

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA CIVIL

**GABRIELA SARTI FIGUEIREDO**

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PELO RESÍDUO DE  
BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO (RBMG) NA PRODUÇÃO DE  
CONCRETOS**

DOURADOS – MS

2019

**GABRIELA SARTI FIGUEIREDO**

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PELO RESÍDUO DE  
BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO (RBMG) NA PRODUÇÃO DE  
CONCRETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Universidade Federal da Grande Dourados como parte das exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Filipe Bittencourt Figueiredo.

DOURADOS – MS

2019

## RESUMO

A indústria da construção civil é caracterizada como a principal consumidora dos recursos naturais, no entanto, possui grande potencial quanto ao aproveitamento de resíduos e subprodutos industriais na produção de materiais de construção. Nesse contexto, a presente pesquisa objetiva utilizar o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), gerado pela indústria de rochas ornamentais, como substituto parcial do cimento em concretos. Para tanto, foram testados os teores de 5; 7,5 e 10% de substituição do RBMG em relação ao volume de cimento no traço. Com relação às propriedades mecânicas de resistência à compressão e resistência à tração dos concretos produzidos, os traços com teores de 5 e 7,5%, obtiveram resultados acima do concreto referência. Apenas no ensaio de absorção o concreto com 10% apresentou resultados acima do traço piloto. De forma geral, a pesquisa indica a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento pelo RBMG na produção de concretos.

**Palavras-chave:** Resíduo. Mármore e granito. Concreto. Resistência mecânica.

## ABSTRACT

The construction industry is characterized as the main consumer of natural resources, however, has great potential for the use of waste and industrial by-products in the production of construction materials. In this context, the present research aims to use the marble and granite beneficiation residue (RBMG), generated by the ornamental stone industry, as a partial cement substitute in concrete. For this, the RBMG 5, 7.5 and 10% substitution contents were tested in relation to the cement volume in the trait. Regarding the mechanical properties of compressive strength and tensile strength of the concrete produced, the traces with contents of 5 and 7.5%, obtained results above the reference concrete. Only in the absorption test the concrete with 10% presented results above the pilot line. Overall, research indicates the technical feasibility of partially replacing cement with RBMG in the production of concrete.

**Keywords:** Residue. Marble and granite. Concrete. Mechanical resistance.

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade desenvolvida pela indústria da construção civil gera grande impacto ao meio ambiente, principalmente no âmbito da utilização de recursos naturais. O setor é responsável pelo consumo de até 75% da matéria-prima existente no planeta, sendo o concreto o principal responsável por este consumo. Sobre este, sabe-se que se trata do segundo material mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água (AGOPYAN, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, a construção civil também assume um papel devastador quando se fala sobre geração de resíduos. Estima-se que para cada ser humano, sejam produzidos 500 quilos de entulho, o que equivale a 3,5 milhões de toneladas por ano (AGOPYAN, 2013).

Sendo assim, a utilização de recursos renováveis, a redução do consumo de recursos não renováveis, a reutilização e reciclagem desses, tornam as intervenções do homem ao meio ambiente menos agressivas (PINTO et al., 2019). Cita-se nesse contexto, a importância da Lei 12305/2010, que prevê a elaboração de planos integrados de gerenciamento dos resíduos e recomenda o desenvolvimento de sistemas de gestão, voltados para a melhoria dos processos produtivos e aproveitamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Assim, todo produtor de resíduos deve preocupar-se com a quantidade e qualidade dos resíduos gerados, desenvolvendo planos de gestão para os mesmos.

Diante disso, espera-se que o desenvolvimento de novos materiais e processos produtivos não esteja somente ligado a aspectos econômicos, mas também a aspectos ambientais e sociais, baseando-se no desenvolvimento sustentável e em modelos cíclicos de produção e consumo, que permitam o reaproveitamento dos resíduos antes do descarte.

Nesse sentido, a indústria da construção tem se mostrado capaz de incorporar resíduos e subprodutos em vários de seus seguimentos, seja com a finalidade de substituir os agregados naturais por reciclados, na utilização de materiais cimentícios alternativos, no uso de subprodutos industriais, ou no encapsulamento dos resíduos (DEGEN, 2017).

Um dos resíduos gerados em grande quantidade no Brasil atualmente, que apresenta características compatíveis com materiais de construção, é o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG). Este é gerado a partir do corte e polimento dos blocos de rochas e apresenta-se inicialmente na forma de lama. Devido à falta de fiscalização, na maioria das vezes o RBMG é descartado diretamente no ecossistema sem nenhum tipo de tratamento prévio (CHINELATO et al., 2015; MELLO, 2018).

Neste contexto, esta pesquisa busca avaliar o comportamento de um concreto com substituição parcial do cimento pelo resíduo do beneficiamento de mármore e granito, frente às suas propriedades mecânicas. Para tanto, realizou-se um estudo experimental utilizando

os teores de 5; 7,5 e 10% de substituição do cimento em volume para o traço com RBMG no concreto.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar propriedades físicas e mecânicas de concretos convencionais produzidos com a incorporação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) como substituto parcial do cimento, em teores de 5; 7,5 e 10% em relação ao volume de cimento no traço.

### 2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Caracterizar o RBMG para análise de suas características químicas e físicas;
- Avaliar a influência dos diferentes percentuais de substituição do cimento pelo RBMG quanto a trabalhabilidade do concreto por intermédio do ensaio de consistência (*Slump Test*);
- Determinar a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral dos concretos confeccionados;
- Analisar a absorção e índice de vazios dos concretos produzidos.

## 3 JUSTIFICATIVA

A indústria brasileira de rochas ornamentais reflete, de maneira peculiar, o desenvolvimento econômico e social do país da última década. De um exportador de granito para a Itália durante as décadas de 1980 e 1990, o Brasil tornou-se o quinto maior exportador mundial de rochas ornamentais (Bacarji et al, 2013). Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2019), o Brasil contabilizou em 2018 aproximadamente 9 milhões de toneladas produzidas.

A elevada produção gera, conseqüentemente, elevadas quantidades de resíduos, já que se estima que ao final do processo de extração e beneficiamento, 30 a 40% do material rochoso extraído seja descartado. Esse volume gera anualmente cerca de 3 milhões de toneladas de resíduo (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014; MELLO, 2018).

Pensando no aproveitamento desse resíduo, vários pesquisadores deram início às pesquisas de utilização do RBMG como um subproduto na construção civil para a fabricação de diversos materiais, como porcelanas, lajotas para piso e vidro (CHINELATO et al., 2015; MOURA, GONÇALVES, LEITE, 2002; BASTOS, 2018).

Em concretos, além do já conhecido efeito fíler do RBMG, têm sido avaliado o seu potencial pozolânico, fator que possibilita sua incorporação no concreto como substituto parcial do cimento (Rana et al., 2016; Bacarji et al., 2013; Ergün, 2011; DEGEN, 2017). O desafio é atingir desempenhos iguais ou superiores aos do concreto convencional, minimizando seu impacto ambiental.

## **4 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1 Rochas ornamentais**

As rochas ornamentais, também chamadas de pedras naturais, rochas lapídeas, rochas dimensionais, rochas de revestimento ou materiais de cantaria, são materiais geológicos naturais que são extraídos na forma de blocos ou placas. Dentre suas aplicações, destaca-se sua utilização para fins de construção, nos revestimentos internos e externos das edificações (MME, 2019).

Geologicamente, as rochas são classificadas como: ígneas, sedimentares ou metamórficas. As rochas ígneas ou magmáticas são geradas a partir da solidificação do magma em diferentes profundidades da terra. As rochas sedimentares são provenientes da deposição de fragmentos de desagregação e erosão de outras rochas. Por fim, as rochas metamórficas são resultado do processo de metamorfismo de rochas já existentes, a partir do aumento da pressão e temperatura no ambiente geológico (CHIODI FILHO; RODRIGUES, 2009).

Comercialmente, as rochas ornamentais são subdivididas em dois grupos: mármore e granitos. O grupo mármore engloba as rochas carbonáticas, enquanto o grupo dos granitos engloba as rochas silicáticas. Existem ainda outros grupos litológicos que são importantes para o setor, como os arenitos, calcários, ardósias e quartzitos (MME, 2019).

Da extração do material rochoso até sua comercialização em produtos finais ou semiacabados, são realizados vários processos que constituem o beneficiamento de rochas ornamentais.

### **4.2 Processo de beneficiamento de rochas ornamentais e geração do RBMG**

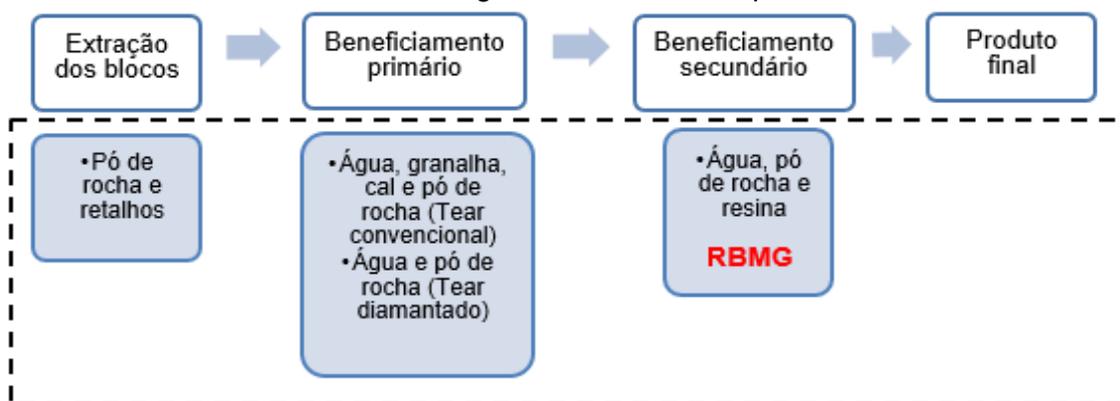
O processo de desdobramento dos blocos de rochas ornamentais acontece em quatro etapas, causando impactos ambientais e gerando resíduos em todas elas. A primeira etapa é chamada de lavra, na qual ocorre a extração da matéria prima. Em seguida ocorre o beneficiamento, que pode ser dividido em primário e secundário, e objetiva transformar os blocos de rocha em chapas prontas ou produtos semiacabados (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

No beneficiamento primário, também chamado de desdobramento, os blocos são serrados nos teares (equipamento usado para o corte dos blocos) e dão origem a chapas de várias espessuras. O desdobramento pode ser realizado por meio de teares convencionais, que utilizam uma solução líquida composta com granelha e cal, ou por meio de teares multifios, com fios diamantados. Este último apresenta maior eficiência quando comparado ao convencional, pois seus fios diamantados aumentam a rapidez do procedimento de corte, além de gerar um resíduo mais limpo, constituído basicamente de pó de rocha e água (ALENCAR, 2013; ABIROCHAS, 2018; CHICON, 2019).

Finalizado o processo de desdobramento dos blocos para obtenção das chapas brutas, inicia-se a fase de acabamento. Nesta etapa, as chapas são submetidas ao polimento, que reduz a rugosidade da superfície e confere brilho ao material (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

A Figura 1 ilustra um resumo do processo de beneficiamento de rochas ornamentais, bem como os resíduos gerados em uma de suas etapas.

**Figura 1** – Esquema representativo das processo de beneficiamento de rochas ornamentais e resíduos gerados em cada etapa



Fonte: Adaptado de Chicon, (2019).

Nesta pesquisa foi utilizado o RBMG, que é obtido a partir do processo de serragem e polimento das chapas de mármore e de granito, para obtenção do produto final nas marmorarias. Para utilização do resíduo na fabricação de materiais de construção, faz-se necessário realizar a sua classificação, principalmente quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente.

#### 4.3 Classificação do RBMG

Os mármorees podem ser classificados como rochas carbonáticas, já os granitos se enquadram como rochas silicáticas. Sendo assim, os principais componentes mineralógicos do RBMG são os minerais presentes nessas rochas: quartzo, feldspato e minerais do grupo das micas (CHIODI FILHO; CHIODI, 2009).

Sobre possíveis efeitos nocivos do uso do resíduo nos materiais de construção, Mello (2018) evidencia que o RBMG não é prejudicial com relação à reatividade potencial de agregados com álcalis de cimento Portland e não promove alteração danosa à estrutura dos materiais desenvolvidos.

Quanto à classificação do material, de acordo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) conforme prescrito pela NBR 10004 (ABNT, 2004), o RBMG é classificado como não perigoso (Classe II), podendo ser não inerte ou inerte (Classe II A ou Classe II B, respectivamente). Essa variação ocorre porque o resíduo possui propriedades químicas bem variadas, já que é composto pelos vários tipos de rocha que passam pelo processo de desdobramento nas marmorarias (Buzzi, 2008; Degen, 2017).

Além disso, resíduos produzidos a partir da utilização de teares convencionais tendem a possuir maior concentração de alumínio, ferro e outros metais, o que contribui para sua classificação como não inerte (Mello, 2018). Entretanto, consolida-se a cada ano a tecnologia do fio diamantado através de teares multifio, fator que diminui consideravelmente a proporção desses metais no RBMG (ABIROCHAS, 2018).

Tais dados demonstram que o RBMG não apresenta possibilidade de causar danos à saúde da população, portanto, pode ser utilizado como um subproduto na construção civil. Dentre suas aplicações, citam-se sua utilização como agregado reciclado em substituição aos agregados naturais ou como adição mineral em substituição parcial ao cimento.

#### **4.4 Adições minerais no concreto**

As adições minerais são materiais silicosos finamente moídos adicionados ao concreto em porcentagens de até 70% em relação à massa de cimento. Estes materiais podem ser pozolanas naturais ou subprodutos industriais, fator que auxilia nos aspectos econômicos e ambientais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o uso de adições minerais pode trazer inúmeros benefícios para o concreto, como aumento da resistência final e da impermeabilidade, maior resistência à fissuração térmica e maior durabilidade em relação à ataque por sulfatos e à expansão pela reação álcali-agregado.

Além disso, as adições influenciam nas propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco, elas interferem na consistência e exsudação do concreto. Já no estado endurecido, têm influência na resistência mecânica, na porosidade, na permeabilidade e na resistência à íons agressivos (GONÇALVES, 2000).

Dentre as adições mais usadas atualmente, citam-se as que possuem atividade pozolânica, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz; as que possuem atividade

cimentante, por exemplo a escória de alto forno; e as que não possuem atividade, que são os fílers. Nesse último grupo se encaixam o material carbonático, o pó de quartzo e o pó de pedra (GONÇALVES, 2000).

Dentro desse contexto, a utilização de resíduos e subprodutos industriais na produção de concretos tem se mostrado uma tendência.

## 5 METODOLOGIA

Após o embasamento técnico e científico realizado nesta pesquisa, foi observada a possibilidade de incorporação do RBMG no concreto, sendo uma alternativa para a produção de novos materiais de construção.

A metodologia utilizada na presente pesquisa consistiu em um estudo experimental, de caráter comparativo, de modo a alterar uma variável (o cimento que foi substituído pelo RBMG), desta forma, delimitou-se o fenômeno, formularam-se hipóteses, determinaram-se os métodos e submeteu-se o fenômeno à experimentação em condições de controle (LAKATOS e MARCONI, 2017).

Para alcançar os objetivos estabelecidos nesta pesquisa, o programa experimental foi dividido em quatro etapas, conforme a Figura 2.

**Figura 2 – Programa Experimental da pesquisa**



Fonte: Autor, (2019).

Os percentuais de substituição do cimento pelo RBMG foram definidas a partir dos resultados do trabalho de Rana et al. (2016), Bacarji et al. (2013) e Ergün (2011), que de uma forma geral, obtiveram em algum desses teores de substituição (5%, 7,5% e 10%),

propriedades mecânicas semelhantes ou superiores às observadas no concreto convencional utilizado como referência.

### 5.1 Materiais

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), que apresenta mais alto comportamento mecânico aos 7 dias de cura. Este cimento foi escolhido devido à sua disponibilidade no mercado local e sua grande utilização na construção civil.

Sobre os agregados, foi utilizada a brita 1 (diâmetro 19mm) como agregado graúdo e areia média natural de rio, como agregado miúdo. Ambos materiais são provenientes de empresas localizadas na cidade de Dourados – MS.

Para as reações de hidratação do concreto, bem como para cura dos corpos de prova, utilizou-se a água proveniente da concessionária de abastecimento local.

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto produzido, foi utilizado o Aditivo Plastificante MAXIMENT PXT 74 na proporção de 730 ml por m<sup>3</sup> de concreto.

O resíduo utilizado nessa pesquisa foi fornecido por uma empresa de beneficiamento de rochas ornamentais, localizada no município de Nova Andradina – MS. O material é resultante do processo de polimento das chapas de rochas, sendo isento de granalha. Essa lama fica armazenada em canaletas durante o beneficiamento, em seguida é disposta em caçambas na área livre da marmoraria, para posterior direcionamento ao aterro sanitário.

O RBMG foi coletado dessas canaletas e transportado em sacos plásticos para o Laboratório de Engenharia de Produção e Produto (LEPP) localizado na Faculdade de Ciência e Tecnologia (FACET) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), onde foi disposto em bandejas e seco durante 24 horas em uma estufa a 100°C. Em seguida o resíduo foi destorroado. A Figura 3a ilustra o resíduo em lama e a Figura 3b ilustra o resíduo seco.

**Figura 3** – Resíduo do beneficiamento de mármore e granito; (a) em lama; (b) seco



Fonte: Autor, (2019).

Após essa etapa, o RBMG foi submetido a diferentes ensaios de caracterização para análise de suas características químicas e físicas.

## 5.2 Caracterização do RBMG

Os ensaios realizados para caracterização do resíduo utilizado seguiram procedimentos de norma. A análise granulométrica do RBMG foi realizada por peneiramento a partir da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Para empregar o RBMG como material pozolânico, este deve atender aos requisitos prescritos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) – Materiais pozolânico – Requisitos, que indica quais exigências devem ser cumpridas para que um material destinado ao uso com cimento Portland seja considerado pozolânico.

De acordo com a referida norma, os materiais pozolânicos são divididos em 3 classes: N, C e E. A classe N compreende as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido e argilas calcinadas. A classe C engloba as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. E por fim a classe E, abrange quaisquer pozolanas não contempladas nas classes anteriores, que obedecem aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014). Sob a perspectiva desta última classe que as análises do RBMG foram realizadas.

A partir dos equipamentos disponíveis no laboratório, optou-se por realizar os ensaios listados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Requisitos químicos para materiais pozolânicos

Propriedade	Classe N de material pozolânico	Método de ensaio
Teor de umidade	≤ 3	NBR NM 24 (ABNT, 2003)
Perda ao fogo	≤ 10	NBR NM 18 (ABNT, 2012)

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tendo sido realizada a caracterização do resíduo, foi iniciada a etapa de produção dos concretos.

## 5.3 Produção dos concretos

Para avaliação do efeito da substituição do RBMG no concreto, foram realizadas 4 misturas, nas quais houve variação nos teores de substituição da massa de cimento pelo RBMG. As proporções das misturas utilizadas encontram-se na Tabela 2.

Para o cálculo da quantidade em massa de resíduo a ser utilizada, foi necessário realizar uma compensação de volumes, uma vez que a massa específica do cimento ( $\rho_{\text{cim}} = 1,16 \text{ g/cm}^3$ ) é diferente da massa específica do resíduo ( $\rho_{\text{RBMG}} = 1,497 \text{ g/cm}^3$ ). Essa compensação é necessária para manter proporção correta da quantidade de volume por

traço, ou seja, para que se mantenha o mesmo volume produzido em todos os traços realizados. Para tanto, utilizou-se a Equação (1) abaixo.

$$M_{RBMG} = M_{cimento} \times \frac{\rho_{RBMG}}{\rho_{cimento}} \quad (1)$$

Em que:  $M_{RBMG}$  é a massa do RBMG, expressa em kg;  $M_{cimento}$  é a massa de cimento, em kg;  $\rho_{RBMG}$  é a massa específica do resíduo, em kg/m<sup>3</sup>; e  $\rho_{cimento}$  é a massa específica do cimento, em kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 2 – Proporções de misturas com RBMG**

Concreto	Relação a/c	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	RBMG (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (ml/m <sup>3</sup> )
Referência	0,6	334	0	780	1054	200	730
5% de substituição		318,4	21,8	780	1054	200	730
7,5% de substituição		309,3	32,4	780	1054	200	730
10% de substituição		300,3	42,8	780	1054	200	730

Fonte: Adaptado de Silva (1975).

Na produção dos concretos foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado para a mistura dos materiais, mantendo-se sempre a mesma sequência de incorporação dos materiais: agregado graúdo, parte da água para umedecer a brita. Em seguida a areia, o cimento e o resíduo eram adicionados. Por fim, colocava-se o restante da água com o aditivo diluído.

A moldagem e cura dos corpos de prova seguiram as prescrições da norma brasileira NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo feito adensamento manual. Após a mistura dos componentes realizou-se o ensaio de abatimento pelo tronco de cone, como determina a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Os corpos de prova foram desformados após 24 horas da moldagem, identificados e acondicionados em tambores contendo solução supersaturada de cal, onde permaneceram até a data de realização dos ensaios.

#### 5.4 Métodos de ensaio

Os ensaios foram realizados tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto e podem ser observados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Ensaios realizados nos concretos produzidos**

Ensaio	Tipo de Corpo de prova	Idade (dias)	Quantidade CP's por ensaio
Ensaio do abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67: 1998)	Concreto fresco	-	-
Ensaio de resistência à compressão (ABNT NBR 5739: 2018)	Cilíndrico 10x20cm	7	3
		28	3
Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222: 2011)	Cilíndrico 10x20cm	28	3
Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT NBR 9778: 2005)	Cilíndrico 10x20cm	21	3

Fonte: Autor, (2019).

Segundo a NBR NM 67, quanto maior a consistência do concreto, menor a sua trabalhabilidade (ABNT, 1998). O ensaio do abatimento é realizado para verificar justamente a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Esta propriedade é fundamental para garantir ao concreto a máxima densidade possível, empregando uma quantidade de trabalho compatível com o processo de adensamento utilizado (BAUER, 2008). A realização do ensaio do abatimento do tronco de cone está ilustrada na Figura 4.

**Figura 4 – Realização do ensaio de abatimento do tronco de cone**

Fonte: Autor, (2019).

Os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, têm como objetivo determinar a capacidade do concreto de suportar esforços. As Figuras 5 e 6 ilustram a realização destes procedimentos.

**Figura 5 – Realização do ensaio de resistência à compressão dos concretos**

Fonte: Autor, (2019).

**Figura 6 – Realização do ensaio de resistência à tração**



Fonte: Autor, (2019).

O ensaio de absorção de água por imersão, teve como propósito encontrar a quantidade de água absorvida pelo corpo de prova, fator que contribui na avaliação das propriedades físicas e durabilidade do concreto.

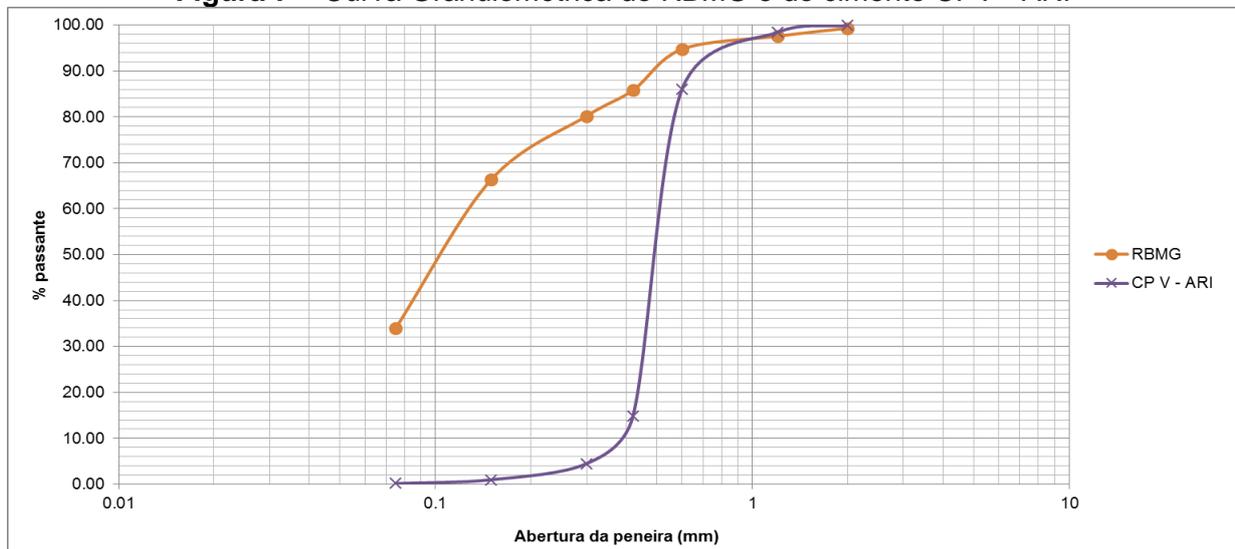
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados da caracterização do RBMG, dos ensaios realizados nos concretos produzidos e será realizada a discussão acerca destes.

### 6.1 Caracterização do RBMG e avaliação da pozolanicidade

Na Figura 7 é observada a distribuição granulométrica do RBMG e do cimento CPV – ARI, e a Tabela 4 apresenta dois diâmetros característicos de cada material.

**Figura 7 – Curva Granulométrica do RBMG e do cimento CPV - ARI**



Fonte: Autor, (2019).

**Tabela 4 – Diâmetros característicos do RBMG e do cimento CPV - ARI**

Material	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)
RBMG	0,11	0,49
Cimento CPV - ARI	0,49	0,65

Fonte: Autor, (2019).

A partir dos dados apresentados é possível verificar que o resíduo apresenta menor diâmetro médio em relação ao cimento. De acordo com Dal Molin (2011), adições minerais que possuem diâmetro médio menor ou igual ao do cimento podem realizar o efeito microfíler, que proporciona maior coesão ao concreto e aumenta sua densidade. Além disso, tal condição pode auxiliar na redução do acúmulo de água retida sob os agregados, no preenchimento dos vazios e na diminuição da exsudação. Tais fatores somados, podem melhorar o desempenho mecânico dos concretos e aumentar sua durabilidade.

Os resultados dos ensaios realizados para verificar se o RBMG atende aos requisitos químicos e físico-mecânicos para ser considerado um material pozolânico, estão apresentados na Tabela 5:

**Tabela 5 – Propriedades do RBMG avaliadas**

Propriedades	RBMG	Limite (ABNT NBR 12653:2014)
Perda ao fogo (PF%)	1.546	≤ 6
Teor de umidade (U%)	0.44	≤ 3

Fonte: Autor, (2019).

Através dos ensaios realizados, pode-se verificar que o RBMG atende aos requisitos químicos prescritos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para um material pozolânico. Entretanto, para caracterizá-lo efetivamente como tal, outros ensaios devem ser efetuados, com o intuito de verificar os demais requisitos químicos além das exigências físicas do material.

## 6.2 Propriedades do concreto no estado fresco

A trabalhabilidade dos concretos foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone. A Tabela 6 apresenta os valores de abatimento dos concretos produzidos.

**Tabela 6 – Abatimentos dos concretos executados**

Concreto	Abatimento (mm)
Referência	110
5% de substituição	115
7,5% de substituição	70
10% de substituição	160

Fonte: Autor, (2019).

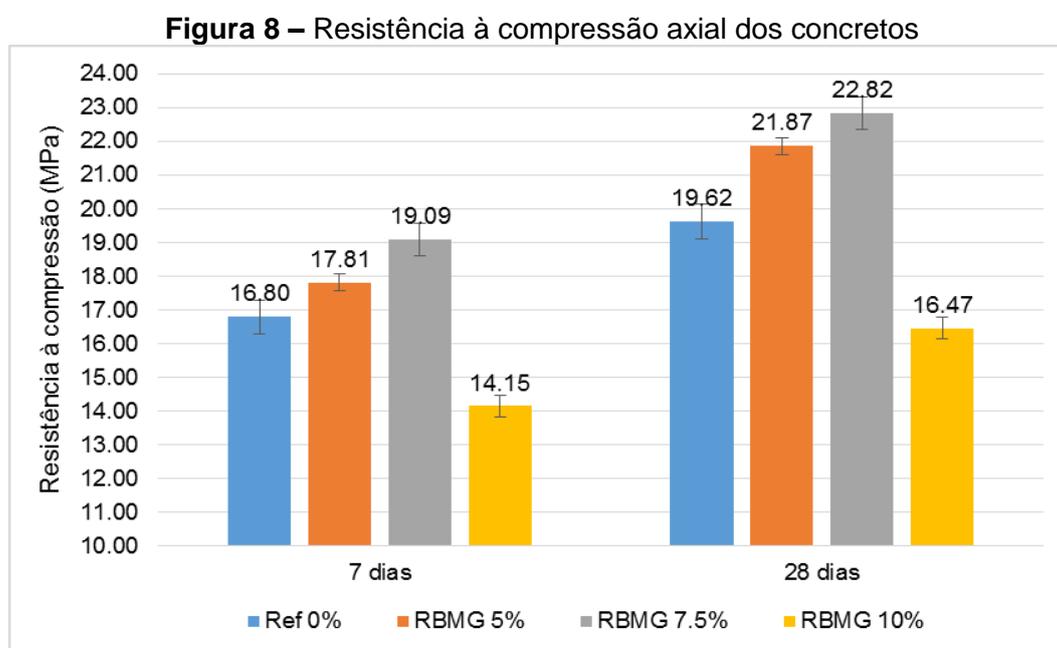
Verifica-se nos concretos produzidos, uma diminuição na consistência com o aumento do teor de RBMG, possivelmente devido à redução do consumo de cimento na

mistura. Segundo Degen, (2017), o efeito de rolamento entre as partículas pode favorecer a redução da consistência do concreto, aumentando sua trabalhabilidade.

O único traço que não segue esta linearidade é o de 7,5% de substituição. As condições às quais a mistura produzida foi exposta, de calor intenso e alta taxa de insolação, podem ter sido fatores que contribuíram na obtenção de tais resultados. Considerando que a quantidade de água foi mantida, independente do teor de substituição (Tabela 2), pode ser que as condições climáticas tenham colaborado na formação de uma mistura mais seca, com menor trabalhabilidade.

### 6.3 Resistência à compressão axial

Com o intuito de avaliar a resistência à compressão do concreto, o ensaio seguiu o procedimento da NBR 5739 (ABNT, 2007) e foi realizado nas idades de 7 e 28 dias. A Figura 8 apresenta os dados obtidos após a realização do ensaio.



Fonte: Autor, (2019).

Percebe-se a partir dos dados que há um aumento significativo da resistência à compressão ao substituir o cimento por RBMG nos traços de 5% e 7,5%. Aos 28 dias de idade, esse ganho de resistência chega a 11,42% para o concreto com 5% de resíduo e a 16,29% para o concreto com 7,5% de RBMG. Já no traço com teor de 10% ocorre uma diminuição de 16,09% na resistência.

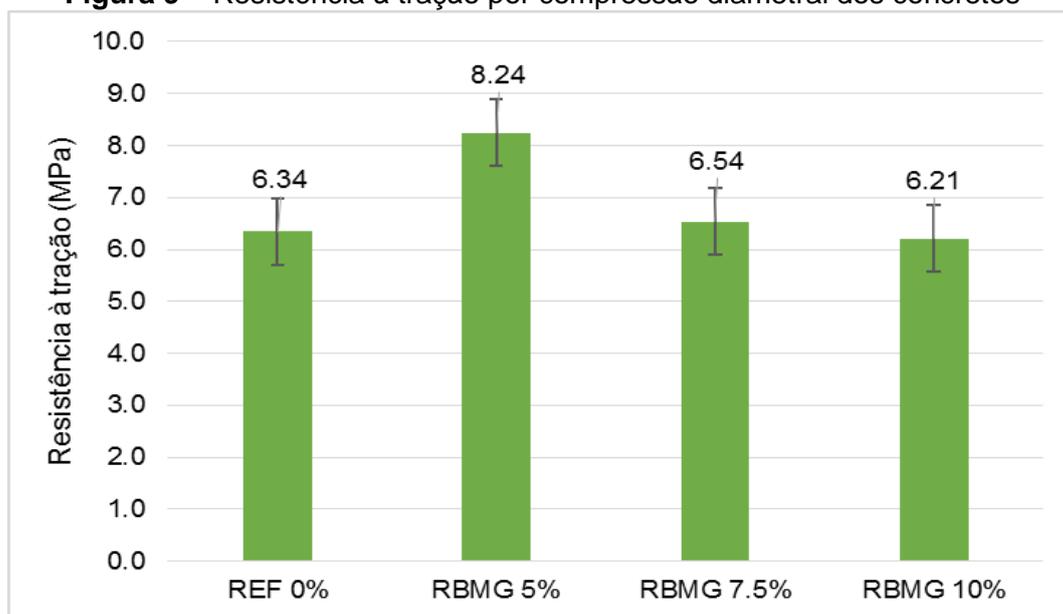
Tais resultados corroboram com os estudos de Ergün (2011), que também apresenta resultados de aumento da resistência à compressão axial no concreto com proporções de 5 e 7,5% de RBMG em substituição ao cimento.

## 6.4 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado nos corpos de prova aos 28 dias de idade. A Figura 9 apresenta os dados obtidos.

Para a resistência à tração, observou-se que o traço com 5% de substituição do resíduo apresentou um ganho significativo de resistência em relação ao traço piloto (30,02%). O traço de 7,5% também apresentou ganho de resistência, embora em menor proporção (3,12%). Já no traço com teor de 10% observou-se uma diminuição de 2,13% da resistência a esse esforço mecânico.

**Figura 9** – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos

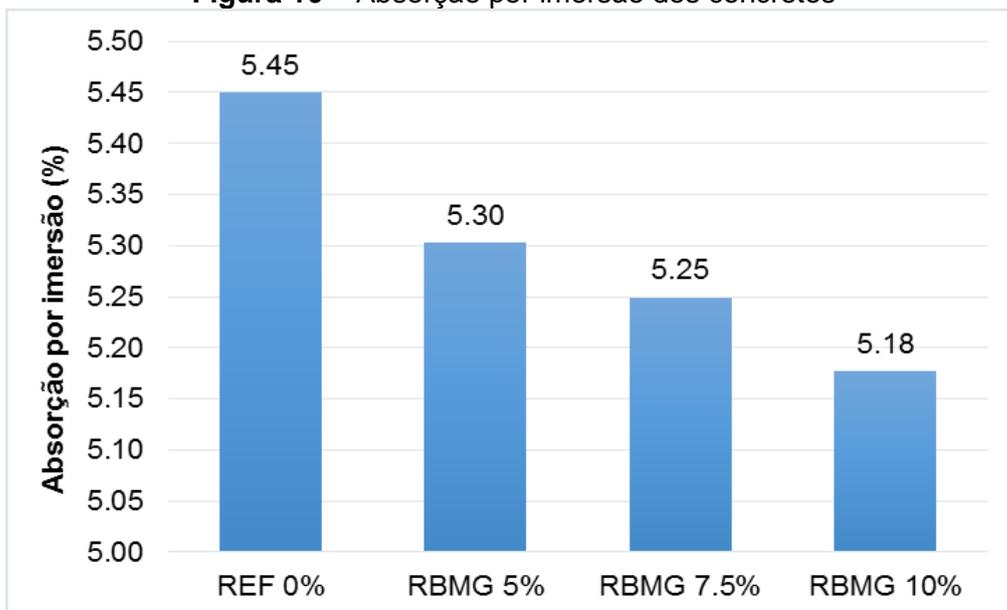


Fonte: Autor, (2019).

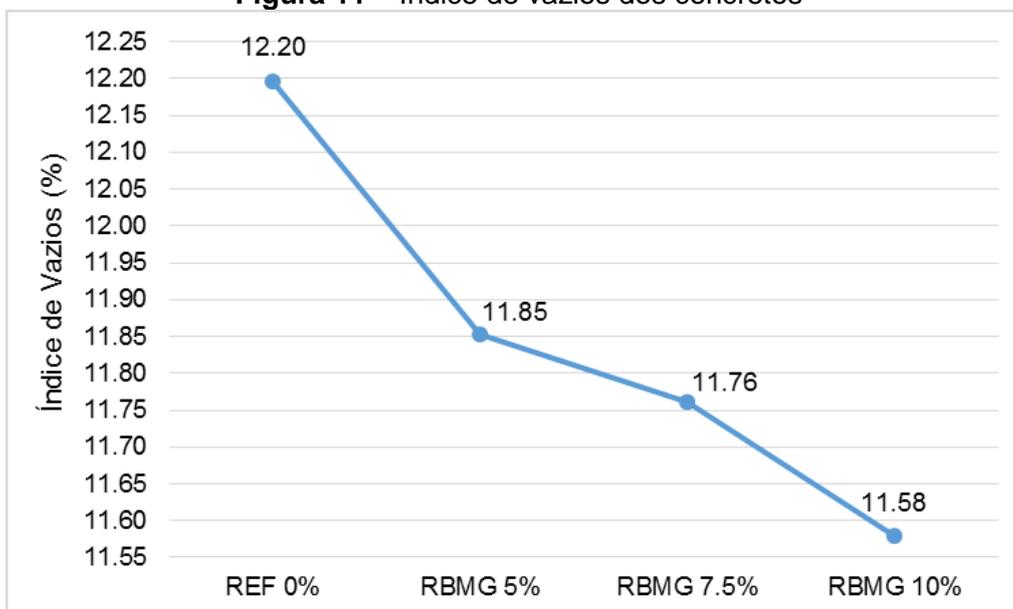
Percebe-se, portanto, que o resultado de resistência à tração no traço de 5% superou de forma expressiva os valores observados no mesmo traço quando a resistência à compressão foi avaliada. Estes dados refutam o descrito por Gonçalves (2000). Segundo o autor, o acréscimo de resistência à tração não é tão expressivo quanto o incremento observado na resistência à compressão dos concretos produzidos com RBMG.

## 6.5 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção por imersão foi realizado conforme o prescrito pela NBR 9778 (ABNT, 2005), aos 21 dias de idade do concreto. As Figuras 10 e 11 mostram os resultados da absorção por imersão e do índice de vazios, respectivamente.

**Figura 10 – Absorção por imersão dos concretos**

Fonte: Autor, (2019).

**Figura 11 – Índice de vazios dos concretos**

Fonte: Autor, (2019).

Observa-se que tanto a absorção quanto o índice de vazios apresentaram resultados positivos sobre a substituição do cimento pelo RBMG, já que se percebe a diminuição destas propriedades à medida que o resíduo é incorporado ao concreto.

No ensaio de absorção por imersão, o traço com 5% de resíduo apresentou diminuição de 2,71% em relação ao traço referência. Esse percentual aumentou para 3,69% quando se considerou o traço com 7,5% de RBMG e para 5,02% quando o traço com 10% de resíduo é considerado. As mesmas proporções são apresentadas pelo índice de vazios, uma vez que este está relacionado com a quantidade de água absorvida pelos poros acessíveis do concreto.

Tais dados obtidos contestam a hipótese de Bacarji et al. (2013), que afirma que a absorção de água aumenta com a substituição do cimento pelo RBMG.

## 7 CONCLUSÃO

A utilização de resíduos e subprodutos vem se mostrando uma alternativa promissora para auxiliar na redução do impacto ambiental causado pela geração de resíduos. A construção civil, como um dos setores que mais impacta o meio ambiente, principalmente pela utilização em larga escala dos recursos naturais, vem se apresentando como o setor com melhores condições de utilização de resíduos sólidos.

A partir do estudo de caracterização do RBMG, o resíduo utilizado nesta pesquisa apresentou características químicas compatíveis com os materiais pozolânicos, fator que justifica sua incorporação no concreto como substituto parcial do cimento.

Quanto a resistência à compressão axial dos concretos produzidos, apenas o traço com proporção de 10% não apresentou desempenho superior ao do concreto referência. Os traços com 5% apresentaram um ganho médio de 11,42%, e os concretos com 7,5% de RBMG demonstraram um ganho de 16,29% na resistência.

Sobre a resistência à tração por compressão diametral, o concreto com 5% de resíduo apresentou ganho de 30,02% na resistência. Na proporção de 7,5% houve um acréscimo de 3,12%. Já o traço com 10% obteve um decréscimo na ordem de 2,13%.

Apenas no ensaio de absorção por imersão o concreto com 10% de RBMG apresentou resultados acima do concreto referência, houve diminuição de 5,02% na absorção do concreto, fator que, aliado à outras propriedades, melhora a durabilidade do material. Os traços de 5 e 7,5% apresentaram redução de 2,71 e 3,68%, respectivamente.

Portanto, de acordo com os resultados obtidos através dos concretos produzidos no presente estudo, conclui-se que o RBMG pode ser utilizado como substituto parcial do cimento nas proporções de 5 e 7,5%, uma vez que proporcionou aumento significativo nas propriedades mecânicas e físicas dos concretos produzidos nestes percentuais.

Para realização de trabalhos futuros sugere-se realizar ensaios de análises químicas e mineralógicas do RBMG, de modo a entender melhor a interação do resíduo com a matriz do concreto na micropartícula. Também podem ser realizadas pesquisas que estabeleçam a relação custo/benefício da utilização do resíduo na produção dos concretos, atestando a viabilidade econômica da substituição.

## REFERÊNCIAS

AGOPYAN, Vahan. **Construção Civil consome até 75% da matéria-prima do planeta**. 2013. Disponível em: <<http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

ALENCAR, Carlos Rubens Araujo. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. 1. Ed. Cachoeiro de Itapemirim: Instituto Euvaldo Lodi - IEL, 2013. 242 p. Disponível em: <<http://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2018**. Brasília – DF. Disponível em: <[http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe\\_01\\_2019\\_Balanco\\_2018.pdf](http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe_01_2019_Balanco_2018.pdf)> Acesso em 24 jun. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 5751: Materiais pozolânicos: Determinação da atividade pozolânica com a cal aos 7 dias**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222 – Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653 – Materiais pozolânico – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; FIGUEIREDO, E. P.; LOPES, J. L. M. P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1–10, 2013.

BASTOS, Isadora Andrade. **Utilização exclusiva de resíduos de rochas ornamentais para fabricação de vidros comuns**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 18 out. 2019.

BUZZI, Daniella Cardoso. **Estudo de classificação e quantificação das lamas geradas no processo de beneficiamento de rochas ornamentais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

CHICON, Marcello Ciciliote. **Resíduos finos da indústria de rochas ornamentais: os materiais depositados e os segregados**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2019.

CHINELATTO, A. S. A.; CHINELATTO, A. L.; FERREIRA, D. E. M.; GRALIK, G. **Estudo da viabilidade do uso de resíduo de polimento de rochas ornamentais em porcelanas**. Revista Matéria, v. 20, n. 4, p. 1075-1086, 2015.

CHIODI FILHO, Cid.; CHIODI, Denize Kistemann. **Relatório Técnico 33 - Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento**. Ministério de Minas e Energia - MME, 2009.

CHIODI FILHO, Cid; RODRIGUES, Eleno de Paula. **Guia de Aplicação de Rochas em Revestimentos**. São Paulo: ABIROCHAS, 2009.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Adições Minerais**. In: CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v.1, 2011. 1946 p.

DEGEN, Maxwell Klein. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Construção civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

ERGÜN, Ali. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 806–812, 2011.

GONÇALVES, Jardel Pereira. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

LAKATOS, E. M. MARCONI, M. A. **Metodologia do trabalho científico: projetos de pesquisa / pesquisa bibliográfica/ teses de doutorado, dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de curso**. 8. Ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELLO, Robson Zulcão. **Avaliação do ciclo de vida da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em materiais de construção civil à base de cimento**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Construção Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. Brasília – DF. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>

web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes>. Acesso em 09 set. 2019.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus - Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana**, n.26, p. 49-61, 2002.

PINTO, Rodrigo Barcelos et al. Resíduos da Construção Civil: matéria prima verde a ser investigada/Civil Construction Waste: green raw material to be investigated. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 2, p. 1339-1351. 2019. Disponível em: <<http://www.brjd.com.br/index.php/BRJD/article/view/1108/958>>. Acesso em 22 set. 2019.

RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H. K.; MOHNOT, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 312–331, 2016.

SILVA, Gildasio Rodrigues da. **Manual de traços de concreto**. 3. Ed. São Paulo: Nobel, 1975.

TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. **Construção sustentável. O caso dos materiais de construção**. Congresso Construção. Coimbra, 2007. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/7542/1/Artigo%204.pdf>>. Acesso em 24 jun. 2019.

VIDAL, F. V.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: Pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.