

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO SUSTENTÁVEL COM
ADIÇÃO DE RESÍDUO DO PROCESSO DA BRITAGEM DE ROCHAS**

IZAC SOUZA SILVA

UNIFEG - CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE GAUXUPÉ

ANA PAULA DUARTE SELEGHIM

INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS - IQSC - USP

MARCELO KAWAKAME

UNIFEG - CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE GAUXUPÉ

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO SUSTENTÁVEL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO PROCESSO DA BRITAGEM DE ROCHAS

1. INTRODUÇÃO

No decorrer do tempo a população mundial cresceu gradativamente, aumentando o consumo de bens e serviços, fazendo que a produção industrial evoluísse de tal maneira, buscando inovações tecnológicas. Com o crescimento populacional houve a necessidade de novas explorações de recursos naturais, movimentando a economia social. A produção em grande escala, utilizando recursos naturais, passou a gerar uma grande quantidade de resíduos, consequentemente acarretando a poluição ambiental (ONU-BR, 2017, 2019).

Atualmente na economia mundial destaca-se a construção civil. No Brasil, o ramo é um dos setores mais importante da economia, gerando empregos diretos e indiretos. Nos últimos anos, criou-se linhas de créditos para financiamentos de imóveis e construções no país e com isso gerou a ampliação, requalificação e construção de novas unidades, principalmente habitacionais, sendo elas coletivas, públicas ou privadas. De 2004 (início do progresso do crédito imobiliário) até 2010 o setor cresceu 42,4%. Nesse período foi financiado na ordem de 2 milhões de moradias e previsto a comercialização de aproximadamente três milhões até 2015. Deste modo, o país passou a investir fortemente na área de infraestrutura. Os investimentos realizados pelos programas sociais deram origem a novos investimentos tecnológicos, aumentando a demanda de mão de obra qualificada. Com isso, houve a necessidade de novos profissionais, gerando diversas oportunidades de empregos na área da construção civil. Assim, muitos trabalhadores deixaram a zona rural se instalando nos grandes centros urbanos, gerando demanda de novas moradias habitacionais. Aliados as novas tecnologias de construção somaram-se ferramentas de gestão, como a produção enxuta e produção mais limpa aplicadas ao setor (CBIC, 2012).

Os novos processos construtivos se expandiram rapidamente pelo país, ocasionando crescimento na indústria da construção civil. O setor passou a ser visto como grande gerador de resíduos que ao serem descartados incorretamente e sem tratamento, provocam problemas como contaminação de solos e poluição dos recursos hídricos, caracterizado como *Impacto Ambiental*. Além disso, o segmento é responsável por muitos desperdícios de materiais nas etapas construtivas.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente – MMA (2012), os resíduos gerados pela construção civil são em sua maioria semelhantes aos agregados naturais e podem representar de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos. Diante desse problema, os resíduos da construção civil também se tornaram sujeitos a legislação referente aos resíduos sólidos, bem como à legislação específica de âmbito federal, estadual e municipal.

Sendo assim, o setor reconhecido como o maior gerador de resíduos assumiu a responsabilidade da criação de programas para sustentabilidade da construção civil. O desenvolvimento de um programa para construção sustentável foi um grande desafio nesse período. Muitas empresas da área não tinham conhecimento sobre ferramentas de gestão ambiental e de como executar obras sustentáveis. O conhecimento sobre materiais ecológicos alternativos e o manejo de resíduos ainda era precário (CBIC, 2012).

Desta forma, o setor passou a ser o alvo principal dos órgãos ambientalistas, sendo criticado pelo volume gerado e pela maneira de descartar os resíduos. A construção civil passou por um processo de “*reciclagem*” enfrentando um grande desafio para adequar-se ao novo conceito (CBIC, 2012). Embora o campo da construção civil tenha passado ultimamente por uma desaceleração, estimou-se um crescimento na ordem de 10% em 2018 (ANEPAC,

2018a). É fato que a indústria da construção civil ainda é uma das responsáveis pelo crescimento econômico do país, mesmo com a diminuição de obras públicas ou privadas. Consequentemente, o setor permanece como causador da geração de grande quantidade de resíduos.

A maior parte dos recursos naturais extraídos são direcionados para o uso comercial da construção civil, gerando um ciclo de poluição. Exemplos típicos são as mineradoras de pedra brita e de extração de areia natural.

As mineradoras beneficiam a matéria prima extraída pelo processo de britagem, produzindo agregados graúdos e outros materiais. O processo de britagem consiste basicamente no decapeamento (retirada da camada de terra depositada sobre a rocha), seguido da trituração através do uso de explosivos. Posteriormente, o material é transportado para beneficiamento onde é feito a separação granulométrica da brita e o "pó de pedra", que são materiais utilizados nas usinas de concreto, pavimentação asfáltica e na construção civil. Nesse processo de produção é gerado, também, resíduos denominados normalmente como "finos de britagem" (IBRAM, 2016).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT Norma Brasileira - NBR 7211/2009- Agregados Para Concreto – Especificação, define que "finos" é o nome genérico dado aos materiais que passam pela peneira 75 μm . Os finos de britagem podem ser classificados pelas diferentes dimensões de britas distintas das usuais, como, por exemplo, menor igual a 0,075 mm (ANEPAC, 2018b).

Os rejeitos finos e ultrafinos são estocados em grandes quantidades por não apresentarem vantagens e, portanto, aceitabilidade e valor no mercado da construção civil. O estoque deste resíduo libera volumes consideráveis de nuvens de poeira, provocando degradações ao meio ambiente e problemas socioambientais (LUZ, 2008). Além disso, há outros rejeitos que também contemplam destinações inadequadas, apresentando sérios riscos à sociedade vizinha e ao meio ambiente (MMA, 2012).

A sustentabilidade é necessária em toda a cadeia produtiva da construção civil. Sendo assim, devido as legislações impostas pelos órgãos ambientais as empresas mineradoras avançaram no sentido de praticar a extração de maneira ambientalmente correta. Com isso, a criação de alternativas incorporando o conceito de sustentabilidade vem se tornando prioridade nessas empresas. Alguns exemplos são: desenvolvimento de projetos de extração mineral; diminuição da quantidade de resíduos gerados e/ou o aproveitamento dos mesmos; menor extração de recursos naturais, entre outros. Buscar soluções e investir em pesquisas inovadoras que visem a criação de métodos e técnicas para reduzir a utilização de recursos naturais, adotando alternativas para utilização de resíduos originados da matéria prima, são conceitos fundamentais para atualidade (ANEPAC, 2018b).

Nessa linha, a areia natural é um recurso mineral fundamental na fabricação de concretos e argamassas que é conhecida como agregado miúdo. A exploração desse recurso está provocando consequências como o esgotamento crescente em suas jazidas, causando degradações nos leitos dos rios (SANTANA; FERREIRA, 2006).

Com base nesse contexto, o presente trabalho teve como propósito a fabricação de blocos de concreto produzidos com adição do resíduo proveniente de mineradora como parte do agregado miúdo e verificar a resistência a compressão e a capilaridade do novo material, contribuindo para construção sustentável. Os corpos de prova de concreto foram analisados de forma a obter eficiência na resistência mecânica e capilaridade dos blocos, comparando com as amostras padrão. Todos procedimentos foram realizados de acordo com a norma NBR 7680/2015 - Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto - Resistência à compressão axial, entre outras normas da ABNT. Os resultados foram tratados utilizando-se o método estatístico da Distribuição Normal Padrão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, há décadas as empresas mineradoras contribuem de forma satisfatória no ramo da construção civil, através da produção de insumos para fabricação de materiais de construção (ANEPAC, 2018b). Os principais produtos utilizados na construção civil provenientes de elementos minerais são: areia, pedra britada, cimento, cal, vidro, cerâmicas, aço, metais, entre outros. Destaca-se a areia e a pedra britada como as substâncias minerais mais consumidas no mundo, e que podem ser aplicadas de forma bruta ou beneficiada nas construções (IBRAM, 2018).

A cadeia produtiva do segmento da Construção Civil é caracterizada como uma das responsáveis pelo alto consumo de recursos naturais, desde a produção dos insumos até a execução da obra e sua operação. Do total extraído do meio natural cerca de 75% é utilizado para a construção civil. Além disso, estima-se que o setor é responsável pela geração de aproximadamente 25% da quantidade total de resíduos gerados pela indústria brasileira (CBIC, 2012).

O Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (superintendência de Goiás), junto ao Ministério de Minas e Energia - MME, relatou em pesquisa publicada no ano de 2018 os títulos de lavra das principais substâncias minerais extraídas no Estado de Goiás (GO) e o Distrito Federal (DF), conforme **Tabela 1**. A indústria da mineração é fundamental para a economia destas regiões. Denomina-se título de lavra como “todo o diploma que autoriza a extração de um determinado bem mineral, sendo subdividido da seguinte maneira: Manifesto de Mina, Decreto de Lavra, Portaria de Lavra, Registro de Extração, Permissão de Lavra Garimpeira e Guia de Utilização.” O Manifesto de Mina, o Decreto de Lavra e a Portaria de Lavra foram reunidos passando a ter o nome de Concessão de Lavra (DNPM, 2018).

Tabela 1: Títulos de Lavra*, por Substância, no Estado de Goiás e Distrito Federal. Situação Vigente em 31.12.2017.

| SUBSTÂNCIA | POSIÇÃO | QUANTIDADE | PARTICIPAÇÃO (%) |
|--------------------|-----------|--------------|------------------|
| Areia | 01 | 925 | 40,80 |
| Gnaisse | 02 | 420 | 18,53 |
| Quartzito | 03 | 190 | 8,38 |
| Diamante | 04 | 175 | 7,72 |
| Quartzo | 05 | 76 | 3,35 |
| Calcário | 06 | 69 | 3,04 |
| Argila | 07 | 65 | 2,87 |
| Ferro | 08 | 40 | 1,76 |
| Rochas Ornamentais | 09 | 37 | 1,63 |
| Granada | 10 | 34 | 1,50 |
| Granulito | 11 | 29 | 1,28 |
| Basalto | 12 | 26 | 1,15 |
| Níquel | 13 | 21 | 0,93 |
| Ametista | 14 | 13 | 0,57 |
| Sienito | 15 | 12 | 0,53 |
| SUBTOTAL | 15 | 2132 | 94,04 |
| Outros | 38 | 135 | 5,96 |
| TOTAL | 53 | 2.267 | 100,00 |

Fonte: Superintendência do DNPM-GO, 2018. Adaptado pelo autor.

***Obs.:** Concessão de Lavra, Registro de Licença, Registro de Extração e Permissão de Lavra.

Nota-se que a areia se destaca em primeira posição dentre as quinze substâncias, representando 40,80% dos títulos de lavra registrados em 31/12/2017. A pedra britada também apresenta alto potencial de exploração, por ser composta principalmente por gnaíse, calcário, granito (granulito), e basalto, que somam 24,00% dos títulos. Assim, a soma da extração desses minerais representa 64,80% do total. Esses materiais são os principais direcionados para consumo na construção civil. Do total da produção de areia e brita nestas regiões em 2017, foi absorvido 99,57% (GO) e 86,87% (DF) e o restante foi negociado nos Estados de Minas Gerais e São Paulo (DNPM, 2018).

O setor da mineração é um dos pilares da economia brasileira. O país é um dos maiores produtores de substâncias minerais do mundo, chegando a produzir mais de 2 bilhões de toneladas anualmente (IBRAM, 2018). A **Tabela 2** apresenta a produção mineral brasileira no ano de 2017.

Tabela 2: Dados Estatísticos sobre Produção de Bens Minerais para o ano de 2017.

| BENS MINERAIS PRODUZIDOS EM 2017 | QUANTIDADES |
|----------------------------------|---------------------|
| Água Mineral | 8 bilhões de litros |
| Minério de Ferro | 430.000.000 t |
| Agregados para Construção | 420.000.000 t |
| Bauxita | 30.000.000 t |
| Fosfato | 6.800.000 t |
| Manganês | 2.400.000 t |
| Alumínio Primário | 1.000.000 t |
| Potássio Concentrado | 460.000 t |
| Zinco Concentrado | 230.000 t |
| Cobre | 200.000 t |
| Liga de Níobio | 90.000 t |
| Níquel Contido | 60.000 t |
| Ouro | 95 t |
| Obs.: t = toneladas | |

Fonte: IBRAM, 2018. Adaptado pelo autor.

Percebe-se que a produção de agregados para uso na indústria da construção civil em 2017 foi de 420 milhões de toneladas, ou melhor, o equivalente a 87,63% da produção total. Esses dados comprovam que o setor é o maior consumidor de bens minerais. Vale frisar que esses números vêm caindo devido à crise econômica do país. Todavia, houve uma leve reanimação do mercado da construção civil recentemente. Em 2018 estimou-se um crescimento de 10% (ANEPAC, 2018a).

A areia é um recurso abundante em todo o planeta por originar-se de processos intempéricos e pelos métodos do ciclo das rochas, que ocorrem de maneira constante. Entretanto, sua escassez acontece frequentemente por ser uma substância de consumo elevado. Regiões metropolitanas são exemplos típicos da falta de areia (DNPM, 2016).

A alta exploração desses recursos naturais traz uma série de problemas ambientais, como a alteração dos cursos d'água e dos processos geológicos, assoreamento, desmatamento, formação de valas, descaracterização do relevo, destruição das áreas de preservação permanente, da fauna e flora, além da escassez da própria areia (LUZ, 2008).

Há uma grande quantidade de resíduos gerados nas empresas mineradoras, destacando-se entre eles os sólidos de extração (estéril/seco) e do tratamento/beneficiamento

(rejeito). Em sua maior parte, estes resíduos podem ser sedimentos, pilhas de minérios pobres, estéreis, solos, aparas, rochas e lamas das serrarias de mármore e granito, as polpas de decantação de efluentes, as sobras da mineração artesanal de pedras preciosas e semipreciosas, e finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento. Por consequência, um grande desafio do setor é a criação de novas tecnologias com estratégias para o aproveitamento desses resíduos (IBRAM, 2018). Esse desafio condiz com o tema “Reengenharia de Minas”, por ser um processo de promoção para sustentabilidade (IBRAM, 2016).

Somado as legislações impostas no setor da mineração pelos órgãos ambientalistas, com o propósito de minimizar os impactos ambientais, o reaproveitamento dos resíduos gerados foi uma alternativa (IBRAM, 2016). Assim, com a escassez da areia natural o setor passou a beneficiar e comercializar o subproduto da britagem de rochas (finos de britagem) como areia artificial na construção civil, especialmente nas grandes cidades e em regiões metropolitanas, já que o transporte da areia natural até essas regiões se encontrava inviável economicamente devido à grande distância das jazidas. Entretanto, houve baixo consumo de areia artificial, e o principal motivo era pela coloração do produto, que representava algo distinto do usual pelos consumidores. O aproveitamento desse resíduo ainda é uma alternativa válida, no entanto, ainda há pouca utilização da areia artificial em relação a areia natural. O setor tem em vista que a proposta será mais aceita pelo mercado futuramente (ANEPAC, 2018b).

Deste modo, mesmo com o beneficiamento parcial do subproduto da britagem de rochas como areia artificial, ainda resta uma porção relevante de resíduos finos e ultrafinos. Estima-se que 20% das matérias primas utilizadas no processo da britagem de rochas se tornam “finos”. Isso acarreta diversos problemas ambientais como nuvens de poeira, assoreamento de rios e lagos provocando alterações na paisagem, fauna e flora, prejudicando até mesmo os lençóis freáticos e, portanto, diminuindo a qualidade de vida das espécies (MMA, 2012).

Somente uma mineradora de grande porte chega a obter milhares de toneladas de resíduos sólidos por dia. Esses resíduos são principalmente arenosos. Durante o período de 1996 a 2005 a geração de rejeitos aumentou cerca de 40%, passando de 202 milhões de toneladas em 1996 para 290 milhões de toneladas em 2005. As quantidades de rejeitos gerados na região de Minas Gerais corresponderam a 101 milhões de toneladas e 123 milhões de toneladas para os anos 2008 e 2009, respectivamente. Isso abrange apenas empresas de mineração de médio ou grande porte e potencial poluidor. Além disso, se estima com relação ao cenário futuro que a quantidade anual irá praticamente dobrar, passando de 348 milhões de toneladas gerados em 2010 para 684 milhões de toneladas em 2030 (IPEA, 2012).

Para Santana e Ferreira (2006), finos de pedreira são resíduos resultantes do processo da britagem, que é a fragmentação de rochas para fins de controle granulométrico e facilidade de transporte em indústrias mineradoras.

A ABNT NBR 7211/2009 – Agregados para Concreto – Especificação, define que agregados miúdos ou areia de origem natural, são materiais passantes e retidos, nas peneiras ABNT 4,8mm e ABNT 0,075 mm, respectivamente, e agregado graúdo como pedregulho, brita e seixo, passantes na peneira ABNT 152 mm e retidos na peneira ABNT 4,8 mm. Ainda segundo essa norma, “finos” é o nome genérico dado aos materiais que passam pela peneira 75 µm (equivalente a abertura de 0,075 mm).

Para diminuição desses rejeitos, é necessário a realização de pesquisas que busquem minimizar tais problemas, apresentando soluções que auxiliem na produção de materiais com, no mínimo, a mesma qualidade dos convencionais e que reduz significativamente a extração de recursos naturais (IBRAM, 2016). Neste sentido, foi constatado como resultado de pesquisa que o resíduo da britagem atende as especificações da NBR 7211/2009, obtendo um

Diâmetro Máximo Característico (DMC) de 4,8 mm e módulo de finura igual a 2,31, caracterizando-o na zona ótima de utilização ($2,20 \leq MF < 2,90$), (SILVA; LOURENÇONI; PENA, 2017).

3. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida no sentido de estudar a influência da adição de resíduos da britagem de rochas (finos de britagem) na resistência e capilaridade do concreto. Para tanto, avaliou-se estas características com relação a adição gradativa de finos de britagem em cinco dosagens distintas.

Para apuração dos resultados desenvolveu-se cálculos estatísticos fundamentado na metodologia da Distribuição Normal Padrão, também conhecida como Distribuição Gaussiana ou Distribuição de Laplace-Gauss, realizado através do *software* Microsoft Excel.

3.1. Materiais Utilizados para confecção do concreto - Classificação:

Na fabricação dos corpos de prova prismáticos referente aos blocos de concreto foi empregado os seguintes materiais: água potável, fornecida pela concessionária local, Companhia de Saneamento de Minas Gerais, COPASA – MG; cimento CP II F-32, atendendo a norma NBR 11578/1991 - Cimento Portland composto; pedrisco como agregado graúdo; areia grossa como agregado miúdo; e adição do finos de britagem como parte do agregado miúdo.

O resíduo (finos de britagem) foi obtido numa mineradora localizada próximo a cidade de Guaxupé, na região Sul do Estado de Minas Gerais.

Os agregados miúdos (areia e finos de britagem) foram passados por peneiramento pela peneira ABNT 10, com abertura 2,00 mm, para obter melhor homogeneidade em seus grãos, eliminando possíveis sujeiras, de acordo com a norma NBR 7211/2009.

3.2. Composição do Traço do Concreto - Confecção dos Corpos de Prova:

Uma das aplicações possíveis para o “concreto sustentável” seria a fabricação dos blocos de concreto, e todos os ensaios foram realizados considerando a fabricação destes. Levando em conta esta aplicação, o traço do concreto foi pré-estabelecido tomando como referência uma fábrica de blocos de concreto, sem função estrutural, localizada próximo a cidade de Guaxupé, na região sul de Minas Gerais. A partir daí, foi determinado o traço do concreto para cada lote, conforme consta na **tabela 3** a seguir:

Tabela 3: Amostragem da composição dos corpos de prova - definição dos traços.

| CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS COM DIÂMETRO 100mm E ALTURA 200mm | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------------|--------------|----------|--------------|
| LOTES | Nº de Corpos de Prova | Porcentagem de Resíduo Adicionada | Cimento CP II F-32 | Areia Grossa | Resíduo Finos de Britagem | Água Potável | Pedrisco | Volume Total |
| 01 | 6 | 0% | 1,09 | 7,63 | 0 | 2 | 3,28 | 12,00 |
| 02 | 6 | 10% | 1,09 | 7,63 | 1,2 | 2,2 | 3,28 | 13,20 |
| 03 | 6 | 20% | 1,09 | 7,63 | 2,4 | 2,4 | 3,28 | 14,40 |
| 04 | 6 | 30% | 1,09 | 7,63 | 3,6 | 2,6 | 3,28 | 15,60 |
| 05 | 6 | 50% | 1,09 | 7,63 | 6 | 3 | 3,28 | 18,00 |
| Volume base (Lote 01): 12 L | | | Unidade de medida: Litros (L) | | | | | |

Fonte: O autor, 2019.

Feito a classificação dos materiais e a definição dos traços, confeccionou-se o concreto para cada lote, conforme estabelecido na **tabela 3**, adicionando pedrisco, água, finos de britagem, areia e cimento, respectivamente, e aos poucos. Para a mistura do concreto utilizou-se betoneira marca Menegotti.

3.3. Ensaio do Abatimento do Concreto pelo Tronco de Cone “*Slump Test*”:

Antes da moldagem dos corpos de prova, realizou-se o ensaio de abatimento do concreto *slump test* para determinar a consistência do concreto, conforme **figura 1**:

Figura 1: Ensaio *Slump test*.



Fonte: O autor, 2019.

O concreto foi adicionado em 3 camadas de 25 golpes cada, utilizando a haste de socamento. Foi obtido através do *slump test* um abatimento de 120 mm, estando dentro do limite estabelecido pela NBR NM 67/1998 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, sendo ≥ 10 mm. Todos procedimentos foram realizados em conformidade com essa norma.

3.4. Moldagem dos Corpos de Prova:

Confeccionou-se cinco lotes de corpos de prova, sendo o primeiro denominado “testemunha”, isto é, sem adição do resíduo, e os demais com adição de diferentes porcentagens do resíduo “finos de britagem”, conforme indicado na **tabela 3**. Para cada lote foram moldados 6 corpos de prova de diâmetro $\phi = 100$ mm e altura $h = 200$ mm. A parte interna dos moldes foi untada com uma fina camada de óleo mineral. O enchimento de cada corpo de prova foi feito em duas camadas de 12 golpes cada, utilizando a haste de socamento. Todos procedimentos foram realizados de acordo com a norma NBR 5738/1994 - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Método de ensaio. Os moldes utilizados estão identificados na **figura 2**.

Figura 2: Moldes utilizados.



Fonte: O autor, 2019.

3.5. Desmoldagem e Cura dos Corpos de Prova:

Concluído a moldagem, os corpos de prova foram guardados na câmara úmida do laboratório de Engenharia Civil do UNIFEG, e após 4 dias foi retirado os moldes, conforme **figura 3**, onde permaneceram aguardando o processo de cura pelo período de 28 dias, em conformidade com a norma NBR 9479 - Câmaras úmidas para cura de corpos-de-prova de cimento e concreto. Os procedimentos foram realizados de acordo com as normas NBR 5738/1994 e NBR 9479.

Figura 3: Corpos de prova desmoldados e guardados na câmara úmida.



Fonte: O autor, 2019.

3.6. Capeamento e Rompimento dos Corpos de Prova:

Após cumprir o prazo de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida para realização do capeamento (retífica) em suas extremidades. Em seguida, foi levado para rompimento na máquina da marca Contenco-Pavitest®, **figura 4** e **figura 5**, através dos ensaios de compressão, conforme norma NBR 5739/1994 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Os rompimentos dos corpos de prova, assim como todos os

demais procedimentos, foram executados seguindo a norma NBR 7680/2015 - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Procedimento e NBR 5739/1994. De acordo com essas normas, a resistência à compressão deve ser calculada através da equação (1) a seguir:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

Onde:

- f_c : resistência à compressão, MPa;
- F : força alcançada, N;
- D ou ϕ : diâmetro do corpo de prova, mm.

Figura 4: Rompimento dos Corpos de Prova.



Fonte: O autor, 2019.

Fig. 5: C. de Prova rompido.



Fonte: O autor, 2019.

3.7. Cálculos Estatísticos:

Para este trabalho, realizou-se a análise estatística dos dados de resistência utilizando-se a metodologia de Laplace-Gauss, também conhecida como Distribuição Normal Padrão. Os cálculos estatísticos foram realizados com auxílio do *software* Microsoft Excel, para que se obtivesse os resultados com maior segurança e precisão.

Uma das aplicações da metodologia da Distribuição Normal Padrão consiste basicamente em determinar limites de confiabilidade (margens de erro) para resultados de pesquisa. Assim, neste estudo foi determinado as margens de erro com base nos cálculos da média (\bar{x}), desvio padrão (DP) (s) e variância (σ), e com referência no nível de confiança utilizado. Para a presente pesquisa foi adotado nível de confiança de 95%.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nos ensaios à compressão dos corpos de prova cilíndricos, conforme NBR 5739, foi determinado os resultados das resistências mecânica para cada um dos 6 corpos de prova, nos cinco lotes. Os resultados obtidos são referentes a aplicação de cargas em Kgf e de tensões em MPa, conforme consta na **tabela 4** a seguir:

Tabela 4: Resistências mecânica dos corpos de prova.

| DADOS E RESULTADOS DAS AMOSTRAS DE ENSAIO |
|--|
| Diâmetro Nominal das amostras: $\phi = 100\text{mm}$ |
| Testemunhas |

| Lote 01 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Carga (Kgf) | 1270 | 1290 | 1450 | 1890 | 1660 | 1540 |
| Tensão (MPa) | 1,59 | 1,61 | 1,81 | 2,36 | 2,07 | 1,92 |
| Adição de 10% de finos de pedraira | | | | | | |
| Lote 02 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Carga (Kgf) | 1630 | 1650 | 1700 | 1460 | 1370 | 1630 |
| Tensão (MPa) | 2,04 | 2,06 | 2,12 | 1,82 | 1,71 | 2,04 |
| Adição de 20% de finos de pedraira | | | | | | |
| Lote 03 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Carga (Kgf) | 2570 | 2450 | 2790 | 2200 | 1930 | 2290 |
| Tensão (MPa) | 3,21 | 3,06 | 3,48 | 2,75 | 2,41 | 2,86 |
| Adição de 30% de finos de pedraira | | | | | | |
| Lote 04 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Carga (Kgf) | 1400 | 1600 | 1700 | 1480 | 1390 | 1830 |
| Tensão (MPa) | 1,75 | 2 | 2,12 | 1,85 | 1,74 | 2,28 |
| Adição de 50% de finos de pedraira | | | | | | |
| Lote 05 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Carga (Kgf) | 570 | 640 | 510 | 580 | 710 | 730 |
| Tensão (MPa) | 0,71 | 0,8 | 0,64 | 0,72 | 0,89 | 0,91 |

Fonte: O autor, 2019.

Com base nos resultados obtidos na **tabela 4**, foi realizado os cálculos estatísticos da média (\bar{x}), variância (σ) e desvio padrão (DP) (s), para cada lote especificado com as diferentes adições do resíduo. Segue os valores obtidos, relatados na **tabela 5** a seguir:

Tabela 5: Resultados da média (\bar{x}), variância (σ) e desvio padrão (s).

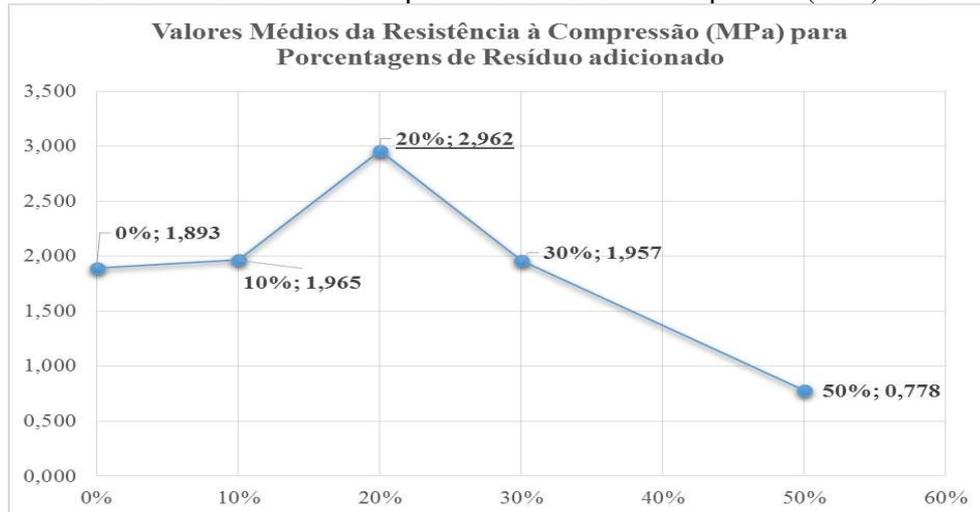
| RESULTADOS ESTATÍSTICOS | | | |
|---|-------------------------------------|--|----------------------------|
| Testemunhas | | | |
| Lote 01 | Média (\bar{x}) | Variância (σ) | DP (s) |
| Carga (Kgf) | 1516,67 | 55426,66667 | 214,9160043 |
| Tensão (MPa) | 1,893 | 0,085786667 | 0,267374062 |
| Adição de 10% de finos de pedraira | | | |
| Lote 02 | Média (\bar{x}) | Variância (σ) | DP (s) |
| Carga (Kgf) | 1573,33 | 16506,66667 | 117,2840806 |
| Tensão (MPa) | 1,965 | 0,02607 | 0,14739403 |
| Adição de 20% de finos de pedraira | | | |
| Lote 03 | Média (\bar{x}) | Variância (σ) | DP (s) |
| Carga (Kgf) | 2371,67 | 90336,66667 | 274,3730226 |
| Tensão (MPa) | 2,962 | 0,139896667 | 0,341438949 |
| Adição de 30% de finos de pedraira | | | |
| Lote 04 | Média (\bar{x}) | Variância (σ) | DP (s) |
| Carga (Kgf) | 1566,67 | 30946,66667 | 160,5891929 |
| Tensão (MPa) | 1,957 | 0,046826667 | 0,197540432 |
| Adição de 50% de finos de pedraira | | | |

| Lote 05 | Média (\bar{x}) | Variância (σ) | DP (s) |
|--------------|---------------------|------------------------|-------------|
| Carga (Kgf) | 623,33 | 7346,666667 | 78,24463063 |
| Tensão (MPa) | 0,778 | 0,011496667 | 0,097880312 |

Fonte: O autor, 2019.

Com a obtenção dos valores médios das resistências à compressão para cada lote, elaborou-se o gráfico representado conforme **Figura 6**:

Figura 6: Resultados médios obtidos para as resistências à compressão (MPa) em cada lote.



Fonte: O autor, 2019.

Baseado nos resultados verificou-se que a adição de 20% de finos de britagem apresentou melhor resistência mecânica, atingindo 2,962 MPa. Sobre a porosidade dos blocos, segundo análises empíricas após o processo de cura, verificou-se que as adições de 10% e 20% do resíduo atingiram melhoria quando comparado com os demais resultados, deixando-os mais liso e, portanto, menos propenso a umidade devida sua menor capilaridade. Entretanto, a melhor aparência encontrada foi com o experimento com adição de 10% de finos de britagem.

Em relação aos resultados obtidos para adição de 30% e 50% do resíduo, constatou-se que a resistência mecânica foi melhor para 30% e pior para 50%, e que o acabamento capilar foi ruim para ambas, isto em relação aos resultados alcançados nas amostras sem adição do resíduo.

Nota-se que todos os corpos de prova não suportaram cargas muito altas e esse resultado comprometeria a utilização do “concreto sustentável” como função estrutural. No tocante a isso, suspeita-se de alguns fatores que estão diretamente relacionados com o traço do concreto. Observou-se na **tabela 3** que o volume de areia foi superior ao dobro do volume de pedrisco, ainda com a adição de finos de britagem, resultou-se num volume de agregados miúdo muito maior que o volume de agregado graúdo. Com isso, o fator água/cimento (a/c) foi amplificado conforme aumentava a adição do resíduo exigindo maior concentração de água durante a confecção, e isso prejudicou a qualidade do concreto, afetando diretamente a resistência mecânica. Esse processo é devido a adição do resíduo “finos de britagem”, pois quanto menor a partícula do agregado miúdo maior será a área de contato superficial por unidade de massa que receberá água e, portanto, maior consumo de água na mistura haverá. Percebe-se na **tabela 3**, a necessidade de maior volume de água na composição do concreto conforme aumentava o resíduo.

Entretanto, deve ser destacado que os resultados dos testes para resistência mecânica dos corpos de prova confeccionados com adição de finos foram maiores que os resultados testemunhas (sem adição de resíduo). Nessa perspectiva, resultados obtidos por outros autores corroboram com os resultados apresentados. Menezes *et al.* (2016), constatou que a adição de 15% de pó de pedra (finos de britagem) na composição do traço apresentou melhor resistência para blocos intertravados de concreto. Outro estudo apresentou que a aplicação do resíduo “finos de britagem” foi viável para a substituição de areia natural em concretos produzidos em usina de pré-fabricados, uma vez que apresentou maior resistência (SANTANA; FERREIRA, 2006).

A análise estatística pela Distribuição Normal Padrão, com nível de confiança $\alpha = 95\%$ ou $\alpha = 0,95$, estabeleceu limites para mais e para menos (margens de erro) para as resistências mecânica dos blocos, quando estes comparados com o valor médio obtido (**tabela 6**).

Tabela 6: Margens de Erro obtidas através da Distribuição Normal Padrão.

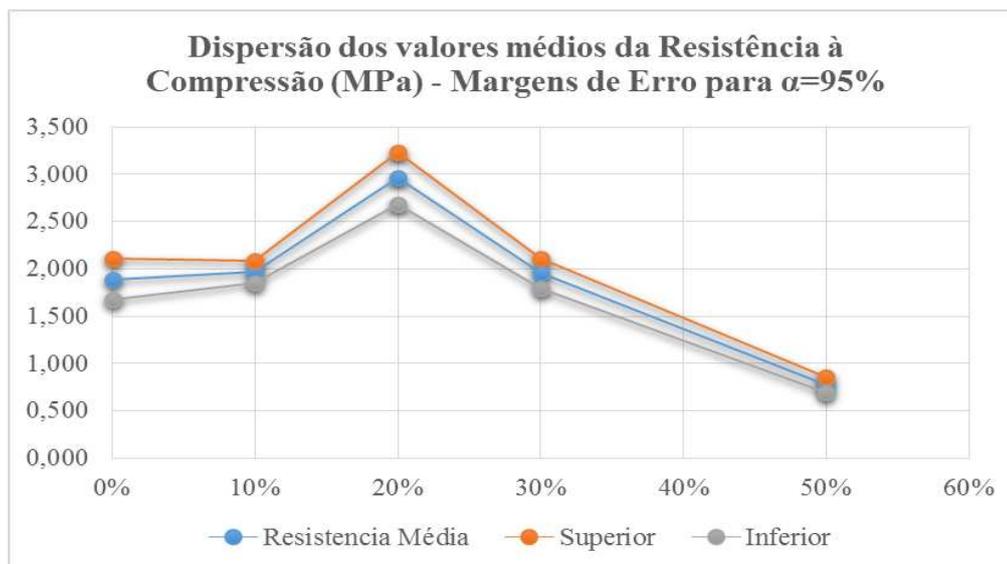
| DISPERSÃO PARA $Z = 1,96$ e $\alpha = 95\%$ | |
|--|---------|
| Testemunhas (MPa) | |
| Limite Superior | 2,10728 |
| Limite Inferior | 1,67939 |
| Adição de 10% de finos de pedreira (MPa) | |
| Limite Superior | 2,08294 |
| Limite Inferior | 1,84706 |
| Adição de 20% de finos de pedreira (MPa) | |
| Limite Superior | 3,23487 |
| Limite Inferior | 2,68846 |
| Adição de 30% de finos de pedreira (MPa) | |
| Limite Superior | 2,11473 |
| Limite Inferior | 1,79860 |
| Adição de 50% de finos de pedreira (MPa) | |
| Limite Superior | 0,85665 |
| Limite Inferior | 0,70001 |

Fonte: O autor, 2019.

Analisando as variações atingidas pela margem de erro, determinou-se as porcentagens de dispersão em relação aos valores superiores e inferiores à média de cada lote. Assim, para os lotes 01, 02, 03, 04 e 05, obteve-se os valores 42%, 24%, 55%, 32% e 16%, nesta ordem.

Ainda podemos notar, no gráfico (**Figura 7**), as margens de erro obtidas em relação à média, através do nível de confiança adotado.

Figura 7: Dispersão dos valores médios da Resistência à Compressão (MPa) para porcentagens de resíduo adicionada - Margens de Erro para confiabilidade de 95%.



Fonte: O autor, 2019.

Esses valores apresentam os limites confiáveis encontrados para as resistências à compressão e definem que para aplicação prática do presente trabalho ou em pesquisas futuras os resultados deverão estar dentro dos limites estabelecidos, desde que aplicada a metodologia adotada nesse estudo.

5. CONCLUSÕES

A sustentabilidade na construção civil deve contemplar a reciclagem, reutilização e a redução do consumo de recursos naturais. A busca por novos materiais que atendam esse conceito e, ao mesmo tempo, mantenham ou melhorem a qualidade é crescente. A reciclagem dos resíduos é uma alternativa viável e a construção civil é um setor promissor para absorção desses novos materiais, sejam eles resíduos de indústrias ou do próprio segmento. A incorporação desses resíduos em concreto é muito relatada por pesquisadores da área. E essa forma é considerada por muitos autores como a mais eficaz para tentar fechar o ciclo de vida dos materiais utilizados na construção. Entretanto, o concreto sustentável deve apresentar as características exigidas nas normas da ABNT.

Neste sentido, a presente pesquisa alcançou resultados promissores considerando a possibilidade da utilização de um resíduo produzido no processo de britagem de rochas (finos de britagem) na composição da fabricação de blocos de concreto.

O resíduo “finos de britagem” possuem alto potencial para ser utilizado como agregado miúdo na indústria da construção civil, especialmente na fabricação de blocos de concreto, visto que, na realização dos ensaios à compressão dos corpos de prova da presente pesquisa as resistências mecânicas foram maiores para adição de 20% do resíduo, quando comparado com os resultados dos corpos de prova testemunhas, além da melhoria no acabamento, minimizando a capilaridade.

Para as adições de 10 e 30% do resíduo os resultados, também, são aceitáveis já que as resistências mecânicas continuaram um pouco superior quando comparadas com a resistência sem adição. Ressalta-se que o acabamento capilar para adição de 10% foi superior aos demais e para as adições acima de 30% foram inferiores. Por outro lado, para adição de 50% do resíduo os resultados foram insatisfatórios, tanto para a resistência à compressão quanto para a capilaridade.

Entretanto, para todas as proporções pré-estabelecidas observou-se que as resistências à compressão não suportaram cargas muito altas. Presume-se que isto ocorreu devido a referência adotada para a composição do concreto, pois, a soma do volume dos agregados miúdos foi maior que do agregado graúdo, e como resultado, houve o aumento do fator água/cimento, afetando a resistência. Porém, um dos objetivos principais foi analisar se a incorporação do resíduo afetaria a resistência e se o bloco de concreto sustentável poderia ser utilizado como elemento sem função estrutural. Neste sentido, observou-se que a resistência aumentou com a adição de 10, 20 e 30% do resíduo em relação aos resultados testemunhas sugerindo a possibilidade de utilização como bloco para construção de alvenaria não estrutural.

Ao se analisar a reciclagem de resíduos na construção civil nacional percebe-se falhas no processo de pesquisa e desenvolvimento, principalmente no tocante a padronização da dosagem para fabricação de materiais de concreto. Encontram-se problemas no desenvolvimento de produtos, transferência de tecnologias e análises de desempenho ambiental. Com isso, sugere-se que em pesquisas futuras se leve em conta a investigação desses fatores e outros mais que interfiram diretamente na qualidade final do concreto. Deve-se investigar principalmente a estrutura química do resíduo, a utilização de aditivo na mistura e a verificação da absorção de água, para que se possa alcançar melhores resultados em relação à capilaridade, resistência e qualidade, podendo utilizar o produto na construção de alvenaria estrutural, ou ainda, como elementos estruturais.

Deste modo, a presente pesquisa contribui para o desenvolvimento de materiais de construção civil sustentáveis considerando a potencialidade da utilização do resíduo “finos de britagem” parcialmente ou integralmente como agregado miúdo. Essa alternativa trará um outro ganho ambiental diminuindo a demanda pela extração de recuso mineral (areia natural).

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738 - **Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. NBR 5739 - **Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. NBR 7211 – **Agregados para Concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 7215 - **Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR NM 67 - **Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR 7680 - **Concreto — Extração, Preparo, Ensaio e Análise de Testemunhos de Estruturas de Concreto Parte 1: Resistência à Compressão Axial**. 2015.

_____. NBR 9479 - **Câmaras Úmidas para Cura de Corpos-de-prova de Cimento e Concreto – Especificação**. 1994.

_____. NBR NM 46:2003 – **Agregados - Determinação do Material Fino que Passa Através da Peneira 75µm, por Lavagem**. 2003.

_____. NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da Composição Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 6136 – **Bloco Vazado de Concreto Simples para Alvenaria – Requisitos**. 2008.

_____. NBR 9935:2011: **Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 6156 - **Máquina de Ensaio de Tração e Compressão - Verificação - Método de Ensaio**. 1983.

_____. NBR 11578: **Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 1991.

A. L. R. DE MENEZES; N. CARDOSO; E. N. DE M. G. PINTO; K. C. CABRAL. **Influência da Adição de Pó de Pedra no Bloco Intertravado**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 06 a 10 de nov. de 2016, Natal, RN, Brasil. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/119-030.pdf>>. Acesso em: 10 de jul. de 2019.

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **Revista Areia e Brita**. Ano 20, edição 72, 2018. Disponível em: <<https://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita/item/376-edicao-72-2018-jan-fev-mar>>. Acesso em: 09 de jul. de 2019.

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **Revista Areia e Brita**. Ano 20, edição 73, 2018. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita>>. Acesso em: 09 de jul. de 2019.

Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia - MME. **Desempenho do Setor Mineral**. Goiás, GO e Distrito Federal, DF. 2018. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/desempenho-2018-ano-base-2017/view>>. Acesso em: 04 de jul. de 2019.

Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral** / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, 2018.131 p.: il.; 29 cm. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2016/view>>. Acesso em: 04 de jul. de 2019.

Confederação Nacional da Indústria. CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Construção Verde: Desenvolvimento com Sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002175850295139e.pdf>. Acesso em: 10 de jul. de 2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Eleições 2018: Políticas Públicas para Indústria Mineral**, Brasília, 2018. 105 p. Disponível em: <<http://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/11/Elei%C3%A7%C3%B5es-2018-Pol%C3%ADticas-P%C3%BAblicas-para-a-Ind%C3%BAstria-Mineral-1.pdf>>. Acesso em: 12 de jul. de 2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 12 de jul. de 2019.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias não Energéticas**- Relatório de Pesquisa, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf>. Acesso em: 15 de jul. de 2019.

LUZ, M. P. da. **Aproveitamento de Fíler de Pedreiras da Região Metropolitana de Goiânia em Pavimentos Flexíveis Urbanos: Avaliação Técnica e Sócio-ambiental**. Marta Pereira da Luz, 2008. Tese Doutorado - Universidade Federal de Goiás. Programa de Doutorado em Ciências Ambientais, 2008. Disponível em: <https://ciamb.prpg.ufg.br/up/104/o/TESE_MARTA.pdf>. Acesso em: 17 de jul. de 2019.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos** - Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais - Governo Federal - Brasília, fevereiro de 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 18 de jul. de 2019.

ONU-BR – Nações Unidas. Brasil. **Relatório**. 17 de jun. de 2019. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-chegar-a-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu/>> Acesso em: 17 de jul. de 2019.

ONU-BR – Nações Unidas. Brasil. **Relatório**. 17 de ago. de 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/agencia-da-onu-ressalta-conexao-entre-mudancas-climaticas-e-padroes-de-consumo/>> Acesso em: 11 de jul. de 2019.

SANTANA, J. de A. e FERREIRA, E. de A.M. **A Viabilidade do Uso de Finos de Pedreira em Concretos Usados em Usinas de Pré-fabricados**. Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Materiais e Tecnologias para Construções Sustentáveis. Universidade Federal da Bahia – EPUFBA. Brasil NOCMAT 2006, Salvador, Bahia. 29 de outubro a 01 de novembro de 2006. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=A+Viabilidade+do+Uso+De+Finos+De+pedreira+Em+Concretos+Usados+Em+Usinas+de+Pr%C3%A9-Fabricados.+&btnG=>>. Acesso em: 16 de jul. de 2019.

SILVA, I. S.; LOURENÇONI, D.; PENA M. R. da S. **Caracterização do Resíduo da Britagem de Rochas e sua Possível Utilização**. 14º CONAMA - Congresso Nacional do Meio Ambiente, 26 a 29 de set. de 2017, Poços de Caldas, MG, Brasil. Disponível em: <<http://www.meioambientepocos.com.br/anais2017/396.%20CARACTERIZA%20%C3%87%20%C3%83O%20DO%20RES%20%C3%8DDUO%20DA%20BRITAGEM%20DE%20ROCHAS%20E%20SUA%20POSS%20%C3%8DVEL%20UTILIZA%20%C3%87%20%C3%83O.pdf>>. Acesso em 15 de jul. de 2019.