

Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade

Dry cost concretes produced with density-separated-crushed-CDW recycled aggregates

Raphael Balduco da Silva
Sérgio Cirelli Angulo
Rafael Giuliano Pileggi
Claudio Oliveira Silva

Resumo

O uso de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) em blocos de concreto permite compatibilizar as diferentes características de composição e porosidade desses agregados com os diferentes níveis de exigência mecânica em uso dos blocos.

Paralelamente, concretos secos são pouco estudados porque a energia de prensagem obtida em vibroprensas não é facilmente reproduzível em escala de laboratório; porém, parte dessa limitação pode ser superada, realizando-se a avaliação do comportamento da mistura (sob confinamento) com prensas de laboratório com controle de deformação. Assim, o objetivo deste artigo foi analisar o comportamento do concreto seco (no estado fresco e endurecido) produzido com agregados de RCD (separados ou não por densidade), empregando-se esse método laboratorial de prensagem. Com substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado misto obtido por processo de jigagem obteve-se resistências à compressão comparáveis às dos concretos de referência. A influência das características dos agregados e das formulações de concretos secos foi identificada pela técnica de compactação laboratorial. A redução da porosidade do agregado reciclado e a otimização da granulometria da mistura seca (cimento e agregados) foram os parâmetros mais importantes para o incremento de resistência observado.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição. Agregados reciclados mistos. Separação por densidade. Comportamento em escala laboratorial. Concretos secos.

Abstract

The use of construction and demolition waste (CDW) in the production of dry cost concrete blocks harmonizes CDW recycled aggregates' characteristics with the different levels of mechanical requirements in use. At the same time, dry cost concretes are scarcely studied due to the difficulty to simulate industrial pressing energy in lab scale; however, that limitation can be partly overcome by using a lab scale compressive testing machine with elongation control, which also allows determining the mixtures' behaviour. The aim of this paper is to evaluate the fresh and hardened state of dry concrete produced with mixed CDW aggregates (with or without the use of density separation), by a lab-scale testing machine. Structural dry concrete can be obtained through the full substitution of the natural aggregates by density-separated-crushed-CDW recycled aggregates. The compressive strengths achieved are similar to those obtained by a reference dry concrete (produced with natural aggregates). The influence of the aggregates' characteristics and their dry mixes (cement; aggregates) was identified through a lab-scale compaction technique. The most important parameters to increase concrete compressive strength are the porosity reduction of recycled aggregates and granulometric optimization of dry mixes.

Keywords: Construction and demolition waste. Mixed recycled aggregates. Density separation. Lab-scale compaction behaviour. Dry concretes.

Raphael Balduco da Silva
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Sérgio Cirelli Angulo
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Rafael Giuliano Pileggi
Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Claudio Oliveira Silva
Associação Brasileira de Cimento
Portland
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 10/07/14
Aceito em 24/07/15

Introdução

O uso de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) em blocos de concreto é uma solução interessante. Dependendo da triagem realizada no RCD ou técnica de reciclagem utilizada, esses agregados reciclados passam a apresentar características bem distintas de composição e porosidade (de 3% a 20% de absorção de água) (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011), que podem ser compatibilizadas com os diferentes níveis de exigência mecânica em uso dos blocos. Blocos de concreto podem ser classificados em três classes de resistência característica (f_{bk}) distintas (ABNT, 2014). Blocos classe C ($f_{bk} \geq 3,0$ MPa) são componentes sem função estrutural utilizados na execução na alvenaria de vedação, enquanto blocos classe A ($f_{bk} \geq 8,0$ MPa) e classe B ($4,0 \leq f_{bk} < 8,0$ MPa) são componentes estruturais apropriados para a execução da alvenaria estrutural.

Souza (2001) estudou a substituição do agregado natural por agregados de RCD de natureza mista (com presença de partículas cimentícias e de cerâmica vermelha) na confecção de blocos de vedação de concreto por vibroprensagem manual. Devido à porosidade do agregado reciclado, teores crescentes de substituição do agregado natural pelo reciclado acarretaram redução da massa específica fresca do concreto seco. Além disso, esse teor crescente implicou aumento da umidade ótima necessária para se compactar o concreto seco (traço 1:10 em massa), variando de 5% a 9%. Os teores crescentes de substituição reduziram a resistência à compressão, assim como o aumento da proporção de agregados, em relação ao cimento. Com teores de substituição de agregados naturais por reciclados entre 30% e 50% da massa e proporção cimento:agregados igual a 1:10 (usual nas fábricas de blocos), foram produzidos corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) de concretos secos com resistência média à compressão de até 13 MPa (ou blocos vazados (10x19x39 cm) com resistência média à compressão de até 2,6 MPa). Através do uso de vibroprensa, Albuquerque (2005) demonstrou que, com proporção cimento:agregados igual a 1:11, a substituição integral de areia natural por areia reciclada de RCD misto foi tecnicamente possível apenas para produzir blocos vazados (14x19x39 cm) com resistência média à compressão de 2,3 MPa. Assim, conclui-se que o uso de agregados de RCD mistos em blocos de vedação, de acordo com a norma vigente e sem aumentar demasiadamente o consumo de cimento (o que implicaria maiores custos e impactos ambientais), é viável tecnicamente, através da substituição parcial de

agregados naturais por reciclados mistos (< 50% da massa).

Complementarmente, Lintz *et al.* (2012) estudaram a substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto (menos poroso que o agregado de RCD misto) na confecção de blocos estruturais de concreto por vibroprensagem (pneumática). Empregando teores de substituição de agregados naturais por reciclados entre 30% e 50% e proporção cimento:agregados igual a 1:10, foram produzidos corpos de prova com cilindros de concretos secos com resistência média à compressão entre 12 e 22 MPa (ou blocos vazados 14 x 19 x 39 com resistência média à compressão entre 4 e 6 MPa, podendo atender à classe B de blocos estruturais. Butler (2007) chegou a uma conclusão semelhante sobre a viabilidade de substituir parcialmente os agregados naturais por agregados reciclados de concreto para a produção de blocos de concreto estruturais. Esse tipo de resultado só é obtido quando o resíduo de concreto é triado na fonte, gerando agregados reciclados menos porosos.

Uma alternativa ainda não pesquisada de viabilizar o uso de teores mais elevados de substituição de agregados naturais por agregados de RCD mistos (contendo cerâmica vermelha) na produção de blocos de concretos, ou até mesmo conseguir blocos de concreto mais resistentes (estruturais), seria melhorar a qualidade dos agregados de RCD mistos. Pode-se reduzir a porosidade dos agregados de RCD produzidos através da separação por densidade utilizando, neste caso, um equipamento de processamento mineral conhecido como jigue a úmido (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Concretos secos prensados (como os dos blocos de concreto) são menos estudados em escala de laboratório que os concretos plásticos porque suas características dependem do tipo de equipamento de prensagem utilizado (MEDEIROS, 1993; FERNANDEZ, 2012). A energia de prensagem dos equipamentos industriais não é facilmente reproduzível em laboratório. Por isso, diversos autores têm tentado reproduzir em laboratório as condições de compactação e vibração realizadas nas fábricas, tornando os estudos de formulação de concretos secos menos trabalhosos e mais acessíveis. Frasson Júnior, Oliveira e Prudêncio Junior (2008) foram os primeiros autores a propor um método de compactação de concreto seco em escala de laboratório, com corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm. Os autores procuraram garantir uma condição máxima de compactação através de um número elevado de golpes manuais

no concreto seco; porém, tais condições de compactação não se aproximam da condição atingida por um equipamento hidráulico de vibroprensagem, cuja energia de compactação é superior.

Felipe (2010) e Oliveira (2004) já procuraram padronizar a energia de compactação desse tipo de ensaio laboratorial propondo o lançamento de soquete com massa e altura conhecida. Esses autores alcançaram, com isso, cerca de 80% da massa específica do concreto seco produzido na fábrica (por equipamento hidráulico de vibroprensagem).

Para ultrapassar essa limitação, Marchioni (2012) utilizou prensa convencional de laboratório para realizar a compactação e procurou avaliar, a partir do controle de deformação desse equipamento, o comportamento da mistura no estado fresco, trazendo novas possibilidades para a compreensão da influência das formulações e características dos materiais durante o processo de prensagem.

O objetivo deste artigo foi analisar o comportamento do concreto seco no estado fresco e endurecido, produzido a partir de agregados de RCD, separados ou não por densidade, empregando-se, para isso, uma prensa convencional com controle de deformação (que permite também a avaliação do comportamento da mistura na compactação). Tomou-se como referência o concreto seco produzido com

agregado natural. Para fins de comparação, todos os concretos secos formulados foram confeccionados com mesmo volume de agregados.

Materiais e métodos

Obtenção das areias de RCD

Foram coletadas cerca de 2 t de resíduos mistos já britado pela usina de reciclagem localizada em Osasco, SP. O agregado reciclado misto foi então rebitado, com britador de mandíbula, em escala de laboratório, com tamanho de partícula abaixo de 9 mm. Em seguida, o agregado de RCD misto foi homogeneizado através da formação de uma pilha alongada (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011) e quarteado em alíquotas homogêneas e representativas de 50 kg, que foram encaminhadas para os estudos de processo. A composição (% em massa) do agregado de RCD misto estimada por catação na fração graúda (entre 9 mm e 4,8 mm) foi de 49,0% de partículas cimentícias, 19,4% de partículas mistas (cimentícias e rochas), 19,8% de partículas de rochas, 8,1% de partículas de cerâmica vermelha e 3,8% de outros (madeira, gesso, papel, aço, etc.).

Para a obtenção dos agregados de RCD do estudo, duas rotas de processamento laboratorial foram propostas (Figuras 1 e 2). As rotas de processo foram realizadas em laboratório nas seguintes condições.

Figura 1 - Rota de processamento por britagem

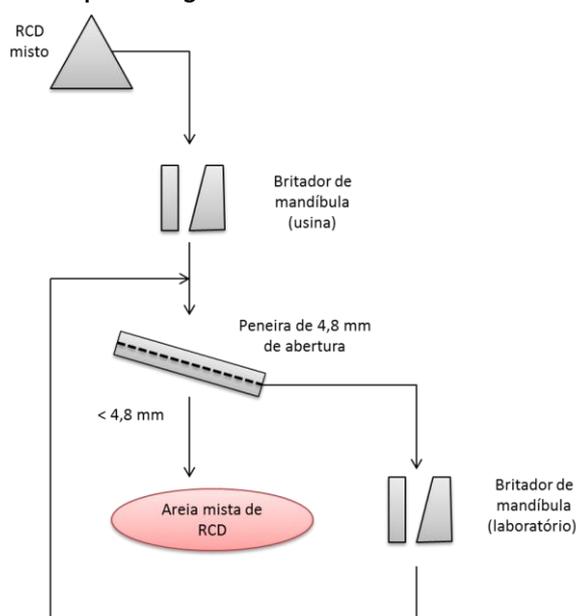
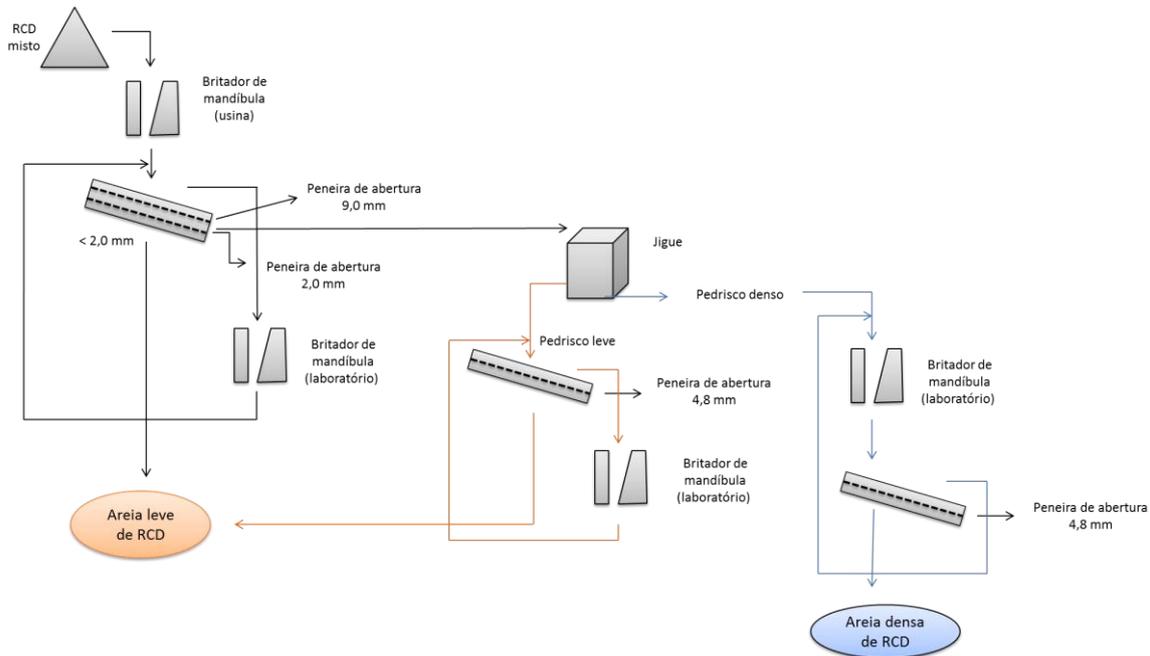


Figura 2 - Rota de processamento com jigagem



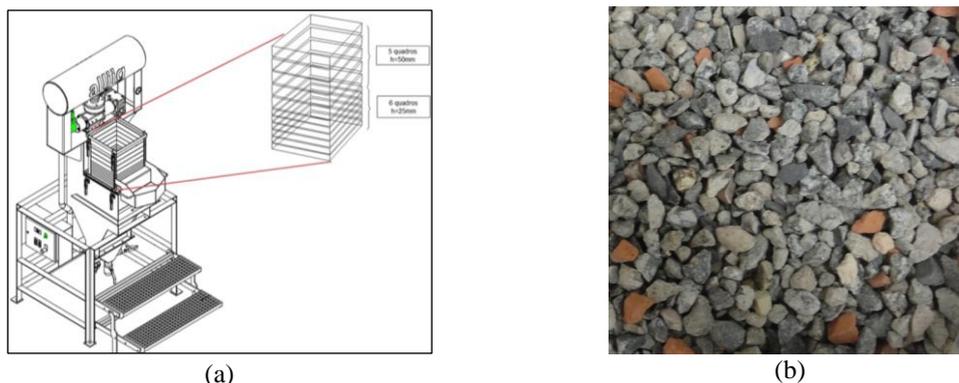
Rota por britagem

Houve apenas um ajuste na dimensão máxima do agregado de RCD misto. O material foi britado em britador de mandíbula e peneirado na # 4,8 mm. O material retido na peneira foi britado por um britador de mandíbula laboratorial e retornado para o peneiramento, formando assim um ciclo fechado de processamento. O material passante na peneira de abertura 4,8 mm formou a areia mista de RCD.

Rota por jigagem

O agregado reciclado misto foi peneirado em duas peneiras com aberturas de 9,0 mm e 2,0 mm. O material entre 9,0 mm e 2,0 mm foi homogeneizado e quarteado até atingir alíquotas de 20 kg, para ser separado por densidade num jigue de laboratório (Figura 3). O jigue estratifica as partículas em camadas com diferentes densidades (SAMPAIO; TAVARES, 2005). A amplitude do pulso do jigue de laboratório foi controlada através da pressão de ar exercida dentro do tanque do jigue. Um inversor de frequência ligado a um motor controla uma válvula rotativa, em que se estabelece a frequência (número de pulsos por minuto). Com base em diferentes testes operacionais foi selecionada a condição de pressão de 0,05 bar (para a amplitude do pulso) e rotação de 50 rpm (para a frequência de pulso), e a separação foi realizada por um período fixo de 20 min. O jigue é composto de onze bandejas de acrílico, sendo cinco de 350x350x50 mm e seis

bandejas de 350x350x25 mm. Embora o uso das bandejas de menor volume possa melhorar a separação dos materiais, optou-se por bandejas de maior volume, pois elas minimizam o efeito de segregação de tamanhos de partículas resultante do “efeito parede” (LARRARD, 1999). Para uma relação geométrica próxima a 5 (50 mm/9 mm), a influência desse efeito é bem restrita (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Foi definida uma quantidade de 20 kg para jigar o material, suficiente para completar todas as bandejas de maior volume e garantir a maior representatividade de massa durante o ensaio. Para coletar o material após o ensaio era retirada uma bandeja por vez, garantindo que toda a amostra caísse na gaveta de coleta. Primeiramente eram retiradas as bandejas superiores, que continham o pedrisco leve (45% kg/kg; teor de cerâmica vermelha ~ 12,5%), contido nas 2 camadas superiores, para, posteriormente, ser retiradas as três camadas inferiores, que continham o pedrisco denso (55% kg/kg; teor de cerâmica vermelha ~ 4,5%). O pedrisco denso de RCD foi novamente britado, em circuito fechado, passante na # 4,8 mm, para ajustar a dimensão máxima para uso em blocos e reduzir o efeito parede durante o empacotamento dos agregados no corpo de prova do concreto seco. O pedrisco leve foi também britado abaixo de 4,8 mm pelo mesmo motivo. Esse pedrisco leve britado foi composto com a fração < 2,0 mm (que não entrou no jigue), formando areia leve.

Figura 3 - (a) Jigote de estratificação All Mineral¹ e (b) o agregado denso obtido

Caracterização das areias de RCD

Foram obtidas alíquotas representativas de 20 kg e, em seguida, de 1 kg, utilizando quarteador do tipo Jones, para realização dos ensaios de caracterização dos agregados (tanto os reciclados quanto os naturais utilizados no traço de concreto seco de referência).

Distribuição granulométrica

As determinações de distribuição granulométrica foram realizadas no equipamento Camsizer, da empresa Retsch, modelos Camsizer-L (C-L) e Camsizer-XT (C-XT), com alíquotas de 1 kg, uma única determinação por amostra. O Camsizer é um equipamento óptico-eletrônico que mede tamanho e forma de partículas através da análise dinâmica de imagens (2D) (HAWLITSCHHECK *et al.*, 2013). O material passa por uma área onde existe uma fonte de luz LED e duas câmeras captam as imagens das partículas, sendo estas processadas pelo software do equipamento através do parâmetro BR_MIN (menor lado do retângulo, de menor área, que confina a projeção da partícula). O modelo C-L realiza análise do material em queda livre (material seco) e possui limite analítico de 30 µm a 30 mm; já o C-XT opera com material seco e também em meio aquoso (<0,6 mm), com alcance de 1 µm a 3 mm. O programa referente aos dois modelos do Camsizer calculou a granulométrica composta das duas frações, a partir das porcentagens de massa delas.

Absorção de água e massa específica aparente

A absorção das areias de RCD (mista, densa e leve) e dos agregados naturais (areia rosa e pó de pedra) foi avaliada de acordo com a norma ABNT (2001). Alíquotas de 1 kg foram secas em estufa (110 °C) e submersas em água durante 24 h. Em seguida, as amostras foram secas com circulador de ar até atingir a condição saturada superfície seca

(SSS), que foi avaliada pelo desmoldamento da areia depois de retirado o molde metálico, e a massa saturada superfície seca (M_{ss}) foi determinada. A absorção de água foi calculada da seguinte forma: $A(\%) = [(M_{ss} - M_{seca}) / (M_{seca})] \times 100$.

A norma utilizada para se determinar a massa específica das areias foi a ABNT (2009a). Determina-se a massa do picnômetro vazio e cheio. A diferença é o volume do picnômetro. Em seguida, determina-se a massa do picnômetro e da areia na condição SSS (~500 g). Completa-se o volume do picnômetro com água, agitando-se periodicamente para eliminar as bolhas, e determina-se a massa do conjunto (frasco + água + material). Então, retira-se a areia do frasco e seca-se em estufa (110 °C) até obter a massa constante (na condição seca). O volume aparente foi determinado pela diferença entre o volume do picnômetro e o volume de água adicionada ao frasco. A massa específica aparente foi calculada da seguinte forma: $ME_A \text{ (g/cm}^3 \text{ ou kg/dm}^3\text{)} = [(Massa \text{ areia}_{seca}) / (\text{volume aparente})]$. No cálculo do volume de sólidos, foi descontado o volume de água absorvida pela areia do volume aparente. A massa específica real foi calculada da seguinte forma: $MER \text{ (g/cm}^3 \text{ ou kg/dm}^3\text{)} = [(Massa \text{ areia}_{seca}) / (\text{volume de sólidos})]$.

Para a realização da absorção de água e massa específica para agregados graúdos, foi utilizado a ABNT (2009b). Alíquotas de 2 kg foram secas em estufa (110°C) durante 24 h e após esse período, foram tomadas as massas secas. O material foi submerso em água durante 24 h, e determinou-se a massa na condição SSS, após secagem com um pano seco.

Esses ensaios foram realizados em duplicata.

¹ Disponível em: <<http://www.allmineral.com>>.

Formulação dos concretos secos

A Tabela 1 apresenta os três traços estudados. Nas formulações 1 e 2 foram utilizadas as areias de RCD obtidas pelas rotas (britagem e jigagem). Na formulação 3 foi empregado o traço de referência², que foi dosado com agregados naturais.

Nas formulações dos traços foi fixado o volume dos agregados do concreto, devido ao fato de agregado reciclado possuir massa específica inferior à do agregado natural. Em caso de substituição da massa de agregado natural por agregado reciclado, o volume de agregado seria maior do que o previsto, implicando aumento de porosidade do agregado, prejudicando as análises comparativas (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Para se avaliar a influência da granulometria no empacotamento dos agregados foram determinadas as massas unitárias (MU) das misturas secas (cimento e agregados) das três formulações apresentadas acima, usando amostras de aproximadamente 100 g cada e determinando-as no equipamento Geopyc, da empresa Macromeritics, na configuração “*tap density*”³. A porosidade residual (volume de vazios) das misturas (1- MU da mistura/MEA da mistura - %) foi então determinada. A massa específica aparente

(MEA) da mistura foi calculada com base na lei das misturas, ponderando-se a massa de cada material com a MEA respectiva. A porosidade interna dos agregados foi desconsiderada neste caso. Foi considerada apenas a porosidade resultante do arranjo granulométrico.

Comportamento dos concretos secos na compactação

Como as distribuições granulométricas dos agregados eram distintas e decorrentes das decisões relativas ao processamento dos agregados de RCD, decidiu-se encontrar, para cada traço de concreto estudado, o teor ótimo de umidade que conduzia a máxima compactação do corpo de prova (avaliada pela massa específica do concreto, no estado fresco).

Para a formulação dos concretos secos, 1.000 g de concreto seco foram produzidos em argamassadeira de laboratório de eixo vertical, com a seguinte sequência de mistura: agregados secos, cimento, mistura por 1 min em velocidade baixa, adição de água, mistura por mais 1 min em velocidade baixa e mistura por mais 2 min na velocidade média.

Tabela 1 - Formulação em massa e volume dos concretos secos

Concreto seco com areia mista de RCD (CS-AM)			
Material	Traço	Massa (%)	Volume (%)
Cimento (CP V 40)	1,00	16,67	11,53
Areia mista de RCD	5,00	83,33	88,47
Total	6,00	100,00	100,00
Concreto seco com areia densa e leve de RCD (CS-AD&L)			
Material	Traço	Massa (%)	Volume (%)
Cimento (CP V 40)	1,00	15,38	11,51
Areia leve de RCD	2,50	38,46	43,11
Areia densa de RCD	3,00	46,15	45,38
Total	6,50	100,00	100,00
Concreto seco de referência, com agregado natural (CSR-AN)			
Material	Traço	Massa (%)	Volume (%)
Cimento (CP V 40)	1,00	13,33	11,66
Areia rosa	0,65	8,67	8,86
Pó de pedra	1,30	17,33	17,66
Pedrisco fino	4,55	60,67	61,82
Total	7,50	100,00	100,00

² O traço foi obtido com uma empresa fabricante de blocos estruturais na cidade de São Paulo.

³ Disponível em: <<http://www.micromeritics.com/Product-Showcase/GeoPyc-1360/GeoPyc-TAP-Density-Option.aspx>>.

Para cada umidade estudada de cada traço de concreto foram obtidos 2 corpos de prova de ~48 (largura) mm x 50 (altura) mm, com 250 g de material cada, por prensagem, utilizando para isso uma prensa da marca Emic de 10 t (Figura 4). O ensaio foi realizado de acordo com Marchioni (2012), na condição confinada, contendo um cilindro externo de aço inox de 100 mm e espessura interna de 50 mm, e molde bipartido de 1 mm. O concreto seco foi comprimido com limite de carga de até 90 KN, com um pistão específico de 48 mm e velocidade de 1 mm/s. Essa condição garante máxima compactação e está próxima da praticada pelas vibroprensas hidráulicas. Após a realização do ensaio, o cilindro foi removido, assim como o corpo de prova com o molde, mecanicamente, para evitar microfissuração do corpo de prova. Os moldes bipartidos foram removidos após 24 h da prensagem, obtendo-se os corpos de prova.

Para o traço de concreto seco de referência (CSR-AN) foi analisada a compactação para os teores de umidade de 6%, 7% e 8%, totalizando 6 corpos de prova (dois para cada umidade). Para o traço de concreto seco com areia densa e leve de RCD (CS-AD&L) foram analisados os teores de 7%, 8%, 9%, e 10%, totalizando outros 8 corpos de prova. Para o traço de concreto seco com areia mista de RCD (CS-AM), foram analisados os teores 6%, 7%, 8%, 9% e 10%, totalizando mais 10 corpos de prova.

A massa específica aparente dos 24 corpos de prova no estado fresco foi avaliada diretamente pela relação entre a massa e volume aparente e os valores médios utilizados para se determinar o teor de umidade ótimo para cada traço.

Em seguida, os traços de concretos secos na condição de umidade ótima foram reproduzidos com 4.000 g de material e foram moldados 12 corpos de prova para avaliação das propriedades

dos concretos secos no estado endurecido (triplicatas de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias e triplicata do índice de vazios). A cada procedimento de prensagem as curvas carga x deslocamento foram plotadas e comparadas, para se avaliar o comportamento reológico das misturas no estado fresco.

Caracterização dos concretos no estado endurecido

Conforme mencionado anteriormente, os corpos de prova foram desmoldados apenas 24 h após a moldagem, para evitar o manuseio do concreto nas primeiras idades e induzir fissuração do corpo de prova. Em seguida, foram curados em câmara úmida, até as respectivas idades de realização dos ensaios de caracterização no estado endurecido.

O ensaio de absorção de água no estado endurecido foi determinado após 7 dias de cura, sendo realizado com base na ABNT (2009c) e adaptado por Marchioni (2012), em triplicata. Durante o período de saturação de 72 h dos corpos de prova, utilizou-se um dessecador com a bomba de vácuo para retirar o ar dos poros permeáveis e acelerar o preenchimento de vazios dos corpos de prova pela água, durante o processo de saturação. A condição SSS foi obtida por secagem por pano, e a massa SSS determinada. Para determinação da massa seca os corpos de prova foram mantidos em estufa a 40 °C até constância de massa.

A resistência mecânica dos corpos de prova foi determinada, em triplicata, nas idades de 3, 7 e 28 dias, conforme a ABNT (2007). Os corpos de prova foram capeados com pasta de enxofre, e a resistência à compressão corrigida de acordo com a Tabela 2, utilizando a relação altura (h)/diâmetro (d) de cada corpo de prova.

Figura 4 - Prensa com cilindro de confinamento e pistão (a), extração do corpo de prova com o molde bipartido (b) e remoção do molde bipartido após 24 h (c)

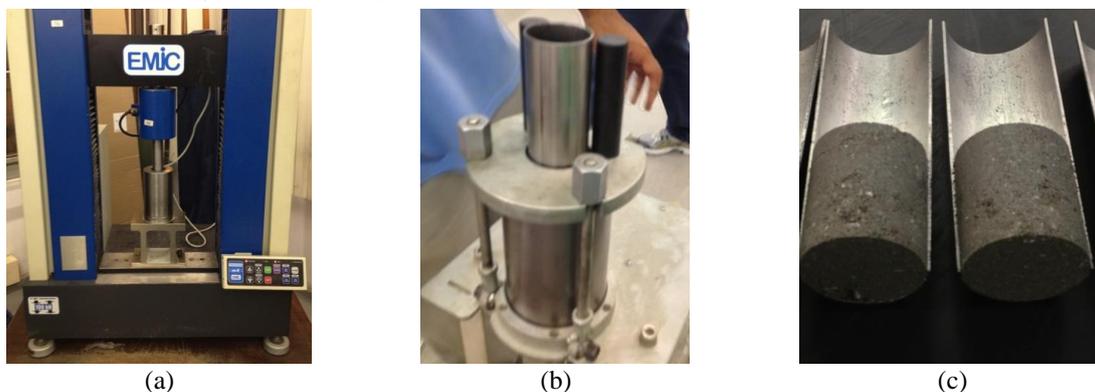


Tabela 2 - Fator de correção para a força ABNT NBR 5739 (2007)

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Figura 5 - Distribuição granulométrica dos agregados naturais

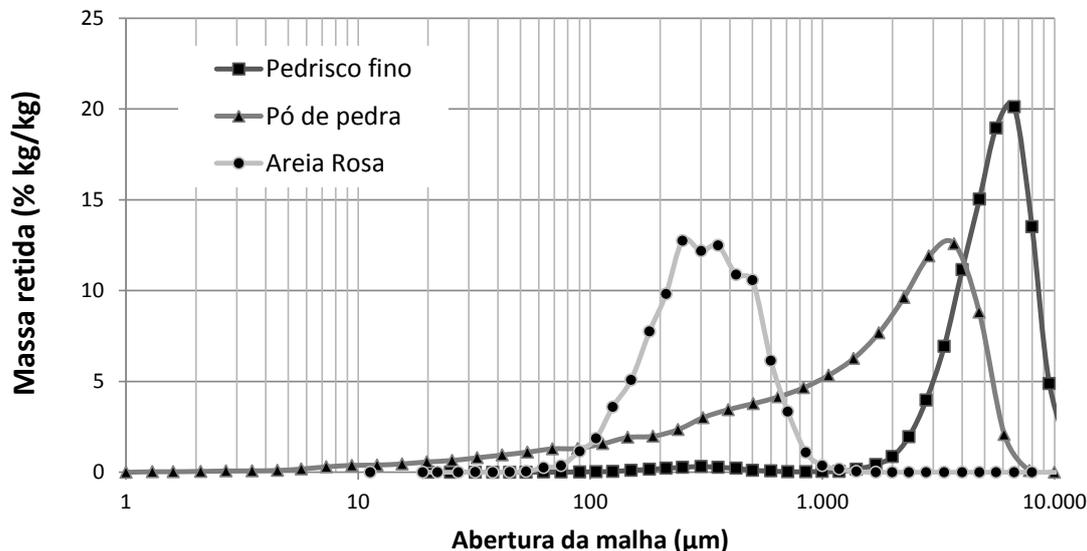
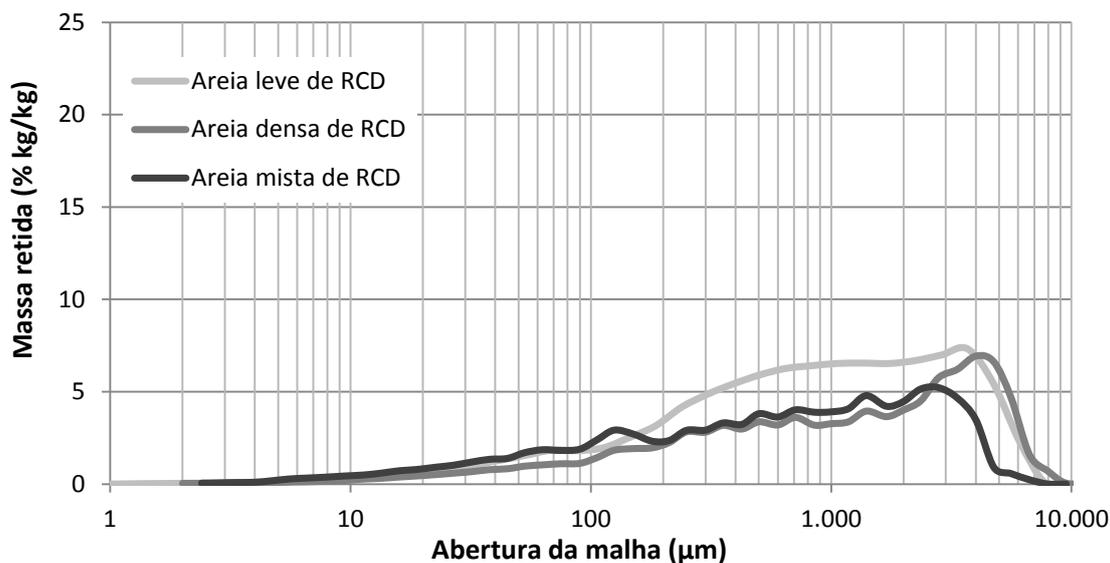


Figura 6 - Distribuição granulométrica dos agregados reciclados



Resultados e discussões

Caracterização dos agregados

Distribuição granulométrica

A Figura 5 e a Figura 6 apresentam as distribuições granulométricas dos agregados naturais e dos agregados reciclados respectivamente. As curvas das areias de RCD apresentam teores mais elevados de finos menores que 100 μm e menores possibilidades de

combinações entre eles, de forma a aumentar o empacotamento e reduzir a porosidade na mistura de agregados.

Absorção de água e massa específica

A Tabela 3 apresenta as absorções médias de água das areias de RCD e as respectivas variações nos resultados. A absorção da areia densa de RCD corresponde a 60% da absorção de água da areia mista de RCD. Assim, o jigue foi capaz de reduzir a porosidade do agregado de RCD em 43%.

Tabela 3 - Absorção de água e massa específica aparente dos agregados

Agregados	Absorção de Água (% kg/kg)	Massa Específica Aparente (MEA) (kg/dm ³)	Massa Específica Real (MER) (kg/dm ³)	Porosidade [(1-MEA/MER)x100] (%)
Areia densa de RCD	5,99 ± 0,06	2,37 ± 0,01	2,67 ± 0,01	11,2
Areia leve de RCD	10,28 ± 1,25	2,07 ± 0,02	2,63 ± 0,13	21,3
Areia mista de RCD	9,72 ± 0,45	2,02 ± 0,02	2,52 ± 0,01	19,8
Areia rosa	0,34 ± 0,11	2,62 ± 0,01	2,65 ± 0,01	1,1
Pó de pedra	1,08 ± 0,04	2,59 ± 0,01	2,66 ± 0,01	2,6
Pedrisco fino	0,97 ± 0,01	2,61 ± 0,01	2,67 ± 0,01	2,2

Ponderando-se as absorções de água das areias de RCD da rota de jigagem (areia densa e leve de RCD) com as respectivas massas de produtos obtidos⁴, a absorção de água composta desses agregados é equivalente a 7,92%, inferior à absorção de água da areia mista de RCD (9,72%), indicando que a britagem da areia leve de RCD foi capaz de reduzir a porosidade em 25%. Assim, a separação densitária é um método mais eficiente que a britagem para reduzir a porosidade das areias de RCD.

Os resultados de absorção das areias de RCD ficaram todos abaixo de 17%, que é o recomendado pela ABNT (2004), a qual estabelece as recomendações para uso dos agregados reciclados em concretos não estruturais. Conforme esperado, quando maior a absorção de água, menor a massa específica aparente das areias de RCD.

Comportamento dos concretos secos na compactação

A Figura 7 apresenta os resultados de carga x deslocamento, em duplicata, das três formulações de concretos secos com teores crescentes de umidade. O deslocamento do pistão responsável pela compactação aumentou com o aumento do teor de umidade na mistura, demonstrando que a água auxilia nesse processo de compactação.

Para o concreto seco de referência produzido com agregado natural (CSR-NA), houve pouca diferença na compactação entre 6% e 8% de umidade. Para o concreto seco produzido com areia densa e leve de RCD (CS-AD&L), o teor de umidade de 8% conseguiu o maior deslocamento do pistão (que está associada à máxima compactação). Para o concreto seco produzido com areia de RCD mista, houve pouca diferença na compactação entre 6% e 9%.

Coerentemente, para os concretos secos produzidos com agregado natural e areia de RCD misto, a umidade ótima para máxima compacidade foi de 7% (Figura 8), enquanto para o concreto seco produzido com a areia densa e leve de RCD a umidade ótima foi de 8%. Os concretos com agregado natural, agregado denso e misto de RCD apresentaram massas específicas no estado fresco de 2,34 kg/dm³, 2,13 kg/dm³ e 2,04 kg/dm³ respectivamente.

⁴Absorção composta dos agregados de RCD da rota avançada = $0,55 \times 5,99 + 0,45 \times 10,28 = 7,92\%$

Figura 7 - Curvas de compactação dos concretos secos com diferentes teores de umidade, em duplicata

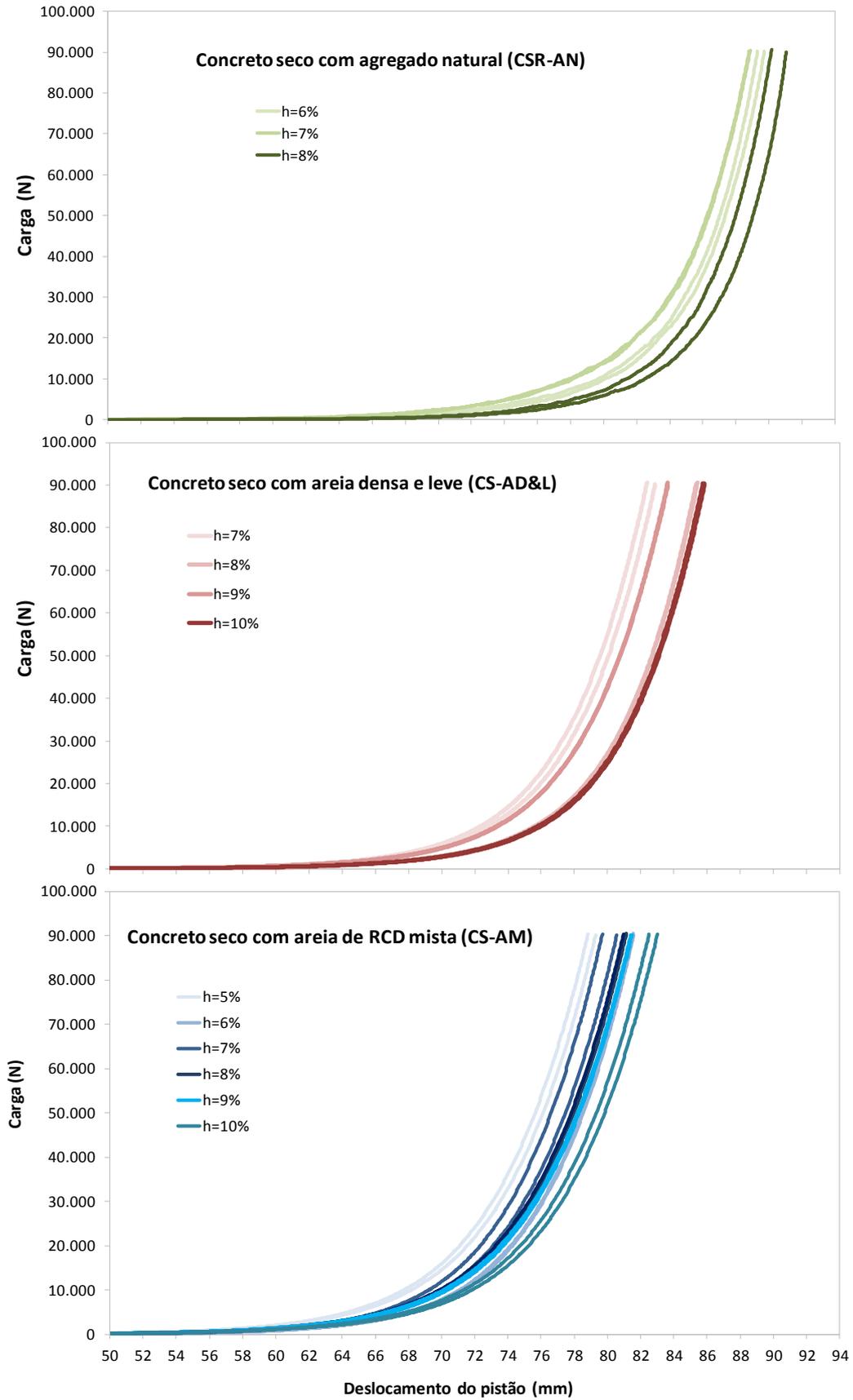
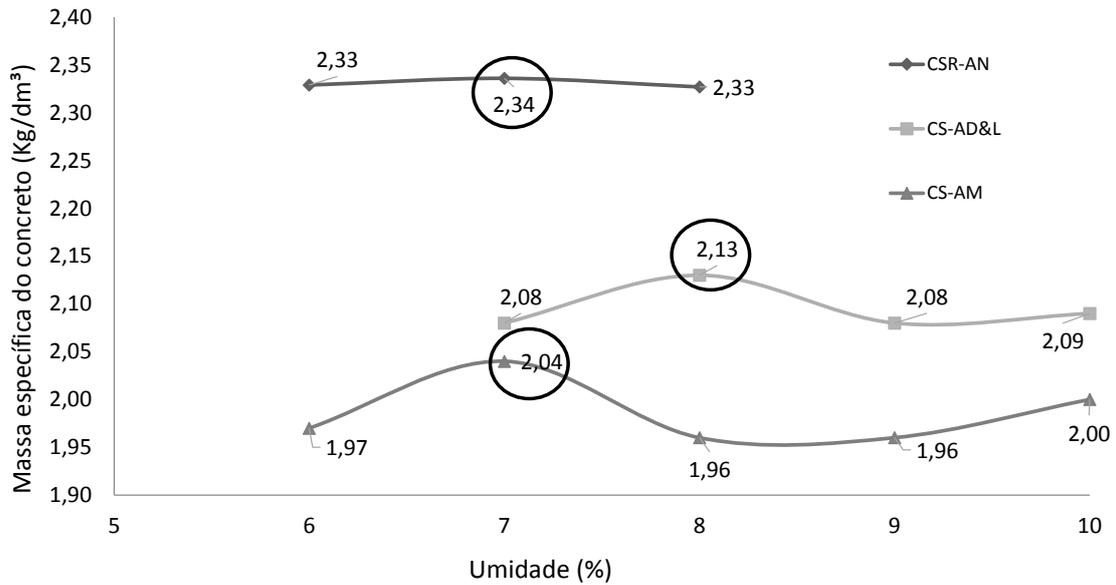


Figura 8 - Massa específica no estado fresco x umidades dos corpos de prova



A Figura 9 apresenta as curvas de compactação das formulações de concretos secos com os teores ótimos de umidade, em triplicata. O CSR-AN apresentou maior deslocamento plástico na prensagem, seguido do CS-AD&L e do CS-AM.

Essa diferença de comportamento pode ser atribuída tanto à maior área superficial e porosidade dos agregados reciclados quanto à distribuição granulométrica, em volume, das três misturas secas (cimento e agregados) utilizadas no estudo (Figura 10). A mistura de cimento e agregado natural é trimodal, enquanto a mistura de cimento e areia densa e leve de RCD é bimodal e a mistura de cimento e areia de RCD mista é monomodal (MENDES, 2008). Assim, espera-se melhor mobilidade durante a prensagem nas

misturas de referência, seguida daquela contendo areia densa e leve de RCD, e daquela contendo a areia de RCD mista, devido à existência e número de descontinuidade entre as distribuições granulométricas das misturas secas. Sem a presença da descontinuidade, ocorre maior intertravamento de partículas no processo de prensagem.

A Tabela 4 apresenta a porosidade residual das misturas secas (cimento e agregados). As misturas que empregaram agregados reciclados (CS-AD&L e CS-AM) apresentaram aumento discreto na porosidade residual, devido à alteração de forma das partículas e/ou excesso da fração fina (< 2 mm) na estrutura granular da mistura.

Figura 9 - Curvas de compactação dos concretos secos com os teores ótimos de umidade, em triplicata

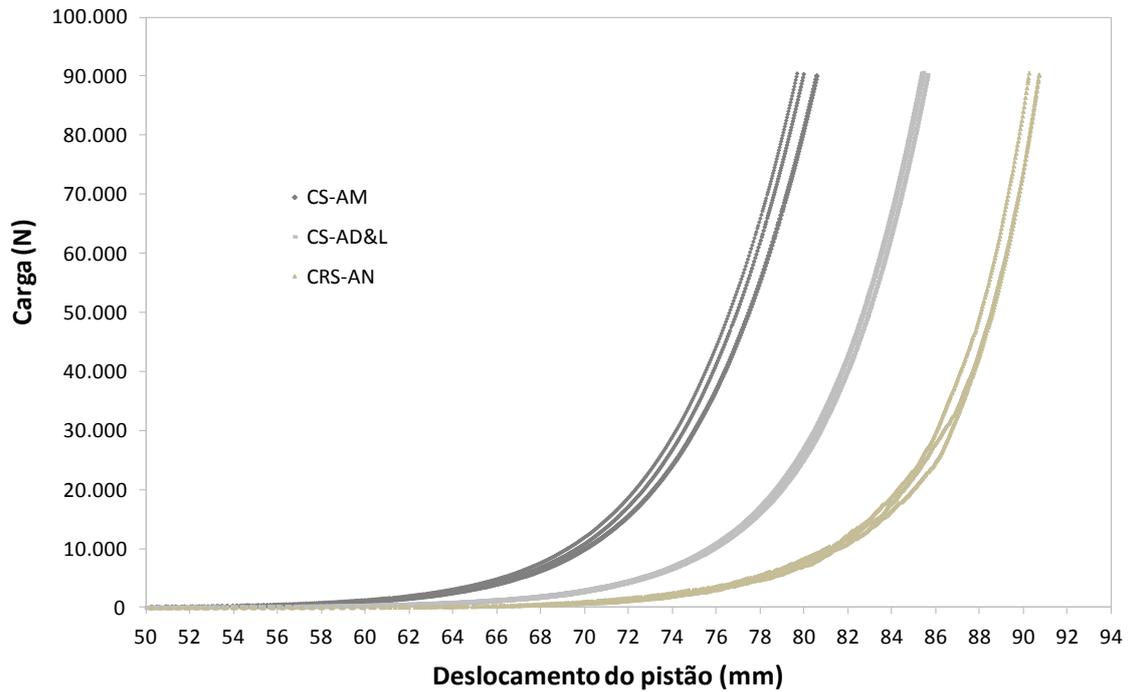


Figura 10 - Distribuição granulométrica da mistura seca (cimento-agregados) utilizada para prensagem dos corpos de prova dos concretos secos

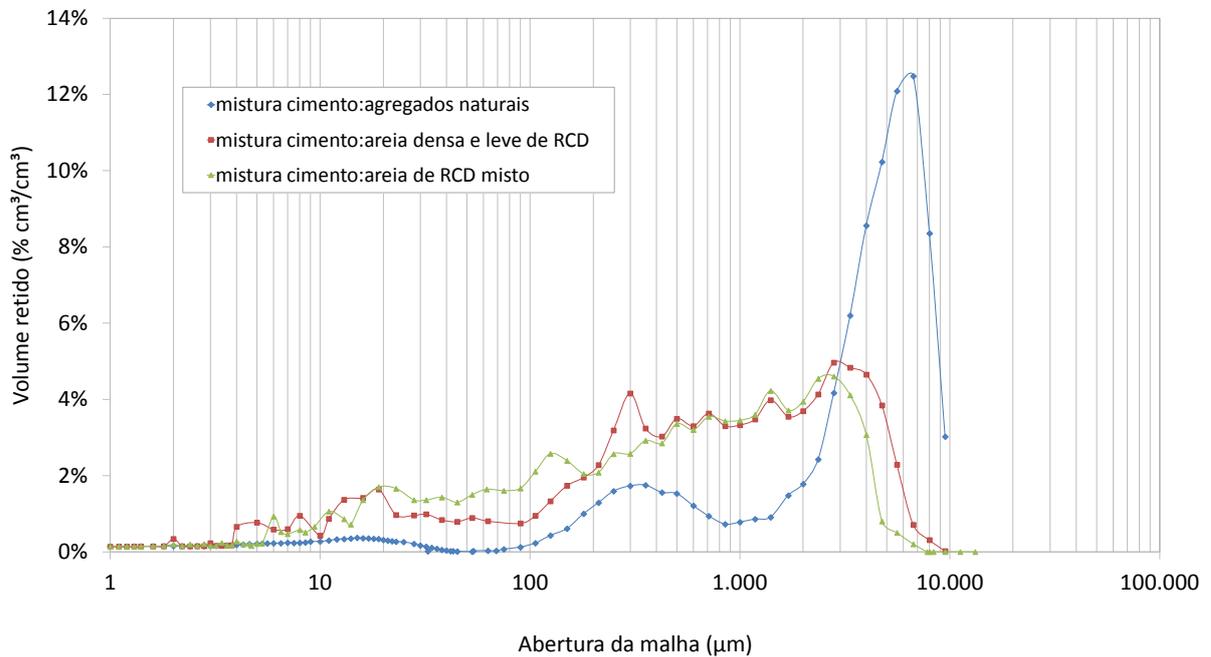


Tabela 4 - Porosidade residual (índice de vazios) das misturas de concreto seco

Misturas	MU da mistura (g/cm³)	MEA da mistura (g/cm³)	Porosidade residual (%)
CS-AD&L	1,68 ± 0,01	2,37	29,1
CS-AM	1,56 ± 0,01	2,20	29,1
CSR-AN	1,91 ± 0,01	2,67	28,5

Nota: *a massa específica (aparente ou real) adotada para o cimento foi 3,1 kg/dm³. Desconsiderou-se a existência de porosidade no cimento.

Caracterização dos concretos secos no estado endurecido

A Figura 11 apresenta os resultados da resistência à compressão dos concretos secos moldados com os três tipos de agregados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se que o concreto produzido com areia densa e leve de RCD apresentou resistência semelhante à do concreto com agregado natural a partir dos 7 dias, enquanto o concreto seco produzido com areia de RCD mista foi 30% inferior. A queda de resistência pode estar associada tanto à presença dos agregados porosos quanto à dificuldade durante o processo de compactação, resultante de uma granulometria sem descontinuidade. Da mesma forma, o aumento de resistência mecânica obtido para os concretos

secos produzidos com areias densa e leve de RCD obtidos pelo processo de jigagem-britagem pode estar relacionado à redução da porosidade do agregado reciclado e melhor distribuição granulométrica (que contém descontinuidades).

Devido à presença de agregados reciclados menos porosos, o concreto produzido com as areias densa e leve de RCD apresentou absorção de água média inferior ao concreto produzido com areia de RCD mista, mas significativamente superior à do concreto de referência, produzido com agregados naturais (Figura 12). Isso indica que a porosidade do agregado não é o único fator a influenciar a resistência do concreto seco, existindo influência da mobilidade da mistura durante a prensagem.

Figura 11 - Resistência à compressão das formulações de concretos secos

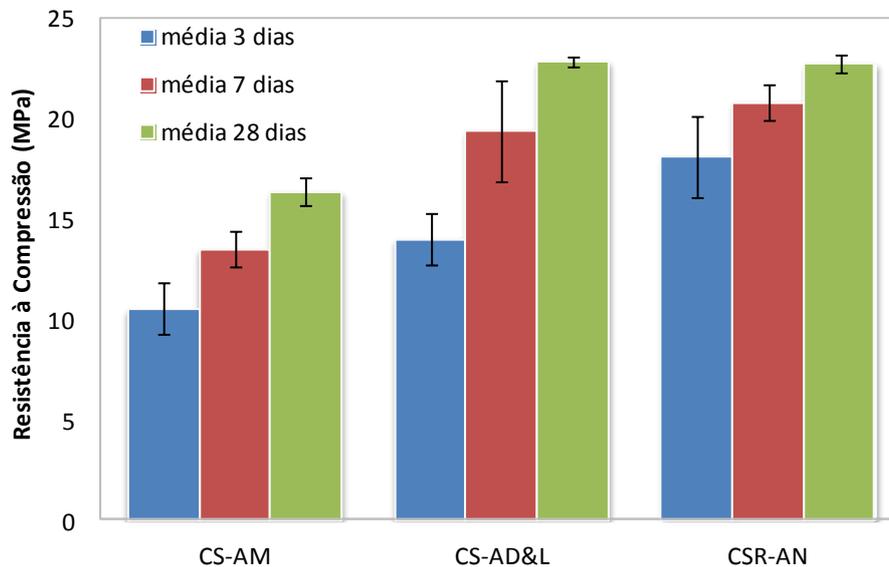
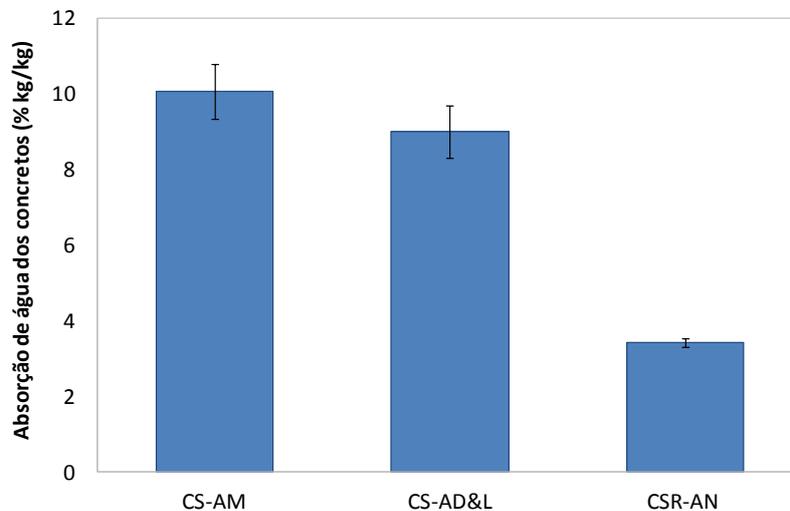


Figura 12 - Absorção de água das formulações de concretos secos



Conclusões

Foi apresentada uma estratégia de processamento que combina o uso de jigues e britagem para obtenção de agregados reciclados menos porosos e permite uso integral desses em concretos secos, viáveis de ser utilizados em blocos com função estrutural. As resistências à compressão obtidas foram comparáveis às dos concretos produzidos com agregados naturais.

Esses resultados são válidos para composições similares de RCD, com predominância de partículas cimentícias e teores restritos de cerâmica vermelha, que permitam recuperação elevada de fração densa de agregados no processo de jigagem. Além disso, esses resultados estão restritos às distribuições granulométricas obtidas para os agregados reciclados e às composições granulométricas das misturas (cimento e agregados) avaliadas. Pequenas alterações podem resultar em resultados distintos ao obtido nesta pesquisa.

A análise dos parâmetros carga e deslocamento durante a compactação (sob confinamento) em escala de laboratório mostrou-se adequada para se avaliar o comportamento das misturas de concretos secos no estado fresco. É uma ferramenta de estudo de baixo custo e fácil implementação, que pode ser utilizada para a compreensão da influência das características dos materiais e das suas formulações durante o processo de prensagem.

A redução da porosidade do agregado reciclado quanto à presença de descontinuidades na composição granulométrica da mistura seca (cimento e agregados) foram considerados os parâmetros mais importantes para o incremento dessas resistências.

Referências

ALBUQUERQUE, S. M. **Estudo do uso de agregados de resíduos de construção e demolição em blocos de concreto para alvenaria**. São Paulo, 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto Com Agregados Reciclados. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Arte Interativa, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria: requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009c.

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, 2004.

BUTLER, A. M. **Uso de Agregados Reciclados de Concreto em Blocos de Alvenaria Estrutural**. São Carlos, 2007. 535 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FELIPE, A. S. **Contribuição Para a Otimização de Traços de Concreto Utilizados na Produção de Blocos Estruturais**. Ilha Solteira, 2010. 160 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers: produção e controle de qualidade**. 3. ed. Jaraguá do Sul: Editora Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2012.

FRASSON JUNIOR, A.; OLIVEIRA, A. L.; PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R. Metodologia de Dosagem Para Blocos de Concreto Empregados em Alvenaria Estrutural. **Revista PRISMA**, Caderno Técnico 10. Mandarin Ltda, 2008.

HAWLITSCHKE, G. *et al.* Análise de Imagens Por Fluxo Dinâmico de Partículas. **Brasil Mineral**, São Paulo, v. 1, n. 329, p. 8 2-85, maio 2013.

LARRARD, F. de. **Concrete Mixture Proportioning**: a scientific approach. London: E&FN Spon, 1999.

LINTZ, R. C. C. *et al.* Study of the Reuse of Construction Residues in Concrete Employed by Blocks Manufacture. **Ibracon Structures and Materials Journal**, Campinas, p.1-8, jun. 2012.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de Técnicas de Caracterização de Concreto Seco Utilizado na Fabricação de Peças de Concreto Para Pavimentação Intertravada**. São Paulo, 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria Estrutural Não Armada de Blocos de Concreto**: produção de componentes e parâmetros de projeto. São Paulo, 1993. 449 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MENDES, T. M. **Influência do Coeficiente de Atrito Entre os Agregados e da Viscosidade da Matriz no Comportamento Reológico Suspensões Concentradas Heterogêneas**. São Paulo, 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição a Dosagem e Produção de Peças de Concreto Para Pavimentação**. Florianópolis, 2004. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e Empacotamento de Partículas**: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. **Beneficiamento Gravimétrico**: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005.

SOUZA, J. G. de. **Contribuição ao Estudo da Relação Entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto**: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Brasília, 2001. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pela concessão do auxílio à pesquisa – processo 2012/25496-6. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Raphael Balduino da Silva

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo | Av. Professor Almeida Prado, 532, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-901 | Tel.: (11) 3767-4253 Ramal 4253 | E-mail: raphaelbs@ipt.br

Sérgio Cirelli Angulo

Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Rua Prof. Almeida Prado, 532, Prédio 01, Cidade Universitária, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-900 | Tel.: (11) 3091-5793 | E-mail: sergio.angulo@lme.pcc.usp.br

Rafael Giuliano Pileggi

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Av. Prof. Almeida Prado, Trav. 2, n. 83, Cidade Universitária, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-900 | Tel.: (11) 3091-5442 | E-mail: rafael.pileggi@lme.pcc.usp.br

Claudio Oliveira Silva

Associação Brasileira de Cimento Portland | Av. Tórres de Oliveira, 76, Jaguaré São Paulo - SP - Brasil | CEP 05347-902 | Tel.: (11) 3760-5376 | E-mail: claudio.silva@abcp.org.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br