

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Dissertação

**ANÁLISE DO USO DE GRÃOS DA AREIA DE BRITAGEM DE ORIGEM
GRANÍTICA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Carina Beleia Antunes

Pelotas, 2020.

Carina Beleia Antunes

**Análise do uso de grãos da areia de britagem de origem granítica na produção
de argamassas de revestimento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais de Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Dr^a. Margarete Regina Freitas Gonçalves

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

A111a Antunes, Carina Beleia

Análise do uso de grãos da areia de britagem de origem granítica na produção de argamassas de revestimento / Carina Beleia Antunes ; Margarete Regina Freitas Gonçalves, orientadora. — Pelotas, 2020.

74 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Areia de britagem granítica. 2. Forma dos grãos. 3. Argamassa de revestimentos. 4. Permeabilidade. 5. Resistência mecânica. I. Gonçalves, Margarete Regina Freitas, orient. II. Título.

CDD : 620.11063

Carina Beleia Antunes

Análise do uso de grãos da areia de britagem de origem granítica na produção de argamassas de revestimento

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciência de Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, UFPel

Data da defesa: 30 de dezembro de 2020.

Banca examinadora:

.....
Prof^a. Dr^a. Margarete Regina Freitas Gonçalves (Orientadora)
Doutora em Engenharia, área de concentração Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

.....
Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

.....
Prof. Dr. Rubens Camaratta
Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

.....
Prof^a. Dr^a. Alice Gonçalves Osorio (Suplente)
Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Agradecimentos

Agradeço e dedico essa dissertação, primeiramente, aos meus pais Valdir e Gládis por todo amor e dedicação que sempre me deram.

À minha orientadora professora Margarete Regina Freitas Gonçalves por toda paciência durante esse processo.

À minha amiga de infância, Josiele, que foi a pessoa que me ativou o gatilho para iniciar o mestrado.

Ao meu amigo Fernando que sempre me ajudou desde o período que fomos colegas de faculdade.

Ao meu amigo Bruno pelo fornecimento de material para a realização da pesquisa e demais amigos da empresa SBS Engenharia por me ajudarem disponibilizando equipamentos de laboratório.

Ao meu namorado Axel por todo amor e determinação em não me deixar desistir de encerrar esse processo.

*“Mais cedo ou mais tarde, a teoria sempre acaba
assassinada pela experiência”.
(Albert Einstein.)”*

Resumo

ANTUNES, Carina Beleia. **Análise do uso de grãos da areia de britagem de origem granítica na produção de argamassas de revestimento. 74f.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

A construção civil é responsável por elevado índice de impacto ambiental causado pelo consumo não consciente de matéria-prima. Dentre os recursos naturais mais esgotados estão as areias de rios que vem sendo substituídas por areias provenientes de britagem de rocha. O uso desse tipo de areia com procedimentos adequados pode ser uma alternativa viável para a substituição da areia natural na produção de argamassa de revestimento. Em referenciais bibliográficos são encontradas informações envolvendo análises sobre o uso de areia de britagem de rochas calcárias e basálticas e poucas envolvendo areias de rochas graníticas, resíduo este produzido em grande escala na região Sul do Rio Grande do Sul, em especial em regiões de extração de granito como a cidade do Capão do Leão. Considerando tais fatos, no presente trabalho realizou-se a análise da utilização de uma areia de britagem de origem granítica em substituição parcial (50%) e total (100%) da areia natural de uma argamassa de revestimento, produzida com o traço 1:1:6 (cimento, cal e areia, respectivamente). Na análise buscou-se verificar a influência das características dos grãos de areia granítica nas propriedades de argamassas de revestimentos. As areias utilizadas foram analisadas quanto a granulometria, massa específica, massa unitária, mineralogia, absorção e forma do grão. E, nas argamassas com areia natural e com areia granítica analisou-se no estado fresco o índice de consistência e no estado endurecido a absorção por capilaridade, a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão a três pontos. Os resultados mostraram que as argamassas com areia granítica apresentaram maior absorção por capilaridade e, também, maiores valores de resistência mecânica quando comparadas com a argamassa de areia natural, indicando que a forma angulosa do grão granítico interferiu nas propriedades analisadas.

Palavras-chave: areia de britagem granítica; forma dos grãos; argamassa de revestimentos; permeabilidade; resistência mecânica.

Abstract

ANTUNES, Carina Beleia. **Analysis of the use of grains from crushing sand of granitic origin in the production of coating mortars.** 74 f. Dissertation (Master in Materials Science and Engineering) - Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

Civil construction is responsible for a high level of environmental impact caused by the unconscious consumption of raw materials. Among the most depleted natural resources are river sands that have been replaced by sands from rock crushing. The use of this type of sand with appropriate procedures can be a viable alternative to replace natural sand in the production of coating mortar. In bibliographic references, information is found involving analyzes on the use of limestone and basaltic rock crushing sand and few involving granite rock areas of sand, a residue produced on a large scale in the southern region of Rio Grande do Sul, especially in extraction regions granite as Capão do Leão city. Considering these facts, in the present work the use of crushing sand of granitic origin was substituted in partial (50%) and total (100%) replacement of the natural sand of a mortar coating, produced with the 1: 1: 6 line (cement, lime, and sand, respectively). The analysis sought to verify the influence of the characteristics of granitic sand grains on the properties of coating mortars. The sands used were analyzed for granulometry, specific mass, unit mass, mineralogy, absorption, and shape of the grain. And, in mortars with natural sand and granite sand, the consistency index was analyzed in the fresh state and the hardened state, capillary absorption, resistance to axial compression, and tensile strength in flexion at three points. The results showed that the mortars with granitic sand presented greater absorption by capillarity and, also, higher values of mechanical resistance when compared with the mortar of natural sand, indicating that the angular shape of the granitic grain interfered in the analyzed properties.

Keywords: granite crushing sand; grain shape; mortar for coverings; permeability; mechanical resistance.

Lista de Figuras

Figura 1: Forma dos agregados	27
Figura 2: Arredondamento dos agregados	27
Figura 3: Carregamento de um caminhão na pedreira	29
Figura 4: Esquema simplificado de um processo de britagem	30
Figura 5: Vista geral de uma instalação de britagem	31
Figura 6: Esquema simplificado do processo de obtenção de areia de britagem.....	31
Figura 7: Depósito de areia de britagem da empresa SBS Engenharia (2018).....	32
Figura 8: Britador usado no processo de redução mecânica da rocha por impacto..	33
Figura 9: Britador utilizado no processo de redução mecânica combinando impacto e desgaste por atrito.....	34
Figura 10: Britador utilizado no processo de redução mecânica combinando impacto, cisalhamento e compressão.....	34
Figura 11: Britador de redução mecânica por compressão e impacto utilizado em um britador de mandíbula que brita sem atrito	35
Figura 12: Análise comparativa da forma morfológica dos grãos de areia: (a) natural e (b) britada	36
Figura 13: Fluxograma representativo do desenvolvimento da pesquisa.....	42
Figura 14: Análise mineralógica da areia natural, por difração de raio-X (DRX)	45
Figura 15: Morfologia dos grãos de areia natural retidos na peneira #4,75	45
Figura 16: Análise mineralógica da areia granítica, por difração de raio-X (DRX)	47
Figura 17: Morfologia dos grãos de areia granítica retidos na peneira #4,75.....	47
Figura 18: Distribuição granulométrica das areias natural (a) e granítica (b), conforme a NBR NM 248 (ABNT,2003)	48
Figura 19: Tubos de PVC utilizados como moldes na produção dos corpos de provas cilíndricos	51
Figura 20: Moldes de madeira de compensado utilizados para a produção dos corpos de provas prismáticos.....	51
Figura 21: Cura úmida dos corpos de prova cilíndricos	54
Figura 22: Prensa utilizada no ensaio de ruptura dos corpos de prova cilíndricos....	55

Figura 23: Corpo de prova cilíndrico com 28 dias de cura, pronto para o ensaio de resistência à compressão axial	55
Figura 24: Acessório utilizado no ensaio de ruptura dos corpos de prova prismáticos	56
Figura 25: Corpo de prova prismático com 28 dias de cura, pronto para o ensaio de resistência à tração na flexão a três pontos	57
Figura 26: Análise comparativa da absorção por capilaridade das três argamassas testadas.....	59
Figura 27: Análise comparativa da resistência à compressão axial	60
Figura 28: Análise comparativa da resistência à tração na flexão a três pontos	62

Lista de Tabelas

Tabela 1: Influência do tamanho de partícula da areia nas propriedades das argamassas.....	24
Tabela 2: Classificação dos agregados segundo a textura superficial e exemplos...	25
Tabela 3: Classificação de grãos de areia segundo a forma das partículas e exemplos.....	28
Tabela 4: Tipos de rochas utilizadas no Brasil para a produção de areia de britagem	29
Tabela 5: Trabalhos publicados sobre substituição de areia natural em argamassas	38
Tabela 6: Características cimento Portland CP IV-32	43
Tabela 7: Características da cal hidratada	43
Tabela 8: Caracterização física da areia natural	44
Tabela 9: Teor de absorção de água dos grãos de areia natural	46
Tabela 10: Caracterização física da areia de britagem	46
Tabela 11: Teor de absorção de água dos grãos de areia granítica	48
Tabela 12: Formulações das argamassas testadas	50
Tabela 13: Número de corpos de provas	52
Tabela 14: Teor de água e índice de consistência	53
Tabela 16: Resultados de resistência à compressão axial (MPa).....	73
Tabela 17: Resultados de resistência à tração na flexão a três pontos (MPa).....	73
Tabela 18: Resultado de Análise de Variância – valor p – da resistência à compressão.....	74
Tabela 19: Resultado de Análise de Variância – valor p – da resistência à flexão....	74

Sumário

Resumo	7
1. Introdução.....	14
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1. <i>Objetivo geral</i>	<i>16</i>
1.1.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>16</i>
1.2 Limitações da pesquisa.....	17
2.1 Argamassas de revestimento	19
2.2 Agregados miúdos	23
2.2.1. <i>Distribuição Granulométrica</i>	<i>23</i>
2.2.2. <i>Textura superficial dos grãos</i>	<i>24</i>
2.2.3 <i>Forma dos grãos</i>	<i>25</i>
2.3 Agregado britado	28
2.3.1. <i>Tipos de britadores.....</i>	<i>32</i>
2.3.2 <i>Areia de britagem</i>	<i>35</i>
2.3.3 <i>Uso de areia de britagem em substituição ao agregado natural</i>	<i>37</i>
3. Materiais e Métodos.....	42
3.1 Seleção e caracterização das matérias-primas	43
3.1.1 <i>Aglomerantes</i>	<i>43</i>
3.1.2 <i>Agregados miúdos</i>	<i>44</i>
3.2 Produção das argamassas.....	49
3.2.1 <i>Obtenção dos corpos de prova</i>	<i>50</i>
3.2.2 <i>Caracterização no estado fresco.....</i>	<i>52</i>
3.2.3 <i>Caracterização no estado endurecido.....</i>	<i>53</i>
3.2.3.1. <i>Absorção por capilaridade.....</i>	<i>53</i>

3.2.3.2. Resistência à compressão axial	54
3.2.3.3. Resistência à tração na flexão a três pontos.....	56
3.3 Análise estatística de variância ANOVA	57
4. Resultados e discussão.....	58
4.1 Análise do teor de água necessário à produção das argamassas .	58
4.2 Análise da absorção por capilaridade	59
4.3 Análise da resistência à compressão axial	60
4.4 Análise da resistência à tração na flexão a três pontos.....	61
5. Conclusões	63
Referências bibliográficas.....	66
APENDICES.....	71

1. Introdução

A construção civil é o ramo de atividade que mais consome recursos não renováveis em todo o planeta. No entanto, também é um setor com uma vasta gama de possibilidades de incorporar rejeitos gerados de diversas atividades e assim minimizar seu próprio impacto.

Uma forma de minimizar tal situação é associar a problemática da redução do impacto ambiental com a elevada demanda na necessidade de produtos e tecnologias construtivas, que garantam um melhor desempenho e maior durabilidade através de pesquisas de inovação tecnológica para o ramo da construção civil.

Nesse contexto se insere a importância de obtenção de fontes alternativas em substituição a areia natural, tendo em vista as consequências de sua exaustiva exploração, com consequente agressão aos leitos dos rios e de suas margens, bem como a redução das áreas de exploração devido à restrição dos órgãos ambientais diante da liberação de novas licenças de operação para esse tipo de recurso natural.

Dentre diversas possibilidades, cada vez mais tem crescido o interesse no uso de agregados reciclados, principalmente, para a produção de concretos e argamassas. O uso de areia de britagem, por exemplo, em substituição a areia natural é uma alternativa que vem despertando grande interesse.

Pesquisas recentes feitas por Kazmierczak, Rosa e Arnold (2016), que realizaram um estudo analisando a influência da adição de filler de areia de britagem de origem basáltica nas argamassas de revestimento, e por Baderina *et al.* (2013), que analisaram a substituição de areia natural por areia de britagem de calcário em argamassas de revestimento e sua exposição em soluções químicas (cal e ácido clorídrico), mostraram a viabilidade das substituições.

Outro trabalho que mostra a possibilidade do emprego da areia de

britagem é o de Cepuritis *et al.* (2017) que, ao analisarem a influência da forma dos grãos finos do agregado artificial proveniente de trituração em um britador do tipo VSI¹, perceberam a influência destes nas propriedades de resistência à flexão e à compressão axial em argamassas.

Na pesquisa de Santos, Veiga, Silva e Brito (2020), eles analisaram a influência dos agregados miúdos nas argamassas, permitindo estabelecer uma relação quanto ao desempenho, distribuição granulométrica e porosidade. No trabalho foram analisados grãos de areia sílica natural, sílica triturada, calcária, basáltica e granítica.

Srivastava e Singh (2020) analisaram as características física, química, mineralógica e morfológica de diversas alternativas em substituição ao agregado miúdo nas argamassas, dentre elas a areia de rocha britada. Foi feita uma análise crítica das argamassas nos estados fresco e endurecido e, também, sobre a sua durabilidade.

A areia de britagem, assim como outros materiais produzidos nas unidades industriais, é estocada em montes ao ar livre sujeitos às intempéries, podendo gerar impactos ambientais e poluição atmosférica, sendo, por isto, a sua reciclagem uma alternativa ambientalmente interessante. Além disto, ela é um produto não valorizado dentro das empresas que produzem agregados britados, sendo muitas vezes mantidos em estoque por não ter uma classificação usual dentro do ramo de comercialização de agregados. Por falta de conhecimento das características das areias britadas, esse material é utilizado em situações sem grandes exigências tecnológicas como a comercialização para uso em aterros.

Na revisão bibliográfica feita para o embasamento da presente dissertação, verificou-se que a maioria das pesquisas com areia de britagem envolveram estudos com resíduos de rochas basálticas e calcárias e que

¹ Britador do tipo VSI - máquina recomendada para alta redução de material e melhoria em sua forma, dando um formato cúbico ao produto final. Fonte: <http://imic.com.br/produtos-novos/britador-de-impacto> (08/01/2021).

poucos trabalhos com areia de britagem de origem granítica são visualizados.

Considerando os fatos acima, no presente trabalho analisou-se a influência do uso de grãos de britagem de origem granítica na produção de argamassas de revestimento, visando a obtenção de um produto com propriedades tecnológicas capazes de competir com as de uma argamassa com areia natural.

A justificativa para o uso do resíduo de britagem está na sua produção em grande escala na região de desenvolvimento desse estudo, na sua constituição predominantemente quartzosa (similar à da areia natural) e na possibilidade de preservação do meio ambiente a partir da redução do consumo de areias naturais provenientes de rios.

1.1 Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho foi o de analisar argamassas de revestimento produzidas com grãos de areia de britagem de origem granítica.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral do trabalho foram propostas as seguintes etapas:

- Identificar a forma e determinar o teor de absorção de água dos grãos da areia de britagem de origem granítica;
- Obter argamassas de revestimento com substituição da areia natural por areia de britagem de origem granítica;
- Verificar a influência das características do grão da areia de britagem de origem granítica nas propriedades de absorção por

capilaridade, resistência à compressão axial e resistência à compressão axial das argamassas de revestimento obtidas;

- Aplicar tratamento estatístico através do Software *Statistica*, versão 7.0, visando identificar a real influência da forma dos grãos de areia de britagem de origem granítica na produção de argamassas.

1.2 Limitações da pesquisa

No desenvolvimento da dissertação apresentada ocorreram limitações que resultaram em alterações do projeto original, sendo estas:

- Concessão da bolsa de pós-graduação por apenas 12 meses. Essa condição resultou na necessidade de obtenção de um trabalho que reduziu o tempo de dedicação com as atividades da pesquisa;
- Pandemia do coronavírus (2020). Situação que impossibilitou o acesso aos laboratórios da Universidade Federal de Pelotas e o desenvolvimento integral da parte experimental da pesquisa;
- Utilização de um laboratório privado sem infraestrutura adequada;
- Necessidade de adequação dos ensaios da pesquisa às condições de trabalho no laboratório privado;

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo está inserida a introdução com a problemática do estudo e sua importância, os objetivos gerais e específicos, as delimitações e a estrutura da dissertação. No capítulo dois são apresentados conceitos fundamentais sobre argamassas, resultados de pesquisas sobre o comportamento de argamassas com substituição do agregado miúdo e sobre a interferência do formato dos grãos nas suas propriedades físicas e mecânicas. No capítulo três é feita uma descrição dos materiais e métodos utilizados no

desenvolvimento da pesquisa. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. No quinto capítulo ocorrem as conclusões da pesquisa. E, no sexto e último capítulo são apresentadas sugestões para futuros trabalhos

Na sequência, tem-se os referenciais bibliográficos e os Apêndices.

2. Revisão bibliográfica

Na revisão bibliográfica do trabalho fez-se um estudo sobre argamassas de revestimento e propriedades no estado fresco e estado endurecido, agregado miúdo e agregado britado e pesquisou-se trabalhos recentes envolvendo substituições em argamassas.

2.1 Argamassas de revestimento

Segundo a NBR 13529 (ABNT 2005), a argamassa é definida como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou instalação própria (argamassa industrializada). A norma ainda classifica as argamassas segundo o seu emprego como: argamassas para assentamento (em alvenaria de vedação, estrutural e encunhamento); argamassas para revestimento de paredes e tetos (interno e externo); argamassas de uso geral; argamassas para reboco; argamassas decorativas em camada fina e argamassa decorativa em monocamada.

Quanto a matéria-prima, nos dias de hoje tem-se diversos estudos de materiais para substituição tanto do agregado quanto do aglomerante, como, por exemplo, trabalhos envolvendo o uso de resíduos de construção civil, cinzas de casca de arroz, cerâmica e vidro.

Para um bom desempenho, as argamassas devem ter no estado fresco resistência à tração na flexão, coeficiente de capilaridade, densidade de massa, retenção de água e resistência potencial de aderência à tração e no estado endurecido resistência à compressão e densidade de massa (NBR 13281: ABNT 2005).

Especificamente sobre as argamassas de revestimento, a

NBR 13529 (ABNT 2013) define que estas se constituem de uma ou mais camadas superpostas usadas para cobrimento de uma superfície, que deverá se apresentar apta a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final, decorativo ou não.

As argamassas de revestimento são usadas para recobrimento de paredes de alvenaria, muros ou estruturas de concreto armado e devem ter aderência ao substrato, contribuir para a impermeabilidade e em menor escala, para o isolamento termoacústico (RECENA, 2015).

Segundo Casareck (2007), as argamassas de revestimento podem ser constituídas com as seguintes camadas:

- Chapisco: camada de preparo da base que tem a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento.
- Emboço: camada de regularização da base feita para receber outra camada de reboco ou de algum tipo de revestimento decorativo.
- Reboco: camada utilizada para o cobrimento do emboço feita para receber acabamento decorativo ou constituir o acabamento final.
- Camada única: revestimento de um único tipo de argamassa aplicado sobre a base sobre o qual é aplicada uma camada decorativa.

Ainda de acordo com Casareck (2007), as argamassas de revestimento pela sua condição de uso devem apresentar no estado fresco as seguintes propriedades:

- Coesão: força física de atração existente entre as partículas solidas presentes nas argamassas.
- Adesão inicial: é a união inicial entre a argamassa no estado fresco ao substrato.

- Retenção de água: refere-se como a argamassa se comporta frente à evaporação da água de amassamento. Argamassas com maior capacidade de retenção de água apresentam uma perda lenta de água desencadeando um progressivo ganho de resistência e aumentando a possibilidade de fissuração, essa capacidade também é muito importante para garantir características de aderência das argamassas aos substratos.
- Retração: está ligada ao movimento de água no interior da pasta da argamassa ou para o exterior da mesma, em consequência a este processo está ligado o fenômeno de fissuração.
- Plasticidade: é a propriedade da argamassa onde ela tende a deformar-se e reter certas deformações após a redução das tensões aplicadas.
- Trabalhabilidade: pode ser entendido como a maior ou menor facilidade de aplicar a argamassa em sua posição final e cumprir adequadamente com a sua finalidade. A trabalhabilidade da argamassa deve estar relacionada conforme o tipo de aplicação, no entanto, uma argamassa para assentamento e outra para revestimento deverão apresentar características de trabalhabilidade distintas. A modificação da trabalhabilidade é sempre ligada à quantidade de água que é utilizada em sua preparação, assim como a falta de água pode estar negativamente relacionada a trabalhabilidade o excesso da mesma pode causar segregação dos componentes da argamassa.
- Reologia: estuda o fluxo e a deformação das argamassas analisando uma relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação em um período de tempo especificado. Essa propriedade está relacionada com a fluidez e à capacidade que a mistura tem em resistir ao escoamento.

- Ar incorporado: a presença de ar incorporado na mistura da argamassa melhora a trabalhabilidade contribuindo para o aumento da área de contato entre argamassa e substrato.
- Porosidade: os poros presentes na pasta apresentam variação conforme o tipo de agregado a ser utilizado, alguns poros são totalmente internos enquanto outros apresentam aberturas para a superfície da partícula e como consequência podem permitir a penetração de água.
- Permeabilidade: é a capacidade de permeação de água pela argamassa.
- Resistência à compressão: é a capacidade da argamassa em resistir à ruptura quando submetidos a esforços de compressão.
- Resistência à tração na flexão: é a capacidade da argamassa em resistir à ruptura quando submetida a esforços de tração. Considerando que a resistência a aderência de uma argamassa ao substrato deve ser de 0,3 Mpa, a resistência à tração deverá ser maior que esse valor para apresentar condições da transferência das tensões para a interface da argamassa com o substrato.

De acordo com Recena (2015), a durabilidade de uma argamassa é a capacidade que esta tem de se manter estável química e fisicamente quando em condições de exposição a um determinado ambiente e, também, de resistir à submissão esforços, determinados na fase de projeto da mesma. Resumidamente, a durabilidade da argamassa está relacionada ao meio de exposição e ao tipo de esforço mecânico que atinge os substratos argamassados. Para o autor, para que a durabilidade da argamassa seja atingida a principal preocupação durante a dosagem deve ser com a umidade (fator água/cimento) e os sais solúveis presentes nas matérias-primas constituintes.

2.2 Agregados miúdos

Os agregados miúdos para argamassa são caracterizados conforme as especificações da norma destinada a agregados para concreto, a NBR 7211(ABNT,2009), que define que os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento. Ainda segundo a norma, nos agregados miúdos, devem ser analisadas a distribuição granulométrica, a forma e a textura dos grãos do agregado miúdo, tendo em vista a influência dessas características nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa

2.2.1. Distribuição Granulométrica

Uma das características do agregado miúdo com grande importância na qualidade das argamassas é a granulometria, visto que esta exerce influência sobre a trabalhabilidade no estado plástico e na compacidade e resistência após o estado endurecido (AMBROZEWIZCN, 2012).

Para satisfazer as condições de agregado miúdo conforme a ABNT 7211:2009, define-se que os grãos devem apresentar granulometria passante na peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficarem retidos na peneira com abertura de malha 0,15 mm. É considerado filer o material granular que passa na peneira com abertura de malha de 0,15 mm. Os materiais com dimensão inferior a 0,075 mm e, também, os materiais solúveis em água presentes nos agregados miúdos são considerados como materiais pulverulentos.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo influencia na formação do índice de vazios, propriedade que atua diretamente na permeabilidade, resistência mecânica e durabilidade das argamassas. Como exemplo da influência do tamanho do grão de areia nas argamassas cita-se as argamassas industrializadas que, por se utilizarem de areia com

granulometria mais fina, tem suas propriedades finais alteradas conforme demonstrado na tabela 1.

Tabela 1: Influência do tamanho de partícula da areia nas propriedades das argamassas.

Tipo de argamassa	Areia / Tamanho médio (mm)	Propriedades			
		Densidade estado fresco (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Absorção (%)
Argamassa convencional (traço 1:1:6*)	4,8mm	1890	3,4	2,0	14,07
Argamassa industrial	2,4mm	1800	5,5	2,1	21,5

*cimento/ cal / areia, respectivamente.

2.2.2. Textura superficial dos grãos

A textura superficial do agregado influencia na sua aderência na pasta de cimento e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas. Os melhores resultados de aderência com a pasta de cimento encontram-se nos agregados com superfície áspera (RECENA, 2015).

A norma brasileira ABNT NBR 7389-1: 2009 indica que a textura superficial do grão dos agregados miúdos deve ser polida, fosca ou rugosa, sendo esta classificação feita com base em uma avaliação visual (FARIAS e PALMEIRA, 2007).

Em busca de uma padronização, Santos e Farias (2011) definiram uma classificação para a textura dos grãos da areia baseada no grau de polimento da superfície das partículas. A Tabela 2 apresenta as texturas identificadas.

Tabela 2: Classificação dos agregados segundo a textura superficial e exemplos

Grupo	Textura Superficial	Características	Exemplos
1	Vítrea	Fratura conchoidal	Flint negro, escória vitrificada
2	Lisa	Desgastado por água ou alisado devido à fratura de rochas laminadas ou de granulação fina	Seixo, chert, ardósia, mármore e alguns riólitos
3	Granular	Fratura mostrando grãos mais ou menos uniformes arredondados	Arenito, oólito
4	Áspera	Fratura áspera de rochas de granulação fina ou média contendo constituintes cristalinos de difícil visualização	Basalto, felsito, pórfiro, calcário
5	Cristalina	Presença de constituintes cristalinos de fácil visualização	Granito, gabro, gnaiss
6	Alveolar	Com poros e cavidades visíveis	Tijolo, pedra-pome, escória expandida, clínquer, argila expandida

Fonte: Neville e Brooks (2013, p. 46)

Segundo Recena (2015), os agregados que apresentam as texturas mais ásperas favorecem a aderência com a pasta de cimento. Em estudos realizados pelo autor, foi possível constatar que no estado fresco as argamassas confeccionadas com grãos mais ásperos apresentam menor trabalhabilidade, necessitando de um maior consumo de água para melhorar tal propriedade, e maior resistência mecânica quando comparadas com argamassas confeccionadas com grãos de textura muito lisa.

2.2.3 Forma dos grãos

Outra característica dos agregados miúdos que influencia nas características das argamassas é a forma do grão.

No Brasil não existem normas para classificar a forma do grão. Em função disto, na prática, se utiliza o método do paquímetro para definir o grau de cubicidade proposto pela norma NBR 7809 (ABNT, 2008), que

consiste em calcular o índice de forma, que é a relação entre comprimento e espessura de todos os grãos separados em frações retidas entre as peneiras de abertura de 19mm a abertura de 37,5mm da série normal e intermediária. É necessário secar as amostras em estufas em temperatura entre 105 a 110°C, e após realizar a análise granulométrica desprezando frações passantes na peneira de malha 9,5 mm ou que as porcentagens retidas forem menores que 5%, cada fração deve ser quarteada até obter o número de grãos conforme a equação 1.

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

200 - número de grãos necessários para realizar o ensaio.

N_i - número de grãos a serem medidos na fração i .

F_i - porcentagem de massa retida individual na fração i .

As medidas devem ser realizadas com auxílio de um paquímetro aferido de resolução 0,1 mm e é necessário efetuar a medida do comprimento e da espessura de cada grão obtido.

Além disso, outras técnicas são utilizadas para a classificação da forma dos grãos. Por exemplo, a técnica de Santos e Farias (2011) que classifica a forma dos grãos como lamelar, cúbica, alongada-lamelar e alongada, conforme apresentado na Figura 1, considerando a relação entre as dimensões B/A e C/B. Os autores ainda classificam o arredondamento dos grãos como muito angular, angular, sub-angular, sub-redonda e redonda (Figura 2).

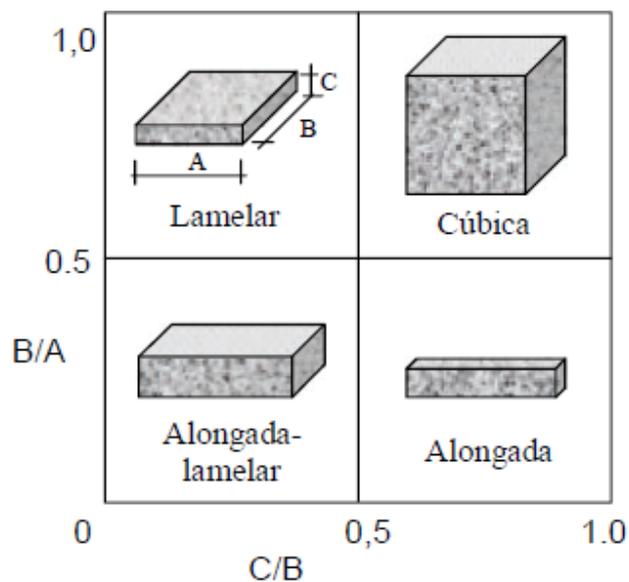


Figura 1: Forma dos agregados

Fonte: Santos e Farias (2011)

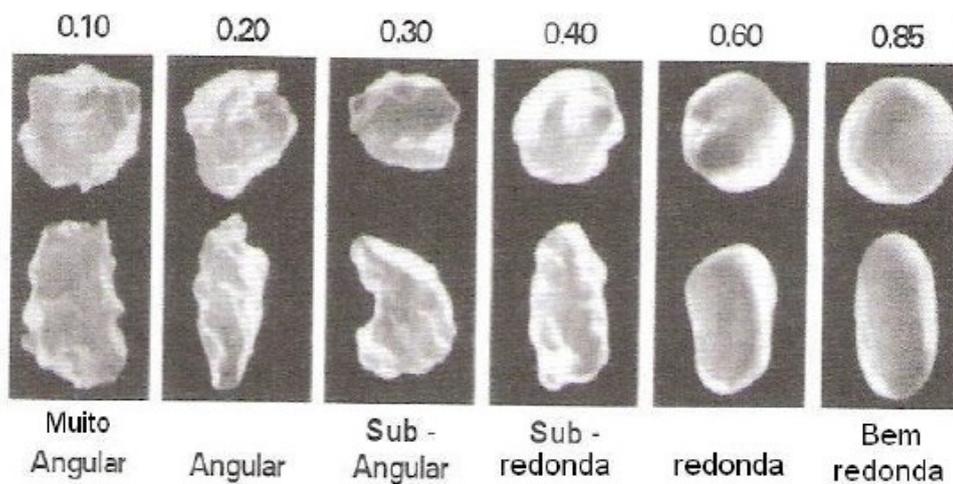


Figura 2: Arredondamento dos agregados

Fonte: Santos e Farias (2011).

Neville e Brooks (2013) classificam os grãos como mostrado na tabela 3. Segundo os autores, a forma arredondada do grão de areia é consequência da resistência mecânica e do tipo de desgaste da rocha mãe, situação essa diferenciada do agregado britado, matéria-prima desta pesquisa, cuja forma do grão é consequência do tipo da rocha mãe e das

características do britador no tocante ao processo de redução e a sua taxa de redução.

Tabela 3: Classificação de grãos de areia segundo a forma das partículas e exemplos

Forma	Descrição	Exemplos
Arredondada	Totalmente desgastado pela ação da água ou totalmente conformado por atrito	Seixo de rio ou zonas litorâneas marítimas; areia de deserto, de origem eólica ou de litoral marítimo
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente conformado por atrito com arestas arredondadas	Outros seixos, flint
Lamelar	Material em que a espessura é menor que as outras duas dimensões	Rochas lamelares
Angulosa	Possuem arestas bem definidas na interseção de faces razoavelmente planas	Pedras britadas de todos os tipos, talus e escória britada
Alongada	Material, em geral, anguloso no qual o comprimento é consideravelmente maior que as outras duas dimensões	–
Lamelar e alongada	Material com o comprimento bem maior que a largura e este bem maior que a espessura	–

Fonte: Neville e Brooks (2013)

Os grãos que apresentam maior angulosidade irão proporcionar argamassas com maiores resistências, pois implicam melhor entrosamento entre as partículas individuais, por outro lado tais partículas possuem maior área superficial exigindo maior quantidade de água para melhorar a trabalhabilidade (KAZMIERCZAK, ROSA e ARNOLD, 2016).

2.3 Agregado britado

O agregado britado tem sua origem em diferentes tipos de rochas. A tabela 4 apresenta as rochas mais comumente utilizadas em processos de britagem no Brasil e a figura 3 exemplifica o processo de carregamento de

material após detonação da rocha.



Figura 3: Carregamento de um caminhão na pedreira

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Tabela 4: Tipos de rochas utilizadas no Brasil para a produção de areia de britagem

Denominação Patológica	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico

Fonte: Bernucci *et al.* (2008, p. 118)

A figura 4 mostra esquematicamente uma operação de britagem de rocha, onde é utilizado um britador de mandíbula como primário e um britador de cone como secundário. Como pode-se ver, no britador primário obtém-se as rochas de menor tamanho e a areia de britagem e no britador secundário obtém-se as britas de diferentes tamanhos e o pó de pedra.

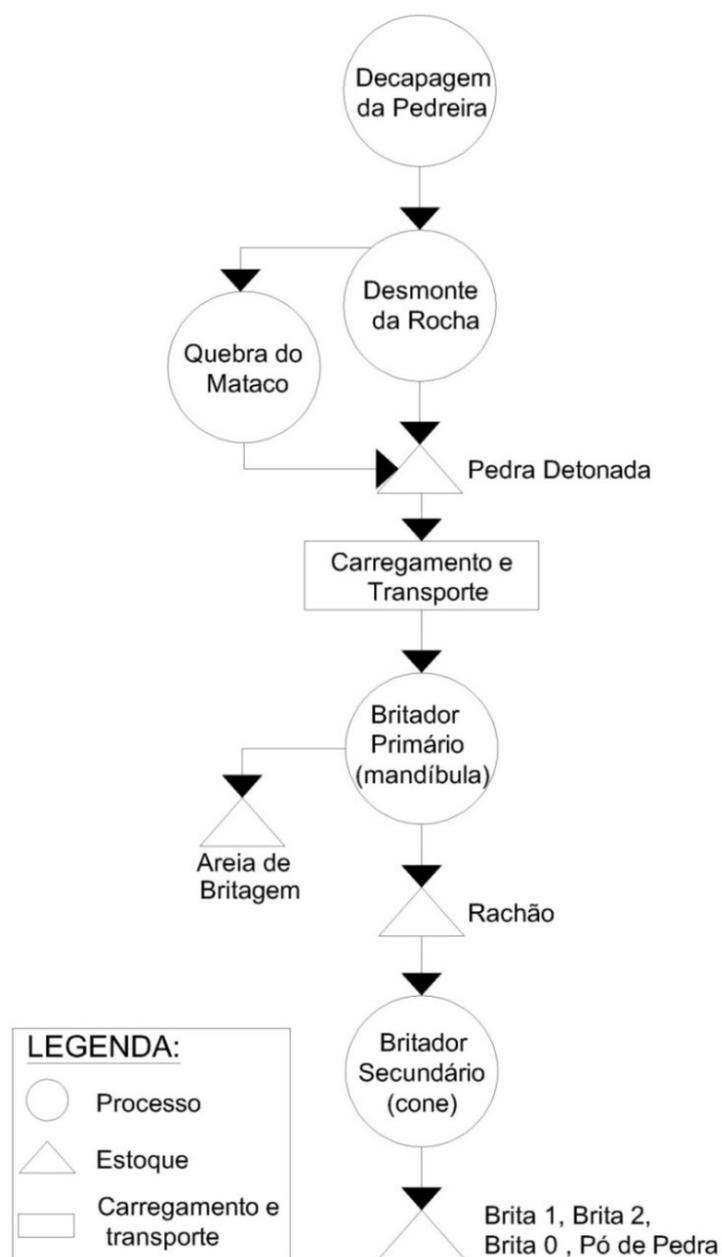


Figura 4: Esquema simplificado de um processo de britagem

A figura 5 apresenta uma planta completa de uma instalação de britagem e a figura 6 mostra o esquema de britagem da empresa que forneceu o material utilizado na pesquisa desenvolvida nessa dissertação.



Figura 5: Vista geral de uma instalação de britagem

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

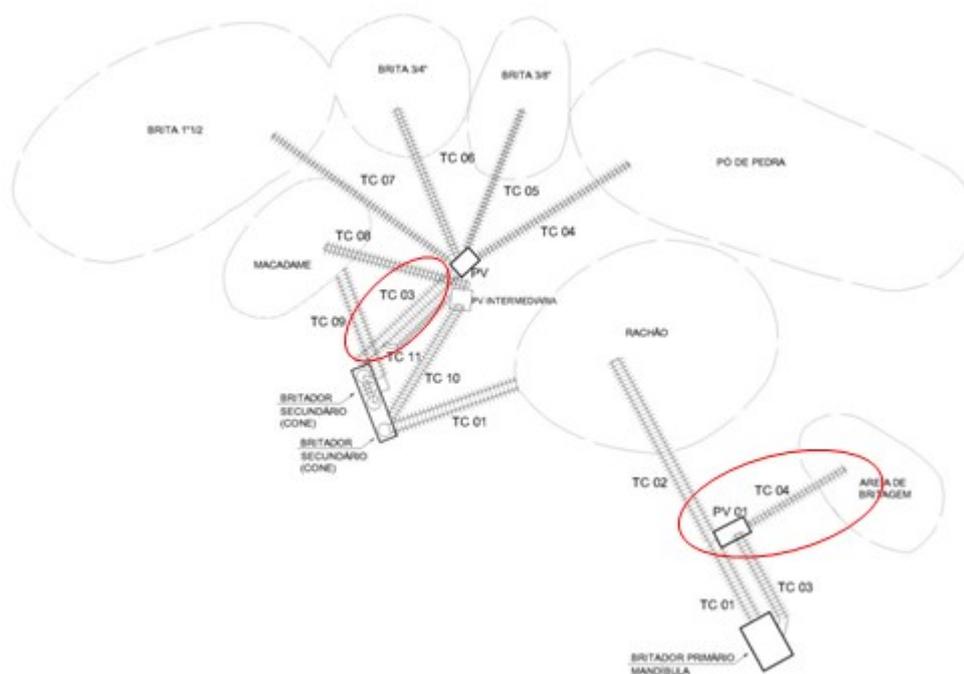


Figura 6: Esquema simplificado do processo de obtenção de areia de britagem

Fonte: SBS Engenharia Ltda., adaptado pela autora.

No processo da empresa parceira, a rocha primeiramente é colocada no britador primário, chamado de mandíbula, a partir do qual o material britado é classificado por peneiras e armazenado em montes conforme classificação. A areia de britagem por não ser um material comercializado é separada já após o britador, sendo transportado pelas correias transportadoras TC-03 e TC-04.

A figura 7 mostra uma área de depósito de areia de britagem, onde é possível ver o grande volume gerado.



Figura 7: Depósito de areia de britagem da empresa SBS Engenharia (2018)

2.3.1. Tipos de britadores

Tipos diferentes de britadores podem ser utilizados no processo de britagem e a forma de processamento destes define diferentes propriedades para o grão processado (RAJAN e SINGH, 2017).

Além do tipo de britador, outro fator importante analisado por Cepuritis *et al.* (2016) para caracterizar a areia de britagem é a velocidade de operação do motor. Tal estudo averiguou que um britador com maior

velocidade de operação produz areias com partículas com formas mais angulosas e superfícies mais irregulares.

Segundo a Bernucci *et al.* (2008) existem quatro tipos de mecanismos para a redução mecânica das rochas: impacto, desgaste por atrito, cisalhamento e compressão, e um tipo de britador mais adequado para cada processo.

Na redução por impacto ocorre a colisão instantânea de um objeto contra o outro. Este mecanismo é usado na maioria dos britadores (Figura - 8) e pode ser por gravidade ou dinâmico.

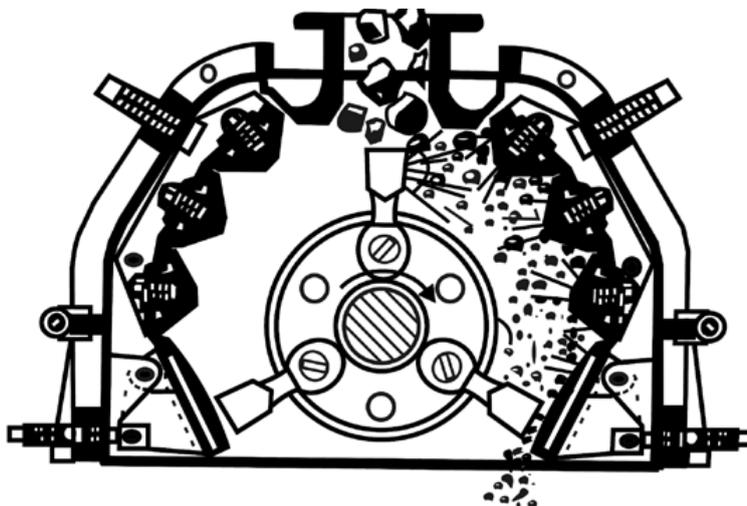


Figura 8: Britador usado no processo de redução mecânica da rocha por impacto
Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

No mecanismo de desgaste por atrito o material é triturado pela ação de desgaste entre duas superfícies duras (Figura 9). Esse processo de redução é utilizado nos martelos de trituras, nos britadores giratórios e nos de cone.

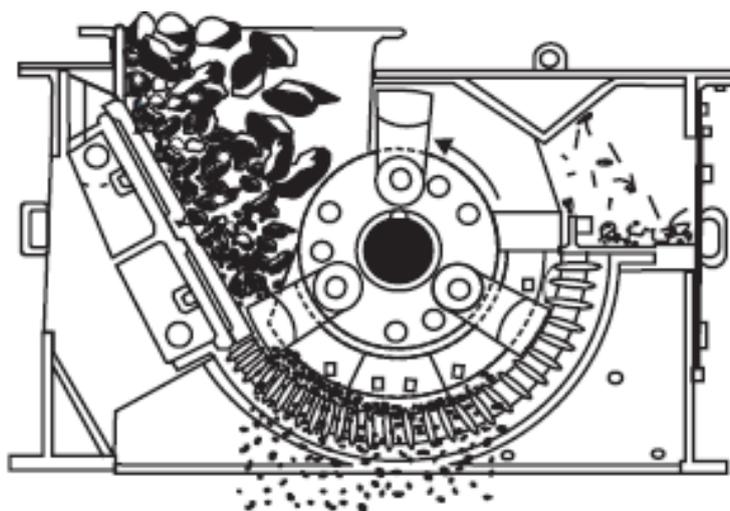


Figura 9: Britador utilizado no processo de redução mecânica combinando impacto e desgaste por atrito

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

No processo de cisalhamento ocorre a ação de um talhador que é usado em combinação com impacto e compressão (Figura 10).

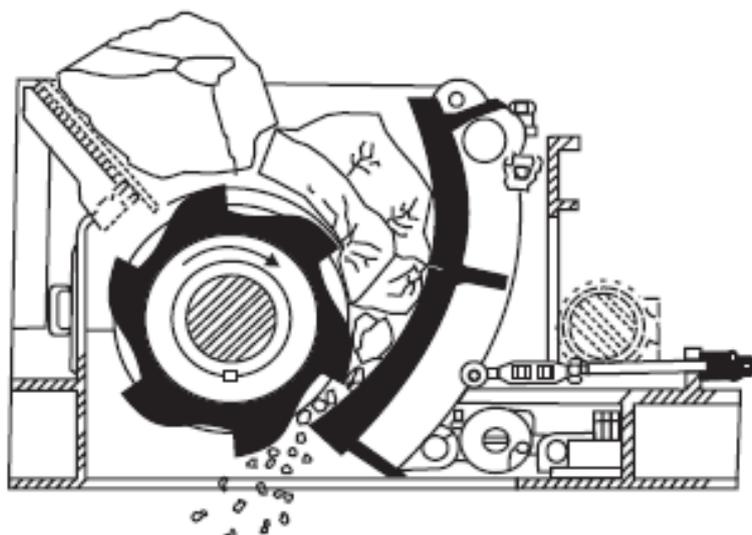


Figura 10: Britador utilizado no processo de redução mecânica combinando impacto, cisalhamento e compressão

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

No processo de compressão ocorre a redução por forças compressivas entre duas superfícies (Figura 11). Os britadores de mandíbula utilizam-se desse sistema porque é o mais efetivo para processar

tamanhos maiores de rochas muito duras e abrasivas. Por este motivo, normalmente, são utilizados como britador primário no processo de britagem.

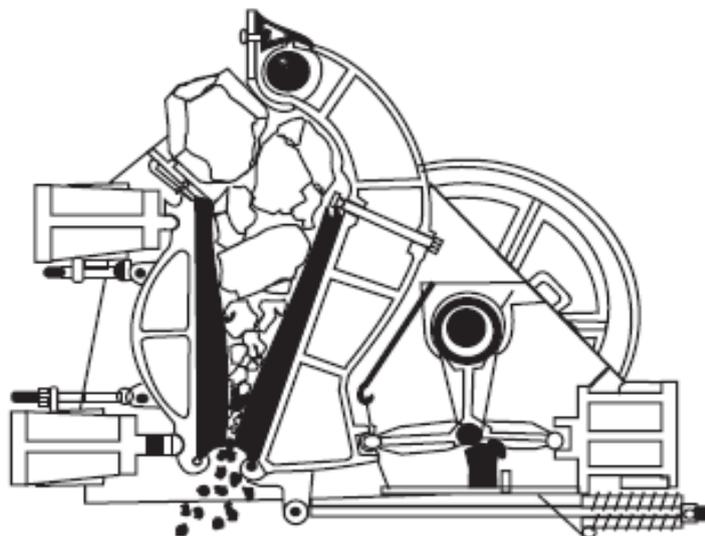


Figura 11: Britador de redução mecânica por compressão e impacto utilizado em um britador de mandíbula que brita sem atrito

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

2.3.2 Areia de britagem

A areia de britagem é um resíduo obtido no processo mecânico de cominuição da rocha, onde o material pode ser ou não submetido a algum processo de classificação para retirada do material pulverulento apresentando granulometria entre 4,8mm e 0,15mm, conforme especificação da NBR 9935 (ABNT 2011) (KAZMIERCZAK, ROSA e ARNOLD, 2016).

A forma como a rocha sofre a cominuição e as características da rocha mãe definem a distribuição granulométrica, a forma, a textura e a integridade dos grãos e, conseqüentemente, influenciam nas propriedades das argamassas.

A areia de britagem, diferentemente da areia natural, possui mais partículas de filler e pó e a forma do grão tem mais angulosidade (CEPURITIS *et al.*, 2017). Além disto, também, diferem na distribuição

granulométrica porque durante a britagem da rocha pode ocorrer falhas no processo em determinadas frações granulométricas (GONÇALVES *et al*, 2007).

A produção de areia de britagem envolve procedimentos que são mais complexos que a extração de areia natural. Deve existir uma instalação industrial de britagem e o processo de produção envolve vários processos normalmente denominados como primário, secundário, terciário e quartenário. No último processo é que acontecem as fases de redução de tamanho, incluindo desde o esmagamento, transporte, controle de dimensão e classificação final (CEPURITIS *et al.*, 2016).

Em um estudo realizado por Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2016) foi analisado, comparativamente, a partir de imagens digitais, a esfericidade e arredondamento de partículas de areia natural extraídas de rio e de areia britada (Figura 12). Os pesquisadores concluíram que a forma do grão da areia natural é mais arredondada enquanto a do grão da areia britada é mais angulosa.

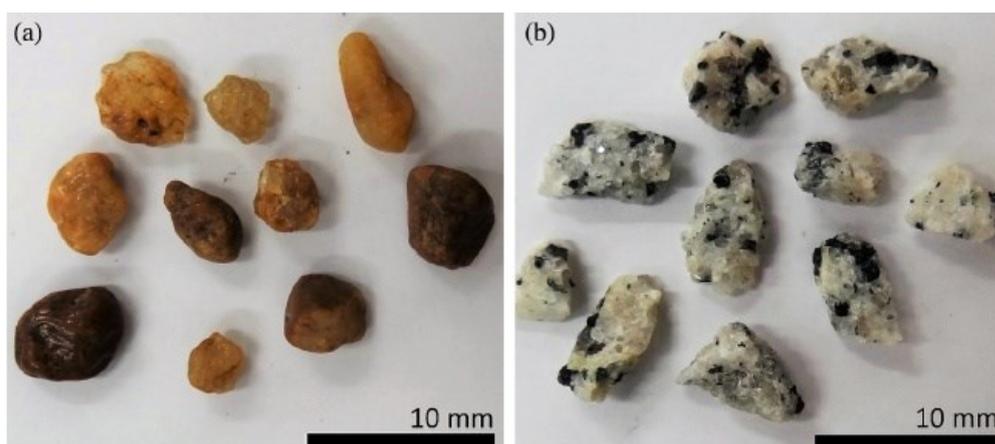


Figura 12: Análise comparativa da forma morfologia dos grãos de areia: (a) natural e (b) britada
Fonte: Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2016)

Existe pouca documentação no Brasil sobre o uso de areia de britagem como agregado para a produção de argamassas de revestimento,

já na produção de concretos o tema é mais abordado. No entanto, à escassez da areia natural vem aumentando o interesse em pesquisas que estudam o uso de areia de britagem em argamassas em substituição ao agregado miúdo natural.

2.3.3 Uso de areia de britagem em substituição ao agregado natural

Mesmo com vários vieses de pesquisas, culturalmente, a sociedade não tem o costume de aplicar alternativas de consumo para a substituição de recursos naturais que estão se tornando escassos, devido ao seu uso indiscriminado ou em função de extração em grande escala. As areias naturais utilizadas como agregado miúdo na produção de concretos e argamassas são um exemplo desta prática. Visando diminuir este impacto ao meio ambiente, pesquisadores buscam alternativas de substituição desses recursos naturais por opções recicláveis, dentre elas o uso da areia de britagem (ARNOLD, 2011).

De acordo com Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2011), a substituição de agregado natural por areia de britagem vem ganhando interesse não só pelo impacto ambiental, mas, também, pelo reflexo de seu custo frente à redução de áreas de exploração e de distâncias de transporte devido ao posicionamento de zonas de extração.

No entanto, segundo Harini, Shaalini e Dhinakaran, (2012), pesquisas feitas com substituição de areia natural por areia de britagem de origem basáltica mostram que as argamassas obtidas apresentam menor trabalhabilidade que as argamassas confeccionadas com areia de rio e justificam esta característica devido à forma irregular, a textura superficial do grão e a presença de filler de britagem. De acordo com os autores, para que a areia de britagem seja utilizada, além da forma e textura dos grãos, também deve ser analisada a influência da presença de partículas finas decorrentes do processo de britagem e as areias com elevados teores de filler (entre 10 e 20%) devem ser submetidas a um processo de lavagem

para a sua remoção.

A tabela 5 apresenta, resumidamente, estudos recentemente realizados com o tema proposto nesse trabalho.

Tabela 5: Trabalhos publicados sobre substituição de areia natural em argamassas

Autor (s)	Proposta	Argamassa	Parâmetros testados	Resultados
Tretin (2020)	Substituição de teores de cal e aditivo incorporador de ar em argamassa com 70% de areia de britagem de basalto	Traços 1:0,25:6; 1:0,50:6 e 1:0,75:6	Resistência à compressão, resistência à flexão, densidade de massa, índice de vazios, absorção de água total, coeficiente de capilaridade	Melhores resultados no traço 1:0,25:6
Santos (2020)	Análise da influência da distribuição granulométrica, porosidade e mineralogia dos agregados nas argamassas de areia natural, calcária, basáltica e granítica	Substituição 100%	Resistencia à compressão, porosidade, absorção por capilaridade	Maior resistência e menor porosidade nas areias de britagem
Srivastava (2020)	Comparativo de diversas pesquisas com substituição de agregado miúdo	Substituição 20%,40%,60%,80% e 100%, traço 1:3	Trabalhabilidade, resistência à compressão, absorção por capilaridade,	Melhor resistência à compressão nas substituições entre 40% e 50%
Tokarski (2017)	Substituição da areia natural por areia de britagem de rocha calcária	Substituição 20%,40%,60% e 80% areia de rio por areia de britagem de calcário no traço 1:3	Reologia, resistência à compressão, resistência à flexão, densidade de massa, índice de vazios, absorção de água total, coeficiente de capilaridade, retração linear	Argamassas de areia de britagem calcária tiveram bons resultados em todos os ensaios atendendo as normas.

<p>Karzmierczac, Rosa e Arnold (2016)</p>	<p>Substituição da areia natural por areia de britagem de basalto e filler de britagem de basalto</p>	<p>Traço 1:1:6 (cimento, cal e areia e filler nas quantidades de 1,5% ,6%, 10%, 20% e 30%)</p>	<p>Reologia, resistência à compressão, resistência à flexão, densidade de massa, módulo dinâmico, índice de vazios, absorção de água total, coeficiente de capilaridade, retração linear, evolução da fissuração.</p>	<p>Redução do fator água/cimento devido a adição de finos, maior resistência à compressão e à flexão nas areias de britagem, densidade de massa um pouco superior com um pequeno acréscimo proporcional ao aumento de adição de filler, mesma ordem de grandeza de módulo dinâmico, maior coeficiente de capilaridade, maior quantidade de poros, pouca diferença no comportamento de retração, maior fissuração em argamassas com adição de 10% de filler.</p>
<p>Baderina <i>et al.</i> (2013)</p>	<p>Substituição da areia natural por areia de britagem de calcário e exposição em soluções químicas (cal e ácido clorídrico)</p>	<p>Substituição 0%,50% e 100% areia de rio por areia de britagem de calcário no traço 1:3</p>	<p>Trabalhabilidade, resistência à compressão, durabilidade à exposição de soluções químicas, absorção por capilaridade,</p>	<p>Ganho de massa em exposição à cal e perda em exposição ao ácido clorídrico, aumento da resistência à compressão e à flexão em 24,73% em exposição ao ar livre, 33,94% em exposição em solução de cal e 57,97% em exposição em ácido clorídrico, aumento de 23,4% na absorção por capilaridade em solução de ácido clorídrico comparado com a argamassa exposta a solução de cal.</p>

Arnold (2011)	Substituição da areia natural por areia de basalto obtidas no britador tipo VSI e no Britador mandíbula	Areia natural, areia de britagem basáltica (britador VSI), areia de britagem basáltica (britador mandíbula) com adição de filler de 0%, 1,5%, 6% e 10% com traço 1:1:6	Reologia, densidade de massa, resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção por capilaridade, índice de vazios, massa específica, retração linear, resistência à aderência à tração e análise da fissuração.	Areia basáltica (VSI) possui composição de grãos mais uniforme e melhor empacotamento, maior massa unitária na areia basáltica (mandíbula), grãos mais angulosos e com baixo grau de esfericidade na areia basáltica (mandíbula), melhor trabalhabilidade e reologia na areia natural seguida da areia basáltica (VSI) e areia basáltica (mandíbula). Todos os ensaios do estado endurecido tiveram melhores resultados para areia natural seguido da areia de britagem basáltica (VSI) e areia de britagem basáltica (mandíbula) mas todas atenderam as especificações de ABNT. A retração e a fissuração tiveram melhores resultados quando ajustado o teor de filler.
---------------	---	--	--	--

Guacelli (2011)	Substituição da areia natural por areia de basalto	Traço 1:1:6 com substituição 30%,50% e 100%	Densidade de massa, teor de ar incorporado, índice de consistência, exsudação, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade (estático e dinâmico), absorção de água, índice de vazios, massa específica, análise de fissuração.	Aumento da proporção de areia de britagem reduziu a quantidade de água, e menor exsudação, densidade da massa cresce com o aumento do percentual de areia de britagem, resistência à compressão e resistência à tração na flexão são maiores nas argamassas com areia de britagem assim como o módulo de elasticidade (elástico e dinâmico), massa específica (seca, saturada e real) cresce proporcionalmente com adição areia de britagem, este resultado é inversamente proporcional para os resultados do índice de vazios. Ocorre maior incidência de fissuração nas argamassas com areia de britagem, os valores mais altos são para adição de 100% e 70%. Dentre todas as análises a argamassa que obteve melhores resultados foi a com substituição de 50% de areia natural por areia de britagem.
-----------------	--	---	---	--

Analisando-se os trabalhos apresentados na tabela 5, verifica-se que o uso de areia de britagem como substituta da areia natural em argamassas é viável porque na maioria dos casos estudados, resulta em ganhos de propriedades mecânicas.

3. Materiais e Métodos

No fluxograma da figura 13 estão apresentadas as etapas que serão desenvolvidas na parte experimental do trabalho e, na sequência descreve-se as metodologias utilizadas.

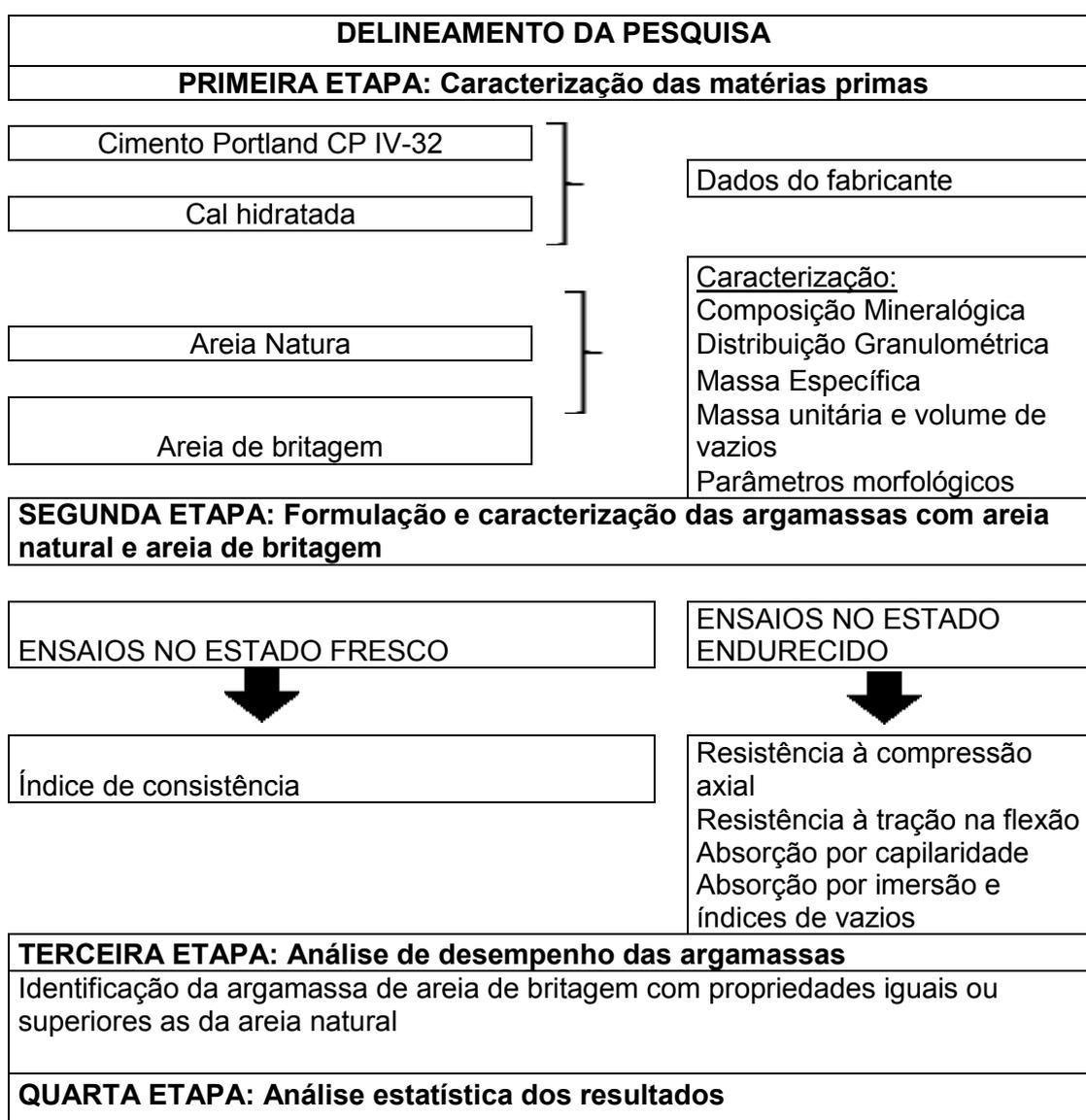


Figura 13: Fluxograma representativo do desenvolvimento da pesquisa

3.1 Seleção e caracterização das matérias-primas

3.1.1 Aglomerantes

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados como aglomerantes o cimento Portland CP IV-32 (Tabela 6) e uma cal hidratada (Tabela 7), cujas características foram fornecidas pelos fabricantes

Tabela 6: Características cimento Portland CP IV-32

Características	Tipo de ensaio		Resultados
Físicas e Mecânicas	Finura (%)	#200	0,29
		#325	1,31
	Blaine (cm ² /g)		4998
	Tempo de pega (min)	Início de pega	350
		Fim de pega	445
	Resistência à compressão (MPa)	3 dias	21,30
		7 dias	24,90
28 dias		39,10	
Químicas	Resíduo insolúvel (%)		40,60
	Perda ao fogo (%)		2,00
	SO ₃ (%)		2,00
	MgO (%)		4,70

Fonte: Inter cement, Candiota, RS, Brasil (2019).

Tabela 7: Características da cal hidratada

Química	Análise (%)	
Óxidos totais	62,00%	
Óxidos não hidratados	10,45%	
CaO	31,02%	
MgO	20,49%	
RI - resíduos insolúveis	38,94%	
PF - perda ao fogo	11,86%	
Física	Análise (%)	
	Limites	Análises
	Peneira 0,6mm	≤ 0,5%
Peneira 0,075mm	≤ 15%	12,89%

Fonte: Dagoberto Barcellos, Caçapava do Sul, RS, Brasil (2019).

3.1.2 Agregados miúdos

Os agregados miúdos utilizados no trabalho foram uma areia natural comercial e uma areia de britagem de origem granítica, proveniente de uma pedreira localizada na cidade do Capão do Leão, RS, que foi extraída por meio de moagem em um britador do tipo mandíbula.

A partir dessa etapa do trabalho, passou-se a usar a terminologia areia granítica para a identificação da areia de britagem de origem granítica. As areias foram caracterizadas como descrito a seguir.

3.1.2.1 Caracterização da areia natural

A areia natural do tipo quartzosa média foi seca em estufa a temperatura de 105°C por 24 horas. Após a secagem, esta foi caracterizada quanto a composição granulométrica, massa específica e massa unitária (Tabela 8), mineralogia (Figura 14), forma dos grãos (Figura 15) e absorção de água (Tabela 9). A análise da absorção de água dos grãos da areia natural foi feita conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2000). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pelotas.

Tabela 8: Caracterização física da areia natural

Composição granulométrica/ NBR NM 248:2003	Ø máx (mm)	4,75
	Módulo de Finura	2,84
Massa específica (g/cm ³) / NBR NM 52:2009 e NBR NM		2,62
Massa unitária solta (g/cm ³) / NBR NM 45:2006		1,55

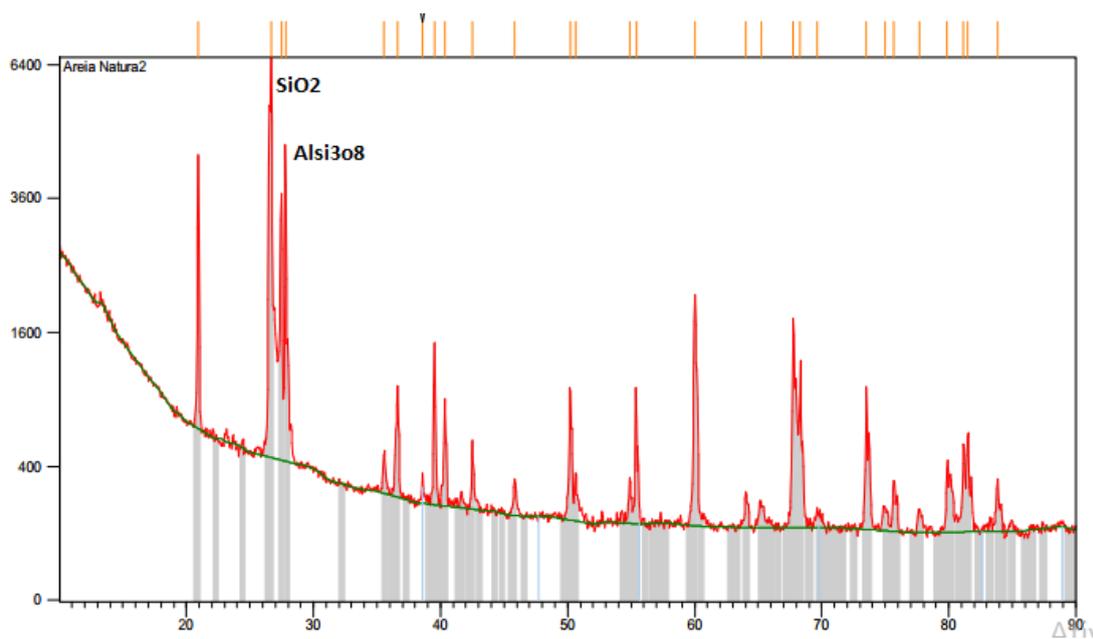


Figura 14: Análise mineralógica da areia natural, por difração de raio-X (DRX)

Quanto a mineralogia (Figura 14), a areia natural apresentou-se composta em maior proporção por quartzo e, também, foram encontradas quantidades de feldspato.



Figura 15: Morfologia dos grãos de areia natural retidos na peneira #4,75

No tocante a morfologia da areia natural, como identificado por

Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2016), a análise da imagem da figura 15 mostra terem os grãos esfericidade e arredondamento.

Tabela 9: Teor de absorção de água dos grãos de areia natural

Amostras	Peso seco (g)	Peso úmido (g)	Absorção de água (%)
1	1016,53	1020	0,34
2	986,14	990	0,39
3	998,79	1002	0,32
Teor médio			0,35

3.1.2.2 Caracterização da areia granítica

Para o uso da areia granítica foi necessário fazer a sua adequação granulométrica. Para tanto, a areia foi seca em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas e peneirada, conforme a NBR NM 248 (ABNT,2003). Na sequência, a areia graduada foi caracterizada quanto a composição granulométrica, massa específica e massa unitária (Tabela 10), mineralogia (Figura 16), e forma dos grãos (Figura 17) e absorção de água (Tabela 11). A análise da absorção de água dos grãos da areia natural foi feita conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2000). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do curso de engenharia civil da Universidade Federal de Pelotas.

Tabela 10: Caracterização física da areia de britagem

Composição granulométrica/ NBR NM 248:2003	Ø máx (mm)	4,75
	Módulo de Finura	2,83
Massa específica (g/cm ³) / NBR NM 52:2009 e NBR NM		2,159
Massa unitária solta (g/cm ³) / NBR NM 45:2006		1,76

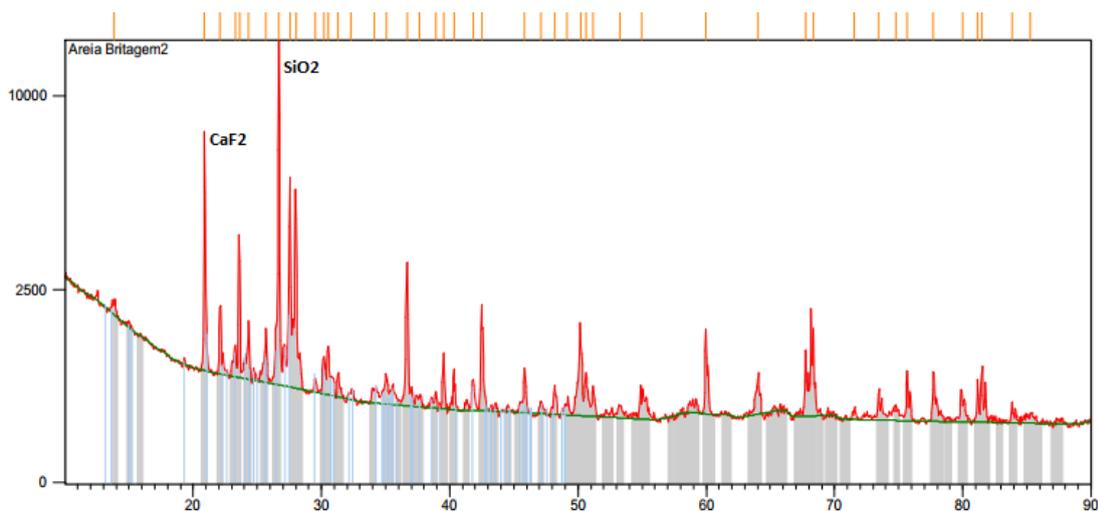


Figura 16: Análise mineralógica da areia granítica, por difração de raio-X (DRX)

Quanto a mineralogia, verifica-se no difratograma da figura 16 que a areia granítica é composta em maior proporção por quartzo e fluoreto de cálcio. Também, foram encontrados alguns componentes provenientes de explosivos para detonação da pedreira que foram desconsiderados. A presença de cálcio tem origem na formação da rocha que está localizada em uma região próxima de onde, também, ocorrem rochas calcárias.



Figura 17: Morfologia dos grãos de areia granítica retidos na peneira #4,75

No tocante a morfologia da areia granítica, a análise da imagem da figura 17 mostra serem os grãos angulosos e terem a superfície irregular. Aspectos estes já identificados por Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2016) em suas pesquisas com areias calcárias e basálticas.

Tabela 11: Teor de absorção de água dos grãos de areia granítica

Amostras	Peso seco (g)	Peso úmido (g)	Absorção de água (%)
1	997,66	1005	0,73
2	992,11	999	0,69
3	993,5	1001	0,75
		Teor médio	0,72

3.1.2.3 Análise comparativa da granulometria das areias

A figura 18 apresenta comparativamente, a distribuição granulométrica das areias natural e granítica.

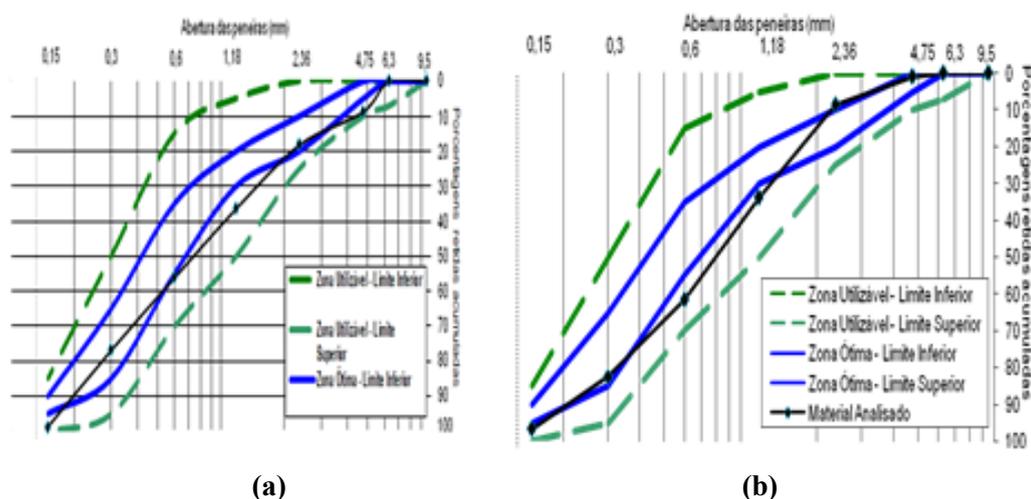


Figura 18: Distribuição granulométrica das areias natural (a) e granítica (b), conforme a NBR NM 248 (ABNT,2003)

A análise das curvas granulométricas da figura 18 mostrou que as areias natural e granítica apresentam distribuição normal, dentro dos limites estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Esta condição resultou na obtenção de propriedades físicas (Tabelas 8 e 10; p. 44 e 46) similares entre as areias. Os resultados obtidos foram de extrema importância para a proposta do trabalho, tendo em vista que este ocorreu com substituição da areia natural pela areia granítica.

3.1.2.4 Análise da forma dos grãos

A análise das figuras 15 (p. 45) e 17 (p. 47) mostrou que existe efetiva diferença no formato dos grãos de areia, sendo o grão da areia natural mais arredondado e o grão de areia de britagem mais anguloso. Resultados similares já haviam sido identificados por Karzmierczac, Rosa e Arnold (2016) e Tokarski (2017) em argamassas com areia de britagem calcária e basáltica.

3.1.2.5 Análise da absorção de água dos grãos

A análise das tabelas 9 (p. 46) e 11 (p. 48) mostrou que os grãos de areia granítica apresentam teor de absorção muito superior (0,72%) ao identificado nos grãos de areia natural (0,35%). Possivelmente, a maior absorção ocorrida é decorrente da presença de grande quantidade de poros na superfície rugosa dos grãos de areia granítica.

Os resultados de absorção de água obtidos para os grãos de areia granítica se assemelham aos encontrados por Tretin (2020) quando analisou a absorção dos grãos de areia basáltica.

3.2 Produção das argamassas

Esta etapa foi desenvolvida no laboratório da empresa Consórcio

Contorno, Pelotas, RS. Em função do laboratório utilizado para os ensaios não possuir argamassadeira de eixo horizontal automatizada, as argamassas testadas foram preparadas manualmente.

Devido ao melhor desempenho em estudos já realizados, o traço escolhido para o desenvolvimento da pesquisa foi o 1:1:6 (cimento: cal: areia) e com ele foram moldadas três formulações diferentes: uma com areia natural, identificada como o traço referência (REF-AN); outra com substituição de 50% da areia natural por areia granítica, identificada por 50-AB; e a última com substituição de 100% da areia natural por areia de britagem de origem granítica, identificada por 100-AB.

O traço foi medido em peso em uma balança de precisão de 0,01g. A tabela 12 apresenta as formulações utilizadas.

Tabela 12: Formulações das argamassas testadas

Formulação	Cimento	Cal	Areia natural	Areia granítica
REF-AN	1 kg	1kg	6kg	-
50-AB	1kg	1kg	3kg	3kg
100-AB	1kg	1kg	-	6Kg

Cada traço foi produzido manualmente de uma única vez, utilizando-se para a mistura de uma colher de pedreiro. O tempo de mistura foi de 15 minutos. A mistura foi feita em um balde.

Para o preparo das argamassas utilizou-se água potável proveniente do SANEP, órgão responsável pelo abastecimento público da cidade de Pelotas, RS, A quantidade de água utilizada nas massas foi determinada para cada traço pelo índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016).

3.2.1 Obtenção dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios de absorção por capilaridade e resistência à compressão axial foram moldados corpos de prova utilizando-

se de tubos de PVC (Figura 19) com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, dimensões conforme NBR 7215 (ABNT,2019).



Figura 19: Tubos de PVC utilizados como moldes na produção dos corpos de provas cilíndricos

Para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões de 16cm x 4cm x 4cm, conforme indicado na NBR 13279 (ABNT,2015), em formas de madeira de compensado (Figura 20).



Figura 20: Moldes de madeira de compensado utilizados para a produção dos corpos de provas prismáticos

Durante a moldagem dos corpos de prova, nas formas de PVC e de compensado de madeira foi aplicado um desmoldante comercial da marca Vedacit.

A tabela 13 apresenta o número total de corpos de prova confeccionados e a distribuição deles por ensaio.

Tabela 13: Número de corpos de provas

Argamassa	Resistência à compressão axial	Absorção por capilaridade	Resistência à tração na flexão	Total
	nº corpos de prova			
TREF-AN	5	5	3	39
50-AB	5	5	3	
100-AB	5	5	3	

3.2.2 Caracterização no estado fresco

Nas argamassas em teste, no estado fresco fez-se somente o ensaio de índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2015), ficando estabelecido para cada traço o intervalo da norma de (265 ± 10) mm.

Para a realização do ensaio, inicialmente, foi preparada uma argamassa de cimento, cal, areia natural (traço; 1:1:6), que foi pesada e deixada em repouso por um período de 18h. Após, a evaporação da água, a argamassa foi novamente pesada e utilizada para o preenchimento do molde cônico.

Antes do início do ensaio, a mesa e o molde cônico foram limpos com um pano levemente umedecido. Após, o molde cônico foi colocado centralizado na mesa e preenchido em três camadas cada uma com respectivamente 15, 10 e 5 golpes por soquete. O material restante foi rasado com uma régua metálica e a superfície da mesa foi novamente limpa e o molde cônico foi retirado. Na sequência, a manivela foi acionada caindo 30 vezes em 30 segundos e imediatamente após o último golpe foram

medidos com um paquímetro 3 diâmetros distintos. Esse processo se repetiu para os dois outros traços com areia granítica e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Teor de água e índice de consistência

Argamassa	Teor de água	Água/cimento	Índice de consistência (mm)
REF-AN	15,00%	0,15	264
100-AB	16,50%	0,165	260
50-AB	15,60%	0,156	259

3.2.3 Caracterização no estado endurecido

Nesta etapa do trabalho, as argamassas foram caracterizadas como descrito a seguir.

3.2.3.1. Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade é considerado um parâmetro físico de grande importância, pois avalia o contato das argamassas com a presença de água verificando a possibilidade de alto índice de absorção que pode levar ao surgimento de manifestações patológicas.

O ensaio foi realizado com os corpos de prova com a idade de 28 dias conforme as diretrizes da NBR 9779 (ABNT, 2013). Os corpos de prova foram secos em estufa até atingir constância de massa, onde em um intervalo de 2h de secagem o peso do corpo de prova teve uma medida menor que 0,5% de variação entre a pesagem anterior e a posterior, após os corpos de prova foram resfriados e sua massa seca determinada.

Os corpos de prova após secos, resfriados e pesados foram colocados em um suporte com uma base metálica preenchida com água constante em altura de 5 mm acima da sua face inferior. O peso das massas saturadas dos corpos de prova foi medido nos períodos de contato com a água de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Os resultados foram obtidos através de uma

relação entre a massa de água absorvida pela área transversal do corpo de prova, conforme a equação 2.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

C – coeficiente de capilaridade

m_{sat} – massa saturada

m_s – massa seca

S – área da seção transversal (cm²)

3.2.3.2. Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado conforme NBR 7215 (ABNT,2019). No processo, os três tipos de argamassa foram colocados nos moldes de PVC com o auxílio de uma espátula, em quatro camadas iguais com 2,5 cm cada, adensadas com 30 golpes uniformes realizados por um soquete.

Os corpos de prova foram submetidos a uma cura inicial dentro dos moldes, por 24h ao ar livre. Após, retirou-se os moldes de PVC e os corpos de prova ficaram submersos em água saturada com cal (Figura 21) até o momento da ruptura.

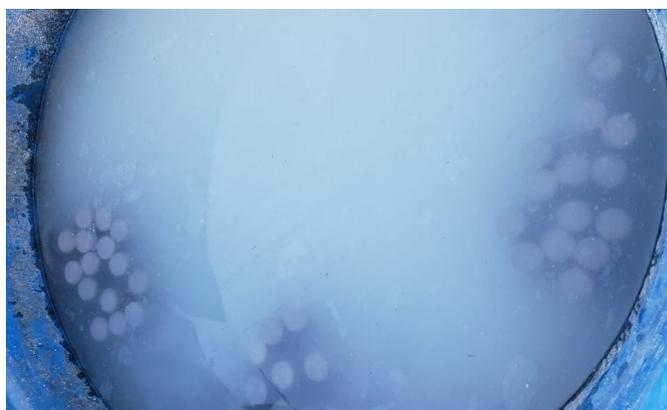


Figura 21: Cura úmida dos corpos de prova cilíndricos

O ensaio de ruptura foi feito no laboratório da empresa Consórcio Contorno com o emprego de uma prensa da marca Solotest (Figura 22). Para tanto, foram usados corpos de prova com 7 e 28 dias de cura (Figura 23), sendo rompidos cinco por traço de argamassa.



Figura 22: Prensa utilizada no ensaio de ruptura dos corpos de prova cilíndricos



Figura 23: Corpo de prova cilíndrico com 28 dias de cura, pronto para o ensaio de resistência à compressão axial

3.2.3.3. Resistência à tração na flexão a três pontos

O ensaio de resistência à tração na flexão a três pontos foi executado conforme NBR 13279 (ABNT,2005).

Para esse ensaio, não se tinha disponível uma mesa de adensamento. Por isto, a moldagem dos corpos de prova nas formas de compensado de madeira ocorreu em três camadas com espalhamento com uma espátula e o adensamento foi manual com golpes de soquete distribuídos proporcionalmente para uma melhor distribuição da argamassa. Os corpos de prova foram submetidos a uma cura ao ar por 28 dias.

O ensaio de tração na flexão a três pontos foi feito no laboratório da empresa Consórcio Contorno com o emprego da mesma prensa utilizada no ensaio de compressão e um acessório conforme figura 24. Para tanto, foram usados corpos de prova prismáticos com 28 dias de cura (Figura 25), sendo rompidos três por traço de argamassa.



Figura 24: Acessório utilizado no ensaio de ruptura dos corpos de prova prismáticos

Fonte: Catálogo Solotest (2020).



Figura 25: Corpo de prova prismático com 28 dias de cura, pronto para o ensaio de resistência à tração na flexão a três pontos

3.3 Análise estatística de variância ANOVA

Na fase final de caracterização os dados obtidos serão analisados estatisticamente a partir da aplicação do Software *Statistica*®, versão 7.0, buscando identificar a influência da forma do grão de areia granítica na produção de argamassas de revestimento.

A análise de variância ANOVA avalia a significância dos fatores e suas interações, adotando como nível de significância o valor de 5%, ou seja, confiança da decisão de 95%.

4. Resultados e discussão

Neste capítulo são discutidos os resultados encontrados nos ensaios realizados na parte experimental da pesquisa, focados na influência da forma do grão da areia granítica.

4.1 Análise do teor de água necessário à produção das argamassas

Analisando-se os teores de água por traço da tabela 14 (p. 53), verificou-se que a presença da areia granítica conduziu a uma maior necessidade de água de mistura, sendo este aspecto mais evidente na substituição de 100% da areia natural. Estes resultados indicam que a forma do grão da areia granítica interferiu na quantidade de água necessária para a produção das argamassas, aspecto este já observado nas análises de Arnold (2011), que demonstrou que as argamassas provenientes de processos de britagem, por terem seus grãos mais angulosos, necessitam de maior quantidade de água para preenchimento dos vazios e, conseqüentemente, para ter melhor trabalhabilidade quando comparada às argamassas produzidas com areia natural.

Além disto, também, a necessidade de maior quantidade de água para o traço com areia granítica pode ser justificada pela presença da maior quantidade de poros abertos identificados no ensaio de absorção de água dos grãos (Tabelas 9 e 11; p. 46 e 48).

Entretanto, na comparação entre a água usada no experimento de Arnold (2011) com areia de britagem basáltico, cujo valor médio foi de 17,10%, e a água utilizada nas argamassas com areia granítica desenvolvidas nesse trabalho, percebe-se que ocorre uma necessidade de menor quantidade de água de mistura (teor máximo igual a 16,5%), indicando ser a areia granítica mais adequada para argamassas de revestimento, devido a possibilidade de uma menor retração durante a cura.

4.2 Análise da absorção por capilaridade

A figura 26 mostra a absorção por capilaridade das três diferentes argamassas. Os valores apresentados no gráfico da figura 28 representam a média dos valores de absorção por capilaridade apresentados na tabela 15 (Apêndice 1, p. 72).

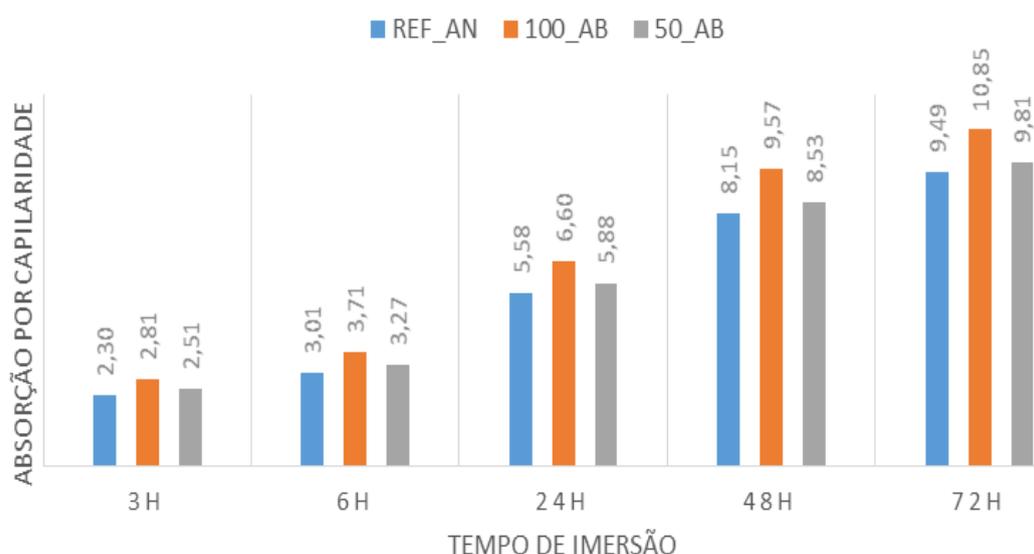


Figura 26: Análise comparativa da absorção por capilaridade das três argamassas testadas

Analisando-se o gráfico da figura 26 é possível identificar a tendência de crescimento da absorção por capilaridade nos três traços de argamassa, sendo o traço com areia natural o de menor absorção capilar.

Percebe-se, também, que a argamassa com substituição total (100%) da areia natural por areia granítica foi a que apresentou os maiores teores de absorção e que, na análise comparativa entre as argamassas com 50% e 100% de areia granítica, identificou-se que a menor quantidade de substituição resultou em uma argamassa com menores teores de absorção capilar, sendo estes próximos aos da argamassa com areia natural.

A justificativa para a maior absorção capilar das argamassas com areia granítica, possivelmente, está vinculada a forma angulosa dos grãos, que propicia um empacotamento com maior índice de vazios, e a presença

de poros superficiais identificados no ensaio de teor de absorção de água dos grãos.

Quanto a redução de absorção de água na argamassa 50-AB, a justificativa para este resultado está, possivelmente, na presença dos dois tipos de agregado, a areia natural com esfericidade e a areia granítica com angulosidade, que possibilitaram um empacotamento com redução do índice de vazios.

4.3 Análise da resistência à compressão axial

A figura 27 apresenta a resistência à compressão axial das argamassas testadas. O gráfico foi obtido a partir dos valores descritos na tabela 16 (Apêndice 2, p. 73).

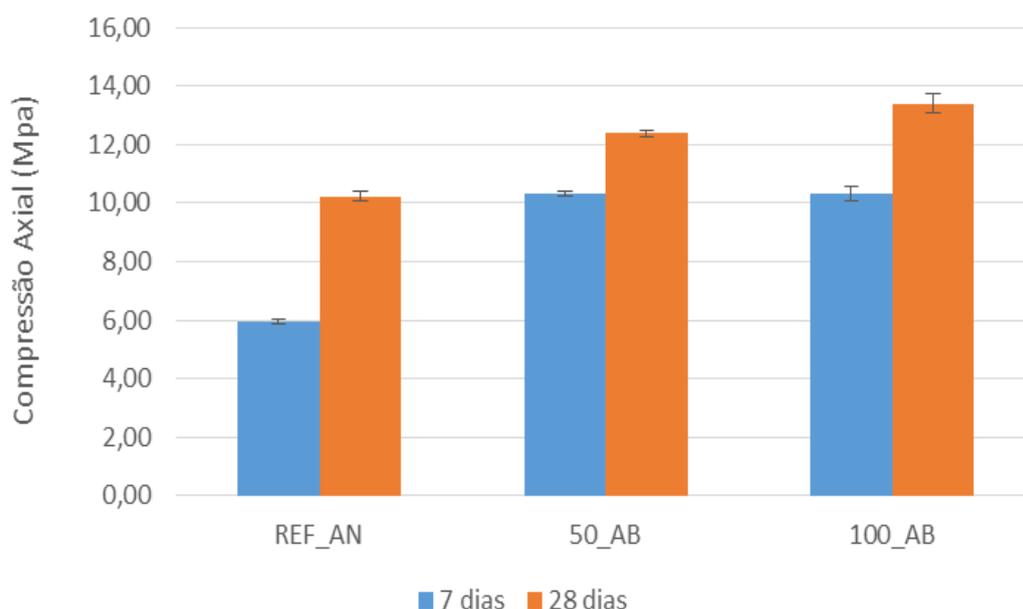


Figura 27: Análise comparativa da resistência à compressão axial

Analisando-se comparativamente os resultados da figura 27, verifica-se que as argamassas com areia de britagem (50-AB e 100-AB) tiveram resultados de resistência à compressão axial superiores (20,9% e 30,9%, respectivamente) aos da argamassa com areia natural, e que estas já aos 7

dias de cura apresentaram resistência superior a encontrada na argamassa referência. Além disto, os resultados mostram que nas argamassas com areia granítica o aumento da resistência à compressão axial é proporcional a quantidade de areia inserida.

A justificativa para tais fatos, possivelmente, está no grão da areia granítica que, além de anguloso, possui irregularidade e poros superficiais que podem ter aumentado a ancoragem com a matriz de cimento. Corroborando com os resultados dessa pesquisa, tem-se os estudos feitos pelos Tokarski (2017), Karzmiereczac, Rosa, Arnold (2016) e Guacelli (2011) que, também, identificaram que as areias de britagem pela sua forma angulosa geram maior resistência mecânica.

Através da análise estatística ANOVA foi constatada a significância estatística das variáveis relacionadas, sendo elas o teor de substituição e idade na resistência à compressão axial. Na Tabela 18 (Apêndice 4 p. 74) estão apresentadas a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações. Verifica-se que o teor de substituição não possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão axial. Entretanto, existe influência significativa na idade. Além disto, é possível observar-se que o valor p é maior do que o nível de significância especificado ($\alpha = 0,05$). Portanto, a hipótese nula, que significa a igualdade entre as médias das resistências, é aceita.

4.4 Análise da resistência à tração na flexão a três pontos

A figura 28 apresenta a resistência à tração na flexão a três pontos das argamassas testadas, em corpos de prova com 28 dias de cura. O gráfico foi obtido a partir dos valores descritos na tabela 17 (Apêndice 3, p. 73).

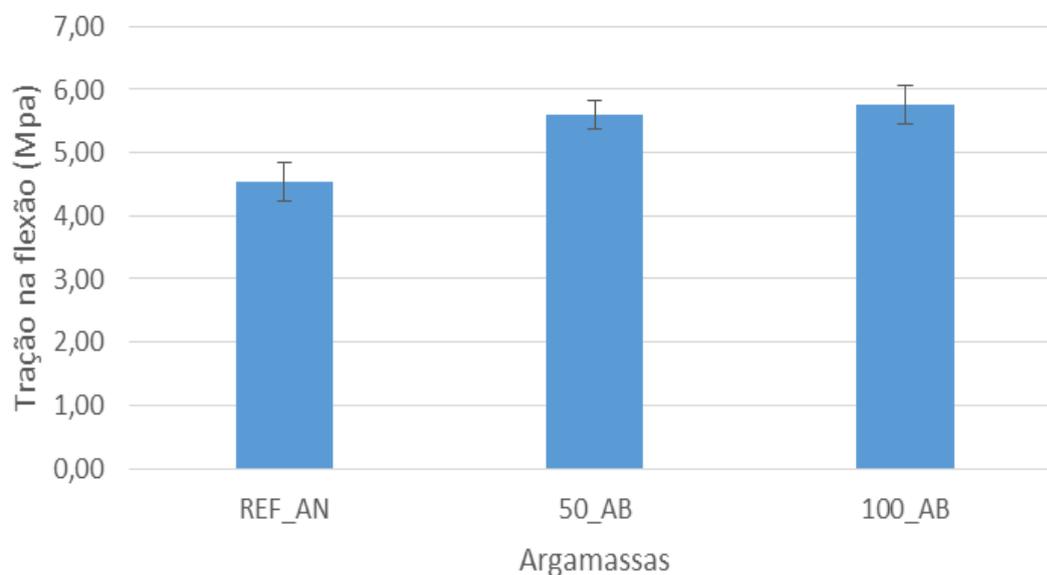


Figura 28: Análise comparativa da resistência à tração na flexão a três pontos

Analisando-se a figura 28, percebe-se que as argamassas com areia de britagem também obtiveram resultados de resistência à tração na flexão a três pontos superiores aos da argamassa com areia natural (REF-AN). Assim, como para o ensaio de resistência a compressão axial, a justificativa para estes resultados, possivelmente, está no grão da areia granítica que possui irregularidade e poros superficiais que podem ter aumentado a ancoragem com a matriz de cimento.

Através da análise estatística ANOVA foi constatada a significância estatística da variável Teor de Substituição na resistência à flexão. Na Tabela 19 (Apêndice 5; p. 74) está apresentada a análise de influência dos fatores, onde pode ser verificado que o teor de substituição possui efeito significativo sobre a resistência à flexão, indicado pelo p-fator de 0,08532% superior à 5%. Pode-se concluir, com base nas análises de variância, que a hipótese de as médias serem iguais foi aceita, e que os efeitos da relação teor de substituição não são significantes ao nível de confiança de 95%.

5. Conclusões

Considerando os resultados obtidos, é possível inferir as seguintes conclusões:

- A morfologia dos grãos da areia granítica apresenta formato anguloso e superfície irregular.
- O ensaio de absorção de água das areias utilizadas mostrou que os grãos de areia granítica apresentam absorção duas vezes maior que a dos grãos de areia natural.
- O alto teor de absorção de água das areias graníticas permitiu concluir que estas possuem porosidade superficial.
- A areia de britagem de origem granítica necessita de maior quantidade de água para obtenção de uma argamassa com consistência e trabalhabilidade adequadas.
- As argamassas com areia de britagem de origem granítica apresentam maior absorção por capilaridade quando comparadas com a argamassa com areia natural, indicando possuírem estas maior índice de vazios que, possivelmente, se formaram devido a porosidade natural e o formato anguloso dos grãos.
- No tocante a resistência mecânica, quer seja na compressão axial ou na tração à flexão a três pontos, as argamassas com areia de britagem apresentaram maiores valores quando comparadas com a argamassas com areia natural.
- O traço com 100% de substituição de areia natural por areia de britagem granítica foi o que efetivamente apresentou os maiores ganhos de resistência mecânica, no entanto segundo a análise estatística ANOVA a substituição em 50% também seria efetiva.

- Embora os resultados sejam satisfatórios, principalmente para os ensaios de resistências, deve-se atentar ao fato de que o alto índice absorção por capilaridade não é indicado para argamassas de revestimento.

Sugestões para futuros trabalhos

Sugere-se para a continuidade deste trabalho:

- Determinação do índice de vazios não realizado na pesquisa em questão,
- Ensaio de aderência;
- Análise de retração e fissuração;
- Ensaio com séries de peneiras intermediárias para buscar melhorar os resultados de capilaridade.
- Análise da reologia das argamassas de areia de britagem de origem granítica;
- Aplicação das argamassas graníticas em um protótipo.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. NBR NM 45. Rio de Janeiro, 200. 10 p.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicações e ensaio de laboratório**. São Paulo: Pini, 2012 459 p.

ARNOLD, D. C. M. Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas. p. 145, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**. NBR 7809. Rio de Janeiro, 2019. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. NBR NM 30. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 1 : Agregado miúdo**. NBR 7389-1. Rio de Janeiro, 2009. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Terminologia**. NBR 9935. Rio de Janeiro, 2011. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto - Especificação**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow**. NBR 15839. Rio de Janeiro, 2019. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. NR 9778. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. NBR 9779. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. NBR 13279. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. NBR 13276. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. NBR 13281. Rio de Janeiro, 2005. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da resistência à compressão de corpos de provas cilíndricos**. NBR 7215. Rio de Janeiro, 2019. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento**. NBR 7200. Rio de Janeiro, 1998. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho do cimento Portland aos 28 dias**. NBR 5752. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração**. NBR 13528. Rio de Janeiro, 2019. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação**. NBR 13749. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia**. NBR 13529. Rio de Janeiro, 2013. 13 p.

BEDERINA, M. et al. Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 146–158, 2013.

CALLISTER JR., Willian; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC,2013 817p.

CARASECK, H. **Argamassas**. In: Instituto Brasileiro de Concreto. Livro de Materiais de Construção Civil, 2007

CARDOSO, F. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. São Paulo, 2009. 138p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo.

CEPURITIS, R. et al. Comparison of 2-D and 3-D shape analysis of concrete aggregate fines from VSI crushing. **Powder Technology**, v. 309, p. 110–125, 2017.

CEPURITIS, R.; JACOBSEN, S.; ONNELA, T. Sand production with VSI crushing and air classification: Optimising fines grading for concrete production with micro-proportioning. **Minerals Engineering**, v. 78, p. 1–14, 2015.

CEPURITIS, R.; JACOBSEN, S.; ONNELA, T. Sand production with VSI crushing and air classification: Optimising fines grading for concrete production with micro-proportioning. **Minerals Engineering**, v. 78, p. 1–14, 2015.

CORDEIRO, G. C.; DE ALVARENGA, L. M. S. C.; ROCHA, C. A. A. Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p.

766–773, 2016.

DE AZEVEDO, A. R. G. et al. Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. **Materials**, v. 12, n. 9, 2019.

FARIAS E PALMEIRA. **Agregados para a Construção Civil**. In: Instituto Brasileiro de Concreto. Livro de Materiais de Construção Civil, 2007

FIORITO, Antonio J.S.I. **Manual de argamassas e revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução**. 2. ed. São Paulo: Pini Ltda, 2009. 232p.

GAO, Y.; DE SCHUTTER, G.; YE, G. Micro- and meso-scale pore structure in mortar in relation to aggregate content. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 149–160, 2013.

GUACELLI, P. A. G. Substituição de areia natural por areia de britagem de rochas basálticas para argamassas de revestimento. p. 166, 2010.

HAN, D. et al. Critical Grain Size of Fine Aggregates in the View of the Rheology of Mortar. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 11, n. 4, p. 627–635, 2017.

KALAGRI, A.; KARATASIOS, I.; KILIKOGLU, V. The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 467–474, 2014.

KAZMIERCZAK, C. DE S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. Influência da adição de filler de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 7–19, 2016.

KOCKAL, N. U. Investigation about the effect of different fine aggregates on physical, mechanical and thermal properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 816–825, 2016.

KWAN, A. K. H.; WONG, V.; FUNG, W. W. S. A 3-parameter packing density model for angular rock aggregate particles. **Powder Technology**, v. 274, p. 154–162, 2015.

LAGERBLAD, B.; GRAM, H. E.; WESTERHOLM, M. Evaluation of the quality of fine materials and filler from crushed rocks in concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 121–126, 2014.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

RAJAN, B.; SINGH, D. Understanding influence of crushers on shape characteristics of fine aggregates based on digital image and conventional techniques. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 833–843, 2017.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Conhecendo Argamassa**. 2.ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015. 188 p.

SANTOS, A. R. et al. Microstructure as a critical factor of cement mortars' behaviour: The effect of aggregates' properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, n. October 2019, 2020.

SRIVASTAVA, A.; SINGH, S. K. Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119706, 2020.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 261–271, 2018.

TOKARSKI, R. B. Comportamento da areia de britagem de rocha calcária na argamassa de revestimento p.157. 2017.

ZHANG, W.; ZAKARIA, M.; HAMA, Y. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 500–510, 2013.

APENDICES

Apêndice 1

Tabela 15: Absorção por capilaridade

Traço	3 horas (g/cm ²)					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	2,35	2,47	2,84	1,93	1,89	2,30
100_AB	2,94	2,96	3,55	2,32	2,27	2,81
50_AB	2,43	2,46	2,50	2,61	2,57	2,51
	6 horas (g/cm ²)					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	3,06	3,26	3,72	2,59	2,44	3,01
100_AB	3,88	3,91	4,69	3,06	2,99	3,71
50_AB	3,16	3,20	3,25	3,39	3,34	3,27
	24 horas (g/cm ²)					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	5,62	6,06	6,99	4,71	4,51	5,58
100_AB	7,10	6,34	8,43	5,44	5,69	6,60
50_AB	5,69	5,76	5,85	6,11	6,01	5,88
	48 horas (g/cm ²)					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	8,21	8,85	10,21	6,87	6,59	8,15
100_AB	10,29	9,19	12,23	7,89	8,25	9,57
50_AB	8,24	8,35	8,48	8,86	8,72	8,53
	72 horas (g/cm ²)					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	9,52	10,36	11,92	7,90	7,76	9,49
100_AB	11,73	10,75	13,94	8,68	9,16	10,85
50_AB	9,48	9,60	9,75	10,18	10,03	9,81

Apêndice 2

Tabela 15: Resultados de resistência à compressão axial (MPa)

Traço	7 dias					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	5,90	6,10	5,89	5,98	5,90	5,95
100_AB	10,60	10,45	10,20	9,98	10,36	10,32
50_AB	10,45	10,30	10,27	10,37	9,86	10,25
Traço	28 dias					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	10,15	10,49	10,13	10,29	10,15	10,24
100_AB	13,78	13,59	13,26	12,97	13,47	13,41
50_AB	12,54	12,36	12,32	12,44	11,83	12,30

Apêndice 3

Tabela 16: Resultados de resistência à tração na flexão a três pontos (MPa)

Traço	28 dias					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média
REF_AN	4,20	4,56	4,90	4,80	4,24	4,54
100_AB	5,90	6,10	5,40	5,46	5,90	5,75
50_AB	5,80	5,78	5,70	5,40	5,34	5,60

Apêndice 4

Tabela 17: Resultado de Análise de Variância – valor p – da resistência à compressão

Tabela da ANOVA					
Fator	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Teor de substituição	2	78,88236	19,72059	6,928441737	0,06532
Idade	1	1241,111976	620,555988	218,0201509	3,01E-28
Teor de substituição x Idade	2	20,215224	2,526903	0,887777709	0,532279889
Resíduos	30	170,77944	2,846324		

Apêndice 5

Tabela 18: Resultado de Análise de Variância – valor p – da resistência à flexão

Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Teor de substituição	2	3,8088	0,9522	7,841339555	0,08532
Resíduos	10	1,214333333	0,121433333		