

## **CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PRODUZIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE COMINUIÇÃO**

**FIGUEIREDO, P.O.<sup>1</sup>, ULSEN, C.<sup>2</sup>, NERY, G.P.<sup>3</sup>, BERGERMAN, M.G.<sup>4</sup>, EL HAJJ, T.M.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo – Universidade de São Paulo.  
paulafigueiredo@usp.br

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo – Universidade de São Paulo.  
carina@lct.poli.usp.br

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo – Universidade de São Paulo.  
guilherme@lct.poli.usp.br

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo – Universidade de São Paulo.  
mbergerman@gmail.com

<sup>5</sup>Núcleo de Engenharia de Minas – Universidade Federal de Alfenas.  
thammiris.hajj@unifal-mg.edu.br

### **RESUMO**

A construção civil é o setor que mais consome recursos naturais em nosso planeta, mas também é o maior gerador de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Deste montante, cerca de 50% são atribuídos aos Resíduos de Construção e Demolição (RCD). A exaustão de reservas de minerais de construção próximos a grandes centros urbanos somadas às crescentes restrições ambientais requer uma nova abordagem quanto ao destino do RCD. Uma alternativa viável é a reciclagem desses resíduos, mas, para isso, precisa-se minimizar ao máximo a porosidade dos agregados reciclados, oriunda da pasta de cimento aderida e remanescente de construções anteriores. Deste modo, o presente trabalho avaliou a liberação da pasta de cimento do agregado de uma amostra de RCD, a qual foi cominuída em dois diferentes britadores, mandíbulas e impacto, ajustados a fim de gerar um produto de mesma granulometria. Os produtos gerados foram caracterizados através de análises de imagem, análises químicas e análises mineralógicas. Os principais resultados foram: os produtos obtidos no britador de impacto têm uma esfericidade e regularidade maior em sua superfície, enriquecimento de sílica nas frações mais grossas e de CaO+PF na fração mais fina e a composição mineralógica está de acordo com os resultados encontrados na composição química. A geração de RCD no meio urbano é contínua e, portanto, desenvolver tecnologias e selecionar equipamentos adequados a reutilização destes como material de construção civil colabora com a preservação ambiental, desenvolvimento econômico e sustentável do país.

**PALAVRAS-CHAVE:** resíduos de construção e demolição (RCD); reciclagem de agregados; tratamento de minérios; caracterização tecnológica.

### **ABSTRACT**

Construction is the sector that consumes the most part of natural resources on our planet, but it is also the largest generator of Urban Solid Waste (USW). Of this amount, about 50% is attributed to Construction and Demolition Waste (CDW). Depletion of construction mineral reserves near major urban centers coupled with

increasing environmental restrictions requires a new approach to the destination of the CDW. A viable alternative is the recycling of these residues, but for this, it is necessary to minimize the porosity of the recycled aggregates, derived from the cement paste adhered to and reminiscent of previous constructions. Thus, the present work evaluated the release of aggregate cement paste of a CDW sample, which was comminuted in two different crushers, jaws and impact, adjusted to generate a product of the same granulometry. The products generated were characterized by image analysis, chemical analysis and mineralogical analysis. The main results were: the products obtained in the impact crusher have greater sphericity and regularity in their surface, silica enrichment in the coarser fractions and CaO + PF in the finer fraction and the mineralogical composition agrees with the results found in the composition chemistry. The generation of CDW in the urban environment is continuous and, therefore, developing technologies and selecting appropriate equipment to reuse these materials as civil construction material contributes to the environmental preservation, economics and sustainable development of the country.

**KEYWORDS:** construction and demolition waste (CDW); recycling of aggregates; ore treatment; technological characterization.

## **1 INTRODUÇÃO**

A construção civil consome uma quantidade significativa de matérias-primas minerais, mas também gera uma elevada quantidade de resíduos (CACHIM, 2009), denominados resíduos de construção e demolição (RCD). No Brasil, estima-se que sejam geradas cerca de 70 milhões de toneladas de RCD por ano (JOHN et al., 2004), quantidade equivalente a 3,7 toneladas por habitante (ANEPAC, 2015). Considerando que a geração destes na malha urbana é contínua e que, diferentemente das jazidas, não deverão escassear no longo prazo, o desenvolvimento de tecnologias que permitam reciclá-los contribuirá para a sustentabilidade no meio ambiente construído (ULSEN, 2011).

As preocupações com a sustentabilidade neste setor devem-se ao fato de a construção ter uma participação expressiva na taxa de geração de poluentes (JOHN, AGOPYAN et al., 2001), por ser a maior fonte de geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (HENDRIKS, 2000; JOHN, 2000) e pela sua importância no desenvolvimento econômico, ambiental e social do país. Caso o RCD fosse um bem mineral produzido atualmente ocuparia a quarta posição no ranking nacional, ficando atrás apenas do minério de ferro, areia e brita (HAWLITSCHEK, 2014).

No entanto, a reciclagem de RCD não é capaz de absorver todo o resíduo gerado e os agregados reciclados produzidos têm aplicações mais comuns, com baixa exigência de desempenho mecânico. A principal limitação da aplicação massiva dos agregados reciclados refere-se à pasta de cimento porosa remanescente de construções anteriores. Deste modo, para tornar os agregados reciclados competitivos, são necessários estudos sobre tratamento mineral capaz de reduzir o conteúdo de pasta de cimento aderida.

Assim, o presente trabalho consiste em comparar métodos de cominuição, usualmente, utilizados em reciclagem de RCD, focados principalmente em avaliar a qualidade dos produtos obtidos e a partir da caracterização tecnológica determinar os teores de aglomerantes presentes, a fim de ampliar as taxas de reciclagem de RCD colaborando para a preservação ambiental, econômica e sustentável do país.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 AMOSTRAGEM INICIAL**

As amostras de resíduos de construção e demolição utilizados no presente trabalho são oriundas de um aterro de materiais inertes de São Paulo. O RCD depositado no aterro foi amostrado de forma aleatória e enviado para o Departamento de Engenharia de Minas da Universidade de São Paulo.

O material de, aproximadamente, 735 kg e granulometria inferior a 5 cm, possui um elevado grau de heterogeneidade. A fim de minimizar essa heterogeneidade, uma pilha alongada, com todo o material, foi realizada e suas extremidades retomadas. Embora fosse necessário dividir a pilha em três alíquotas (britador de impacto, mandíbula e tal qual) a mesma foi dividida em seis partes a fim de garantir a homogeneidade do material, sendo que ao final da divisão, as partes opostas entre si foram novamente unidas, tornando-se assim, três alíquotas.

### **2.2 PROCESSAMENTO**

Para comparar os agregados reciclados gerados a partir do processamento mineral, os equipamentos foram inicialmente configurados a fim de se obter dois produtos em um passante de 80% próximo a 4,8 mm, de modo a minimizar a influência do tamanho máximo de partículas nas características de liberação mineral.

Cada alíquota foi processada separadamente, obtendo-se assim, dois produtos do mesmo resíduo oriundos de diferentes sistemas de cominuição, sendo britador de impacto de eixo horizontal e britador de mandíbula; a alíquota titulada como tal qual, foi arquivada caso necessite de estudos futuros.

Na sequência, o produto de cada processamento foi disposto em uma pilha alongada e amostrado novamente em duplicata. Isto é, as análises de caracterização ocorreram em duplicidade com alíquotas de extremidade opostas da pilha, a fim de avaliar se a homogeneidade da pilha foi atingida.

### **2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS GERADOS**

A caracterização seguiu os parâmetros físicos e químicos existentes aplicados a agregados reciclados.

A distribuição granulométrica foi determinada por dois métodos, o primeiro de acordo com a norma ISO 13322-2/06 (ISO, 2006), no qual foi realizado um peneiramento úmido nas malhas da série Tyler: 12,5, 9,5, 4,8, 2,4, 1,2, 0,6, 0,3, 0,15 0,15mm. E o segundo por análise dinâmica de imagens, no qual também foi feita a análise morfológica das partículas.

Para a realização da Difração de Raios X (DRX) e espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), as amostras foram previamente cominuídas em moinho de rolos até a dimensão média de partícula na ordem de 1 mm e, em seguida, pulverizadas até tamanho de partículas inferiores a 0,037 mm. A composição química foi determinada em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, por comparação com materiais certificados de referência na calibração Rochas, em espectrômetro por fluorescência de raios X, marca Bruker, modelo S8 Tiger; a perda ao fogo (PF) efetuada a 1.020°C por 2h. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data e ICSD - Inorganic Crystal Structure Database. A determinação

semiquantitativa das mesmas foi efetuada pelo método RIR - Ratio Intensity Reference utilizando as estruturas cristalinas do ICSD. O estudo foi efetuado através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca Bruker, modelo D8 Endeavor, com detector sensível a posição.

As análises de composição química e mineralógica foram feitas tanto em frações, as mesmas utilizadas na distribuição granulométrica, quanto na amostra inicial.

Ao todo foram 16 caracterizações, sendo oito advindas do britador de impacto e oito do britador de mandíbula. Sendo que, das oito amostras, quatro denominadas A e as outras quatro B.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A figura 1 apresenta as distribuições granulométricas comparativas obtidas por análise de imagens dinâmica no equipamento Camsizer e por peneiramento úmido entre os britadores.

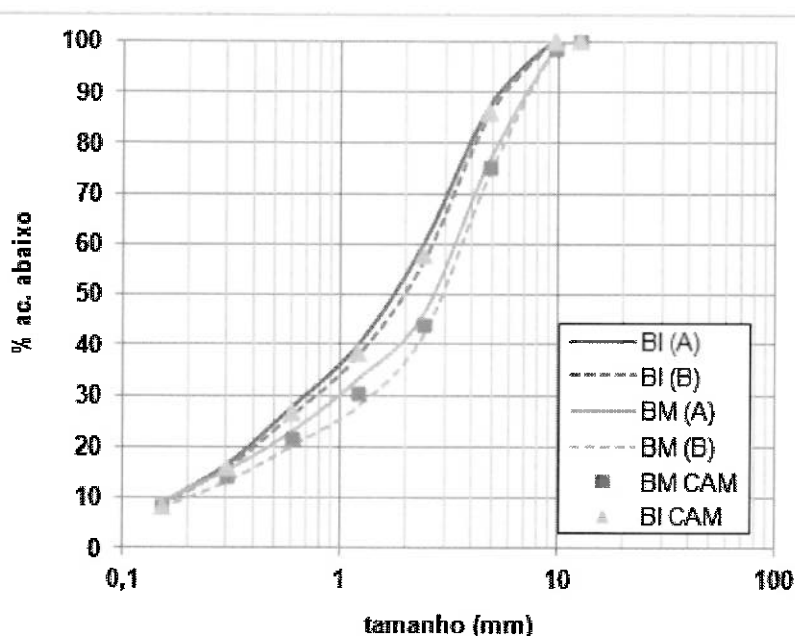


Figura 1 – Distribuição granulométrica comparativa entre análise de imagem e peneiramento úmido entre os britadores.

A homogeneidade na pilha alongada foi atingida. Essa afirmação pode ser confirmada nas curvas obtidas em A e B, tanto no britador de impacto quanto no britador de mandíbula, são similares entre si.

Também é possível perceber a semelhança dos resultados das duas técnicas, porém, o Camsizer permite realizar cada medida em cerca de 2 minutos e a caracterização de partículas na ordem de até poucos micrômetros, enquanto por peneiramento úmido pode levar horas e os limites para a caracterização das partículas são de dezenas de micrômetros. Além disso, o Camsizer apresenta uma elevada representatividade, precisão e reprodutibilidade em suas análises, adicionalmente, é possível caracterizar a morfologia das partículas.

A forma das partículas está relacionada aos parâmetros de esfericidade e relação de aspecto. Assim, é preciso entender o impacto que essas pequenas variações têm mediante esses parâmetros. A distribuição de partículas por esfericidade nas amostras de cada britador é apresentada na figura 2.

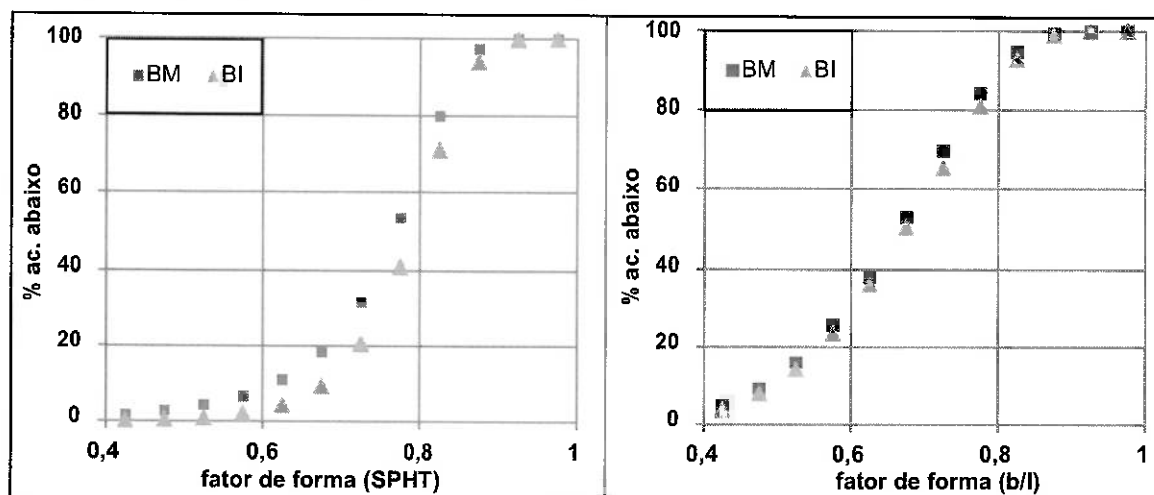


Figura 2 – Distribuição da relação de esfericidade (esquerda) e distribuição da relação de aspecto (direita).

De acordo com a figura 2 à esquerda, pode-se notar um deslocamento entre as curvas. Esse deslocamento indica que as partículas geradas a partir do britador de impacto possuem uma esfericidade e regularidade maior em sua superfície comparada com as partículas geradas no britador de mandíbula. Já à direita, as distribuições das partículas são bastante similares.

A relação de aspecto ( $b/l$ ) segue uma escala da ordem de 0 a 1, assim, de 0 a 0,5 as partículas tendem a apresentar um aspecto alongado, enquanto as partículas de 0,5 a 1 um aspecto esférico. Então, pode-se verificar que, aproximadamente, 10% do material gerado têm partículas mais próximas ao aspecto alongado e 90% tendem a forma esférica, mas não há partícula com fator forma igual a 1 (100% esférica) e igual a 0 (100% alongada).

### 3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O sumário da composição química e os teores de aglomerantes por intervalos granulométricos agrupados em função da semelhança de composição química e para as amostras como um todo (todas as frações juntas), em britadores de mandíbula e impacto, é exposto na tabela 1.

**Tabela 1 - Análise granulométrica produtos dos britadores.**

Fração (mm)	Massa (%)	Teores (%)									Distribuição no ensaio (%)				
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PF	CaO+PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO+PF	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O
<b>BM A</b>	100	66,5	10,4	2,7	1,2	7,6	2,2	3,2	6,2	13,9	100	100	100	100	100
-9,5+2,4	54	65,1	12,8	3,7	1,3	5,7	3,1	3,7	3,9	9,6	17,8	20,4	19,9	14,9	21,2
-2,4+0,15	37	70,5	8,2	2,6	1,1	7,6	1,5	2,6	6,2	13,8	9,8	7,6	7,5	9,3	7,4
-0,15	9	52,7	10,1	3,7	1,9	15,7	1,38	2,62	12,2	27,9	7,2	8,7	10,5	18,3	6,8
<b>BM B</b>	100	67,1	10,5	2,9	1,2	7,6	2,2	3,1	5,7	13,3	100	100	100	100	100
-9,5+2,4	58	65,8	13	3,4	1,2	5,4	3,1	3,8	3,6	9,1	19,2	22,5	19,7	16,6	22,7
-2,4+0,15	34	70,9	8	2,3	1,1	7,6	1,4	2,5	6,2	13,8	9,0	6,8	5,9	8,5	6,5
-0,15	8	52,7	10,2	3,64	1,9	15,4	1,33	2,58	12,1	27,5	6,5	7,9	9,2	16,2	5,8
<b>BI A</b>	100	66,6	10,3	3	1,3	7,8	2,2	3,1	5,8	13,6	100	100	100	100	100
-9,5+2,4	40	63,0	13,0	3,6	1,4	7,3	3,1	3,5	4,8	12,2	19,3	24,9	22,5	17,9	24,5
-2,4+0,15	51	69,8	8,8	2,8	1,2	7,1	1,7	2,8	5,7	12,8	13,5	11,3	11,2	11,9	11,1
-0,15	9	53,5	10,1	4,6	2,1	13,7	1,5	2,6	11,4	25,1	7,1	8,4	12,6	16,4	6,5
<b>BI B</b>	100	66,1	10,1	3,3	1,3	8,0	2,1	3,1	6,0	14,0	100	100	100	100	100
-9,5+2,4	44	63,3	12,5	3,4	1,3	7,4	2,9	3,6	5,12	12,6	21,1	25,7	22,8	20,5	25,9
-2,4+0,15	48	70	8,8	2,7	1,2	7,1	1,7	2,8	5,6	12,7	12,7	10,5	10,2	10,9	10,5
-0,15	8	53,9	9,9	4,6	2,1	13,6	1,4	2,6	11,5	25,1	6,7	7,7	11,9	15,1	6,2

Os principais constituintes das frações acima de 0,15 mm são: sílica, óxido de cálcio, alumina, óxido de potássio e óxido de ferro que juntamente com a perda ao fogo ultrapassam 95% dos teores nas amostras; elementos menores são Na<sub>2</sub>O e MgO.

A soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro está relacionada aos silicatos presentes nas rochas, areia e cerâmicas, ao passo que a soma dos teores de CaO com a PF está essencialmente relacionada à pasta de cimento remanescente nos agregados reciclados e possível presença de calcáreo (ANGULO et al., 2009).

Nota-se um aumento nos teores de sílica no intervalo -2,4+0,15 mm, acompanhado pela redução na soma dos teores de Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O. Esse comportamento pode indicar aumento do conteúdo de areia de quartzo e redução na proporção de fragmentos líticos, fato confirmado pelo empobrecimento de Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O na fração (relação teor e distribuição) (ULSEN, 2011).

Nas frações abaixo de 0,15 mm, há uma redução considerável no teor de sílica e aumento de CaO+PF.

### 3.3 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

O resultado semi-quantitativo da composição mineralógica por difração de raios X é demonstrado na tabela 2 a seguir.

**Tabela 2 – Estimativa semi-quantitativa da composição mineralógica por DRX.**

Fração (mm)	Minerais %				
	Mica	Calcita	K-Feld.	Plagioclásio	Quartzo
<b>BM A</b>	4	3	12	19	61
-12,5+2,4	7	3	16	27	42
-2,4+0,15	3	3	13	17	61
-0,15	7	13	12	17	45
<b>BM B</b>	5	5	14	17	59
-12,5+2,4	7	3	19	25	42
-2,4+0,15	3	5	18	14	60
-0,15	6	19	20	16	35
<b>BI A</b>	4	4	14	19	61
-9,5+2,4	6	6	6	21	56
-2,4+0,15	6	6	7	11	64
-0,15	6	10	10	17	54
<b>BI B</b>	4	4	12	16	58
-9,5+2,4	6	5	10	22	52
-2,4+0,15	5	5	12	14	61
-0,15	8	10	12	20	50

Apesar dos produtos gerados no britador de impacto e mandíbula, de um modo geral, ser bastante similar, nota-se que na fração -2,4+0,15 mm há uma maior concentração de quartzo na amostra do britador de mandíbula, comparada à fração anterior, frente ao britador de impacto. O aumento do quartzo é concordante com os resultados das análises químicas, que indica maiores teores de sílica.

Na fração abaixo de 0,15 mm de todas as amostras, ocorre um decréscimo de quartzo e enriquecimento de calcita. Este enriquecimento pode ser explicado pela certa facilidade de fragmentação da pasta de cimento e assim, ter uma tendência maior a se concentrar, como partículas livres, em granulometrias menores.

Os teores de calcita estão essencialmente relacionados com a pasta de cimento remanescente nos agregados reciclados e, secundariamente, ao conteúdo de calcita, sendo que por difratometria de raios X não se pode distinguir ambas as fases (ULSEN, 2011).

#### 4 CONCLUSÕES

Do ponto de vista técnico, o processamento mineral é determinante nas características e propriedades do agregado reciclado obtido e esse controle de qualidade é guiado pelos resultados da caracterização tecnológica. Neste estudo, os procedimentos aplicados à reciclagem de RCD foram comparativos com foco na melhoria da qualidade dos produtos. Assim, condições operacionais estabelecidas ao processar os RCD foram definidas, objetivando manter o mesmo tamanho máximo de partículas para ambos os processos. O resultado foi uma distribuição granulométrica mais fina no produto do britador de impacto, com partículas de maior esfericidade e regularidade em sua superfície. Nas análises quantitativas da composição química e mineralógica de maiores granulometrias notam-se um aumento do teor de sílica relacionada ao quartzo, enquanto que em frações menores há o enriquecimento do teor de calcita advinda do cimento. Embora o resíduo possuir uma elevada heterogeneidade, a pilha de homogeneização minimizou essa problemática.

Ao reciclar os RCD, tende-se a conservar as jazidas de matérias-primas não

renováveis, minimizarem os impactos ambientais causados pela mineração, reduzir as terras ocupadas por bota-foras, extração ilegal de areia e as disposições ilegais de resíduos. Embora sua reciclagem ser tecnicamente viável e contribuir para o desenvolvimento econômico e sustentável do país, ainda existem desafios a serem alcançados e técnicas a serem aprimoradas.

## **5 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.
- CACHIM, P. B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1292–1297, 2009.
- DE JUAN, M. S.; GUTIERREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009.
- DEBIEB, F. et al. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3382–3387, 2009.
- ETXEBERRIA, M.; MARI, A. R.; VAZQUEZ, E. Recycled aggregate concrete as structural material. **Materials and Structures**, v. 40, n. 5, p. 529–541, 2007.
- ISO. **13322-2 Particle size analysis -- Image analysis methods -- Part 2: Dynamic image analysis methods** (I. O. for Standardization, Ed.), 2006.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000.
- MATOS, G. R. Use of Minerals and Materials in the United States From 1900 Through 2006,. n. USGS Fact Sheet 2009-3008, p. 6, 2009.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1999.
- RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 407–415, 2007.
- ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. São Paulo: Universidade de São paulo, 2011.
- ULSEN, C. et al. Separability Studies on Recycled Aggregates From Different Construction and Demolition Wastes 2 Materiais E Métodos. v. 3, p. 341–348, 2014.