

Influência dos métodos de britagem nas propriedades do agregado reciclado de concreto

Influence of crushing methods on the properties of recycled concrete aggregate

Paula Oliveira Figueiredo 
Thammiris Mohamad El Hajj 
Rafael dos Santos Macedo 
Carina Ulsen 

Resumo

O principal desafio quanto ao uso dos agregados reciclados de concreto (ARC) como materiais de construção de alto desempenho refere-se à pasta de cimento remanescente de construções anteriores que permanece aderida na superfície dos agregados naturais. As propriedades do ARC podem ser aprimoradas com a seleção de equipamentos de cominuição capazes de promover a liberação entre essa zona de interface, todavia os métodos de britagem são pouco abordados na literatura científica. O presente trabalho visa contribuir para a mudança nesse cenário ao comparar as propriedades de ARC cominuídos em britadores de mandíbulas e de impacto, ambos ajustados a fim de gerar um produto com distribuição granulométrica equivalente. O resultado foi a obtenção de agregados reciclados semelhantes em termos de morfologia de partículas, composição química e mineralógica, de modo que se pode concluir que a liberação da pasta de cimento residual em ambas as rotas de britagem foi análoga. Essa similaridade entre as propriedades confronta a crença comum de que o britador de impacto gera um produto com menor teor de pasta de cimento aderido e com finos excessivos.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto. Cinética de cominuição. Propriedades do agregado de concreto. Britador de mandíbulas. Britador de impacto.

Abstract

The main challenge regarding the use of recycled concrete aggregates (RCA) in high-performance building materials refers to the remaining cement paste from previous constructions that remains attached to natural aggregates surface. The properties of RCA can be improved through the selection of comminution equipment capable of promoting release in this interface zone. However, crushing methods are rarely discussed in the scientific literature. This paper aims to contribute to change this scenario, comparing the properties of RCA crushed by jaw and impact crushers, both adjusted in order to generate a product with the same granulometry. The result obtained was a similar product in terms of particle shape, and chemical and mineralogical composition, leading to the conclusion that the liberation of the residual cement paste on both crushing methods was analogous. This similarity between properties challenges the common belief that the impact crusher generates a product with lower grade of adhered cement paste and excessive fines.

Keywords: Recycled concrete aggregates. Comminution kinetics. Concrete aggregates properties. Jaw crusher. Impact crusher.

¹Paula Oliveira Figueiredo
¹Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

²Thammiris Mohamad El Hajj
²Universidade Federal de Alfenas
Poços de Caldas - MG - Brasil

³Rafael dos Santos Macedo
³Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

⁴Carina Ulsen
⁵Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 25/02/19
Aceito em 11/11/19

Introdução

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) é encorajada dentro dos novos preceitos de sustentabilidade e economia circular (UNITED..., 2015), em que os benefícios se estendem ao aumento da vida útil de jazidas minerais, à conservação dos recursos naturais e à eliminação da deposição ilegal desses resíduos nas cidades. Entretanto, para produzir agregados reciclados (AR) com propriedades adequadas às aplicações, é necessário o controle das operações de cominuição no beneficiamento do RCD.

A britagem é a primeira etapa de cominuição no beneficiamento mineral, sendo o principal objetivo promover a liberação entre as fases minerais constituintes (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006); essa separação física pode ser realizada por cinética de fragmentação à compressão, impacto ou abrasão. Na reciclagem de resíduo de concreto (RC), espera-se que a britagem promova a liberação (desagregação), principalmente, do agregado natural e da pasta de cimento residual (KIM; CHO; AHN, 2012). Para que essa liberação seja eficaz, recomenda-se analisar a granulometria do resíduo a ser beneficiado, o produto desejável (WILSON, 1996) e a eficiência energética na cominuição (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014). No entanto, essas condições são raramente avaliadas, de modo que a escolha do equipamento está prioritariamente relacionada ao custo de aquisição (normalmente de segunda-mão), à capacidade de produção e à facilidade de manutenção.

Adicionalmente, são escassos na literatura científica trabalhos que ofereçam uma análise comparativa entre os diferentes mecanismos de cominuição aplicados na reciclagem de RCD (BRAYMAND *et al.*, 2017). Desse modo, o presente estudo tem como objetivo contribuir para a mudança nesse cenário ao avaliar a influência dos britadores de mandíbulas e de impacto nas propriedades do agregado reciclado de concreto (ARC).

Referencial teórico

Influência dos britadores de mandíbulas e de impacto na reciclagem de RCD

Na reciclagem de RCD, não há consenso em relação à influência da cinética de fragmentação sobre as propriedades dos AR. Segundo Hansen (1986), o britador de mandíbulas tem baixa relação de redução e fragmenta uma parcela dos agregados naturais presentes no concreto, o que resulta em um produto com distribuição granulométrica mais grossa, enquanto na britagem por impacto a fragmentação dos resíduos de argamassas e de agregados naturais ocorre uniformemente, gerando AR de baixa qualidade. Essa conclusão do autor não é confirmada por dados de experimentos apresentados no trabalho.

De acordo com Momber (2002), ao cominuir o RC em britador de mandíbulas, uma zona de ruptura é formada e está diretamente correlacionada à granulometria do agregado natural presente no resíduo. Essa desagregação depende da resistência do resíduo à fragmentação, que, por consequência, influencia na eficiência energética do processo, de modo que o consumo de energia para fragmentar os resíduos de concreto é maior quando comparado aos resíduos mistos ou de alvenaria.

Além disso, há diversos autores que concluem que a fragmentação no britador de mandíbulas ocorre nos limites entre partículas, isto é, ao longo das fraquezas, o que permite alta relação de redução do tamanho do material e, portanto, gera agregados reciclados com baixo teor de pasta de cimento e porcentagem de finos consideráveis (FLEISCHER, 1996; LIMA, 1999; ETXEBERRIA *et al.*, 2007). Por outro lado, segundo Gress, Snyder e Sturtevant (2009), o britador de mandíbulas, ante os britadores de impacto e cônico, tende a deixar maiores teores de pasta de cimento aderidos nos AR; entretanto, os autores obtiveram essa conclusão sem apresentar resultados de caracterização que a fundamentem.

Para Etxeberria *et al.* (2007), o RC beneficiado em britador de impacto gera um produto com maior liberação de argamassa, porém a análise não demonstra dados comparativos com outros métodos de britagem.

Em estudo recente, Ulsen *et al.* (2018) fizeram uma comparação entre o britador de mandíbulas e o de impacto em britagem secundária para RC de diferentes origens e resistências. O resultado foi um produto similar em relação ao conteúdo de pasta de cimento remanescente de construções anteriores, densidade, porosidade e distribuição de tamanho de partículas em ambas as rotas de britagem. Os autores destacaram que a britagem em granulações menores e mais próximas da granulação de liberação das fases poderia gerar resultados divergentes, o que motivou a continuidade dos estudos.

Caracterização do agregado reciclado de concreto

Distribuição granulométrica e morfológica

A distribuição granulométrica das partículas possibilita analisar as proporções granulométricas em massa do produto; em outras palavras, quanto do RC processado se concentra no intervalo granulométrico desejável. A técnica a ser utilizada deve estar de acordo com a distribuição do tamanho das partículas, a possibilidade de operação em meio aquoso ou a seco, e se há intenção de fracionar a amostra. Entre os métodos conhecidos, o peneiramento é o mais antigo (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006) e usual na indústria mineral. No entanto, estudos têm avaliado a automatização desse método mediante análise dinâmica de imagens, que, além da distribuição granulométrica, também permite determinar diferentes parâmetros de forma das partículas, tais como esfericidade (SPHT) e relação de aspecto (b/l), o que pode interferir nas propriedades reológicas de misturas cimentícias (HAWLITSCHEK, 2000).

Na caracterização morfológica, a relação de aspecto refere-se à razão entre o menor e o maior diâmetro das partículas, com valores variando entre 0 e 1; dessa forma, quanto mais próximo de 0, mais alongada será a partícula. Já a esfericidade¹ considera a irregularidade de seu perímetro projetado; quanto mais próximo de 1, mais regular será a superfície da partícula. Essas propriedades podem ser influenciadas pela cinética de cominuição aplicada às partículas, e os agregados submetidos ao impacto, como em britador de impacto, tendem a ter aspecto cúbico (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982), enquanto a compressão, como em britador de mandíbulas, inclina-se para a geometria lamelar (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As partículas alongadas e lamelares devem ser evitadas ou limitadas a no máximo 15%, em massa, em agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Composição química e mineralógica

O RCD possui elevado grau de heterogeneidade (ANGULO, 2000), o que dificulta sua gestão, processamento e controle de qualidade. Para a identificação dos minerais, técnicas analíticas são comumente conjugadas (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997), e, nesse caso, as análises química e mineralógica auxiliam na avaliação da qualidade do agregado reciclado, proporcionando uma utilização confiável dele (LIMBACHIYA; MARROCCHINO; KOULOURIS, 2007).

Segundo Angulo *et al.* (2009), em agregados ausentes de carbonatos a composição química permite a quantificação do teor de pasta de cimento. Já a caracterização mineralógica possibilita a quantificação dos minerais, portanto propicia a determinação da composição e do grau de liberação das fases de interesse (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997); no AR, os principais minerais são quartzo, feldspato, calcita e mica (BIANCHINI *et al.*, 2005; LIMBACHIYA; MARROCCHINO; KOULOURIS, 2007; ULSEN, 2011).

Absorção de água

A absorção de água é um método indireto para avaliação da porosidade das partículas dos agregados reciclados, sendo a taxa de absorção de água diretamente proporcional à quantidade e ao tamanho dos poros em um conjunto de partículas. Como os agregados reciclados possuem quantidades significativas e variáveis de poros advindos da pasta de cimento, esse se torna o parâmetro que mais diferencia os agregados reciclados dos naturais e, por isso, é amplamente discutido na literatura científica (HANSEN, 1986; KOBAYASHI; KAWANO, 1988; MEHTA; MONTEIRO, 1994; LAMOND *et al.*, 2002; CHEN; YEN; CHEN, 2003; YACOUB; DJERBI; FEN-CHONG, 2018).

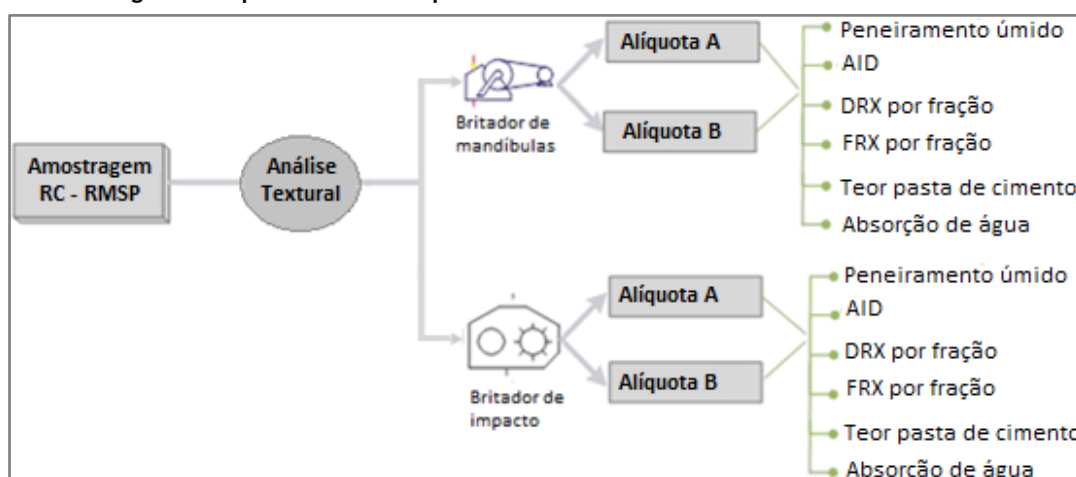
Em linhas gerais, maiores taxas de liberação na britagem tendem a reduzir o teor de pasta de cimento aderida e, por consequência, menor porcentagem ou demanda de água no teste de absorção. Ao contrário, agregados reciclados com elevada porosidade (menores taxas de liberação) resultarão em produtos com alta absorção de água e baixa resistência mecânica, o que pode limitar suas aplicações (GOMEZ-SOBERON, 2002; POON; SHUI; LAM, 2004).

Materiais e métodos

O procedimento experimental é esquematizado na Figura 1 e detalhado na sequência.

¹O conceito de esfericidade pode divergir entre diferentes autores e áreas; aqui se considera a esfericidade (SPHT) a relação entre a área e o perímetro da partícula ($SPHT = (4\pi \cdot \text{área da partícula}) / (\text{perímetro da partícula})^2$).

Figura 1- Fluxograma do procedimento experimental



Amostragem, preparação e processamento das alíquotas de RC

As amostras de resíduos de concreto (RC) utilizadas no presente trabalho foram coletadas em um aterro de materiais inertes da Região Metropolitana de São Paulo. Cerca de 750 kg de RC depositados no aterro foram amostrados e transportados para estudos laboratoriais.

Tendo em vista a elevada granulação da amostra, a amostragem foi realizada por pilha alongada, sendo as extremidades retomadas e redistribuídas, conforme as melhores práticas laboratoriais de obtenção de alíquotas representativas (PETERSEN; MINKKINEN; ESBENSEN, 2005). Para minimizar a heterogeneidade das alíquotas, a pilha foi dividida em seis partes, sendo as alíquotas opostas da amostra inicialmente; (2+2 BM) direcionada para britagem em mandíbulas; e (3+3 BI) para teste no britador de impacto, como demonstrado na Figura 2.

Para avaliar a influência dos mecanismos de britagem nas propriedades dos agregados reciclados, os britadores foram configurados de acordo com o resultado da análise textural da amostra, isto é, conforme a granulação de liberação das fases. Desse modo, adotou-se que 80% em massa seria passante em 4,8mm (P80 = 4,8mm), como demonstra a Figura 3.

Na sequência, o produto obtido por cada britador foi disposto em uma pilha alongada e amostrada novamente em duplicata, em que os lados opostos foram denominados de A e B, como exemplificado na Figura 2. As alíquotas A e B, de ambos os britadores, passaram pela mesma sequência de caracterização para posterior comparação.

Caracterização do agregado reciclado

A distribuição granulométrica foi determinada por dois métodos: peneiramento e análise de imagens dinâmica (AID). O peneiramento foi realizado a úmido em peneiras de abertura quadrada nas malhas da série Tyler com aberturas nominais de 12,5 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm. A AID foi realizada segundo procedimento descrito pela norma ISO 13322-2:2006 (INTERNATIONAL..., 2006), no equipamento Camsizer, da marca Retsch Technology, tendo sido considerado o parâmetro x_{min}^2 na determinação do diâmetro da partícula. Ainda no Camsizer foi realizada a análise morfológica das partículas por parâmetros de esfericidade (SPHT) e relação de aspecto (b/l).

A determinação da composição química e mineralógica foi realizada nas frações granulométricas obtidas no peneiramento. Para isso, as amostras de cada fração foram previamente cominuídas em moinho de rolos até a dimensão média de partícula na ordem de 1mm para posterior amostragem e pulverização até tamanho de partículas inferiores a 0,037mm; destaca-se o cuidado de redução de massa (amostragem) apenas após a redução do tamanho máximo das partículas.

² x_{c_min} - corresponde à largura da partícula; trata-se do menor valor dentre os diâmetros máximos para distintas orientações de medida e é o parâmetro que mais se assemelha àquele considerado no peneiramento.

Figura 2 - Procedimento de amostragem

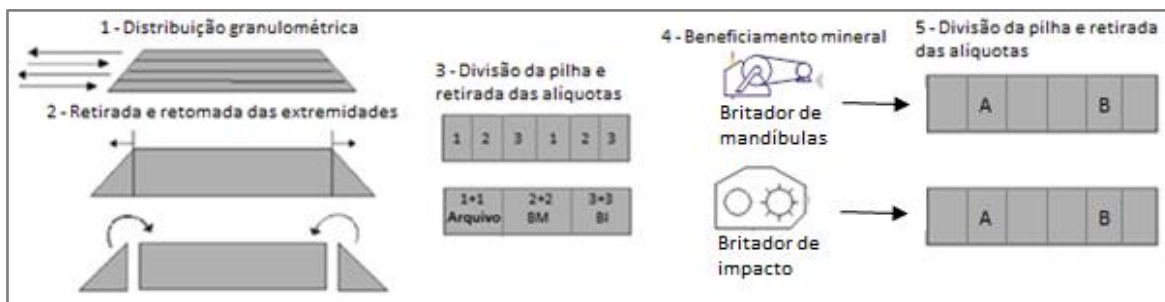
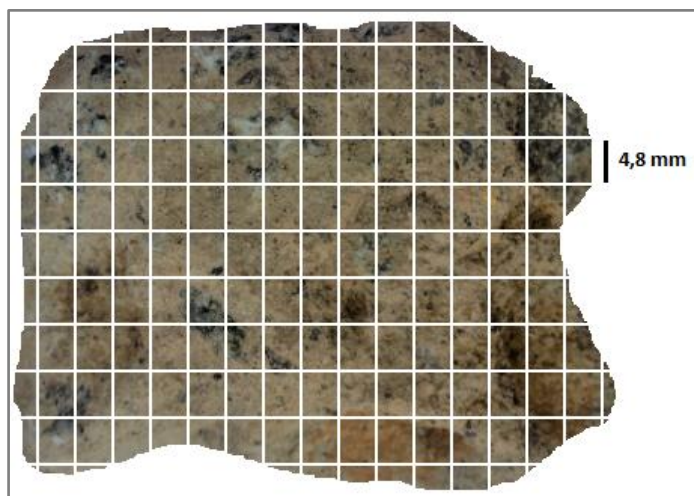


Figura 3 - Análise textural para configuração de britadores



A composição química foi determinada em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, por comparação com materiais certificados de referência na calibração “Rochas” (10 maiores elementos), em espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX), a perda ao fogo (PF) foi efetuada por gravimetria a 1.050 °C por 2h.

A composição mineralógica por difração de raios X (DRX) foi efetuada pelo método do pó, em difratômetro em arranjo geométrico *Bragg-Brentano Bruker, modelo D8 Endeavor*, com tubo de cobre (K_{α} - 1,5406 Å), 40 kV de tensão, corrente de 50 mA, faixa de varredura de 20-2-70° e detector Lynxeye XE sensível à posição, passo de 0,02° e tempo de aquisição de 1 h. As fases presentes foram identificadas por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do International Centre for Diffraction Data (ICDD) e do Inorganic Crystal Structure Database (ICSD); a análise semiquantitativa da proporção das fases constituintes foi efetuada pelo método *Reference Ratio Intensity (RIR)*.

A estimativa do teor de pasta de cimento residual foi determinada pela soma dos teores de CaO com a PF (ANGULO *et al.*, 2009), e a quantificação por lixiviação em ácido clorídrico (HCl), em que o agregado reciclado reage com a solução, sendo a pasta de cimento o resíduo solúvel, e a parte insolúvel as rochas, cerâmicas, argilominerais e micas, de acordo com o procedimento de Quarcioni e Cincotto (2006). O ensaio de absorção de água para agregados miúdos foi realizado conforme a norma NM30 (ABNT, 2001).

A avaliação comparativa da influência dos britadores de mandíbulas e de impacto sobre as propriedades do agregado reciclado de concreto foi regida em concordância com os conceitos estatísticos baseados na hipótese nula, de modo a analisar a similaridade das propriedades do produto de cada britador. O teste de hipótese foi realizado por “distribuição T de Student” em um nível de confiança equivalente a 95%.

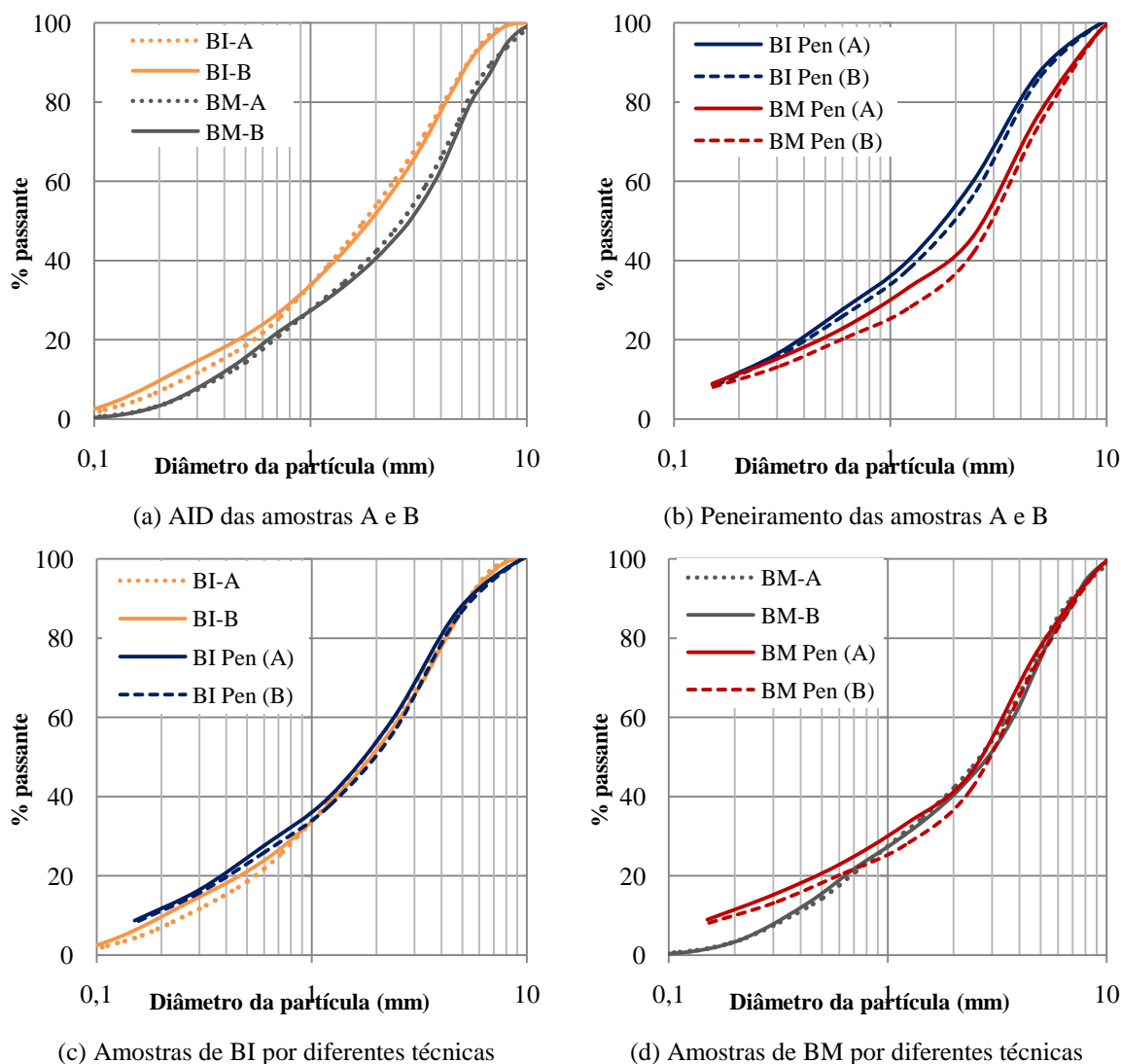
Resultados e discussões

Distribuição granulométrica e morfológica de partículas

A Figura 4 apresenta as distribuições granulométricas comparativas das alíquotas A e B dos britadores de mandíbulas (BM) e de impacto (BI), obtidas por peneiramento úmido (Pen) e análise de imagens dinâmica.

Os britadores de mandíbulas e de impacto foram configurados para gerar um produto com $P_{80} = 4,8\text{mm}$, no entanto houve um deslocamento entre as curvas do BI e do BM, conforme demonstram as Figuras 4a e 4b, possivelmente associado à heterogeneidade das alíquotas, mesmo após as sucessivas etapas de homogeneização. Em testes preliminares com amostra de massa reduzida, os equipamentos foram ajustados de modo que as curvas fossem sobrepostas, entretanto, na realização da britagem de todo o material, as curvas divergiram, o que foi atribuído à heterogeneidade da alíquota inicial usada nos testes preliminares. Isso ressalta a importância da amostragem em estudos de AR. O deslocamento das curvas ocorreu de forma paralela, o que endossa a provável sobreposição caso a configuração de *top-size* fosse atingida.

Figura 4 - Análise comparativa da distribuição granulométrica entre as alíquotas A e B dos BI e BM obtidas por diferentes técnicas de caracterização



Na literatura, afirma-se que o peneiramento a úmido resulta em um fracionamento de partículas mais eficiente quando comparado ao peneiramento a seco (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982). No entanto, a análise dinâmica de imagens apresenta resultados de distribuição de tamanho de partículas similares aos do peneiramento a úmido, como apresentam as Figuras 4c e 4d, especialmente nas frações acima de 0,60mm, devido ao fato de as partículas terem maior facilidade de dispersão em meio seco. Além disso, as curvas de distribuição granulométrica A e B, de mesma técnica e britagem, são similares entre si, e essa semelhança é mais evidente na análise dinâmica de imagem (Figura 4a).

Em paralelo aos resultados granulométricos, a AID reporta os dados referentes à morfologia das partículas, relação de aspecto e esfericidade, sendo estes apresentados na Figura 5 em termos de distribuição granulométrica.

Os resultados de esfericidade demonstram que o britador de impacto (BI) gera partículas com valores mais próximos de 1 quando comparado a partículas do britador de mandíbulas (BM); já na relação de aspecto os resultados se mostram uniformes. Estudos anteriores demonstraram que pequenas variações nos parâmetros de forma (inferiores a 0,1) geram impactos expressivos na dosagem de argamassas com agregados miúdos reciclados (HAWLITSCHKE, 2014).

Composição química

A Tabela 1 sumariza a composição química e a PF agrupadas por intervalos granulométricos em função da semelhança composicional. Em destaque estão as amostras como um todo, isto é, sem fracionamento.

Os principais óxidos constituintes nas quatro amostras sem fracionamento são sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de cálcio (CaO), que, somados com a perda ao fogo (PF), ultrapassam 90% dos teores; e em menores proporções, óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de potássio (K_2O) e óxido de sódio (Na_2O).

Ao se compararem os produtos dos britadores de mandíbulas e de impacto, percebem-se sutis variações de teores entre os óxidos constituintes, bem como a composição granuloquímica das alíquotas A e B de mesmo método de britagem, que, por sua vez, indica que o procedimento de homogeneização realizado após a britagem possibilitou a mitigação da heterogeneidade na amostra. Desse modo, é necessário reiterar a importância da amostragem durante todas as etapas do processamento para não enviesar os resultados.

De acordo com Angulo *et al.* (2009), em amostras de RC sem agregados calcários, a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro está relacionada aos silicatos presentes nas rochas e areia, ao passo que a soma dos teores de CaO com a perda ao fogo corresponde à pasta de cimento remanescente de construções anteriores. Nesse contexto, verifica-se que há maior enriquecimento de silicatos em 2,4-0,15mm e resíduos de pasta de cimento abaixo de 0,15mm, fato observado nas quatro alíquotas estudadas.

A Figura 6 apresenta uma correlação entre a soma dos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e os teores de $\text{CaO} + \text{PF}$ ante a distribuição do tamanho de partícula em ambos os processos de britagem.

Figura 5 - Análise morfológica comparativa do produto de BI e de BM

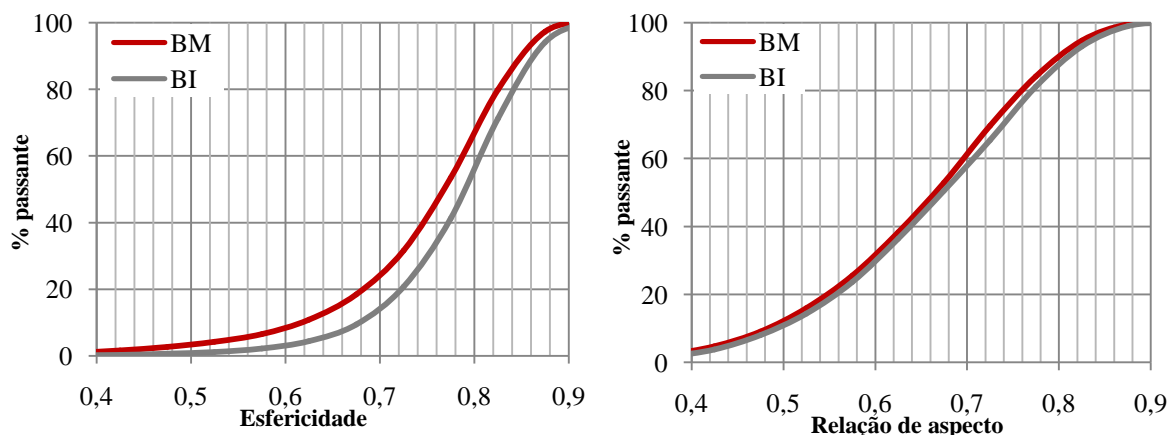
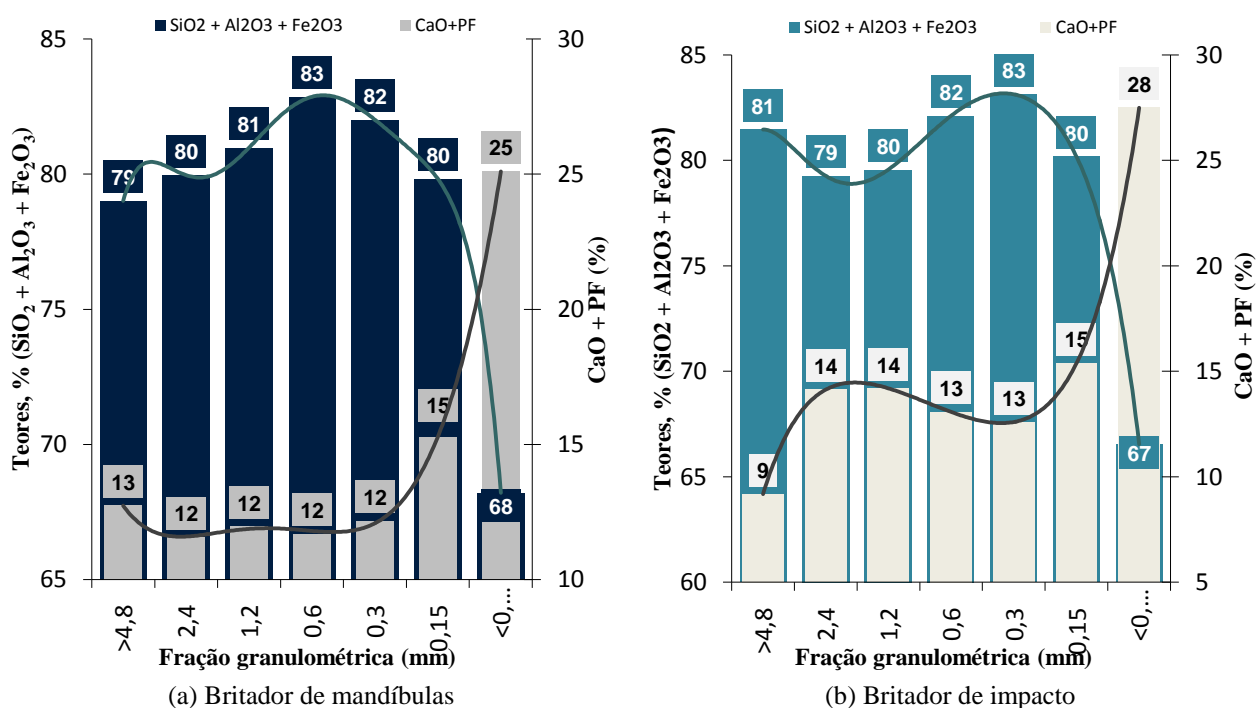


Tabela 1 - Sumário da composição química dos produtos obtidos por britagem

Fração (mm)	Teores (%)							Distribuição no ensaio (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	PF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
BM A	66,5	10,4	2,7	7,6	2,2	3,2	6,2	100	100	100	100	100	100
9,5-2,4	65,1	12,8	3,7	5,7	3,1	3,7	3,9	53,5	61,1	59,6	45,9	67,2	60,9
2,4-0,15	70,5	8,2	2,6	7,6	1,5	2,6	6,2	39,3	30,2	29,9	35,9	27,1	31,6
<0,15	52,7	10,1	3,7	15,7	1,4	2,6	12,2	7,2	8,7	10,5	18,2	5,7	7,5
BM B	67,1	10,5	2,9	7,6	2,2	3,2	5,7	100	100	100	100	100	100
9,5-2,4	65,8	13,0	3,4	5,4	3,1	3,8	3,7	57,6	65,1	60,1	51,0	71,1	65,5
2,4-0,15	70,9	8,0	2,3	7,6	1,4	2,5	6,2	36,1	27,1	29,8	33,1	24,0	27,8
<0,15	52,7	10,2	3,6	15,4	1,3	2,6	12,1	6,5	7,9	11,1	15,9	4,9	6,6
BI A	66,6	10,3	3,0	7,8	2,2	3,1	5,8	100	100	100	100	100	100
9,5-2,4	63,0	13,0	3,6	7,3	3,1	3,5	4,8	39,2	49,9	45,0	39,3	56,2	45,9
2,4-0,15	69,8	8,8	2,8	7,1	1,7	2,8	5,7	53,8	42,2	42,0	45,5	38,5	46,8
<0,15	53,5	10,1	4,6	13,7	1,5	2,6	11,4	7,1	7,8	12,0	15,4	5,3	7,2
BI B	66,1	10,1	3,3	8,0	2,1	3,1	6,0	100	100	100	100	102	100
9,5-2,4	63,5	12,5	3,4	7,4	2,9	3,6	5,1	42,2	50,2	45,5	42,5	55,7	48,8
2,4-0,15	70,0	8,8	2,7	7,1	1,7	2,8	5,6	51,1	42,1	42,6	43,1	38,9	44,4
<0,15	53,9	9,9	4,6	13,6	1,4	2,6	11,5	6,7	7,7	11,9	14,4	5,4	6,8

Figura 6 - Correlação entre a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro e os teores de CaO + PF ante a distribuição granulométrica dos produtos de BI e de BM



No produto do BI e do BM (Figura 6), nota-se que no intervalo granulométrico entre 4,8 mm e 0,15 mm os teores de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ foram de 79% e 83% em ambos os produtos, enquanto o teor de CaO + PF oscilou de 9% a 15%. Nas frações abaixo de 0,15 mm, o comportamento dos produtos difere, de modo que há uma expressiva redução nos teores de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, 67% e 68%, e aumento no conteúdo de

CaO + PF, 25% e 28%. Desse modo, os dados demonstraram haver uma estreita correlação entre a fração granulométrica e a composição química; o mesmo comportamento também foi observado em estudo anterior (ANGULO *et al.*, 2009).

Composição mineralógica

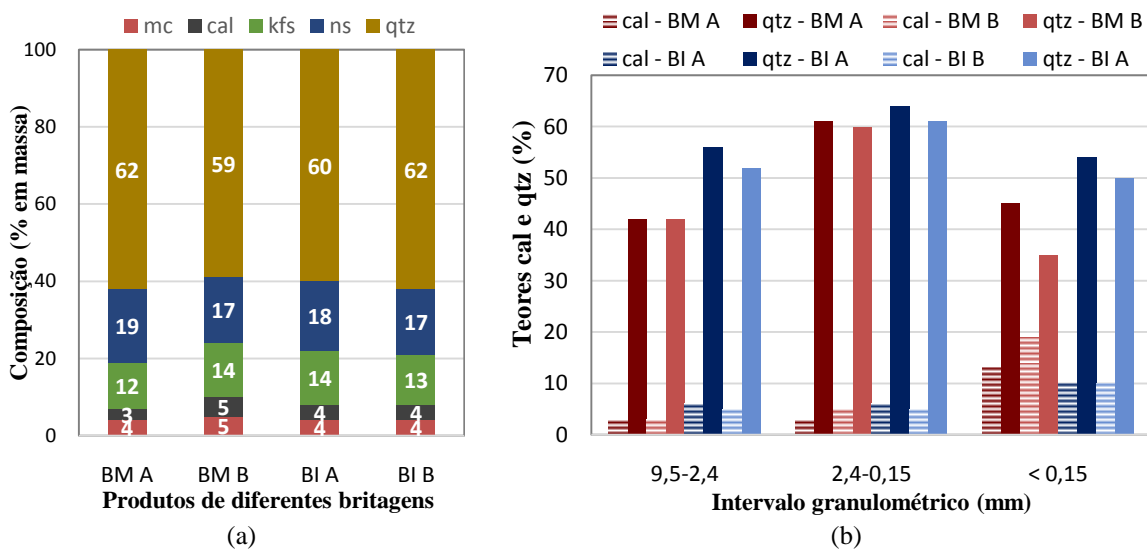
A composição mineralógica semiquantitativa (% em massa) dos produtos obtidos nos britadores de impacto (BI) e de mandíbulas (BM) é apresentada na Figura 7a. A proporção de quartzo (qtz) e calcita(cal) por intervalo granulométrico é indicada na Figura 7b.

A análise semiquantitativa da composição mineralógica demonstra que nas alíquotas há quartzo (59-62%), feldspato sódico (17-19%), feldspato potássico (12-14%), mica (4-5%) e calcita (3-5%), em diferentes proporções (Figura 7a).

Os teores de calcita estão essencialmente relacionados com a pasta de cimento remanescente nos agregados reciclados e, secundariamente, ao conteúdo de calcita. Por difratometria de raios X não se pode distinguir ambas as fases. Entretanto, os agregados constituintes na amostra são de origem granítica, portanto se admite que o teor de calcita esteja majoritariamente associado à pasta de cimento; e os agregados de calcita, se presentes, devem ser encontrados em pequenas proporções. Os feldspatos estão relacionados aos elementos K₂O e Na₂O, e, assim como quartzo, são fases provenientes de areia natural siliciosa incorporada no ARC (EVANGELISTA *et al.*, 2015); ainda, o reduzido teor de mica indica baixa presença de cerâmica na amostra (LIMBACHIYA; MARROCCHINO; KOULOURIS, 2007), o que é desejável em ARC.

A composição mineralógica (% em massa) dos quatro produtos foi sutilmente variada. Ao comparar os teores de calcita – advinda da pasta de cimento – e quartzo, nota-se que no intervalo 2,4-0,15mm há maior proporção de quartzo e teor reduzido de pasta de cimento, enquanto na fração < 0,15mm esse fato se inverte, portanto há um enriquecimento de pasta de cimento e decréscimo de quartzo. Essa análise está de acordo com a composição química, em que o teor de sílica está associado ao quartzo, e a pasta de cimento, ao óxido de cálcio.

Figura 7 - Composição mineralógica média dos produtos de britagem (a) e composição por intervalo granulométrico (b)



Nota: Legenda:

- mc - mica;
- cal - calcita;
- kfs - feldspato potássico;
- ns - feldspato sódico; e
- qtz - quartzo.

Teor de pasta de cimento e absorção de água

A somatória dos teores de CaO com PF é exposta de forma comparativa, entre as frações granulométricas das alíquotas A e B do BI e do BM, na Figura 8.

A pasta de cimento tem baixa resistência à fragmentação em comparação aos agregados naturais presentes no concreto, com predisposição a decompor-se e concentrar-se em frações <0,15mm (ULSEN *et al.*, 2013). A Figura 8 confirma tal afirmação, em que há pequenas oscilações de CaO+PF no intervalo granulométrico 4,8-0,15mm, e maior disparidade na fração abaixo de 0,15mm. Essa ocorrência pode ser percebida nas quatro amostras.

O teor da pasta de cimento também foi estimado pela lixiviação de HCl (resíduo solúvel), e os resultados juntamente com o teste de absorção de água, concentração de CaO + PF abaixo de 0,15 mm e suas respectivas análises de distribuição T de Student são demonstrados na Tabela 2.

A quantificação do resíduo solúvel da alíquota do britador de mandíbulas (BM) e do britador de impacto (BI) é de 20,57% e de 17,61% respectivamente, valores estes consistentes com o teor de pasta de cimento determinado em estudos anteriores (23% g/g) (ANGULO *et al.*, 2009). Os resultados do teste de absorção de água estão dentro do recomendável (menor que 10% de absorção de água) pelo International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (Rilem) para aplicação em concreto com resistência à compressão inferior a 50MPa (RILEM, 1994).

O cálculo estatístico aceita a hipótese nula para um nível de confiança igual a 95%; em outras palavras, com o valor de P (bicaudal) superior a 0,05, admite-se que não há diferença estatística entre as médias dos testes, tanto da absorção de água, quanto do teor da pasta de cimento por lixiviação de HCl e concentração de CaO+PF. Esses resultados endossam a semelhança entre os britadores de mandíbulas e de impacto na liberação da pasta de cimento dos agregados naturais, mesmo quando britados em granulação próxima à de liberação das fases.

Conclusão

A influência da britagem na reciclagem de resíduo de concreto foi realizada de forma comparativa com foco nas propriedades dos agregados reciclados. Entretanto, tendo em vista a elevada granulação e massa da amostra, anterior à análise comparativa, foram necessários etapas de processamento e caracterização a fim de mitigar possíveis problemas de heterogeneidade. Assim, pode-se notar que a qualidade e representatividade das alíquotas para os estudos subsequentes foi alcançada, fator de suma importância para não enviesar os resultados.

Na sequência, as condições operacionais dos equipamentos de britagem foram estabelecidas conforme a análise textural do resíduo de concreto. O resultado da caracterização do agregado reciclado de concreto tanto do britador de mandíbulas quanto do de impacto indicou similaridade em composição química e mineralógica, relação de aspecto e liberação da pasta de cimento residual em ambas rotas de britagem. Essa semelhança entre as propriedades refuta os estudos que os britadores de impacto geram um produto com menor teor de pasta de cimento e finos excessivos.

Figura 8 - Comparativo do conteúdo estimado de pasta de cimento (CaO + PF) por fração granulométrica

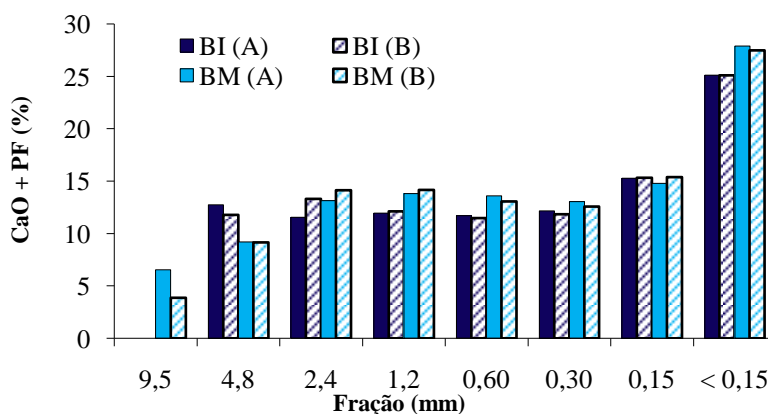


Tabela 2 - Absorção de água, resíduo solúvel, CaO + PF e análise estatística dos resultados

Britadores	Absorção de água (%)		CaO + PF (%)		Resíduo solúvel (%)	
	média	desv. pad.	média	desv. pad.	média	desv. pad.
BM	4,58	0,406	27,7	0,283	20,57	0,570
BI	3,98	0,113	25,1	0,000	17,61	0,800
P (bicaudal)	0,134		0,051		0,101	

Nota: desv. pad. - desvio padrão.

A geração de resíduos de construção no meio urbano é contínua, portanto, identificar os equipamentos mais adequados para gerar produtos com propriedades que elevarão a circularidade dos recursos naturais destinados ao setor construtivo colabora com a preservação ambiental e com a qualidade de vida urbana da população ao eliminar a deposição ilegal desses resíduos nas cidades.

Referências

ANGULO, S. C. *et al.* Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from Sao Paulo, Brazil. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 721-730, 2009.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

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

BIANCHINI, G. *et al.* Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 149-159, 2005.

BRAYMAND, S. *et al.* Separation and quantification of attached mortar in recycled concrete aggregates. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 5, p. 1393-1407, 2017.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 1, p. 125-132, 2003.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735-742. 2007.

EVANGELISTA, L. *et al.* Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 178-188, 2015.

FLEISCHER, W. Construction of modern pavements. In: CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee, 1996. **Proceedings [...]** London, 1996.

GOMEZ-SOBERON, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301-1311, 2002.

GRESS, D. L.; SNYDER, M. B.; STURTEVANT, J. R. Performance of rigid pavements containing recycled concrete aggregates. **Transport Research Record**, v. 2113, p. 99-107, 2009.

HANSEN, T. C. The second RILEM state of the art report on recycled aggregates and recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, v. 1, n. 111, p. 201-204, 1986.

HAWLITSCHKE, G. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas**. São Paulo, 2000. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13322-2**: particle size analysis: image analysis methods: part 2: dynamic image analysis methods. Switzerland, 2006.

KELLY, E. C.; SPOTTISWOOD, J. **Introduction to mineral processing**. New York: John Wiley, 1982.

KIM, K. H.; CHO, H. C.; AHN, J. W. Breakage of waste concrete for liberation using autogenous mill. **Minerals Engineering**, v. 35, p. 43-45, 2012.

KOBAYASHI, S.; KAWANO, H. **Properties and usage of recycled aggregate concrete: demolition and reuse of concrete and masonry**: reuse of demolition waste. London: Chapman & Hall, 1988.

- LAMOND, J. F. *et al.* Removal and reuse of hardened concrete: reported by ACI Committee 555. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, p. 300-325, 2002.
- LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Carlos, 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- LIMBACHIYA, M. C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A. Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. **Waste Management**, v. 27, n. 2, p. 201-208, 2007.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.
- MOMBER, A. W. The fragmentation of cementitious composites in a jaw breaker. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 38, n. 2, p. 151-164, 2002.
- PETERSEN, L.; MINKKINEN, P.; ESBENSEN, K. H. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 77, n. 1-2, p. 261-277, 2005.
- 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**, v. 18, n. 6, p. 461-468, 2004.
- QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Optimization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 10, p. 1069-1078, 2006.
- QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 90, p. 21-33, 2014.
- RILEM. Specification for concrete with recycled aggregate. **Materials and Structures**, v. 27, p. 557-559, 1994.
- SANT'AGOSTINO, L. M.; KAHN, H. **Metodologia para caracterização tecnológica de matérias primas minerais.** 1997. Boletim técnico. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição.** São Paulo, 2011. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- ULSEN, C. *et al.* Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 494-502, 2018.
- ULSEN, C. *et al.* Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1168-1173, 2013.
- UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.** United Nations Sustainable Development. New York, 2015.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment.** 7. ed. London: Butterworth-Heinemann, 2006.
- WILSON, J. Recycling construction and demolition waste: the Dutch experience. **Quarry Management**, v. 23, p. 28-37, 1996.
- YACOUB, A.; DJERBI, A.; FEN-CHONG, T. Water absorption in recycled sand: new experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 464-471, 2018.

Paula Oliveira Figueiredo

Departamento de Engenharia de Minas | Universidade de São Paulo | Av. Professor Mello Moraes, 2373, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-030 | Tel.: (11) 3091-5151 | E-mail: paulafigueiredo@usp.br

Thammiris Mohamad El Hajj

Instituto de Ciência e Tecnologia | Universidade Federal de Alfenas | Rodovia José Aurélio Vilela, 11999 | Poços de Caldas - MG - Brasil | CEP 37715-400 | Tel.: (11) 99554-3127 | E-mail: thammiris.poli@gmail.com

Rafael dos Santos Macedo

Departamento de Engenharia de Minas | Universidade de São Paulo | E-mail: rafaelmacedo@usp.br

Carina Ulsen

Departamento de Engenharia de Minas | Universidade de São Paulo | E-mail: carina.ulsen@usp.br

Ambiente Construído

Revista da 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



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.