ensaio descrito em ABNT NBR NM52:2009 (ABNT, 2009d), a amostra deve estar na condição saturada com superfície seca, obtida da mesma forma que ABNT NBR NM30:2000 (ABNT, 2000b). Por esse motivo, os ensaios para determinação da absorção de água e da massa específica e massa específica aparente foram feitos simultaneamente.

4.4 Caracterização química dos agregados

A caracterização química compreendeu a execução dos ensaios para identificação da presença de contaminantes, com análise do teor de sais solúveis, teor de íons cloreto, teor de íons sulfatos e a determinação de material orgânico por perda ao fogo. Na Tabela 7 encontram-se as normas vigentes para estes testes.

Tabela 7 – Ensaios e normas para caracterização química de agregados reciclados.

| Ensaio | Norma |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Teor de sais solúveis | ABNT NBR 9917:2009 |
| Teor de íons cloretos | Método argentimétrico de Mohr |
| Teor de íons sulfatos | ABNT NBR 9917:2009 |
| Material orgânico - perda ao fogo | ABNT NBR NM 18:2012* |

*Adaptado de Dias; Lima (2004).
Fonte: da autora, 2017.

A realização dos ensaios seguiu o método de ensaio previsto em cada norma vigente relacionada acima. A descrição dos procedimentos e equipamentos utilizados estão nos anexos apresentados ao final desse trabalho.

4.4.1 Determinação do teor de íons cloretos

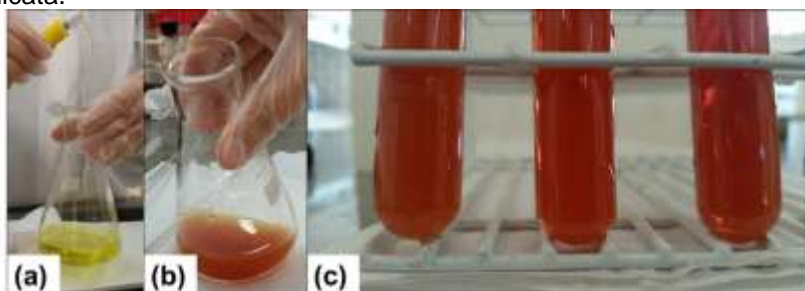
A determinação do teor de íons cloretos em agregados para concreto foi realizada a partir do método argentimétrico de Mohr (Figura 7).

Para o ensaio de determinação do teor de cloretos foram utilizadas as soluções obtidas segundo ABNT NBR 9917:2009 (ABNT, 2009b).

A análise de cada amostra foi realizada em triplicata. Em cada determinação foram adicionados em um frasco de Erlenmeyer de 250 mL: 20 mL de solução, 25 mL de água destilada e 1 mL de K_2CrO_4 utilizado como indicador.

A titulação deu-se a partir do gotejamento de solução de nitrato de prata (0,005 mol/L) até a precipitação do cromato de prata em cor vermelha (Figura 7c).

Figura 7 - Fotografias da realização da determinação do teor de íons cloretos: (a) solução composta por amostra, água destilada e indicador; (b) resultado após precipitação do nitrato de prata; (c) resultado do ensaio em triplicata.



Fonte: da autora, 2017.

4.4.2 Material orgânico: determinação do teor por perda ao fogo

A norma ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a), de agregados para concreto, assim como a de agregados reciclados ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), não especificam um método de ensaio próprio para obtenção do teor de matéria orgânica. Apenas a norma ABNT NBR NM18:2012 (ABNT, 2012b) trata de perda ao fogo em cimentos, submetendo o material a ser analisado a uma temperatura de 950 °C.

Segundo Gross (1971) os procedimentos que determinam a perda de matéria orgânica com aquecimento de amostras, baseiam-se em resultados de perda de massa, determinada com uma balança analítica. Leong e Tanner (1999) e Suguio (1973) *apud* Dias e Lima (2004) consideram a existência de carbonatos na amostra. Isso tornou necessário corrigir as estimativas de perda de massa, uma vez que os carbonatos podem ser decompostos a partir de 400 °C, com a liberação de dióxido de carbono (CO_2). Leong e Tanner (1999) *apud* Dias e Lima (2004) também

identificaram que acima de 500 °C a 600 °C, além da perda de material orgânico, pode ocorrer perda de matéria constituinte e da água estrutural, acrescentando erros ao método. Portanto, Silva *et al.* (1999) trabalharam com solos, usando temperaturas entre 105 °C a 250 °C para a determinação de matéria orgânica. Já Dias e Lima (2004) determinaram a matéria orgânica em solos e sedimentos com uma variação térmica de 110 °C a 360 °C.

Assim, o método empregado neste trabalho foi o de submeter uma amostra de 1,000 ± 0,001 g de agregado miúdo reciclado a temperatura de 350 °C (Figura 65a). Isso porque, as amostras de agregados poderiam apresentar perda de água estrutural em temperaturas a partir de 500 °C (DIAS; LIMA, 2004). Mesmo assim, foram ensaiadas amostras expostas a 950 °C, temperatura indicada em ABNT NBR NM18:2012 (ABNT, 2012b), para verificar seu comportamento.

4.5 Determinação do teor de incorporação dos agregados em argamassa

A determinação do teor de incorporação de agregado miúdo reciclado foi realizada em argamassa de uso geral, pois são utilizadas em larga escala nas obras. A argamassa com 0% de substituição foi denominada traço de referência e foram testadas as substituições de 20% e 40% do agregado natural por agregado reciclado, mantendo-se a relação água-cimento utilizada no traço referência.

A relação água-cimento e a proporcionalidade dos traços foram fixados, a fim de garantir um parâmetro fixo de comparação dos resultados obtidos nos ensaios, para determinação das características mecânicas das argamassas testadas.

Os traços de argamassa foram identificados pela sigla “A” seguida do número que representa o teor de substituição como descrito na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 – Identificação dos traços de argamassa para o estudo.

| Sigla | Nomenclatura |
|-------|---|
| A0 | Argamassa referência (0% de substituição) |
| A20 | Argamassa com 20% de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado. |
| A40 | Argamassa com 40% de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado. |

Fonte: da autora, 2017.

Definiu-se trabalhar com traço em massa 1:3 (aglomerante e agregado, respectivamente) para a produção do traço de argamassa para uso geral, uma vez que

esta é uma das recomendações técnicas mais difundidas para a preparação de argamassas (THOMAZ; HELENE, 2000). As composições das argamassas estudadas estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição das argamassas para o estudo (traço em massa 1:3).

| Sigla | Composição (Kg) | | | |
|-------|-----------------|---------------|-----------------|-----|
| | Cimento | Areia natural | Areia reciclada | a/c |
| A0 | 1 | 3 | - | 0,5 |
| A20 | 1 | 2,4 | 0,6 | 0,5 |
| A40 | 1 | 1,8 | 1,2 | 0,5 |

Fonte: da autora, 2017.

4.6 Material para preparo das argamassas estudadas

4.6.1 Cimento

Segundo o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC, [s.d.b]), em 2014 foram produzidas mais de 71 milhões de toneladas de cimento. Quanto aos perfis de consumo, o uso do cimento para produção de argamassas foi de mais de um milhão de toneladas, representando 1,42 % de todo o cimento produzido no país (SNIC, [s.d.]).

A produção do cimento CII, em 2008, representou 63,65% de toda a produção de cimento no país (SNIC, [s.d.c]).

A escolha do tipo de cimento foi feita pela facilidade de aquisição na região estudada: cimento Portland composto com escória e resistência à compressão aos 28 dias de 32 MPa (CP II E 32).

As características físicas do cimento CP II E 32 utilizado foram determinadas por meio de ensaios e seguem listadas abaixo:

- massa específica de 3,343 g/cm³ (ABNT NBR 16605:2017);
- finura de 0,8% (ABNT NBR 11579:2012a)
- resistência à compressão aos 28 dias de 32,78 MPa (DRM = 5,51%) (ABNT NBR 7215:1997)

4.6.2 Areia natural

O agregado é o material que apresenta maior consumo na produção de argamassas e é responsável pelo comportamento e desempenho da mistura no estado fresco e endurecido. Isso porque características como dureza, forma dos grãos,

granulometria e porosidade afetam os resultados alcançados na produção das argamassas (CARDOSO, 2010).

Segundo ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a), os agregados são classificados segundo sua origem (naturais, industrializados ou reciclados), a forma, dimensão de suas partículas (angulares ou arredondados e grossos ou finos) e massa unitária (leves, médios ou pesados).

O material de origem natural, de rio, escolhido para a composição da argamassa nos traços referência e com substituição de 20% e 40% do agregado natural, provem de um fornecedor da região de Barão Geraldo em Campinas/SP, que é qualificado com garantia de atendimento às prescrições exigidas pela ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) e foi devidamente caracterizado.

4.6.3 Agregados miúdos reciclados

Para a composição da argamassa nos traços com substituição de 20% e 40% do agregado natural, selecionou-se material das unidades recicladoras em operação na região metropolitana de Campinas, que foram previamente caracterizados.

4.6.4 Água

Na produção das argamassas de aglomerante hidráulicos a água confere a consistência no estado fresco e a característica aglomerante aos aglomerantes hidráulicos como o cimento, permitindo que este ao endurecer desenvolva a resistência mecânica adequada.

O teor de água/aglomerante da mistura influencia propriedades como porosidade e resistência mecânica e durabilidade.

A água utilizada no trabalho foi proveniente da rede de abastecimento no município de Campinas/SP.

4.6.5 Aditivo superplastificante

O uso de aditivo superplastificante foi necessário melhorar a homogeneização da mistura, uma vez que os agregados reciclados usados possuem alto índice de absorção de água.

O aditivo ADVA™ CAST 525, fabricado pela empresa Grace do Brasil Ltda., é um superplastificante de última geração à base de policarboxilato, desenvolvido para evitar

segregação em concretos autoadensáveis (GRACE DO BRASIL, s.d.). Sua massa específica é 1,059 g/cm³.

4.7 Preparo das argamassas

Para o preparo da argamassa tanto para a determinação de suas características no estado fresco ou endurecido, a ABNT NBR 13276:2005 (ABNT, 2005a) recomenda que a mistura seja composta por 2,5 Kg de material seco.

A argamassa foi preparada a partir do proporcionamento do traço definido no estudo, misturando-se os materiais em velocidade baixa por 90 segundos com o auxílio de uma argamassadeira marca Perfecta Curitiba modelo 20 Litros trifásica. Após esse período, a mistura foi deixada em repouso por 15 minutos, para que se pudesse então homogeneizar a argamassa manualmente, com espátula durante 30 segundos.

4.8 Preparo dos corpos de prova de argamassa

Após o preparo da argamassa, foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 cm × 4 cm × 16 cm, com adição da argamassa em duas camadas e com 30 golpes da mesa de adensamento, rasando-se a superfície do molde ao final do processo com uma régua.

Os corpos de prova foram moldados em quantidade suficiente para a determinação das características físicas e mecânicas das argamassas no estado endurecido, sendo necessários seis corpos de prova para cada traço estudado.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram (48 ± 24) horas nos moldes em ambiente climatizado, com temperatura de (23 ± 2) °C e (60 ± 5)% de umidade relativa do ar. Após esse período inicial, os corpos de prova foram retirados do molde e permaneceram por mais 26 dias no ambiente climatizado para que pudessem, aos 28 dias, serem utilizados para a determinação da resistência à tração na flexão e resistência à compressão, da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

4.9 Análise das características físicas no estado fresco e endurecido e características mecânicas das argamassas

A caracterização física das argamassas estudadas foi feita a partir da execução dos ensaios requeridos pela ABNT NBR 13281:2005 (ABNT, 2005f) para argamassa no estado fresco e endurecido. No estado fresco foram realizados ensaios para

determinação da densidade de massa, teor de ar incorporado, índice de consistência e retenção de água. No estado endurecido, aos 30 dias, foram analisados: absorção de água por capilaridade; coeficiente de capilaridade; retenção de água; densidade de massa; teor de ar incorporado; resistência à tração na flexão; resistência à compressão e determinação de massa aparente. As normas para a realização destes ensaios são apresentadas nas Tabelas 10 e 11, que relacionam os ensaios realizados com a argamassa no estado fresco e no estado endurecido, respectivamente.

Tabela 10 – Ensaios e normas para caracterização física de argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos no estado fresco.

| Ensaio | Norma |
|------------------------|---------------------|
| Densidade de massa | ABNT NBR 13278:2005 |
| Teor de ar incorporado | ABNT NBR 13278:2005 |
| Índice de consistência | ABNT NBR 13276:2005 |
| Retenção de água | ABNT NBR 13277:2005 |

Fonte: adaptado de ABNT, 2005e.

Tabela 11 – Ensaios e normas para caracterização física e mecânica de argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos no estado endurecido.

| Ensaio | Norma |
|-------------------------------------|---------------------|
| Absorção de água por capilaridade | ABNT NBR 15259:2005 |
| Coeficiente de capilaridade | ABNT NBR 15259:2005 |
| Massa aparente no estado endurecido | ABNT NBR 13280:2005 |
| Resistência à compressão | ABNT NBR 13279:2005 |
| Resistência à tração na flexão | ABNT NBR 13279:2005 |

Fonte: adaptado de ABNT, 2005e.

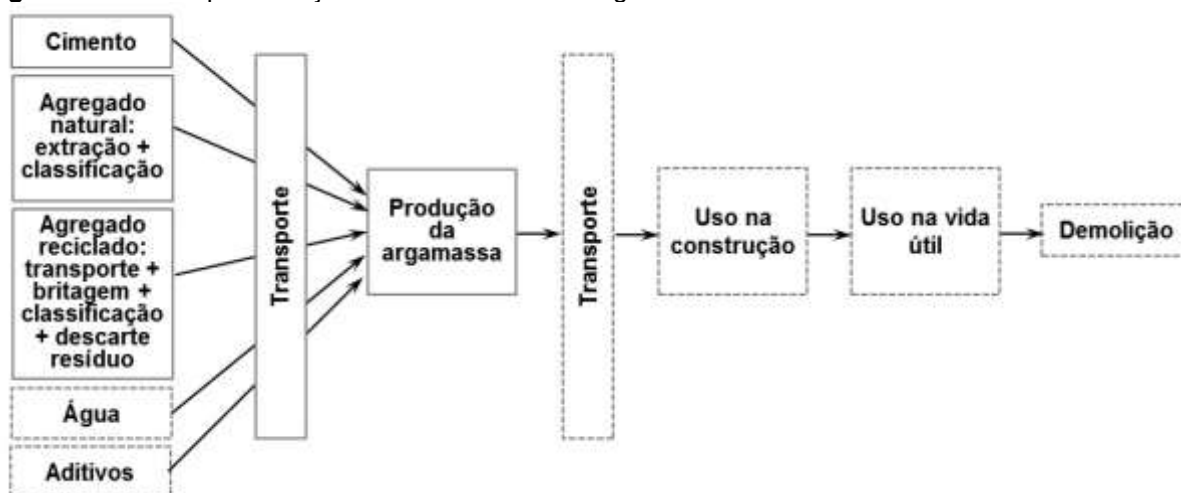
Os ensaios de lixiviação e de solubilização de metais pesados presentes em agregados reciclados previstos por ABNT NBR 10005:2004 (ABNT, 2004e) e ABNT NBR 10006:2004 (ABNT, 2004f), respectivamente, não foram realizados nesse trabalho devido a dificuldades de acesso aos equipamentos necessários, o que não significa menor relevância ou importância.

4.10 Análise da viabilidade de aplicação do agregado miúdo reciclado em argamassa de uso geral por método multicritérios

Para a execução da análise multicritérios, preferiu-se trabalhar com o método *Analytic Hierarchy Process* pela sua simplicidade e facilidade de interpretação de seus resultados.

Tosic *et al.* (2015) realizaram a avaliação do impacto ambiental através da análise do ciclo de vida (ISO, 2006). Com base neste estudo, os limites escolhidos para representar a avaliação origem-destino, no caso das argamassas, estão demonstrados na Figura 8.

Figura 8 – Representação do ciclo de vida da argamassa.



Fonte: baseado em Tosic *et al.*, 2015.

Tosic *et al.* (2015) aplicaram uma regra de corte com relação à produção de agregado reciclado de concreto, para que nenhum impacto da produção original que utilizou agregado natural fosse alocado à produção do agregado reciclado. O corte excluiu as etapas anteriores ao recebimento do entulho na unidade de processamento, ou seja, etapas de construção, utilização e demolição da estrutura de concreto. Este mesmo procedimento foi adotado no presente trabalho, como mostra a Figura 8.

A produção do agregado reciclado incluiu o processamento do material a partir do qual são gerados os agregados reciclados e a destinação final ambientalmente adequada ao resíduo da reciclagem que não pode ser reciclado (TOSIC *et al.*, 2015).

Para o inventário de ciclo de vida dos materiais constituintes da argamassa, Marinković *et al.* (2013) e Tosic *et al.* (2015) utilizaram dados disponibilizados por fornecedores e fabricantes de cimento (demanda de energia e emissões), informações de processos e energia utilizados para extração/produção.

Em seu trabalho, na análise do impacto ambiental, Marinkovic *et al.* (2010) avaliaram o uso de agregados reciclados graúdos na produção de concreto e levou em consideração que não haveria aproveitamento da parcela miúda de agregado produzidos na reciclagem.

No presente trabalho esse tipo de consideração não será realizado pois serão produzidas argamassas, utilizando a parcela miúda dos agregados reciclados, que foi descartada e considerada como parcela não aproveitável nos trabalhos de Marinkovic *et al.* (2010) e Totic *et al.* (2015).

Totic *et al.* (2015) dividiram o estudo do impacto ambiental em quatro categorias: carga ambiental, uso energético, geração de resíduos e esgotamento de recursos naturais. Os valores estimados das emissões com potencial de alterações climáticas (dióxido de carbono), de acidificação (óxidos de enxofre), de eutrofização (óxidos de nitrogênio) e de criação de oxidantes fotoquímicos (compostos orgânicos voláteis diferentes do metano) foram agrupados para formar uma função simples denominada carga ambiental, usada como dado de entrada para a análise multicritérios.

O uso de energia foi escolhido por Totic *et al.* (2015) como uma função critério, pois a indústria de cimento é considerada como um grande consumidor de energia. Nesse trabalho, o uso de energia não será considerado, pois o consumo de cimento será o mesmo para todos os traços, mas isso não significa que deixa de ter relevância no impacto ambiental para produção de argamassa.

A quantidade de resíduos utilizados na produção das argamassas com a substituição correspondeu ao fator esgotamento dos recursos naturais, também usado como dado de entrada em sua análise multicritérios. Isso porque as fontes de areia de qualidade não são infinitas e a sua extração tem um forte impacto sobre o meio ambiente. Assim, a quantidade de recursos naturais consumidos durante o ciclo de vida correspondeu ao esgotamento de recursos naturais e também foi incluída como dado de entrada para análise multicritérios (TOSIC *et al.*, 2015).

Para analisar e comparar os resultados obtidos nos diferentes tipos de argamassas produzidos, por não se tratar de elemento com função estrutural, foram fixados os parâmetros de consumo de cimento e fator água/cimento para todos os traços.

O impacto ambiental foi medido em termos do esgotamento de recursos naturais e da distância de transporte dos agregados ao centro consumidor.

Finalmente, para a análise da viabilidade de aplicação do agregado miúdo reciclado em argamassa para uso geral, foram considerados também os resultados obtidos no desempenho da argamassa.

4.10.1 Critérios considerados na análise multicritérios

Considerando os materiais constituintes da argamassa, os responsáveis pela ampliação do impacto ambiental no produto final devido ao impacto durante sua produção ou extração são o cimento e areia natural de rio.

A comparação do impacto ambiental deu-se pelo peso nos quesitos: esgotamento dos recursos naturais (consumo maior ou menor de agregado miúdo natural) e distância de transporte. Isso porque o cimento, apontado nos trabalhos de Marinkovic *et al.* (2010) e Tosic *et al.* (2015) como o maior causador do impacto ambiental, teve seu consumo mantido, não interferindo nos resultados das análises.

4.10.1.1 Função critério 1 (f1) – esgotamento dos recursos naturais

Para o critério de esgotamento dos recursos naturais é considerado o esgotamento causado pela extração da areia quartzosa utilizada como agregado miúdo, cuja origem natural provém de leitos de rios.

Na comparação entre os traços de argamassa estudados, os pesos utilizados para aplicação da comparação que se referem ao esgotamento dos recursos naturais foram: 1 (um) para a argamassa referência, já que 100% da massa de seu agregado miúdo é areia natural de rio; 0,80 (oito décimos) para as argamassas do tipo A20, na qual foi realizada a substituição de 20% do agregado natural de rio pelos agregados miúdos reciclados e; 0,60 (seis décimos) para as argamassas do tipo A40, devido à substituição de 40% do agregado miúdo natural, como feito por Tosic *et al.* (2015).

4.10.1.2 Função critério 2 (f2) – distância de transporte

Dentre os diversos impactos, os causados pelo transporte dos agregados do seu local de extração (natural) ou produção (reciclados) estão o custo final da argamassa e a emissão de poluentes devido ao uso do modal rodoviário. Todos estão diretamente relacionados à distância de transporte: quanto maior a distância percorrida, maior o impacto. Sendo assim, para a análise dessa função critério foram calculadas as distâncias de transporte para cada um dos traços de argamassas propostos, considerando a massa de agregados fornecida por cada unidade.

Os pesos utilizados para aplicação dessa função critério foram a distância percorrida, em quilômetros, para obtenção do agregado necessário para produção da argamassa. Desta forma, a distância de transporte foi obtida pela soma da distância

necessária para obtenção de cada tipo de agregado empregado, considerando o teor de substituição já que o consumo de agregado natural será 20% menor nas argamassas do tipo A20 e 40% menor nas A40. A distância será acrescida daquela necessária para obtenção do agregado miúdo reciclado, independente da quantidade consumida.

4.10.1.3 Função critério 3 (f3) – desempenho físico e mecânico da argamassa

De acordo com os trabalhos de Mattana *et al.* (2012), para a análise do desempenho da argamassa serão utilizados resultados obtidos a partir de ensaios das argamassas testadas nos estados fresco e endurecido.

Dentre os resultados que serão considerados para a análise dessa função critério estão: densidade de massa (estado fresco); retenção de água (estado fresco); teor de ar incorporado (estado fresco); coeficiente de capilaridade (estado endurecido); densidade de massa (estado endurecido); resistência à compressão axial (estado endurecido); e resistência à tração na flexão (estado endurecido).

Mattana *et al.* (2012) listou e explicou de forma resumida a importância de cada característica física ou mecânica e sua correlação com outras para que fossem atribuídos os pesos que representam o grau de importância de uma característica física ou mecânica em relação à outra.

Neste trabalho procurou-se adotar critérios semelhantes aos de Mattana *et al.* (2012), já que algumas características analisadas por eles não foram consideradas neste, tais como índice de vazios, módulo de elasticidade e resistência de aderência à tração.

Desta forma, com relação ao grau de importância das características físicas e mecânicas para o preparo e aplicação da argamassa, são listadas em ordem decrescente: coeficiente de capilaridade, resistência à tração na flexão, retenção de água; resistência à compressão e teor de ar incorporado; e densidade de massa nos estados fresco e endurecido.

4.10.2 Aplicação na análise multicritérios

Tosic *et al.* (2015) apresenta os passos matemáticos para a realização da análise multicritérios.

Para cada parâmetro da função critério, há uma alternativa com o valor ideal (máximo ou mínimo), dependendo se a função critério representa um benefício ou não. O método utilizado (AHP) trabalha com um compromisso comparando quanto os valores da função critério de cada alternativa estavam longe dos valores ideais de cada critério. Para medir a proximidade ou distância do ideal foi utilizada uma função de agregação (L_p) com J alternativas diferentes indicadas como $A_1; A_2; \dots; A_J$. Para a alternativa A_j , a classificação do critério j foi denotada por f_{ij} , ou seja, f_{ij} foi o valor da função critério i para essa alternativa; n foi o número de critérios (Equação 1):

$$L_{p,j} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{w_i(f_i^* - f_{i,j})}{(f_i^* - f_i^-)} \right]^p \right\}^{1/p}, \quad 1 \leq p \leq \infty; j = 1, 2, \dots, J \quad (1)$$

onde $L_{1,j}$ (como S_j na Equação. 2) e $L_{\infty,j}$ (como R_j na Equação 3) foram usadas para formular a classificação. A distância para a solução ideal correspondeu a uma distância em um espaço n -dimensional (n é o número de critérios), isto é, a diferença entre valor de cada função critério (para cada alternativa) e o valor ideal foi um componente de um vetor distância para cada alternativa.

Então, a solução foi obtida a partir do valor mínimo da soma de todos os componentes das distâncias, isto é, a soma algébrica de todas as distâncias dos critérios individuais foi mínima ($\min_j S_j$). Além disso, todas as alternativas têm uma componente do vetor de distância, com um valor máximo, isto é, sempre pode haver uma função critério mais distante de seu valor ideal do que todas as outras. A solução obtida a partir $\min_j R_j$ foi a alternativa com o menor valor da sua distância máxima do componente.

O algoritmo de classificação utilizado por Tosic *et al.* (2015) consiste nos seguintes passos:

- a) determinação do melhor e do pior valor f_i de todas as funções critério, $i = 1, 2, \dots, n$. Se a função i precisou ser minimizada, então:

$$f_i^* = \min_j f_{i,j} \text{ e } f_i^- = \max_j f_{i,j}$$

- b) cálculo dos valores S_j e R_j , com $j = 1, 2, \dots, J$, pelas relações

$$S_j = \sum_{i=1}^n \frac{w_i(f_i^* - f_{i,j})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (2)$$

$$R_j = \max_i \left[\frac{w_i(f_i^* - f_{i,j})}{(f_i^* - f_i^-)} \right] \quad (3)$$

onde, w_i foram os pesos dos critérios, expressando sua importância relativa.

c) cálculo dos valores Q_j , com $j = 1, 2, \dots, J$, pela relação:

$$Q_j = \left[\frac{v(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} \right] + \left[\frac{(1-v)(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \right] \quad (4)$$

onde, $S^* = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^* = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$ e $n = 0,5$.

A medida Q foi uma interpolação linear das medidas S_j e R_j . O coeficiente interpolação n pode assumir valores entre 0 e 1. Se $n = 0$, então, a medida Q foi igual à medida de R_j , isto é, a menor máxima distância individual. Este foi o caso com vários fatores de decisão com "poder de veto", que deviam ser satisfeitos até um grau mínimo. Quando $n = 1$, Q foi igual a medida S_j , foi o caso com múltiplos fatores de decisão, nenhum com "poder de veto". Neste estudo foi adotado o valor de $n = 0,5$, com importância ou medidas de pesos iguais;

- d) listagem das diferenças entre os valores de S , R e Q de duas alternativas, que representam a "vantagem" de uma alternativa sobre outra (valores ideais para todas as três medidas é 0). Se, por exemplo, alternativa A_1 teve um valor de 0,25 na lista de classificação Q e a alternativa A_2 teve um valor de 0,50, então alternativa A_1 teve 25%, $(0,50 - 0,25) \times 100$, de vantagem sobre alternativa A_2 ;
- e) proposição de uma solução de compromisso apenas uma alternativa (a'), que foi mais bem classificada pela medida Q (mínimo), quando duas condições fossem satisfeitas:

C1 "vantagem aceitável", quando $Q(a'') - Q(a') \geq DQ$, onde a'' foi a alternativa na segunda posição na lista de classificação por Q ; $DQ = \min \{1 / (J-1); 0,25\}$; J sendo o número de alternativas ou;

C2 "estabilidade aceitável", quando a alternativa a' também foi a melhor classificada por S e/ou R . A solução de compromisso também tem uma estabilidade aceitável se ela é a melhor classificada pela medida Q para $n = 0,25$ e $n = 0,75$. Isso simula processos de decisão em que maior ênfase é dada, quer para a proximidade simultânea a todos os valores ideais ($n = 0,75$, maior ênfase dada à medida S) ou para a minimização da distância máxima individual ($n = 0,25$, maior ênfase dada à

medida R). Se uma destas condições não fosse satisfeita, então múltiplas alternativas precisaram ser propostas como a solução de compromisso (TOSIC *et al.*, 2015).

Para a realização dos passos matemáticos da análise multicritérios, nesse trabalho, a calculadora de prioridades desenvolvida por BPMSG (2016) foi usada para a comparação do grau de importância de um critério considerado em relação a outro, com a proposição dos pesos e geração da matriz de decisão (Figura 9).

Figura 9 – Imagem da calculadora desenvolvida e disponibilizada pelo Business Performance Management Singapore (BPMSG).

[AHP-OS Home](#) [Latest News](#) ([forgot?](#)) [Register](#)

BPMSG AHP Online System

AHP Priority Calculator

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20)

Pairwise Comparison AHP priorities

3 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to AHP priorities is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

| | A - Importance - or B? | Equal | How much more? |
|---|---|------------------------------------|---|
| 1 | <input checked="" type="radio"/> Crit-1 or <input type="radio"/> Crit-2 | <input checked="" type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 2 | <input checked="" type="radio"/> Crit-1 or <input type="radio"/> Crit-3 | <input checked="" type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 3 | <input checked="" type="radio"/> Crit-2 or <input type="radio"/> Crit-3 | <input checked="" type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |

CR = 0% OK

AHP Balanced scale dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons

| Category | Priority | Rank |
|----------|----------|------|
| 1 Crit-1 | 33.3% | 1 |
| 2 Crit-2 | 33.3% | 1 |
| 3 Crit-3 | 33.3% | 1 |

Number of comparisons = 3
Consistency Ratio CR = 0,0%

Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix

| | 1 | 2 | 3 |
|---|------|------|------|
| 1 | 1 | 1,00 | 1,00 |
| 2 | 1,00 | 1 | 1,00 |
| 3 | 1,00 | 1,00 | 1 |

Principal eigen value = 3,000
Eigenvector solution: 1 iterations, delta = 0,0E+0

Fonte: BPMSG, 2017.

A partir da definição dos pesos e geração da matriz de decisão, foram criadas planilhas eletrônicas para a aplicação dos critérios.

A planilha eletrônica elaborada pela autora, a partir da matriz de decisão obtida com calculadora BPMSG, calcula os pesos para cada atributo analisado, fazendo a comparação de cada par de atributos (Figura 10).

Figura 10 – Imagem da planilha eletrônica desenvolvida para a realização da análise multicritérios deste trabalho.

| | | Estado fresco | | | Estado endurecido | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------|----------------------------|------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | Densidade de massa | Retenção de água | Teor de ar incorporado | Densidade de massa | Resistência à compressão axial | Resistência à tração na flexão | Coefficiente de capilaridade | Auto-vetor | Normalização do auto vetor | Auto valor | Índice de Consistência (IC) | Razão de Consistência (RC) |
| Estado fresco | Densidade de massa | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/5 | 1/9 | 1/7 | 0,30 | 3,1% | 0,95 | | |
| | Retenção de água | 5 | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | 1,85 | 19,1% | 1,16 | | |
| | Teor de ar incorporado | 3 | 1/3 | 1 | 3 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 0,68 | 7,0% | 1,09 | | |
| | Densidade de massa | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 0,37 | 3,8% | 0,87 | 0,08 | 0,06 |
| Estado endurecido | Resistência à compressão axial | 5 | 1/3 | 3 | 3 | 1 | 1/5 | 1/5 | 0,93 | 9,6% | 1,42 | | |
| | Resistência à tração na flexão | 9 | 1 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 2,73 | 28,1% | 1,04 | | |
| | Coefficiente de capilaridade | 7 | 3 | 3 | 5 | 5 | 1 | 1 | 2,80 | 29,5% | 0,95 | | |
| Soma dos pesos | | 31,00 | 6,07 | 15,67 | 23,00 | 14,87 | 3,71 | 3,21 | 9,72 | 1,00 | 7,48 | | |

Fonte: da autora, 2017.

Para que os resultados obtidos a partir da análise multicritérios sejam válidos, é importante que exista coerência entre as hierarquias impostas. Essa coerência é medida pela razão de consistência, índice que deve ser inferior a 0,1 (SAATY, 1991; COSTA *et al.* 2009; SAATY, 2000 *apud* MARINS *et al.* 2009; VARGAS, 2010 *apud* FAVRETTO e NOTTAR, 2016).

Portanto, para a interpretação e inclusão de cada uma das funções critério, bem como para cada característica física ou mecânica na análise multicritérios é preciso analisar inicialmente quando se trata de um atributo direto (quanto maior o valor encontrado, melhor o indicador) ou de um atributo indireto (quanto menor o valor encontrado, melhor o indicador). Esse passo é muito importante, pois na análise multicritérios todos os dados são comparados da mesma forma. Sendo assim, para atributos diretos os valores utilizados na análise são fruto da normalização dos dados e, para atributos indiretos, os valores devem primeiro ser

harmonizados para então serem normalizados e, desta forma, todos possam ser comparados de acordo com os critérios e pesos atribuídos a eles, de forma correta.

Com os resultados normalizados são aplicados os pesos para cada categoria, obtendo-se o resultado final da análise multicritérios, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Imagem da planilha eletrônica com o tratamento dos resultados e aplicação dos pesos para a realização da análise multicritérios.

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet titled "RESULTADOS DE ENSAIOS". The spreadsheet is organized into several sections, each with a header row. The first section, "RESULTADOS DE ENSAIOS", has columns for "Módulo", "Esp. 1", "Esp. 2", "Esp. 3", "Esp. 4", "Esp. 5", "Esp. 6", "Esp. 7", "Esp. 8", "Esp. 9", "Esp. 10", "Esp. 11", "Esp. 12", "Esp. 13", "Esp. 14", "Esp. 15", "Esp. 16", "Esp. 17", "Esp. 18", "Esp. 19", "Esp. 20", "Esp. 21", "Esp. 22", "Esp. 23", "Esp. 24", "Esp. 25", "Esp. 26", "Esp. 27", "Esp. 28", "Esp. 29", "Esp. 30", "Esp. 31", "Esp. 32", "Esp. 33", "Esp. 34", "Esp. 35", "Esp. 36", "Esp. 37", "Esp. 38", "Esp. 39", "Esp. 40". The second section, "RESULTADOS DE ENSAIOS (NORMALIZAÇÃO E NORMALIZAÇÃO)", has columns for "Módulo", "Esp. 1", "Esp. 2", "Esp. 3", "Esp. 4", "Esp. 5", "Esp. 6", "Esp. 7", "Esp. 8", "Esp. 9", "Esp. 10", "Esp. 11", "Esp. 12", "Esp. 13", "Esp. 14", "Esp. 15", "Esp. 16", "Esp. 17", "Esp. 18", "Esp. 19", "Esp. 20", "Esp. 21", "Esp. 22", "Esp. 23", "Esp. 24", "Esp. 25", "Esp. 26", "Esp. 27", "Esp. 28", "Esp. 29", "Esp. 30", "Esp. 31", "Esp. 32", "Esp. 33", "Esp. 34", "Esp. 35", "Esp. 36", "Esp. 37", "Esp. 38", "Esp. 39", "Esp. 40". The third section, "RESULTADOS DE ENSAIOS (NORMALIZAÇÃO E NORMALIZAÇÃO)", has columns for "Módulo", "Esp. 1", "Esp. 2", "Esp. 3", "Esp. 4", "Esp. 5", "Esp. 6", "Esp. 7", "Esp. 8", "Esp. 9", "Esp. 10", "Esp. 11", "Esp. 12", "Esp. 13", "Esp. 14", "Esp. 15", "Esp. 16", "Esp. 17", "Esp. 18", "Esp. 19", "Esp. 20", "Esp. 21", "Esp. 22", "Esp. 23", "Esp. 24", "Esp. 25", "Esp. 26", "Esp. 27", "Esp. 28", "Esp. 29", "Esp. 30", "Esp. 31", "Esp. 32", "Esp. 33", "Esp. 34", "Esp. 35", "Esp. 36", "Esp. 37", "Esp. 38", "Esp. 39", "Esp. 40". The fourth section, "RESULTADOS DAS ARGAMASSAS E CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS (COM ANÁLISES INDICADAS)", has columns for "Módulo", "Esp. 1", "Esp. 2", "Esp. 3", "Esp. 4", "Esp. 5", "Esp. 6", "Esp. 7", "Esp. 8", "Esp. 9", "Esp. 10", "Esp. 11", "Esp. 12", "Esp. 13", "Esp. 14", "Esp. 15", "Esp. 16", "Esp. 17", "Esp. 18", "Esp. 19", "Esp. 20", "Esp. 21", "Esp. 22", "Esp. 23", "Esp. 24", "Esp. 25", "Esp. 26", "Esp. 27", "Esp. 28", "Esp. 29", "Esp. 30", "Esp. 31", "Esp. 32", "Esp. 33", "Esp. 34", "Esp. 35", "Esp. 36", "Esp. 37", "Esp. 38", "Esp. 39", "Esp. 40". The spreadsheet is displayed in a window titled "atp - Excel" with a ribbon menu at the top. The status bar at the bottom shows "Página 1 de 1" and "12:34 06/05/2017".

Fonte: da autora, 2017.

4.10.3 Proposição de alternativas

A proposição das alternativas inicia com a atribuição de pesos para as categorias que se deseja analisar. Neste trabalho das categorias analisadas foram: esgotamento dos recursos naturais, distância de transporte e desempenho das argamassas. Esta última é muito abrangente e depende do resultado de diversas características físicas e mecânicas da argamassa. Sendo assim, realizou-se primeiro a análise multicritérios dessas características para obter a nota de desempenho para cada argamassa produzida.

A partir dessa análise inicial, criou-se um ranking das argamassas analisadas a partir do desempenho obtido com o teor de substituição do agregado e do agregado reciclado utilizado. Essa análise gerou os vetores normalizados utilizados em uma

análise geral no que tange às funções critérios estabelecidas: esgotamento dos recursos naturais, distância de transporte e desempenho da argamassa.

Para a análise do desempenho de argamassas, foram analisadas as características relacionadas em ABNT NBR 13281:2005 (ABNT, 2005f). Como descrito por Mattana *et al.* (2012) algumas características têm maior importância, mas como uma propriedade pode influenciar de forma direta ou indireta, todas são relevantes para a análise do desempenho das argamassas. Desta forma, analisando a interferência de uma em relação à outra, foram atribuídos pesos às características analisadas de acordo com o seu grau de importância em relação à outra.

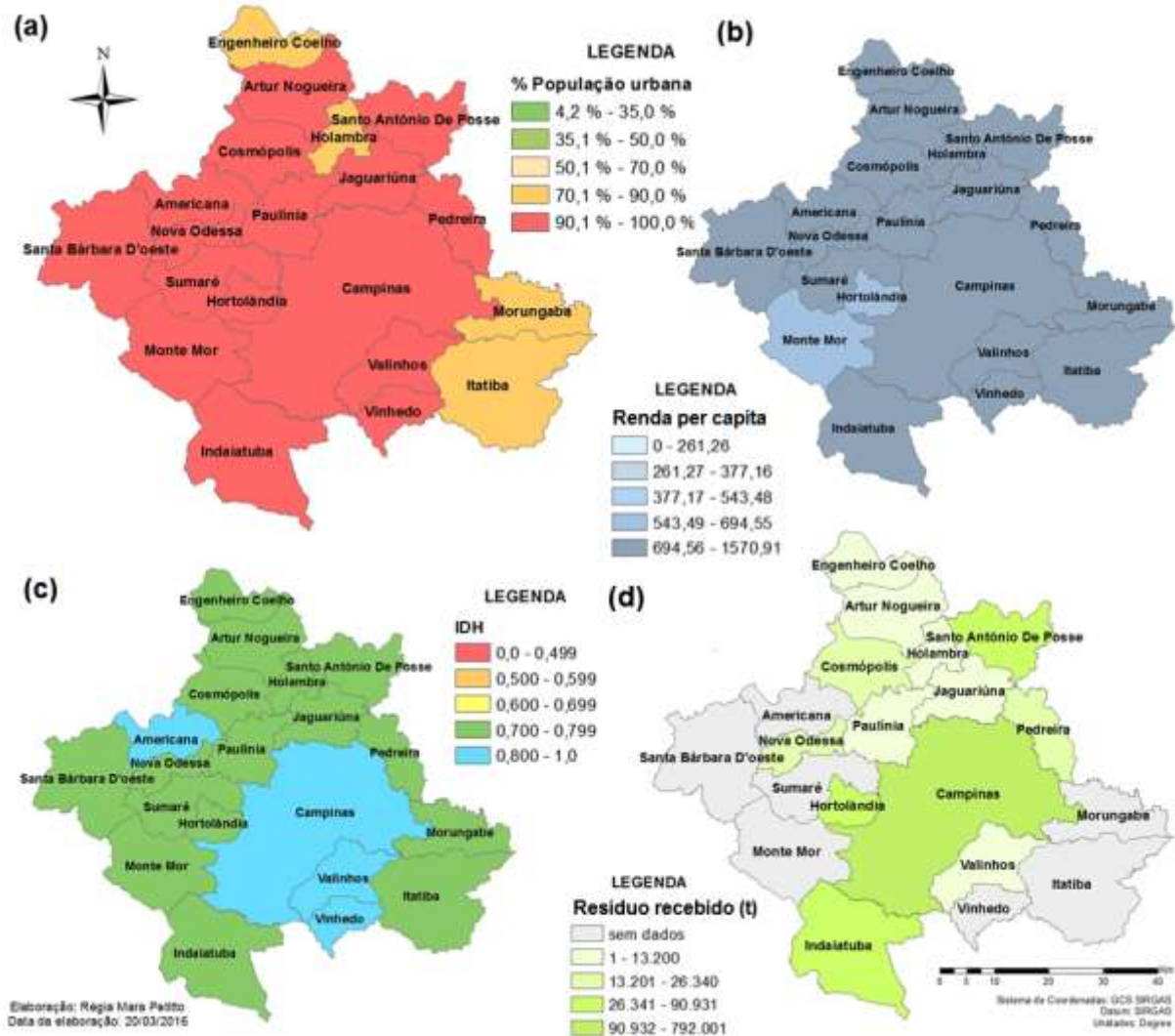
5 RESULTADOS

5.1 A situação da Região Metropolitana de Campinas com relação aos RCC

Os dados disponibilizados em 2015 pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, com informações coletadas até 2013, e os dados divulgados no site do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, (s.d.), permitem entender o panorama atual da Região Metropolitana de Campinas quanto ao atendimento das exigências impostas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos para o tratamento dos resíduos de construção civil.

A Região Metropolitana de Campinas (RMC) é constituída por vinte municípios: Americana, Arthur Nogueira, Campinas, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Holambra, Hortolândia, Indaiatuba, Itatiba, Jaguariúna, Monte Mor, Morungaba, Nova Odessa, Paulínia, Pedreira, Santa Bárbara D'Oeste, Santo Antônio de Posse, Sumaré, Valinhos e Vinhedo, ocupando uma faixa territorial de mais de três mil e oitocentos quilômetros quadrados e com uma população total de aproximadamente dois milhões e oitocentos mil habitantes, dos quais 97% estão em áreas urbanas. Com Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) igual a 0,792, a RMC ocupa a segunda posição entre as regiões metropolitanas brasileiras e caracteriza-se como uma região com alto padrão de vida, acesso ao conhecimento, cuja população tem vida longa e saudável, conforme mostra a Figura 12, apresentada a seguir.

Figura 12 – Mapas temáticos com a situação da Região metropolitana de Campinas quanto a: (a) urbanização; (b) renda per capita; (c) IDH e (d) coleta de RCD.



A Tabela 12, apresentada a seguir, traz informações sobre os municípios da RMC: área em quilômetros quadrados, população urbana em percentual e renda per capita em Reais dos municípios da RMC.

Tabela 12 – Dados dos municípios pertencentes à região metropolitana de Campinas.

| Cidade | Área (Km ²) | População urbana (%) | IDH ^a | Renda per capita (R\$) |
|------------------------|-------------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| Americana | 133,6 | 99,5 | 0,811 | 1.161,68 |
| Arthur Nogueira | 179,23 | 90,5 | 0,749 | 823,24 |
| Campinas | 797,91 | 98,3 | 0,805 | 1.390,83 |
| Cosmópolis | 154,8 | 92,9 | 0,769 | 829,25 |
| Engenheiro Coelho | 109,33 | 73,1 | 0,732 | 707,37 |
| Holambra | 64,93 | 72,4 | 0,793 | 1.274,53 |
| Hortolândia | 63,5 | 100,0 | 0,756 | 686,96 |
| Indaiatuba | 310,83 | 99,0 | 0,788 | 1.098,31 |
| Itatiba | 324,39 | 84,4 | 0,778 | 1.080,74 |
| Jaguariúna | 143,16 | 97,1 | 0,784 | 1.038,61 |
| Monte Mor | 241,91 | 93,9 | 0,733 | 674,23 |
| Morungaba | 146,55 | 85,4 | 0,715 | 733,72 |
| Nova Odessa | 73,22 | 98,4 | 0,791 | 878,14 |
| Paulínia | 140,95 | 99,9 | 0,795 | 1.160,79 |
| Pedreira | 108,62 | 99,2 | 0,769 | 853,76 |
| Santa Bárbara d'Oeste | 272,06 | 99,2 | 0,781 | 863,02 |
| Santo Antônio de Posse | 154,36 | 91,2 | 0,702 | 695,67 |
| Sumaré | 154,77 | 98,8 | 0,762 | 820,03 |
| Valinhos | 147,63 | 95,2 | 0,819 | 1.570,91 |
| Vinhedo | 81,78 | 96,9 | 0,817 | 1.493,32 |

^a Índice de Desenvolvimento Humano.

Fonte: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, [s.d.].

Os dados obtidos no levantamento sobre a existência de usinas recicladoras de resíduos da construção civil, a participação do município em consórcio intermunicipal para gestão integrada dos resíduos de construção civil gerados no município e a existência de unidades recicladoras privadas foram agrupados na Tabela 13.

Tabela 13 – Dados da gestão dos resíduos sólidos da construção civil dos municípios pertencentes à região metropolitana de Campinas. (continua)

| Cidade | Possui URM | Quantidade recebida em 2013 (toneladas) | Consórcio | Identificação do consórcio | Possui Unidade Recicladora Privada | Amostragem |
|------------------------|------------------|---|---------------|----------------------------|------------------------------------|------------------|
| Campinas | Sim | 792.001 | Não | - | Sim | Sim |
| Indaiatuba | Não informado | Não informada | Não informado | - | Não informado | Não |
| Itatiba | Não informado | Não informada | Não informado | - | Não informado | Não |
| Paulínia | Não informado | Não informada | Não informado | - | Sim | Não ⁹ |
| Pedreira | Não | 1.000 | Não | - | Sim | Sim |
| Valinhos | Não ^f | Não informada | Não | - | Não ^f | Não |
| Vinhedo | Não informado | Não informada | Não | - | Não informado | Não |
| Morungaba | Sim ^d | Não informada | Sim | CISBRA | Não | Não |
| Santo Antônio de Posse | Sim ^d | Não informada | Sim | CISBRA | Não informado | Não |
| Arthur Nogueira | Sim ^d | 4.170 ^e | Sim | CONSAB | Não | Não |
| Cosmópolis | Sim ^d | 5.820 ^e | Sim | CONSAB | Não | Não |
| Engenheiro Coelho | Sim ^d | 920 ^e | Sim | CONSAB | Não | Não |

^a Fonte: (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, [s.d.])

^b Fonte: Dados obtidos a partir de contatos e visitas técnicas.

^c Hortolândia possui Unidade Recicladora fruto de parceria Público-Privada.

^d Britador itinerante.

^e Dados de 2015, disponibilizados pelo relatório de atividades do consórcio CONSAB.

^f Segundo Valinhos, (s.d.), já existe projeto aprovado para implantação de uma usina fruto de parceria Público-Privada.

⁹ Amostragem não realizada pois a empresa Estre possui o britador, mas não está em operação por motivos estratégicos/operacionais da empresa.

Fonte: Dados obtidos pela autora a partir de contatos e visitas técnicas, 2015.

Tabela 13 – Dados da gestão dos resíduos sólidos da construção civil dos municípios pertencentes à região metropolitana de Campinas. (conclusão)

| Cidade | Possui URM | Quantidade recebida em 2013 (toneladas) | Consórcio | Identificação do consórcio | Possui Unidade Recicladora Privada | Amostragem |
|-----------------------|------------------|---|------------------|----------------------------|------------------------------------|------------|
| Holambra | Sim ^d | 5.010 ^e | Sim | CONSAB | Não | Não |
| Jaguariúna | Sim ^d | 2.250 ^e | Sim | CONSAB | Não | Não |
| Americana | Não | Não informada | Sim | CONSIMARES | Sim | Sim |
| Hortolândia | Sim ^c | 71.371 | Sim ^c | CONSIMARES | Não | Sim |
| Monte Mor | Não | Não informada | Sim | CONSIMARES | Não | Não |
| Nova Odessa | Não | Não informada | Sim | CONSIMARES | Não | Não |
| Santa Bárbara d'Oeste | Não | 20.000 ^e | Sim | CONSIMARES | Não informado | Não |
| Sumaré | Não | Não informada | Sim | CONSIMARES | Não informado | Não |

^a Fonte: (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, [s.d.])

^b Fonte: Dados obtidos a partir de contatos e visitas técnicas.

^c Hortolândia possui Unidade Recicladora fruto de parceria Público-Privada.

^d Britador itinerante.

^e Dados de 2015, disponibilizados pelo relatório de atividades do consórcio CONSAB.

^f Segundo Valinhos, (s.d.), já existe projeto aprovado para implantação de uma usina fruto de parceria Público-Privada.

^g Amostragem não realizada pois a empresa Estre possui o britador, mas não está em operação por motivos estratégicos/operacionais da empresa.

Fonte: Dados obtidos pela autora a partir de contatos e visitas técnicas, 2015.

Como mostra a Tabela 13 dos vinte municípios integrantes da RMC, apenas Campinas e Hortolândia possuem Unidade Recicladora Municipal (URM) de resíduos de construção civil. Campinas opera a URM desde 2003 e Hortolândia, cuja URM é resultado de uma parceria público privada, desde 2012.

Na RMC, além das unidades municipais existem unidades privadas localizadas nos municípios de Americana, Campinas, Paulínia e Pedreira.

Como o investimento para implantação de uma URM é alto, e a legislação permite a gestão integrada de forma intermunicipal, alguns municípios já se organizaram em consórcios que possuem um único britador. O britador trabalha de forma itinerante, permanecendo temporariamente em cada município, com o objetivo de beneficiar o entulho gerado. Neste caso, os municípios possuem um local de transbordo onde acumulam o material até que o equipamento seja alocado para ele. Os municípios de Arthur Nogueira, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Holambra, e Jaguariúna são os municípios da RMC que integram o Consórcio Intermunicipal na Área de Saneamento Básico (CONSAB), e que já possuem o britador itinerante em operação.

Outros municípios, seguindo este modelo, também se organizaram em outros consórcios para atender às exigências legais e, de fato, conseguem fazer a gestão dos resíduos de construção civil. Da RMC, os municípios de Americana, Hortolândia, Monte Mor, Nova Odessa, Santa Bárbara D'Oeste e Sumaré utilizam a estrutura existente em Hortolândia, fruto de uma parceria público-privada, por meio do Consórcio Intermunicipal de Manejo dos Resíduos Sólidos (CONSIMARES). Já os municípios de Morungaba e Santo Antônio de Posse integram o Consórcio Intermunicipal de Saneamento Básico da Região do Circuito das Águas (CISBRA).

5.2 As usinas recicladoras da Região Metropolitana de Campinas

Todos os municípios da RMC já possuem o plano de gestão integrada dos resíduos sólidos, sendo que, em algumas existe Unidade Recicladora Municipal, privada ou em parceria Público-Privada, além da existência de uma unidade itinerante que atende aos municípios participantes do Consórcio Intermunicipal de Saneamento Ambiental (CONSAB) (Figura 13).

Figura 13 – Mapa temático da existência de consórcio municipal e localização das UREs da região metropolitana de Campinas em 2013.



Fonte: da autora, 2017.

Dos vinte municípios pertencentes à RMC, alguns já possuem a estrutura de uma unidade recicladora de resíduos da construção civil em operação e foram realizadas visitas às usinas existentes.

5.2.1 Usina recicladora privada no município de Americana/SP

Trata-se de uma usina privada que recebe os resíduos de construção civil de geradores particulares transportados por empresas da região, operando com um britador de martelos.

Como pode ser visto na Figura 14, existe um processo de triagem visual, com posterior separação de unidades que sejam identificadas como resíduo de concreto. Desta forma, a usina produz tanto material misto quanto de concreto em momentos distintos. Os resíduos são, então, beneficiados e utilizados em obras de pavimentação do proprietário da usina.

Figura 14 – Fotografias da usina recicladora privada de Americana – SP: (a) vista do abastecimento do britador e correia transportadora do material processado para o classificador; (b) da pilha de entulho e (c) geral do classificador.



Fonte: da autora, 2017.

5.2.2 Usina recicladora municipal do município de Campinas – SP

Usina municipal que recebe resíduos gerados no município de Campinas. Existe balança rodoviária na entrada dos caminhões para que seja feita não somente a determinação da massa recebida, mas também a estimativa da composição do material recebido (misto ou concreto). A triagem é feita por uma cooperativa que faz, basicamente, a separação dos materiais plásticos e de madeiras que possam ser identificados de forma visual nas caçambas recebidas. Na Figura 15, da próxima página, é possível verificar o britador de mandíbula funcionando e o processo de classificação e separação dos diversos tamanhos de material produzido. Esta usina tem estrutura para efetuar a classificação e armazenagem de agregados reciclados mistos separadamente dos agregados reciclados de concreto, mas opera produzindo apenas agregado misto.

Figura 15 – Fotografias da usina recicladora municipal de Campinas – SP: (a) vista do abastecimento do britador; (b) geral do classificador e (c) geral do armazenamento e carregamento de agregado reciclado.



Fonte: da autora, 2017.

5.2.3 Usina recicladora privada no município de Campinas – SP

Usina privada implantada por uma empresa de transporte de caçambas de Campinas – SP e que possui aterro próprio. Instalada no bairro Barão Geraldo, recebe entulhos gerados não apenas no município de Campinas, mas em alguns outros municípios, com área de atuação na região metropolitana de Campinas. A separação do entulho proveniente de material cimentício é feita de forma visual. A empresa também tem um trabalho de conscientização da separação dos tipos de RCC em alguns clientes e obras de porte grande. A triagem é feita por funcionários próprios que fazem, basicamente, a separação dos materiais plásticos e de madeiras que possam ser identificados de forma visual nas caçambas recebidas. A madeira é triturada para a produção de aparas comercializadas para uso como combustível. Na próxima página, na Figura 16a é possível verificar a área de transbordo, na Figura 16b, o britador de mandíbula e, na Figura 16c o uso de um britador hidráulico operando como britador primário, reduzindo o tamanho dos blocos de entulho de concreto para abastecimento do britador principal, de mandíbulas. Na Figura 16d é possível visualizar o processo de classificação e separação dos diversos tamanhos de material produzido. Esta usina tem estrutura para efetuar a classificação e armazenagem de agregados reciclados mistos separadamente dos agregados reciclados de concreto.

Figura 16 – Fotografias da usina recicladora privada de Campinas – SP: (a) vista geral da área de transbordo; (b) do britador principal (britador de mandíbulas); (c) do britador secundário (britador hidráulico) e (d) do classificador e esteiras transportadoras.



Fonte: da autora, 2017.

5.2.4 Usina recicladora público-privada no município de Hortolândia – SP

Trata-se de uma usina fruto de uma parceria público-privada, que recebe os resíduos de construção civil de geradores particulares transportados por empresas da região e dos agentes municipais do consórcio Consimares (Americana, Hortolândia, Monte Mor, Nova Odessa, Santa Bárbara D'Oeste e Sumaré).

A usina possui processo de triagem visual realizado por cooperativa de catadores de resíduos plásticos, papéis, metais e madeiras. Antes de serem encaminhadas à área de transbordo, o conteúdo das caçambas é verificado para identificação da condição do entulho quanto à sua composição geral: argamassa e concreto ou misto. Desta forma a unidade consegue beneficiar as diferentes

composições, gerando material reciclado misto e de concreto, em momentos distintos, operando com britador de martelo (Figura 17).

Figura 17 – Fotografias da usina recicladora de parceria público-privada de Hortolândia – SP: (a) vista do britador; (b) da correia transportadora após classificação e (c) do classificador.



Fonte: da autora, 2017.

5.2.5 Usina recicladora privada no município de Paulínia – SP

Trata-se de uma usina privada já implantada que ainda não recebe resíduos de construção civil, por decisão interna da empresa.

Como pode ser visto na Figura 18, na próxima página, existem um britador de mandíbulas e um classificador instalados, mas não estão em operação. A usina possui apenas uma pequena quantidade de entulho recebido para teste do equipamento.

Figura 18 – Fotografias da usina recicladora privada de Paulínia – SP: (a) vista da correia transportadora após classificação; (b) do britador e (c) do material estocado para processamento.



Fonte: da autora, 2017.

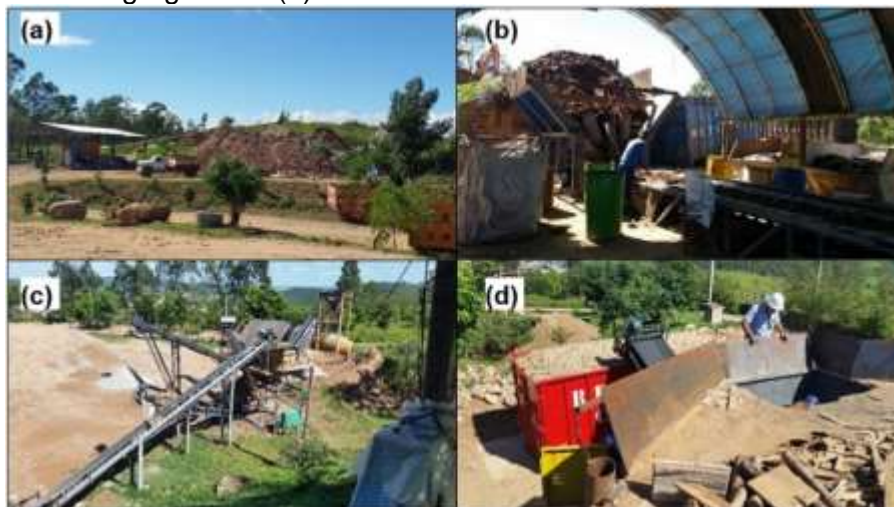
5.2.6 Usina recicladora privada no município de Pedreira – SP

Trata-se de uma usina privada que recebe resíduos de construção civil da cidade de Pedreira, sejam eles de geradores particulares, transportados e recebidos pelas empresas de transporte de entulho, quanto pela própria Prefeitura.

Como pode ser visto na Figura 19 da próxima página, existe a triagem prévia do material, realizada por funcionários que retiram do entulho os materiais a base de plásticos, madeiras, metais e vidro. Essa triagem é feita em uma esteira transportadora, durante e antes do abastecimento do britador. Por outro lado, quando o entulho é recebido, as caçambas são verificadas quanto à sua composição e aquelas que contém apenas resíduos de concreto e argamassa são separadas em outra área de transbordo.

A usina produz agregados reciclados misto e de concreto, que são utilizados pela Prefeitura Municipal em serviços de pavimentação, operando com britador de mandíbula.

Figura 19 – Fotografias da usina recicladora privada de Pedreira – SP: (a) vista do material recebido para processamento; (b) do processo de triagem; (c) do classificador e esteiras transportadoras de agregados e (d) do triturador de madeira.



Fonte: da autora, 2017.

5.3 Seleção e amostragem dos agregados reciclados

Foram realizadas visitas, pela autora, a todas as usinas recicladoras instaladas na RMC. Durante as visitas foram coletadas amostras do agregado miúdo reciclado de todas as usinas, exceto da usina recicladora de Paulínia que ainda não está em operação, já que as usinas além de produzirem, disponibilizam os agregados reciclados produzidos para o uso em trabalhos de pavimentação, produção de argamassas e concretos sem fins estruturais.

Nas Figuras 20 a 22 é possível observar a condição das amostras coletadas dos agregado miúdo reciclado misto e miúdo reciclado de concreto, bem como do agregado natural de rio.

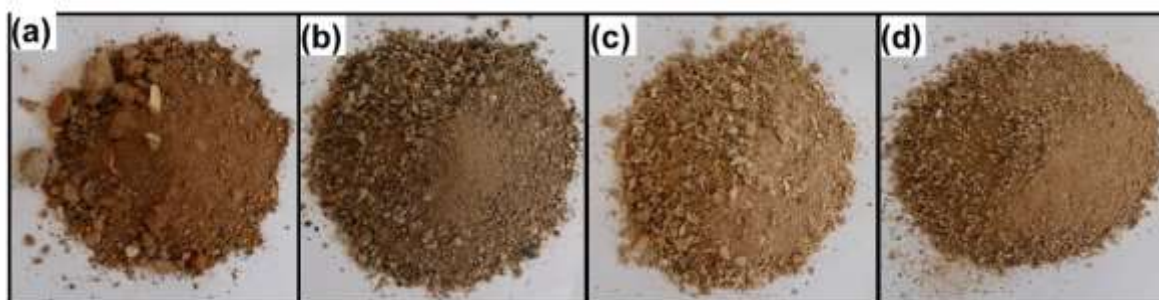
Na Tabela 14, segue a relação da nomenclatura empregada para identificação das amostras.

Tabela 14 - Siglas empregadas para a identificação das amostras.

| Município da unidade recicladora | Sigla | |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | Agregado reciclado misto | Agregado reciclado de concreto |
| Americana (ARC) | AMC-M | AMC-C |
| Campinas – municipal (ARM) | CPS-M-M | CPS-M-C |
| Campinas – privada (ARC) | CPS-P-M | CPS-P-C |
| Hortolândia (ARC) | - | HTL-C |
| Pedreira (ARC) | P-M | P-C |

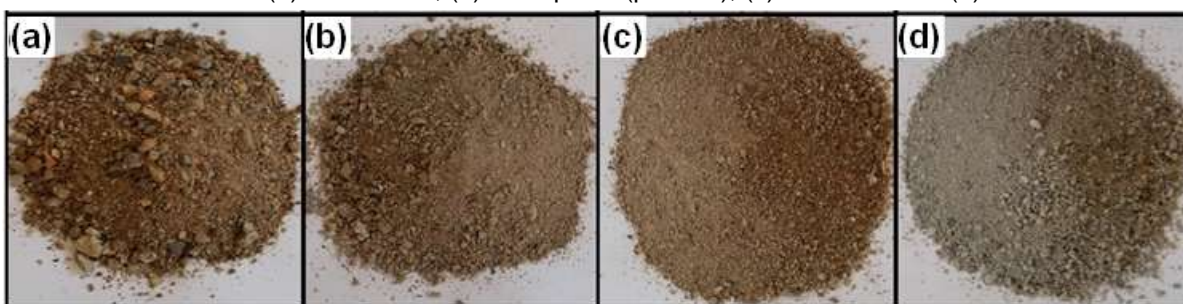
Fonte: da autora, 2017.

Figura 20 – Fotografias das amostras de agregado miúdo reciclado misto coletadas nas usinas recicladoras de: (a) Americana; (b) Campinas (municipal); (c) Campinas (privada) e (d) Pedreira.



Fonte: da autora, 2017.

Figura 21 – Fotografias das amostras de agregado miúdo reciclado de concreto coletadas nas usinas recicladoras de: (a) Americana; (b) Campinas (privada); (c) Hortolândia e (d) Pedreira.



Fonte: da autora, 2017.

Figura 22 – Fotografia da amostra de agregado miúdo natural de rio.



Fonte: da autora, 2017.

A partir de uma análise visual das amostras, percebe-se melhor qualidade em algumas amostras de agregado reciclado. As amostras de Pedreira têm qualidade superior, seguida pelas de Campinas, Hortolândia e Americana, isto porque apresentam maior regularidade nas dimensões dos grãos e aspecto da amostra.

5.4 Determinação das características físicas dos agregados reciclados amostrados

5.4.1 Composição granulométrica

Com os materiais coletados nas usinas visitadas, foram realizados ensaios para determinação da sua distribuição granulométrica, segundo ABNT NBR NM248:2001 (ABNT, 2001a) e a classificação a partir da análise da curva granulométrica e dos parâmetros postos na ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a), cujos resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados obtidos na classificação granulométrica das amostras dos agregados miúdos da RMC. (continua)

| Município da extração | | Aguai – SP | | | | |
|--|-------------|---|-------------------|------------|-----|------------|
| Material | | Agregado miúdo natural de rio | | | | |
| | | Porcentagens retidas, em massa | | | | |
| Abertura das peneiras (mm) | Individuais | | | Acumuladas | | |
| | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 6,3 | 0 | 0,2 | 0,1 ± 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| 4,8 | 0 | 0,2 | 0,1 ± 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| 2,4 | 1,6 | 2,3 | 2,0 ± 0,4 | 2 | 3 | 2 |
| 1,2 | 10,0 | 12,0 | 11,0 ± 1,0 | 12 | 15 | 13 |
| 0,6 | 37,2 | 40,9 | 39 ± 1,9 | 49 | 56 | 52 |
| 0,3 | 34,2 | 32,9 | 33,6 ± 0,7 | 83 | 88 | 86 |
| 0,15 | 14,5 | 9,9 | 12,2 ± 2,3 | 97 | 98 | 98 |
| Fundo | 2,6 | 1,7 | 2,2 ± 0,5 | 100 | 100 | 100 |
| Dimensão | | 2,4 mm | | | | |
| máxima característica ($\varnothing_{\text{máx.}}$) mm | | 2,51 | | | | |
| Módulo de finura | | 2,51 | | | | |
| Classificação (ABNT NBR 7211:2009) | | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 18% e com somatória dos desvios de 43%. | | | | |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 15 – Resultados obtidos na classificação granulométrica das amostras dos agregados miúdos da RMC. (continuação)

| Município da unidade recicladora | Americana – SP | | | | | | Americana – SP | | | | | |
|--|---|------|-------------------|------------|-----|------------|--------------------------------|------|-------------------|------------|-----|------------|
| Material | Agregado miúdo de concreto | | | | | | Agregado miúdo misto | | | | | |
| Abertura das peneiras (mm) | Porcentagens retidas, em massa | | | | | | Porcentagens retidas, em massa | | | | | |
| | Individuais | | | Acumuladas | | | Individuais | | | Acumuladas | | |
| | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 12,5 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 | 8,7 | 10,7 | 9,7 ± 1 | 9 | 11 | 10 |
| 9,5 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 | 7,6 | 7,8 | 7,7 ± 0,1 | 16 | 18 | 17 |
| 6,3 | 3,5 | 3,6 | 3,6 ± 0,1 | 4 | 4 | 4 | 3,2 | 9,8 | 6,5 ± 3,3 | 19 | 28 | 24 |
| 4,8 | 5,8 | 4,6 | 5,2 ± 0,6 | 9 | 8 | 9 | 6,5 | 6,3 | 6,4 ± 0,1 | 26 | 35 | 30 |
| 2,4 | 14 | 12,9 | 13,5 ± 0,6 | 23 | 21 | 22 | 18,6 | 11,6 | 15,1 ± 3,5 | 45 | 46 | 45 |
| 1,2 | 11,9 | 13,4 | 12,7 ± 0,8 | 35 | 34 | 35 | 9,3 | 9,2 | 9,3 ± 0,1 | 54 | 55 | 55 |
| 0,6 | 15,7 | 16,9 | 16,3 ± 0,6 | 51 | 51 | 51 | 10,4 | 10,1 | 10,3 ± 0,2 | 64 | 65 | 65 |
| 0,3 | 23,5 | 21,2 | 22,4 ± 1,2 | 74 | 73 | 74 | 11,7 | 11,3 | 11,5 ± 0,2 | 76 | 77 | 76 |
| 0,15 | 17,7 | 19,2 | 18,5 ± 0,8 | 92 | 92 | 92 | 14,9 | 14,4 | 14,7 ± 0,3 | 91 | 91 | 91 |
| Fundo | 7,8 | 8,3 | 8,1 ± 0,3 | 100 | 100 | 100 | 9,1 | 8,8 | 9 ± 0,2 | 100 | 100 | 100 |
| Dimensão máxima característica ($\varnothing_{m\acute{a}x.}$) mm | 6,3 mm | | | | | | 19 mm | | | | | |
| Módulo de finura | 2,83 | | | | | | 3,79 | | | | | |
| Classificação (ABNT NBR 7211:2009) | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 11% e com somatória dos desvios de 18%. | | | | | | Agregado graúdo | | | | | |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 15 – Resultados obtidos na classificação granulométrica das amostras dos agregados miúdos da RMC. (continuação)

| Município da unidade recicladora | Campinas – SP (privada) | | | | | | Campinas – SP (privada) | | | | | |
|--|---|------|-------------------|------------|-----|------------|--------------------------------|------|-------------------|------------|-----|------------|
| Material | Agregado miúdo reciclado de concreto | | | | | | Agregado miúdo reciclado misto | | | | | |
| Abertura das peneiras (mm) | Porcentagens retidas, em massa | | | | | | Porcentagens retidas, em massa | | | | | |
| | Individuais | | | Acumuladas | | | Individuais | | | Acumuladas | | |
| | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 6,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 ± 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4,8 | 0,6 | 0,4 | 0,5 ± 0,1 | 1 | 1 | 1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 ± 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| 2,4 | 14,7 | 11,1 | 12,9 ± 1,8 | 16 | 12 | 14 | 21,6 | 22,0 | 21,8 ± 0,2 | 22 | 22 | 22 |
| 1,2 | 15,1 | 15,9 | 15,5 ± 0,4 | 31 | 28 | 29 | 28,0 | 25,1 | 26,6 ± 1,5 | 50 | 47 | 49 |
| 0,6 | 17,6 | 18,4 | 18 ± 0,4 | 48 | 46 | 47 | 17,4 | 17,2 | 17,3 ± 0,1 | 67 | 65 | 66 |
| 0,3 | 20,8 | 19,7 | 20,3 ± 0,6 | 69 | 66 | 67 | 10,9 | 12,9 | 11,9 ± 1,0 | 78 | 78 | 78 |
| 0,15 | 19,3 | 21,3 | 20,4 ± 1,1 | 88 | 87 | 88 | 11,6 | 11,7 | 11,7 ± 0,1 | 90 | 89 | 89 |
| Fundo | 11,7 | 12,9 | 12,3 ± 0,6 | 100 | 100 | 100 | 10,3 | 10,7 | 10,5 ± 0,2 | 100 | 100 | 100 |
| Dimensão máxima característica ($\varnothing_{máx.}$) mm | 4,8 mm | | | | | | 4,8 mm | | | | | |
| Módulo de finura | 2,46 | | | | | | 3,05 | | | | | |
| Classificação (ABNT NBR 7211:2009) | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 2% e com somatória dos desvios de 2%. | | | | | | Zona Utilizável Superior | | | | | |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 15 – Resultados obtidos na classificação granulométrica das amostras dos agregados miúdos da RMC. (continuação)

| Município da unidade recicladora | Campinas – SP (municipal) | | | | | | Hortolândia – SP | | | | | |
|--|---|------|-------------------|------------|-----|------------|---|------|-------------------|------------|-----|------------|
| Material | Agregado miúdo reciclado misto | | | | | | Agregado miúdo reciclado de concreto | | | | | |
| Abertura das peneiras (mm) | Porcentagens retidas, em massa | | | | | | Porcentagens retidas, em massa | | | | | |
| | Individuais | | | Acumuladas | | | Individuais | | | Acumuladas | | |
| | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4,8 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2,4 | 13,3 | 11,4 | 12,4 ± 1,0 | 13 | 11 | 12 | 7,7 | 8,2 | 8 ± 0,3 | 8 | 8 | 8 |
| 1,2 | 17,7 | 19,1 | 18,4 ± 0,7 | 31 | 30 | 31 | 12,5 | 15,3 | 13,9 ± 1,4 | 20 | 24 | 22 |
| 0,6 | 22,9 | 24,2 | 23,5 ± 0,7 | 54 | 55 | 54 | 19,4 | 22,0 | 20,7 ± 1,3 | 40 | 46 | 43 |
| 0,3 | 24,8 | 22,8 | 23,8 ± 1,0 | 79 | 77 | 78 | 27,8 | 24,3 | 26,1 ± 1,8 | 67 | 70 | 69 |
| 0,15 | 14,9 | 15,9 | 15,4 ± 0,5 | 94 | 93 | 93 | 22,4 | 21,6 | 22 ± 0,4 | 90 | 91 | 91 |
| Fundo | 6,5 | 6,7 | 6,6 ± 0,1 | 100 | 100 | 100 | 10,2 | 8,6 | 9,4 ± 0,8 | 100 | 100 | 100 |
| Dimensão máxima característica ($\varnothing_{m\acute{a}x.}$) mm | 4,8 mm | | | | | | 4,8 mm | | | | | |
| Módulo de finura | 2,68 | | | | | | 2,33 | | | | | |
| Classificação (ABNT NBR 7211:2009) | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 1% e com somatória dos desvios de 1%. | | | | | | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 2% e com somatória dos desvios de 2%. | | | | | |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 15 – Resultados obtidos na classificação granulométrica das amostras dos agregados miúdos da RMC. (conclusão)

| Município da unidade recicladora | Pedreira – SP | | | | | | Pedreira – SP | | | | | |
|---|---|------|-------------------|------------|-----|------------|---|------|-------------------|------------|-----|------------|
| Material | Agregado miúdo reciclado de concreto | | | | | | Agregado miúdo reciclado misto | | | | | |
| Abertura das peneiras (mm) | Porcentagens retidas, em massa | | | | | | Porcentagens retidas, em massa | | | | | |
| | Individuais | | | Acumuladas | | | Individuais | | | Acumuladas | | |
| | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 6,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 ± 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4,8 | 0,7 | 0,6 | 0,7 ± 0,1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 ± 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 ± 0,0 | 4 | 4 | 4 | 3,9 | 3,9 | 3,4 ± 0,5 | 3 | 4 | 3 |
| 1,2 | 19,6 | 14,2 | 16,9 ± 2,7 | 24 | 18 | 21 | 23,7 | 23,7 | 25,5 ± 1,8 | 30 | 28 | 29 |
| 0,6 | 19,2 | 18,6 | 18,9 ± 0,3 | 43 | 37 | 40 | 27,3 | 27,3 | 27,6 ± 0,3 | 58 | 55 | 56 |
| 0,3 | 23,5 | 30,6 | 27,1 ± 3,6 | 67 | 68 | 67 | 21,2 | 21,2 | 19,9 ± 1,3 | 77 | 76 | 76 |
| 0,15 | 25,4 | 23,3 | 24,4 ± 1,1 | 92 | 91 | 92 | 14,0 | 14,0 | 14,2 ± 0,2 | 91 | 90 | 90 |
| Fundo | 7,8 | 9,1 | 8,5 ± 0,7 | 100 | 100 | 100 | 9,9 | 9,9 | 9,6 ± 0,3 | 100 | 100 | 100 |
| Dimensão máxima característica ($\varnothing_{\text{máx.}}$) mm | 2,4 mm | | | | | | 2,4 mm | | | | | |
| Módulo de finura | 2,25 | | | | | | 2,54 | | | | | |
| Classificação (ABNT NBR 7211:2009) | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 6% e com somatória dos desvios de 6%. | | | | | | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 7% e com somatória dos desvios de 8%. | | | | | |

Fonte: da autora, 2017.

Como pode ser visto nos resultados apresentados na Tabela 15, a dimensão característica do agregado miúdo natural de rio é de 2,4 mm; e dos agregados miúdos reciclados amostrados é: 2,4 mm para os agregados reciclados da unidade de Pedreira; 4,8 mm para as amostras das usinas de Campinas (municipal e privada) e Hortolândia; 6,3 mm para a amostra de agregado miúdo reciclado de concreto produzido na unidade de Americana e; 19 mm para o agregado miúdo reciclado misto de Americana.

Os agregados reciclados produzidos na unidade de Americana não podem ser classificados como miúdos, pois apresentam mais que 5% de grãos com dimensões maiores que 4,8 mm, como exposto acima.

O módulo de finura do agregado permite, de forma numérica, a comparação entre agregados quanto ao tamanho geral de seus grãos. Segundo ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) a classificação dos agregados miúdos é feita a partir do valor do módulo de finura do material, podendo ser classificado em: zona utilizável inferior, o que corresponde, comercialmente a areia fina (1,55 – 2,20); zona ótima, ou areia média (2,20 – 2,90); e zona utilizável superior ou areia grossa (2,90 – 3,50).

Os valores obtidos nas amostras, exceto nas de agregados reciclados mistos produzidos em Americana (3,79) e na unidade privada de Campinas (3,05), permitem a classificação dos agregados reciclados na zona ótima, ou seja, granulometria de areia média. As amostras das usinas analisadas, seguindo a escala de classificação proposta por ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) são agregados miúdos reciclados na zona utilizável superior. Porém, vale ressaltar que as amostras produzidas na unidade de Americana não são amostras de agregados miúdos, devido à sua dimensão máxima característica encontrada.

Considerando a realidade das usinas que é cada usina ter apenas um equipamento responsável pela separação mecânica do material produzido nas diversas faixas granulométricas, a partir de peneiras, é importante salientar que o material misto e o material de concreto são classificados em um mesmo equipamento e, portanto, a variação da curva granulométrica encontrada para resultados obtidos em uma mesma usina está relacionada à natureza heterogênea do material.

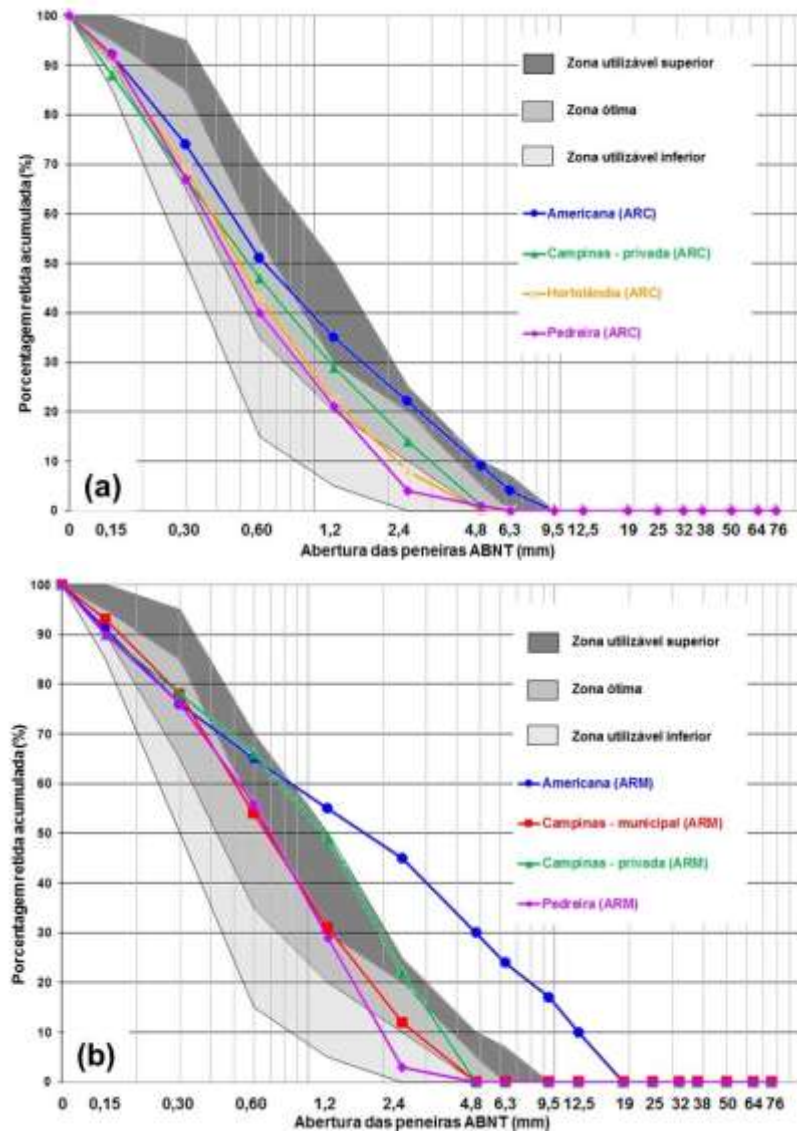
Analisando as curvas granulométricas apresentadas na Figura 23, é possível verificar que:

- na unidade de Americana, o AMR de concreto não se mantém na faixa granulométrica relativa à classificação pelo seu módulo de finura (zona ótima) devido a desvios nas peneiras de abertura de 6,3 mm a 1,2 mm e o AMR misto, além de apresentar grãos maiores que 12,5 mm, também não se mantém na faixa granulométrica relativa à classificação pelo seu módulo de finura (zona utilizável superior) devido a desvios nas peneiras de abertura de 6,3 mm a 0,6 mm;
- na unidade privada de Campinas os agregados produzidos não receberam a mesma classificação granulométrica. O AMR de concreto não apresentou nenhum desvio pontual na faixa granulométrica relativa à classificação pelo seu módulo de finura (zona ótima), mas o AMR misto apresentou desvios nas peneiras de abertura de 2,4 mm a 0,6 mm quando comparado com os limites da faixa granulométrica relativa à classificação pelo seu módulo de finura (zona utilizável superior);
- na unidade municipal de Campinas que produz apenas AMR misto houve desvio pontual na faixa granulométrica relativa à classificação pelo seu módulo de finura (zona ótima) na peneira de abertura de 1,2 mm;
- na unidade de Hortolândia que produz apenas AMR de concreto houve desvio pontual na faixa granulométrica relativa à classificação pelo seu módulo de finura (zona ótima) na peneira de abertura de 2,4 mm;
- na unidade de Pedreira os agregados produzidos receberam a mesma classificação granulométrica relativa à classificação pelo seu módulo de finura (zona ótima) mas, o AMR de concreto apresentou desvio pontual na peneira de abertura de 2,4 mm e o AMR misto apresentou desvios nas peneiras de 2,4 mm e 0,6 mm.

Os desvios apresentados na maioria das amostras, com exceção apenas ao material de concreto da unidade privada de Campinas, demonstram certa descontinuidade granulométrica.

Para melhor visualização dos resultados da composição granulométrica e demais interpretações, foram traçadas as curvas granulométricas dos materiais analisados, apresentadas na Figura 23 da próxima página.

Figura 23 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados da RMC: (a) agregados reciclados de concreto; (b) agregados reciclados mistos.



Fonte: da autora, 2017 e ABNT (2009a).

Como já mencionado, a unidade de Americana opera com produção de material que, pelo valor encontrado para o módulo de finura do material, apresenta classificação possível segundo ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a), mas pela dimensão máxima característica apresentada, não são agregados miúdos e isso se torna bastante vivível na curva do material misto (Figura 23b) que apresentou dimensão máxima característica (19 mm) muito superior à dimensão que estabelece a separação do que é agregado miúdo do graúdo (4,8 mm). Isso pode ser resultado do fato dos agregados reciclados serem armazenados próximos ao material ainda não processado.

Para a característica física analisada neste item, o melhor material é o agregado miúdo reciclado de concreto produzido pela unidade privada de Campinas, que não apresentou nenhum desvio granulométrico, podendo ser seguido dos AMR que são de fato miúdos e que apresentaram desvio em apenas uma peneira que são: o AMR misto da mesma unidade (privada de Campinas), de concreto produzido em Hortolândia e o AMR de concreto de Pedreira.

A grande variação da composição granulométrica encontrada entre as usinas e entre os materiais produzidos na mesma unidade também foi encontrada por Marinho (2016), que afirmou que tanto a natureza do material britado quanto o tipo de britador utilizado interferem na distribuição granulométrica do material produzido.

5.4.2 Teor de material passante na peneira 75 μm

Seguindo o método de ensaio proposto na ABNT NBR NM46:2001 (ABNT, 2001b) foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 16, juntamente com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) e ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), para os agregados natural e reciclados, respectivamente.

Tabela 16 – Resultados do teor de finos das amostras dos agregados miúdos da RMC.

| Município da unidade recicladora | Teor de finos (%) | Limite ABNT |
|----------------------------------|-------------------|----------------------|
| Natural | 1,00 | 5,00 ⁽¹⁾ |
| Americana (ARC) | 3,50 | |
| Campinas – privada (ARC) | 6,00 | 15,00 ⁽²⁾ |
| Hortolândia (ARC) | 4,00 | |
| Pedreira (ARC) | 4,50 | |
| Americana (ARM) | 3,00 | |
| Campinas – municipal (ARM) | 3,50 | 20,00 ⁽²⁾ |
| Campinas – privada (ARM) | 8,00 | |
| Pedreira (ARM) | 6,50 | |

Notas:

⁽¹⁾ Máximo teor permitido segundo ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) para concreto protegido do desgaste superficial.

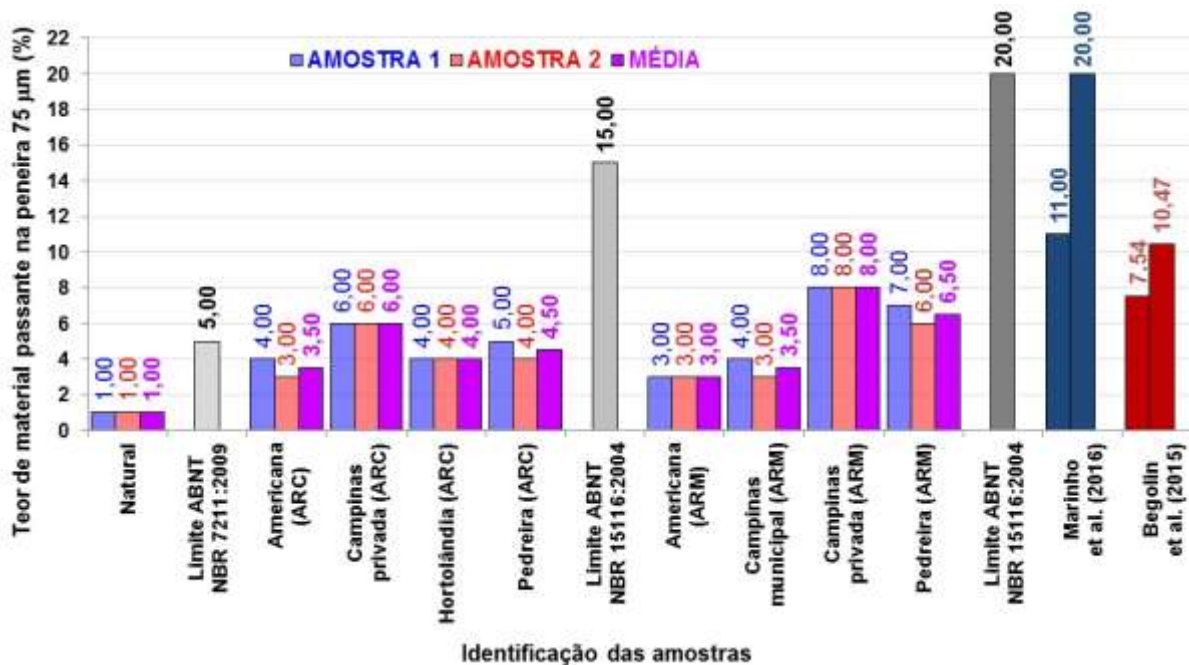
⁽²⁾ ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

Fonte: da autora, 2017.

Quanto ao teor de material fino, que passa pela peneira de abertura 75 μm , o menor resultado obtido nos agregados reciclados foi da unidade de Americana com o

agregado reciclado misto (3,0%) e maior, no agregado reciclado misto da unidade municipal de Campinas (8,0%) como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Gráfico do teor de finos dos agregados miúdos reciclados da RMC e limites estabelecidos na NBR 15116:2004.



Fonte: da autora, 2017; ABNT (2009a), ANBT (2004d); Marinho *et al.* (2016) e Bigolin *et al.* (2015).

Segundo ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), que aborda os requisitos para o emprego dos agregados reciclados na construção civil (produção de concreto sem fins estruturais), o limite máximo de material passante na peneira de 75 µm, é de 20% para agregado miúdo misto e 15% para agregado reciclado de concreto. Já a ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) limita a presença de material fino em 3% para uso na fabricação de concretos submetidos à abrasão superficial e, 5% para concretos protegidos do desgaste superficial. Os resultados obtidos em todas as amostras atenderam aos limites postos na ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

Marinho (2016) encontrou teores de material passante na peneira de 75 µm entre 11 % e 20 %. Já Bigolin *et al.* (2015) encontraram valores entre 7,54% e 10,47%, também bastante superiores aos observados nas amostras analisadas nesse trabalho, as quais apresentam valores que atenderiam, na maioria dos casos, inclusive o limite imposto aos agregados naturais.

Existe uma diferença muito grande entre os limites impostos pela ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) e ABNT (2004). O teor de material fino

presente em agregados interfere de forma a prejudicar a resistência à abrasão superficial em concretos e sua durabilidade. Seguindo estes critérios, nenhum desses agregados seria recomendado para utilização na substituição total do agregado miúdo natural, uma vez que quando em substituição parcial, deve-se analisar o resultado obtido em sua composição final, fruto da mistura produzida com os agregados naturais e reciclados.

Para a característica física analisada neste item, o melhor material é o agregado miúdo reciclado misto de Americana, por ter apresentado o menor teor de material pulverulento, mas é importante ressaltar que os materiais produzidos nessa unidade de processamento não foram classificados como agregados de graduação miúda, sendo assim, dos agregados miúdos reciclados analisados, o melhor resultado foi encontrado no agregado de misto da unidade municipal de Campinas.

5.4.3 Absorção de água

Seguindo o método de ensaio proposto na ABNT ABNT NBR NM30:2000 (ABNT, 2000b) foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 17, onde também estão identificados os limites impostos pela ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) para a absorção de água em agregados reciclados.

Tabela 17 – Resultados da absorção de água das amostras dos agregados miúdos da RMC.

| Município da unidade recicladora | Absorção de água (%) | Limites ABNT |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Natural | 0,90 | não há ⁽¹⁾ |
| Americana (ARC) | 5,75 | |
| Campinas - privada (ARC) | 11,72 | 12,00 ⁽²⁾ |
| Hortolândia (ARC) | 7,82 | |
| Pedreira (ARC) | 14,10 | |
| Americana (ARM) | 5,73 | |
| Campinas – municipal (ARM) | 5,78 | 17,00 ⁽²⁾ |
| Campinas – privada (ARM) | 7,15 | |
| Pedreira (ARM) | 6,66 | |

Notas:

⁽¹⁾ ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).

⁽²⁾ ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

Fonte: da autora, 2017.

Segundo ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), que aborda os requisitos para aceitação dos agregados reciclados para emprego na construção civil (produção

de concreto sem fins estruturais), o limite máximo de absorção de água é de 12% para agregado miúdo reciclados de concreto e, 17% para agregado miúdo reciclado misto.

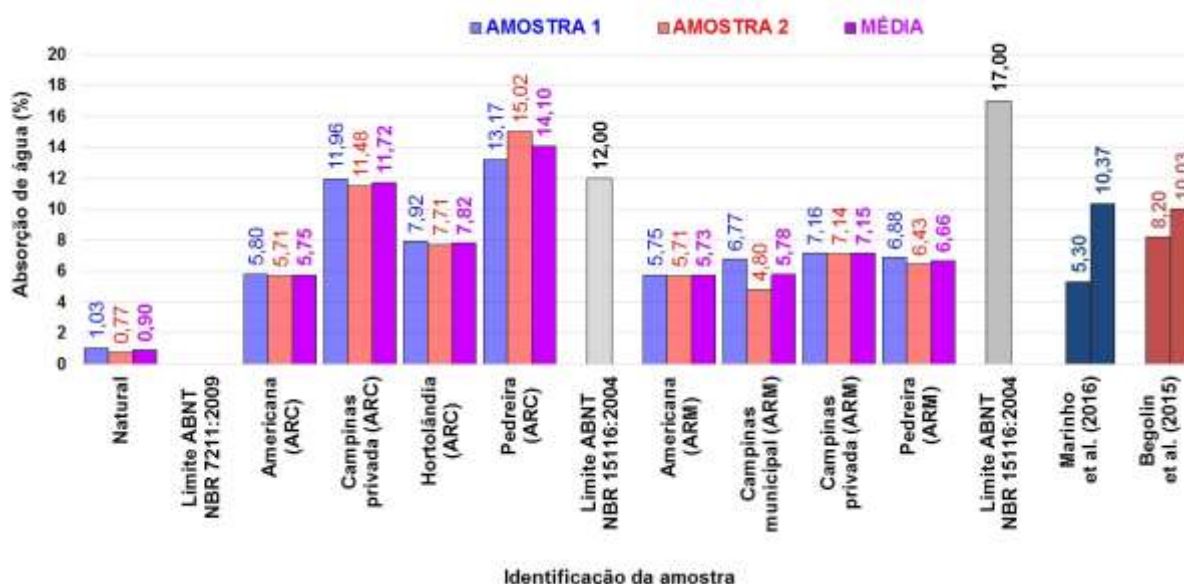
Já a ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) não estabelece limite para a absorção de água de agregados miúdos de origem natural.

Quanto à absorção de água nos agregados miúdos reciclados, o menor resultado foi obtido no agregado reciclado misto da unidade de Americana (5,73%). Apenas o material misto de Pedreira (14,10%) não atendeu ao limite posto na ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) como pode ser visto na Figura 25.

Como observado por Ulsen (2006) e Bigolin *et al.* (2015), os maiores valores de absorção de água são encontrados em materiais de composição mais finas. Neste trabalho observou-se essa tendência: as amostras que apresentaram menores valores de módulo de finura, apresentaram os maiores valores de absorção de água.

Com exceção ao agregado reciclado de concreto produzido em Pedreira, os valores encontrados não diferem muito dos encontrados por Marinho (2016), cujo trabalho apresentou valores entre 5,30% e 10,37% e por Bigolin *et al.* (2015), que encontraram valores entre 8,20% e 10,03%.

Figura 25 – Gráfico da absorção de água das amostras dos agregados reciclados.



Fonte: da autora, 2017; ABNT (2009a), ABNT (2004d); Marinho *et al.* (2016) e Bigolin *et al.* (2015).

A elevada absorção de água apresentada pelo agregado reciclado interfere nos procedimentos necessários para seu uso na produção de argamassas e concreto, pois

se incorporado na mistura na condição seca, tomará água da mistura, interferindo na consistência obtida na mistura que o contém (BAUER, 2013).

Poon *et al.* (2004 *apud* Bravo *et al.*, 2014) observaram a microestrutura de concretos com adição de agregado reciclado e com agregados naturais, verificando que a elevada absorção do agregado reciclado gerou uma zona de transição mais densa devido à elevada absorção de água nas fases iniciais da mistura.

É possível observar uma tendência de maior absorção nos agregados reciclados de concreto que pode estar relacionada à natureza porosa dos compostos cimentícios que o originam.

Analisando os resultados da análise de absorção de água, o melhor material é o agregado miúdo reciclado misto produzido pela unidade municipal de Campinas, que apresentou o mesmo valor do agregado miúdo reciclado misto de Americana, mas como esse material não pode ser considerado de agregado miúdo, o valor encontrado nesse ensaio não pode ser considerado válido devido à metodologia empregada.

5.4.4 Torrões de argila e materiais friáveis

Seguindo o método de ensaio proposto na ABNT NBR 7218:2010 (ABNT, 2010) foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 18 e Figura 26, apresentadas a seguir.

Tabela 18 – Resultados do teor de torrões de argila e materiais friáveis das amostras dos agregados miúdos da RMC.

| Município da unidade recicladora | Teor de torrões de argila e materiais friáveis (%) | Limite ABNT |
|----------------------------------|--|-------------|
| Natural | 0,73 | 3,00 |
| Americana (ARC) | 4,84 | |
| Campinas – privada (ARC) | 5,60 | 2,00 |
| Hortolândia (ARC) | 6,20 | |
| Pedreira (ARC) | 3,62 | |
| Americana (ARM) | 6,35 | |
| Campinas – municipal (ARM) | 9,32 | 2,00 |
| Campinas – privada (ARM) | 4,29 | |
| Pedreira (ARM) | 4,37 | |

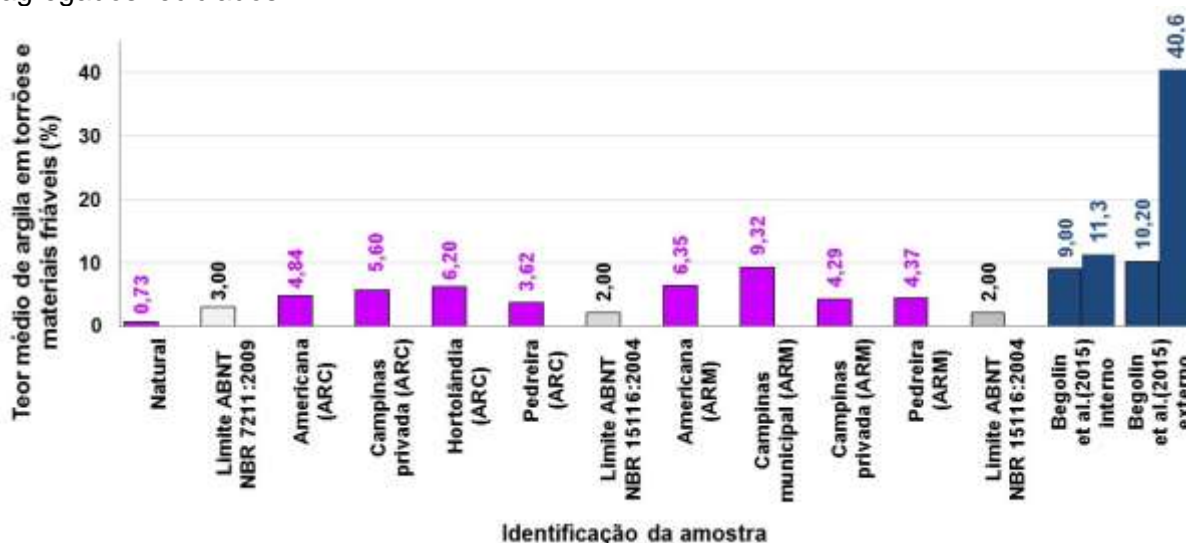
Notas:

(1) ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).

(2) ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

Fonte: da autora, 2017.

Figura 26 – Gráfico com o teor de torrões de argila e materiais friáveis das amostras dos agregados reciclados.



Fonte: da autora, 2017, ABNT (2009a), ABNT (2004d) e Bigolin *et al.* (2015).

Quanto à presença de torrões de argila e materiais friáveis, nenhum dos agregados reciclados atende ao limite imposto por ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d). O menor resultado foi obtido no agregado reciclado de concreto da unidade de Pedreira (3,62%).

Bigolin *et al.* (2015), analisando as características do agregado reciclado produzido no ambiente de uma pequena cooperativa, encontraram valores acima do limite em todas as amostras analisadas. Estes autores também verificaram que cuidados na armazenagem podem interferir de forma positiva, pois enquanto agregados produzidos e estocados em áreas internas apresentaram valores entre 9,0 e 11,3%, enquanto os que ficaram expostos ao tempo apresentaram valores maiores, entre 10,2 e 40,6%.

Ainda em comparação com os resultados obtidos por Bigolin *et al.* (2015), e considerando que todas as amostras desse trabalho foram coletadas de estoques que estavam expostos ao tempo, os valores de teor de torrões de argila e materiais friáveis aqui encontrados, mesmo que não atendam ao limite de ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), são bem menores, com exceção apenas do agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas (9,32%).

Para aceitação dos agregados reciclados para emprego na produção de concreto sem fins estruturais, o limite máximo para o teor de torrões de argila e materiais friáveis presentes é de 2% para agregado miúdo reciclados de concreto e misto ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

A presença excessiva de torrões de argila e materiais friáveis é prejudicial, pois altera a distribuição granulométrica do agregado. Esses materiais apresentam resistência inferior à dos agregados rochosos e introduzem material de maior absorção de água (BAUER, 2013).

Quanto à presença de torrões de argila e materiais friáveis em agregados miúdos reciclados, o melhor material é o agregado miúdo reciclado de concreto produzido pela unidade de Pedreira, seguido dos AMR que são de fato miúdo mistos da unidade municipal de Campinas e da unidade de Pedreira.

5.4.5 Massa específica e massa específica aparente

Segundo os métodos propostos pela ABNT NBR NM52:2009 (ABNT, 2009d), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados da massa específica e massa específica aparente das amostras dos agregados miúdos da RMC.

| Município da unidade recicladora | Massa específica (g/cm ³) | Massa específica aparente (g/cm ³) |
|----------------------------------|---------------------------------------|--|
| Natural | 2,63 | 2,59 |
| Americana (ARC) | 2,75 | 2,51 |
| Campinas – privada (ARC) | 2,75 | 2,33 |
| Hortolândia (ARC) | 2,71 | 2,41 |
| Pedreira (ARC) | 2,79 | 2,28 |
| Americana (ARM) | 2,74 | 2,50 |
| Campinas – municipal (ARM) | 2,68 | 2,46 |
| Campinas – privada (ARM) | 2,77 | 2,48 |
| Pedreira (ARM) | 2,62 | 2,38 |

Fonte: da autora, 2017.

A massa específica do material é uma característica física que pode indicar a sua composição. Espera-se encontrar valores menores de massa específica aparente em agregados com alta absorção de água (ULSEN, 2006).

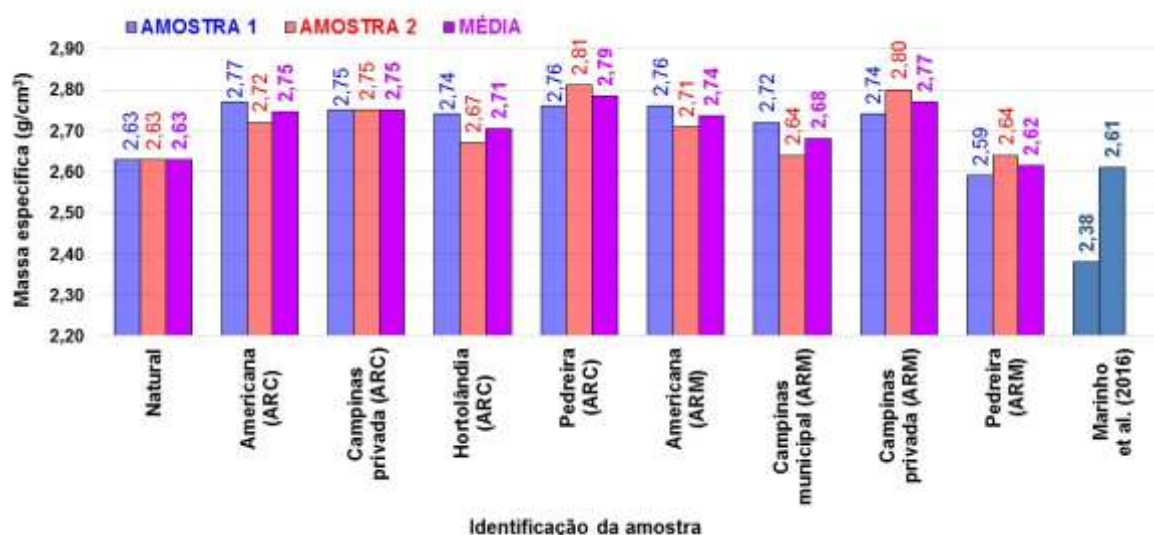
Quanto à massa específica, o menor resultado foi obtido no agregado reciclado misto da unidade de Pedreira (2,62 g/cm³), e o maior no agregado reciclado de concreto da mesma unidade (2,79 g/cm³) (Figura 27).

Marinho (2016) estudando a existência de diferença nas características de materiais produzidos com diferentes tipos de britador encontrou valores entre 2,38 e 2,61 g/cm³. Calcado e Ferreira (2013 *apud* CALCADO, 2016) trabalharam com agregado reciclado com massa específica de 2,45 g/cm³ e Pedroso (2008) com

2,515 g/cm³. Nesse trabalho os valores encontrados são superiores aos encontrados por Marinho (2016), Calcado e Ferreira (2013 *apud* CALCADO, 2016) e Pedroso (2008), mas isso provavelmente se deve apenas à natureza do material.

Como apontado por Ângulo, 2000; Zordan, 1997; Pinto, 1999; Harder e Freeman, 1997; Dorsthorst e Hendriks, 2000 (*apud* ÂNGULO, 2010), a variabilidade da sua composição, intrínseca à sua natureza, interfere diretamente nas características e propriedades dos agregados reciclados gerados. Essa variabilidade poderia ser mitigada com o manejo de pilhas de homogeneização, e com o emprego de agregados para diversas finalidades (ÂNGULO, 2000 *apud* ÂNGULO, 2010).

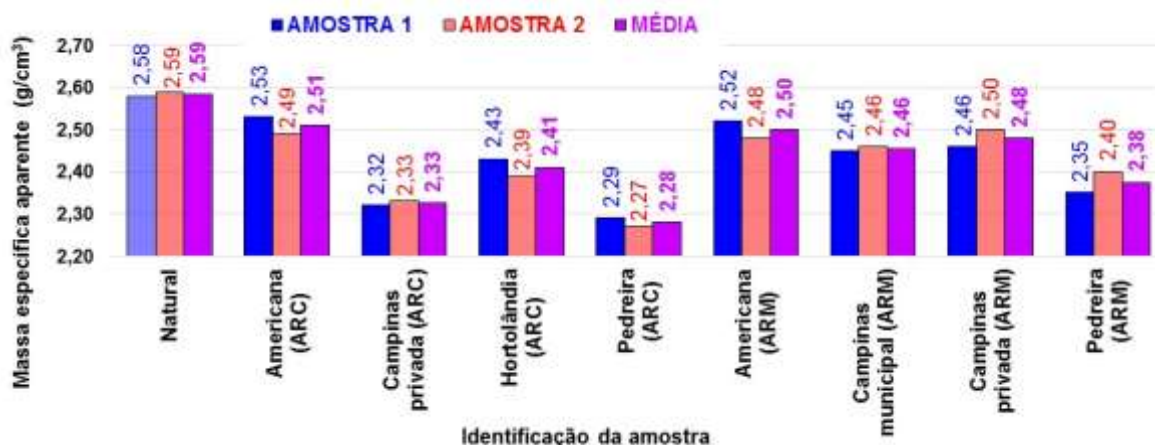
Figura 27 – Gráfico da massa específica das amostras dos agregados reciclados.



Fonte: da autora, 2017 e Marinho *et al.* (2016).

Como pode ser visto na Figura 28, o agregado reciclado de concreto de Pedreira apresentou a menor massa específica aparente (2,28 g/cm³) e o de concreto de Americana, a maior (2,51 g/cm³).

Figura 28 – Gráfico da massa específica aparente das amostras dos agregados reciclados.



Fonte: da autora, 2017.

Para Ulsen (2006), a diferença encontrada ao se comparar os valores de massa específica e massa específica aparente está relacionada à presença de fragmentos de aglomerante e de materiais com alta porosidade. Em seu trabalho, comparando valores de massa específica por picnometria e por líquidos densos, o autor afirma que os valores de massa específica são constantes e que se aproximam dos valores obtidos em agregados naturais, na ordem de 2,6 a 2,7 g/cm³. O mesmo comportamento foi encontrado neste trabalho. As maiores diferenças foram encontradas nos agregados miúdos reciclados de concreto das unidades de Campinas (privada) e Pedreira, que também apresentaram os maiores índices de absorção de água (11,48 e 15,02%, respectivamente).

Para a característica física analisada neste item, o melhor material é o agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas, por apresentar menor diferença entre os valores obtidos para massa específica e massa específica aparente, comportamento que reflete na absorção de água analisada no item 5.4.3.

5.4.6 Impurezas orgânicas

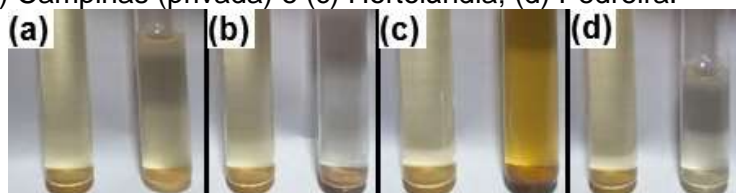
Seguindo os métodos propostos por ABNT NBR NM49:2001 (ABNT, 2001c), foram obtidos os resultados apresentados nas Figuras 29 a 31.

Figura 29 – Fotografias dos resultados obtidos nos ensaios de impurezas orgânicas, com o padrão à esquerda e a amostra à direita do agregado miúdo natural de rio.



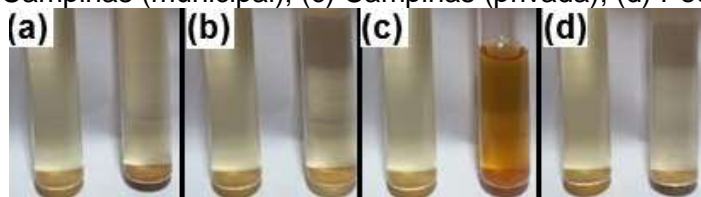
Fonte: da autora, 2017.

Figura 30 – Fotografias dos resultados obtidos nos ensaios de impurezas orgânicas, com o padrão à esquerda e a amostra à direita, dos agregados miúdos reciclados de concreto: (a) Americana; (b) Campinas (privada) e (c) Hortolândia; (d) Pedreira.



Fonte: da autora, 2017.

Figura 31 – Fotografias dos resultados obtidos nos ensaios de impurezas orgânicas, com o padrão à esquerda e a amostra à direita dos agregados miúdos reciclados mistos de: (a) Americana; (b) Campinas (municipal); (c) Campinas (privada); (d) Pedreira.



Fonte: da autora, 2017.

A partir da análise visual das soluções obtidas, os agregados miúdos reciclados de concreto produzidos em Americana e Hortolândia e o agregado miúdo reciclado misto produzido na unidade privada de Campinas, foram reprovados. Isso porque a tonalidade mais escura da amostra do que a da solução padrão indica a presença de uma quantidade de impurezas orgânicas acima das 300 ppm aceitáveis de acordo com a ABNT NBR NM49:2001 (ABNT, 2001c).

Os melhores materiais considerando a análise feita para o quesito contaminação por impurezas orgânicas são os agregado miúdos reciclados de concreto produzidos na unidade privada de Campinas e na unidade de Pedreira, por apresentarem as soluções com tonalidades mais claras, praticamente translúcidas.

5.5 Determinação das características químicas dos agregados reciclados amostrados

5.5.1 Teor de sais solúveis

Seguindo os métodos propostos pela ABNT NBR 9917:2009 (ABNT, 2009b), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados do teor de sais solúveis presentes nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC.

| Município da unidade recicladora | Teor médio de sais solúveis (%) | Limite ABNT |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Natural | 0,34 | não há ⁽¹⁾ |
| Americana (ARC) | 0,49 | |
| Campinas – privada (ARC) | 0,79 | não há ⁽²⁾ |
| Hortolândia (ARC) | 0,51 | |
| Pedreira (ARC) | 0,56 | |
| Americana (ARM) | 1,16 | |
| Campinas – municipal (ARM) | 0,57 | não há ⁽²⁾ |
| Campinas – privada (ARM) | 0,76 | |
| Pedreira (ARM) | 0,65 | |

Notas:

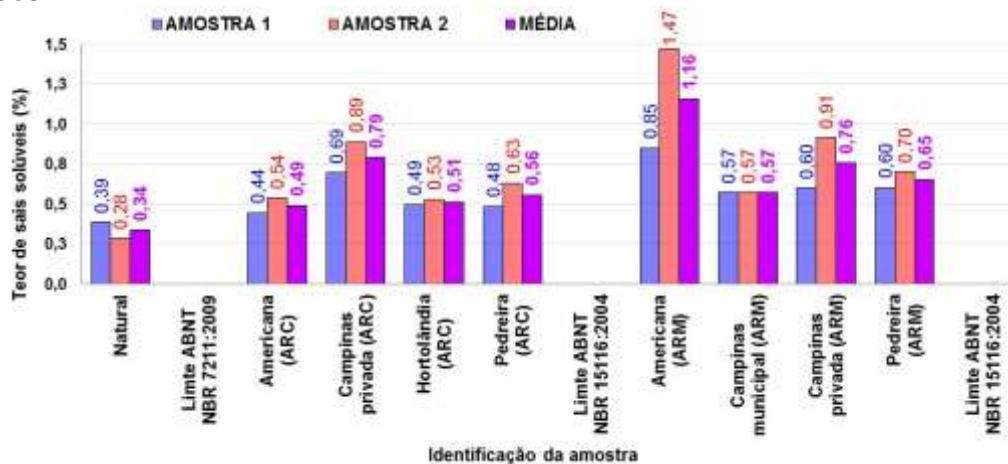
(1) ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).

(2) ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

Fonte: da autora, 2017.

Quanto ao teor de sais solúveis, o menor resultado foi obtido no agregado miúdo reciclado de concreto de Americana (0,49 %) e, o maior no agregado miúdo reciclado misto da mesma unidade (1,16 %), como pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 – Gráfico do teor de sais solúveis presentes nas amostras dos agregados reciclados.



Fonte: da autora, 2017, ABNT (2009a) e ABNT (2004d).

Não há limite para o teor de sais solúveis em ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), porém a mesma norma especifica teores máximos de cloretos e sulfatos, os quais fazem parte do teor de sais solúveis presentes na solução obtida para sua determinação.

Para a característica química analisada neste item, o melhor agregado miúdo é o agregado miúdo reciclado de concreto da unidade de Hortolândia, por apresentar o menor teor de sais solúveis.

5.5.2 Teor de íons cloretos

Seguindo os métodos propostos pela ABNT NBR 9917:2009 (ABNT, 2009b), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados do teor de íons cloretos presentes nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC.

| Município da unidade recicladora | Teor médio de íons cloretos (%) | Limites ABNT |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Natural | 0,11 | 0,20 ⁽¹⁾ |
| Americana (ARC) | 0,13 | |
| Campinas – privada (ARC) | 0,18 | 1,00 ⁽²⁾ |
| Hortolândia (ARC) | 0,12 | |
| Pedreira (ARC) | 0,15 | |
| Americana (ARM) | 0,15 | |
| Campinas – municipal (ARM) | 0,14 | 1,00 ⁽²⁾ |
| Campinas – privada (ARM) | 0,14 | |
| Pedreira (ARM) | 0,15 | |

Notas:

⁽¹⁾ ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).

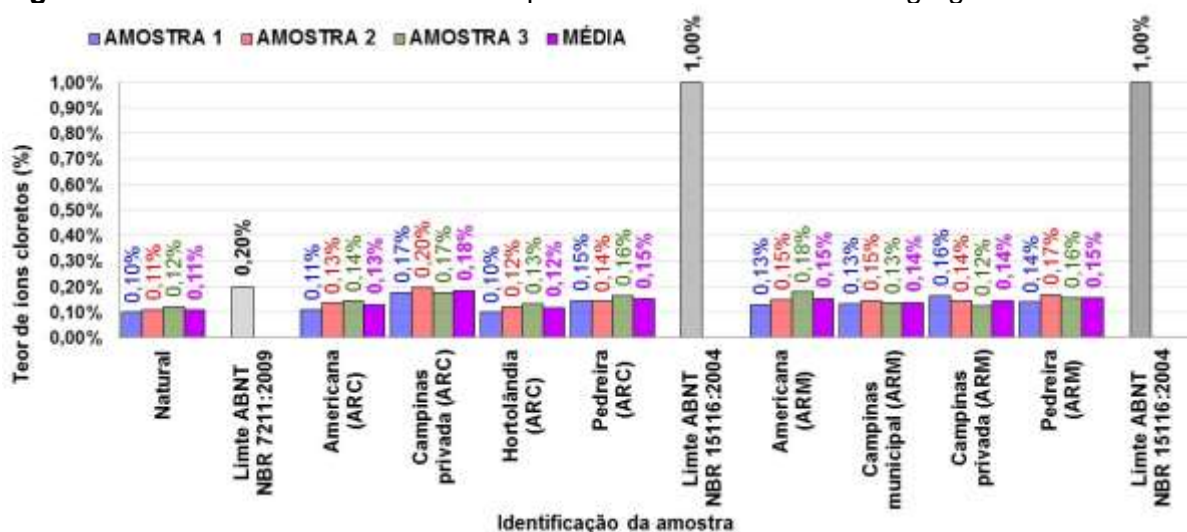
⁽²⁾ ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

Fonte: da autora, 2017.

O menor resultado encontrado nos ensaios para determinação do teor de íons cloretos foi obtido no agregado miúdo reciclado de concreto de Hortolândia (0,12%), e o maior no agregado miúdo reciclado de concreto da unidade privada de Campinas (0,18%), como pode ser visto na Figura 33.

Bigolin *et al.* (2015) também encontraram valores bastante baixos para o teor de íons cloretos, mesmo para os agregados reciclados que permaneceram expostos ao tempo.

Figura 33 – Gráfico do teor de cloretos presentes nas amostras de agregados reciclados.



Fonte: da autora, 2017, ABNT (2009a) e ABNT (20014d).

Para aceitação dos agregados reciclados, o limite máximo para o teor de íons cloretos presentes tanto nos agregados de concreto quanto nos agregados mistos é de 1% ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), valor maior que o exigido aos agregados miúdos naturais (0,20%) imposto pela ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).

Todos os agregados miúdos reciclados analisados foram aprovados na análise do teor de íons cloretos.

Na análise do teor de íons cloretos, o melhor agregado miúdo reciclado é o de concreto da unidade de Hortolândia, por apresentar o menor teor de íons cloretos.

5.5.3 Teor de sulfatos

Também seguindo os métodos propostos pela ABNT NBR 9917:2009 (ABNT, 2009b), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 22, a seguir.

Tabela 22 – Resultados do teor de íons sulfatos presentes nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC.

| Município da unidade recicladora | Teor médio de sulfatos (%) | Limite ABNT |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Natural | 0,11 | 0,10 ⁽¹⁾ |
| Americana (ARC) | 0,13 | |
| Campinas – privada (ARC) | 0,11 | 1,00 ⁽²⁾ |
| Hortolândia (ARC) | 0,17 | |
| Pedreira (ARC) | 0,13 | |
| Americana (ARM) | 0,31 | |
| Campinas – municipal (ARM) | 0,20 | 1,00 ⁽²⁾ |
| Campinas – privada (ARM) | 0,26 | |
| Pedreira (ARM) | 0,34 | |

Notas:

⁽¹⁾ ABNT NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a).

⁽²⁾ ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d).

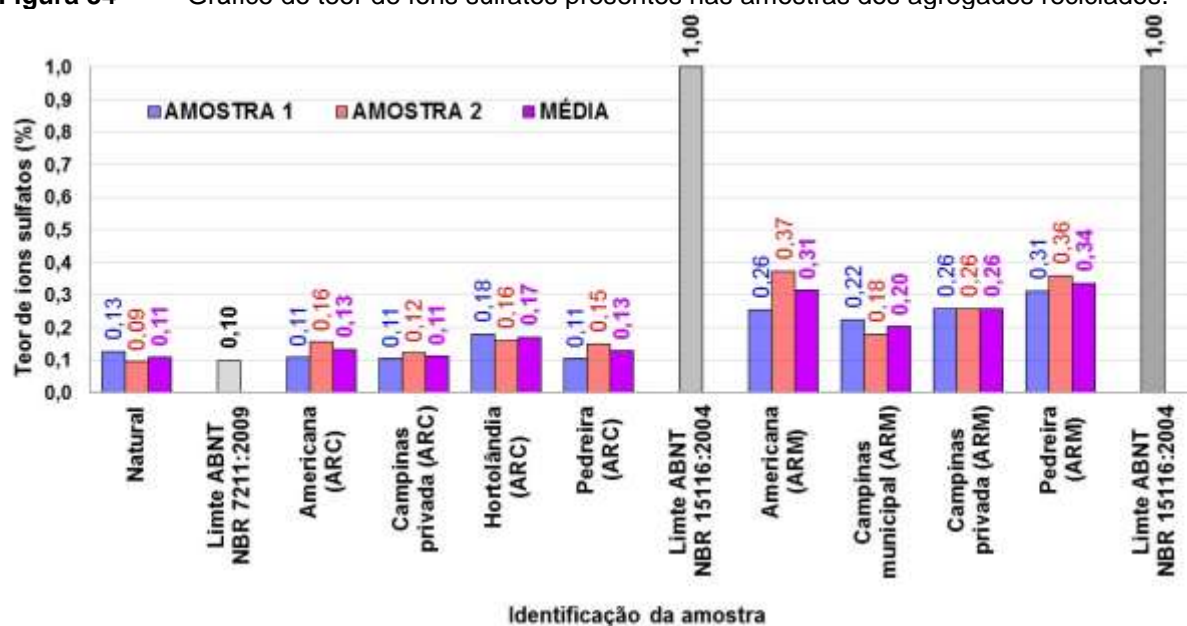
Fonte: da autora, 2017.

O menor teor de sulfatos foi obtido no agregado miúdo reciclado de concreto da unidade privada de Campinas (0,11%) e, o maior, no agregado miúdo reciclado misto de Pedreira (0,34%), como pode ser visto na Figura 34, apresentada na próxima página.

Bigolin *et al.* (2015) também analisaram o teor de sulfatos de suas amostras e encontraram teores muito abaixo do limite. Os autores ressaltaram a importância dessa análise, já que esse tipo de contaminação está ligado à presença de gesso na composição do entulho, que provoca redução na durabilidade de concretos e argamassas.

O limite máximo de ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) para aceitação de agregados miúdos reciclados para o teor de sulfatos é o mesmo para os de concreto e mistos é de 1%, desta forma, todos os agregados miúdos reciclados amostrados estão aprovados para uso na produção de concretos para fins não estruturais.

O limite máximo para o teor de íons sulfatos para os agregados miúdos naturais na ABNT NBR 7211:2009 é de 0,10% (ABNT, 2009a).

Figura 34 – Gráfico do teor de íons sulfatos presentes nas amostras dos agregados reciclados.

Fonte: da autora, 2017, ABNT (2009a) e ABNT (2004d).

Para a característica química analisada neste item, o melhor agregado miúdo é o agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas, por apresentar o menor teor de sulfatos.

5.5.4 Material orgânico: determinação do teor por perda ao fogo

Seguindo a metodologia descrita no item 4.4.2, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados do teor de perda de massa nas temperaturas de 350 °C e 950 °C nas amostras dos agregados miúdos reciclados da RMC.

| Município da unidade recicladora | Perda ao fogo a 350 °C (%) | Perda ao fogo a 950 °C (%) |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Natural | 0,05 | 0,38 |
| Americana (ARC) | 1,24 | 5,04 |
| Campinas – privada (ARC) | 3,98 | 9,64 |
| Hortolândia (ARC) | 1,70 | 6,55 |
| Pedreira (ARC) | 2,83 | 7,63 |
| Americana (ARM) | 1,25 | 5,89 |
| Campinas – municipal (ARM) | 2,50 | 7,21 |
| Campinas – privada (ARM) | 1,14 | 12,65 |
| Pedreira (ARM) | 1,57 | 6,45 |

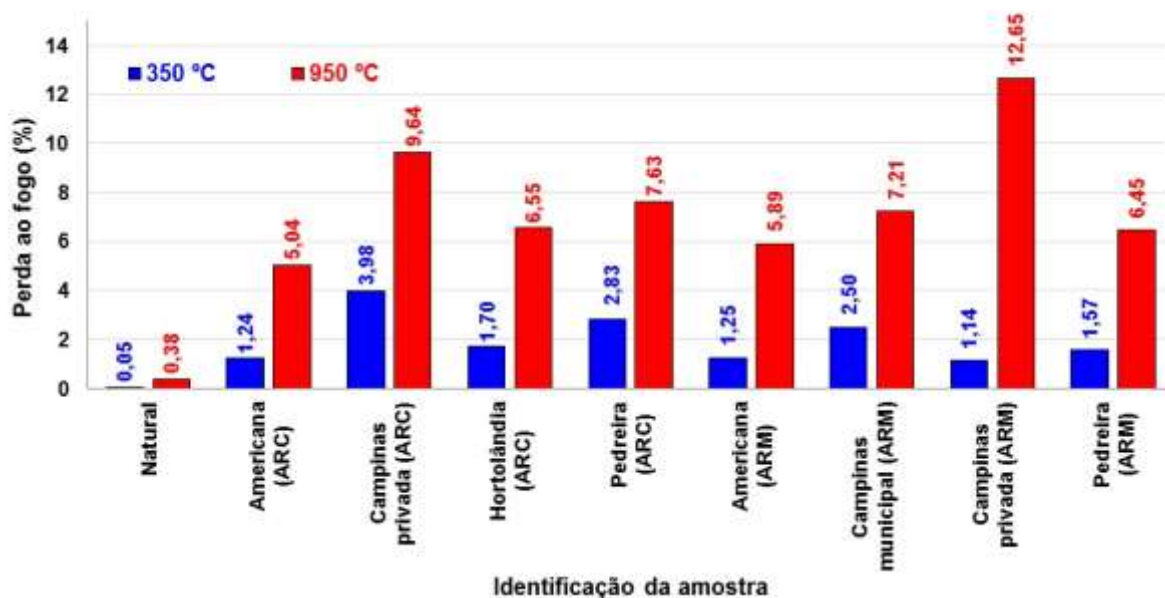
Fonte: da autora, 2017.

Quanto à perda de massa na temperatura de 350 °C, o agregado miúdo reciclado com menor perda foi o misto da unidade privada de Campinas (1,14%),

enquanto a maior foi encontrada no cinza da mesma unidade (3,98%). A 950 °C, as perdas foram bastante superiores e a menor perda foi encontrada no agregado de concreto de Americana (5,04 %), e a maior no agregado misto da unidade privada de Campinas (12,65%), como pode ser observado na Figura 35.

Pedroso (2008), que trabalhou com as temperaturas de 600 °C e 800 °C, encontrou perdas de massa de 6,02 e 12,84%, respectivamente, indicando que as perdas superiores na temperatura mais elevadas são resultados da descarbonatação do carbonato de cálcio presente nos agregados reciclados.

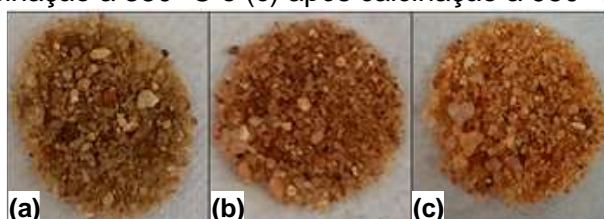
Figura 35 – Gráfico do teor de perda de massa nas temperaturas de 350 °C e 950 °C das amostras de agregados miúdos reciclados da RMC.



Fonte: da autora, 2017.

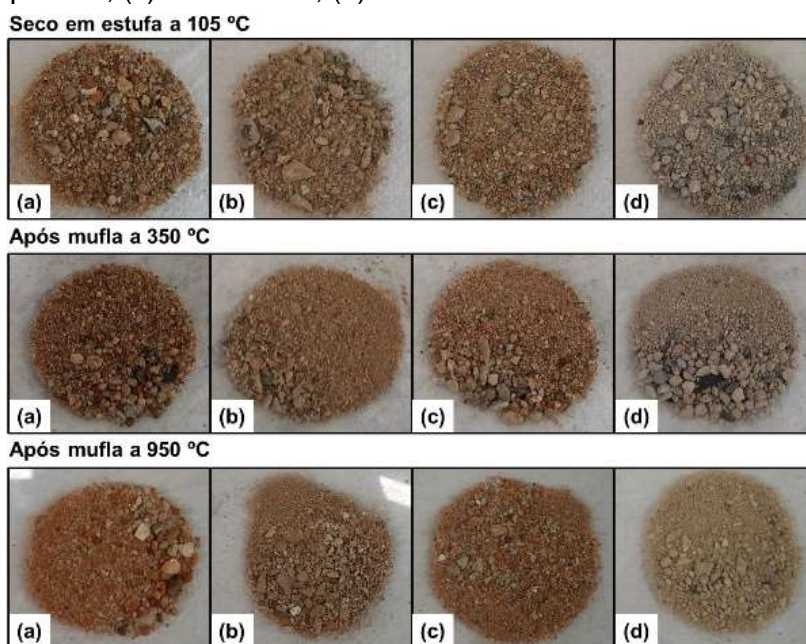
Nas Figuras 36 a 38, é possível observar o aspecto e a perda de massa dos agregados miúdos utilizados neste trabalho, antes e depois do ensaio de perda de matéria orgânica ao fogo nas duas temperaturas.

Figura 36 – Fotografias das amostras do agregado miúdo natural de rio: (a) seco em estufa a 105 °C; (b) após calcinação a 350 °C e (c) após calcinação a 950 °C em mufla.



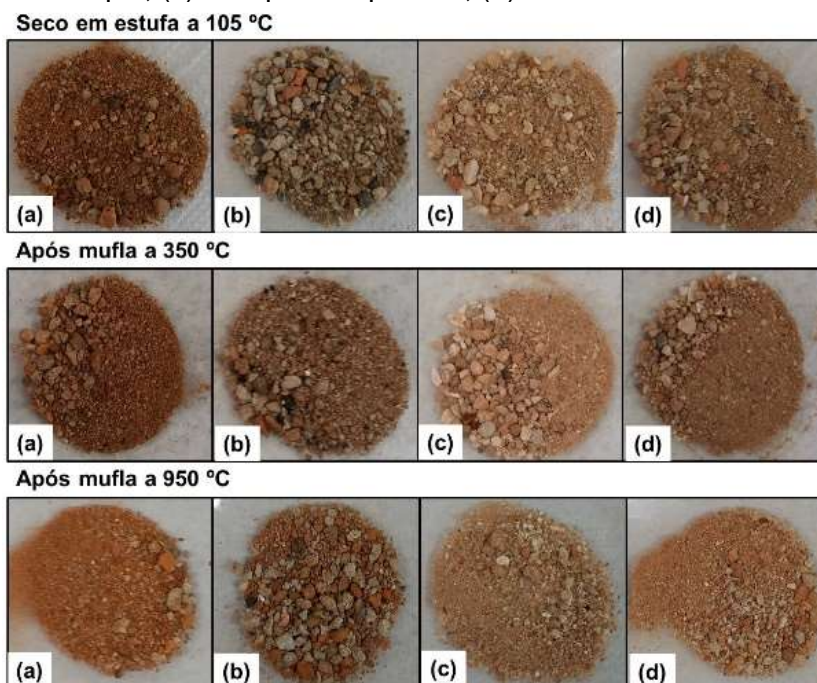
Fonte: da autora, 2017.

Figura 37 – Fotografia das amostras dos agregados miúdos reciclados de concreto, antes e depois do ensaio de perda ao fogo, nas temperaturas de 350 °C e 950 °C: (a) Americana; (b) Campinas – privada; (c) Hortolândia; (d) Pedreira.



Fonte: da autora, 2017.

Figura 38 – Fotografia das amostras dos agregados miúdos reciclados mistos, antes e depois do ensaio de perda ao fogo, nas temperaturas de 350 °C e 950 °C: (a) Americana; (b) Campinas – municipal; (c) Campinas – privada; (d) Pedreira.



Fonte: da autora, 2017.

Percebem-se nitidamente as alterações no aspecto dos agregados da unidade privada de Campinas, fato que condiz com os resultados apresentados na Tabela 23 e nas Figuras 37 e 38.

Leong e Tanner (1999), Suglio (1973) e Dias e Lima (2004) observaram perdas excessivas de massa nas amostras, durante a determinação do teor de matéria orgânica por calcinação em temperaturas entre 110 °C e 360 °C, devido à constituição do material que originou os agregados. Como o entulho tem material cimentício em sua composição, podem ocorrer perdas consideráveis devido aos carbonatos formados durante a hidratação do cimento, principalmente a etringita (C–A–S–H), o silicato de cálcio hidratado (C–S–H) e o hidróxido de cálcio (C–H).

Aguiar e Selmo (2006) apresentaram as seguintes explicações de perda de massa em argamassas expostas a várias temperaturas:

- a) até 80 °C provavelmente ocorre perda de água não estrutural (umidade) não envolvendo reações que desestabilizem a etringita (C–A–S–H);
- b) de 80 °C a 180 °C pode ocorrer a desestabilização da etringita e a desidratação inicial do silicato de cálcio hidratado (C–S–H) e perda final de umidade da argamassa;
- c) de 400 °C a 550 °C pode ocorrer perda excessiva em argamassas com agregados reciclados, provavelmente devido à presença e desidroxilação de cal hidratada, o hidróxido de cálcio, (C–H ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$);
- d) de 550 °C a 800 °C pode ocorrer a volatilização do gás carbônico (CO_2) do carbonato de cálcio (CaCO_3) e do carbonato de magnésio (MgCO_3). Nessa faixa de temperatura a argamassa com agregado reciclado pode apresentar maior perda de massa devido à alta carbonatação dos resíduos de argamassa, e;
- e) de 800 °C a 1000 °C pode ocorrer a volatilização final dos carbonatos e da dolomita.

Estas modificações estruturais, com perda de material volátil como a água e/ou gases, como o gás carbônico, podem justificar as elevadas perdas de massa observada nas amostras de agregados reciclados aquecidos a 350 °C e, principalmente, a 950 °C.

Pedroso (2008) também afirma que a perda ao fogo pode estar associada a diversos fatores, dentre eles a perda de água de constituição e a liberação dos silicatos de cálcio hidratados e da perda de água dos compostos argilominerais de solo ou de fragmentos cerâmicos que tenham sido queimados a temperaturas inferiores 500 °C, além de rochas naturais como granitos e feldspatos.

Apesar dos diversos autores indicarem que a perda excessiva observada em temperaturas acima de 550 °C ocorre devido à descarbonização do carbonato de cálcio que é encontrado principalmente ou, em maiores concentrações, nos

agregados reciclados de concreto, não foi possível observar essa tendência nas amostras analisadas.

Os resultados obtidos à 350 °C mostram menor perda ao fogo quando comparado com os resultados 950 °C. Mas, pelo exposto acima, não foi possível fazer correlação dos resultados obtidos neste ensaio com os de impurezas orgânicas determinadas conforme a ABNT NBR NM49:2001 (ABNT, 2001c).

5.5.5 Sumário dos resultados de caracterização física e química dos agregados miúdos reciclados da Região Metropolitana de Campinas

Os agregados reciclados produzidos na unidade de Americana não são agregados miúdos e o melhor material é o agregado miúdo reciclado de concreto produzido pela unidade privada de Campinas, que não apresentou nenhum desvio granulométrico.

Quanto ao teor de material fino (com dimensão menor que 75 µm) presente nos agregados, a norma ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) impõe limites de 15 % para os agregados de concreto e 20 % para os agregados mistos. Os agregados reciclados de todas as unidades atenderam a esses limites, e o melhor agregado miúdo reciclado é o misto da unidade municipal de Campinas. O único agregado miúdo reprovado é o agregado miúdo reciclado de concreto de Pedreira.

Nenhuma amostra de agregado reciclado (de concreto ou misto) apresentou teor de torrões de argila e materiais friáveis que atende ao limite de 2 % impostos pela ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), o que pode indicar falha no processo de triagem e armazenamento de material para produção do material oferecido pela unidade. A presença excessiva de torrões de argila e materiais friáveis pode ser oriunda de contaminação de solo ou de material argiloso no entulho utilizado para sua produção ou no processo de abastecimento do triturador. Dentre todos os reprovados, o melhor é o agregado miúdo reciclado misto da unidade privada de Campinas, unidade cujas amostras apresentaram os menores teores de torrões de argila e materiais friáveis.

Considerando o melhor valor o menor encontrado e que mais se aproxime do resultado encontrado para o agregado miúdo natural, o melhor na análise da massa específica é o agregado miúdo reciclado misto de Pedreira. Para a massa específica aparente, o melhor é o agregado miúdo reciclado de concreto de Pedreira.

Os resultados de determinação da massa específica e massa específica aparente, assim como na determinação da absorção de água, também apresentaram diferença significativa, o que reforça a heterogeneidade do material.

O ensaio qualitativo realizado mostrou presença excessiva de impurezas orgânicas nas amostras de agregado miúdo reciclado de concreto de Hortolândia e de agregado reciclado misto da unidade privada de Campinas. Este tipo de contaminação pode ser resultado de contaminação do material originalmente recebido pela unidade, não necessariamente indicando falha processo de triagem e armazenamento, até porque apenas o material misto da unidade privada de Campinas foi reprovado.

A ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) não especifica valor máximo para o teor de sais solúveis, mas existem limites de 1 % para íons cloretos e 1 % para íons sulfatos. Mesmo existindo amostras com teores de sais solúveis superiores a 1 %, todas foram aprovadas quanto ao teor de sulfatos e de cloretos. A amostra de agregado miúdo reciclado que apresentou menor teor foi a do agregado reciclado de concreto de Hortolândia. Quanto ao teor de íons cloretos, o melhor resultado foi obtido pelo agregado miúdo reciclado de concreto de Hortolândia. A amostra que apresentou melhor resultado na análise do teor de íons sulfatos foi a do agregado miúdo reciclado de concreto da unidade privada de Campinas.

Para a análise de perda de massa ao fogo, foram realizadas análises a 350 °C, em que o melhor resultado foi obtido pelo agregado miúdo reciclado misto da unidade privada de Campinas, e a 950 °C, pelo agregado miúdo reciclado misto de Pedreira. De modo geral, o melhor agregado miúdo reciclado foi o de concreto de Pedreira, pois apresentou o melhor resultado para as análises realizadas, o maior número de vezes.

A seguir são apresentados nas Tabelas 24 e 25 os resultados das características físicas e químicas dos agregados miúdos reciclados analisados neste trabalho.

Tabela 24 – Síntese dos resultados da caracterização física e química dos agregados reciclados de concreto amostrados, em vermelho os resultados inadequados e em negrito os melhores resultados.

| Amostras | Granulometria | | | | Teor de finos (%) | Absorção de água (%) | Argila e materiais friáveis (%) | Impurezas orgânicas | Massa específica (g/cm ³) | Massa específica aparente (g/cm ³) | Teor de sais solúveis (%) | Teor de íons cloretos (%) | Teor de íons sulfatos (%) | Perda de material orgânico (%) | |
|----------------------------|-------------------------------------|-------|------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------------|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------|
| | Dimensão máxima característica (mm) | Miúdo | Módulo de finura | Classificação granulométrica | | | | | | | | | | 350 °C | 950 °C |
| Americana (ARC) | 6,3 | não | 2,83 | ótima | 3,5 | 5,75 | 4,84 | clara | 2,75 | 2,51 | 0,49 | 0,13 | 0,13 | 1,24 | 5,04 |
| Campinas – privada (ARC) | 4,8 | sim | 2,46 | ótima | 6,0 | 11,72 | 5,60 | clara | 2,75 | 2,33 | 0,79 | 0,18 | 0,11 | 3,98 | 9,64 |
| Hortolândia (ARC) | 4,8 | sim | 2,33 | ótima | 4,0 | 7,82 | 6,20 | escura | 2,71 | 2,41 | 0,51 | 0,12 | 0,17 | 1,70 | 6,55 |
| Pedreira (ARC) | 2,4 | sim | 2,25 | ótima | 4,5 | 14,10 | 3,62 | clara | 2,79 | 2,28 | 0,56 | 0,15 | 0,13 | 2,83 | 7,63 |
| Limite ABNT NBR 15116:2004 | ≤ 4,8 | sim | ≤ 3,50 | | ≤ 15,00 | ≤ 12,00 | ≤ 2,00 | padrão | - | - | - | ≤ 1,00 | ≤ 1,00 | - | - |

Fonte: da autora, 2017 e ABNT (2004d).

Tabela 25 – Síntese dos resultados da caracterização física e química dos agregados reciclados mistos amostrados, em vermelho os resultados inadequados e em negrito os melhores resultados.

| Amostras | Granulometria | | | | Teor de finos (%) | Absorção de água (%) | Argila e materiais friáveis (%) | Impurezas orgânicas | Massa específica (g/cm³) | Massa específica aparente (g/cm³) | Teor de sais solúveis (%) | Teor de íons cloretos (%) | Teor de íons sulfatos (%) | Perda de material orgânico (%) | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|------------|------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------|
| | Dimensão máxima característica (mm) | Miúdo | Módulo de finura | Classificação granulométrica | | | | | | | | | | 350 °C | 950 °C |
| Americana (ARM) | 19,0 | não | 3,79 | graúdo | 3,0 | 5,73 | 6,35 | clara | 2,74 | 2,5 | 1,16 | 0,15 | 0,31 | 1,25 | 5,89 |
| Campinas - municipal (ARM) | 4,8 | sim | 2,68 | ótima | 3,5 | 5,78 | 9,32 | clara | 2,68 | 2,46 | 0,57 | 0,14 | 0,20 | 2,5 | 7,21 |
| Campinas - privada (ARM) | 4,8 | sim | 3,05 | utilizável superior | 8,0 | 7,15 | 4,29 | escura | 2,77 | 2,48 | 0,76 | 0,14 | 0,26 | 1,14 | 12,65 |
| Pedreira (ARM) | 2,4 | sim | 2,54 | ótima | 6,5 | 6,66 | 4,37 | clara | 2,62 | 2,38 | 0,65 | 0,15 | 0,34 | 1,57 | 6,45 |
| Limite ABNT NBR 15116:2004 | ≤ 4,8 | sim | ≤ 3,50 | | ≤ 20,00 | ≤ 17,00 | ≤ 2,00 | padrão | - | - | - | ≤ 1,00 | ≤ 1,00 | - | - |

Fonte: da autora, 2017 e ABNT (2004d).

5.6 Análise das características físicas no estado fresco e endurecido e características mecânicas das argamassas

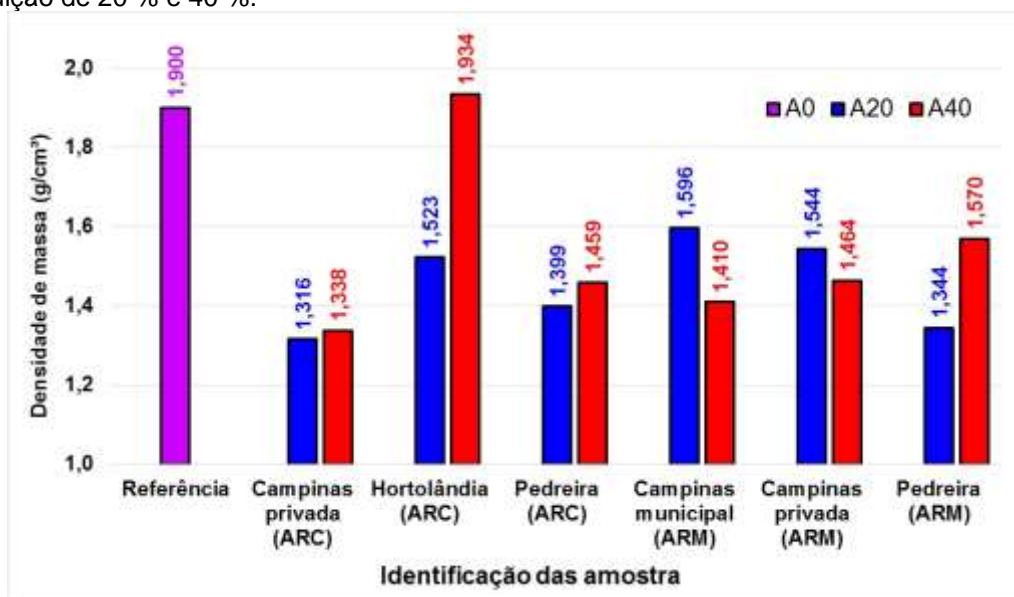
As análises das argamassas testadas no estado fresco foram realizadas com os métodos descritos no item 4.9.

Para a produção de argamassas, não foram utilizados os agregados miúdos produzidos na unidade de Americana/SP pois não foram classificados como agregados miúdos nos ensaios de caracterização.

5.6.1 Densidade de massa da argamassa

Os resultados da determinação da densidade de massa das argamassas testadas são apresentados na Figura 39.

Figura 39 – Gráfico da densidade de massa apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017.

O menor resultado ($1,316 \text{ g/cm}^3$) foi encontrado na argamassa com 20% de substituição usando o agregado miúdo reciclado de concreto da unidade privada de Campinas. Esse resultado representa uma redução de 30,7% do encontrado na argamassa de referência.

Por outro lado, o maior resultado obtido na argamassa produzida com 40% de substituição utilizando o AMR de concreto de Hortolândia ($1,934 \text{ g/cm}^3$) superou a argamassa referência em 1,8%.

Quanto à densidade de massa da argamassa, na Figura 39 não é possível observar alguma tendência de alteração relacionada ao aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural de rio. Os resultados encontrados para as argamassas testadas são menores que o da argamassa referência, mas isso está relacionado ao aspecto da argamassa que não apresentou a consistência necessária para viabilizar sua aplicabilidade como argamassa de assentamento ou revestimento, como pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 – Fotografia da consistência da argamassa: (a) argamassa referência; (b) argamassa com 40% de substituição do agregado miúdo natural de rio por agregado miúdo reciclado.



Fonte: da autora, 2017.

Marinho (2016) trabalhou com argamassas com consistências semelhantes à da argamassa de referência e por isso, não fixou a relação água/cimento nem tão pouco o consumo de cimento, trabalhando com argamassas diferentes. Nesse trabalho Marinho (2016) encontrou valores de densidade de massa no estado fresco bastante próximos entre 1,73 e 1,88 g/cm³.

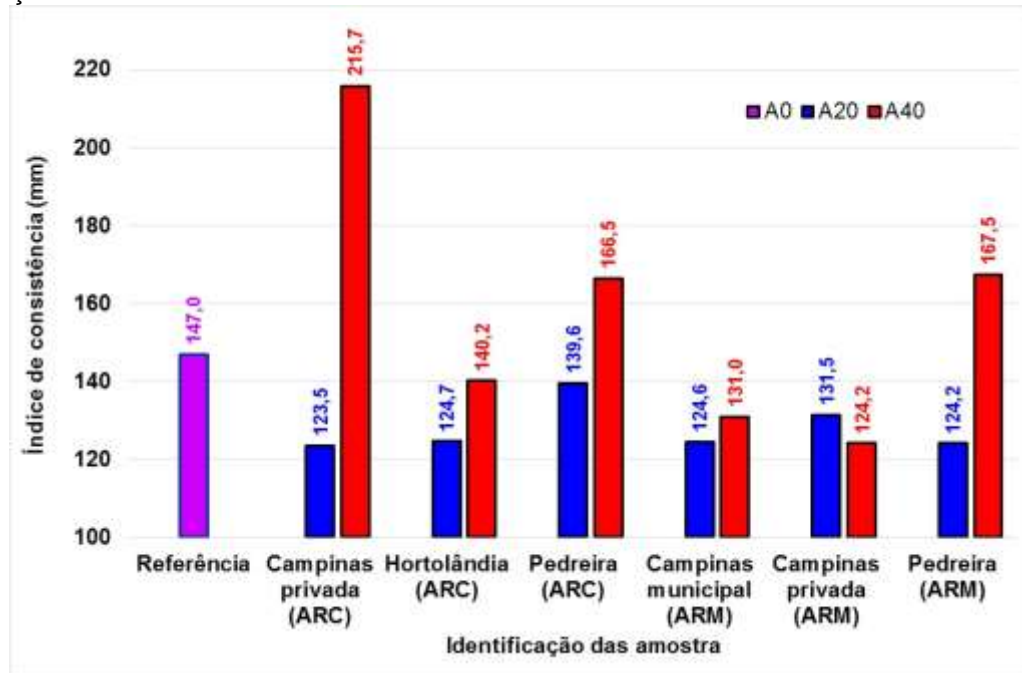
Aguiar e Selmo (2006) também fizeram alterações no traço definido, mas desta vez fixando o fator água/cimento, mas aumentando o consumo de cimento para e água para que fossem obtidas consistências semelhantes e, por isso também obtiveram uma menor variação nos resultados da densidade de massa no estado fresco, com valores entre 1,486 g/cm³ e 1,512 g/cm³.

Analisando apenas o resultado da densidade de massa no estado fresco da argamassa, o melhor resultado foi encontrado na argamassa do A20 usando o agregado miúdo reciclado de concreto da unidade privada de Campinas.

5.6.2 Índice de consistência

Os resultados da determinação do índice de consistência das argamassas testadas são apresentados na Figura 41.

Figura 41 – Gráfico do índice de consistência apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017.

O menor valor encontrado (124,0 mm) foi obtido em diversos traços. O maior valor de índice de consistência (215,7 mm) foi obtido na argamassa A40 produzida com AMR de concreto da unidade privada de Campinas.

Quanto ao índice de consistência das argamassas foram encontrados valores menores nas argamassas com 20% de substituição do agregado miúdo natural de rio por agregados miúdos reciclados, mas para todos os teores de substituição os resultados não podem ser analisados como consistência de argamassa pois, mesmo homogênea, a relação água/cimento e a produção de argamassas com mesmo consumo de materiais não permitiram uma consistência plástica com aglomeração das partículas (Figura 42).

Figura 42 – Fotografia de uma argamassa sem aglomeração entre as partículas.



Fonte: da autora, 2017.

Desta forma, os elevados valores encontrados nos ensaios das argamassas com 40% de substituição não representam plasticidade da argamassa como o ensaio se propõe. Esse comportamento pode estar relacionado com os elevados teores de absorção de água dos agregados reciclados, mencionado no item 5.4.3.

Esses problemas encontrados no ensaio de consistência não foram relatados por Aguiar e Selmo (2006) nem Marinho (2016), pois diferentemente da metodologia proposta por esse trabalho, esses autores fixaram a consistência.

O elevado índice de consistência (216 mm) apresentado pela argamassa com 40 % de substituição utilizando o agregado miúdo reciclado produzida na unidade privada de Campinas é justificado pela falta de agregação das partículas da mistura. O uso de aditivo superplastificante no máximo teor indicado pelo fabricante (1 % sobre o peso do aglomerante) não foi capaz de conter a absorção de água dos agregados, o que poderia permitir a obtenção de argamassa plástica e consistente.

Isso também se deve ao fato dos agregados reciclados utilizados no preparo das argamassas estarem na condição seca (0% umidade), o que permitiu que a água da mistura responsável pela hidratação do cimento e da manutenção da consistência plástica da mistura fosse absorvida pelo agregado que possui maior capacidade de absorção de água que o agregado natural.

Pedroso (2008) relatou que o uso de agregados com maior absorção de água leva ao aumento do consumo de água na mistura para que se mantenha a mesma consistência. Como neste trabalho a relação água/cimento e consumo de material utilizada foi a mesma em todos os traços, foi possível observar essa interferência.

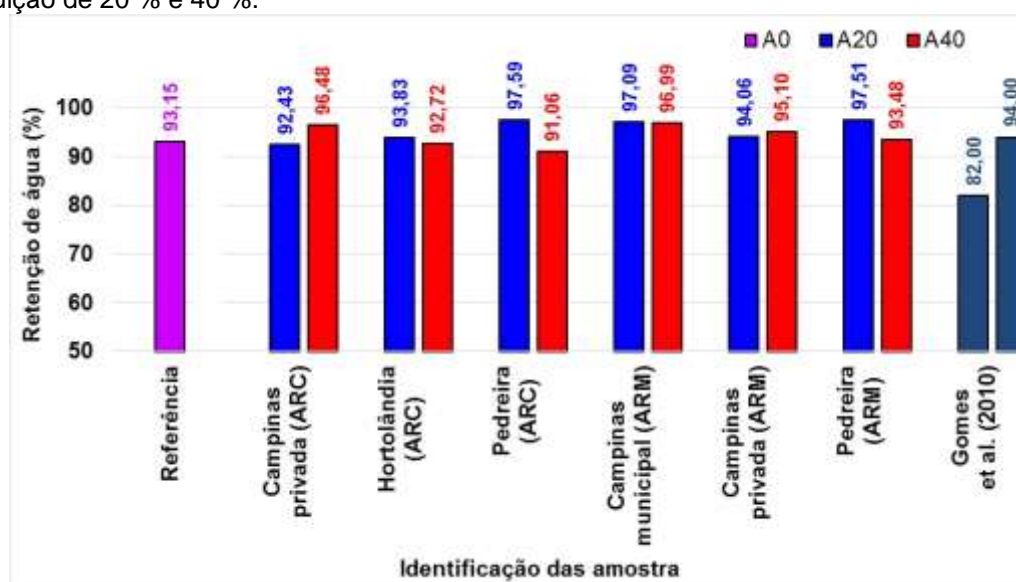
Na análise dos valores obtidos é importante observar que os resultados das argamassas A40 produzidas com agregado miúdo reciclado de concreto da unidade privada de Campinas e com os agregados miúdos reciclados de Pedreira (de concreto e misto) não são reflexo de uma consistência plástica, pois o elevado índice de consistência é resultado da falta de aglomeração entre as partículas, como pôde ser visto na Figura 42.

O melhor resultado foi alcançado na argamassa A20 com o agregado miúdo reciclado de concreto de Pedreira, que apresentou índice de consistência de 139,6 mm e condições de aplicação devido à coesão e plasticidade obtidas.

5.6.3 Retenção de água

Os resultados da determinação da retenção de água das argamassas testadas são apresentados na Figura 43, na próxima página.

Figura 43 – Gráfico da retenção de água apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017 e Gomes *et al.* (2010).

Quanto à retenção de água nas argamassas produzidas com agregados miúdos reciclados, o menor resultado (91,06%) foi obtido na argamassa A40 produzida com AMR de concreto de Pedreira e o maior (97,59%) foi obtido nas argamassas A20 com o AMR de concreto produzido em Pedreira, seguido pelo material misto da mesma usina (97,51%), mas outros traços apresentaram resultados bastante semelhantes com variação de 6,53%.

Gomes *et al.* (2010) encontraram uma variação bastante superior (12%), com valores de 82 a 94% para as substituições de 14 a 42% de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado. A retenção de água encontrada em seu trabalho foi inferior, inclusive no traço de referência.

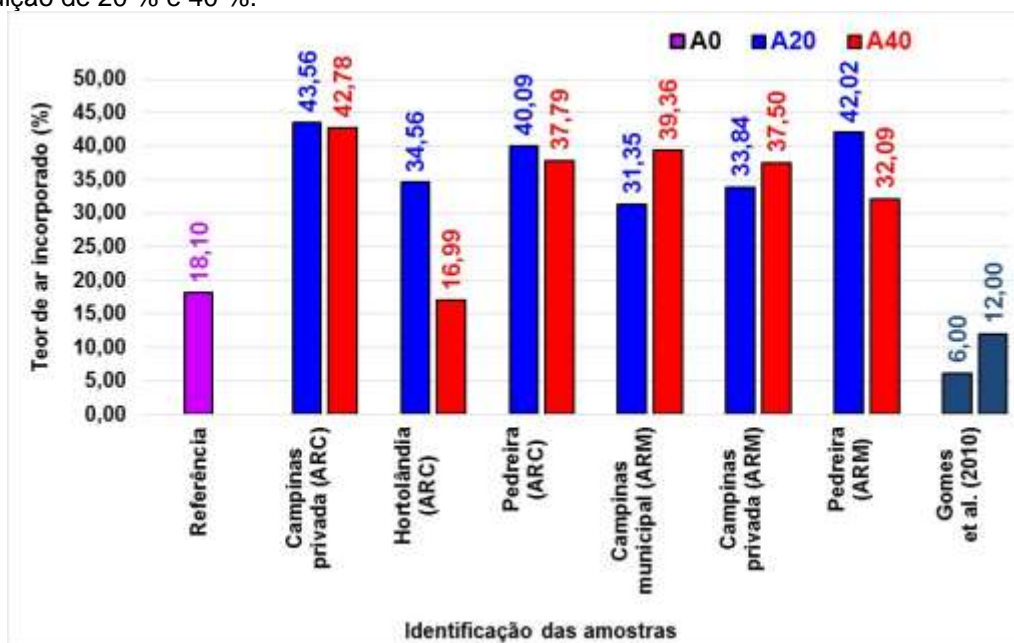
Silva (2006 *apud* Gomes *et al.*, 2010) relaciona o aumento da retenção de água quando há o aumento de material fino. No caso da substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, além de aumentar o teor de finos, há também a substituição de material com baixa absorção de água (0,90%) por material com absorção quase 16 vezes maior, como é o caso do agregado miúdo reciclado de concreto de Pedreira, gerando índices elevados de retenção de água.

O melhor resultado de retenção de água foi alcançado na argamassa A20 com o AMR de concreto produzido em Pedreira.

5.6.4 Teor de ar incorporado

O menor teor de ar incorporado das argamassas (16,99%) foi observado na A40 produzida com AMR de concreto de Hortolândia. O maior (43,56%) ocorreu em A20 produzida com AMR de concreto de Hortolândia. O maior (43,56%) ocorreu em A20 produzida com AMR de concreto da unidade privada de Campinas, como mostra a Figura 44 na próxima página.

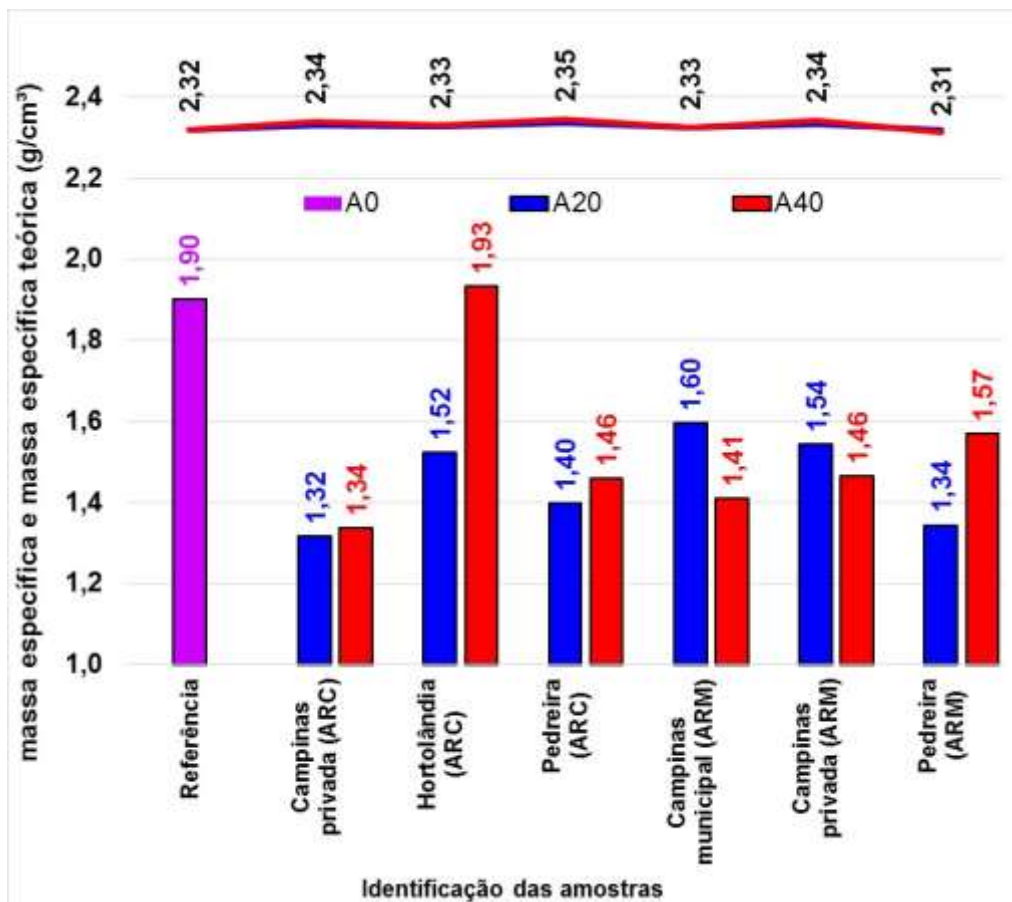
Figura 44 – Gráfico do teor de ar incorporado apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017 e Gomes *et al.* (2010).

Na Figura 45 é possível observar que as massas específicas teóricas de todas as argamassas testadas apresentam valores bem próximos da média (2,33 g/cm³), com variação de $\pm 0,02$ g/cm³ (2,31 a 2,35 g/cm³). Ainda que exista variação, os resultados não diferem dos da argamassa referência (2,31 g/cm³).

Figura 45 – Gráfico da massa específica no estado fresco (colunas) e da massa específica teórica (g/cm^3) (linhas) apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017.

Na prática, ao produzir argamassas com substituição, mesmo parcial, do agregado miúdo natural de rio, observa-se elevador teor de ar incorporado.

Esse resultado pode ser explicado analisando o teor de absorção de água dos agregados. Argamassas produzidas com agregados que apresentam elevados teores de absorção de água também apresentam elevados teores de ar incorporado. Isso porque o agregado miúdo reciclado na condição seca, utilizada no preparo das argamassas, absorveu a água de amassamento e tornou a mistura praticamente seca.

Gomes *et al.* (2010) encontrou valores bem menores para o teor de ar incorporado em suas argamassas, variando de 6 % a 12% nas argamassas com substituição e 14% na argamassa de referência.

A diferença bastante expressiva encontrada quando se compara os valores de Gomes *et al.* (2010) com os desse trabalho se dá ao fato das argamassas deles apresentarem consistência e plasticidade compatíveis com as necessidades para aplicação da argamassa. O valor do seu traço de referência é menor (14%), mas o

seu traço possui menor consumo de aglomerante, fato que interfere nos resultados obtidos.

O melhor resultado foi observado na argamassa A20 com o AMR de concreto produzido em privada de Campinas.

Na próxima página, a Tabela 26 apresenta o conjunto das características físicas das argamassas testadas no estado fresco.

Tabela 26 – Resultados das características físicas, no estado fresco, apresentadas pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.

| Traços | | Densidade de massa (g/cm ³) | | | | Índice de consistência (mm) | | | | Retenção de água (%) | Teor de ar incorporado (%) |
|--------|----------------------------|---|------|------|--------------------|-----------------------------|-------|-------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| | | D1 | D2 | D3 | D médio | IC1 | IC2 | IC3 | IC médio | | |
| A0 | Referência | 1,92 | 1,87 | 1,91 | 1,90 ± 0,03 | 147,8 | 146,6 | 146,6 | 147,0 ± 0,8 | 93 | 18 |
| | Americana (ARC) | 1,49 | 1,46 | 1,45 | 1,47 ± 0,02 | 123,4 | 127,4 | 121,3 | 124,0 ± 3,4 | 97 | 37 |
| | Campinas – privada (ARC) | 1,36 | 1,38 | 1,21 | 1,32 ± 0,11 | 123,1 | 125,8 | 121,6 | 123,5 ± 2,3 | 92 | 44 |
| | Hortolândia (ARC) | 1,55 | 1,54 | 1,48 | 1,52 ± 0,04 | 125,0 | 124,1 | 124,9 | 124,7 ± 0,6 | 94 | 35 |
| A20 | Pedreira (ARC) | 1,44 | 1,40 | 1,36 | 1,40 ± 0,04 | 135,7 | 128,3 | 154,8 | 139,6 ± 15,2 | 98 | 40 |
| | Americana (ARM) | 1,84 | 1,79 | 1,76 | 1,80 ± 0,04 | 135,1 | 135,4 | 136,2 | 135,6 ± 0,6 | 92 | 23 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 1,64 | 1,54 | 1,61 | 1,60 ± 0,06 | 124,0 | 122,0 | 127,7 | 124,6 ± 3,1 | 97 | 31 |
| | Campinas – privada (ARM) | 1,55 | 1,52 | 1,56 | 1,54 ± 0,02 | 126,5 | 142,0 | 125,9 | 131,5 ± 10,5 | 94 | 34 |
| | Pedreira (ARM) | 1,40 | 1,38 | 1,25 | 1,34 ± 0,09 | 124,5 | 124,5 | 123,7 | 124,2 ± 0,5 | 98 | 42 |
| | Americana (ARC) | 1,50 | 1,48 | 1,44 | 1,47 ± 0,03 | 127,1 | 123,3 | 125,5 | 125,3 ± 2,0 | 98 | 37 |
| | Campinas – privada (ARC) | 1,34 | 1,31 | 1,37 | 1,34 ± 0,03 | 247,3 | 211,0 | 188,9 | 215,7 ± 31,6 | 96 | 43 |
| | Hortolândia (ARC) | 1,91 | 1,93 | 1,97 | 1,93 ± 0,04 | 143,5 | 139,5 | 137,7 | 140,2 ± 3,3 | 93 | 17 |
| A40 | Pedreira (ARC) | 1,48 | 1,48 | 1,42 | 1,46 ± 0,04 | 180,3 | 168,6 | 150,6 | 166,5 ± 15,9 | 91 | 38 |
| | Americana (ARM) | 1,75 | 1,73 | 1,54 | 1,67 ± 0,13 | 124,4 | 130,0 | 130,4 | 128,3 ± 3,9 | 96 | 28 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 1,42 | 1,39 | 1,42 | 1,41 ± 0,02 | 130,2 | 133,3 | 129,5 | 131,0 ± 2,3 | 97 | 39 |
| | Campinas – privada (ARM) | 1,49 | 1,46 | 1,44 | 1,46 ± 0,03 | 125,1 | 122,9 | 124,7 | 124,2 ± 1,3 | 95 | 37 |
| | Pedreira (ARM) | 1,57 | 1,55 | 1,60 | 1,57 ± 0,03 | 175,3 | 168,2 | 158,9 | 167,5 ± 8,6 | 93 | 32 |

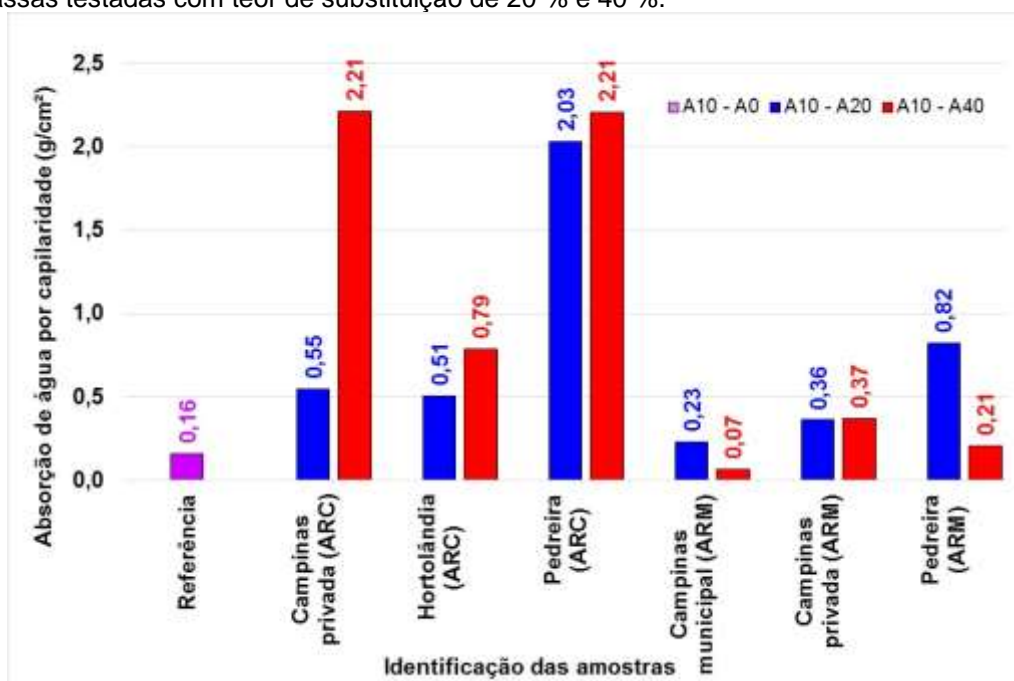
Fonte: da autora, 2017.

As análises das características físicas e mecânicas das argamassas testadas, preparadas conforme o item 4.5, no estado endurecido, após 30 dias de sua moldagem, foram realizadas com os métodos descritos no item 4.9.

5.6.5 Absorção de água por capilaridade

Quanto a absorção de água por capilaridade nas argamassas produzidas com os agregados miúdos reciclados, o menor resultado para contato de 10 minutos ($0,07 \text{ g/cm}^2$) foi obtido na argamassa A40 produzida com AMR misto da unidade municipal de Campinas. Já o maior resultado ($2,21 \text{ g/cm}^2$) foi obtido nas argamassas A40 com o AMR de concreto da unidade privada de Campinas e da unidade de Pedreira, como pode ser visto na Figura 46.

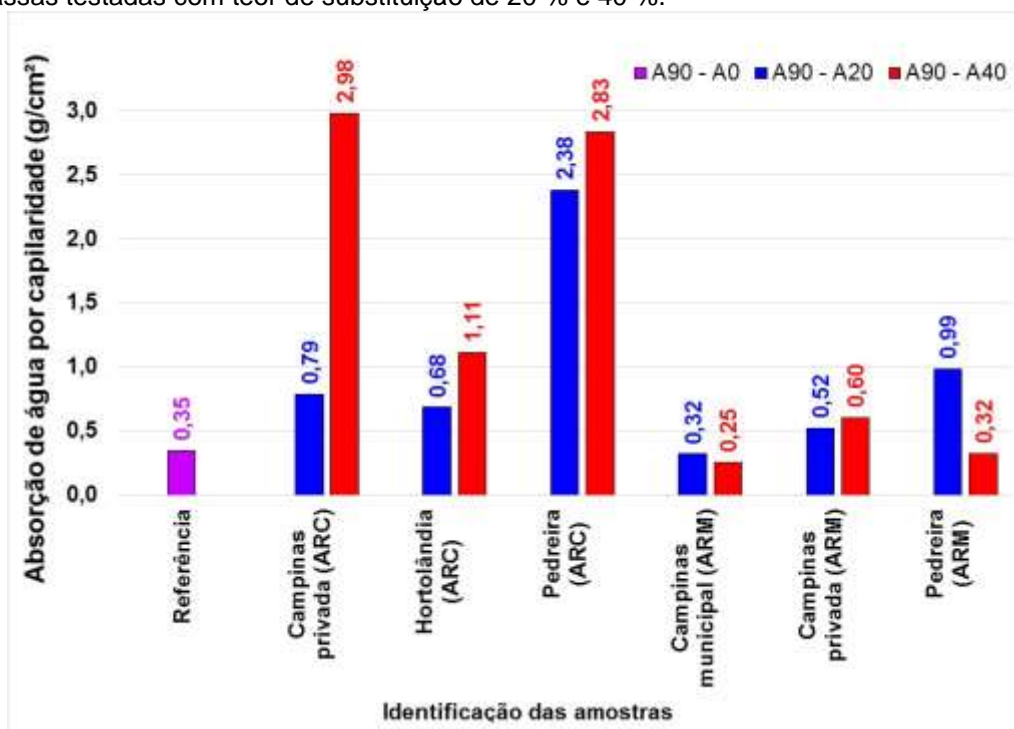
Figura 46 – Gráfico da absorção de água por capilaridade, em 10 minutos, apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017.

No ensaio de absorção de água por capilaridade com 90 minutos de contato, o comportamento dos resultados permaneceu o mesmo, como pode ser visto na Figura 47.

Figura 47 – Gráfico da absorção de água por capilaridade, em 90 minutos, apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017.

Os resultados de absorção de água em 90 minutos seguiram o mesmo padrão observado no ensaio de 10 minutos. O menor resultado foi novamente da argamassa A40 produzida com AMR misto da unidade municipal de Campinas (0,25 g/cm²). Os maiores resultados foram da argamassa A40 com o AMR de concreto da unidade privada de Campinas (2,98 g/cm²), seguido pelo da unidade de Pedreira (2,83 g/cm²).

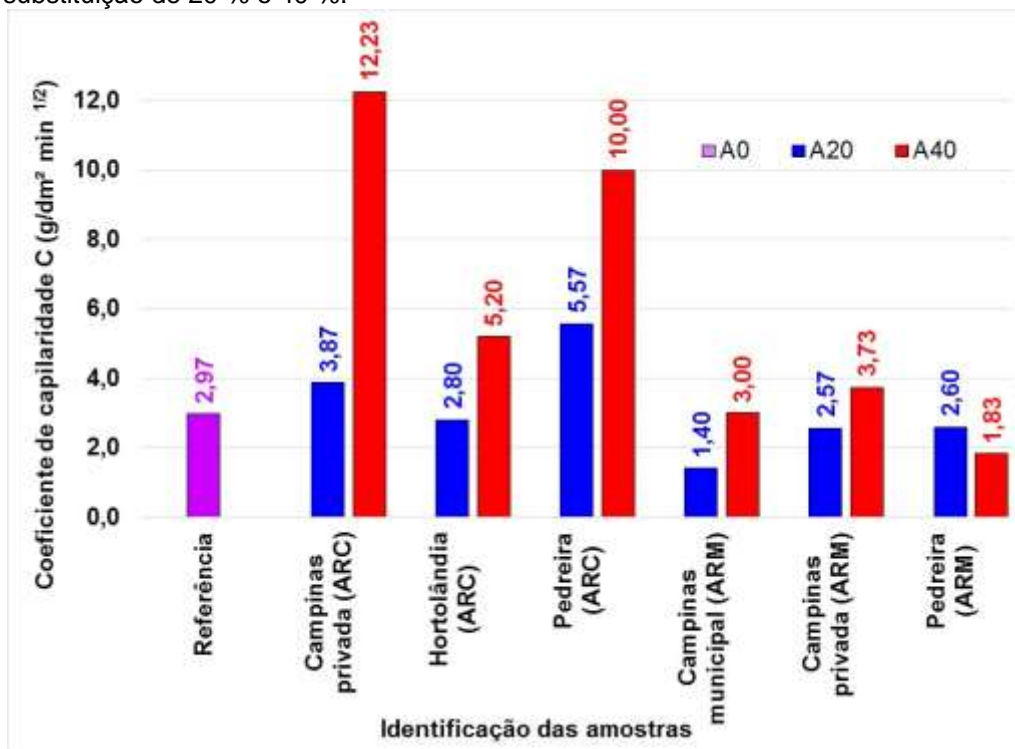
Em sua análise, Pedroso (2008) partiu do pressuposto que o uso de agregados com maior capacidade de absorção de água, influenciaria nos resultados de absorção por capilaridade em argamassas. Ele observou um aumento da absorção em traços com substituição em teores superiores a 25%, não encontrando relação entre a capilaridade da argamassa e a capacidade de absorção dos agregados miúdos reciclados.

5.6.6 Coeficiente de capilaridade

Quanto ao coeficiente de capilaridade, assim como os teores de absorção apresentados em 5.6.5, os menores resultados foram obtidos para a argamassa A40 produzida com AMR misto da unidade municipal de Campinas (1,40 g/dm² min^{1/2}).

Os maiores resultados foram obtidos para a argamassa A40 com o AMR de concreto da unidade privada de Campinas (12,23 g/dm² min^{1/2}) e da unidade de Pedreira (10,00 g/dm² min^{1/2}), como pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 – Gráfico do coeficiente de capilaridade apresentado pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017.

Diferente do observado por Pedroso (2008), neste trabalho é possível observar uma relação direta entre o aumento do coeficiente de capilaridade e o aumento do teor de substituição. Além disso, foi verificado que os maiores coeficientes de capilaridade ocorreram nas argamassas produzidas com os agregados que apresentaram os maiores valores de absorção de água: agregado reciclado de concreto da unidade privada de Campinas e da unidade de Pedreira. Para os demais agregados, que não apresentaram diferenças significativas de características quanto à absorção de água, também não foram observadas grandes variações no desempenho de suas argamassas.

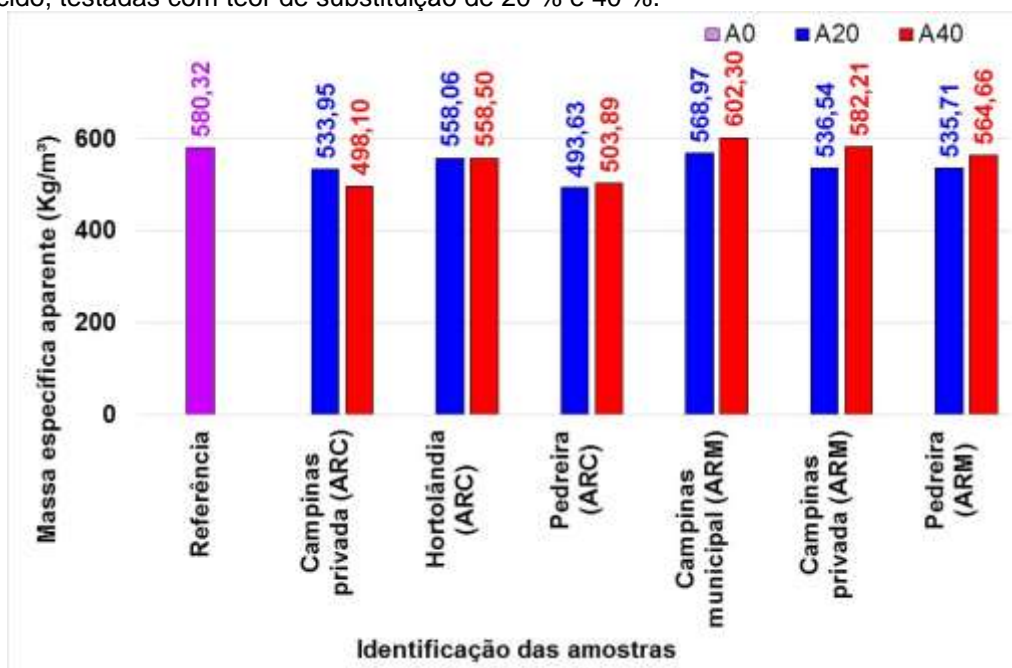
A argamassa A20 que apresentou o melhor resultado foi a com agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas (1,40 g/dm² min^{1/2}). A argamassa A40 com melhor desempenho foi a com AMR misto de Pedreira (1,83 g/dm² min^{1/2}), sendo a primeira a melhor dentre todas, com resultado superior ao da referência.

É interessante também observar que o maior índice de capilaridade ($12,33 \text{ g/dm}^2 \text{ min}^{1/2}$) foi apresentado pela argamassa que utilizou o agregado miúdo reciclado com segundo maior teor de material pulverulento (6,0 %) e com o maior teor de absorção de água (11,72 %).

5.6.7 Massa específica aparente no estado endurecido

Quanto à massa específica aparente no estado endurecido, o menor resultado foi obtido na argamassa A20 produzida com AMR de concreto de Pedreira ($493,63 \text{ Kg/m}^3$) e o maior foi obtido na argamassa A40 com o AMR misto da unidade municipal de Campinas ($602,30 \text{ Kg/m}^3$), como pode ser visto na Figura 49.

Figura 49 – Gráfico da massa específica aparente apresentado pelas argamassas, no estado endurecido, testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017.

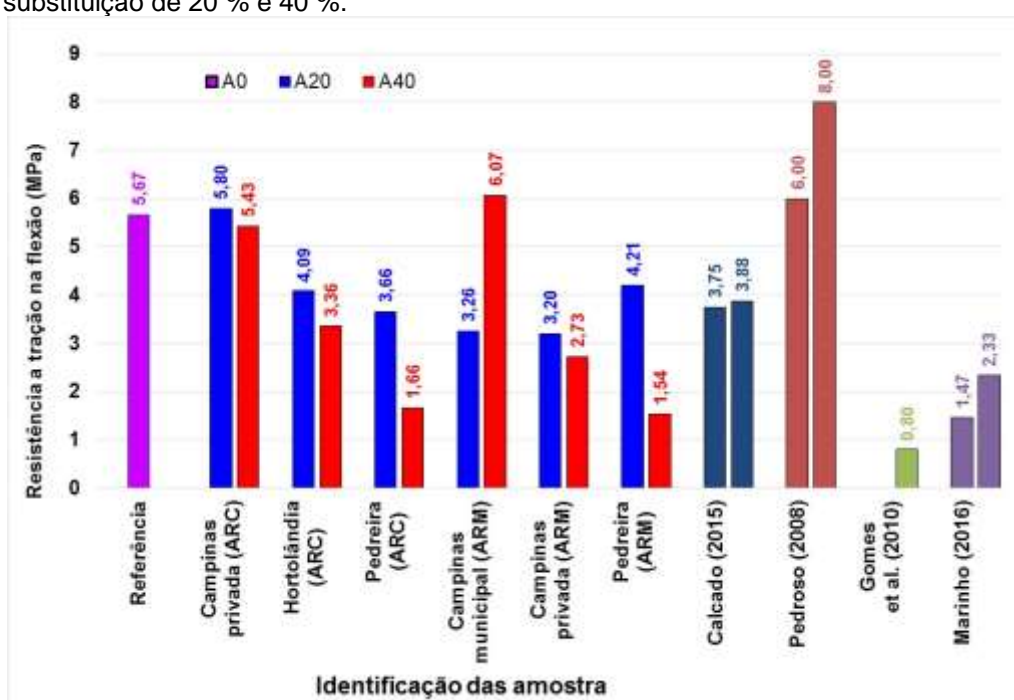
Aguiar e Selmo (2006), Costa *et al.* (2005), Gomes *et al.* (2010) e Marinho (2016) estudaram a densidade de massa no estado endurecido, característica determinada a partir de corpos de prova saturados. Estes autores estudaram também a capacidade de absorção com corpos de prova submersos e, portanto, é possível comparar seus resultados no intervalo de 300 a 600 Kg/m^3 . Os resultados encontrados neste trabalho estão dentro do mesmo intervalo.

Analisando o resultado encontrado para a massa específica aparente no estado endurecido de forma isolada, a argamassa A40 com AMR de concreto da unidade privada de Campinas apresentou o melhor resultado.

5.6.8 Resistência à tração na flexão

Para a resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com os agregados miúdos reciclados, o menor resultado foi obtido na argamassa A40 produzida com AMR de concreto de Pedreira (1,66 MPa) e o maior foi obtido na argamassa A40 com o AMR misto da unidade municipal de Campinas (6,07 MPa), como mostra a Figura 50.

Figura 50 – Gráfico da resistência à tração na flexão apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017, Calcado (2015), Pedroso (2008), Gomes et al. (2010) e Marinho (2016).

Nos estudos de argamassas produzidas com os agregados miúdos reciclados, Calcado (2015) encontrou valores entre 3,75 e 3,88 MPa, e Pedroso (2008) valores entre 6,0 e 8,0 MPa, na média, para resistência à tração na flexão. Já Marinho (2016) reportou valores entre 1,47 MPa e 2,23 MPa, e Gomes *et al.* (2010) relatou a máxima resistência à flexão de 0,8 MPa.

Pedroso (2008) encontrou melhor desempenho de resistência à tração na flexão em argamassas produzidas com agregados que apresentaram maior teor de partículas com dimensões inferiores a 0,150 mm. Essa tendência não foi observada nas argamassas desse trabalho.

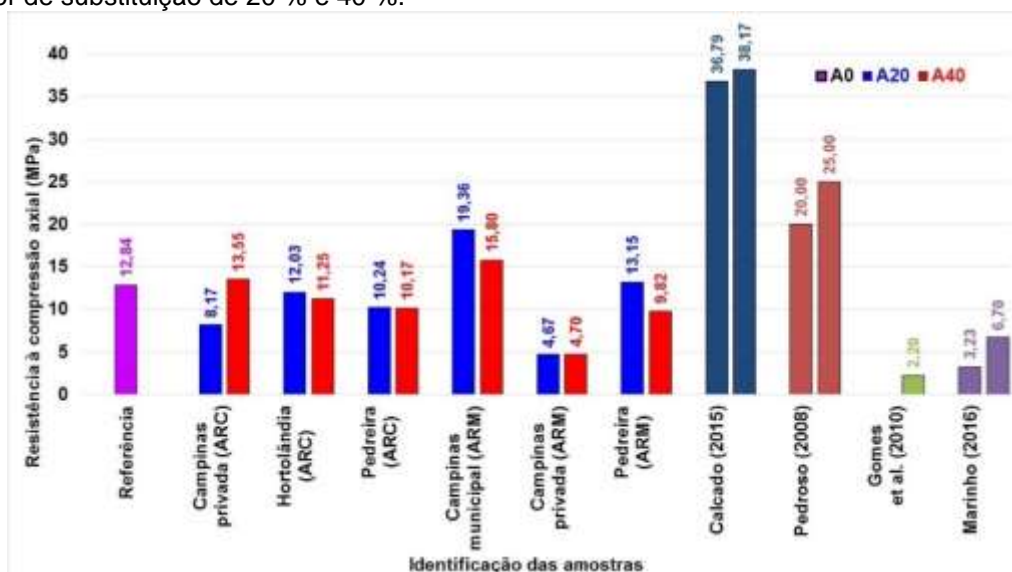
Nesse trabalho o maior valor de resistência à tração na flexão foi obtido na argamassa produzida com o agregado misto de Americana, mas é importante levar em consideração que este agregado não foi classificado como agregado miúdo, por apresentar a dimensão máxima característica de 19 mm. Portanto, não é comparável aos resultados dos demais traços estudados. O melhor resultado então foi obtido na argamassa A40 produzida com agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas.

Não foi possível observar tendência de apresentar menor resistência à tração na flexão em traços que apresentaram maior teor de ar incorporado nem tão pouco com menor massa específica aparente.

5.6.9 Resistência à compressão axial

Quanto a resistência à compressão axial das argamassas produzidas com os agregados miúdos reciclados, o menor resultado foi obtido na argamassa A20 produzida com AMR misto da unidade privada de Campinas (4,67 MPa) e o maior foi obtido nas argamassas A20 com o AMR misto da unidade municipal de Campinas (19,36 MPa), como pode ser visto na Figura 51 a seguir.

Figura 51 – Gráfico da resistência à compressão axial apresentada pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %.



Fonte: da autora, 2017, Calcado (2015), Pedroso (2008), Gomes et al. (2010) e Marinho (2016).

Pedroso (2008) trabalhou com substituição de 25 % a 100 % e encontrou resultados de resistência à compressão axial das argamassas entre 20 MPa e 25 MPa aos 28 dias de idade, com pequena perda de desempenho nos maiores teores de substituição. Calcado (2015) obteve desempenho de 36,79 MPa para 50% de substituição e 38,17 MPa para 15% de substituição. Marinho (2016) reportou resultados entre 3,23 e 6,70 MPa. Gomes *et al.* (2010) obtiveram 2,2 MPa em seu melhor resultado de resistência à compressão axial das argamassas.

Para a resistência à compressão, a argamassa A20 produzida com o agregado misto da unidade municipal de Campinas é a melhor.

Também não foi possível, como no caso da resistência à tração na flexão, observar tendência de apresentar menor resistência à compressão em traços que apresentaram maior teor de ar incorporado, nem tão pouco com menor massa específica aparente.

5.6.10 Sumário dos resultados de caracterização física e mecânica das argamassas produzidas com agregados miúdos reciclados da Região Metropolitana de Campinas em substituição parcial do agregado miúdo natural.

O melhor resultado de densidade de massa foi obtido na argamassa A20 com agregado miúdo reciclado de concreto da unidade privada de Campinas.

Quanto ao índice de consistência, a melhor argamassa foi a A20 com o agregado miúdo reciclado de concreto de Pedreira.

O melhor resultado de retenção de água foi observado na argamassa A20 com o AMR de concreto produzido em Pedreira.

A argamassa A20 com o AMR de concreto produzido em privada de Campinas apresentou o menor teor de ar incorporado, sendo considerada a melhor.

Não foi possível observar alteração nas características físicas no estado fresco que pudessem ser relacionadas ao maior ou menor teor de finos ou à absorção de água.

As argamassas que apresentaram melhor desempenho para a absorção de água por capilaridade aos 10 minutos, também foram as melhores aos 90 minutos, foram obtidas com agregado miúdo reciclado misto e, a melhor foi a A40 com agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas.

A argamassa que apresentou o melhor coeficiente de capilaridade foi a A20 com agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas.

Foram observados maiores coeficientes de capilaridade nas argamassas produzidas com os agregados que apresentaram maior capacidade de absorção de água.

A argamassa A40 com AMR de concreto da unidade privada de Campinas apresentou o melhor resultado de massa específica aparente no estado endurecido, não sendo possível observar alguma tendência de alteração que pudesse ser relacionada à massa específica do agregado miúdo reciclado utilizado.

A argamassa A40 produzida com agregado misto da unidade municipal de Campinas apresentou maior resistência à tração na flexão que as demais.

A argamassa A20 produzida com o agregado misto da unidade municipal de Campinas é a que apresentou melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão axial.

Não foi possível observar correlação do comportamento da resistência à tração na flexão e à compressão axial com maior ou menor teor de finos e absorção de água dos agregados reciclados.

De modo geral, e sem considerar que uma característica tem maior importância que outra, as argamassas A20 com AMR misto da unidade municipal de Campinas e com AMR de concreto da unidade privada de Campinas e de Pedreira, bem como a

A40 com agregado misto da unidade municipal de Campinas apresentaram os melhores resultados.

O agregado miúdo reciclado misto da unidade municipal de Campinas gerou o maior número de melhores resultados.

Na próxima página, a Tabela 27 apresenta o conjunto das características físicas das argamassas testadas no estado endurecido, após 30 dias de sua moldagem.

Tabela 27 – Resultados das características físicas e mecânicas em estado endurecido, após 30 dias de sua moldagem, apresentados pelas argamassas testadas com teor de substituição de 20 % e 40 %, em azul os melhores resultados.

| Traços | | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | Coefficiente de capilaridade (g/dm ² min ^{1/2}) | Massa específica aparente (Kg/m ³) | | | | Resistência à compressão axial (MPa) | Resistência à tração na flexão (MPa) |
|--------|----------------------------|--|-------------|--|--|----------|----------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | A10 | A90 | C médio | ρ_1 | ρ_2 | ρ_3 | ρ média | f_c médio | f_{st} médio |
| A0 | Referência | 0,16 | 0,35 | 2,97 | 589,38 | 574,81 | 576,78 | 580,32 | 12,84 | 5,67 |
| A20 | Campinas – privada (ARC) | 0,55 | 0,79 | 3,87 | 594,39 | 568,48 | 569,90 | 577,59 | 8,17 | 5,80 |
| | Hortolândia (ARC) | 0,51 | 0,68 | 2,80 | 554,33 | 568,06 | 584,51 | 568,97 | 12,03 | 4,09 |
| | Pedreira (ARC) | 2,03 | 2,38 | 5,57 | 508,99 | 524,48 | 568,38 | 533,95 | 10,24 | 3,66 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 0,23 | 0,32 | 1,40 | 541,36 | 560,52 | 572,30 | 558,06 | 19,36 | 3,26 |
| | Campinas – privada (ARM) | 0,36 | 0,52 | 2,57 | 499,95 | 509,51 | 471,44 | 493,63 | 4,67 | 3,20 |
| | Pedreira (ARM) | 0,82 | 0,99 | 2,60 | 535,93 | 516,23 | 554,98 | 535,71 | 13,15 | 4,21 |
| A40 | Campinas – privada (ARC) | 2,21 | 2,98 | 12,23 | 591,07 | 599,13 | 575,32 | 588,51 | 13,55 | 5,43 |
| | Hortolândia (ARC) | 0,79 | 1,11 | 5,20 | 595,59 | 608,40 | 602,89 | 602,30 | 11,25 | 3,36 |
| | Pedreira (ARC) | 2,21 | 2,83 | 10,00 | 505,22 | 492,22 | 496,86 | 498,10 | 10,17 | 1,66 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 0,07 | 0,25 | 3,00 | 553,80 | 560,80 | 560,90 | 558,50 | 15,80 | 6,07 |
| | Campinas – privada (ARM) | 0,37 | 0,60 | 3,73 | 496,78 | 512,85 | 502,06 | 503,89 | 4,70 | 2,73 |
| | Pedreira (ARM) | 0,21 | 0,32 | 1,83 | 583,97 | 548,66 | 561,36 | 564,66 | 9,82 | 1,54 |

Fonte: da autora, 2017.

5.7 Análise da viabilidade de substituição do agregado natural por agregado reciclado pelo método de multicritérios

5.7.1 Análise multicritérios para avaliar o desempenho físico e mecânico das argamassas

Para a aplicação de resultados em uma análise multicritérios, como dito anteriormente, os resultados devem apresentar-se normalizados, portanto é importante a identificação do comportamento do resultado de uma característica.

Na análise multicritérios, todos os resultados são tratados de forma idêntica. Sendo assim, quando existirem características com comportamento indireto, pois maiores resultados não implicam em melhor desempenho, esses devem ser harmonizados antes de serem normalizados.

Dentre as características físicas e mecânicas das argamassas, na Tabela 28 está a identificação daquelas com comportamento direto e indireto.

Tabela 28 – Ensaio e normas para caracterização física de argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos no estado fresco.

| Atributos diretos | Atributos indiretos |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Resistência à compressão | Coefficiente de capilaridade |
| Resistência à tração na flexão | Densidade de massa (estado fresco) |
| Retenção de água | Massa aparente no estado endurecido |
| | Teor de ar incorporado |

Fonte: autora, 2016.

A Tabela 29 apresenta os pesos e a interação estabelecida entre as características analisadas, seguindo a mesma correlação apresentada por Mattana *et al.* (2012). Também é possível visualizar todos os cálculos necessários para a aplicação da AHP.

Tabela 29 – Planilha eletrônica com a matriz de decisão para análise multicritérios do desempenho das argamassas.

| Categorias | Estado fresco | | | Estado endurecido | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------|----------------------------|------------|-----------------------------|----------------------------|------|
| | Densidade de massa | Retenção de água | Teor de ar incorporado | Densidade de massa | Resistência à compressão axial | Resistência à tração na flexão | Coefficiente de capilaridade | Auto vetor | Normalização do auto vetor | Auto valor | Índice de Consistência (IC) | Razão de Consistência (RC) | |
| Estado fresco | Densidade de massa | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/5 | 1/9 | 1/7 | 0,30 | 3,1% | 0,95 | | |
| | Retenção de água | 5 | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | 1,85 | 19,1% | 1,16 | | |
| | Teor de ar incorporado | 3 | 1/3 | 1 | 3 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 0,68 | 7,0% | 1,09 | | |
| Estado endurecido | Densidade de massa | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 0,37 | 3,8% | 0,87 | 0,08 | 0,06 |
| | Resistência à compressão axial | 5 | 1/3 | 3 | 3 | 1 | 1/5 | 1/5 | 0,93 | 9,6% | 1,42 | | |
| | Resistência à tração na flexão | 9 | 1 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 2,73 | 28,1% | 1,04 | | |
| | Coefficiente de capilaridade | 7 | 3 | 3 | 5 | 5 | 1 | 1 | 2,86 | 29,5% | 0,95 | | |
| Soma dos pesos | | 31,00 | 6,07 | 15,67 | 23,00 | 14,87 | 3,71 | 3,21 | 9,72 | 1,00 | 7,48 | | |

Fonte: da autora, 2017.

Com o uso da ferramenta disponibilizada por BPMSG (2016), foram realizadas vinte e uma comparações para definir o grau de importância das características em relação ao desempenho geral das argamassas (Tabela 30).

Tabela 30 – Pesos atribuídos para cada característica analisada.

| | Categoria | Peso (%) |
|-------------------|--------------------------------|----------|
| Estado fresco | Densidade de massa | 3,1 |
| | Retenção de água | 19,1 |
| | Teor de ar incorporado | 7,0 |
| Estado endurecido | Densidade de massa | 3,8 |
| | Resistência à compressão axial | 9,6 |
| | Resistência à tração na flexão | 28,1 |
| | Coeficiente de capilaridade | 29,5 |

Fonte: da autora, 2017.

5.7.2 Análise multicritérios para verificação da interferência dos fatores no resultado final para definição do teor de substituição

Essa análise foi realizada para verificar o comportamento dos resultados quando são inseridos fatores externos e que não interferem no desempenho físico e mecânico das argamassas, mas sim quando se considerada fatores de ordem ambiental.

Sendo assim, essa análise utilizou os resultados obtidos na análise multicritérios do desempenho, o percentual de contribuição para o esgotamento dos recursos naturais (Tabela 31) e de distância de transporte. Na o Tabela 32 é possível visualizar todos os cálculos necessários para essa aplicação da AHP.

A distância de transporte foi obtida utilizando o calculador de rotas do *Google Maps* inserindo como origem o endereço da unidade recicladora e da extração da areia natural de rio e, como destino, o endereço do Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Campinas, local onde foram produzidas as argamassas.

Tabela 31 – Percentual de contribuição das argamassas para o esgotamento dos recursos naturais.

| Traços | | Contribuição para esgotamento dos recursos naturais (%) |
|---------------|----------------------------|--|
| A0 | Referência | 100 |
| | Americana (ARC) | 80 |
| | Campinas – privada (ARC) | 80 |
| | Hortolândia (ARC) | 80 |
| A20 | Pedreira (ARC) | 80 |
| | Americana (ARM) | 80 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 80 |
| | Campinas – privada (ARM) | 80 |
| | Pedreira (ARM) | 80 |
| | Americana (ARC) | 60 |
| | Campinas – privada (ARC) | 60 |
| | Hortolândia (ARC) | 60 |
| A40 | Pedreira (ARC) | 60 |
| | Americana (ARM) | 60 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 60 |
| | Campinas – privada (ARM) | 60 |
| | Pedreira (ARM) | 60 |

Fonte: da autora, 2017.

Para essa primeira análise multicritérios que inclui os fatores ambientais, a matriz de decisão apresentada na Tabela 32 foi obtida atribuindo-se pesos iguais aos três fatores analisados com o objetivo de verificar o comportamento dos resultados a partir de um julgamento imparcial quando são incluídas questões de ordem ambiental para definição do teor de substituição.

Tabela 32 – Planilha eletrônica com a matriz de decisão para análise multicritérios da interferência dos fatores no resultado final.

| Categorias | Esgotamento de recursos naturais | Distância de transporte (econômico) | Desempenho da argamassa | Auto vetor | Normalização do auto vetor | Auto valor | Índice de Consistência (IC) | Razão de Consistência (RC) |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|----------------------------|------------|-----------------------------|----------------------------|
| Esgotamento de recursos minerais | 1 | 1 | 1 | 1,00 | 33,3% | 1,00 | | |
| Distância de transporte | 1 | 1 | 1 | 1,00 | 33,3% | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| Desempenho da argamassa | 1 | 1 | 1 | 1,00 | 33,3% | 1,00 | | |
| Soma dos pesos | 3 | 3 | 3 | 3,00 | 1 | 3,00 | | |

Fonte: da autora, 2017.

A partir de três comparações pôde-se definir o grau de importância de cada fator (Tabela 33).

Tabela 33 – Pesos atribuídos para cada característica analisada.

| Categoria | Peso (%) |
|----------------------------------|----------|
| Esgotamento de recursos naturais | 33,3 |
| Distância de transporte | 33,3 |
| Desempenho da argamassa | 33,3 |

Fonte: da autora, 2017.

5.7.3 Análise multicritérios para definição do teor de substituição

Essa análise foi realizada para identificar o teor de substituição e o agregado miúdo reciclado que apresentou melhor desempenho.

Nessa análise multicritérios também são abordados os fatores ambientais além do desempenho das argamassas, mas na proposição da matriz de decisão apresentada na Tabela 34 foram obtidas atribuindo-se pesos iguais para os fatores que tratam de impactos ambientais e peso maior para o desempenho físico e mecânica das argamassas, uma vez que para viabilizar a aplicação sua especificação baseia-se nas características abordadas nessa categoria.

A Tabela 34 apresenta os cálculos necessários para a definição dos pesos e verificação da consistência das comparações realizadas nessa AHP.

Tabela 34 – Planilha eletrônica com a matriz de decisão para análise multicritérios do teor de substituição.

| Categorias | Esgotamento de recursos naturais | Distância de transporte (econômico) | Desempenho da argamassa | Auto vetor | Normalização do auto vetor | Auto valor | Índice de Consistência (IC) | Razão de Consistência (RC) |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|----------------------------|------------|-----------------------------|----------------------------|
| Esgotamento de recursos minerais | 1 | 1 | 1/9 | 0,48 | 9,1% | 1,00 | | |
| Distância de transporte | 1 | 1 | 1/9 | 0,48 | 9,1% | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| Desempenho da argamassa | 9 | 9 | 1 | 4,33 | 81,8% | 1,00 | | |
| Soma dos pesos | 11,00 | 11,00 | 1,22 | 5,29 | 1 | 3,00 | | |

Fonte: da autora, 2017

A partir de três comparações, assim como feito na análise anterior, foi possível definir o grau de importância de cada fator (Tabela 35).

Tabela 35 – Pesos atribuídos para cada característica analisada.

| Categoria | Peso (%) |
|----------------------------------|----------|
| Esgotamento de recursos naturais | 9,1 |
| Distância de transporte | 9,1 |
| Desempenho da argamassa | 81,8 |

Fonte: da autora, 2017.

A definição do teor de substituição de agregado natural iniciou com a análise multicritérios do desempenho físico e mecânico das argamassas estudadas.

5.7.4 Desempenho físico e mecânico das argamassas

Como exposto no item 5.7.1, para a realização dessa análise multicritérios, foram relacionados na planilha eletrônica os resultados obtidos na avaliação de desempenho da argamassa na comparação entre os traços de argamassa estudados identificando as características físicas ou mecânicas mais relevantes para a produção e aplicação das argamassas (Tabela 37).

A Tabela 39 apresenta os valores normalizados dos resultados das argamassas, para posterior análise multicritérios, cujos resultados seguem na Tabela 41.

Seguindo os critérios e pesos estabelecidos para a análise multicritérios das características físicas e mecânicas das argamassas descritos em 5.7.1 e com a aplicação dos pesos atribuídos para cada característica analisada, é possível determinar o índice de desempenho das argamassas quanto às características físicas e mecânicas consideradas (Tabela 40).

Também foram apresentadas as planilhas eletrônicas utilizadas para a atribuição dos pesos (Tabela 29), para o procedimento de harmonização dos atributos indiretos (Tabela 38) e de normalização dos atributos indiretos após a harmonização e dos atributos diretos com o resultado da análise do tipo AHP (Tabela 39).

Na Tabela 36, segue a relação da nomenclatura empregada para identificação das unidades.

Tabela 36 - Siglas empregadas para a identificação das amostras.

| Município da unidade recicladora | Sigla | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---|
| | Agregado reciclado misto (ARM) | Agregado reciclado de concreto (ARC) |
| Campinas – municipal (ARM) | CPS-M | CPS-M |
| Campinas – privada (ARC) | CPS-P | CPS-P |
| Hortolândia (ARC) | - | HTL |
| Pedreira (ARC) | P | P |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 37 – Resultados dos ensaios para determinação das características físicas e mecânicas das argamassas.

| | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | |
| | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P |
| Densidade de massa da argamassa no estado fresco (Kg/m ³) | 900 | 1.316 | 1.523 | 1.399 | 1.596 | 1.544 | 1.344 | 1.338 | 1.934 | 1.459 | 1.410 | 1.464 | 1.570 |
| Retenção de água (%) | 93 | 92 | 94 | 98 | 97 | 94 | 98 | 96 | 93 | 91 | 97 | 95 | 93 |
| Teor de ar incorporado (%) | 18 | 44 | 35 | 40 | 31 | 34 | 42 | 43 | 17 | 38 | 39 | 37 | 32 |
| Massa específica aparente no estado endurecido (Kg/m ³) | 580 | 534 | 558 | 494 | 569 | 537 | 536 | 498 | 558 | 504 | 602 | 582 | 565 |
| Resistência à compressão axial (MPa) | 19,41 | 14,25 | 13,51 | 7,17 | 10,47 | 14,44 | 15,00 | 8,76 | 15,36 | 8,76 | 12,10 | 14,90 | 12,69 |
| Resistência à tração na flexão (MPa) | 5,91 | 3,44 | 2,98 | 3,39 | 5,49 | 3,12 | 4,89 | 3,76 | 6,23 | 3,76 | 3,76 | 6,00 | 1,24 |
| Coefficiente de capilaridade (%) | 3,0 | 3,9 | 2,8 | 5,6 | 1,4 | 2,6 | 2,6 | 12,2 | 5,2 | 10,0 | 3,0 | 3,7 | 1,8 |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 38 – Harmonização dos resultados das características físicas e mecânicas das argamassas, considerados como atributos indiretos e identificados em vermelho.

| Categorias | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | | soma |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|
| | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | | |
| | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | |
| Densidade de massa da argamassa no estado fresco | 20,8856 | 14,2834 | 12,3421 | 13,4360 | 11,7776 | 12,174 2 | 13,985 9 | 14,048 6 | 9,7192 | 12,883 5 | 13,331 2 | 12,839 5 | 11,972 6 | 173,6794 |
| Retenção de água | 93,15 | 92,43 | 93,83 | 97,59 | 97,09 | 94,06 | 97,51 | 96,48 | 92,72 | 91,06 | 96,99 | 95,10 | 93,48 | 1231,48551 2 |
| Teor de ar incorporado | 24,8693 | 10,3306 | 13,0207 | 11,2258 | 14,3539 | 13,299 3 | 10,708 4 | 10,518 4 | 26,494 6 | 11,909 4 | 11,434 3 | 12,001 2 | 14,024 7 | 184,1908 |
| Massa específica aparente no estado endurecido | 12,2636 | 13,3287 | 12,7528 | 14,4173 | 12,5083 | 13,264 4 | 13,284 8 | 14,288 0 | 12,742 8 | 14,123 7 | 11,816 2 | 12,223 8 | 12,603 7 | 169,6182 |
| Resistência à compressão axial | 19,41 | 14,25 | 13,51 | 7,17 | 10,47 | 14,44 | 15,00 | 8,76 | 15,36 | 8,76 | 12,10 | 14,90 | 12,69 | 166,791666 7 |
| Resistência à tração na flexão | 5,91 | 3,44 | 2,98 | 3,39 | 5,49 | 3,12 | 4,89 | 3,76 | 6,23 | 3,76 | 3,76 | 6,00 | 1,24 | 53,97 |
| Coeficiente de capilaridade | 19,4719 | 14,9397 | 20,6310 | 10,3772 | 41,2619 | 22,506 5 | 22,217 9 | 4,7221 | 11,109 0 | 5,7767 | 19,255 6 | 15,473 2 | 31,509 1 | 239,2517 |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 39 – Resultados normalizados dos ensaios para determinação das características físicas e mecânicas das argamassas.

| RESULTADOS NORMALIZADOS | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|------------|----------|--------------|--------------|----------|---------------|
| Categorias | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | | soma |
| | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | | |
| | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | |
| Densidade de massa da argamassa no estado fresco | 0,1203 | 0,0822 | 0,0711 | 0,0774 | 0,0678 | 0,0701 | 0,0805 | 0,0809 | 0,0560 | 0,0742 | 0,0768 | 0,0739 | 0,0689 | 1,0000 |
| Retenção de água | 0,0756 | 0,0751 | 0,0762 | 0,0792 | 0,0788 | 0,0764 | 0,0792 | 0,0783 | 0,0753 | 0,0739 | 0,0788 | 0,0772 | 0,0759 | 1,0000 |
| Teor de ar incorporado | 0,1350 | 0,0561 | 0,0707 | 0,0609 | 0,0779 | 0,0722 | 0,0581 | 0,0571 | 0,1438 | 0,0647 | 0,0621 | 0,0652 | 0,0761 | 1,0000 |
| Massa específica aparente no estado endurecido | 0,0723 | 0,0786 | 0,0752 | 0,0850 | 0,0737 | 0,0782 | 0,0783 | 0,0842 | 0,0751 | 0,0833 | 0,0697 | 0,0721 | 0,0743 | 1,0000 |
| Resistência à compressão axial | 0,1164 | 0,0854 | 0,0810 | 0,0430 | 0,0628 | 0,0866 | 0,0899 | 0,0525 | 0,0921 | 0,0525 | 0,0725 | 0,0893 | 0,0761 | 1,0000 |
| Resistência à tração na flexão | 0,1095 | 0,0637 | 0,0552 | 0,0628 | 0,1017 | 0,0578 | 0,0906 | 0,0697 | 0,1154 | 0,0697 | 0,0697 | 0,1112 | 0,0230 | 1,0000 |
| Coeficiente de capilaridade | 0,0814 | 0,0624 | 0,0862 | 0,0434 | 0,1725 | 0,0941 | 0,0929 | 0,0197 | 0,0464 | 0,0241 | 0,0805 | 0,0647 | 0,1317 | 1,0000 |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 40 – Resultados da análise multicritérios para determinação do desempenho das argamassas quanto as suas características físicas e mecânicas.

| Categorias | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | |
| | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P |
| Densidade de massa da argamassa no estado fresco | 0,0037 | 0,0025 | 0,0022 | 0,0024 | 0,0021 | 0,0022 | 0,0025 | 0,0025 | 0,0017 | 0,0023 | 0,0024 | 0,0023 | 0,0021 |
| Retenção de água | 0,0144 | 0,0143 | 0,0145 | 0,0151 | 0,0150 | 0,0146 | 0,0151 | 0,0149 | 0,0144 | 0,0141 | 0,0150 | 0,0147 | 0,0145 |
| Teor de ar incorporado | 0,0094 | 0,0039 | 0,0049 | 0,0043 | 0,0054 | 0,0050 | 0,0041 | 0,0040 | 0,0101 | 0,0045 | 0,0043 | 0,0046 | 0,0053 |
| Massa específica aparente no estado endurecido | 0,0027 | 0,0030 | 0,0028 | 0,0032 | 0,0028 | 0,0029 | 0,0030 | 0,0032 | 0,0028 | 0,0031 | 0,0026 | 0,0027 | 0,0028 |
| Resistência à compressão axial | 0,0111 | 0,0082 | 0,0077 | 0,0041 | 0,0060 | 0,0083 | 0,0086 | 0,0050 | 0,0088 | 0,0050 | 0,0069 | 0,0085 | 0,0073 |
| Resistência à tração na flexão | 0,0307 | 0,0179 | 0,0155 | 0,0176 | 0,0286 | 0,0162 | 0,0254 | 0,0196 | 0,0324 | 0,0196 | 0,0196 | 0,0312 | 0,0065 |
| Coeficiente de capilaridade | 0,0240 | 0,0184 | 0,0254 | 0,0128 | 0,0508 | 0,0277 | 0,0274 | 0,0058 | 0,0137 | 0,0071 | 0,0237 | 0,0191 | 0,0388 |
| Desempenho da argamassa | 0,0961 | 0,0682 | 0,0731 | 0,0595 | 0,1107 | 0,0769 | 0,0860 | 0,0550 | 0,0839 | 0,0557 | 0,0745 | 0,0831 | 0,0772 |

Fonte: da autora, 2017.

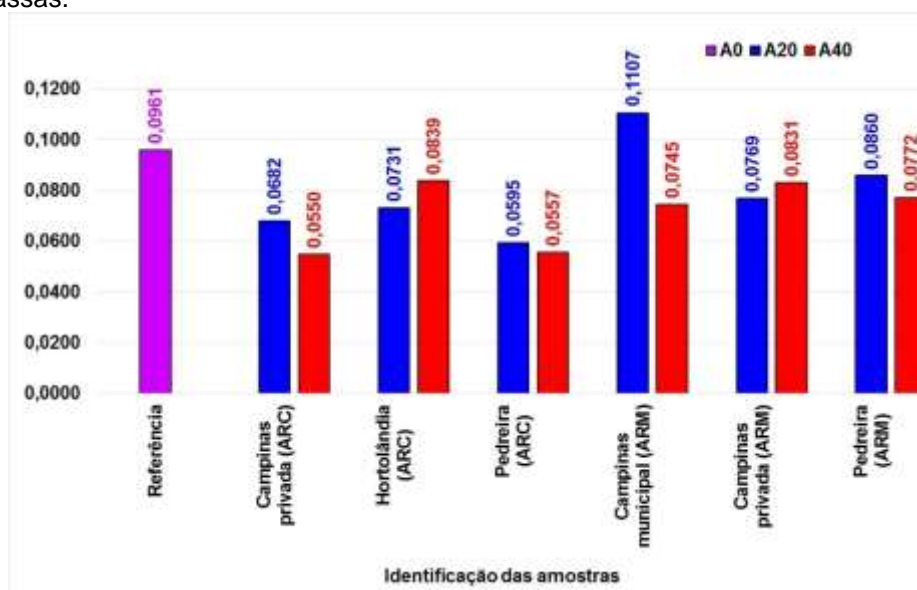
Tabela 41 – Índice de desempenho das características físicas e mecânicas para cada traço de argamassa.

| | Traços | Desempenho |
|-----|----------------------------|-------------------|
| A0 | Referência | 0,0961 |
| | Campinas – privada (ARC) | 0,0682 |
| | Hortolândia (ARC) | 0,0731 |
| | Pedreira (ARC) | 0,0595 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 0,1107 |
| | Campinas – privada (ARM) | 0,0769 |
| | Pedreira (ARM) | 0,0860 |
| A40 | Campinas – privada (ARC) | 0,0550 |
| | Hortolândia (ARC) | 0,0839 |
| | Pedreira (ARC) | 0,0557 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 0,0745 |
| | Campinas – privada (ARM) | 0,0831 |
| | Pedreira (ARM) | 0,0772 |

Fonte: da autora, 2017.

A partir da análise multicritérios, pode-se identificar que o melhor traço, em se tratando de desempenho, foi a argamassa do tipo A20 produzidas com agregado reciclado misto da unidade municipal de Campinas/SP (0,1107), tendo obtido desempenho superior ao da argamassa referência, como pode ser observado na Figura 52.

Figura 52 – Gráfico com os resultados na análise multicritérios do desempenho físico e mecânico das argamassas.



Fonte: da autora, 2017.

5.7.5 Distância de transporte

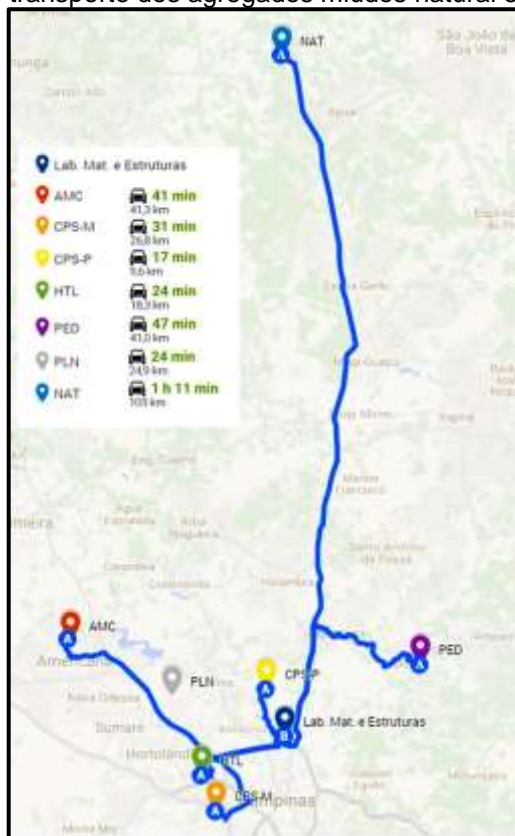
Como exposto em 5.7.2, o levantamento das rotas e a distância percorrida para a obtenção dos agregados seguem relacionadas, respectivamente, na Figura 53 e na Tabela 42.

Tabela 42 – Distâncias de transporte.

| Local de origem | Distância ao destino (Km) |
|---|---------------------------|
| Areia natural de rio | |
| Extração situada na SP-340 (KM 212) em Aguaí/SP | 103 |
| Agregado miúdo reciclado | |
| Unidade recicladora de Americana/SP | 41,3 |
| Unidade recicladora municipal de Campinas/SP | 26,8 |
| Unidade recicladora privada de Campinas/SP | 9,6 |
| Unidade recicladora de Hortolândia/SP | 18,3 |
| Unidade recicladora de Paulínia/SP | 24,9 |
| Unidade recicladora de Pedreira/SP | 41,0 |

Fonte: da autora, 2017.

Figura 53 – Cenários de transporte dos agregados miúdos natural e reciclado.



Fonte: da autora a partir do Google Maps, 2017.

Com base nas distâncias apresentadas na Tabela 42, foram calculadas as distâncias totais percorridas para a obtenção dos agregados miúdos necessários para a produção de cada tipo de argamassa (Tabela 43). Como o trabalho não aborda a quantidade de argamassa produzida, a distância total utilizada é a soma da distância necessária para obter o agregado natural e reciclado, sem considerar massa ou volume.

Tabela 43 – Resultados das distâncias de transporte dos agregados para produção de argamassas.

| Traços | Distâncias percorridas para o transporte dos agregados (Km) | | |
|--------------------------------|---|-----------|-------|
| | Natural | Reciclado | Total |
| A0 Referência | 103 | | 103 |
| Campinas – privada (ARC) | 103 | 9,6 | 112,6 |
| Hortolândia (ARC) | 103 | 18,3 | 121,3 |
| Pedreira (ARC) | 103 | 41,0 | 144,0 |
| A20 Campinas – municipal (ARM) | 103 | 26,8 | 129,8 |
| Campinas – privada (ARM) | 103 | 9,6 | 112,6 |
| Paulínia (ARM) | 103 | 24,9 | 127,9 |
| Pedreira (ARM) | 103 | 41 | 144,0 |
| Campinas – privada (ARC) | 103 | 9,6 | 112,6 |
| Hortolândia (ARC) | 103 | 18,3 | 121,3 |
| Pedreira (ARC) | 103 | 41,0 | 144,0 |
| A40 Campinas – municipal (ARM) | 103 | 26,8 | 129,8 |
| Campinas – privada (ARM) | 103 | 9,6 | 112,6 |
| Paulínia (ARM) | 103 | 24,9 | 127,9 |
| Pedreira (ARM) | 103 | 41,0 | 144,0 |

Fonte: da autora, 2017.

5.7.1 Interferência dos fatores no resultado final para definição do teor de substituição.

Como exposto no item 5.7.2, para a proposição do teor de substituição do agregado natural de rio por agregado miúdo reciclado, na comparação entre os traços de argamassa estudados, foram identificados o desempenho das argamassas quanto as características físicas ou mecânicas, a contribuição do traço para o esgotamento dos recursos naturais e a distância de transporte percorrida para obtenção do material necessário para sua produção.

Para essa análise multicritérios os resultados (Tabela 44) de cada função foram analisados quanto ao seu comportamento. O esgotamento dos recursos naturais e a distâncias de transporte foram tratados como atributos indiretos e,

portanto, foram inicialmente harmonizados (Tabela 45). O desempenho foi tratado como atributo direto.

A Tabela 46 apresenta os valores obtidos após a normalização. As planilhas eletrônicas utilizadas para realizar essa AHP seguem apresentadas nas Tabelas 44 a 46.

Tabela 44 – Características das argamassas quanto às funções-critérios analisadas, identificadas em vermelho as características consideradas como atributos indiretos.

| Categorias | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | | soma | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|------------|
| | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | | | |
| | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | | |
| Esgotamento de recursos naturais (%) | 100 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 940 |
| Distância de transporte do agregado natural (Km) | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | 103,0 | |
| Distância de transporte do agregado reciclado (Km) | | 9,6 | 18,3 | 41,0 | 26,8 | 9,6 | 41,0 | 9,6 | 18,3 | 41,0 | 26,8 | 9,6 | 41,0 | | |
| Distância de transporte total (Km) | 103,0 | 112,6 | 121,3 | 144,0 | 129,8 | 112,6 | 144,0 | 112,6 | 121,3 | 144,0 | 129,8 | 112,6 | 144,0 | 1631,6 | |
| Desempenho da argamassa | 0,0961 | 0,0682 | 0,0731 | 0,0595 | 0,1107 | 0,0769 | 0,0860 | 0,0550 | 0,0839 | 0,0557 | 0,0745 | 0,0831 | 0,0772 | 1,0000 | |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 45 – Harmonização dos resultados para análise da interferência dos fatores ambientais (atributos indiretos identificados em vermelho).

| Categorias | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | | soma | |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | | | |
| | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | | |
| Esgotamento de recursos minerais | 9,4000 | 11,7500 | 11,7500 | 11,7500 | 11,7500 | 11,7500 | 11,7500 | 15,6667 | 15,6667 | 15,6667 | 15,6667 | 15,6667 | 15,6667 | 15,6667 | 173,9000 |
| Distância de transporte (econômico) | 15,8408 | 14,4902 | 13,4509 | 11,3306 | 12,5701 | 14,4902 | 11,3306 | 14,4902 | 13,4509 | 11,3306 | 12,5701 | 14,4902 | 11,3306 | 171,1660 | |
| Desempenho da argamassa | 0,0961 | 0,0682 | 0,0731 | 0,0595 | 0,1107 | 0,0769 | 0,0860 | 0,0550 | 0,0839 | 0,0557 | 0,0745 | 0,0831 | 0,0772 | 1,0000 | |

Fonte: da autora, 2017.

Tabela 46 – Resultados normalizados para análise da interferência dos fatores ambientais.

| Categorias | PESO | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| | | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | | |
| | | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | |
| Esgotamento de recursos minerais | 33,3% | 0,0180 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0300 | 0,0300 | 0,0300 | 0,0300 | 0,0300 | 0,0300 |
| Distância de transporte (econômico) | 33,3% | 0,0308 | 0,0282 | 0,0262 | 0,0221 | 0,0245 | 0,0282 | 0,0221 | 0,0282 | 0,0262 | 0,0221 | 0,0245 | 0,0282 | 0,0221 | |
| Desempenho da argamassa | 33,3% | 0,0320 | 0,0227 | 0,0244 | 0,0198 | 0,0369 | 0,0256 | 0,0287 | 0,0183 | 0,0280 | 0,0186 | 0,0248 | 0,0277 | 0,0257 | |
| Análise ambiental | | 0,0809 | 0,0735 | 0,0731 | 0,0644 | 0,0839 | 0,0764 | 0,0732 | 0,0766 | 0,0842 | 0,0707 | 0,0794 | 0,0859 | 0,0778 | |

Fonte: da autora, 2017.

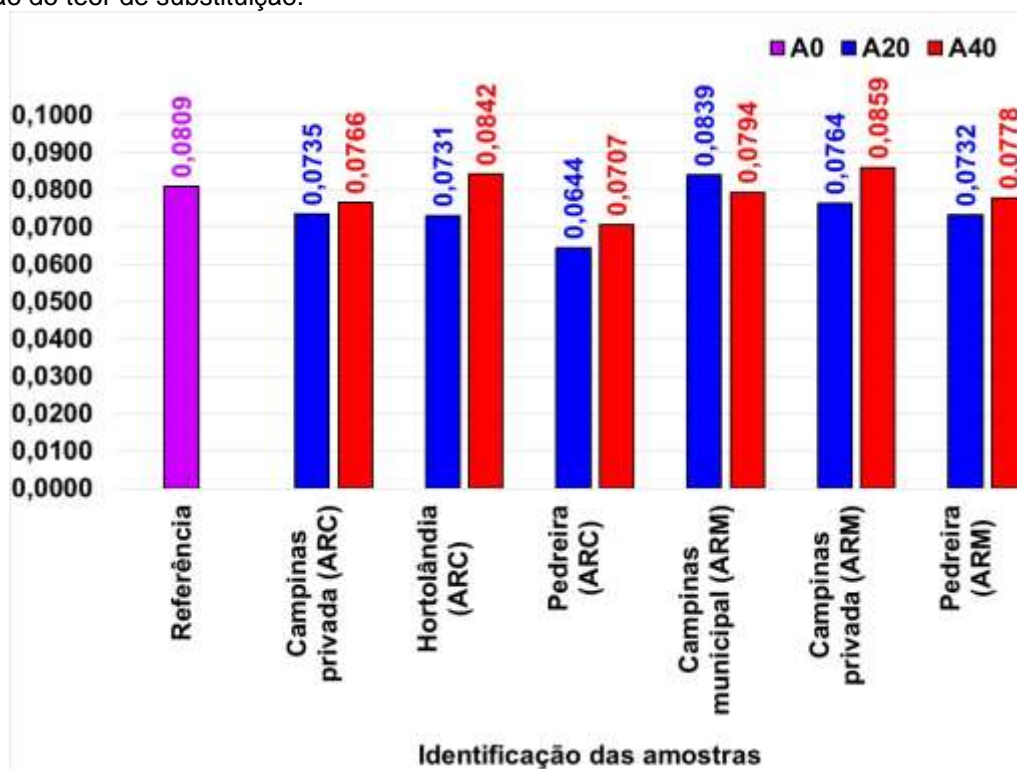
A partir da AHP realizada para analisar a interferência dos fatores ambientais para determinação do teor de substituição, é possível identificar que os melhores resultados, em se tratando de uma análise imparcial com atribuição de pesos iguais a todos os fatores analisados, foram: a argamassa do tipo A40 produzida com agregado reciclado misto da unidade privada de Campinas/SP (0,0859), seguida pela A40 produzida com agregado miúdo reciclado de concreto da unidade de Hortolândia (0,0842) e da A20 com agregado reciclado misto da unidade municipal de Campinas (0,0839), tendo obtido desempenho superior ao da argamassa referência (0,0809), como pode ser observado na Tabela 47 e na Figura 54.

Tabela 47 – Índice de desempenho da influência dos fatores ambientais.

| Traços | | Desempenho |
|---------------|----------------------------|-------------------|
| A0 | Referência | 0,0809 |
| | Campinas – privada (ARC) | 0,0735 |
| | Hortolândia (ARC) | 0,0731 |
| A20 | Pedreira (ARC) | 0,0644 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 0,0839 |
| | Campinas – privada (ARM) | 0,0764 |
| | Pedreira (ARM) | 0,0732 |
| | Campinas – privada (ARC) | 0,0766 |
| | Hortolândia (ARC) | 0,0842 |
| A40 | Pedreira (ARC) | 0,0707 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 0,0794 |
| | Campinas – privada (ARM) | 0,0859 |
| | Pedreira (ARM) | 0,0778 |

Fonte: da autora, 2017.

Figura 54 – Gráfico com os resultados na análise multicritérios da interferência dos fatores para a definição do teor de substituição.



Fonte: da autora, 2017.

5.7.2 Definição do teor de substituição.

Em seu trabalho Mattana *et al.* (2012) atribuíram pesos para as categorias consideradas na análise do desempenho físico e mecânico das argamassas baseando-se no consenso de quatro especialistas. Portanto, como ainda não há bibliografia técnico-científica que ajude a fixar o grau de importância que uma propriedade tem em relação a outra, caberá aos avaliadores escolher essa correlação a partir das comparações entre elas. A mesma observação vale para a atribuição de pesos aos fatores ambientais, que precisam ser considerados nestas análises.

Assim sendo, para essa análise multicritérios, os resultados utilizados foram os mesmos de 5.7.1, sendo alterados apenas os pesos das categorias, que foram apresentados em 5.7.3 na Tabela 35.

A planilha eletrônica utilizada para realizar essa AHP pode ser analisada na Tabela 48.

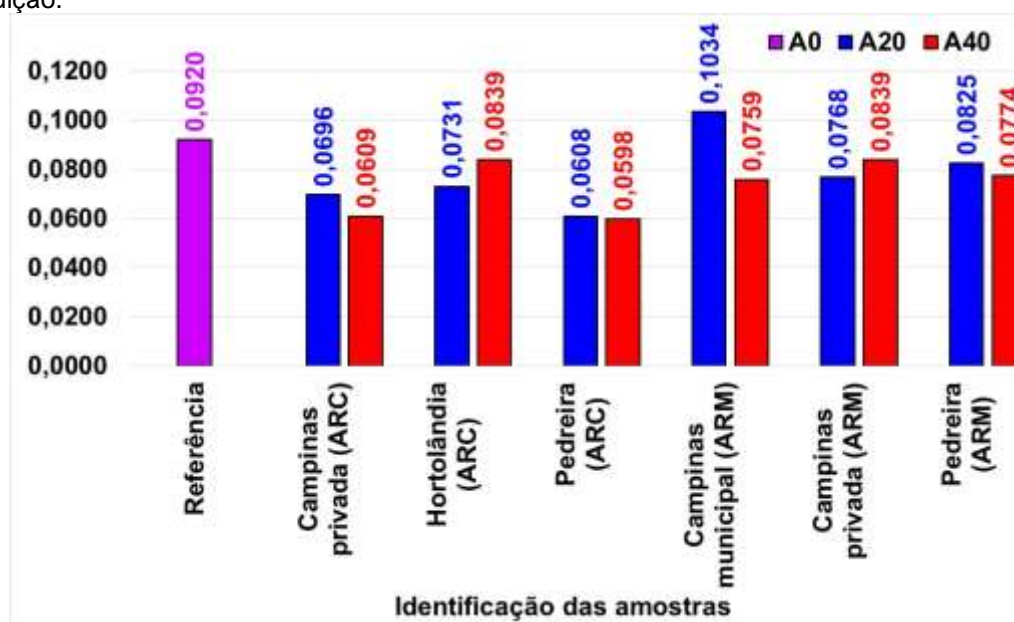
Tabela 48 – Resultados normalizados para análise para determinação do teor de substituição.

| Categorias | PESO | A0 | A20 | | | | | | A40 | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| | | | ARC | | | ARM | | | ARC | | | ARM | | | |
| | | | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | CPS-P | HTL | P | CPS-M | CPS-P | P | |
| Esgotamento de recursos minerais | 9,1% | 0,0049 | 0,0061 | 0,0061 | 0,0061 | 0,0061 | 0,0061 | 0,0061 | 0,0061 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0082 |
| Distância de transporte (econômico) | 9,1% | 0,0084 | 0,0077 | 0,0071 | 0,0060 | 0,0067 | 0,0077 | 0,0060 | 0,0077 | 0,0071 | 0,0060 | 0,0067 | 0,0077 | 0,0060 | |
| Desempenho da argamassa | 81,8% | 0,0787 | 0,0558 | 0,0598 | 0,0487 | 0,0906 | 0,0629 | 0,0704 | 0,0450 | 0,0686 | 0,0456 | 0,0610 | 0,0680 | 0,0632 | |
| Análise ambiental | | 0,0920 | 0,0696 | 0,0731 | 0,0608 | 0,1034 | 0,0768 | 0,0825 | 0,0609 | 0,0839 | 0,0598 | 0,0759 | 0,0839 | 0,0774 | |

Fonte: da autora, 2017.

A partir desta AHP, realizada agora para determinar o teor de substituição do agregado natural de rio por agregado reciclado na produção de argamassas, foi possível identificar que o melhor resultado na argamassa do tipo A20 produzidas com agregado reciclado misto da unidade municipal de Campinas/SP (0,1034), tendo obtido desempenho superior ao da argamassa referência (0,0920), como pode ser observado na Figura 55 e na Tabela 49.

Figura 55 – Gráfico com os resultados na análise multicritérios para identificação do teor de substituição.



Fonte: da autora, 2017.

Tabela 49 – Índice de desempenho dos teores de substituição.

| Traços | | Desempenho |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| A0 | Referência | 0,0920 |
| A20 | Campinas – privada (ARC) | 0,0696 |
| | Hortolândia (ARC) | 0,0731 |
| | Pedreira (ARC) | 0,0608 |
| | Campinas – municipal (ARM) | 0,1034 |
| | Campinas – privada (ARM) | 0,0768 |
| | Pedreira (ARM) | 0,0825 |
| | A40 | Campinas – privada (ARC) |
| Hortolândia (ARC) | | 0,0839 |
| Pedreira (ARC) | | 0,0598 |
| Campinas – municipal (ARM) | | 0,0759 |
| Campinas – privada (ARM) | | 0,0839 |
| Pedreira (ARM) | | 0,0774 |

Fonte: da autora, 2017.

Quanto aos resultados das três análises multicritérios desenvolvidas nesse trabalho, a classificação das argamassas em cada análise pode ser observada na Tabela 50. Observa-se que para os pesos atribuídos para a determinação do teor de substituição, o melhor resultado (números 1 na Tabela 50) obtido na análise do desempenho físico e mecânico, foi a mesma que resultou no melhor teor de substituição, tendo superado a argamassa de referência que ficou em segundo lugar.

Tabela 50 – Resultado comparativo das análises multicritérios realizadas, os números em negrito indicando da melhor para a pior alternativa.

| Desempenho físico e mecânico | | Interferência dos impactos ambientais | | Teor de substituição | |
|-------------------------------------|---------------|--|---------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | A20 ARM CPS-M | 1 | A40 ARM CPS-P | 1 | A20 ARM CPS-M |
| 2 | A0 | 2 | A40 ARC HTL | 2 | A0 |
| 3 | A20 ARM P | 3 | A20 ARM CPS-M | 3 | A40 ARC HTL |
| 4 | A40 ARC HTL | 4 | A0 | 4 | A40 ARM CPS-P |
| 5 | A40 ARM CPS-P | 5 | A40 ARM CPS-M | 5 | A20 ARM P |
| 6 | A40 ARM P | 6 | A40 ARM P | 6 | A40 ARM P |
| 7 | A20 ARM CPS-P | 7 | A40 ARC CPS-P | 7 | A20 ARM CPS-P |
| 8 | A40 ARM CPS-M | 8 | A20 ARM CPS-P | 8 | A40 ARM CPS-M |
| 9 | A20 ARC HTL | 9 | A20 ARC CPS-P | 9 | A20 ARC HTL |
| 10 | A20 ARC CPS-P | 10 | A20 ARM P | 10 | A20 ARC CPS-P |
| 11 | A20 ARC P | 11 | A20 ARC HTL | 11 | A40 ARC CPS-P |
| 12 | A40 ARC P | 12 | A40 ARC P | 12 | A20 ARC P |
| 13 | A40 ARC CPS-P | 13 | A20 ARC P | 13 | A40 ARC P |

Fonte: da autora, 2017.

Apesar das argamassas com 40% de substituição não apresentarem condições de aplicabilidade, como demonstrado pelos resultados do índice de consistência, não foi possível observar alguma tendência de perda de desempenho com o aumento da substituição.

Assim como salientado por Mattana *et al.* (2012), é importante mencionar que não é possível considerar os resultados obtidos para estas argamassas como um valor padrão para cada traço ou material empregado, uma vez que por ser gerado em um processo de reciclagem de entulhos, o agregado miúdo reciclado não apresentará as mesmas características, propriedades e tão pouco desempenho devido a sua natureza heterogênea.

6 CONCLUSÕES

6.1 A situação da Região Metropolitana de Campinas com relação à reciclagem dos RCC

Todos os vinte municípios pertencentes à região metropolitana de Campinas apresentam plano municipal ou integrado para gestão de seus resíduos sólidos.

Alguns municípios formaram consórcios intermunicipais para que a destinação ambientalmente adequada de seus resíduos pudesse ser economicamente viável.

Existem unidades recicladoras privadas em operação na região metropolitana de Campinas, o que reforça que existe viabilidade técnica e econômica para a reciclagem e uso dos agregados reciclados produzidos.

Na região metropolitana de Campinas operam quatro usinas privadas, uma municipal e uma fruto de parceria público-privada. Além disso, os municípios que fazem parte dos consórcios CISBRA e CONSAB dispõem, cada um, de uma unidade itinerante de reciclagem de resíduos de construção e demolição que atende a todos os municípios através de agendamento, permanecendo o tempo necessário para processar o material depositado de forma provisório em áreas de transbordo, produzindo agregados reciclados que são utilizados pela esfera municipal em serviços de terraplanagem e revestimento primário de vias não asfaltadas.

Não foi possível coletar amostras apenas da unidade situada em Paulínia, pois a unidade não está em operação. Para as demais unidades foram coletadas amostras de todos os tipos de agregado miúdo reciclado produzidos nas unidades (misto e de concreto).

As amostras de campo foram coletadas de acordo com os procedimentos prescritos por ABNT NBR NM26:2009 (ABNT, 2009c) e reduzidas para que pudessem ser estudadas, de acordo com ABNT NBR NM27:2000 (ABNT, 2000a).

6.2 Características físicas e químicas dos agregados reciclados amostrados

A determinação da composição granulométrica permitiu verificar que as unidades estão preparadas para realizar a classificação dos materiais segundo as faixas granulométricas de agregado miúdo prescritas para uso do material na produção de concreto sem fins estruturais e argamassas.

A unidade de Americana opera com produção de material com granulação média, mas não apresenta regularidade na classificação pois o agregado reciclado

misto foi identificado como agregado miúdo, mas suas características não permitem tal classificação. A unidade recicladora privada de Campinas também forneceu materiais com curvas granulométricas bem diferentes para seus agregados miúdos (de concreto e misto). Em Pedreira a unidade possui descontinuidade granulométrica na peneira 2,4 mm. As demais unidades apresentaram granulometria na zona ótima.

Quanto ao teor de material fino (com dimensão menor que 75 μm) presente nos agregados, os agregados reciclados de todas as unidades atenderam aos limites impostos pela ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d), apresentando valores não muito superiores ao limite imposto aos agregados naturais.

Analisando os valores obtidos no ensaio para determinação da absorção de água dos agregados reciclados coletados, verifica-se diferença significativa quando se compara os valores dos agregados de concreto. Nos agregados reciclados mistos, a diferença é menor, mas também demonstra heterogeneidade em sua composição.

Os valores encontrados para a absorção de água não são superiores aos valores estipulados como limite aos agregados reciclados misto e de concreto o que novamente viabiliza seu uso, exceto para o agregado miúdo reciclado de concreto de Pedreira.

Nenhuma amostra de agregado reciclado (de concreto e misto) apresentou teor de torrões de argila e materiais friáveis que atende à ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d). Os resultados podem indicar falha no processo de triagem e armazenamento de material para produção do material oferecido pela unidade. A presença excessiva de torrões de argila e materiais friáveis pode ser oriundo de contaminação de solo ou material argiloso no entulho utilizado para sua produção ou no processo de abastecimento do triturador.

Os resultados obtidos no ensaio de caracterização para determinação da massa específica e massa específica aparente, assim como na determinação da absorção de água apresentaram diferença significativa com relação à absorção, o que reforça a hipótese de heterogeneidade do material.

Como exposto anteriormente, o ensaio qualitativo, com interpretação visual do resultado, indicou presença excessiva de impureza orgânica nas amostras de agregado miúdo reciclado de concreto de Hortolândia e de agregado reciclado misto da unidade privada de Campinas. Diferente do teor de material fino, esse tipo de contaminação pode ser resultado de contaminação do material originalmente recebido pela unidade, não necessariamente indicando falha processo de triagem e

armazenamento, até porque apenas o material misto da unidade privada de Campinas foi reprovado.

A ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) não especifica valor máximo para o teor de sais solúveis, mas existem os limites de 1% para cloretos e 1% para sulfatos. Mesmo existindo amostras que apresentaram teor de sais solúveis superior a 1%, todas foram aprovadas quanto ao teor de sulfatos e de íons cloretos.

Os resultados obtidos a 350 °C mostram menor perda ao fogo quando comparado com os resultados a 950 °C. Não foi possível fazer correlação dos resultados obtidos neste ensaio com os de impureza orgânica determinado pela ABNT NBR NM49:2001 (ABNT, 2001c).

6.3 Características físicas no estado fresco e endurecido e características mecânicas das argamassas obtidas

Quanto à densidade de massa da argamassa, não foi possível observar alguma tendência de alteração relacionada ao aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural de rio. Os resultados encontrados para as argamassas testadas são menores que o da argamassa referência, mas isso está relacionado ao aspecto da argamassa que não apresentou a consistência necessária para viabilizar sua aplicabilidade como argamassa de assentamento ou revestimento.

Quanto ao índice de consistência das argamassas foram encontrados valores menores nas argamassas com 20 % de substituição do agregado miúdo natural de rio por agregados miúdos reciclados, mas para todos os teores de substituição os resultados não podem ser analisados como consistência de argamassa pois mesmo homogênea, o consumo de água, mesmo com uso de aditivo, não permitiu uma consistência plástica com aglomeração das partículas.

Observa-se a possível tendência de correlação entre a absorção de água do agregado com o coeficiente de absorção de água apresentado pela argamassa produzida com substituição.

Quanto aos resultados de resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial, não foi possível identificar tendência de resultados maiores ou menores utilizando o comportamento mecânico à compressão. Isso pode ter ocorrido por influência da falta de consistência plástica da argamassa no estado fresco.

6.4 Viabilidade de substituição do agregado natural por agregado reciclado pelo método de multicritérios

Quanto aos resultados obtidos nas análises multicritérios realizadas, foi possível observar que a argamassa que apresentou o melhor resultado na análise de desempenho também apresentou o melhor resultado quando foram incluídos fatores de ordem ambiental no julgamento, tendo desempenho superior à argamassa referência que ficou em segundo lugar.

O melhor resultado foi obtido nas argamassas com 20% de agregado reciclado, mas não é possível observar alguma tendência de se obter melhores resultados com menores substituições.

Apesar das argamassas com 40% de substituição não apresentarem condições de aplicabilidade, como demonstrado nos resultados no índice de consistência, apresentaram desempenho semelhantes aos demais.

6.5 Teor de substituição de agregado natural de rio por agregado reciclado

Apenas uma argamassa apresentou desempenho superior à de referência, obtido na argamassa com 20% de substituição do agregado natural de rio. A argamassa A20 produzida com agregado reciclado misto da unidade municipal de Campinas/SP apresentou o melhor desempenho.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesse trabalho indicam a necessidade de realização de trabalhos futuros no que tange à substituição do agregado natural por agregados reciclados com a manutenção da consistência, bem como o estudo de outros teores de substituição.

Foi identificada também a possibilidade de desenvolver trabalhos junto às usinas a fim de propor ações que possibilitem a redução na diferença entre os agregados reciclados produzidos, sejam eles mistos ou de concreto.

8 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DO TRABALHO REALIZADO

PETITTO, R. M.; SOUZA, E. F. Overview of civil construction waste recycling in the Metropolitan Region of Campinas. In: Simpósio do Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana (SPInfra) - 2016, 2016, Campinas. Anais do Simpósio do Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana (SPInfra)- 2016. Campinas: PUC-Campinas, 2016. v. 1. p. 1-1.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, G. D., SELMO, S. M. S. **Estudos de argamassas com agregados contaminados por gesso de construção** – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/438. São Paulo: EPUSP, 2006. 20 p. Disponível em: <http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00438.pdf>. Acesso em: 16 abr 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1765**: standard practice for applying analytical hierarchy process (AHP) to multiattribute decision analysis of investments related to buildings and buildings systems. West Conshohocken, PA, 2002.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, D. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. 2010. Disponível em: <<http://www.pedrasul.com.br/artigos/sustentabilidade.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. Rio de Janeiro, 2005f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112**: resíduos da construção civil e resíduos volumosos: áreas de transbordo e triagem: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114**: resíduos sólidos da construção civil: áreas de reciclagem: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados - determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9290**: cal hidratada para argamassas - determinação de retenção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917**: agregados para concreto: determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: sistemas de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM27**: agregado miúdo: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2000a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM49**: agregado miúdo: determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM52**: agregado miúdo: determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009d.

BAUER, L. A. F.; DIAS, J. F. (Rev.) **Materiais de construção I**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 2 v.

BIGOLIN, M.; DANILEVICZ, A. M. F.; GRAEFF, A. G.; SILVA FILHO, L. C. F. Viabilidade do agregado reciclado de RCD produzido no ambiente de uma pequena cooperativa. **Espacios**, Caracas, v. 36, p. 7, 2015.

BPMSG. **BPMSG AHP priority calculator**. 2016. Singapura. Disponível em <http://bpmsg.com/academic/ahp_calc.php>. Acesso em: 16 jun. 2016.

BRASIL Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307. 17 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais 2013**. 2015. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diag2013/DiagRS2013_XLS.zip>. Acesso em: 27 mai. 2015.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **O que é Avaliação do Ciclo de Vida**. [s. d.a] Disponível em: < <http://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos**: orientação para o seu licenciamento e aplicação da Resolução CONAMA 307/2002. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/3871-manual-reune-recomendacoes-para-manejo-de-residuos-da-construcao-civil>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 448, de 2012. 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Linha do Tempo**. [s. d. b] Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/linha-do-tempo>>. Acesso em: 29 mai. 2015.

BRAUNSCHWEIG, A.; KYTZIA, S.; BISCHOF, S. *Recycled Concrete: Environmentally Beneficial over Virgin Concrete?* 2011. **Towards Life Cycle Sustainability Management**, Berlim, AL, 2011. Disponível em: < http://www.lcm2011.org/papers.html?file=tl_files/pdf/paper/3_Session_LCM_Tools%20for_Green_and_Sustainable_Buildings/6_Braunschweig-Recycled_concrete-669_b.pdf>. Acessado em: 15 jun. 2016.

BRAVO, M.; BRITO, J. D.; SILVA, A. S.; EVANGELISTA, L. Análise da influência de agregados de centrais de reciclagem de resíduos de construção e demolição no fabrico de betões. **Engenharia Civil**, Minho, PT, v. 49, p. 43-64, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281408692_Analise_da_influencia_de_agregados_de_centrais_de_reciclagem_de_residuos_de_construcao_e_demolicao_no_fabrico_de_betoas>. Acesso em: 15 jun. 2016.

CALCADO, G. C. S. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento**

Portland. 2015. 101f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2015.

CAMPINAS. Secretaria Municipal de Infraestrutura. Departamento de Limpeza Urbana. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos:** PGIRS Município de Campinas. [s. d.] Disponível em: <http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/dlu/audienncias/plano_municipal_residuos_solidos.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2015.

CARDOSO, J. R. D. A., **Uso do Agregado de Entulho da Construção Civil de Manaus - AM para Obtenção de Bloco de Argamassa Celular.** 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **A – Relatórios de atividades executadas no ano de 2015.** Cosmópolis, SP, 2015. 45 p.

COSTA, J. F. S.; CORREIA, M. G.; SOUZA, L. T. T. 2009. Auxílio à decisão utilizando o método AHP: Análise Competitiva Dos Softwares Estatísticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. **Anais....** São Carlos: ABEPRO, 2010.

COSTA, J. S., MARTINS, C. A., BALDO, J. B. Argamassa de alvenaria usando agregado reciclado da indústria de piso cerâmico. **Cerâmica Industrial**, São Carlos, SP, v. 10, jul. ago. 2005.

DIAS, J. C.; LIMA, W. N., Comparação de métodos para a determinação de matéria orgânica em amostras ambientais. **Revista Científica da Universidade Federal do Pará**, Belém, v.3, abr. 2004.

Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2015.

EHRlich, P. J., Modelos quantitativos de apoio às decisões - I. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v.36, n. 1, p. 33-41, jan. fev. mar. 1996a.

EHRlich, P. J., Modelos quantitativos de apoio às decisões - II. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v.36, n. 2, p. 44-52, abr. mai. jun. 1996b.

FAVRETTO, J.; NOTTAR, L. A., 2016. Utilização da metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) na definição de um software acadêmico para uma Instituição de Ensino Superior do Oeste Catarinense. **Sistema & Gestão**, Niterói, RJ, v. 11, n.2, p. 183-191, 2016.

FENKER, E. **Sustentabilidade Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida do Produto**. [s. d.] Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/sustentamb_ciclovida.pdf>.

Acesso em: 15 mai. 2017.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de ciclo de vida dos produtos**. Viseu, PT: Instituto Politécnico de Viseu, 2004. 80p.

GOMES, P. C. C., SANTOS, M. G. C., FELIX, S. S., SANTOS, R. B. dos. Obtenção de argamassas com agregados reciclados produzidos na obra para uso em revestimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XIII, 2010, Canela, RS. **Anais eletrônicos...** Canela: ENTAC, 2010. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2010/arquivos/467.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2017.

GRACE DO BRASIL. **Aditivos para concreto: ADVA™ CAST 525**. Sorocaba, SP. [s.d.]. Disponível em: <http://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2016.

GROSS, M. G. Carbon determination. In: CARVER, R. E. (ed.) **Procedure in sedimentar petrology**. New York: Wiley-Interscience, 1971. Cap. 25, p. 573-596.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, nov. 2002.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Rólidos da Construção Civil**. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) Environmental Management e Life Cycle Assessment. Set of International Standards: ISO 14040 e 14043. Genebra, SU: International Organization for Standardization, 2006.

KNOERI, C., SANYÉ-MENGUAL, E., ALTHAUS, H. J., 2013. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, New York, v. 18, p. 909-918, jun. 2013.

LEONG, L. S.; TANNER, P. A. Comparison of methods for determination of organic carbon in marine sediment. **Marine Pollution Bulletin**, Elsevier, Amsterdam, v. 38, p. 875-879, 1999.

MARINHO, G. P. **Avaliação da influência dos agregados reciclados produzidos em britadores de mandíbula e de impacto nas propriedades de argamassas de revestimento**. 2016. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2016.

MARINKOVIĆ, S. B., IGNJATOVIĆ, I., RADONJANIN, V., 2013. Life-cycle assessment (LCA) of concrete with recycled aggregates (RAs). In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; DE BRITO, J. (Eds.), **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2013. p. 115-130.

MARINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, Elsevier, Amsterdam, v. 30, p. 2255-2264, nov. 2010.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. **O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41, 2009, Porto Seguro. **Anais...**, Porto Seguro: SBPO: 2009 p. 1778-1788.

MATTANA, A. J., MEDEIROS, M. H. F. de; SILVA, N. G. da, COSTA, M. do R. de M. M. da, 2012. Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 63-79, out./dez. 2012.

NAGATAKI, S., GOKCE, A., SAEKI, T., HISADA, M., 2004. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, Amsterdam, v. 34. p. 965–971, jun. 2004.

PEDROSO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração: Construção Civil, Florianópolis, 2008.

PISSOLATO JUNIOR, O. **Argamassa de revestimento utilizando areia proveniente da britagem de resíduos de construção civil**. 2016. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Campinas, 2016.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, Elsevier, Amsterdam, v. 18, p. 461-468, jul. 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VALINHOS. **Implantação de Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil será realidade em Valinhos**. Disponível em: <http://valinhos.sp.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=3321:implantacao-de-usina-de-reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil-sera-realidade-em-valinhos&catid=34:noticias&Itemid=93>. Acesso em: 29 fev. 2016.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. [s. d.]. Disponível em: <<http://www.atlasbrasil.org.br>>. Acesso em: 21 fev. 2016.

RODRIGUES, F.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. D. A new method to determine the density and water absorption of fine recycled aggregates. **Material Research**, São Carlos, v. 6. n. 5. p. 1045-1051, out. 2013.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Editora Makron, 1991.

SÃO PAULO. Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo. **Resíduos da Construção Civil e o Estado de São Paulo**. 2012.

SILVA, A. C., TORRADO, P. V., ABREU JUNIOR, J. D. S., Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. **Revista da Universidade de Alfenas**, Alfenas, MG, v. 5. p. 21-26, 1999.

SILVA, D. S. **Estudo comparativo dos métodos de produção de argamassa de revestimento utilizada em obras do município de Tubarão**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. (Faculdade de Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão. SC. 2008.

SILVA, J., BRITO, J., VEIGA, M. R. Avaliação do comportamento à água de argamassas com incorporação de agregados cerâmicos. **Revista Engenharia Civil**. Braga, PT, n. 28, p. 37-45, 2007.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Perfil da distribuição do cimento Portland consumido segundo as regiões geográficas (t) – 2014**. Rio de Janeiro, [s.d.a]. Disponível em:

<<http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=Perfilconsumo2015.gif>>.

Acesso em: 16 mai. 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Produção nacional de cimento por regiões e estados (t) – 2014**. Rio de Janeiro, [s.d.b]. Disponível em:

<<http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2014.gif>>.

Acesso em: 16 mai. 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2013**. Rio de Janeiro, [s.d.c]. Disponível em:

<<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

SOLEDADE, M. G. M.; NAPRAVNIK FILHO, L. A. F.; SANTOS, J. N.; SILVA, M. A. M. ISO 14000 e a Gestão Ambiental: uma reflexão das práticas ambientais corporativas. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 9., 2007, Curitiba. **Anais...Curitiba**: ENGEMA, 2007.

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. 317p.

THOMAZ, E.; HELENE, P. **Qualidade no Projeto e na Execução de Alvenaria Estrutural e de Alvenarias de Vedação em Edifícios**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil – BT/PCC/252. São Paulo: EPUSP, 2000. 31p.

TOSIC, N., S. MARINKOVIC, T. DASIC, e M. STANIC. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, Amsterdam, v. 87. p. 766–776, 15 jan. 2015.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VARGAS, R. V. Utilizando a programação Multicritérios (Analytic Hierarchy Process –AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. In: PMI GLOBAL CONGRESS, 2010, North America, Washington –DC, EUA. **Anais...** Washington-DC: PMI, 2010.

WEIL, M., JESKE, U., SCHEBEK, L., 2006. Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. **Waste Management & Research**. v. 24, p. 197-206, jun. 2006.

ZHAN, M.; PAN, G.; WANG, Y.; FU, M.; LU, X. No Access Effect of pre soak-accelerated carbonation factors on enhancing recycled aggregate mortars. **Magazine of Concrete Research**, London, abr. 2017. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.16.00468>>

ANEXOS

Seleção e amostragem dos agregados reciclados

Para a caracterização e produção das argamassas o material da amostra de campo foi reduzido segundo ABNT NBR NM27:2000 (ABNT, 2000a), pelo método previsto para redução de amostra com quarteador de amostras modelo mecânico (Figura 56). O separador mecânico utilizado tem doze calhas de igual abertura, sendo utilizado dois recipientes para receberem as duas metades. A redução deu-se com material seco em estufa marca Fanem modelo 515 até peso constante determinada em balança marca Gehaka modelo BG8000.

Figura 56 – Fotografia do quarteador mecânico utilizado no processo de redução das amostras de campo.



Fonte: da autora, 2017.

Composição granulométrica

No caso da composição granulométrica, o material seco em estufa e resfriado à temperatura ambiente a ser analisado foi dividido em duas amostras e a massa de cada amostra foi determinada por pesagem em uma balança marca Gehaka modelo BG8000.

A sequência de peneiras limpas formou um conjunto unido, com as peneiras dispostas com a abertura decrescente do topo até a base, provida de fundo.

A amostra foi colocada no conjunto de peneiras que, então, foi colocado em um agitador eletromecânico de peneiras marca Solotest modelo 8 x 2 50 - 60 Hz, pelo tempo necessário para promover a separação e classificação dos grãos da amostra (Figura 57).

Figura 57 – Fotografia do agitador eletromecânico e série de peneiras para determinação da composição granulométrica.



Fonte: da autora, 2017.

Após esse procedimento, cada uma das peneiras e o fundo, um de cada vez, foram destacados do conjunto, para que fosse determinada a massa do material retido em sua malha, despejando-o em um recipiente de massa conhecida e pesando o recipiente com a amostra em uma balança marca Gehaka modelo BG8000. Durante a execução do procedimento não deve haver diferença da massa inicial e final da amostra em mais que 0,3% da massa inicial.

Para cada uma das amostras foram calculadas as porcentagens de material retido em cada uma das peneiras e no fundo, com aproximação de 0,1%, não podendo haver diferença maior que 4% entre as amostras de uma mesma peneira. Após esses cálculos e verificações, os percentuais médios, retidos acumulados, em cada peneira e no fundo, foram calculados com aproximação de 1%.

O ensaio permitiu a determinação dos seguintes parâmetros:

- a) dimensão máxima característica do material, que corresponde à abertura da peneira, em mm, onde ficou retido acumulado no máximo 5%, e;
- b) módulo de finura, que é a soma dos percentuais retidos acumulados nas peneiras de série normal, dividida por 100.

Neste trabalho, os ensaios de composição granulométrica dos agregados miúdos reciclados foram realizados seguindo o método de ensaio previsto em ABNT NBR NM248:2001 (ABNT, 2001a), a partir de duas amostras de 500 g para cada usina de reciclagem e peneiras da série normal e intermediária, descritas na

ABNT NBR NM248:2001 (ABNT, 2001a) a partir da abertura de 6,3 mm, até a de 0,150 mm (Tabela 51).

Tabela 51 – Séries de peneiras para classificação granulométrica de agregados.

| Série normal (mm) | Série intermediária (mm) |
|-------------------|--------------------------|
| | 6,3 |
| 4,75 | |
| 2,36 | |
| 1,18 | |
| 0,600 | |
| 0,300 | |
| 0,150 | |

Fonte: adaptado de ABNT, 2001a.

Os resultados apresentados correspondem à média aritmética dos valores experimentais das duas amostras.

Teor de material passante na peneira 75 μm

A determinação do teor de material fino presente no agregado, ou seja, do material passante na peneira de 75 μm , foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM46:2001 (ABNT, 2001b), que prevê a lavagem da amostra de agregado, usando água e, quando necessário, agente umectante.

De acordo com esta norma, a massa mínima da amostra de material seco foi definida pela dimensão máxima característica do agregado a ser analisado (Tabela 52).

Tabela 52 – Massa mínima da amostra para determinação do teor de material passante na peneira 75 μm .

| Dimensão máxima (mm) | Massa mínima (g) |
|----------------------|------------------|
| 2,36 | 100 |
| 4,75 | 500 |
| 9,5 | 1000 |

Fonte: adaptado de ABNT, 2001b.

Após a pesagem da massa de cada amostra (m_i) em uma balança marca Gehaka modelo BG8000, a mesma foi colocada em um recipiente e coberta com água. A amostra foi então agitada vigorosamente a fim de conseguir a completa separação das partículas mais finas que 75 μm , que ficarão em suspensão, das partículas maiores. Em seguida, a água foi vertida cuidadosamente em um conjunto de peneiras

composto pelas de abertura de 1,18 mm e 75 μm , evitando ao máximo o transbordamento de partículas maiores, como pode ser visto na Figura 58. A lavagem foi repetida até que a água de lavagem se apresentasse clara.

Figura 58 – Fotografia da lavagem do agregado para determinação do teor de material fino.



Fonte: da autora, 2017.

O material retido nas peneiras, bem como o que restou no recipiente, foram levados a uma estufa marca Fanem modelo 515 regulada a 105 °C, por 24 horas ou até massa constante. A massa da amostra seca sem as partículas finas (m_f), em temperatura ambiente, foi determinada por pesagem em uma balança marca Gehaka modelo BG8000.

O cálculo do percentual de material passante na peneira de 75 μm foi feito seguindo a Equação 5, descrita na norma:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (5)$$

A determinação foi feita a partir do resultado de duas amostras de cada material, não havendo diferença maior que 1,0% em relação à sua média aritmética. O resultado foi expresso com aproximação ao décimo mais próximo ou, quando o resultado for superior a 10%, a aproximação deve ser feita ao número inteiro mais próximo.

Neste trabalho, os ensaios para determinação do teor de material passante na peneira de 75 μm foram realizados seguindo o método de ensaio previsto na ABNT NBR NM46:2001 (ABNT, 2001b), descrito acima, sem o uso de agente umectante. A massa mínima das amostras foi definida pela dimensão máxima

característica obtida no ensaio de composição granulométrica e os resultados experimentais foram expressos na forma de percentuais.

Torrões de argila e materiais friáveis

Para determinação do teor de argila e de materiais friáveis presentes no agregado miúdo reciclado, a ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) indica o mesmo método para determinação em agregados de origem natural, cujo procedimento é descrito pela ABNT NBR 7218:2010 (ABNT, 2010).

Para a determinação da massa mínima da amostra de cada intervalo granulométrico utilizada no ensaio foi necessário conhecer a composição granulométrica do material a ser analisado conforme Tabela 53.

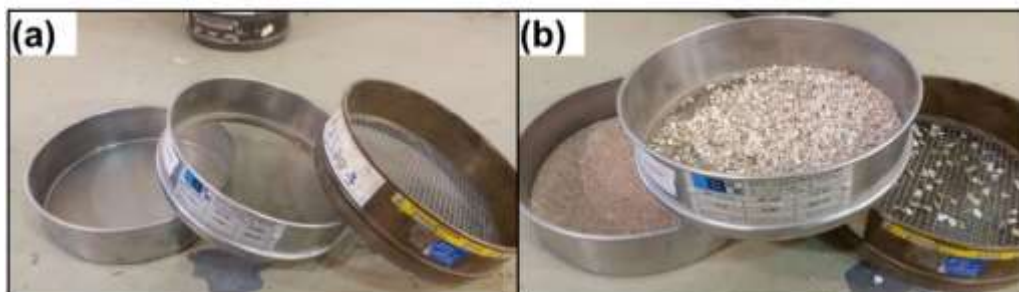
Tabela 53 – Intervalos granulométricos e massa mínima para amostra do ensaio.

| Intervalos granulométricos a serem ensaiados (mm) | Massa mínima da amostra para ensaio de cada intervalo granulométrico (g) |
|---|--|
| $\geq 1,18$ e $< 4,75$ | 200 g |
| $\geq 4,75$ e $< 9,5$ | 1.000 |

Fonte: adaptado de ABNT, 2010.

Após a definição da massa mínima da amostra, o material a ser analisado foi separado na fração do intervalo granulométrico a ser ensaiado, usando um conjunto de peneiras e um agitador eletromecânico de peneiras marca Solotest modelo 8x2 50 – 60 Hz, como mostra a Figura 59.

Figura 59 – Fotografias (a) das peneiras utilizadas na classificação granulométrica da amostra segundo os intervalos prescritos; (b) amostra classificada para determinação do teor de torrões de argila e materiais friáveis.



Fonte: da autora, 2017.

Após a determinação e o registro da massa das amostras de cada intervalo granulométrico (m_i), cada fração foi transferida para uma bandeja apropriada,

formando uma camada delgada, que foi coberta com água potável e permaneceu em repouso por 24 horas.

Após o período de repouso, foram identificadas as partículas com aparência de torrões de argila ou materiais friáveis, que foram pressionados com os dedos a fim desfazê-las.

As amostras de cada intervalo granulométrico foram transferidas para as peneiras com aberturas indicadas na Tabela 54.

Tabela 54 – Peneiras para remoção das partículas de argila e materiais friáveis.

| Intervalos granulométricos a serem ensaiados (mm) | Abertura das peneiras (mm) |
|---|----------------------------|
| $\geq 1,18$ e $< 4,75$ | 0,600 |
| $\geq 4,75$ e $< 9,5$ | 2,36 |

Fonte: adaptado de ABNT, 2010.

O peneiramento foi realizado por via úmida para a remoção das partículas de argila e de materiais friáveis, agitando-se o material cuidadosamente com as mãos durante a lavagem, como mostra a Figura 60 apresentada a seguir.

Figura 60 – Fotografia da lavagem da amostra de agregados miúdos reciclados.



Fonte: da autora, 2017.

Finalmente, cada amostra foi retirada da peneira correspondente, transferida para uma bandeja e seca em estufa marca Fanem modelo 515. As amostras foram pesadas em uma balança marca Gehaka modelo BG8000 até massa constante para que, em temperatura ambiente, fosse determinada a massa do material retido (m_f).

Para a determinação do teor de torrões de argila e materiais friáveis de cada intervalo granulométrico (m_t), foi usada a Equação 6 descrita pela ABNT NBR 7218:2010 (ABNT, 2010):

$$m_t = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (6)$$

onde, m_t é o teor de argila torrões e materiais friáveis, em percentual, arredondando o valor ao décimo mais próximo.

O teor parcial de argila e materiais friáveis da amostra foi obtido multiplicando-se a porcentagem determinada em cada intervalo granulométrico (m_t) pela porcentagem retida individual desse intervalo granulométrico, que foi obtida na classificação granulométrica, e dividindo por 100.

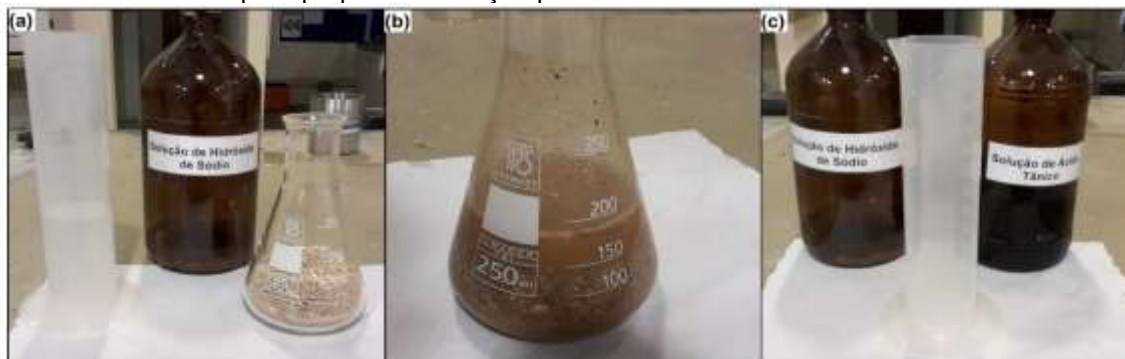
Para amostras compostas por mais de um intervalo granulométrico, o teor de argila e materiais friáveis presentes na amostra total foi obtido pela soma dos teores parciais encontrados.

Impurezas orgânicas

O procedimento foi realizado segundo o método de ensaio descrito na ABNT NBR NM49:2001 (ABNT, 2001c), com 200 g de material seco.

Esse ensaio determina a contaminação do agregado de forma qualitativa, quando se compara a tonalidade de uma solução de hidróxido de sódio a 3% que ficou em contato com a amostra durante 24 horas e, depois foi filtrada, com a de uma solução padrão, composta por 97% de solução de hidróxido de sódio a 3% e 3% de uma solução padrão de ácido tânico a 2% (Figura 61).

Figura 61 – Fotografias das etapas para determinação das impurezas orgânicas: (a) 200 g de amostra e 100 mL de hidróxido de sódio; (b) amostra em solução de hidróxido de sódio; (c) hidróxido de sódio e ácido tânico para preparo da solução padrão.



Fonte: da autora, 2017.

A solução padrão apresenta a mesma tonalidade de uma amostra com 300 (trezentas) partes por milhão (ppm) de impurezas orgânicas, sendo este o limite máximo para que o agregado seja considerado próprio para o emprego em concretos.

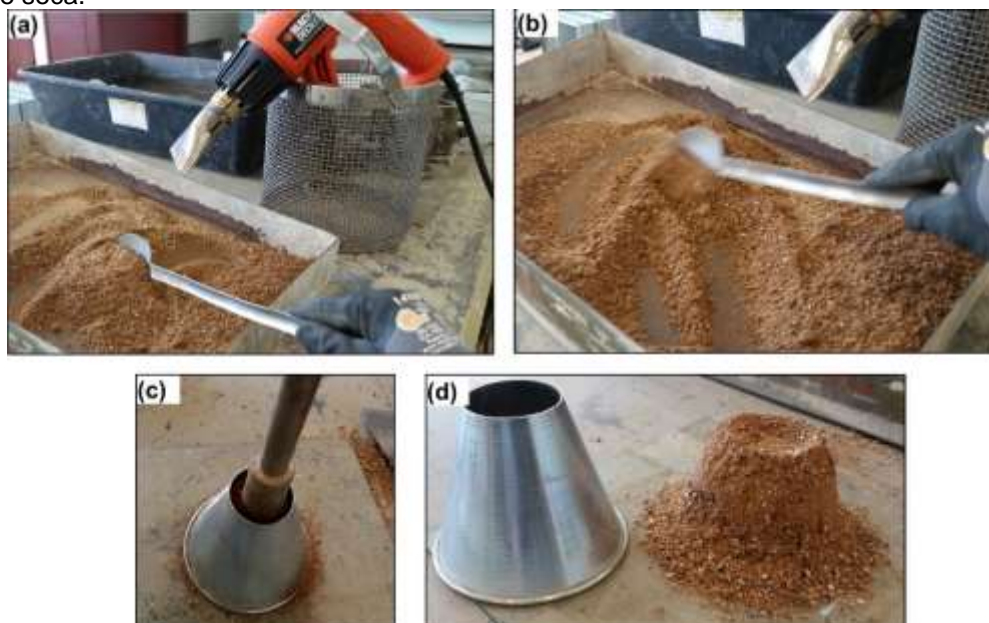
Sendo assim, se a solução de hidróxido de sódio em contato com o agregado miúdo reciclado (AMR) for mais clara que a solução padrão, indica que o teor de impurezas orgânicas do material é aceitável para que o AMR possa ser usado em concretos.

Absorção de água

Para a determinação da absorção de água em agregados miúdos reciclados, a ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) indica o mesmo método de ensaio empregado aos agregados de origem natural em ABNT NBR NM30:2000 (ABNT, 2000b).

A amostra deve ter aproximadamente 1 Kg e estar seca em estufa e à temperatura ambiente. A massa da amostra (m) foi pesada uma balança marca Gehaka modelo BG8000 e o processo de saturação foi iniciado, cobrindo-se a amostra com água por 24 horas. Após esse período, a amostra foi estendida em uma superfície plana e submetida à ação de corrente de ar quente (soprador térmico marca Black & Decker modelo HG2000K), para que as partículas pudessem ficar como o ensaio preconiza: saturadas com superfície seca. Para determinar se esta condição foi atingida, é usado um molde tronco cônico, onde é colocada uma porção da amostra. Esta é levemente compactada com uma haste de compactação e, ao levantar o molde, as partículas se soltam, desmoronando (Figura 62).

Figura 62 – Fotografias das etapas da obtenção da condição saturada com superfície seca em agregados miúdos: (a) e (b) material saturado espalhado e recebendo ar quente; (c) material recebendo golpes de haste normal no molde tronco cônico; (d) material no estado saturado com superfície seca.



Fonte: da autora, 2017.

Quando a amostra atingiu a condição saturada superfície seca, a massa da amostra (m_s) foi medida, com aproximação de 0,1 g, em uma balança marca Gehaka modelo BG8000. O resultado do teste foi obtido com a Equação 7 descrita na norma, a partir da média aritmética dos resultados de duas amostras, com aproximação de 0,1%.

$$m = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (7)$$

Para a determinação da absorção de água dos agregados reciclados, utilizou-se o método sugerido por Rodrigues *et al.* (2013), que se diferencia da ABNT NBR NM30:2000 (ABNT, 2000b) basicamente por propor a lavagem dos agregados miúdos reciclados (AMR) antes do procedimento para determinação da absorção. Rodrigues *et al.* (2013) demonstraram que a presença do material fino torna bem mais difícil a obtenção de resultados precisos. Isso por que as partículas finas falseiam a identificação da condição saturada superfície seca nos AMR. Assim, o procedimento realizado neste trabalho seguiu as recomendações de Rodrigues *et al.* (2013), com apenas uma diferença, a lavagem dos AMR foi realizada utilizando-se as peneiras com abertura de 1,18 mm e de 75 μm .

Após esse procedimento, o material ficou submerso em água por 24 horas para que, então, após a saturação definitiva do material, fosse obtida a amostra na condição saturada com superfície seca.

Massa específica e massa específica aparente

Conforme o método de ensaio descrito na ABNT NBR NM52:2009 (ABNT, 2009d), a amostra deve estar na condição saturada com superfície seca, obtida da mesma forma que ABNT NBR NM30:2000 (ABNT, 2000b). Por esse motivo, os ensaios para determinação da absorção de água e da massa específica e massa específica aparente foram feitos simultaneamente.

Para a determinação da massa específica e da massa específica aparente, segundo a ABNT NBR NM52:2009 (ABNT, 2009d) foi necessário obter:

- a) a massa de 500,0 g \pm 0,1 g de amostra na condição saturada superfície seca (m_s), usando uma balança marca Gehaka modelo BG8000;
- b) a massa da amostra seca em estufa (m) após o ensaio, usando uma balança marca Gehaka modelo BG8000;
- c) o volume do frasco (V);
- d) o volume de água adicionada ao frasco (V_a), que foi determinado pela diferença entre a massa do conjunto composto pelo frasco, agregado e água (m_2) e a massa do conjunto composto pelo frasco e agregado (m_1), dividindo pela massa específica da água (ρ_a), de acordo com a Equação 8:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (8)$$

O procedimento descrito em ABNT NBR NM52:2009 (ABNT, 2009d) foi executado com os seguintes passos:

- a) 500,0 g \pm 0,1 g da amostra na condição saturada com superfície seca (m_s) foram colocadas em um picnômetro com capacidade para 500 mL e registrar sua massa total (m_1);
- b) o picnômetro foi preenchido até a marca de 500 mL, agitado até que não existissem bolhas de ar aprisionadas no material analisado e, em seguida, foi colocado em banho termorregulador marca Quimis modelo 0334M-28 a 21 °C \pm 2 °C, por uma hora;

- c) frasco foi completado com água até a marca de 500 mL e a massa do conjunto (m_2), pesada com precisão de 0,1 g, usando uma balança marca Gehaka modelo BG8000, foi registrada;
- d) o agregado foi retirado do frasco, seco em estufa marca Fanem modelo 515 até massa constante. As pesagens foram realizadas com precisão de 0,1 g, usando uma balança marca Gehaka modelo BG8000, e a massa da amostra (m) foi registrada.

Como esse ensaio também exigiu que o material estivesse na condição saturada com superfície seca, neste procedimento também foi usada a adaptação de Rodrigues *et al.* (2013).

A determinação das características físicas dos agregados foi realizada com as fórmulas descritas na ABNT NBR NM52:2009 (ABNT, 2009d):

- a) massa específica do agregado seco (d_1) (Equação 9);

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (9)$$

- b) massa específica do agregado saturado com superfície seca (d_2) (Equação 10) e

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (10)$$

- c) massa específica (d_3) (Equação 11)

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (11)$$

onde: m é o valor da massa da amostra seca em estufa, em gramas; m_s é o valor da massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas; V é o valor do volume do frasco, em centímetros cúbicos; V_a é o valor do volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos; ρ_a é o valor da massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Para expressar os resultados, foi usada a média aritmética dos valores experimentais das duas amostras. Para validação do ensaio e determinação das

características físicas em questão, a diferença não foi maior do que $0,02 \text{ g/cm}^3$ e o resultado foi expresso com aproximação de $0,01 \text{ g/cm}^3$.

Determinação do teor de sais solúveis

A norma ABNT NBR 9917:2009 (ABNT, 2009b) descreve o método de ensaio para determinação do teor de sais solúveis em agregados para concreto.

Para o ensaio de determinação do teor de sais solúveis foi necessário obter uma amostra de 20 g, extraída de uma amostra inicial de 1 Kg de material passante pela peneira 2,36 mm de abertura. A amostra foi seca em estufa marca Fanem modelo 515 a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ e pesada em balança marca Gehaka modelo BG400 até massa constante (Figura 63a).

A amostra foi, então, colocada em um frasco de Erlenmeyer de 250 mL, com cerca de 100 mL de água destilada aquecida a $(80 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, e foi mantida sob agitação magnética por 10 minutos (Figura 63b).

Após esse período, a dispersão foi filtrada em papel filtro, recolhendo-se o filtrado em um balão volumétrico de 500 mL. Durante a filtração, o material retido foi lavado, com água a $(80 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, até a obtenção de um volume de cerca de 300 mL (Figura 63c).

Figura 63 – Fotografias das etapas para obtenção da solução dos sais solúveis: (a) amostra com 20 g; (b) amostra em 100 mL de água destilada aquecida a $(80 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, no agitador magnético; (c) recolhimento do filtrado em balão volumétrico de 500 mL.



Fonte: da autora, 2017.

Quando o conteúdo do balão atingiu a temperatura ambiente, o volume do frasco foi completado com água destilada, obtendo-se a solução para a determinação do teor de sais solúveis (Figura 63).

Das soluções de sais solúveis obtidas com o procedimento descrito acima, 100 mL de amostra foram transferidos, com o auxílio de uma proveta, para uma cápsula de porcelana previamente tarada, que foi colocada em banho termostático marca Quimis modelo 0334M-28, a (105 ± 5) °C até a evaporação da água presente. Em seguida, a cápsula com os sólidos restantes foi seca em estufa marca Fanem modelo 515 até massa constante e resfriada em dessecador até a temperatura ambiente, pesando-se o precipitado com aproximação de 0,0001 g, em uma balança marca Bel modelo M124A.

A porcentagem de sais solúveis foi calculada com a Equação 12, descrita na ABNT NBR 9917:2009 (ABNT, 2009b).

$$s = \frac{m_2 \times 5}{m_1} \times 100 \quad (12)$$

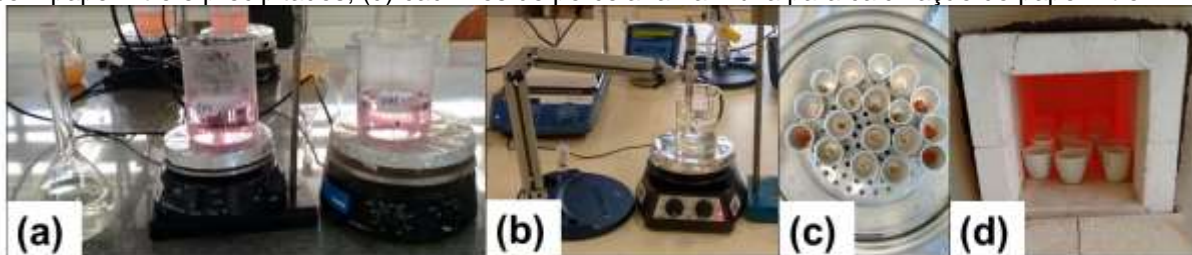
onde, s é o valor da quantidade percentual de sais solúveis; m_1 é o valor da massa da amostra original de aproximadamente 20 g, em gramas; m_2 é o valor da massa de sais solúveis, em gramas e 5 é o valor do fator de alíquota.

Determinação do teor de íons sulfatos

A determinação do teor de sulfatos foi realizada em duplicata a partir do método descrito na ABNT NBR NM52:2009 (ABNT, 2009d), como demonstrado na Figura 64.

Transferiu-se 200 mL da solução para um béquer de 400 mL, onde foram adicionadas algumas gotas de uma solução com o indicador vermelho de metila e ácido clorídrico até que ocorresse a mudança de cor da solução, para que então fosse completada a marca de 250 mL do frasco com água destilada (Figura 64a). Essa solução foi então aquecida até a ebulição quando foram adicionados lentamente, 10 mL de solução de cloreto de bário também quente, para que ocorresse a formação dos precipitados. A solução permaneceu a temperatura de ebulição por cerca de 30 minutos e depois permaneceu em repouso por 24 horas à temperatura ambiente.

Figura 64 – Fotografias da realização da determinação do teor de íons sulfato: (a) preparo da solução com vermelho de metila e ácido clorídrico; (b) teste com nitrato de prata; (c) cadinhos tarados com papel filtro e precipitados; (d) cadinhos de porcelana na mufla para calcinação do papel filtro.



Fonte: da autora, 2017.

Após o repouso, o precipitado foi filtrado em papel filtro faixa azul, com água quente, até a eliminação dos cloretos. Essa eliminação foi verificada utilizando-se o teste com nitrato de prata (Figura 64b). Após a filtração, o papel filtro foi colocado em um cadinho de porcelana previamente tarado (Figura 64c), onde foi queimado lentamente, sem inflamar, até o seu total desaparecimento, com calcinação entre 800 °C e 900 °C durante uma hora (Figura 64d). Após esfriar em dessecador, tomou-se o resultado a partir da pesagem do resíduo como sulfato de bário.

O percentual que indica o teor de sulfatos (SO_4^{2-}) presente nos agregados analisados foram calculados a partir da Equação 13:

$$SO_4^{2-} = \frac{m_2 \times 2,5 \times 0,412}{m_1} \times 100 \quad (13)$$

onde m_1 é a massa da amostra original utilizada para preparo da solução, expressa em gramas (g); m_2 é a massa de $BaSO_4$, expressa em gramas (g); 2,5 é o fator de alíquota e 0,412 é o fator estequiométrico para a transformação de $BaSO_4$ em SO_4^{2-} .

Material orgânico: determinação do teor por perda ao fogo

A norma ABNT (2009a), de agregados para concreto, assim como a de agregados reciclados ABNT NBR 15116:2004 (ABNT, 2004d) não especificam um método de ensaio próprio para obtenção do teor de matéria orgânica. Apenas a norma ABNT NBR NM18:2012 (ABNT, 2012b) trata de perda ao fogo em cimentos, submetendo o material a ser analisado a uma temperatura de 950 °C.

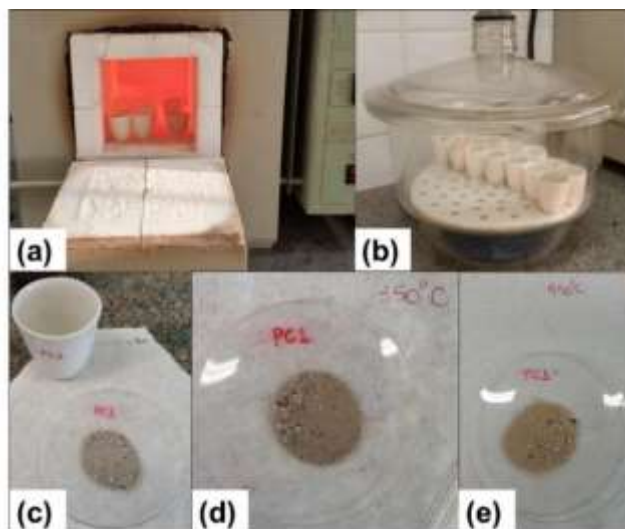
Segundo Gross (1971) os procedimentos que determinam a perda de matéria orgânica com aquecimento de amostras baseiam-se em resultados de perda de massa, determinada com uma balança analítica. Leong e Tanner (1999) e

Suguió (1973) *apud* Dias e Lima (2004) consideram a existência de carbonatos na amostra. Isso tornou necessário corrigir as estimativas de perda de massa, uma vez que os carbonatos podem ser decompostos a partir de 400 °C, com a liberação de dióxido de carbono (CO₂). Leong e Tanner (1999) *apud* Dias e Lima (2004) também identificaram que acima de 500 °C a 600 °C, além da perda de material orgânico, pode ocorrer perda de matéria constituinte e da água estrutural, acrescentando erros ao método. Portanto, Silva *et al.* (1999) trabalharam com solos usando temperaturas entre 105 °C a 250 °C para a determinação de matéria orgânica. Já Dias e Lima (2004) determinaram a matéria orgânica em solos e sedimentos com uma variação térmica de 110 °C a 360 °C.

Assim, o método empregado neste trabalho foi o de submeter uma amostra de 1,000 ± 0,001 g de agregado miúdo reciclado a temperatura de 350 °C (Figura 65a). Isso porque, as amostras de agregados poderiam apresentar perda de água estrutural em temperaturas a partir de 500 °C (DIAS; LIMA, 2004). Mesmo assim, foram ensaiadas amostras expostas a 950 °C, temperatura indicada na ABNT NBR NM18:2012 (ABNT, 2012b), para verificar seu comportamento.

Antes do teste, as amostras dos agregados finos foram secas em estufa marca Fanem modelo 515 a 105 °C até massa constante (Figura 65c). A seguir, em uma balança marca Gehaka modelo BG400, foram pesadas amostras de 1,000 ± 0,001 g de cada um dos agregados para cadinhos previamente secos e tarados. Os cadinhos foram colocados em uma mufla marca Quimis modelo MF568, na temperatura de 950 °C, durante 50 minutos, como recomenda a ABNT NBR NM18:2012 (ABNT, 2012b). Ao final deste tempo, os cadinhos com as amostras foram retirados da mufla e mantidos em um dessecador até que atingissem a temperatura ambiente (Figura 65b), quando foi feita a pesagem da massa final de cada amostra em uma balança marca Bel modelo M1003.

Figura 65 – Fotografias do ensaio para determinação do teor de matéria orgânica por perda ao fogo: (a) cadinhos na mufla a 350°C; (b) cadinhos no dessecador até atingirem a temperatura ambiente; (c) amostra seca em estufa; (d) amostra após 50 minutos a 350 °C; (e) amostra após 50 minutos a 950 °C.



Fonte: da autora, 2017.

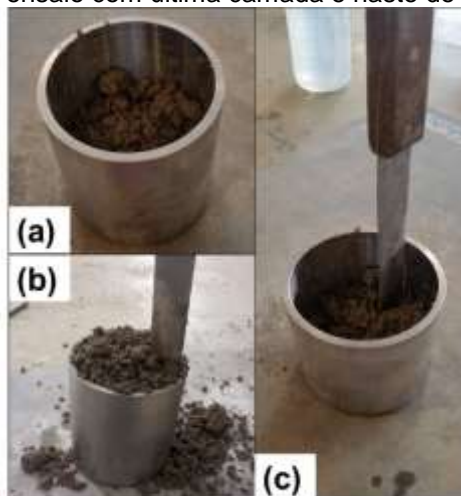
Densidade de massa da argamassa

Segundo a ABNT NBR 13278:2005 (ABNT, 2005c), a determinação da densidade de massa foi feita utilizando-se um recipiente cilíndrico com capacidade aproximada de 400 cm³ e uma placa de vidro utilizada para garantir a ausência de bolhas de ar no recipiente.

As massas do recipiente com a placa de vidro (m_v) e do recipiente preenchido com água destilada, rasando-se o recipiente com a placa de vidro de tal forma que não houvesse bolhas de ar em seu interior (m_a), foram obtidas com uma balança marca Gehaka modelo BG8000. O volume do recipiente (v_r) foi obtido pela subtração das massas m_a e m_v .

Imediatamente após o preparo da argamassa o recipiente foi preenchido em três camadas de argamassa fresca, aplicando-se vinte golpes com a haste de adensamento normal em cada camada. Após o preenchimento do recipiente com a argamassa, o mesmo foi submetido a três quedas de uma altura de aproximadamente três centímetros; não permanecendo vazios entre a argamassa e a parede do recipiente, então foi feito o seu rasamento (Figura 66).

Figura 66 – Fotografias do ensaio para determinação da densidade de massa: (a) recipiente de ensaio com primeira camada de argamassa; (b) recipiente de ensaio com segunda camada e haste de adensamento; (c) recipiente de ensaio com última camada e haste de adensamento.



Fonte: da autora, 2017.

Com ausência de material aderido na parede externa do recipiente, foi determinada a massa do conjunto com argamassa (m_c), usando-se uma balança marca Gehaka modelo BG8000.

A densidade de massa (d) foi calculada com a Equação 14:

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \times 1000 \quad (14)$$

onde: d é o valor da densidade de massa da argamassa no estado fresco, em quilogramas por metro cúbico (Kg/m^3); m_c é o valor da massa do recipiente/placa de vidro com a argamassa, em gramas (g); m_v é o valor da massa do recipiente placa de vidro, em gramas e v_r é o valor do volume do recipiente, em centímetros cúbicos (cm^3).

Os resultados foram apresentados em quilogramas por metro cúbico (Kg/m^3), arredondados ao número inteiro mais próximo.

Teor de ar incorporado

Ainda segundo a ABNT NBR 13278:2005 (ABNT, 2005c), o teor de ar incorporado à argamassa foi calculado com a Equação 15:

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (15)$$

onde: A é o valor do teor de ar incorporado na argamassa, em percentual (%); d é o valor da densidade de massa da argamassa, no estado fresco em quilogramas por metro cúbico (Kg/m^3); m_v é a massa do recipiente em gramas (g) e d_t é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3), sem vazios.

Como este trabalho trata de argamassas cujos traços podem ser dosados e preparados em obra, não se tratando de argamassas industrializadas, a densidade de massa teórica foi calculada dividindo-se o somatório das massas secas dos componentes da argamassa, mais a da água, pelo somatório das massas específicas de cada componente da argamassa.

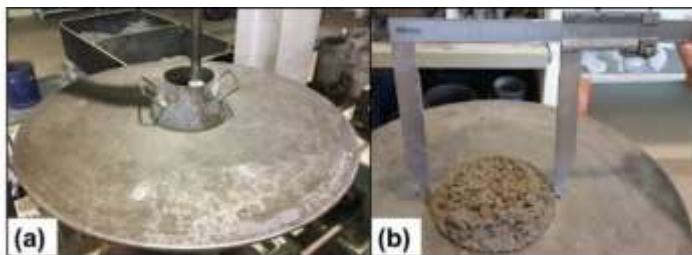
O resultado que expressa o teor de ar incorporado, em percentual, foi arredondado ao número inteiro mais próximo.

Índice de consistência

Seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 13276:2005 (ABNT, 2005a) para o preparo da argamassa, a determinação do índice de consistência foi feita a partir do preenchimento de um molde tronco-cônico, em três camadas de argamassa, aplicando-se 15, 10 e 5 golpes com soquete normal, respectivamente, completando o volume do molde se eventualmente for necessário e rasando sua superfície (Figura 67a).

Retirado o molde, a manivela da mesa de consistência marca Solotest modelo manual foi acionada 30 vezes, em um intervalo de 30 segundos, de maneira uniforme. Imediatamente após o último golpe, com um paquímetro marca Mitutoyo modelo analógico máx. 52 cm resolução 0,05 mm, foi medido o espalhamento da forma tronco-cônica original da argamassa. As medidas foram realizadas em três diâmetros, uniformemente distribuídos (Figura 67b).

Figura 67 – Fotografias do ensaio para determinação do índice de consistência da argamassa: (a) molde tronco-cônico e soquete normal na mesa de consistência; (b) determinação do espalhamento com paquímetro.



Fonte: da autora, 2017.

O índice de consistência da argamassa foi expresso pela média das três medidas, em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo.

Retenção de água

A retenção de água da argamassa foi determinada conforme a ABNT NBR 13277:2005 (ABNT, 2005b), utilizando o funil de Büchner modificado pela ABNT NBR 9290:1996 (ABNT, 1996), acoplado a uma bomba de vácuo marca Primar modelo 141 2vc, como mostra a Figura 68, apresentada a seguir.

Figura 68 – Fotografias do ensaio para determinação da capacidade de retenção de água da argamassa: (a) aparato com funil e bomba a vácuo; (b) sucção da água utilizada para umedecer o papel filtro; (c) determinação da massa do aparato; (d) determinação da massa inicial da argamassa analisada; (e) determinação da massa final da argamassa analisada.



Fonte: da autora, 2017.

O suporte foi colocado sobre o funil, de forma que houvesse estanqueidade. O papel-filtro foi posicionado sobre o fundo do prato e umedecido com água.

Com a torneira que controla a aplicação do vácuo fechada, a bomba de vácuo foi acionada para aplicar ao conjunto uma sucção de 51 mm de mercúrio. Então, a

torneira foi aberta, por 90 segundos, para a retirada do excesso de água do papel-filtro. Após esse procedimento, a massa do conjunto composto por funil e papel-filtro úmido (m_v) foi obtida por pesagem em uma balança marca Gehaka modelo BG8000.

O conjunto foi preenchido com argamassa no estado fresco, um pouco além de sua capacidade e a argamassa foi adensada com 16 golpes de soquete normal aplicados junto à borda e 21 golpes de soquete normal distribuídos na área central do conjunto. O excesso foi retirado com uma régua, rasando a superfície do prato e a massa foi determinada novamente (m_a) por pesagem em uma balança marca Gehaka modelo BG8000.

Com o funil preenchido de argamassa devidamente reposicionado no equipamento, a torneira foi aberta para aplicação da mesma sucção durante 15 minutos. Após a retirada da água retida pela argamassa, a determinação da massa (m_s) foi realizada novamente por pesagem em uma balança marca Gehaka modelo BG8000.

O cálculo da retenção de água foi feito com a Equação 16:

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{\frac{m_w}{m + m_w} \times (m_a - m_v)} \right] \quad (16)$$

onde, m_a é o valor da massa do conjunto composto por funil, papel filtro e argamassa, em gramas; m_s é o valor da massa do conjunto composto por funil, papel filtro e argamassa, após a sucção, em gramas; m_v é o valor da massa do conjunto vazio, composto apenas pelo funil e papel filtro úmido após sucção inicial, em gramas; m_w é o valor da massa total de água acrescentada à mistura para preparo da argamassa, em gramas e m é o valor da soma das massas dos materiais secos que compõe a argamassa, em gramas.

O resultado foi expresso em percentual, arredondado ao número inteiro mais próximo.

Absorção de água por capilaridade

Segundo a ABNT NBR 15259:2005 (ABNT, 2005g), para a realização do ensaio foram necessários três corpos de prova prismáticos, aos 28 dias, com as superfícies lixadas com lixa grossa marca Makita modelo MBO451 e limpas com pincel.

Após o preparo dos corpos de prova, as massas iniciais (m_0) foram obtidas por pesagem em uma balança marca Gehaka modelo BG8000. Estes corpos de prova foram dispostos com a face quadrada sobre suportes que garantissem o contato com água até um nível de $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de sua face inferior (Figura 69).

Figura 69 – Fotografia do ensaio para absorção de água por capilaridade: corpos de prova apresentando a face quadrada em contato com água.



Fonte: da autora, 2017.

Após 10 minutos de exposição à água, os corpos de prova foram retirados da água e secos com pano úmido. As massas dos corpos de prova (m_{10}) foram obtidas por pesagem em uma balança marca Gehaka modelo BG8000 e os mesmos foram recolocados imediatamente em contato com a água. A última pesagem de cada corpo de prova foi feita após 90 minutos de contato com água (m_{90}).

A absorção de água por capilaridade, para cada tempo, foi calculada com a Equação 17, em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2).

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (17)$$

onde: A_t é o valor da absorção de água por capilaridade, para cada tempo t , aproximada ao décimo mais próximo, em gramas por centímetro quadrado; m_t é a massa do corpo de prova em cada tempo (10 e 90 minutos), em gramas; m_0 é a massa inicial do corpo de prova, em gramas e 16 é o valor da área do corpo de prova em contato com a água, em centímetros quadrados.

Os resultados de absorção de água por capilaridade individual e média obtidos foram arredondados ao centésimo mais próximo.

Coeficiente de capilaridade

Ainda segundo ABNT NBR 15259:2005 (ABNT, 2005g), o coeficiente de capilaridade foi calculado com a Equação 18, a partir dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (18)$$

onde: C é o valor do coeficiente de capilaridade, aproximado ao décimo mais próximo, em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto ($\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{1/2}$); m_{10} e m_{90} são os valores das massas do corpo de prova a 10 e 90 minutos, respectivamente, em gramas.

Os resultados dos coeficientes de capilaridade foram arredondados ao décimo mais próximo e o desvio relativo máximo dos resultados de pelo menos dois corpos de prova não foi superior a 20% para validação do ensaio.

Massa específica aparente no estado endurecido

Segundo a ABNT NBR 13280:2005 (ABNT, 2005e), para a determinação da massa específica aparente no estado endurecido foram utilizados três corpos de prova prismáticos, com dimensões de $4 \times 4 \times 16$ cm, moldados conforme ABNT NBR 13279:2005 (ABNT, 2005d). A densidade de massa foi calculada com a Equação 19.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{v} \times 1000 \quad (19)$$

onde: m é a massa do corpo de prova, em gramas, arredondada ao décimo mais próximo e v é o volume do corpo de prova, em centímetros cúbicos, obtido pela média de duas determinações de cada dimensão do corpo de prova, em centímetros e arredondadas ao décimo mais próximo.

O resultado foi expresso em quilogramas por metro cúbico, arredondado ao número inteiro mais próximo.

Resistência à tração na flexão

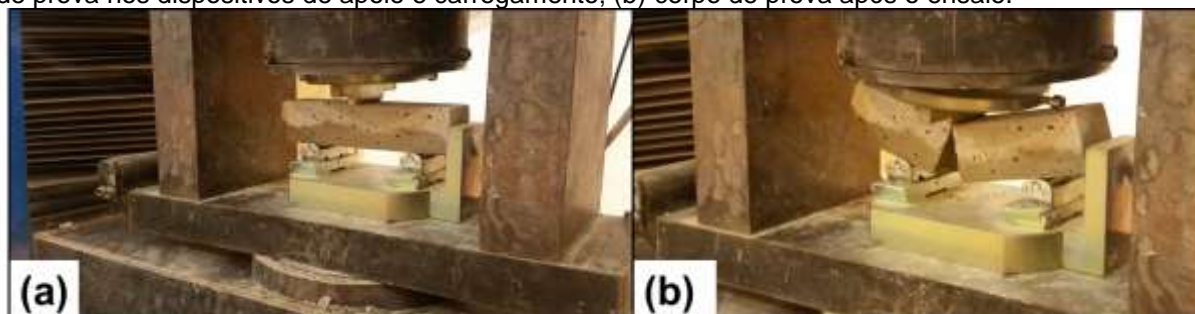
Segundo ABNT NBR 13279:2005 (ABNT, 2005d), para a realização do ensaio são necessários três corpos de prova prismáticos, aos 28 dias.

Os corpos de prova foram posicionados no equipamento marca Emic modelo DL30000, de forma que a face de rasamento não ficasse em contato com os dispositivos de apoio ou de carregamento (Figura 70a). A carga foi aplicada a uma taxa de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova e a resistência à tração na flexão foi determinada com a Equação 20:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3} \quad (20)$$

onde: R_f é o valor da resistência à tração na flexão, em megaPascal (MPa); F_f é a carga verticalmente no centro do prisma, em Newton e L é a distância entre os dispositivos de apoio, em milímetros.

Figura 70 – Fotografias do ensaio para determinação da resistência à tração na flexão: (a) corpo de prova nos dispositivos de apoio e carregamento; (b) corpo de prova após o ensaio.



Fonte: da autora, 2017.

Resistência à compressão axial

Ainda segundo a ABNT NBR 13279:2005 (ABNT, 2005d), após a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, as metades dos três corpos de prova prismáticos foram utilizados como corpos de prova para a determinação da resistência à compressão da argamassa (Figura 71a).

Cada metade do corpo de prova prismático foi posicionada no dispositivo de apoio do equipamento marca Emic modelo DL30000, de modo que nem a face rasada, nem a de ruptura tenha contato com o aparato de aplicação de carga (Figura 71). A

carga foi aplicada a uma taxa de (500 ± 50) N/s até a ruptura do corpo de prova e a resistência à compressão foi determinada com a Equação 21:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (21)$$

onde: R_c é a resistência à compressão, em megaPascal (MPa); F_c é a carga máxima aplicada, em Newton e 1600 é o valor da área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga de (40×40) mm, em milímetros quadrados.

Figura 71 – Fotografias do ensaio para determinação da resistência à compressão axial: (a) metade do corpo de prova prismático posicionado no aparato para determinação da resistência à compressão; (b) fratura do corpo de prova; (c) corpo de prova após ruptura.



Fonte: da autora, 2017.