



## **ANÁLISE ESTRUTURAL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE PLACAS DE MÁRMORE E GRANITO**

**Sandy Rebelo Bandeira**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Edílson Marques Magalhães

Belém

Maio de 2019

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS  
DE BENEFICIAMENTO DE PLACAS DE MÁRMORE E GRANITO**

Sandy Rebelo Bandeira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Edilson Marques Magalhães, D.Eng.  
(PPGEP/ITEC/UFPA - Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Edinaldo José de Sousa Cunha, D.Eng.  
(PPGEP/ITEC/UFPA - Membro)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. David Barbosa de Alencar, Dr.  
(FAMETRO - Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

MAIO DE 2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
de acordo com ISBD Biblioteca do Instituto de Tecnologia/UFPA - Belém-  
PA**

---

B214a Bandeira, Sandy Rebelo, 1985-

Análise estrutural de concretos produzidos com resíduos de beneficiamento de placas de mármore e granito / Sandy Rebelo Bandeira - 2019.

Orientador: Edilson Marques Magalhães

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Belém, 2019.

1. Concreto 2. Análise estrutural (Engenharia) 3. Resíduos como material de construção 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc) I. Título.

CDD 23.ed.620.136

---

*Dedico este trabalho a minha família.*

*Em especial, à minha amada Alice.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me permitir caminhar nesta jornada e por me fortalecer nos momentos em que pensei em desistir.

Ao meu orientador, pelo acompanhamento durante as pesquisas experimentais e pela assistência na elaboração desta dissertação.

Aos professores e colegas do PPGEF e funcionários do ITEGAM, pela oportunidade única.

À minha avó paterna e ao professor Sanches, pelo "empurrão inicial" para percorrer este caminho.

À minha esposa, por ter me apoiado e compreendido minhas longas ausências em função da pesquisa. e à minha filha, Alice Bandeira, que em muitos momentos teve que sentir minha ausência.

À minha família, que sempre acreditou em mim.

Aos meus colegas de trabalho, que me deram dicas e, de alguma forma, colaboram para a elaboração desta dissertação.

Aos professores e alunos da Universidade do Estado do Amazonas, pelo apoio e compreensão nos períodos de ausência.

À universidade Nilton Lins, por fornecer acesso ao laboratório de engenharia civil.

À professora Cláudia Cândido Silva, pela orientação na análise química da amostra resultante do corte de placas de mármore e granitos.

Ao amigo Araújo Lima, conhecido também por “Metemarcha”, pelo trabalho de trituração dos resíduos.

Ao Sr. Paulo Ioppi e Sra. Anne Ioppi pela cessão das dependências da empresa CONCRESONDA.

Aos colegas Marcos Paulo, Dalton, Jéssica, Pedro, Márcio e Janderson pelo apoio laboratorial.

À todas as empresas que se dispuseram a colaborar para o andamento da pesquisa e que também forneceram material para estudo.

A todos que direta ou indiretamente ajudaram na elaboração desta dissertação, deixo os meus sinceros agradecimentos.

*“Tenha fé em Deus,  
tenha fé na vida.  
Tente outra vez!”*

(Raul Seixas)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

## **ANÁLISE ESTRUTURAL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE PLACAS DE MÁRMORE E GRANITO**

**Sandy Rebelo Bandeira**

Maio/2019

Orientador: Edilson Marques Magalhães

Área de Concentração: Engenharia de Processos

O presente trabalho mostra a viabilidade da utilização de resíduos de corte de placas de mármore e granito na produção de concreto. A pesquisa foi realizada em cinco etapas, que compreenderam desde a coleta de resíduos nas empresas beneficiadoras, passando por processo de trituração, peneiramento de resíduos e produção e rompimento de corpos-de-prova. A análise química realizada por fluorescência de raio-x mostra que o material atende aos requisitos da NBR 12653:2015 no que se refere à concentração de óxidos de alumínio, silício e ferro, qualificando-o como material pozolânico. Os resultados de compressão axial mostraram que as misturas produzidas com a substituição de agregados atendem aos requisitos mínimos de NBR 6118:2014 para aplicação em elementos estruturais submetidos à agressividade ambiental moderada, classe II. Os traços foram dosados seguindo instruções do método de dosagem IPT/USP. Foram produzidas 195 amostras, que foram rompidas com 3, 7 e 28 dias. Esperava-se com os concretos atingissem, no mínimo, 30 MPa aos 28 dias. Os traços produzidos com a substituição dos agregados apresentaram valores menores que o traço de referência. No que se refere à absorção, observou-se que os traços com substituição de agregados apresentaram ligeiro aumento no consumo de água, o que pode explicar a redução nos índices de resistência à compressão.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

**STRUCTURAL ANALYSIS OF CONCRETES PRODUCED WITH RESIDUES  
FROM BENEFICIARIES OF MARBLE AND GRANITE PLATES**

**Sandy Rebelo Bandeira**

May/2019

Advisor: Edilson Marques Magalhães

Research Area: Process Engineering

The present work shows the feasibility of the use of cutting residues of marble and granite slabs in concrete production. The research was carried out in a series of stages, which comprised the collection of waste in the beneficiary companies, through the process of crushing, sieving of waste and production and breaking of specimens. The chemical analysis performed by x-ray fluorescence shows that the material meets the requirements of NBR 12653: 2015 for the concentration of aluminum, silicon and iron oxides, qualifying it as pozzolanic material. The results of axial compression showed that the mixtures produced with the substitution of aggregates meet the minimum requirements of NBR 6118: 2014 for application in structural elements subjected to moderate environmental aggression, class II. The traces were dosed following the instructions of the IPT / USP dosing method. 195 samples were produced, which were ruptured at 3, 7 and 28 days. Concrete was expected to reach at least 30 MPa at 28 days. The traces produced with the substitution of the aggregates presented smaller values than the reference trait. Regarding the absorption, it was observed that the traces with substitution of aggregates presented a slight increase in water consumption, which may explain the reduction in the indices of compressive strength.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	3
<b>1.2.1 - Objetivo geral.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2 - Objetivos específicos.....</b>	<b>3</b>
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1 - HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	5
2.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS.....	7
<b>2.2.1 - Processo de extração e beneficiamento de rochas.....</b>	<b>8</b>
2.3 - GERAÇÃO DE RESÍDUOS.....	9
<b>2.3.1 - Desdobramento.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.2 - Polimento.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.3 - Corte das placas.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.4 - Sobras de chapas.....</b>	<b>10</b>
2.4 - CONCRETO.....	11
<b>2.4.1 - Definição.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4.2 - Cimento portland.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.3 - Agregados.....</b>	<b>14</b>
2.5 - PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	14
<b>2.5.1 - Resistência à compressão.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.2 - Resistência à tração.....</b>	<b>15</b>
2.6 - REQUISITOS MÍNIMOS PARA ACEITAÇÃO DE CONCRETOS DE ACORDO COM A ABNT NBR 6118:2014.....	16
2.7 - REQUISITOS DE POZOLANICIDADE DE ACORDO COM A ABNT NBR 12653:2015.....	17
2.8 - ESTUDOS COM A APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO.....	18
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	22

3.2 - MATERIAIS.....	23
3.3 - MÉTODOS.....	24
3.3.1 - Coleta de resíduos de corte de mármore e granito.....	24
3.3.2 - Britagem dos resíduos de corte de mármore e granito.....	25
3.3.3 - Análise química por fluorescência de raios-x.....	27
3.3.4 - Dosagem do concreto.....	28
3.3.5 - Trabalhabilidade do concreto no estado fresco.....	29
3.3.6 - Produção dos corpos-de-prova.....	30
3.3.7 - Cura dos corpos-de-prova.....	31
3.3.8- Rompimento dos corpos-de-prova.....	32
3.3.9 - Preparação das amostras para realização de absorção por imersão....	33
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
4.1 - LOCALIZAÇÃO DAS FONTES GERADORAS DE RESÍDUOS.....	34
4.2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS RESÍDUOS.....	35
4.3 - ANÁLISE POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	36
4.4 - PROPIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	36
<b>4.4.1 - Trabalhabilidade.....</b>	<b>36</b>
4.5 - PROPIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	37
<b>4.5.1 - Resistência à tração por compressão axial.....</b>	<b>37</b>
<b>4.5.2 - Absorção por imersão.....</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>45</b>
5.1 - CONCLUSÕES.....	45
5.2 - SUGESTÕES.....	46
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>47</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Templo de Luxor .....	5
Figura 2.2	Basílica de São Pedro .....	7
Figura 2.3	Placas com dimensões padrão .....	8
Figura 2.4	Chapas com bordas irregulares .....	11
Figura 2.5	Materiais constituintes do concreto simples .....	12
Figura 2.6	Gráfico da resistência à compressão na primeira situação (utilização de resíduos pétreos britados com adição de areia rosa e areia média comum).....	19
Figura 2.7	Gráfico da resistência à compressão na segunda situação (utilização de resíduos pétreos graúdos britados e retidos na peneira 4,8 mm com adição de areia média comum de leito de rio) .....	19
Figura 2.8	Gráfico da resistência à compressão de todos os traços.....	20
Figura 3.1	Fluxograma que demonstra as etapas da metodologia experimental .....	23
Figura 3.2	Resíduos de corte de placas de mármore e granito .....	24
Figura 3.3	Triturador de resíduos .....	25
Figura 3.4	Resíduos do corte de placas de mármore e granito triturados .....	26
Figura 3.5	Série de peneiras .....	26
Figura 3.6	Retenção de agregados .....	27
Figura 3.7	Agregados separados conforme a granulometria .....	27
Figura 3.8	Preparação de amostra para análises de FRX: (a) Peneiramento de amostras; (b) Material passante na peneira #200; (c) Amostra submetida à secagem em estufa .....	27
Figura 3.9	Ensaio do abatimento de uma amostra .....	30
Figura 3.10	Moldagem dos corpos-de-prova: (a) Corpos-de-prova enformados; (b) Corpos-de-prova em cura inicial de 24 horas....	31
Figura 3.11	Corpos-de-prova imersos .....	31
Figura 3.12	Apresentação de um corpo-de-prova após o rompimento .....	32
Figura 3.13	Amostras em estufas para secagem .....	33

Figura 4.1	Localização das empresas visitadas na cidade de Manaus .....	34
Figura 4.2	Curva granulométrica dos agregados triturados .....	35
Figura 4.3	Comparação da dimensão dos agregados. (a) Areia); (b) Brita 1; (c) Brita 0 .....	35
Figura 4.4	Composição química do RCMG obtido através de FRX .....	36
Figura 4.5	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos, com rompimento aos 3 dias .....	38
Figura 4.6	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados graúdos, com rompimento aos 3 dias .....	38
Figura 4.7	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos e graúdos, com rompimento aos 3 dias .....	38
Figura 4.8	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos, com rompimento aos 7 dias .....	39
Figura 4.9	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados graúdos, com rompimento aos 7 dias .....	39
Figura 4.10	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos e graúdos, com rompimento aos 7 dias .....	40
Figura 4.11	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos, com rompimento aos 28 dias .....	41
Figura 4.12	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados graúdos, com rompimento aos 28 dias .....	41
Figura 4.13	Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos e graúdos, com rompimento aos 28 dias .....	41

Figura 4.14	Índices de absorção de concretos produzidos com a substituição de agregados miúdos em comparação ao traço de referência .....	43
Figura 4.15	Índices de absorção de concretos produzidos com a substituição de agregados graúdos em comparação ao traço de referência.....	43
Figura 4.16	Índices de absorção de concretos produzidos com a substituição de agregados miúdos e graúdos em comparação ao traço de referência .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição de cimentos portland comuns e compostos.....	13
Tabela 2.2	Composição de cimentos portland de alto-forno, pozolânicos e de alta resistência inicial.....	13
Tabela 2.3	Classes de agressividade ambiental (CAA).....	16
Tabela 2.4	Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	17
Tabela 2.5	Requisitos químicos.....	18
Tabela 3.1	Empresas visitadas e suas coordenadas geográficas.....	25
Tabela 3.2	Consumo de materiais para 1m <sup>3</sup> de concreto.....	28
Tabela 3.3	Traços com a substituição de agregados.....	29
Tabela 3.4	Tolerância em horas permitida para rompimentos de corpos-de-prova.....	32
Tabela 4.1	Abatimento em mm das misturas produzidas.....	37

## NOMENCLATURA

A/C	RELAÇÃO ÁGUA CIMENTO
ABIROCHAS	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
CONAMA	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
FRX	FLUORESCÊNCIA POR RAIOS-X
NBR	NORMA BRASILEIRA
NM	NORMA MERCOSUL
RCG	RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO
RCGM	RESÍDUO DO CORTE DE GRANITO E MÁRMORE
RMG	RESÍDUO DE MÁRMORE E GRANITO

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - MOTIVAÇÃO

A produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento teve crescimento considerável desde a década de 20 até os dias atuais. Dados econômicos apontam que a produção saiu de 1,5 para 105 milhões de toneladas por ano (MELLO *et al.*, 2011). Em 2009, a produção mundial atingiu cerca de 104,5 milhões de toneladas por ano, destacando-se a China como grande produtora, atingindo a produção de 31 milhões de toneladas por ano. O Brasil, segundo MELLO *et al.* (2011), produziu cerca de 8 milhões de toneladas por ano, fato que o colocou em posição de destaque no cenário de produção de rochas internacional, pois o país contribui com a exportação de rochas com características estéticas e tecnológicas extremamente competitivas em nível mundial (SARDOU FILHO, 2013).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS), o mercado de rochas ornamentais e de revestimento movimenta cerca de US\$ 12 bilhões/ano com a comercialização de materiais brutos e beneficiados.

Sob a ótica de que grande parte dos resíduos, de modo geral, é descartada de maneira inadequada, o crescimento da indústria de mármore e granito, apesar de representar fortalecimento da economia, resulta também em grave problema urbano.

OLIVEIRA *et al.* (2011) estima que grande parte dos resíduos de corte de mármore e granitos seja descartada diretamente no meio ambiente, causando impactos ambientais que vão desde o assoreamento de rios e córregos até a obstrução de vias e esgotamento de aterros sanitários.

RODRIGUES (2015) afirma que os resíduos de corte de mármore e granito apresentam formatos que vão desde o pó até pequenos fragmentos com até 25 cm de diâmetro, sendo que grande parte deste resíduo, em especial o pó, é descartado no meio ambiente através de lixiviação.

Pelo lado econômico, os impactos estão relacionados com o descarte de resíduos de corte de mármore e granito, visto que a destinação destes resíduos aos aterros sanitários gera gastos com transporte e descarte. Por outro lado, deixa de gerar ganhos econômicos, uma vez que a transformação de resíduos em agregados pode ser uma alternativa à extração de



agregados naturais convencionais, minimizando custos com aquisição de agregados (KARPINSKI *et al.*, 2009).

A produção de placas de mármore e granito, basicamente é feita através da serragem de blocos de pedra. Nesta etapa, cerca de 5% do bloco é perdido, gerando resíduos em forma de pó, que posteriormente ao se misturar com água, é transformado em lama. Na etapa de esquadreamento das placas, 20% dos blocos resulta em resíduos, gerando amontoados que acabam sendo descartados em aterros sanitários ou até em locais clandestinos. Segundo RODRIGUES (2015), o estado do Amazonas gerou no ano de 2015, aproximadamente 5000 m<sup>3</sup> de resíduos de corte de placas de mármore e granitos, sendo diretamente descartados em terrenos ao redor de marmorarias ou sendo destinados aos aterros sanitários. Em outros casos, parte dos resíduos é descartada de maneira irregular em leitos de igarapés e finais de vias públicas.

A indústria da construção civil ocupa lugar de destaque na economia, visto que é grande geradora de renda, seja na comercialização de imóveis ou pela geração de empregos. Por outro lado, destaca-se negativamente como grande consumidora de recursos naturais, utilizando cerca de 50% dos recursos consumidos (KARPINSKI *et al.*, 2009). MELLO *et al.* (2011) afirma que os resíduos de corte de placas de mármore e granitos estão diretamente ligados à construção civil, uma vez que seu maior campo de aplicação está na utilização de placas para revestimentos de paredes internas e externas, pisos e soleiras, além da aplicação em balcões e peças isoladas, tais como tampos de mesas e pias.

A legislação brasileira que versa acerca do tratamento adequado dos resíduos de construção civil, estando incluso neste grupo os resíduos de corte de placas de mármore e granitos, é a resolução 307, de 17 de julho de 2002, alterada pelas resoluções 348/2004, 431/2011, 448/2012 e 469/2015, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que classifica e determina o tratamento adequado para cada tipo de resíduo. De acordo com a referida resolução, em seu artigo 1º, ficam estabelecidos “diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais” (CONAMA 307, 2002).

Considerando a dificuldade na extração e aquisição de agregados convencionais utilizados na produção de concreto, bem como o alto custo dos insumos, considerando também a necessidade de tratamento adequado dos resíduos perante a legislação ambiental, abre-se a oportunidade de estudar a transformação de resíduos de mármore e granito em agregados que substituem os agregados convencionais, resultando em diminuição da extração

de outros agregados e proporcionando o melhor aproveitamento de recursos naturais, minimizando possíveis impactos causados no âmbito financeiro e ambiental.

Assim, nesta dissertação pretende-se mostrar que a utilização de agregados resultantes da trituração de resíduos de corte de placas de mármore e granitos é uma alternativa viável seja no âmbito estrutural, ambiental e econômico.

## 1.2 - OBJETIVOS

### 1.2.1 - Objetivo geral

Produzir corpos-de-prova com a substituição de resíduos de mármore e granitos em proporções de 25%, 50% 75% e 100% de agregados graúdos, miúdos e graúdos e miúdos visando comparar com corpos-de-prova produzidos com agregados convencionais.

### 1.2.2 - Objetivos específicos

- Realizar caracterização química dos resíduos por meio de fluorescência de raio x de modo a mensurar a quantidade de concentração de óxidos de alumínio, silício e ferro;
- Produzir corpos-de-prova de concretos convencionais e corpos-de-prova de concretos com a substituição dos agregados miúdos, graúdos e miúdos e graúdos, visando a realização de ensaios de compressão axial para determinação e comparação de parâmetros de resistência dos corpos-de-prova produzidos;
- Realizar ensaios de absorção por imersão, a fim de verificar se os concretos produzidos com resíduos triturados mantêm parâmetros de absorção do concreto convencional.

## 1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Dentre as principais contribuições apresentadas pela dissertação “Análise Estrutural de Concretos Produzidos com Resíduos de Beneficiamento de Placas de Mármore e Granito”, pode-se enumerar:

- A possibilidade de quantificação dos resíduos de corte de placas de mármore e granitos gerados na cidade de Manaus, bem como a investigação do destino aplicado aos resíduos;
- A aplicação dos resíduos da atividade de corte de mármore e granito na produção de concreto, contribui para a minimização do descarte destes e na redução da utilização de seixo retirado dos leitos dos rios;
- A localização de zonas com maior índice de geração de resíduos de corte de placas de mármore e granitos de modo a facilitar a coleta de resíduos, objetivando a destinação correta;
- A aplicação de artefatos de concretos produzidos com resíduos de corte de placas de mármore e granitos em obras de interesse público, tais como pavimentações, calçadas e elementos de drenagem.

#### 1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação é dividida em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta a motivação, os objetivos, as contribuições da dissertação e a forma de organização do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre a classificação de rochas, onde se aborda desde a classificação até o processo de extração de rochas do meio ambiente e o processo de beneficiamento das rochas. Ainda no referido capítulo, será apresentado também informações acerca da produção de concretos, destacando parâmetros de controle e resistência, além de informações sobre os agregados constituintes do concreto.

No capítulo 3 são apresentados os meios para a elaboração da dissertação, além da descrição dos métodos de trabalhos realizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados. Neste capítulo, os parâmetros de resistência e absorção de concreto produzido com agregados resultantes da trituração de resíduos de mármore e granitos são comparados com parâmetros de concretos produzidos com agregados convencionais. Ainda neste capítulo, será apresentado mapa georreferenciado, apresentando a localização dos geradores de resíduos identificados e destacando áreas de maior concentração.

Por fim, o capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho, com sugestão para elaboração de trabalhos futuros, decorrentes deste estudo.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 - HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Para MOREIRAS (2005), rocha ornamental é todo material em que as características e a resistência mecânica satisfaçam a exigência de cada tipo de aplicação.

O uso de rochas ornamentais iniciou quando o homem ainda se abrigava em cavernas (MORAES, 2006). Sua aplicação se dava na confecção de utensílios domésticos e artefatos para caça, guerra e como objetos sacros (ALENCAR, 2013). No entanto, a aplicação de rochas ornamentais como elemento estético data do terceiro milênio antes de Cristo, na região da Mesopotâmia e no Egito. Utilizava-se dois tipos de rochas para esculpir imagens de faraós e outros deuses. Estas rochas eram calcárias, de grãos finos, e rochas lustráveis como granito vermelho e quartzitos preto ou rosa e eram bastante utilizadas devido à sua condição de textura muito aproximada à coloração da pele humana (ALENCAR, 2013).

Em seus estudos, PEREIRA (2009) afirma que a utilização de rochas no Egito se aplicava na construção de templos e túmulos, destacando-se o templo de Luxor, conforme apresentado na Figura 2.1, construído por volta de 1260 a.C.



Figura 2.1 – Templo de Luxor.  
Fonte: Adaptado de PEREIRA (2009).

De acordo com ALENCAR (2013) foram gregos e romanos que difundiram a aplicação de rochas ornamentais. Os gregos aplicavam a utilização de rochas ornamentais na produção artística e arquitetônica, apresentando o resultado ao público, enquanto que os romanos aplicavam rochas ornamentais em construções privadas, enfatizando o status de riqueza e poder dos proprietários.

ALENCAR (2013) afirma que o uso de rochas foi bastante restrito, pois as técnicas de extração eram rudimentares e as minas eram propriedades exclusivas. No Egito, as minas pertenciam aos faraós, Na Grécia e em Roma, às cidades-estados e no império bizantino, eram de propriedades do imperador.

Por volta do século V a.C., os gregos utilizaram cerca de 22.000 toneladas de mármore para a construção do templo Parthenon, dedicado à deusa Atena, e edifícios, como por exemplo o Teatro de Epidauro, por volta de 350 a.C., além de estradas, viadutos e portos (PEREIRA, 2009).

Em 220 a.C. iniciou-se a construção da grande muralha da China, aproveitando construções de reinos anteriores. Construída com grandes blocos de rochas, encontram-se vestígios de blocos de calcário e granito em sua estrutura (PEREIRA, 2009).

A aplicação de rochas ocorreu ainda na Índia, por volta de 150 a.C., com a construção do templo de Mahabodhi, em Bodhgaya. De acordo com PEREIRA (2009), o templo é rodeado de rochas nos quatro lados, tendo um dos lados rodeado de granito.

A partir do século XV, ocorreu grande utilização de rochas ornamentais na construção de castelos, igrejas e mosteiros.

Nos séculos XVI e XVII, diversos países europeus recebem solicitações para concessão de lavras de mármore (ALENCAR, 2013). Surgem então, diversas construções com aplicação de rochas ornamentais. Em Roma, destaca-se a Basílica de São Pedro, apresentada na Figura 2.2, tendo seu revestimento feito com mármore branco.

No século XIX, o consumo de mármore aumentou significativamente, principalmente na região mediterrânea e América do Norte. No entanto, não havia utilização qualitativa do material (ALENCAR, 2013), pois o emprego do mármore estava relacionado com sua aplicação na construção de habitações para a classe média (PEREIRA, 2009).



Figura 2.2 – Basílica de São Pedro.  
Fonte: ALENCAR (2013).

No final do século XIX e início do século XX, é introduzido a mecanização na extração e beneficiamento de rochas. Tal medida proporciona maior uso de rochas ornamentais, principalmente como elementos estruturais (ALENCAR, 2013).

PEREIRA (2009) afirma que a procura por mármore Carrara aumentou significativamente, destacando a grande utilização de mármore e granito na arquitetura em geral, gerando considerável aumento no consumo de rochas.

## 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua Norma Brasileira (NBR) 15012:2013 define rocha ornamental como material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer função estética.

Dentre os principais tipos de rochas ornamentais, destacam-se os mármore e granitos que são rochas utilizadas para revestimento, sendo classificadas como rochas silicáticas (granitos) e rochas carbonáticas (mármore) (MELLO *et al.*, 2011).

Os granitos compreendem um conjunto de rochas silicáticas formadas por feldspato, quartzo, sienitos, monzonitos, charnoquitos, diabásios, basaltos, gnaisses e migmatitos. Por outro lado, mármore são rochas metamórficas, compostas basicamente por calcita e/ou dolomita (OLIVEIRA, 2015).

No âmbito geológico, granitos são rochas ígneas, ou seja, rochas resultantes da solidificação de magma em diferentes profundidades da crosta terrestre enquanto que mármore são rochas metamórficas com origem sedimentar, isto é, rochas formadas pelo metamorfismo de outras rochas e ainda através da deposição química ou detrítica da desagregação e erosão de outras rochas (MELLO *et al.*, 2011).

### 2.2.1 - Processo de extração e beneficiamento de rochas

MOLINARI (2007) nomeia como lavra o processo de exploração e beneficiamento de rochas ornamentais. Ainda de acordo com MOLINARI (2007), este processo compreende operações coordenadas, objetivando o aproveitamento da jazida desde a extração até o beneficiamento das rochas. MORAES (2006) afirma que processo de extração ocorre em forma de blocos, extraídos de maciços rochosos ou matacões, com dimensões adequadas à etapa seguinte de beneficiamento. Para ALENCAR (2013), os blocos extraídos devem ter entre 5 e 8 metros cúbicos. Posteriormente, estes blocos são transformados em placas com dimensões padrão, sendo estas 2,4m x 1,2m x 0,6m a 3,3m x 1,8m x 1,5m, conforme mostrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Placas com dimensões padrão.  
Fonte: RODRIGUES (2015).

MORAES (2006) alerta ainda para as características ideais das lavras, tais como verificação de impurezas, trincas e topografia de forma a condicionar o dimensionamento



adequado dos equipamentos e instalações, minimização dos custos, fluxo e sequência das atividades e redução de impactos ambientais.

## 2.3 - GERAÇÃO DE RESÍDUOS

Grande parte dos processos produtivos são fontes geradoras de resíduos. A construção civil, que consome cerca de 14% a 50% dos recursos naturais, destaca-se como uma das principais atividades econômicas geradora de resíduos (GONÇALVES, 2000). JOHN (2000) estimou que o Brasil consumiu cerca de 220 milhões de toneladas de agregados, totalizando quase 1,3 t/hab.ano.

Conforme RODRIGUES (2015), a geração de resíduos de cortes de placas de mármore e granitos ocorre a partir do momento que os blocos são extraídos dos matacões, chegando a totalizar quase 25% durante todo o ciclo de beneficiamento de rochas ornamentais.

Antes de chegar ao consumidor final, a matéria-prima passa por etapas de beneficiamento, visando a redução dos blocos em placas. De acordo com LOPES *et al.* (2006), o processo de beneficiamento ocorre por meio de esquadrejamento e polimento, gerando resíduos em forma de sobras de placas ou lamas, resultado da mistura de pó com água utilizada em cortadeiras.

Para BARROS *et al.* (2006), estas etapas são, respectivamente, o desdobramento dos blocos em placas, polimento das placas e corte das placas.

### 2.3.1 - Desdobramento

Nesta etapa, de acordo com BARROS *et al.* (2006), os blocos são posicionados em teares, que são máquinas equipadas com barras de aço e que cortam os blocos com espessura de 2cm, através de fricção entre as barras e material abrasivo, geralmente constituído por água, cal hidratada e granalhas de aço, transformando-os em placas. Deve-se ainda considerar o desbastamento das barras como parte do resíduo, incorporado ao resíduo principal.

GONÇALVES (2000) afirma que a água utilizada no processo de desdobramento passa por um sistema de esgotamento, sendo direcionada a tanques de decantação. Então, parte da água e resíduo é reaproveitada.



### **2.3.2 - Polimento**

A próxima etapa do beneficiamento de rochas é o polimento. Este processo é realizado em politrizes que, por abrasão e utilizando grande quantidade de água, se obtém o efeito de lustre nas placas. BARROS *et al.* (2006) afirma que o resíduo gerado nesta etapa não contém ganalha de aço e é gerado em quantidade menor. Este resíduo é chamado de resíduo do processo de acabamento (GONÇALVES, 2000).

### **2.3.3 - Corte das placas**

Visando à redução das placas em chapas que possibilitem melhor manuseio e movimentação, o corte das placas é outra etapa que gera resíduos (MOREIRA *et al.*, 2003). BARROS *et al.*(2006) afirma que nesta etapa o corte é realizado com lâminas diamantadas e com grande utilização de água.

O resíduo gerado nas três etapas anteriormente descritas, basicamente constituído do pó das rochas misturado com a água utilizada, caracteriza-se como uma espécie de lama, não biodegradável e classificado conforme a ABNT NBR 10004:2004 como de classe II - Inerte.

O Volume total gerado nestas etapas pode corresponder a aproximadamente 25% do bloco. MOREIRA *et al.* (2003) sugere que uma alternativa à minimização da geração de resíduos é a utilização de fio diamantado.

Normalmente, os resíduos gerados nas etapas de desdobramento, polimento e corte das placas é depositado em lagoas. Conforme BARROS *et al.* (2003), este resíduo fica em estado de decantação, até que a água evapore e a lama apresente rigidez para sua retirada.

### **2.3.4 - Sobras de chapas**

Após o conclusão das etapas anteriores, as chapas são destinadas ao consumidor final. Seguindo um processo lógico, antes de chegar ao consumidor final, as chapas passam por outras etapas de beneficiamento, agora realizadas nas empresas que comercializam rochas ornamentais. RODRIGUES (2015) nomeia estas etapas de beneficiamento como cortes para uso final.

As chapas, quando destinadas às empresas que fazem cortes, chegam com as bordas irregulares, conforme mostra a Figura 2.4, e passam por processo de esquadrejamento,

resultando em pequenas partes que acabam sendo amontadas no pátio das empresas, aguardando geração de volume considerável para receberem destinação.



Figura 2.4 - Chapas com bordas irregulares.  
Fonte: RODRIGUES (2015).

Assim, após o acúmulo de volume nos pátios das empresas, os resíduos são destinados aos aterros sanitários ou doados para fins diversos, destacando-se a aplicação como regularização de solos (RODRIGUES, 2015).

## 2.4 - CONCRETO

### 2.4.1 - Definição

De acordo com PINHEIRO (2007), concreto é um material construtivo, resultante da mistura, em proporções adequadas, de aglomerantes, agregados e água, o que converge com a definição dada na ABNT NBR 12655:2015 que define concreto como material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados e água, que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento.

O concreto pode ser simples, quando é produzido somente com a utilização de aglomerante, agregados e água, ou armado, quando ocorre a adição de armadura metálica ao concreto simples. Há ainda a possibilidade de o concreto ser protendido, ou seja, quando a

estrutura recebe tensões que o torna capaz de melhorar seu comportamento estrutural sob diversas ações de carga (HANAI, 2005).

PINHEIRO (2007) afirma que o concreto simples é obtido através da mistura de cimento portland, o principal aglomerante utilizado na produção de concreto, água e agregados, subdivididos em grãos e miúdos. Basicamente, se obtém concreto após a adição de agregados à pasta cimentícia. A Figura 2.5, apresenta os materiais que constituem o concreto simples.

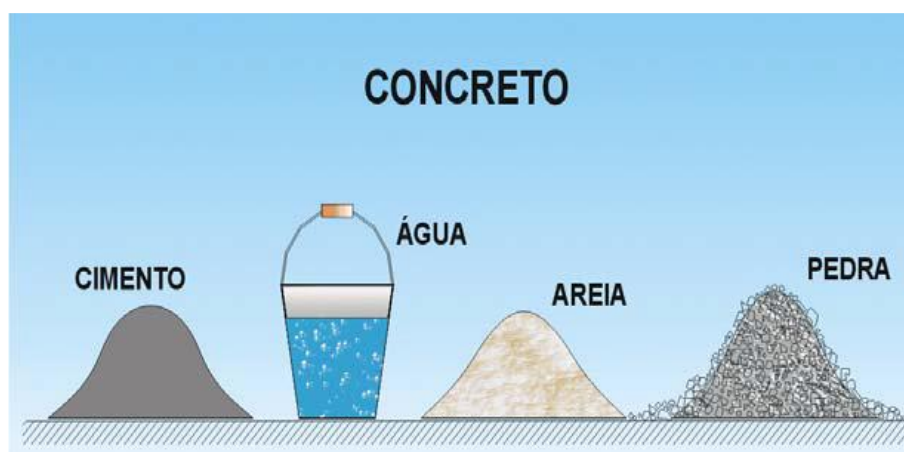


Figura 2.5 – Materiais constituintes do concreto simples.  
Fonte: PINHEIRO (2007).

#### 2.4.2 - Cimento portland

BAUER (1994) classifica cimento como o produto obtido através da pulverização de clínquer, tendo em sua composição, cal ( $\text{CaO}$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), constituindo de 95 a 96% dos óxidos, magnésia ( $\text{MgO}$ ), na proporção de 2 a 3% e uma porção menor de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), sendo este último adicionado após a calcinação, com a finalidade de retardar o tempo de pega do produto. Há ainda a adição de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) e titânio ( $\text{TiO}_2$ ), sendo estes considerados óxidos de menor importância e presentes na proporção de 1 a 2%.

A análise das propriedades químicas das proporções dos compostos constituintes dos cimentos portland está diretamente relacionada à aplicação de cada tipo de cimento (BAUER, 1994).

Para a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP (2002), o cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece após a adição de água e que não se decompõe após o endurecimento.

Segundo a ABCP (2002), o cimento portland, que tem seu nome em homenagem à ilha britânica de Portland, é classificado de acordo com sua composição. No Brasil, existem alguns tipos de cimento que são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição de cimentos portland comuns e compostos.

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002).

Outros tipos de cimento portland estão disponíveis no mercado, mas sua utilização depende de características especiais de aplicação. Conforme apresentado na Tabela 2.2, estes cimentos são: Cimento alto-forno, pozolânico e de alta resistência inicial.

Tabela 2.2 – Composição de cimentos portland de alto-forno, pozolânicos e de alta resistência inicial.

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45		15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002).

Cabe ressaltar que para cada tipo de cimento portland há uma norma específica da ABNT que, além de definir as características de cada tipo de cimento, orienta quanto à

realização dos métodos de ensaio utilizados para verificar o atendimento às exigências das respectivas normas (ASSOCIAÇÃO BASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

### **2.4.3 - Agregados**

A ABNT NBR 9935:2011 define agregado como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de concreto. Na ABNT NBR 7211:2009 os agregados para concreto são definidos como grãos e miúdos. Complementando a informação, a ABNT NBR 12655:2015 os define como material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Por outro lado, BAUER (1994) define os agregados como material particulado, incoesivo, de atividade química nula, constituído de misturas de partículas com variação em suas dimensões e os classifica de acordo com a origem (naturais ou industrializados), as dimensões das partículas (grãos e miúdos) e o peso específico aparente (leves, médios e pesados). No que se refere à produção de concretos, deve-se considerar a classificação segundo as dimensões das partículas (BAUER, 1994).

Na ABNT NBR 7211:2009 é possível classificar os agregados de acordo com a granulometria. Os agregados grãos possuem dimensões que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Já os agregados miúdos possuem dimensões de grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

## **2.5 - PROPRIEDADES DO CONCRETO**

O concreto é produzido através da mistura da pasta, resultante da mistura de cimento e água, com os agregados, podendo ser realizado através de preparo mecânico ou manual (ANDOLFATO, 2002). De acordo com PINHEIRO (2007) entre as principais vantagens do concreto, destacam-se a possibilidade de se moldar em diversas concepções estruturais, baixo custo de materiais e mão de obra. Se dimensionado corretamente, apresenta boa resistência às solicitações exigidas além de requerer baixo investimento em caso de necessidade de manutenção.

Dentre as principais propriedades mecânicas, PINHEIRO (2007) destaca a resistência à compressão e a resistência à tração.

### **2.5.1 - Resistência à compressão**

ANDOLFATO (2002) e PINHEIRO (2007) definem a resistência à compressão ( $f_c$ ), como a principal característica mecânica dos concretos. Basicamente, a resistência à compressão é determinada após a submissão de corpos-de-prova com idade de 28 dias, convencionando-se que esta é a idade em que a estrutura deverá entrar em carga, padronizados conforme a ABNT NBR 5738:2016 Concreto – Procedimento para moldagem de corpos de prova, ao rompimento em prensas. O ensaio de resistência à compressão deve ser realizado conforme determina a ABNT NBR 5739:2007 Concreto – Ensaio de compressão em de corpos-de-prova cilíndricos.

No ensaio de resistência à compressão, são definidas a resistência média à compressão do concreto, ( $f_{cm}$ ), e a resistência característica à compressão, ( $f_{ck}$ ) (ARAÚJO, 2001).

ANDOLFATO (2002) define a resistência característica do concreto à compressão como sendo um valor mínimo estatístico acima do qual ficam situados 95% dos resultados experimentais. Para PINHEIRO (2007), este valor é definido como 5% de probabilidade de não ser alcançado em um determinado lote de concreto.

### **2.5.2 - Resistência à tração**

De modo semelhante à resistência a compressão, a resistência à tração apresenta uma significativa variabilidade em torno de um valor médio (ARAÚJO, 2001). Assim, obtém-se a resistência a média do concreto à tração, ( $f_{ctm}$ ), e a resistência característica do concreto à tração, ( $f_{ctk}$ ). A diferença entre compressão e tração está indicada na realização dos ensaios. Na tração há três ensaios normalizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão.

PINHEIRO (2007) afirma que o ensaio mais utilizado é o ensaio de tração na compressão diametral normalizado pela ABNT NBR 7222:2011 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, que foi desenvolvido por Lobo Carneiro, em 1943. Em sua realização, um corpo de prova com dimensões definidas conforme a ABNT NBR 5738:2016, é posicionado com o eixo horizontal entre a prensa e recebe a aplicação de uma força até sua ruptura por tração indireta.

## 2.6 - REQUISITOS MÍNIMOS PARA ACEITAÇÃO DE CONCRETOS DE ACORDO COM A ABNT NBR 6118:2014

A ABNT NBR 6118:2014 - Projetos de estruturas de concreto armado - Procedimento - determina requisitos mínimos para aceitação de concretos em elementos estruturais. De acordo com a Tabela 2.3, apresentada abaixo, (tabela 6.1 da ABNT NBR 6118:2014), os concretos estão sujeitos à agressividade de acordo com o ambiente em que estão inseridos.

Tabela 2.3 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

<b>Classe de agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a, b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a, b</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a, c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 6118 (2014).

Deste modo, as classes de concreto devem atender a classe de agressividade ambiental, quando do seu dimensionamento. A Tabela 2.4 (tabela 7.1 da ABNT NBR 611:2014), apresenta as classes mínimas de concreto recomendadas levando em consideração as classes de agressividade ambiental.

Tabela 2.4 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto	Tipo <sup>b, c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1, da NBR 6118:2014)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe do concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 6118 (2014).

## 2.7 - REQUISITOS DE POZOLANICIDADE DE ACORDO COM A ABNT NBR 12653:2015

A ABNT NBR 12653:2015 - Materiais pozolânicos - Requisitos, estabelece os requisitos para materiais destinados ao uso com cimento Portland e concreto, argamassa e pasta. De acordo com a ABNT NBR 12653:2015, os materiais devem ter capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias.

Para tal, os materiais pozolânicos podem ser naturais, que são materiais de origem vulcânica, com caráter petrográfico ácido (65% ou mais de SiO<sub>2</sub>) ou de origem sedimentar ou ainda artificiais, sendo os materiais provenientes do tratamento térmico ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica.

De modo geral, os materiais pozolânicos são classificados na classe N e devem estar em conformidade com os requisitos químicos estabelecidos na Tabela 2.5 (tabela 1, da ABNT NBR 12653).



Tabela 2.5 – Requisitos químicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO <sub>3</sub>	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25

(\*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 12653 (2015).

## 2.8 - ESTUDOS COM A APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE CORTE DE MÁRMORE E GRANITO

A seguir, serão apresentados alguns trabalhos relacionados com a reutilização de resíduos de corte de mármore e granitos na produção de concretos.

O estudo da reciclagem de resíduos gerados no beneficiamento de rochas ornamentais ganhou força no final dos anos 90. CALMON *et al.* (1997) e SILVA (1998) estudaram a aplicação destes resíduos na produção de argamassas e tijolos de solo cimento. NEVES (1999) estudou a utilização dos resíduos da serragem e polimento de granitos em tijolos de cerâmica vermelha.

GONÇALVES (2000) em seu trabalho denominado “Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos” afirma que a adição de 10% de RCG proporciona ao concreto melhor desempenho nas propriedades mecânicas do que a utilização de concreto convencional. No entanto, tal desempenho não apresenta relevância significativa.

No que se refere às propriedades do concreto no estado fresco, as dosagens de concreto com adição de RCG apresentaram maior coesão e consistência e diminuição da exsudação.

QUEIROZ *et al.* (2008) estudou o aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland e simulou duas situações: na primeira, foi utilizado todo o produto da britagem com a adição de areia rosa e, posteriormente, areia média

comum. Já na segunda situação, observou-se somente a utilização da fração graúda, retida na peneira 4,8 mm com a adição de areia média comum de leito de rio. Para a determinação da tensão de ruptura do concreto, corpos de prova com dimensões de 10cm x 20cm foram produzidos e submetidos ao ensaio de compressão uniaxial, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Em sua conclusão, QUEIROZ *et al.* (2008) considera que os agregados resultantes da britagem de resíduos de marmorarias apresentam características tecnológicas satisfatórias para a aplicação na produção de concretos. Tal afirmação pode ser evidenciada nas Figuras 2.6 e 2.7, onde se observa que os resultados aos 28 dias de cura do concreto nas duas situações atingiram a tensão de ruptura aproximada 35 MPa.

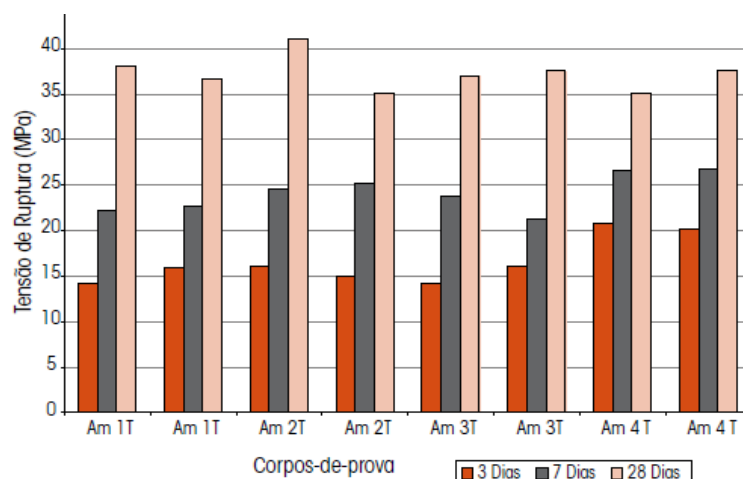


Figura 2.6 – Gráfico da resistência à compressão na primeira situação (utilização de resíduos péticos britados com adição de areia rosa e areia média comum).

Fonte: QUEIROZ *et al.* (2008).

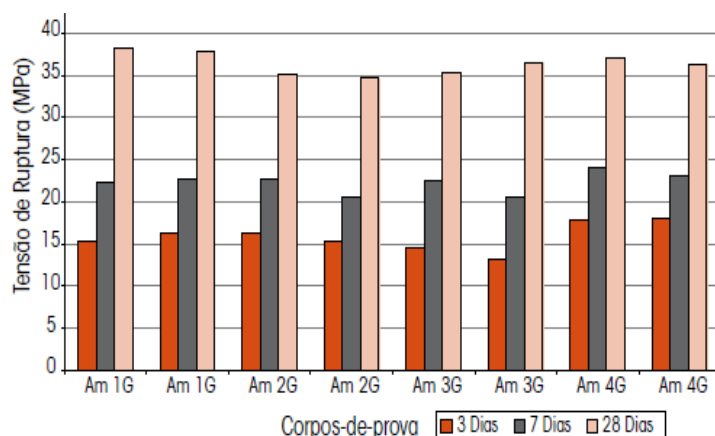


Figura 2.7 – Gráfico da resistência à compressão na segunda situação (utilização de resíduos péticos graúdos britados e retidos na peneira 4,8 mm com adição de areia média comum de leito de rio).

Fonte: Adaptada de QUEIROZ *et al.* (2008).

RODRIGUES (2015) pesquisou a “utilização dos resíduos de cortes de placas de mármore e granitos como adição na fabricação de concreto auto adensável”.

Inicialmente, o autor concluiu que a massa específica dos resíduos resultantes do beneficiamento de placas de mármore e granitos (RMG) se aproxima das massas dos agregados em valores especificados na literatura, o que contribuiu para que o concreto auto adensável produzido obtivesse boa coesão.

No que se refere às propriedades mecânicas, os concretos produzidos com a substituição de RMG alcançaram valores de resistência à compressão superiores aos concretos produzidos convencionais. Do mesmo modo, nos ensaios de resistência à flexão, os concretos produzidos com a adição de RMG apresentaram resultados satisfatórios aos limites estabelecidos pela NBR 15805:2010.

ANDRADE *et al.* (2016) realizou o “estudo da produção do bloco de concreto para a vedação contendo substituição parcial da areia por resíduo gerado no corte de granito e mármore (RCGM). Corpos-de-prova foram produzidos e submetidos à ensaios de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Seguindo parâmetros da indústria da construção civil, houve adição gradativa 5%, 10% e 15% de RCGM no traço de referência. Foram produzidos, então, 48 corpos de prova e ensaiados em conformidade com as normas técnicas.

Após submeter os blocos ao ensaio de compressão, esperava-se atingir a resistência de 2,5 MPa para os blocos de vedação. No entanto, conforme mostra a Figura 2.8, todos os traços com adição de RCGM apresentaram valores superiores ao esperado.

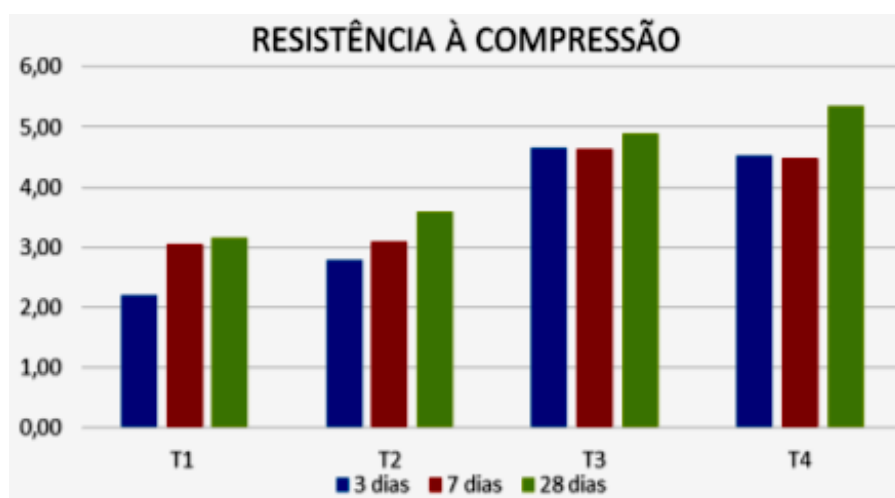


Figura 2.8 – Gráfico da resistência à compressão de todos os traços.  
Fonte: Adaptada de ANDRADE *et al.* (2016).

Assim, chegou-se à conclusão que os blocos produzidos com a adição de RCGM apresentaram melhores índices de resistências do que os blocos produzidos com a utilização do concreto com traço referencial. Concluiu-se ainda que o resíduo gerado apresenta grande potencial pozolânico e que o resíduo é aliado ao preenchimento dos vazios.

Por fim, ANDRADE *et al.* (2016) concluiu que a produção de artefatos de concreto com a adição de RCGM é viável tecnicamente e ainda surge como uma alternativa à problemática ambiental.

Portanto, nesta dissertação, diferente de estudos anteriores, pretende-se mostrar que a substituição total dos agregados convencionais por agregados resultantes da trituração de resíduos do beneficiamento de mármore e granitos é uma alternativa viável.

De certa forma, a viabilidade da aplicação dos resíduos resultará, no mínimo, em ganhos para o meio ambiente, uma vez que a transformação dos resíduos em agregados possibilitará a redução de extração de recursos minerais e reduzirá o descarte dos resíduos em aterros e pode resultar ainda ganhos econômicos, pois possibilitará a redução de gastos com envio do resíduo aos aterros.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos aplicados na elaboração desta dissertação.

Para atingir os objetivos propostos, desenvolveu-se uma metodologia experimental composta das etapas mostradas na Figura 3.1.

Na primeira etapa, empresas beneficiadoras de mármore e granito foram identificadas e visitadas. Durante a visita, foram coletados dados de posicionamento geográfico e resíduos para trituração.

A segunda etapa compreendeu a transformação de resíduos em agregados. Nesta etapa, os resíduos coletados na etapa anterior foram levados à empresa Araújo & Lima Demolições para trituração e, posteriormente, peneirados para definição dos grãos.

Na terceira etapa, os resíduos, após peneiramento, foram preparados para realização de fluorescência por raio x. Uma parte da amostra, em forma de pó, foi submetida a um processo de secagem para se adequar aos requisitos de realização do ensaio de fluorescência por raio x.

A quarta etapa compreendeu a produção dos corpos-de-prova. Nesta etapa, foram produzidos 195 corpos-de-prova obedecendo parâmetros normativos e orientações literárias.

Por fim, a quinta etapa compreendeu a análise das propriedades mecânicas dos corpos-de-prova. Os 195 corpos-de-prova anteriormente produzidos foram submetidos a ensaios de compressão axial e absorção por imersão.

Os resultados obtidos ao fim das etapas 2, 3, 4 e 5 são apresentados no capítulo 4.

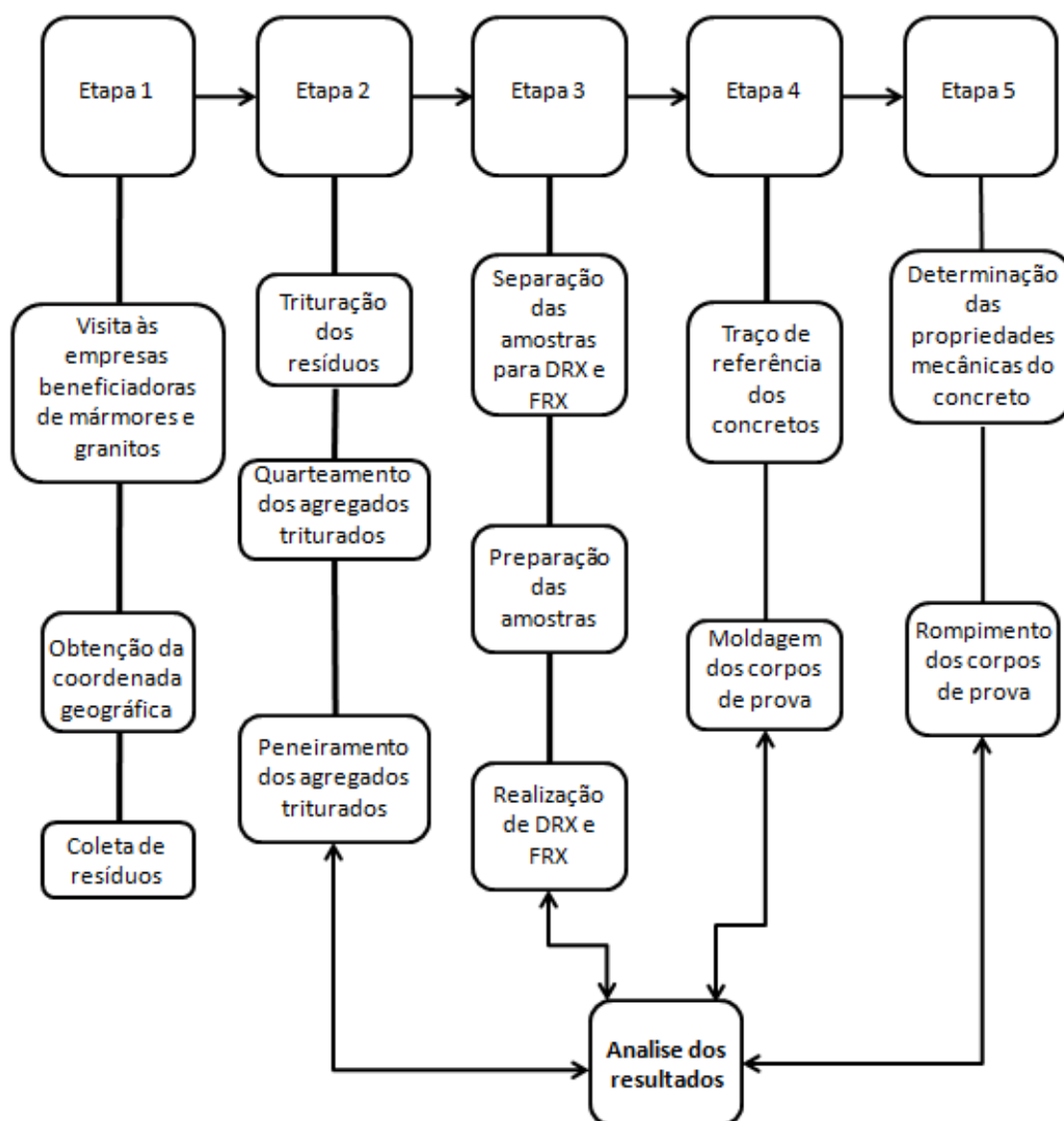


Figura 3.1 - Fluxograma que demonstra as etapas da metodologia experimental.

### 3.2 - MATERIAIS

Na realização desta dissertação, foram utilizados os seguintes materiais: resíduos do corte de placas de mármore e granitos, cimento Portland CP III – 40 RS e agregados convencionais para produção de concreto.

Foram utilizados também os seguintes equipamentos: moldes de corpos-de-prova com dimensões de 20cm x Ø 10cm, confeccionados em tubos metálicos e peneiras conforme NBR NM 248:2003, espectrômetro de fluorescência de Raios-X Supermini200 Rigaku, estufa Modelo SP-100 - SPLABOR, balança digital Segma com precisão de 2g, betoneira Menegotti com capacidade de 150 litros e balança analítica Adventurer OHAUS.

Para a realização da localização das fontes geradoras de resíduos visitadas, utilizou-se um GPS GARMIN GPSMAP 78s.

Para a manipulação dos pontos coletados e geração dos mapas, utilizou-se o software gratuito Quantum Gis (QGis), na versão 2.18.14 – GRASS.

### 3.3 - MÉTODOS

#### 3.3.1 - Coleta de resíduos de corte de mármore e granito

Durante a fase de identificação da geração de RCMG, foram visitadas empresas beneficiadoras de placas de mármore e granito na cidade de Manaus, visando identificar a procedência dos materiais e o quantitativo de resíduo gerado, além da coleta de amostras. A Figura 3.2 apresenta os resíduos gerados durante o processo de beneficiamento de placas de mármore e granito.



Figura 3.2 - Resíduos de corte de placas de mármore e granito.

Na oportunidade, as coordenadas geográficas foram registradas no GPS GARMIN GPSMAP 78s, através do método de posicionamento estático rápido, com o intuito de gerar um mapa identificando os locais visitados.

A Tabela 3.1 mostra as coordenadas geográficas das empresas beneficiadoras de mármore e granitos visitadas.

Tabela 3.1 - Empresas visitadas e suas coordenadas geográficas.

<b>Empresa</b>	<b>Ponto</b>	<b>Latitude (S)</b>	<b>Longitude (W)</b>
Fuzari & Fuzari LTDA - ME	P1	3°4'4.4"	60°00'16.1"
Grancity Comércio de Materiais de Construção Eireli - ME	P2	3°4'6.6"	60°1'27.7"
Harmazem Mármore e Granitos LTDA	P3	3°4'1.3"	60°2'48.2"
Cristal Mármore e Granitos LTDA - ME	P4	3°4'16.7"	60°2'57.3"
J. L. Cirillo	P5	3°3'12.4"	60°2'38.6"
Anpaiva Comércio de Granitos e Construções LTDA - ME	P6	3°3'1.8"	59°59'32"
Granmarmore Comercio LTDA – ME	P7	3°5'33.1"	60°2'56.8"
Rezende & Oliveira Comércio de Materiais de Construção LTDA – ME	P8	3°3'0.9"	59°59'13.8"
Carlos Alexandre Lima Araújo – ME	P9	3°2'59.9"	59°59'26.2"
Marmoraria Artes LTDA – ME	P10	3°2'14.2"	59°58'58.7"

### 3.3.2 - Britagem dos resíduos de corte de mármore e granito

A transformação dos resíduos em agregados triturados foi realizada na usina da empresa Araújo & Cia Demolições, com a utilização de um britador de mandíbulas, mostrado na Figura 3.3.

Antes de submeter os resíduos ao processo de trituração, o triturador ficou em funcionamento por aproximadamente 10 minutos, com o objetivo de descontaminar as mandíbulas de trituração e esteira de peneiramento. Após este período, iniciou-se então a trituração dos resíduos, que podem ser visualizados na Figura 3.4.



Figura 3.3 - Triturador de resíduos.





Figura 3.4 - Resíduos de corte de placas de mármore e granito triturados.

Após o processo de trituração, os resíduos foram submetidos ao peneiramento para separação de acordo com a dimensão dos agregados. As peneiras utilizadas foram escolhidas em função da separação de agregados graúdos e miúdos, conforme a Norma Mercosul NBR NM 248:2003. As figuras a seguir apresentam, respectivamente, a série de peneiras utilizadas (Figura 3.5), a retenção de agregados conforme a malha (Figura 3.6) e os agregados separados conforme sua granulometria (Figura 3.7).



Figura 3.5 - Série de peneiras.



Figura 3.6 - Retenção de agregados.



Figura 3.7 - Agregados separados conforme a granulometria.

### 3.3.3 - Análise química por fluorescência de raios-x

A análise química de fluorescência do RCMG utilizado foi realizada por meio de espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X. O equipamento utilizado foi o Supermini200, da marca Rigaku.

Para a preparação da amostra, uma pequena porção dos resíduos foi submetida ao peneiramento na peneira de malha #200 (Figura 3.8a). Posteriormente, o material passante na peneira #200 (Figura 3.8b) foi levado à secagem em estufa (Figura 3.8c).

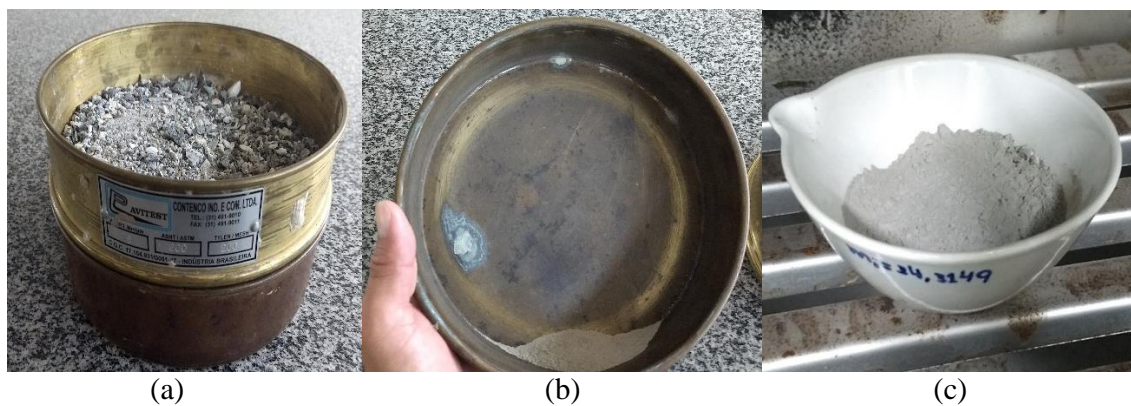


Figura 3.8 - Preparação de amostra para análises de FRX: (a) Peneiramento de amostras; (b) Material passante na peneira #200; (c) Amostra submetida à secagem em estufa.

Por fim, após a secagem da amostra, foram preparadas três pastilhas prensadas em prensa compactadora de amostras espectrométricas a uma pressão aproximada de 20 toneladas, com massa aproximada de 4,60 g, tendo em sua composição aproximadamente 90% de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) e 10% do pó residual de mármore e granitos.

### 3.3.4 - Dosagem do concreto

O concreto foi dosado respeitando as orientações do método de dosagem IPT/USP (HELENE e TERZIAN, 1992). Optou-se por escolher este método, pois o mesmo é um método de dosagem experimental e que atende requisitos normativos, tais como: preparo e controle de concreto (ABNT NBR 12655:2015), moldagem e cura de corpos-de-prova (ABNT NBR 5738:2016), determinação da composição granulométrica (ABNT NM 248:2003), ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT NBR 5739:2007) e requisitos estruturais (ABNT NBR 6118:2014).

Assim, adotou-se o traço de referência 1 : 1,98 : 2,87 : 0,46 (FREITAS JUNIOR, 2014), que aos 28 dias deverá atingir 30 MPa de resistência característica à compressão. O consumo de materiais para  $1m^3$  do traço de referência é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Consumo de materiais para  $1m^3$  de concreto.

<b>Cimento</b>	<b>Ag. Miúdo</b>	<b>Ag. Graúdo</b>	<b>A/C</b>
375 kg	743 kg	1076 kg	172,5 l

Fonte: Adaptada de FREITAS JUNIOR (2014).

Posteriormente, utilizando regra de três simples, foram dosados novos traços com a substituição dos agregados convencionais por agregados resultantes da trituração de resíduos do corte de placas de mármore e granito. Foram produzidos traços com a substituição de 25%, 50%, 75% e 100% dos agregados, divididos em três categorias, sendo estas: Substituição de agregados miúdos, nomeados como AM, substituição de agregados graúdos, nomeados como AG e substituição de agregados miúdos e graúdos, nomeados como B. Os novos traços foram produzidos conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Traços com a substituição de agregados.

<b>Traço</b>	<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Areia (resíduo)</b>	<b>Brita</b>	<b>Brita (resíduo)</b>	<b>Relação A/C</b>
I - Referência	1	1,98	-	2,87	-	0,46
II - Subst. 25% - Ag. Miúdo	1	1,49	0,50	2,87	-	0,46
III - Subst. 50% - Ag. Miúdo	1	0,99	0,99	2,87	-	0,46
IV - Subst. 75% - Ag. Miúdo	1	0,5	1,49	2,87	-	0,46
V - Subst. 100% - Ag. Miúdo	1	-	1,98	2,87	-	0,46
VI - Subst. 25% - Ag. Graúdo	1	1,98	-	2,15	0,72	0,46
VII - Subst. 50% - Ag. Graúdo	1	1,98	-	1,44	1,44	0,46
VIII - Subst. 75% - Ag. Graúdo	1	1,98	-	0,72	2,15	0,46
IX - Subst. 100% - Ag. Graúdo	1	1,98	-	-	2,87	0,46
X - Blend - Subst. 25% - Miúdo + Graúdo	1	1,49	0,25	2,15	0,72	0,46
XI - Blend - Subst. 50% - Miúdo + Graúdo	1	0,99	0,99	1,44	1,44	0,46
XII - Blend - Subst. 75% - Miúdo + Graúdo	1	0,5	1,49	0,72	2,15	0,46
XIII - Blend - Subst. 100% - Miúdo + Graúdo	1	-	1,98	-	2,87	0,46

### 3.3.5 - Trabalhabilidade do concreto no estado fresco

Após a produção dos traços, cada mistura foi submetida ao ensaio do tronco de cone, seguindo as recomendações da NBR NM 67:1998. Estabeleceu-se como ideal o abatimento de 60 mm, com variações de 10 mm para mais ou para menos.

O abatimento foi medido com uma régua convencional, conforme mostra a Figura 3.9, onde foram obtidos os abatimentos de cada mistura.



Figura 3.9 - Ensaio do abatimento de uma amostra.

### **3.3.6 - Produção dos corpos-de-prova**

Os corpos-de-prova foram moldados conforme orientações da ABNT NBR 5738. Respeitando a definição dos traços, foram moldados então 195 corpos-de-prova. Destes, foram separados doze corpos-de-prova por mistura para serem rompidos aos 3, 7 e 28 dias. Para cada mistura, foram ainda separados dois corpos-de-prova para realização de ensaio de absorção por imersão, com realização após 28 dias de cura.

Os corpos-de-prova foram moldados em moldes com dimensões de 10cm de diâmetro x 20cm de altura, atendendo o que determina a ABNT NBR 5738. Os moldes e as bases foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral, para que a desmoldagem ocorresse sem alteração na forma das amostras.

O adensamento adotado foi manual e obedeceu às prescrições normativas acerca da quantidade de golpes para cada camada, conforme orientação da ABNT NBR 5738. Na Figura 3.10 tem-se a moldagem dos corpos-de-prova.





Figura 3.10 – Moldagem dos corpos-de-prova: (a) Corpos-de-prova enformados; (b) Corpos-de-prova em cura inicial de 24 horas.

### 3.3.7 - Cura dos corpos-de-prova

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram acondicionados em local livre de vibrações ou outro tipo de ação que pudesse causar perturbação ao concreto. Nas primeiras 24 h, os corpos-de-prova foram cobertos com filme de PVC, a fim de evitar a perda de água do concreto. Posteriormente, os corpos-de-prova, já desmoldados, foram submetidos à cura submersa até a idade de rompimento, conforme apresentado na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Corpos-de-prova imersos.

### 3.3.8 - Rompimento dos corpos-de-prova

Antes de serem prensados, os corpos-de-prova foram capeados com uma fina camada de enxofre em estado líquido, não excedendo a 3 mm em cada base.

Os corpos-de-prova atenderam as tolerâncias de tempo para rompimento conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Tolerância em horas permitida para rompimentos de corpos-de-prova

<b>Idade de ensaio</b>	<b>Tolerância permitida (h)</b>
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 5739, (2007).

Os corpos-de-prova foram rompidos no laboratório da empresa CONCRESONDA, em prensa hidráulica com capacidade de 200.000 kgf. A Figura 3.12 apresenta um corpo de prova após o rompimento.



Figura 3.12 - Apresentação de um corpo-de-prova após o rompimento.

### 3.3.9 - Preparação das amostras para realização de absorção por imersão

Após 28 dias de cura, as amostras foram preparadas para serem submetidas ao ensaio de absorção por imersão, conforme orientações normativas da NBR 9778:2005. Inicialmente, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa em temperatura de  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , por período igual ou superior a 72 horas. Após a secagem, cada amostra teve a massa registrada. A Figura 3.13 mostra as amostras em estufa, em processo de secagem.



Figura 3.13 – Amostras em estufas para secagem.

Após a secagem e determinação da massa seca, as amostras retornaram à imersão em água com temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , para saturação. Decorridas 72 horas de imersão, as amostras foram pesadas para que fosse obtido a massa saturada.



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 LOCALIZAÇÃO DAS FONTES GERADORAS DE RESÍDUOS

Após a visita às empresas beneficiadoras de placas de mármore e granito na cidade de Manaus, gerou-se o mapa apresentado na figura 4.1

Durante a investigação da geração de resíduos, observou-se que 90% da matéria-prima é importada do estado do Espírito Santo, os 10% restantes são importados do estado de Roraima. Após o processo de beneficiamento constatou-se que cada empresa gera em torno de 15% de resíduos.

Atualmente, as empresas importam cerca de 85 chapas por mês com dimensões de 2,85m x 1,8 m x 0,02m, o que remete a um volume aproximado de 8,72m<sup>3</sup>, que, por sua vez, retorna a aproximadamente 1,30m<sup>3</sup> de resíduo gerado por mês em cada empresa beneficiadora de placas de mármore e granito.

Assim, estima-se que as 10 empresas beneficiadoras de placas de mármore e granito gerem, anualmente, cerca de 150m<sup>3</sup> de resíduo de corte de placas de mármore e granitos, diretamente descartados no meio ambiente. Em poucos casos, o resíduo gerado é doado para fins de regularização de solos.

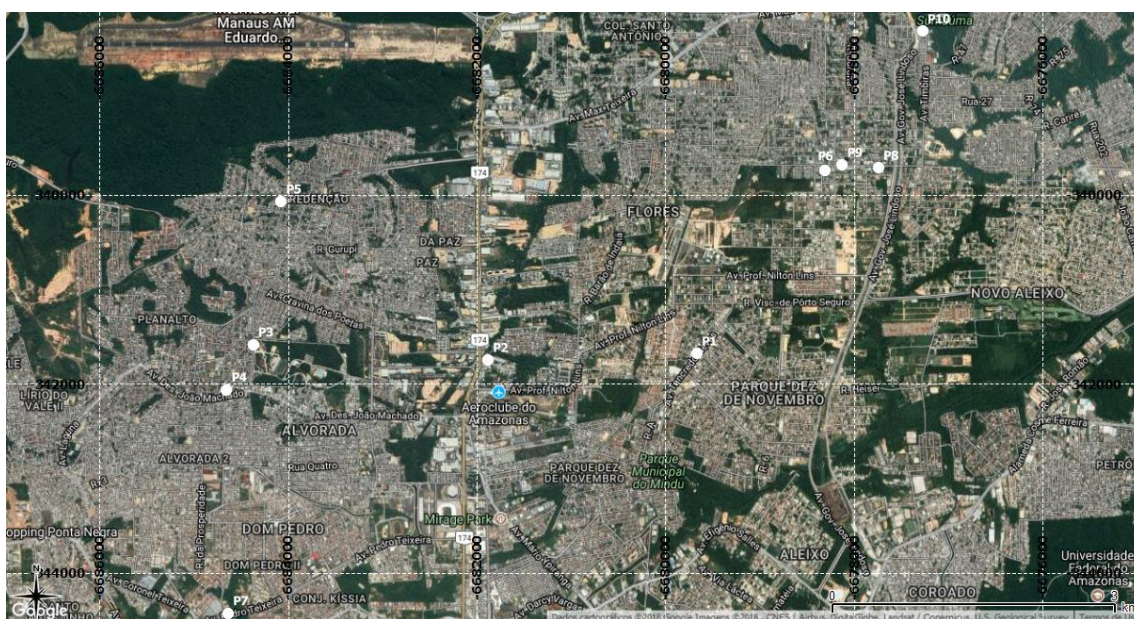


Figura 4.1 – Localização das empresas visitadas na cidade de Manaus.

## 4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS RESÍDUOS

Após a trituração dos resíduos, os agregados resultantes foram submetidos ao processo de granulometria. A figura 4.2 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados triturados.

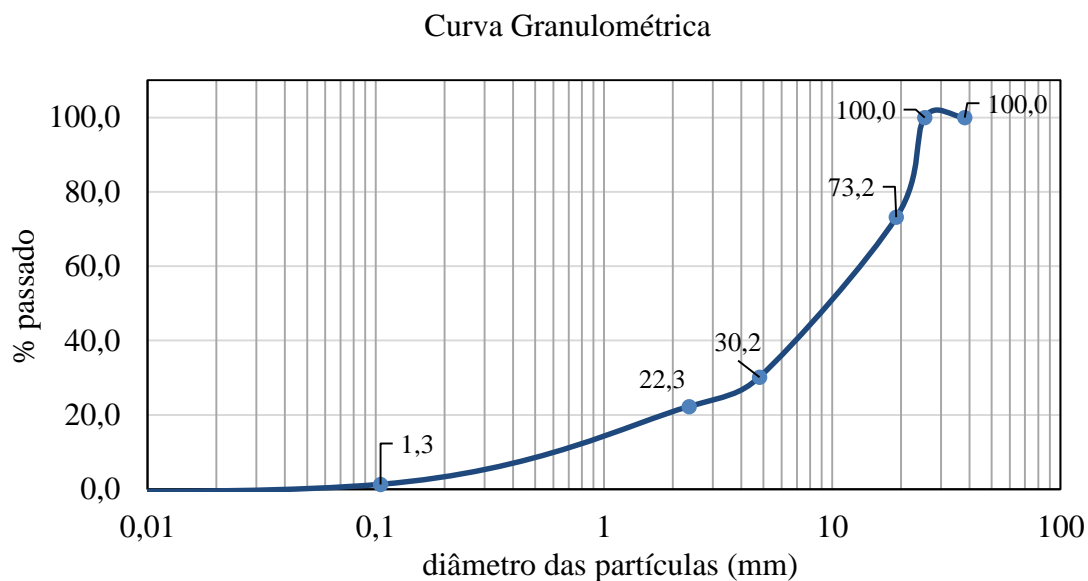


Figura 4.2 - Curva granulométrica dos agregados triturados.

Na análise granulométrica, identificou-se que o módulo de finura (MF) do material corresponde à 3,73 mm, estando classificado como areia grossa.

A quesito de comparação, os agregados foram colocados lado a lado para comparação visual da dimensão dos grãos. A figura 4.3 apresenta os agregados miúdos e as britas utilizadas na produção dos concretos, comparados com os agregados miúdos e grãos triturados.

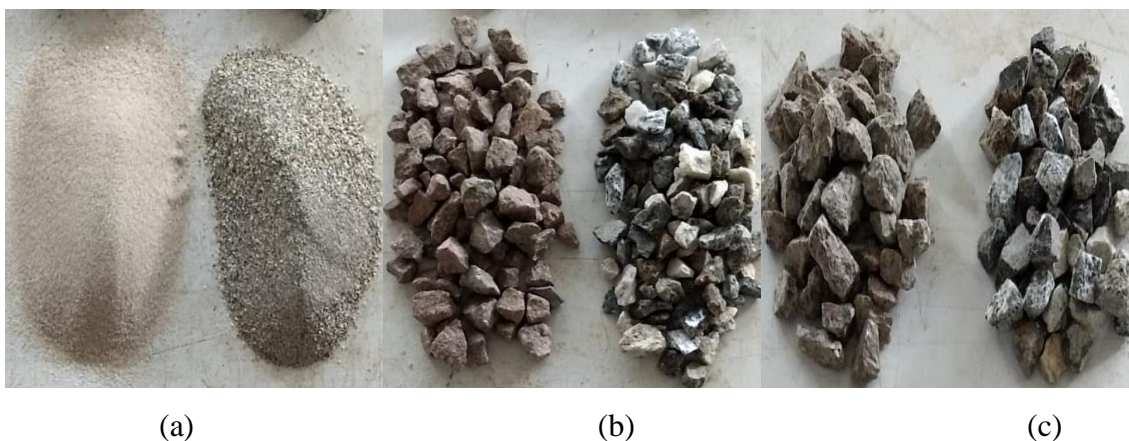


Figura 4.3 – Comparação da dimensão dos agregados: (a) Areia; (b) Brita 1; (c) Brita 0.

### 4.3 ANÁLISE POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A análise por fluorescência de raio x (FRX) foi realizada com o objetivo de determinar a concentração de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silício ( $\text{SiO}_2$ ) e ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Após a quantificação da concentração destes óxidos, os resultados foram comparados com a tabela 1 da ABNT NBR 12653 e constatou-se que o material residual atende os requisitos da referida norma. Assim, é possível aplicar o material na produção de concreto, pois o mesmo se caracteriza com material pozolânico. Os resultados da análise de FRX são apresentados na figura 4.4.

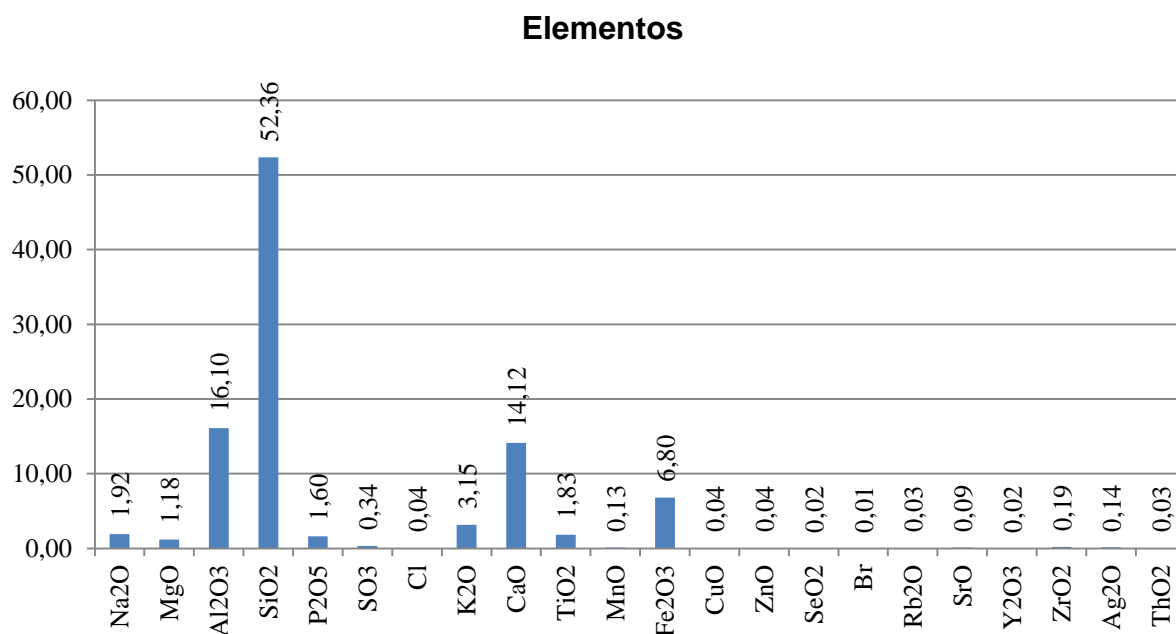


Figura 4.4 - Composição química do RCMG obtido através de FRX.

### 4.4 PROPIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### 4.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade das amostras foi obtida através do ensaio de tronco de cone. Em todas as amostras, a relação A/C foi mantida, visando diminuir alterações no traço de referência, como por exemplo, a adição de água. A tabela 4.1 apresenta os resultados dos abatimentos para as misturas produzidas.

Observou-se que as misturas apresentaram pouca variação no abatimento, sempre dentro do intervalo estabelecido.

Tabela 4.1 – Abatimento em mm das misturas produzidas.

MISTURA	ABATIMENTO (mm)
TRAÇO DE REFERÊNCIA	60
25% AM	65
50% AM	70
75% AM	70
100% AM	70
25% AG	65
50% AG	65
75% AG	65
100% AG	70
25% BLEND	70
50% BLEND	70
75% BLEND	65
100% BLEND	65

As misturas que obtiveram maiores valores de abatimento também apresentaram maiores índices de absorção de água e, por consequência, apresentaram menores índices de resistência.

#### 4.5 PROPIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

##### 4.5.1 Resistência à tração por compressão axial

Para avaliar a resistência dos corpos de prova produzidos, as amostras foram submetidas ao ensaio de tração por compressão axial. Para cada mistura, doze amostras foram submetidas ao referido ensaio, em períodos diferentes.

Aos três dias, foram rompidas quatro amostras de cada mistura. Os resultados foram comparados em relação ao traço de referência e são apresentados nas figuras 4.5; 4.6 e 4.7

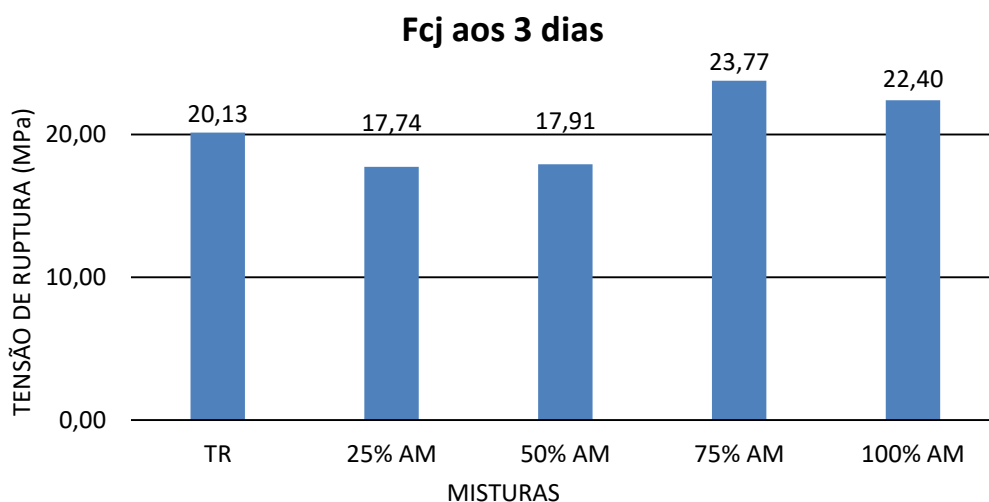


Figura 4.5 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos, com rompimento aos 3 dias.

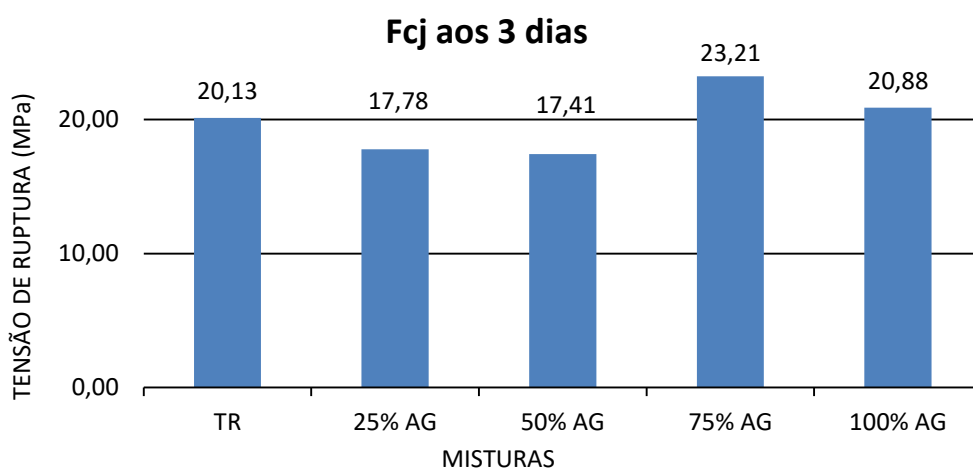


Figura 4.6 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados graúdos, com rompimento aos 3 dias.

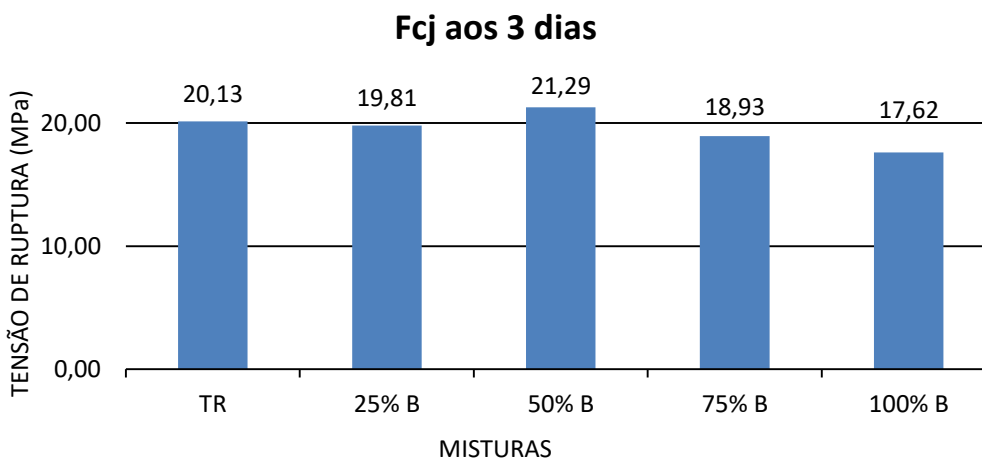


Figura 4.7 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos e graúdos, com rompimento aos 3 dias.

As amostras rompidas aos três dias produzidas com a substituição de agregados miúdos e substituição de agregados graúdos apresentaram índices bem aproximados das amostras do traço de referência.

Em percentuais, as amostras 50AM, 100AM, 75AG e 100AG apresentaram, respectivamente, 18%, 11%, 15% e 4% de índice de resistência superior ao traço de referência.

As demais misturas, ou seja, 25AM, 50AM, 25AG, 50AG, 25B, 50B, 75B e 100B apresentaram valores inferiores ao índice do traço de referência.

De modo similar, agora aos sete dias, as misturas foram submetidas ao ensaio tração por compressão diametral. Novamente, quatro amostras de cada mistura foram rompidas e comparadas às amostras do traço de referência. As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos.

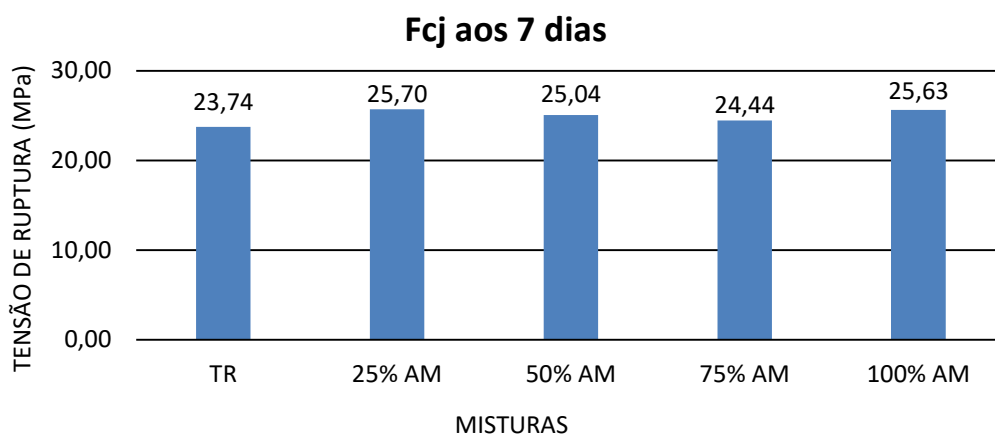


Figura 4.8 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos, com rompimento aos 7 dias.

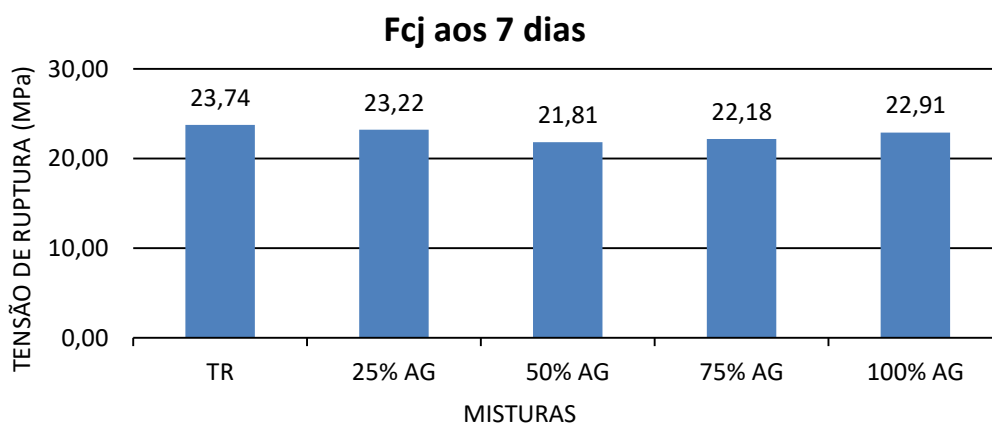


Figura 4.9 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados graúdos, com rompimento aos 7 dias.

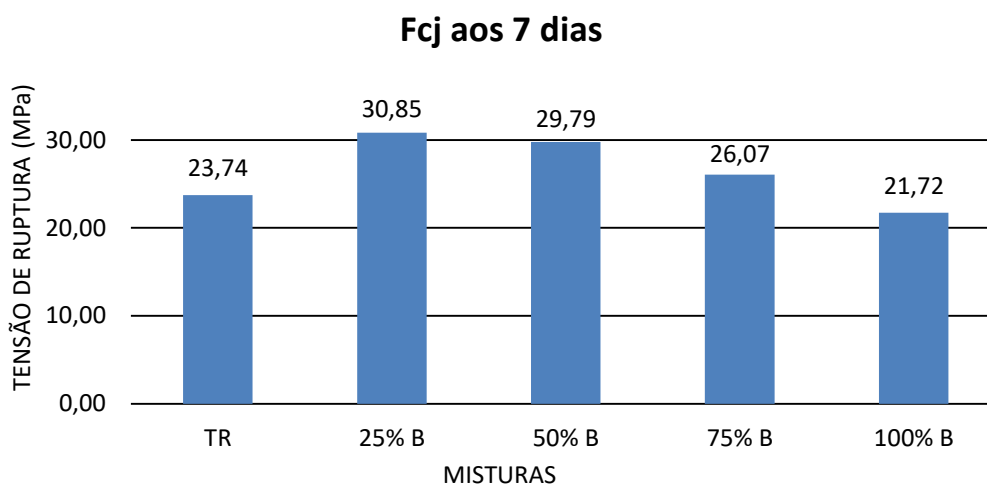


Figura 4.10 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos e graúdos, com rompimento aos 7 dias.

As amostras produzidas com a substituição de agregados miúdos e rompidas aos sete dias apresentaram índices satisfatórios em comparação às amostras do traço de referência. Apenas as amostras com a substituição de 75% dos agregados miúdos tiveram índice abaixo de 25 MPa. Ainda assim, o resultado foi superior ao traço de referência, que atingiu 23,74 MPa aos sete dias. Em percentuais, as misturas apresentaram ligeiro crescimento em relação ao índice do traço de referência, atingindo cerca de 8% de crescimento.

As amostras produzidas com a substituição de agregados graúdos e rompidas aos sete dias apresentaram índices bem próximos ao índice do traço de referência. No entanto, todas as amostras ficaram abaixo do índice do traço de referência. As amostras atingiram, em média, 95% do índice do traço de referência.

No caso das amostras produzidas com a substituição de agregados miúdos e graúdos, somente a mistura com substituição de 100% de agregados miúdos e graúdos ficou abaixo do índice do traço de referência, atingindo 91% do índice do traço de referência. As demais amostras apresentaram índices superiores ao índice do traço de referência. Inclusive, a mistura com substituição de 25% de agregados miúdos e graúdos atingiu o que se esperava atingir aos 28 dias. Neste caso, as misturas 25B, 50B e 75B atingiram, respectivamente, 30%, 25% e 10% a mais que o índice do traço de referência.

Por fim, aos vinte e oito dias foram rompidas as amostras restantes de cada mistura. O traço de referência, dosado para atingir 30 MPa aos vinte e oito dias, atingiu 40 MPa. As figuras 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam os resultados obtidos aos vinte e oito dias.



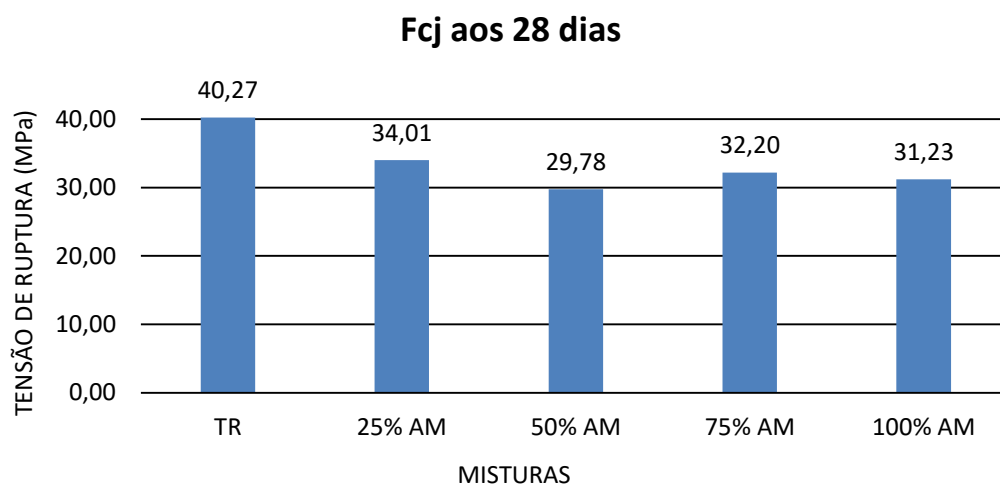


Figura 4.11 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos, com rompimento aos 28 dias.

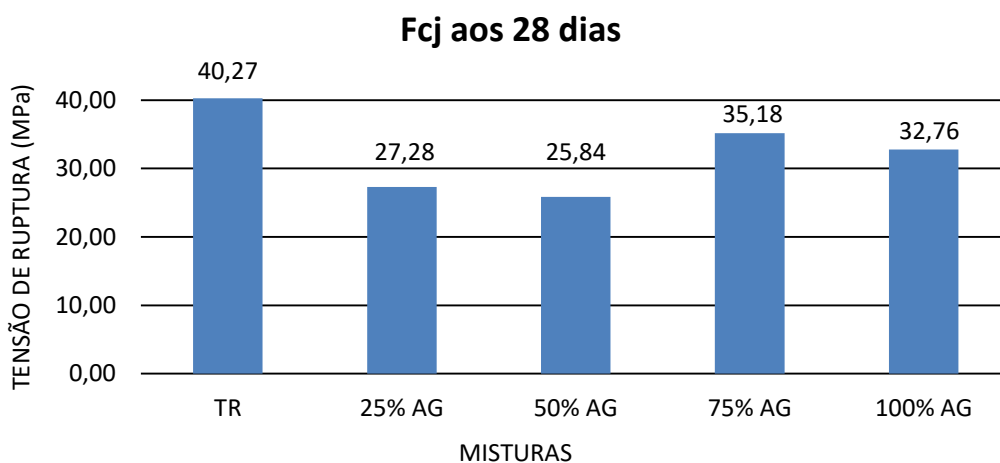


Figura 4.12 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados graúdos, com rompimento aos 28 dias.

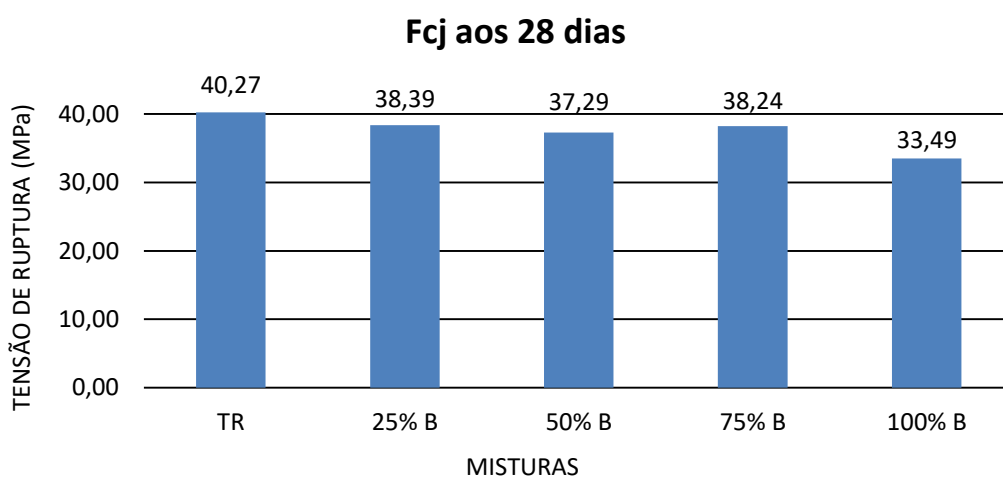


Figura 4.13 - Comparação do traço de referência com concreto produzido com a substituição de agregados miúdos e graúdos, com rompimento aos 28 dias.



As amostras produzidas com a substituição de agregados miúdos e rompidas aos vinte e oito dias apresentaram índices satisfatórios em relação ao índice dosado das amostras do traço de referência. No entanto, em comparação ao índice do traço de referência rompido aos vinte e oito dias, as amostras apresentaram aproximadamente redução de 21% de resistência. Porém, apenas as amostras com a substituição de 50% dos agregados miúdos tiveram índice abaixo de 30 Mpa.

Das amostras produzidas com a substituição de agregados graúdos e rompidas aos vinte e oito dias, apenas as misturas com 75% e 100% de substituição de agregados graúdos apresentaram índices acima de 30 MPa. As amostras de 25% e 50% de substituição de agregados graúdos apresentaram índices menores que 30 MPa, mas superiores a 25 MPa.

Já as amostras produzidas com a substituição de agregados graúdos e miúdos e rompidas aos vinte e oito dias apresentaram índices bem aproximados do índice atingido do traço de referência. No entanto, as amostras da mistura com a substituição de 100% de agregados graúdos e miúdos apresentaram índices menores do que o índice das amostras do traço de referência. Todavia, todas as misturas apresentaram índices superiores a 30 MPa.

Em todos os casos, nenhuma mistura superou o índice das amostras do traço de referência rompido aos vinte e oito dias. No entanto, das doze misturas testadas, nove atingiram índices superiores a 30 MPa. Em nenhum dos casos, as amostras tiveram índices inferiores a 25 MPa.

#### **4.5.2 Absorção por imersão**

Após os vinte e oito dias de cura, as amostras foram submetidas ao ensaio de absorção por imersão, conforme orientações da ABNT NBR 9778. Para a realização do ensaio, foram reservadas duas amostras de cada mistura.

As figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam os resultados do ensaio de absorção por imersão.

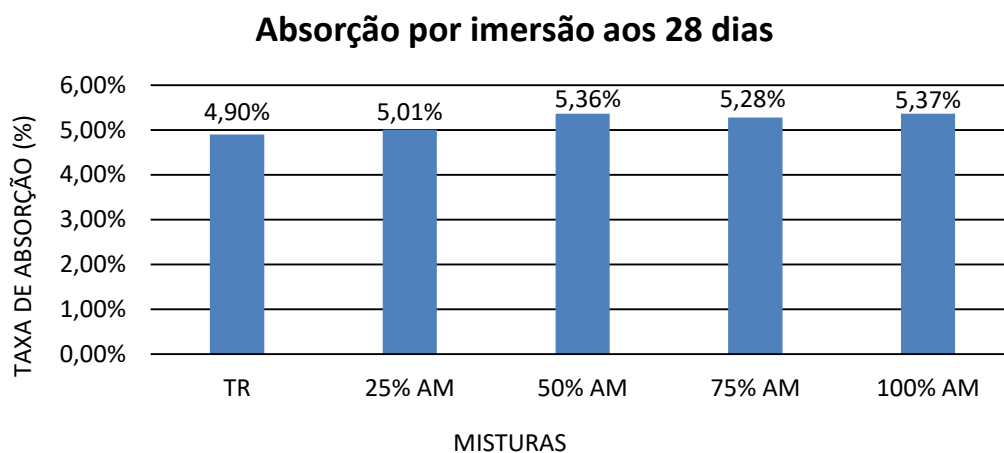


Figura 4.14 - Índices de absorção de concretos produzidos com a substituição de agregados miúdos em comparação ao traço de referência.

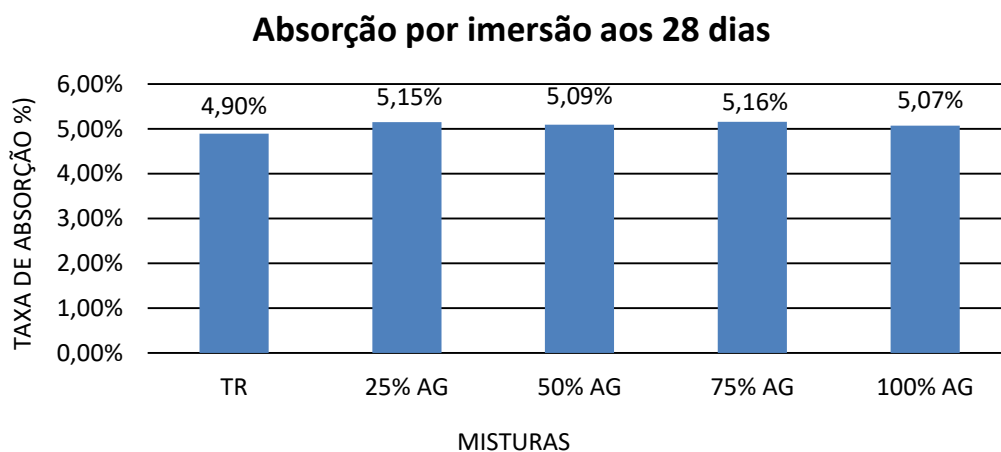


Figura 4.15 - Índices de absorção de concretos produzidos com a substituição de agregados graúdos em comparação ao traço de referência.

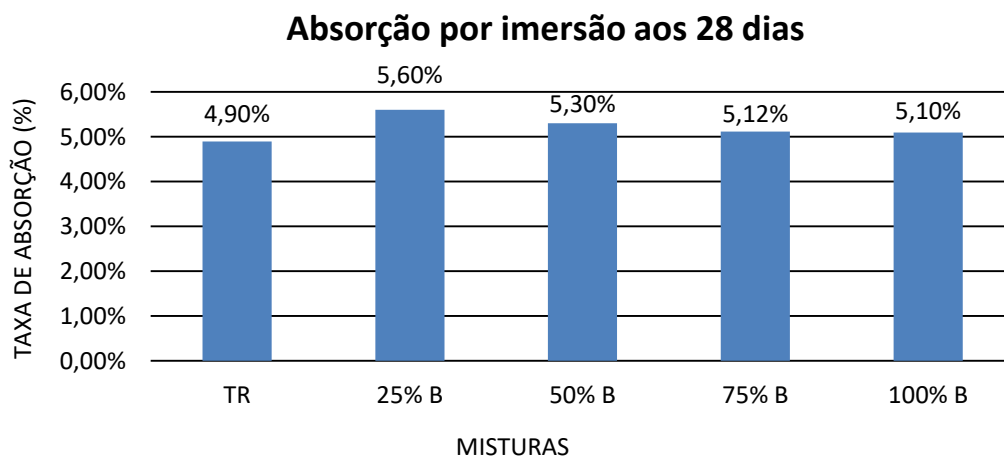


Figura 4.16 - Índices de absorção de concretos produzidos com a substituição de agregados miúdos e graúdos em comparação ao traço de referência.

Destaca-se que em nenhuma amostra houve alteração da relação água/cimento. O que causou maiores índices de absorção em concretos produzidos com a substituição dos agregados convencionais por agregados triturados. No entanto, não houve grande variação de índices.

Ainda assim, é possível observar que as misturas que apresentaram maiores índices de absorção apresentaram também menores índices de resistência à compressão.

Para todas as misturas, o critério de moldagem das amostras foi igual. Assim, pode-se considerar a presença de vazios nas misturas que apresentaram maiores índices de absorção, justificando valores menores de resistência à compressão.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 CONCLUSÕES

A caracterização química realizada por fluorescência de raio x mostrou que a concentração de óxidos alumínio, silício e ferro superaram os valores mínimos requisitados na NBR 12653. Deste modo, os agregados resultantes da trituração de resíduos de mármore e granito apresentam valor satisfatório para utilização na produção de concretos.

Considerando os resultados obtidos e ainda a relação água/cimento utilizada, observou-se que os concretos produzidos com a substituição de 25% AM, 75% AM, 100% AM, 75% AG, 100% AG, 25% B, 50% B, 75% B e 100% B apresentaram resultados satisfatórios para utilização em elementos estruturais onde se requeira a aplicação de concreto com  $f_{ck}$  de 30 MPa. Ou seja, sua aplicação é viável em elementos estruturais expostos à agressão ambiental de classe III (construções de caráter industrial ou expostas a ambientes marinhos).

Os concretos produzidos com a substituição de 50% AM, 25% AG e 50% AG apresentaram resultados inferiores a 30 MPa, mas superiores a 25 MPa, atendendo requisito mínimo de concreto em relação à classe de agressividade ambiental para zona urbana, podendo ter sua aplicação, por exemplo, em lajes. No caso de zonas rurais, onde a classe de agressividade é considerada fraca, sua aplicação se estende a vigas, pilares e lajes.

No que se refere à absorção de água, todas as misturas com substituição de agregados miúdos e graúdos apresentaram variação para cima em relação aos resultados de absorção por imersão das amostras do traço de referência. Tal fato pode explicar a diminuição nos parâmetros de resistência à compressão.

Deste modo, considerando a relação água/cimento adotada no traço de 0,46 e considerando ainda os limites permissíveis na tabela 7.1 da NBR 6118:2014, ou seja, relação água/cimento 0,60 pra classe de agressividade ambiental I, 0,55 pra classe de agressividade ambiental II e 0,50 para classe de agressividade ambiental III onde as classes de concreto devem ser maiores ou iguais a 20, 25 e 30 MPa respectivamente, acredita-se que a produção de concretos com a substituição total de agregados resultantes da trituração de sobras de corte de placas de mármore e granitos é viável no âmbito estrutural.

Deve-se considerar ainda os ganhos ambientais que a utilização de tais resíduos pode proporcionar ao meio ambiente. Em primeiro caso, destaca-se a possibilidade de reduzir a extração de recursos naturais do meio ambiente, possibilitando vida útil maior das jazidas de seixo.

Posteriormente, merece destaque a minimização de descarte dos resíduos gerados em marmorarias. Neste caso, o resultado ambiental está relacionado ao não descarte de resíduos em aterros sanitários, preservando a vida útil dos aterros. Há ainda resultados econômicos para as fontes geradoras deste resíduo, uma vez que se pode reduzir custos com transporte e destinação de resíduos em aterros sanitários.

## 5.2 SUGESTÕES

De forma a complementar este estudo e utilizar outros resíduos gerados no processo de trituração, há a possibilidade de realizar novas pesquisas, abordando os seguintes temas:

- Produção de concreto com relação água/cimento igual a 0,65 visando verificar o máximo que se pode alcançar em índices de resistência;
- Utilização do resíduo de mármore e granito na forma de pó, como material de enchimento em microconcretos;
- Utilização do resíduo de mármore e granito na forma de pó, em complemento ao cimento em argamassas.
- Quantificação total do quantitativo gerado anualmente na cidade de Manaus, bem como o mapeamento de todas as fontes geradoras;
- Elaboração de programa de coleta e trituração dos resíduos gerados, de forma a gerar material suficiente para aplicação em obras públicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: Rochas Ornamentais.** IEL, 2013.

ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto.** Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, SP, 2002.

ANDRADE, T. S. et al. Estudo da produção do bloco de concreto para a vedação contendo substituição parcial da areia por resíduo gerado no corte de granito e mármore (RCGM). In: **Congresso brasileiro de cerâmica**, v. 60, pp. 2132-2143, Águas de Lindóia, SP, 2016.

ARAÚJO, J. M. **Estruturas de concreto: A resistência à compressão e critérios de ruptura para o concreto.** Rio Grande: Dunas, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7. Ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_**NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_**NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2014.

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

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

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

\_\_\_\_\_**NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_**NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_**NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_**NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2006.

BARROS, A. R. et al. Estudos e resultados sobre a utilização do resíduo do corte de mármore e granito em materiais à base de cimento. In: **Encontro nacional de tecnologia no ambiente construído**, v. 11, pp. 3975-3984, Florianópolis, SC, 2006.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 307, de 05 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Brasília, 2002.

CALMON, J. L. et al. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: **II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas.** V. 2, pp. 64-75, Salvador, BA, 1997.

FREITAS JUNIOR, J. A. **Materiais de construção II: Dosagem de concretos.** Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2014.

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

HANAI, J. B. **Fundamentos do concreto protendido.** Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

HELENE P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** Brasília, Pini, 1992.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos Sólidos na Construção Civil: Contribuição à Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento (tese de livre docência).** São Paulo: EPUSP, 2000.

KARPINSKI, L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: Uma abordagem ambiental.** Porto Alegre: Edipucrs, 2009.

LOPES, J. L. M. P. et al. Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, na produção de concretos. In: **Congresso de pesquisa, ensino e extensão da UFG**, v. 3, 5p, Goiânia, GO, 2006.

MELLO, I. S. C., FILHO, C. C.; CHIODI, D. K. **Atlas de rochas ornamentais da amazônia brasileira**. CPRM, 2011.

MOLINARI, E. J. **Reutilização dos resíduos de rochas naturais para o desenvolvimento de compósitos poliméricos com matriz termofixa na manufatura de pedras industriais**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

MORAES, I. V. M. **Mármore e granito: Lavra, beneficiamento e tratamento de resíduos**. SBRT, 2006.

MOREIRA, J. M. S. et al. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. In: **Cerâmica**, v. 49, pp. 262-267, Campos de Goytacazes, RJ, 2003.

MOREIRAS, S. T. F. **Estudo sobre o revestimento de fachadas de edifícios altos com placas de granito ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, D. M. et al. Utilização de resíduo de granito como substituição ao cimento Portland em matrizes cimentícias. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, v. 53, pp. 1-13, Florianópolis, SC, novembro, 2011.

OLIVEIRA, L. S. **Reaproveitamento de resíduos de marmoraria em compósitos cimentícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del-Rei, 2015.

OLIVEIRA, T. N. et al. **Comportamento de blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para alvenarias**. In: **Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. I, Salvador. Bahia, 2010.

PEREIRA, R. M. N. **Pigmentação de rochas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente) – Universidade do Porto. Porto, 2009.

PINHIERO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.



QUEIROZ, F. C. et al. Estudo para o reaproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento portland. **Exacta**, v. 6, pp. 83-92, Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2008.

RODRIGUES, M, A. **Utilização dos resíduos de cortes de placas de mármore e granitos como adição na fabricação de concreto autoadensável.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2015.

SARDOU FILHO, R. et al. **Atlas de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo.** CPRM, 2013.

SILVA, S. A. C. **Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito: Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de colamento.** Espírito Santo, 1998.