

Análise da quebra de partículas de agregados reciclados durante a compactação do concreto seco

(Analysis of particles breakage of CDW recycled aggregates during the compaction of dry-cast concretes)

D.A. Niza¹, G.C.P. Brasileiro, J.A.F. Mesquita, R.C.O. Romano, R.G. Pileggi, S.C. Angulo

¹Universidade de São Paulo, Escola Politécnica

¹Av. Prof. Almeida Prado, 83 – Butantã, São Paulo – SP – 05508-070

daniilo.niza@gmail.com

Resumo

O concreto seco é utilizado na fabricação de artefatos cimentícios como blocos e peças de pavimentação, e o processo de fabricação por vibro-prensagem, permite a compactação da massa conferindo propriedades como a densidade e resistência à compressão do concreto seco. Produtos como os blocos de vedação apresentam poucas exigências de desempenho mecânico e, neste caso, a incorporação de agregados reciclados é possível, oferecendo uma alternativa para redução dos impactos ambientais. Entretanto, algumas características dos agregados reciclados como elevada porosidade e baixa dureza, podem levar a quebra das partículas durante o processo de compactação. O objetivo deste trabalho é verificar a quebra do agregado reciclado durante a compactação, alterando o volume de controle do corpo de prova compactado e empregando um método laboratorial baseado em reometria compressiva. A quebra dos agregados recicladas foi avaliada verificando-se a distribuição de partículas por análise dinâmica de imagens (ADI), antes e após o processo de compactação. Os resultados confirmam que a alteração do volume de material compactado interfere na quebra dos agregados reciclados observada após a compactação.

Palavras chave: agregados reciclados, quebra de partículas, compactação, concreto seco

Abstract

Dry concrete is used in the manufacture of cementitious artifacts such as blocks and paving pieces, and the vibro-press fabrication process allows compacting of the mix by imparting properties such as compressive strength and density. Products such as sealing blocks have few mechanical performance requirements and, in this case, the incorporation of recycled aggregates is possible, offering an alternative to reduce environmental impacts. However, some characteristics of recycled aggregates such as high porosity and low hardness can lead to particle breakage during the compaction process. The objective of this work is to verify the breaking of the recycled aggregate during compaction by changing the control volume of the compacted test sample by the laboratory scale method based on the compressive rheometry. The breakdown of the recycled aggregates was evaluated by the particle distribution technique by dynamic image analysis (DIA) after the compacting process. The results show that the change in the volume of compacted material interferes with the breaking of aggregates after compaction.

Keywords: recycled aggregates, particle breaking, compaction, dry cast concrete

INTRODUÇÃO

A fabricação de artefatos cimentícios como blocos e peças de pavimentação utilizam um tipo de concreto denominado “concreto seco”, que recebe este nome pelo teor reduzido de água utilizado na mistura (6 a 9% em massa).

Devido à baixo teor de água para fornecer fluidez às misturas, o processo de moldagem ocorre por: (a) vibração, desaglomerando os finos e aumentando a fluidez em altas taxas de cisalhamento [1], e (b) compactação, que elimina vazios e densifica o produto gerado [2]. Quando desmoldados, os concretos se comportam como um sólido, dispensando o uso de fôrmas e permitindo um rápido processo de produção e expedição de produtos [3].

A intensidade empregada no processo de compactação pelas vibroprensas interfere na densidade e desempenho mecânico do concreto seco: quanto maior a carga de compactação (ou energia) usada durante o processo, maior a densidade e maior a resistência mecânica desses concretos [4][5].

Além disso, a energia de compactação depende também do volume de material a ser preenchido dentro do molde, uma vez que muitas máquinas estabelecem uma altura de descida fixa do pistão; então, a carga aplicada é o resultado do volume fornecido (compactado) (principalmente controlado pelo tempo de enchimento do material no molde) [6].

Desta forma, em muitas pesquisas realizadas em laboratório tenta-se reproduzir a carga, energia ou condição de compactação empregada, ao invés dos métodos habituais de pesquisa realizados pelas fábricas (testes em escala de produção).

Poon et al. [7] usaram moldes metálicos rígidos, preencheram com o material seco e submetem o material a uma força de compressão axial uniformemente distribuída de 600 kN por um minuto para compactar o material. Felipe [8] e Oliveira [9] propuseram o estabelecimento da energia de compactação com o lançamento de um soquete com uma massa conhecida de uma altura fixa, atingindo cerca de 80% da densidade do concreto seco produzido na fábrica.

Marchioni [10] propôs a adaptação do método de reometria compressiva utilizado na área farmacêutica [11] para realizar a compactação de misturas cimentícias a seco: compressão axial em um estado confinado usando uma máquina de teste universal de laboratório. O método permite controlar a carga de compactação, o volume da amostra moldada, o deslocamento axial durante a prensagem e a energia de compactação empregada. O autor foi capaz de obter ~ 90% da densidade de blocos de pavimentação produzidos por uma máquina hidráulica industrial de produção em grande escala.

Pesquisas foram realizadas ao longo de anos para viabilizar o uso de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) em concretos pré-moldados. Devido as baixas especificações com relação à resistência à compressão em artefatos como blocos de alvenaria ($F_{b,k} \geq 3,0$ MPa-NBR[12]) incluindo alguma tolerância em termos de porosidade (absorção de água $\leq 10\%$ [12]). Isso favorece a incorporação de agregados reciclados de RCD no concreto, na substituição parcial ou total dos agregados naturais. Em Hong Kong Poon et al [7], fabricaram blocos de pavimentação que atenderam as especificações normativas vigentes de Hong Kong usando 100% de agregados reciclados de RCD (composto de 75% em massa de agregados de concreto reciclados, 25% de agregados de cerâmica reciclados), em substituição de agregados naturais. Soutsos et al [13] propuseram a substituição de 20% da areia natural por concreto reciclado e incorporaram também 60% de agregados de concreto grosso reciclado em substituição aos naturais. Com um consumo de cimento de 100 kg / m³, os autores obtiveram blocos de concreto de até 7 MPa. No Brasil Lintz et al [14], substituiu de 20% dos agregados naturais por agregado de concreto reciclado viabilizando a produção de blocos de concreto com resistência à compressão média na faixa de 4 a 6 MPa.

Em relação aos estudos realizados na literatura, observamos deficiências no controle da distribuição granulométrica dos agregados reciclados, quando os agregados naturais são substituídos por reciclados. A presença de finos nos agregados reciclados de RCD pode alterar significativamente o volume de cimento (e o total de finos) das misturas, prejudicando assim o empacotamento das misturas.

Esse processo também deve ser feito controlando-se o volume (massa) de material compactado, energias de compactação aplicadas, pouco exploradas nos estudos. Pode ocorrer deformação ou mesmo quebra das partículas dos agregados reciclados durante o processo de mistura e / ou durante a compactação nos moldes. Os resultados podem ser imprevisíveis, densificando ou não a mistura durante a moldagem [2], [15]. Artoni e al [16] avaliou características como extensão granulométrica e angulosidade de misturas de concreto com agregados reciclados em dois tipos diferentes de misturadores planetários e conseguiu observar a quebra dos agregados durante o processo de mistura.

O objetivo do artigo é verificar a quebra do agregado reciclado durante a compactação do concreto seco, a partir da alteração dos volumes de controle de material compactado que preenche o molde, empregando um método de compactação de escala laboratorial (baseado na reometria compressiva).

MATERIAIS E MÉTODOS

Cimento CPV (Holcim), com densidade real de 3,1 g/cm³ (determinada por picnometria de gás Hélio) e área superficial específica de 1,31m²/g (determinado a partir do método BET por adsorção de N₂ em um equipamento Belsorp) foi o ligante utilizado no trabalho. Os agregados reciclados mistos (ARM) utilizados na elaboração das misturas dos concretos secos foram obtidos em usina de reciclagem da cidade de São Paulo. São compostos por aproximadamente 88% de material cimentício, 8% de material cerâmico e 4% de impurezas, e apresentavam dimensões entre 6,30 e 0,15 mm. O material foi quarteado e peneirado nas frações de interesse, conforme ilustrado na Figura 1 de modo a obter distribuições estreitas de tamanho de partículas, para facilitar o proporcionamento da composição do concreto.

A densidade real e absorção de água foram obtidas pelas normas de ensaio brasileiras vigentes [17], [18] e estão apresentadas na Tabela 1. A porosidade foi determinada pela relação entre a densidade real e a aparente [19], [20].

Tabela 1: Absorção de água, densidade e porosidade dos agregados

| Tipo de Agregado | Absorção de Água (%) | Densidade Aparente (g/cm ³) | Densidade Real (g/cm ³) | Porosidade (%) |
|------------------|----------------------|---|-------------------------------------|----------------|
| ARM | 9,72 | 2,02 | 2,52 | 19,8 |

Distribuição granulométrica dos materiais: A distribuição granulométrica do cimento foi obtida através da técnica de difração de laser, no equipamento Helos da Sympatec e dos agregados reciclados foram determinadas por análise dinâmica de imagens (ADI) no equipamento QicPic, Sympatec. O método ADI consiste na captura de imagens por uma câmera à medida que as partículas passam por um funil em queda livre. As imagens são então processadas pelo software e tratadas com parâmetros pré-estabelecidos. O parâmetro adotado foi o “BR_Min” (diâmetro mínimo da partícula) por apresentar maior similaridade aos resultados obtidos pela granulometria por peneiras [21]

Os resultados são apresentados na Figura 1. Como os agregados foram separados por peneiramento, as frações foram identificadas como: -6,30+4,80; -4,80+2,40; -2,40+1,20; -1,20+0,60; -0,60 +0,15. A nomenclatura apresentada como “-” refere-se ao material passante pela peneira, bem como o “+” está associado à quantidade retida na peneira.

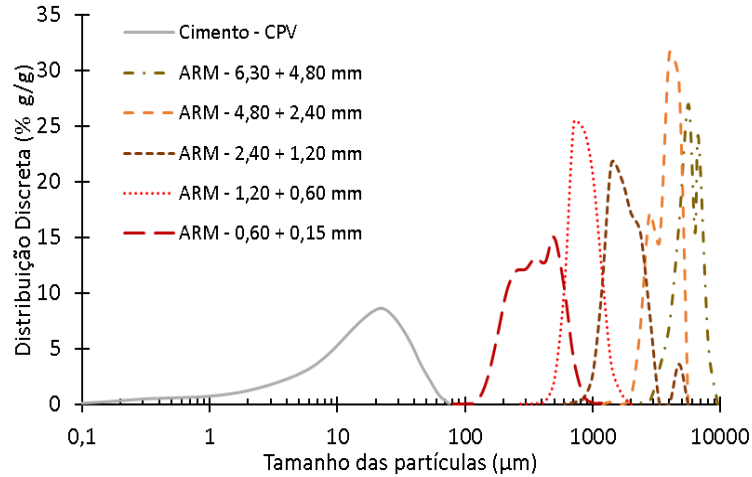


Figura 1 – Distribuição granulométrica dos materiais: Cimento (<100 µm) e agregados reciclados (>150µm)

Composição avaliada: A mistura de concreto seco foi formulada considerando os limites especificados pela fábrica de blocos Columbia [22] e adaptados por Fernandes [23] aplicados em larga escala no cenário nacional. O teor de cimento foi fixado em 9%-volume e de agregados em 91%-volume. A Tabela 1 apresenta o consumo dos materiais enquanto a Figura 2 apresenta as curvas granulométricas discretas e acumulada e os limites mínimo e máximo especificados pela literatura para blocos de concreto.

Tabela 2 – Formulação de concreto seco

| Materiais (Intervalos - mm) | Massa (%) | Volume (%) | Consumo de Materiais (kg/m ³) |
|--------------------------------|--------------|---------------|--|
| Cimento (-0,075) | 10,8 | 9,0 | 213 |
| ARM (-6,30+4,80) | 13,8 | 14,1 | 272 |
| ARM (-4,80+2,40) | 22,7 | 23,2 | 447 |
| ARM (-2,40+1,20) | 11,6 | 11,8 | 228 |
| ARM (-1,20+0,60) | 16,1 | 16,48 | 315 |
| ARM (-0,60+0,15) | 25,0 | 25,5 | 491 |
| Água | 12,0 | 12,0 | 236 |

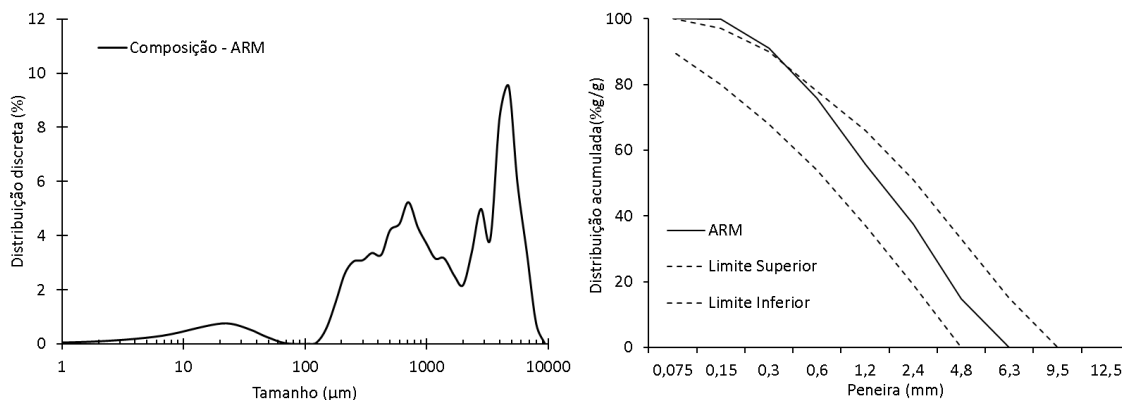


Figura 2 – Distribuição discreta de tamanho da mistura de concreto seco (esq.) e limites especificados pela literatura para blocos de concreto (curva acumulada de agregados) (dir.)

O volume de referência utilizado na metodologia foi definido fixando-se a altura de referência do corpo de prova (5cm) e o deslocamento máximo do pistão de 10cm durante a prensagem. No processo de fabricação, o deslocamento descendente do pistão no molde é fixo e a quantidade de material que enche o molde depende do tempo de alimentação, visando garantir o volume e a compactação da mistura. Quanto maior o tempo, maior quantidade de material preenche o molde, reduzindo os vazios e aumentando sua resistência final [9].

Foram adotados 4 volumes de controle de material compactado, para verificar a influência durante a compactação: 90, 98, 100 e >100% (em relação ao volume de referência; com 5 cm de altura de corpo de prova). Volumes abaixo da capacidade do molde (90 e 98%) apresentam menores cargas de compactação e evitam a quebra dos agregados que implicariam em alterações no esqueleto granular. As demais condições (100 e >100%) implicam em cargas de compactação e densidade maiores dos corpos de prova.

O teor ótimo de água utilizado foi o que apresentou maior densidade após compactação e menor exsudação visível a olho nu logo após a compactação do corpo de prova. Os volumes de referência, o teor ótimo de umidade e a massa utilizada na moldagem são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Volume teórico do molde, volume utilizado e massa dos cps.

| Misturas | Volume de referência do molde (cm ³) | Volume final do corpo de prova | | Massa utilizada (g)* | Volume granular compactado (cm ³) |
|----------|--|--------------------------------|--------------------|----------------------|---|
| | | (%) | (cm ³) | | |
| ARM | 98,2 | 90 | 88,4 | 142 | 88,4 |
| | | 98 | 96,2 | 156 | 96,2 |
| | | 100 | 98,2 | 159 | 98,2 |
| | | >100 | 98,2 | 187 | 116,0 |

* Massa de materiais sem água e determinada pelo volume compactado x densidade de empacotamento

A mistura das formulações foi realizada em uma argamassadeira de laboratório (EMIC) com 1500g de pó e a quantidade proporcional de água, durante 2 minutos, mantendo-se a velocidade de cisalhamento mais baixa. Após a mistura, a massa de concreto seco foi colocada em moldes bipartidos de espessura 1mm já fixados em um cilindro rígido externo de aço inoxidável (Figura

3). A amostra foi comprimida por um pistão de 48mm de diâmetro acoplado na célula de carga de uma prensa (EMIC) com capacidade máxima de 90kN. O setup de compactação é ilustrado na Figura 4, sendo que o primeiro ciclo de compactação consiste no deslocamento do pistão a uma velocidade controlada de 5mm/s até 70mm de deslocamento e, a uma velocidade de 1mm/s, para os próximos 30mm de deslocamento até 100mm de deslocamento total. A carga de compressão máxima foi registrada e monitorada por 5s sem deslocamento do pistão, sendo possível observar a relaxação (acomodação plástica) no pico de compactação máxima. Na sequência, o pistão retorna 20mm na direção contrária com velocidade de 5mm/s, aliviando a carga no concreto seco. Inicia-se então um segundo ciclo de prensagem análogo ao primeiro com duração de 20s, resultando em amostras cilíndricas de aproximadamente 50x50mm. Ao fim do segundo ciclo é possível obter a recuperação elástica do material (alteração do volume após compactação), a partir do deslocamento do pistão nos picos de carga em cada ciclo de compactação. O trabalho exigido durante a compactação (W) foi calculado a partir da estimativa da área abaixo da curva no gráfico de carga pelo deslocamento até o primeiro pico de carga de compactação e expresso em Joules (J).



Figura 3 – Extrator automático dos corpos de prova; conjunto de moldagem (cilindro+ pistão + base) e moldes bi-partidos; corpos de prova após a compactação.

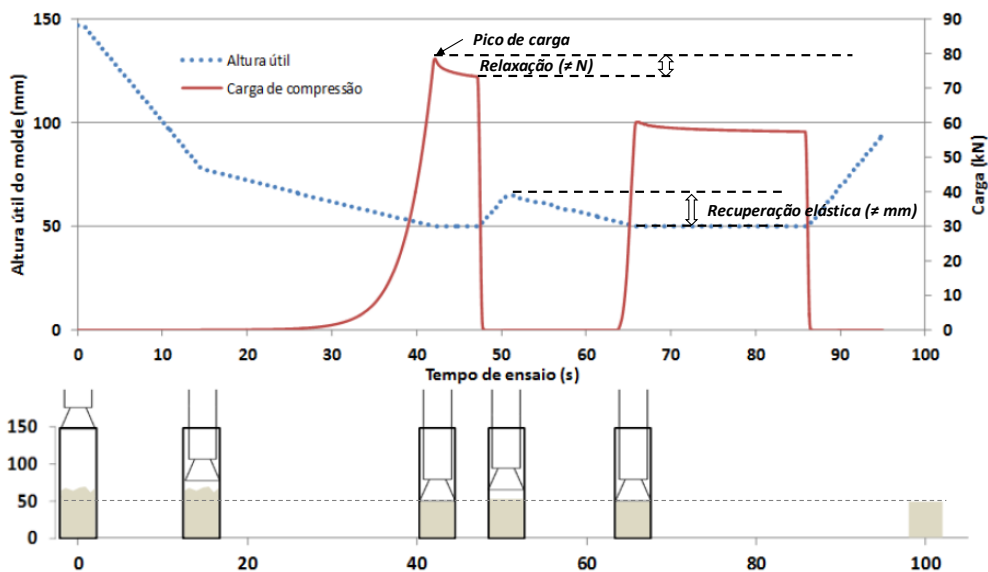


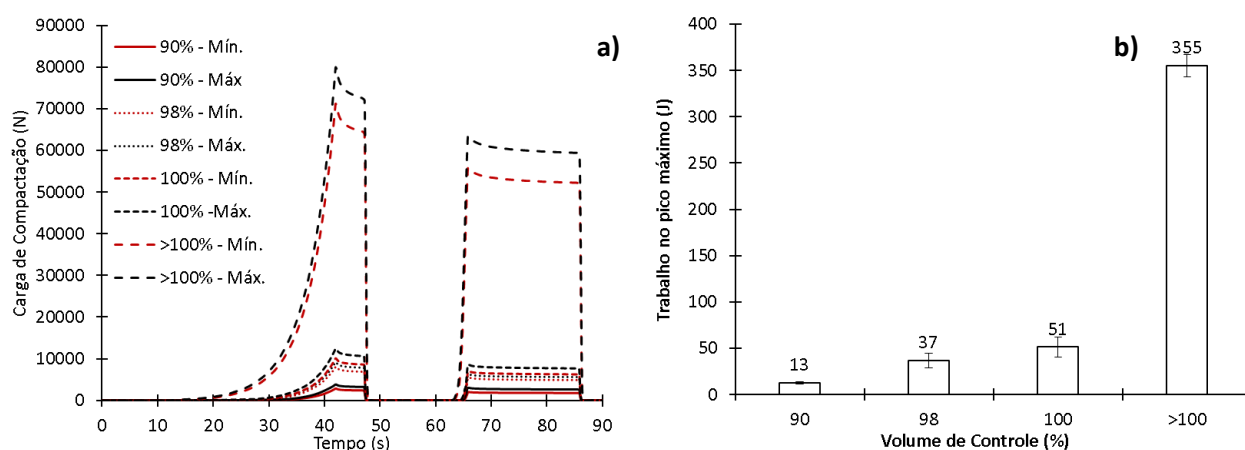
Figura 4 - Representação gráfica do ciclo de moldagem em função do tempo de ensaio: altura útil do molde com a descida do pistão; carga necessária para a compressão; ilustração do conjunto molde, pistão.

Avaliação da quebra dos agregados durante a compactação: Após a moldagem do concreto seco, o corpo de prova foi lavado em água corrente dentro de peneira de diâmetro 0,15mm, retirando as partículas de cimento da mistura (e eventualmente finos gerados pela quebra). A amostra retida foi seca em estufa em temperatura de 100 ± 5 °C por 24 horas e submetida a técnica de Análise dinâmica de Imagem para verificar extensão granulométrica. Como se sabia a composição granulométrica inicial antes da aplicação da carga compressiva para compactação, a diferença entre ambas representa a quebra dos agregados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação da carga de compactação durante a produção dos corpos de prova

As alterações dos volumes compactados refletiram diretamente nas cargas de compactação dos concretos secos. À medida que se aumenta o volume de controle, a carga aumenta (Figura 5a) e conseqüentemente o trabalho envolvido na compactação (Figura 5b). O trabalho calculado na compactação do volume >100% foi cerca de 7 vezes maior que o volume 100%. Nota-se um ligeiro acréscimo, nas demais comparações entre os volumes, porém não tão acentuado quanto o volume >100%. Como o deslocamento final do pistão é fixo (50mm), volumes menores que a referência resulta em menor carga de compactação, pois não promovem a acomodação efetiva dos agregados reciclados. Houve menor relaxação no volume >100 em comparação aos demais volume, o que pode ser atribuído à redução dos vazios e densificação da mistura devido ao acréscimo da carga de compactação. A recuperação elástica calculada apresentou pequeno acréscimo nos volumes 98 e 100% em consideração aos demais. A alteração do volume não apresentou grande variação na recuperação elástica dos concretos secos. A recuperação elástica está associada módulo de elasticidade do concreto (redução de vazios resultantes), mas também controlado pelo módulo do agregado. Maiores valores de recuperação elástica podem gerar microfissuras e novos vazios.



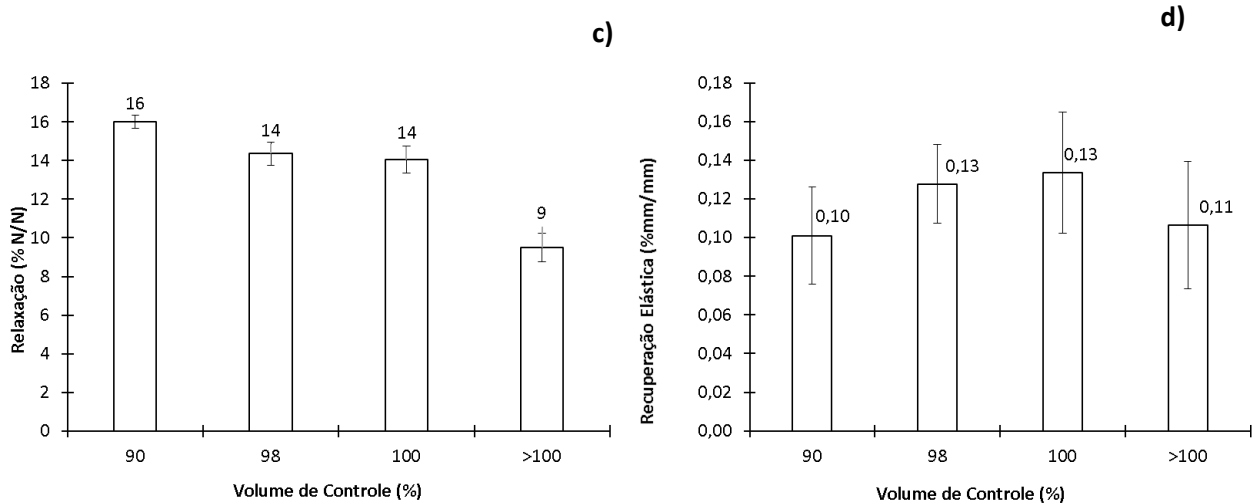


Figura 5 – a) reometria compressiva da mistura em função da variação do volume – b) trabalho envolvido na compactação – c) relaxação e d) recuperação elástica

Quantificação da quebra dos agregados durante a compactação

A Figura 6, à esquerda, ilustra o perfil das curvas granulométricas, inicial e após a aplicação da compactação. À direita é apresentada a diferença entre ambas: valores negativos indicam diminuição da quantidade de partículas na faixa de diâmetros e valores positivos, por outro lado, indicam aumento na quantidade de partículas na faixa. Nota-se que até o volume de controle de 100% não há considerável quebra das partículas de agregado reciclado porém, quando o volume maior foi utilizado (>100%), notou-se que considerável quantidade de agregados foi quebrada, evidenciado pelo surgimento de maior quantidade de partículas na faixa de diâmetros entre 500 e 100 micra e diminuição entre 3000 e 8000 micra.

O acréscimo do trabalho de compactação nos maiores volumes provocou a quebra do ARM, favorecendo o empacotamento do sistema granular, preenchendo os vazios do sistema granular.

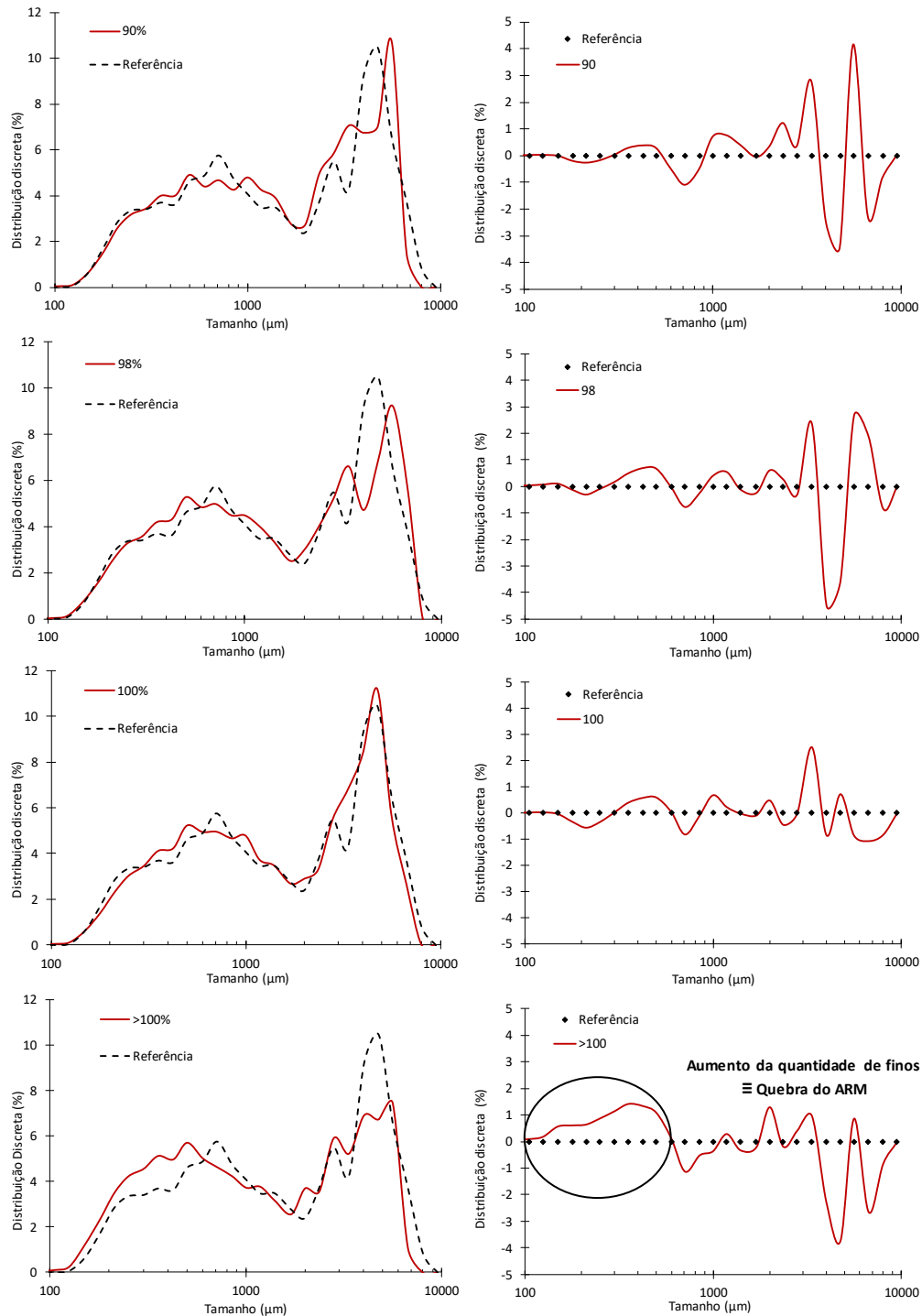


Figura 6 – Distribuição granulométrica das misturas após compactação em relação à referência (esq.). Parcela de materiais distribuídos ao longo da extensão granulométrica (dir.)

CONCLUSÕES

A alteração no volume de controle afetou diretamente no trabalho envolvido durante a compactação do concreto seco. Quanto maior o volume de material compactado, maior o trabalho obtido na compactação influenciando diretamente na quebra ocorrida na extensão granulométrica dos concretos secos, a partir de volumes de controle superior a 100% (>100%). Após a compactação do corpo de prova, observou-se um acúmulo de partículas mais finas na

faixa de tamanho entre 500 e 100 micra, confirmando a quebra dos agregados reciclados durante a compactação.

A metodologia proposta foi capaz de quantificar a quebra dos agregados reciclados mistos durante a compactação de concreto seco oferecendo uma alternativa para o desenvolvimento de misturas a partir de testes em escala de laboratório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processos 2014/50948-3, 2012/25496-6 e 2016/20420-2), à CNPQ (processo: 311.125/2015-8) e a Alcoa Foundation pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Hüsken e H. J. H. Brouwers, “A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study”, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, nº 10, p. 1246–1259, out. 2008.
- [2] R. Riedel e I.-W. Chen, Orgs., *Ceramics science and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [3] J. Marchand, H. Hornain, S. Diamond, M. Pigeon, e H. Guiraud, “The microstructure of dry concrete products”, *Cement and concrete research*, vol. 26, nº 3, p. 427–438, 1996.
- [4] J. S. Medeiros e F. H. Sabbatini, “Alvenaria Estrutural Não Armada de Blocos de Concreto: Produção de Componentes e Parâmetros de Projeto”, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [5] S. M. Albuquerque, “Estudo Para Uso De Agregados De Resíduos De Construção E Demolição Em Blocos De Concreto Para Alvenaria”, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo, 2005.
- [6] J. A. Albero, “A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte I: O preenchimento das cavidades do molde”, *Cerâmica Industrial*, vol. 5, nº 5, p. 23–28, 2000.
- [7] C. S. Poon, S. C. Kou, e L. Lam, “Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks”, *Construction and Building Materials*, vol. 16, nº 5, p. 281–289, 2002.
- [8] A. dos S. Felipe, “Contribuição para a otimização de traços de concreto utilizados na produção de blocos estruturais.”, Universidade Estadual Paulista, 2010.
- [9] A. L. de Oliveira, “Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [10] M. L. Marchioni, “Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2012.
- [11] M. Delalonde, G. Baylac, B. Bataille, M. Jacob, e A. Puech, “The rheology of wet powders: a measuring instrument, the compresso-rheometer”, *International journal of pharmaceutics*, vol. 130, nº 1, p. 147–151, 1996.

- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 6136 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos - Rio de Janeiro*. 2016.
- [13] M. N. Soutsos, K. Tang, e S. G. Millard, “Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, nº 2, p. 726–735, fev. 2011.
- [14] R. C. C. Lintz, A. Jacintho, L. L. Pimentel, e L. A. Gachet-Barbosa, “Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 5, nº 2, p. 166–181, 2012.
- [15] J. SOUSA, E. BAUER, e R. SPOSTO, “Blocos de concreto produzidos com agregados provenientes da reciclagem de resíduos gerados pela construção civil”, *IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Paraná, Brasil, 2002*.
- [16] R. Artoni, B. Cazacliu, E. Hamard, A. Cothenet, e R. S. Parhanos, “Resistance to fragmentation of recycled concrete aggregates”, *Materials and Structures*, vol. 50, nº 1, fev. 2017.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 52 - Agregado Miúdo - Determinação De Massa Específica E Massa Específica Aparente - Rio De Janeiro*. 2009.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água - Rio de Janeiro*. 2001.
- [19] S. C. Angulo, B. S. Raphael, V. L. de Oliveira, e C. Ulsen, “Caracterização das propriedades físicas dos agregados gráudos de RCD reciclados por picnometria de pó e de gás”, apresentado em Congresso Brasileiro do Concreto, Maceió, 2012, p. 11.
- [20] B. L. Daminele, “Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.”, text, Universidade de São Paulo, 2013.
- [21] G. Hawlitschek, C. Ulsen, H. Kahn, E. A. Masini, e M. Tocchini, “Análise De Imagens Dinâmica - Caracterização Da Distribuição De Tamanho E Forma De Partículas”, *HOLOS*, vol. 3, p. 22, jul. 2015.
- [22] N. Jablonski, “Mix designs for concrete block”, 1996.
- [23] I. Fernandes, *Blocos e Pavers: Produção e controle de qualidade.*, 3ª. São Paulo: Editora Treino, 2012.