

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Caroline Giordani

**VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ARENITO COMO SUBSTITUIÇÃO
DO AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS**

Porto Alegre
agosto 2014

CAROLINE GIORDANI

**VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ARENITO COMO SUBSTITUIÇÃO
DO AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientadora: Angela Borges Masuero
Coorientador: Anderson Augusto Müller

Porto Alegre
agosto 2014

CAROLINE GIORDANI

**VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ARENITO COMO SUBSTITUIÇÃO
DO AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 11 de agosto de 2014

Profa. Angela Borges Masuero
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Anderson Augusto Müller
MSc. pela UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Aguida Gomes de Abreu
Dra. pela UFRGS

Profa. Angela Borges Masuero
(UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Prof. Daniel Tregnago Pagnussat
(UCS)
Dr. pela UFRGS

Anderson Augusto Müller
(UFCSPA)
MSc. pela UFRGS

A meus pais, dindos e ao Nando,
pelo carinho, incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

À professora Angela e ao Anderson, agradeço por todos os ensinamentos, orientações e por confiarem em mim para a realização deste trabalho, mas, mais que isso, agradeço pela amizade, paciência, e consolo nas horas de desespero.

Agradeço à professora Carin pela atenção que nos disponibiliza e pelo incentivo na busca de um trabalho de conclusão de qualidade.

À banca deste trabalho, professora Aguida e professor Daniel, agradeço pela disponibilidade e pelas contribuições para o aperfeiçoamento desta pesquisa.

Agradeço a todo o pessoal do Norie e Lamtac, aos professores Bonin e Ruy e às professoras Ana Paula e Denise, à Carina, Laís, Silvia, Cris, Lu Cordeiro, Gisele, Simone, Natália, Rafa, Ariane, Ana Paula, Gabriela, Fernanda's, Marina, Mauro, Márlon, Abrahão, Eugênio, Lucas. Obrigada pela disponibilidade, pelo auxílio e por compartilharem momentos tão legais.

Aos bolsistas, Bruno, Felipe, Anne, Josi, Gui, Fran, Allan, Luiz, Führ, Mikael, Formiga, Alexandre, Torri, Leonardo, Davi, Maders, Andres, Amanda, Carol e Állisson, muito obrigada pela amizade e pela grande ajuda neste trabalho.

Agradeço muitíssimo ao Sr. Gilmar, Airton e Demétrius, que estão sempre disponíveis para ajudar e são grandes companheiros.

Agradeço àqueles que tornaram possível este trabalho.

Agradeço ao Telmo Focht por indicar este resíduo e por ter nos acompanhado na coleta.

Agradeço também ao proprietário da pedreira, Mário Moreira da Silva, que foi muito solícito por nos receber e disponibilizar o material.

Ao professor Rafael e ao Alfonso, por disponibilizarem o britador do LTM para a fragmentação do arenito.

Agradeço à Fabiana, ao Paulo e ao Lucas, do laboratório Lacer, pela atenção e por realizarem os ensaios de termogravimetria, fluorescência e difração de raios X.

Agradeço também ao Josué Argenta, que foi muito solícito em disponibilizar o adaptador para retificar os corpos de prova, e à Lívia, bolsista do LEME, pelo transporte desta peça entre os laboratórios.

Agradeço a meus pais, Airton e Valdéris, por todo o carinho, por compreenderem a minha ausência nos finais de semana, e pelo incentivo e priorização do estudo e da educação desde que era criança. Tenho vocês como meus maiores exemplos. Agradeço ao meu irmão Rafael e à Míria, pelo afeto, amizade e companheirismo.

Meu eterno agradecimento aos dindos Aurea e Decio pelo acolhimento, carinho e apoio durante todos os anos da faculdade. Vocês são únicos! Muito obrigada também pelo auxílio na correção da gramática deste trabalho!

Agradeço à atenção também de todos os meus familiares, que sempre lembram e perguntam por mim.

Nando, obrigada por estares sempre ao meu lado me apoiando e mimando, e desculpe-me por minha ausência, mas tu bem sabes que engenharia não é fácil!

Gurias, Daia e Mona, obrigada pela amizade e desculpem-me pelo sumiço nesses últimos tempos.

Aos amigos da faculdade, Bárbara, Carlise, Thaís, Mari, Ana, Dani, Mauri, Vini's, Augusto e Cássio, muito obrigada pelo companheirismo ao longo desses cinco anos e meio.

Por fim, agradeço àqueles que, mesmo não citados aqui, também participaram deste trabalho ou, de alguma forma, me apoiaram.

A simplicidade é o último grau de sofisticação.

Leonardo da Vinci

RESUMO

A incorporação de resíduos aos materiais de construção constitui tanto uma ampla fonte de estudos para os setores de pesquisa, como também uma prática usual para o setor da indústria da construção. Neste trabalho, foi investigada a possibilidade de utilização do resíduo proveniente do beneficiamento do arenito, na forma de agregado miúdo, em argamassas. Enquanto que, em um extremo, existe uma demanda contínua por agregados, observada pela quantidade expressiva de construções em andamento, em outro, existem elevadas quantidades inutilizadas do resíduo de arenito, o qual também possui características que podem vir a atender às funções dos materiais tradicionais, mas que só pode ser utilizado como tal após verificação de seu desempenho através de estudos específicos de viabilidade técnica. Primeiramente, o remanescente de arenito passou pelos processos de coleta, realizada em uma pedreira de extração de Arenito Botucatu em Taquara/RS, e de beneficiamento, a fim de reduzir o tamanho das partículas do resíduo até equivalência com as de agregado miúdo. Limitados pela quantidade de material, optou-se pela realização do estudo em corpos de prova de argamassa de cimento. O plano experimental contou com dois tipos de resíduo (amarelo e rosa), três traços, em massa, de cimento e agregado miúdo (1:1,5, 1:3,0 e 1:4,5) e cinco porcentagens de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Verificou-se que o agregado miúdo de arenito possui uma granulometria com grande porcentagem de materiais finos e também possui uma elevada absorção, o que leva ao aumento da água necessária para a mistura, suprida neste trabalho pelo aditivo superplastificante, mas que gerou aumento no custo da argamassa. Com o aumento da substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito, decorreu-se também o aumento da resistência à compressão no traço intermediário e pobre, enquanto que no traço rico a resistência manteve-se próxima da argamassa de referência. A absorção de água por capilaridade é menor para todas as argamassas que possuem agregado miúdo de arenito, comparativamente com a formada apenas por agregado natural. Tanto a massa específica aparente quanto o módulo de elasticidade dinâmico são maiores para o traço mais rico. Em geral, de acordo com o método e ensaios propostos neste trabalho, o material apresentou características adequadas para uma possível utilização.

Palavras-chave: Arenito Botucatu. Agregado Miúdo. Argamassa. Reciclagem. Resíduo. Sustentabilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho	21
Figura 2 – Limites da composição granulométrica de agregados miúdos	48
Figura 3 – Matriz experimental	50
Figura 4 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural	53
Figura 5 – Pedreira em Taquara/RS, local onde foi coletado o resíduo de arenito	54
Figura 6 – Abertura de fendas no arenito	55
Figura 7 – Extração do bloco de arenito com auxílio de cunha e alavanca	56
Figura 8 – Aspecto do arenito amarelo coletado	57
Figura 9 – Aspecto do arenito rosa coletado	57
Figura 10 – Distribuição granulométrica dos resíduos sem beneficiamento	57
Figura 11 – Início da britagem do resíduo, com detalhe do britador de rolos	58
Figura 12 – Esquema do procedimento realizado com o resíduo britado	58
Figura 13 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito amarelo britado B1 e B2	59
Figura 14 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito rosa britado B1 e B2	60
Figura 15 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de arenito amarelo	63
Figura 16 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de arenito rosa	64
Figura 17 – Análise termogravimétrica dos arenitos amarelo e rosa	66
Figura 18 – Difratograma de raios X do arenito amarelo	67
Figura 19 – Difratograma de raios X do arenito rosa	67
Figura 20 – Molde da forma tronco-cônica empregada no ensaio de consistência	70
Figura 21 – Medidas de três diâmetros ortogonais do espalhamento da argamassa após 30 golpes na mesa de consistência	70
Figura 22 – Realização da moldagem	72
Figura 23 – Acabamento superficial	72
Figura 24 – Vedação da base do corpo de prova	75
Figura 25 – Corpo de prova com resina epóxi aplicada	75
Figura 26 – Vista dos corpos de prova durante o ensaio de absorção por capilaridade ...	76
Figura 27 – Vista do equipamento e corpo de prova utilizado no ensaio de ultrassom ...	77
Figura 28 – Influência do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito e do traço da argamassa na quantidade de aditivo empregado para manter uma mesma consistência	80
Figura 29 – Influência do traço na resistência à compressão das argamassas, aos 28 dias de idade	82

Figura 30 – Influência do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito na resistência à compressão de argamassas, aos 28 dias de idade	83
Figura 31 – Influência do traço e do teor de substituição na resistência à compressão de argamassas, aos 28 dias de idade	84
Figura 32 – Influência do tipo de arenito, traço e do teor de substituição na resistência à compressão de argamassas, aos 28 dias de idade	85
Figura 33 – Absorção por capilaridade das argamassas confeccionadas apenas com agregado miúdo natural	86
Figura 34 – Absorção por capilaridade das argamassas com 25% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito	87
Figura 35 – Absorção por capilaridade das argamassas com 50% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito	87
Figura 36 – Absorção por capilaridade das argamassas com 75% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito	88
Figura 37 – Absorção por capilaridade das argamassas com 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito	88
Figura 38 – Influência do traço na absorção de água por capilaridade das argamassas ...	90
Figura 39 – Influência do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito na absorção de água por capilaridade das argamassas	91
Figura 40 – Influência do traço e do teor de substituição na absorção de água por capilaridade das argamassas	92
Figura 41 – Influência do traço na altura de absorção de água por capilaridade das argamassas	94
Figura 42 – Influência teor de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito na altura de absorção de água por capilaridade das argamassas	94
Figura 43 – Influência do tipo de arenito, traço e teor de substituição na densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas	96
Figura 44 – Influência do tipo de arenito, traço e teor de substituição na densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas	97
Figura 45 – Influência do tipo de arenito, traço e teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico	99
Figura 46 – Custo por m ³ das argamassas	101
Figura 47 – Custo por m ³ e por resistência à compressão das argamassas	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre as características dos agregados e as propriedades do concreto que influenciam	36
Quadro 2 – Características do aditivo superplastificante	68
Quadro 3 – Processo de mistura da argamassa	69
Quadro 4 – Procedimento do ensaio de consistência	70
Quadro 5 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites da composição granulométrica de agregados miúdos	47
Tabela 2 – Limites do módulo de finura de agregados miúdos	48
Tabela 3 – Características físicas e químicas do cimento	51
Tabela 4 – Caracterização química do cimento por fluorescência de raios X	52
Tabela 5 – Caracterização física do agregado miúdo natural	53
Tabela 6 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito amarelo britado B1 e B2	59
Tabela 7 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito rosa britado B1 e B2	60
Tabela 8 – Porcentagem de mistura de B1 e B2	61
Tabela 9 – Caracterização física do agregado miúdo de arenito amarelo	62
Tabela 10 – Caracterização física do agregado miúdo de arenito rosa	63
Tabela 11 – Caracterização química dos arenitos por fluorescência de raios X	66
Tabela 12 – Relação água/cimento e aditivo/cimento das argamassas em função do traço e do teor de substituição de agregado natural por resíduo de arenito	71
Tabela 13 – Consistência das argamassas para os diferentes traços e teores de substituição de agregado natural por resíduo de arenito	71
Tabela 14 – Fator de correção da força de ruptura	74
Tabela 15 – Resistência à compressão média das argamassas com diferentes teores de substituição e proporcionamento	81
Tabela 16 – ANOVA: resultados da resistência à compressão	82
Tabela 17 – Absorção de água por capilaridade média das argamassas	89
Tabela 18 – ANOVA: resultados da absorção de água por capilaridade	89
Tabela 19 – Altura média de absorção de água por capilaridade das argamassas	92
Tabela 20 – ANOVA: resultados da altura de absorção de água por capilaridade	93
Tabela 21 – Densidade de massa aparente no estado endurecido média das argamassas	95
Tabela 22 – ANOVA: resultados da densidade de massa aparente no estado endurecido	95
Tabela 23 – Média do módulo de elasticidade das argamassas	97
Tabela 24 – ANOVA: resultados do módulo de elasticidade dinâmico	98
Tabela 25 – Consumo de cimento referente aos três traços de argamassa	100
Tabela 26 – Custos unitários dos insumos	100
Tabela 27 – Custo por m ³ das argamassas	101
Tabela 28 – Custo por m ³ e por resistência à compressão das argamassas	102

LISTA DE SIGLAS

ANOVA – Análise de Variância

CP I – Cimento Portland Comum

CP III – Cimento Portland com Escória de Alto Forno

CP IV – Cimento Portland Pozolânico

CP V – ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

Fepam – Fundação Estadual de Proteção Ambiental

Lacer – Laboratório de Materiais Cerâmicos

Lamtac – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

LTM – Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental

MF – Módulo de Finura

Norie – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

OECD – *Organisation for Economic Co-operation and Development*

RCD – Resíduo da Construção e Demolição

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	19
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	19
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
2.2.1 Objetivo Principal	19
2.2.2 Objetivos Secundários	19
2.3 HIPÓTESE	20
2.4 DELIMITAÇÕES	20
2.5 LIMITAÇÕES	20
2.6 DELINEAMENTO	20
3 RESÍDUOS	23
3.1 RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	25
3.2 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO ARENITO BOTUCATU	27
3.2.1 Arenito	27
3.2.2 Arenito Botucatu	29
3.2.2.1. Características do Arenito Botucatu	30
3.2.2.2. Extração do Arenito Botucatu	30
4 AGREGADOS	32
4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS	32
4.2 ORIGEM DOS AGREGADOS	33
4.3 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO	34
4.4 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS E ARGAMASSAS	35
4.4.1 Petrografia	37
4.4.2 Forma, Textura e Superfície Específica dos Agregados	37
4.4.3 Massa Específica	39
4.4.4 Massa Unitária	40
4.4.5 Porosidade e Absorção	40
4.4.6 Teor de Umidade	42
4.4.7 Distribuição Granulométrica	43
4.4.8 Propriedades Mecânicas	46
4.5 NORMA	47
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49

5.1 METODOLOGIA	49
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS	50
5.2.1 Cimento	50
5.2.2 Agregado Miúdo	52
5.2.2.1 Agregado Miúdo Natural	52
5.2.2.2 Agregado Miúdo de Arenito	54
5.2.2.2.1 <i>Extração e Beneficiamento do Arenito Botucatu</i>	54
5.2.2.2.2 <i>Coleta e Processamento do Resíduo</i>	56
5.2.2.2.3 <i>Caracterização Física dos Agregados Miúdos de Arenito</i>	61
5.2.2.2.4 <i>Caracterização Química dos Agregados Miúdos de Arenito</i>	65
5.2.2.2.5 <i>Caracterização Físico-Química dos Agregados Miúdos de Arenito</i>	66
5.2.2.2.6 <i>Caracterização Mineralógica dos Agregados Miúdos de Arenito</i>	67
5.2.3 Água	68
5.2.4 Aditivo	68
5.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	68
5.3.1 Quantidade de Material	68
5.3.2 Mistura	69
5.3.3 Ensaio de Consistência	70
5.3.4 Dosagem	71
5.3.5 Moldagem	72
5.3.6 Cura	72
5.4 ENSAIOS	73
5.4.1 Compressão Axial	73
5.4.2 Absorção de Água por Capilaridade	74
5.4.3 Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido	76
5.4.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico	76
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
6.1 EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO NA CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA	79
6.2 ANÁLISE DO RESULTADO DOS ENSAIOS	81
6.2.1 Resistência à Compressão	81
6.2.2 Absorção de Água por Capilaridade	86
6.2.2.1 Absorção de Água por Capilaridade ao Longo do Tempo	86
6.2.2.2 Absorção de Água por Capilaridade	88
6.2.2.3 Altura de Absorção	92

6.2.3 Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido	95
6.2.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico	97
6.3 ANÁLISE QUANTITATIVA E DE CUSTO	99
6.3.1 Análise da Quantidade de Resíduo Produzido	99
6.3.2 Análise do Custo das Argamassas	100
7 CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A	113
APÊNDICE B	115
APÊNDICE C	119
APÊNDICE D	122

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável pelo planejamento, projeto e execução de obras de habitação e de infraestrutura. A participação abrangente na economia do País a torna uma significativa fonte de renda. Porém, constitui uma grande consumidora de recursos naturais e processados e, por consequência, é geradora de resíduos.

O crescimento econômico do Brasil, nos últimos anos, não apenas propiciou como também tornou necessária a construção ou ampliação da infraestrutura como portos, aeroportos, rodovias, usinas de geração de energia e redes para o saneamento básico, e do setor habitacional. Disto, decorreu um aumento, tanto da demanda por mão de obra e materiais de construção, quanto da quantidade de resíduos gerados.

Diversos trabalhos buscam o reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) na própria indústria da construção. Leite (2001, p. 1), afirma que “Atualmente, a preocupação ambiental diz respeito, entre outras coisas, ao excessivo ou ineficiente consumo de recursos naturais.”. Esta citação, apesar de escrita há mais de uma década, permanece válida. É no contexto abordado que o presente trabalho se insere, visando reaproveitar o resíduo gerado nos processos de obtenção da matéria-prima, tornando o consumo de recursos naturais mais eficiente e, desta forma, minimizando danos ambientais. O resíduo em questão é resultante da extração e beneficiamento da rocha sedimentar arenito, comumente utilizada em alicerces, muros e revestimentos de pisos e paredes.

Relacionado ao excessivo consumo de materiais, em janeiro de 2013, foi denunciado na mídia: “Ação ilegal de dragas causa danos ambientais ao Rio Jacuí, no RS” (ALMEIDA, 2013). Decorrente desta evidência, a extração de areia no Rio Jacuí foi proibida durante vários meses, o que gerou aumento de preços deste insumo e até mesmo sua falta no mercado. Ainda, em setembro de 2013, Mariano (2013, p. 1) fez nova denúncia em relação à extração de areia: “Retirada de areia impacta área em Viamão”. Estas duas reportagens evidenciam a necessidade da busca de outras fontes deste agregado indispensável na maior parte das obras da construção civil.

Têm-se, porém, a consciência de que a utilização de materiais de má qualidade ou contaminados pode gerar manifestações patológicas e, até mesmo, resultar no comprometimento da estrutura de uma edificação. Como exemplo de manifestação possível, pode-se citar as reações expansivas entre os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e minerais reativos dos agregados (TIECHER, 2010). Desta maneira, é necessário um estudo aprofundado das características e propriedades físicas do material que virá a ser utilizado.

Com base nas situações descritas, este trabalho busca iniciar o estudo da viabilidade técnica da utilização do resíduo do beneficiamento de arenito como agregado para a construção civil, mais especificamente, como agregado miúdo em argamassas. Possui o intuito de colaborar com uma destinação adequada para este material remanescente, proporcionar uma fonte alternativa para suprir a demanda por agregados convencionais e, conseqüentemente, reduzir a extração de recursos naturais, cada vez mais escassos.

Como objetivos específicos, são identificadas as características, propriedades físicas e químicas do agregado miúdo de arenito e do agregado miúdo natural, entre os quais é realizada uma análise comparativa. É também avaliada qual a influência do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo estudado em argamassas de cimento, nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, massa específica aparente no estado endurecido e módulo de elasticidade dinâmico.

É importante salientar dois tópicos acerca deste projeto. O trabalho tem por objetivo a utilização do resíduo em concretos. Porém, devido à limitação na quantidade de material, o trabalho foi executado em argamassa de cimento, a qual é constituinte do concreto. Portanto, sempre que for mencionada a palavra argamassa neste trabalho, deve ficar subentendido que refere-se à argamassa de cimento. Além disso, o termo “agregado miúdo proveniente do resíduo do beneficiamento de arenito” tem sua denominação simplificada, em muitos casos, para “agregado miúdo de arenito”, e o agregado miúdo de referência poderá ser chamado de “agregado miúdo natural”, de “areia natural”, ou apenas “areia”.

No capítulo seguinte a este, referente às diretrizes do trabalho, são apresentados os tópicos que direcionam esta pesquisa. No capítulo 3, são apresentados os temas fruto da pesquisa bibliográfica introduzindo os resíduos em geral, algumas das suas possíveis aplicações em Engenharia e tópicos acerca do remanescente resultante do beneficiamento da rocha arenito, o

qual é estudado neste trabalho. A seguir, no capítulo 4, é intensificada a questão relativa aos agregados, discorrendo sobre sua importância, função, características, requisitos para utilização e influência sobre as propriedades de argamassas e concretos.

O programa experimental deste estudo é tratado no capítulo 5, no qual descreve-se a metodologia aplicada, os materiais utilizados e os ensaios executados. No capítulo 6 são expostos os resultados dos experimentos, sua análise estatística e uma possível interpretação. Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões obtidas com este trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a influência da substituição do agregado natural pelo resíduo do beneficiamento de arenito nas propriedades das argamassas de cimento?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação da influência do uso de resíduo do beneficiamento do arenito como substituição do agregado natural em argamassas de cimento.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) caracterização física, química e mineralógica do agregado miúdo derivado do resíduo do beneficiamento de arenito;
- b) influência do teor de substituição do agregado natural na resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, massa específica aparente e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas;
- c) identificação do teor ótimo de substituição do agregado.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é de que a substituição parcial de agregado miúdo natural pelo resíduo do beneficiamento de arenito influencia positivamente nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, massa específica aparente e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da substituição do agregado miúdo natural por outro, derivado do beneficiamento do resíduo do arenito Botucatu, em argamassas de cimento.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

a) com relação ao resíduo:

- originário do beneficiamento do arenito Botucatu proveniente de jazida da cidade de Taquara, Rio Grande do Sul;
- utilização de duas tipologias, uma com tonalidade amarela e outra rosa;
- utilização do material após britagem, sem composição da granulometria;

b) com relação à argamassa de cimento:

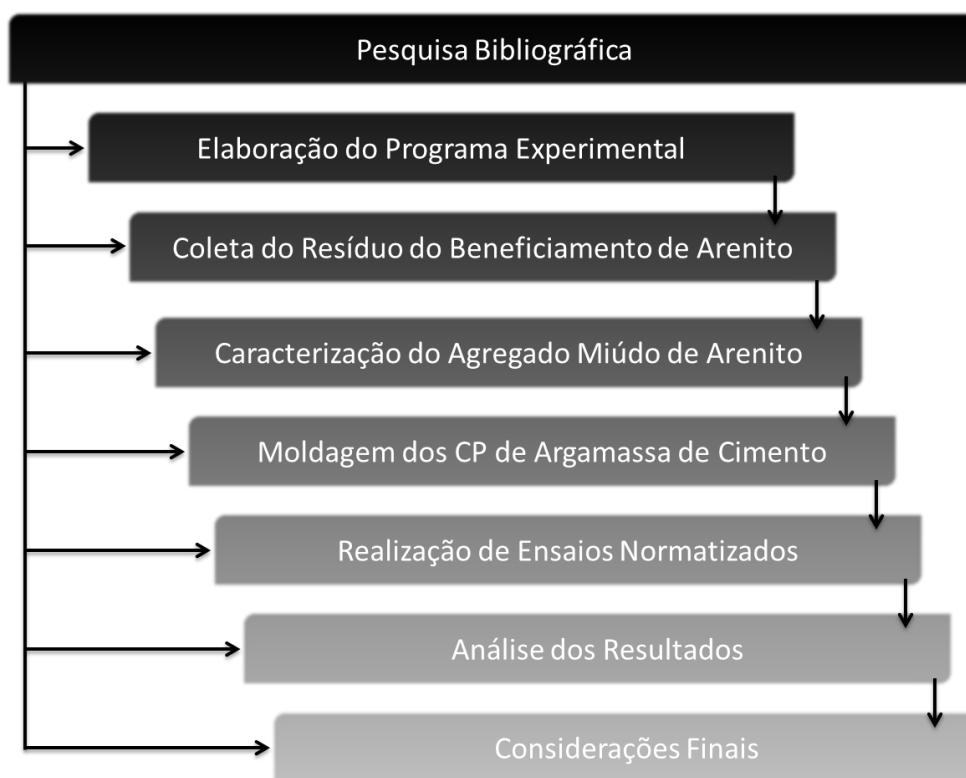
- três diferentes traços, constituídos apenas de cimento e agregado miúdo, sem cal;
- cinco diferentes teores de substituições do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo de arenito, que variam entre 0 e 100%;
- utilização de aditivo superplastificante para manter constante a relação água/cimento e a consistência;

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas citadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do programa experimental;
- c) coleta do resíduo do beneficiamento de arenito;
- d) caracterização do agregado miúdo de arenito;
- e) moldagem dos corpos de prova de argamassa de cimento;
- f) realização de ensaios normatizados;
- g) análise dos resultados;
- h) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborada pela autora)

O trabalho iniciou com a **pesquisa bibliográfica**, através da busca da literatura técnica e científica relacionadas aos temas pesquisados e abordados, que foram sobre resíduos, incluído o resíduo de beneficiamento do arenito Botucatu, e agregados. O conteúdo destes capítulos foi o embasamento teórico para a elaboração de todo o trabalho, desde o plano experimental até os resultados e conclusões.

Como dito, concomitantemente com a pesquisa bibliográfica, ocorreu a **elaboração do programa experimental**. Esta fase foi de fundamental importância, pois visava definir e planejar os procedimentos que foram realizados, de modo que os resultados obtidos fossem significativos e complementares, ou seja, que pudessem ser analisados e comparados. Em seguida, foi realizada a **coleta do resíduo do beneficiamento de arenito** na cidade de Taquara/RS, cuja quantidade dependeu da definição do plano experimental e da recomendação existente nas normas vigentes.

Os experimentos propriamente ditos iniciaram com a **caracterização do agregado miúdo de arenito**, através da realização de ensaios baseados nos procedimentos das normas técnicas. Estes ensaios foram definidos no plano experimental com base na literatura, que indica quais são fundamentais para a descrição de agregados miúdos. Algumas das caracterizações também foram feitas com o agregado natural, a fim de que os resultados pudessem ser comparados.

Após a caracterização de todos os materiais constituintes, foram **moldados os corpos de prova** de argamassa de cimento com os traços e porcentagens de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo de arenito definidos no plano experimental. Por fim, foram **realizados ensaios** sobre os corpos de prova, os quais também foram definidos no plano experimental, e que têm por base os procedimentos das normas técnicas. Esta etapa consistiu no procedimento final do experimento, cujo objetivo era a obtenção de dados.

Em etapa posterior, foram **analisados os resultados** obtidos nos ensaios de caracterização dos corpos de prova. Esta fase teve a finalidade de buscar explicações acerca do comportamento das argamassas de cimento quando foram variados os tipos de arenito, os traços e as porcentagens de substituição do agregado miúdo. Nas **considerações finais**, pretendeu-se, a partir da análise dos resultados, responder à questão de pesquisa deste trabalho.

3 RESÍDUOS

O impulso para a procura da utilização dos resíduos e subprodutos foi consequência da crise de 1973, ocorrida por motivos energéticos, e que desencadeou mudanças na economia em nível mundial (CALMON, 2007, p. 1593). Porém, as primeiras Normas Brasileiras a tratarem de forma abrangente sobre a classificação e procedimentos com relação a resíduos sólidos em geral, com exceção dos radioativos, datam do ano de 1987. Fica evidenciado, portanto, que a preocupação com este tema é relativamente recente no País, uma vez que se passaram menos de trinta anos desde a criação de um padrão para a sua gestão. As quatro Normas criadas naquele ano foram canceladas e revisadas em 2004, devido à “[...] crescente preocupação da sociedade com relação às questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável [...]”, como é revelado na introdução de uma delas, a NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. v). A Norma citada tem como finalidade a classificação dos resíduos sólidos e nela tais materiais são definidos como “Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 1).

Conforme a European Commission¹ (2006 apud CALMON, 2007, p. 1592), a gestão de resíduos deve iniciar com a prevenção da formação desse material através da melhora do processo produtivo, seguida pela procura de alternativas para reutilizá-los ou reciclá-los e, se não existirem tais possibilidades, a correta deposição. Porém, Calmon (2007, p. 1592) relata que o padrão de produção atual é linear, no qual os produtos são extraídos, processados, utilizados e descartados no meio ambiente, e também indica que o padrão ideal deveria ser cíclico ou fechado. O autor acrescenta que “O mundo está diante de um dilema entre o equilíbrio do sistema físico-ecológico e os demais sistemas, tais como: o sistema demográfico, econômico e industrial, o sistema de ciência e tecnologia e o sistema político.” (CALMON, 2007, p. 1591).

¹ EUROPEAN COMMISSION. European Union's Approach to Waste Management. 2006. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>>. Acesso em: 27 abr. 2007.

Rohde (2006, p. 170) também comenta que, em um tipo de economia monoprodutiva tradicional, cujo objetivo é o lucro oriundo do produto final, ao mesmo tempo em que não ocorre a busca pelo reconhecimento econômico ou a reciclagem dos resíduos, estes são vistos como um inconveniente que surge ao final da cadeia produtiva. Pelo mesmo autor, um resíduo passará a ser considerado um subproduto somente quando o sistema produtivo for observado através de um modelo ambiental sistemático. Chateau² (2007 apud SANTOS, 2012, p. 66) acrescenta que um resíduo não pode continuar sendo considerado desta maneira a partir do momento que é valorizado economicamente.

Embora as afirmativas de Calmon (2007) e Rohde (2006) tenham sete anos ou mais, ainda são válidas para os dias de hoje. Inclusive, a visão de que existe a necessidade de integrar os diversos sistemas já era defendida há vinte anos, por Mehta e Monteiro (1994, p. 564), ao declararem que o futuro da escolha dos materiais para a construção (aço ou concreto) seria relacionado não apenas com a engenharia e economia, mas também com a energia e ecologia.

Sob uma perspectiva atual, a busca de uma produção com maior eficiência e menores passivos ambientais é decorrente tanto por obrigação da legislação, quanto da economia de materiais e de custos com a deposição dos resíduos, da melhoria da qualidade dos produtos e maior competitividade, bem como da melhoria da imagem da empresa frente à sociedade (CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, [2002?]), que agora procura por produtos com certificações ambientais (PASSUELO, 2007, p. 6). Um dos métodos de crescente utilização para aperfeiçoamento da produção é a análise do ciclo de vida, o qual compreende “[...] a extração de matérias-primas, transporte, manufatura, distribuição, uso/reuso e disposição final; seus impactos econômicos e ambientais.” (PASSUELO, 2007, p. 1). Outro método, denominado produção mais limpa, avalia “[...] produtos e processos, para otimizar o emprego de matérias-primas, de modo a não gerar ou a minimizar a geração de resíduos [...]” (CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, [2002?], p. 9).

Este trabalho, embora não tenha o foco voltado à melhoria do processo de extração do arenito Botucatu, trata da reutilização do resíduo gerado a partir de sua extração, com o objetivo de verificar a viabilidade de sua utilização como matéria-prima na indústria da construção.

² CHATEAU, L. Environmental Acceptability of Beneficial Use of Waste as Construction Material: State of Knowledge, Current Practices and Future Developments in Europe and in France. **Journal of Hazardous Materials**, v. 139, n. 3, p. 556-562, 2007.

Este capítulo está dividido em dois itens. O primeiro discorre sobre as possíveis aplicações dos resíduos na construção civil e o segundo versa sobre o material tratado nesta pesquisa.

3.1 RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme mencionado na introdução, a indústria da construção civil constitui um amplo setor da economia e também é responsável por exercer grande influência sobre o meio ambiente (CALMON, 2007, p. 1593):

[A indústria da construção civil] É grande consumidora de matérias-primas e recursos minerais, importante geradora de resíduos, inclusive durante o processo de construção por meio das perdas e desperdícios, grande consumidora de energia e também colaboradora na poluição ambiental, incluído o efeito estufa.

Mas o mesmo autor acrescenta que esta indústria não só é capaz de incorporar os resíduos que gera, como também os subprodutos e resíduos de outras atividades. Isso se deve à “[...] necessidade de grande quantidade de materiais, da diversidade de insumos utilizados e de redução dos custos de produção.” (SANTOS, 2012, p. 65). Porém, este último autor aponta que, antes de um material ser aceito e utilizado nesta área, devem ser considerados empecilhos de ordem técnica, econômica e até mesmo política. Aqui poderia ser incluída a barreira cultural, uma vez que os resíduos são vistos, muitas vezes, como materiais simplesmente descartáveis.

Ângulo et al. (2001, p. 4-5) confirmam que a indústria cimenteira é responsável pela maior experimentação brasileira relacionada à incorporação de produtos remanescentes de outras indústrias na construção civil, ao reutilizar cinza volante e escória de alto-forno misturadas ao cimento. Carvalho³ (2002 apud JOHN; ÂNGULO, 2003, p. 57), ao utilizar como método de análise o ciclo de vida, verificou que o cimento CP I produz 1.655 ton. de CO₂ equivalente, enquanto que o CP IV e o CP III produzem, respectivamente, 828 e 496 ton. de CO₂ equivalente. Ou seja, além de utilizarem um material residual na produção, as indústrias de cimento também economizam energia e reduzem emissões de gases tóxicos.

³ CARVALHO, J. de. **Análise do Ciclo de Vida Ambiental Aplicada à Construção Civil**: estudo de caso – comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, São Paulo, 2002.

Para iniciar uma avaliação da utilização de um resíduo como possível matéria-prima na construção civil, John e Ângulo (2003) estabeleceram uma metodologia para conduzir as pesquisas:

- a) estudar o processo que gera o resíduo;
- b) determinar as características deste material;
- c) definir as possíveis alternativas de utilização;
- d) desenvolver a alternativa escolhida;
- e) avaliar o produto.

Com relação à etapa que determina a característica do material, Ambrozewicz (2012, p. 30) aponta que seu conhecimento é fundamental para a previsão do comportamento e para que possam ser escolhidos adequadamente. O autor evidencia que um material é reconhecido tanto por suas propriedades, as quais são características intrínsecas que os distinguem dos demais, como também pela reação frente à presença de agentes externos. Na etapa de caracterização devem ser contempladas as definições (JOHN; ÂNGULO, 2003, p. 20):

- a) da composição química do resíduo de forma quantitativa [...];
- b) das suas características microestruturais [...];
- c) das características físicas como massa específica real, granulometria, porosidade [...], eventualmente das características mecânicas, além da caracterização ambiental; e
- d) de outras características relevantes, como poder calorífico, condutividade térmica, radioatividade, etc.

Na etapa de identificação do possível emprego do resíduo, John (2000, p. 58) exemplifica que o material pode vir a ser utilizado como aglomerante ou como agregado, e identifica quais os requisitos para que possa ser utilizado como este último:

- a) apresentar forma granular ou poder ser transformado para a forma granular preferencialmente cúbica ou esférica;
- b) apresentar estabilidade dimensional quando embebido no aglomerante ao longo do tempo e durante ciclos de molhagem ou secagem;
- c) apresentar baixa solubilidade em água;
- d) resistir aos esforços da mistura.

Gonçalves (2013) também desenvolveu um método de avaliação dos resíduos com potencial aplicação em concretos e argamassas, dividido em duas partes: a primeira correspondente à avaliação da periculosidade do remanescente, e a segunda correspondente a avaliação da durabilidade dos materiais aos quais foi incorporado. Nesta segunda etapa, o autor avalia a durabilidade quanto à degradação física (abrasão, erosão, cavitação e fogo), química (hidratação do MgO e CaO, reação entre álcalis e agregado, ataque por sulfatos, corrosão por cloretos) e quanto à existência de impurezas.

A delimitação da aplicação do resíduo é definida tanto por suas características, propriedades físicas e de resistência, quanto pelas consequências do seu uso sobre o material, como a variação da trabalhabilidade (JOHN, 2000, p. 58). Calmon (2007, p. 1597) acrescenta que devem ser avaliadas as propriedades e a durabilidade do material ao qual o resíduo foi incorporado de acordo com o padrão da norma e com os requisitos exigidos por esse material.

Diversos têm sido os estudos para avaliar uma possível aplicação dos resíduos na indústria da construção civil. Estrella (1996, p. 74-77) lista uma grande quantidade de resíduos utilizados, como escória de alto-forno e de caldeira; cinzas volante e pesada; cinzas de carvão; casca de arroz; pó-de-pedra; isopor; plásticos; fibras de propileno, de aço, de vidro, têxteis e vegetais; lamas. Calmon (2007) cita como exemplos de materiais estudados o remanescente oriundo da mineração e desdobramento do granito e do mármore e os resíduos da indústria de celulose e da indústria siderúrgica. Levy (2007), por sua vez, cita outros materiais utilizados, como o RCD, resíduos poliméricos, de pneus e de madeira.

3.2 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO ARENITO BOTUCATU

Neste item são apresentados conceitos importantes acerca do arenito, do arenito Botucatu e a formação do resíduo oriundo da extração e beneficiamento deste último.

3.2.1 Arenito

O arenito é uma rocha sedimentar que tem como constituintes “[...] grãos de quartzo, frequentemente imersos numa matriz argilosa ou siltosa, ora cimentados por sílica amorfa, ora por óxidos de ferro ou ora por carbonatos.” (FRAZÃO, 2002, p. 15). O mesmo autor

acrescenta que a estrutura formada tem elevada porosidade, sendo ela a responsável pela desagregação da rocha em ensaios de sanidade por sulfatos e de gelo e degelo. Mehta e Monteiro (1994, p. 242) definem arenito como uma rocha constituída por partículas da mesma faixa granulométrica da areia e cuja fratura se desenvolve ao redor dos grãos, e não através deles, como ocorre na rocha quartzito. Frascá (2007 p. 445-446) contribui dizendo que arenitos possuem acima de 50% de partículas, constituídas principalmente de quartzo. O mesmo autor expõe ainda que a tonalidade da rocha resultante pode ser branca, rosa ou avermelhada.

Constituinte principal dos arenitos, o mineral quartzo é a sílica (SiO_2) na forma cristalina, geralmente incolor, cuja química dificilmente se altera e considerado como o mineral mais duro entre os convencionais (dureza 7 na classificação de Mohs) (FRAZÃO, 2002, p. 7). Maciel Filho e Nummer (2011, p. 39) citam que existem variedades, como o quartzo criptocristalino, chamado de calcedônia ou ágata, e a sílica hidratada, também denominada opala. Frazão (2002, p. 7) destaca que a calcedônia, a opala (sílica amorfa) e o quartzo excessivamente metamorfozados podem reagir com os álcalis presentes no cimento.

Os óxidos de ferro são representados pela magnetita ou hematita (MEDERO, 2005, p. 149). Frascá (2007, p. 446) discorre que a coloração avermelhada presente em alguns tipos de arenito é devida “[...] em geral, pelo recobrimento dos grãos por finíssima película de óxidos ou hidróxidos de ferro.” Pierini (2006, p. 48-49), por sua vez, comenta que os óxidos de ferro conferem a coloração de arenitos e siltitos, sendo verde ou cinza quando existe ganho de elétrons (redução) e vermelho ou marrom quando existe perda de elétrons (oxidação). A autora acrescenta que esse processo ocorre devido às variações do nível do lençol freático e pela percolação de águas superficiais.

Com relação aos minerais da cimentação carbonática, pode-se citar a calcita e a dolomita (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 245). Possuem aspecto visual semelhante, porém a calcita possui uma menor dureza entre as duas (MACIEL FILHO; NUMMER, 2011, p. 41).

Segundo Frazão (2002, p. 15), a cimentação das rochas sedimentares com materiais ferruginosos é mais frágil que as demais, as ligações carbonáticas desintegram-se com águas ácidas, enquanto que aquelas com sílica apresentam maior dureza. Evidencia que o tipo e quantidade desse agente cimentante influenciam em características da rocha como durabilidade e resistência mecânica.

As propriedades do arenito são também influenciadas pelo modo como está depositado o sedimento. Frazão (2002, p. 15) indica que “A resistência mecânica também depende da direção dos esforços em relação à estratificação.”. O mesmo autor explica que, se a carga aplicada for perpendicular à estratificação, tanto resistência à compressão quanto à flexão são maiores. Se variado o ângulo de aplicação da carga, a resistência à compressão diminui, e se aplicada a carga paralelamente à estratificação, a resistência à flexão é menor.

Com relação à utilização, a durabilidade desta rocha em revestimentos é razoável, mas mancham pelo acúmulo de poeira e outros materiais (FRAZÃO, 2002, p. 15). Para utilização como pedra britada, o autor cita ainda que os arenitos cimentados por sílica são vantajosos em relação aos demais, mas que esse tipo de cimentação pode reagir com os álcalis presentes no cimento. Além disso, evidencia que o material formado possui formato anguloso, o que reduz a trabalhabilidade de concretos.

3.2.2 Arenito Botucatu

A Bacia do Paraná possui uma estratigrafia constituída por rochas sedimentares e magmáticas, de até 7000 metros de espessura total, sendo a Supersequência Gondwana III definida como “[...] o intervalo da coluna estratigráfica da Bacia do Paraná [...] onde se posicionam os sedimentos eólicos da Formação Botucatu e as rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral.” (REIS, 2013, p. 18).

O arenito com o qual foi trabalhado é parte constituinte da Formação Botucatu, que cobre áreas do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai em um total de 1,6 milhões km², e possui espessuras que variam de 80 a 400 m (MILANI⁴, 1997 apud REIS, 2013, p. 21). A Formação Botucatu situa-se entre a Formação Rio do Rastro e a Formação Serra Geral (REIS, 2013, p. 21).

⁴ MILANI, E. J. **Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. 1997. 255 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

3.2.2.1 Características do Arenito Botucatu

A origem da Formação Botucatu foi devido ao transporte eólico e deposição de sedimentos em dunas, os quais foram compactados por deposições de sedimentos superiores e cimentados pela precipitação de minerais (VIEIRA, 2012, p. 29), vindo a formar um “[...] extenso deserto de paleodunas.” (BETIOLLO, 2006, p. 39).

O material da formação “[...] constitui-se quase que totalmente, em sua área de ocorrência, por arenitos maduros, quartzosos de coloração vermelha, rósea ou amarelo-clara, com granulometria fina a média, grãos arredondados e aspecto fosco.” (REIS, 2013, p. 21). Bettio (2006, p. 39) acrescenta que a formação dos arenitos através do transporte por meio eólico os caracteriza com uma composição que tende a ser homogênea. Reis (2013, p. 21) cita ainda que a estrutura possui estratos cruzados, padrão também evidenciado em ambientes de formação eólica, e fraturas principais na orientação NE.

Quanto à exposição do arenito, Bettio (2006, p. 39) diz que “A área de afloramento da Formação Botucatu é relativamente pequena se comparada com a extensão, pois, em boa parte, os arenitos são recobertos pela Formação Serra Geral.”. No Rio Grande do Sul, os afloramentos são evidenciados na área rural e distritos ao sul da cidade de Taquara e no Rio dos Sinos, também ao sul (BARBOSA; FERREIRA, 2006, p. 234).

3.2.2.2 Extração do Arenito Botucatu

A extração do arenito (também conhecido como pedra grês) da região de Taquara tem a finalidade de abastecer o setor da construção civil de grande parte do estado do Rio Grande do Sul (BARBOSA; FERREIRA, 2006, p. 235). Pode-se acrescentar que, além da extração, ocorre o beneficiamento deste material, uma vez que as peças de arenito retiradas passam por processo de corte para a formação de blocos ou placas.

As peças resultantes são utilizadas não somente como blocos para alicerces e lajes (BARBOSA; FERREIRA, 2006, p. 235), mas também como revestimento, pilaretes para cerca, paralelepípedos e meio-fio (em fase de elaboração)⁵. Frazão (2002, p. 15) acrescenta que “O arenito Botucatu (silicoso) é muito usado como calçamento pela facilidade de

⁵ Informação obtida no trabalho Aproveitamento do Resíduo de Corte do Arenito, elaborado pelo mestrando Mauro Mario, sob a orientação de Angela Borges Masuero, para uma das disciplinas da Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS).

obtenção de placas (devido à sua estratificação) e pela aspereza que apresenta. É usado, também, como revestimento decorativo de paredes.”.

Dados de 2002 indicavam que a extração deste material no município de Taquara era praticamente clandestino, pois apenas uma pequena quantidade das quinhentas minas estimadas buscava regularizar a operação e “[...] a esmagadora maioria, permanecia no exercício da atividade extrativa totalmente à margem da legislação aplicável, tanto no que concerne ao interesse patrimonial da União quanto no que tange à proteção jurídica do ambiente natural.” (BARBOSA; FERREIRA, 2006, p. 233).

Com relação à extração do arenito em Taquara foi observado que, apesar desta atividade gerar grande quantidade de empregos na região, ocorria uma intensa degradação ambiental e, entre os fatores contribuintes para esta degradação, pode-se citar (BARBOSA; FERREIRA, 2006, p. 235):

- a) a retirada da cobertura vegetal para limpeza e instalação da frente de lavra;
- b) a inexistência de um planejamento anterior e durante a extração, que acarreta a geração de maior quantidade de rejeitos;
- c) o acúmulo de resíduos sobre a vegetação adjacente ao local de mineração e nos corpos hídricos;
- d) o impacto visual ocasionado pela mudança da topografia.

A partir de tais evidências, a Fepam – Fundação Estadual de Proteção Ambiental – e Ministério Público, em ação conjunta, promoveram ações para estimular a busca dos extratores pelo licenciamento da atividade, principalmente por motivos ambientais e, caso contrário, seriam aplicadas medidas de repressão administrativas ou penais (BARBOSA; FERREIRA, 2006, p. 234). Os autores indicam ainda que o plano permanece em operação, com a existência de uma contínua fiscalização. Embora exista esta medida pública atuante com o intuito de regularizar a situação dos extratores, têm-se o conhecimento de que, atualmente, entre as pedreiras existentes, cerca de 120 são regulares, enquanto outras aproximadamente 500 continuam na irregularidade (em fase de elaboração)⁶.

⁶ Informação obtida no trabalho Aproveitamento do Resíduo de Corte do Arenito, elaborado pelo mestrando Mauro Mario, sob a orientação de Angela Borges Masuero, para uma das disciplinas da Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS).

4 AGREGADOS

Agregado é considerado um “[...] material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.” pela NBR 9.935 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011b, p. 2).

Mehta e Monteiro (1994, p. 239-240) comentam que o custo desse material é relativamente barato e que o volume que ocupa em relação ao volume total de concreto é significativo, de 60% a 80%. “Mas a economia não é a única razão de se usar agregado: ele confere vantagens técnicas consideráveis ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade que a pasta de cimento pura.” (NEVILLE, 1997, p. 125).

4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados podem ser classificados de diversas maneiras. A NBR 9.935 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011b), não trata da classificação dos agregados, mas divide as diversas terminologias dos agregados (restringidas às importantes para este trabalho) quanto aos seguintes critérios:

a) natureza:

- naturais (retirados da natureza, e que podem passar por processos de britagem, lavagem ou classificação);
- artificiais (obtidos por métodos industriais);
- reciclados (obtidos de resíduos da mineração, da indústria ou dos processos de demolição e construção);

b) dimensões:

- agregado graúdo (grãos constituintes são retidos na peneira com 4,75 mm de abertura de malha e passantes na peneira com 75 mm de abertura de malha);
- agregado miúdo (grãos constituintes são retidos na peneira com 0,15 mm de abertura de malha e passantes na peneira com 4,75 mm de abertura de malha);

c) densidade:

- densidade normal (de 2.000 a 3.000 kg/m³);
- leves;
- pesados.

A mesma norma citada anteriormente classifica a areia quanto à natureza de forma diferente, como natural, artificial, reciclada ou de britagem.

4.2 ORIGEM DOS AGREGADOS

O conhecimento da rocha originária do agregado utilizado é fundamental, visto que (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 482):

[...] herdarão a mineralogia e muitas das propriedades físicas e mecânicas da rocha mãe a partir da qual foram obtidos. Essas propriedades são influenciadas desde a formação da rocha e alteradas pelos processos de intemperismo aos quais a rocha de origem é submetida.

Rocha é uma agregação de minerais, definidos por Maciel Filho e Nummer (2011, p. 33) como materiais de “[...] corpo sólido, inorgânico, com composição química aproximadamente definida e que pode ser encontrado na natureza.”. A NBR NM 66 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998) divide as rochas em três grupos, conforme sua origem: ígneas, sedimentares e metamórficas. Mehta e Monteiro (1994, p. 241) complementam: “[...] estes grupos são ainda subdivididos de acordo com a composição química e mineralógica, textura ou granulação, e estrutura cristalina.”.

Maciel Filho e Nummer (2011, p. 42) comentam que o magma é constituído por silicatos, principalmente, e por material volátil, em ponto de fusão. As rochas ígneas, também chamadas de magmáticas, originam-se a partir do resfriamento deste material e “Quanto maior a profundidade, mais lento o resfriamento, o que permite maior cristalização dos minerais, resultando, geralmente, em rochas mais resistentes e melhores agregados.” (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 482).

As rochas metamórficas são derivadas tanto de rochas ígneas e sedimentares quanto de metamórficas, e suas características são determinadas pela rocha matriz e intensidade do intemperismo (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 483). São geradas por fatores como aumento

de temperatura ou pressão, ou por ação química (MACIEL FILHO; NUMMER, 2011, p. 45). Mehta e Monteiro (1994, p. 243) as definem como “[...] densas, mas frequentemente folhadas.” e cita como exemplos o mármore, filito, gnaisse e xisto.

Por fim, para as rochas sedimentares são fundamentais dois conceitos, apresentados por Maciel Filho e Nummer (2011, p. 43, grifo do autor): “Qualquer rocha pode ser destruída pela ação do intemperismo e fornecer material para a formação de outras rochas denominadas sedimentares.” e “**Diagênese** é todo o processo de transformação de um material solto, como areia, cascalho, lama, que é sedimento, em rocha sedimentar.”.

Segundo Farias e Palmeira (2007, p. 482):

As rochas sedimentares formam-se por três processos principais: (a) pela deposição (sedimentação) das partículas originadas pela erosão de outras rochas e, nesse caso, são conhecidas como rochas sedimentares clásticas ou detríticas; (b) pela precipitação de substâncias em solução e, nesse caso, são ditas rochas sedimentares químicas; ou (c) pela deposição dos materiais de origem orgânica [...].

O arenito, argilito e siltito são rochas detríticas e sua coesão é relativa ao agente responsável pela cimentação, que pode ser sílica cristalina (maior), carbonato ou óxido de ferro (menor) (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 483). Os autores comentam ainda que o material em questão é anisotrópico, ou seja, ao se variar o plano de medição, serão obtidas diferentes propriedades mecânicas e físicas.

Como exemplo de rochas sedimentares químicas, são citados o evaporito e o calcário (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 483). Maciel Filho e Nummer (2011, p. 43) explicam que ocorre o fenômeno da precipitação, em especial em ambiente aquoso, formando um material que vem a originar esse tipo de rocha.

4.3 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO

A areia como agregado natural pode ser extraída de rios, jazidas de cava ou de praias (AMBROZEWICZ, 2012, p. 44-45). O autor comenta que, no primeiro caso, é feita a sucção da areia presente ao longo do rio; no segundo caso, são retiradas de depósitos em vales ou próximos aos rios; e que no último caso, a utilização em concreto armado não é recomendada

pela existência de cloretos e pela finura. Petrucci (1998, p. 40) comenta que tais materiais devem ser lavados e classificados.

Uma importante observação acerca da mudança de exploração de agregados miúdos é feita por Recena (2008, p. 162):

A preocupação com o meio ambiente tem criado restrições à exploração de jazidas no leito de rios naquelas regiões consagradas pela obtenção de materiais de boa qualidade, obrigando a exploração de areias em locais alternativos, muitas vezes sendo obtidos agregados com características e qualidades diferentes daquelas internalizadas ao longo do tempo, tidas como adequadas, impedindo que muitas alterações importantes decorrentes dessas alterações sejam percebidas.

Segundo Ambrozewicz (2012, p. 45), “A pedra britada é o agregado industrializado mais utilizado na construção civil, [...]”. O mesmo autor menciona que as rochas naturais são extraídas de jazidas, beneficiadas através do processo de britagem e classificadas de acordo com a granulometria, resultando desse processo, além dos agregados graúdos, também a areia britada, o pó de pedra, o fíler, etc.

Conforme Petrucci (1998, p. 41), existem britadores de bolas ou martelos, de movimento contínuo (rolos ou giratórios) ou de mandíbulas (de efeito simples ou duplo). O autor informa que os britadores de rolos possuem dois cilindros com textura corrugada, dentada ou lisas, afastados por uma distância entre si e que giram em sentidos opostos.

4.4 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS E ARGAMASSAS

Neste trabalho está sendo avaliada a influência de um agregado miúdo em argamassas de cimento, as quais constituem concretos. Portanto, este tópico irá apresentar as características dos agregados que influenciam tanto argamassas de cimento quanto concretos. Embora tais características sejam importantes para ambos, a literatura que trata com maior abrangência sobre as características de agregados é a de concretos e, por isso, esta será apresentada em maior número.

Neville (1997, p. 126) apresenta que as características dos agregados influenciadas pelas características da rocha matriz são a “[...] composição química e mineralógica, características

petrográficas, densidade de massa, dureza, resistência, estabilidade química e física, estruturas de poros e cor.”, e que as características que independem de sua origem são a “[...] forma e tamanho de partículas, textura superficial e absorção.”. O autor comenta que tais características exercem influência sobre as propriedades do estado fresco e endurecido do concreto. Pode-se acrescentar que o mesmo ocorre sobre as propriedades de argamassas. O quadro 1, elaborado por Sbrighi Neto (2000, p. 26), apresenta a relação entre as propriedades do concreto no estado endurecido e as características dos agregados que as influenciam.

Quadro 1 – Relação entre as características dos agregados e as propriedades do concreto que influenciam

PROPRIEDADES DO CONCRETO	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DO AGREGADO
Resistência mecânica	Resistência mecânica Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Granulometria Módulo de elasticidade Coeficiente de Poisson
Resistência à derrapagem	Tendência ao polimento
Economia	Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

(fonte: SBRIGHI NETO, 2000, p. 26)

4.4.1 Petrografia

Um dos ensaios importantes para o conhecimento das características dos agregados é a análise da petrografia (FRASCÁ, 2007, p. 456):

O estudo petrográfico estabelece a classificação da rocha e compreende a descrição macroscópica (estruturação, cor) e microscópica (mineralogia, textura, granulação), com ênfase nas características (alteração, deformação, padrão de microfissuramento e outros) que possam influenciar o comportamento mecânico e a durabilidade sob as condições de uso a que será submetida.

Farias e Palmeira (2007, p. 495-496) demonstram a importância da análise mineralógica, em obras da construção civil, ao citar que este ensaio detecta a presença de materiais danosos, as propriedades químicas e físicas dos minerais e seu grau de alteração. Os mesmos autores citam os diversos materiais que podem danificar as propriedades do concreto e a forma como ocorre:

- a) as reações de hidratação podem ser alteradas com a presença de substâncias orgânicas;
- b) a aderência entre agregado e pasta pode ser reduzida pela presença de materiais finos envolvendo os agregados;
- c) partículas pulverulentas, mesmo que não reativas, podem exigir maior quantidade de água em concretos, devido à elevada área superficial;
- d) os materiais constituintes do agregado como sílica ou carbonato podem ser reativos com os álcalis do cimento e os sais de areias marinhas e desérticas geram corrosão de armaduras.

As normas NBR 7.389-1, NBR 7.389-2 e NBR 15.577-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009e, 2009f, 2008a) tratam da avaliação petrográfica dos agregados miúdos, graúdos e potencialmente reativos com os álcalis do cimento, respectivamente.

4.4.2 Forma, Textura e Superfície Específica dos Agregados

O índice de forma dos agregados graúdos é determinado pela NBR 7.809 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006c). A geometria, ou forma, depende da rocha de origem e, se existir, do método de britagem (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 492). Mehta e Monteiro (1994, p. 266) classificam as partículas de agregados como alongadas, achatadas, angulosas ou arredondadas.

Partículas arredondadas, como materiais encontrados em rios e regiões marítimas e a areia proveniente da deposição eólica, possuem as arestas e vértices desgastados (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 266). Neville (1997, p. 131) acrescenta que a quantidade de vazios em uma mistura composta de partículas arredondadas é menor do que com partículas angulosas, e que tal propriedade influencia na massa específica do concreto.

Partículas angulosas possuem arestas e cantos vivos, constituindo exemplos os agregados provenientes da britagem de rochas intrusivas, conforme Mehta e Monteiro (1994, p. 266). Segundo Neville (1997, p. 132), partículas com forma angulosa demandam uma maior quantidade de água de mistura para manter a trabalhabilidade. Embora venha a consumir uma maior quantidade de pasta de cimento, pela maior superfície específica, Farias e Palmeira (2007, p. 494) apontam que as partículas angulosas possuem maior resistência, uma vez que o modo como as partículas se acomodam favorece o intertravamento.

Mehta e Monteiro (1994, p. 266) comentam que os produtos da britagem de arenitos, calcários com estratificação e folhelhos possuem pequenas espessuras (são achatados ou lamelares) e grande comprimento (são alongados). As partículas lamelares acumulam ar e água de exsudação sob elas, pois se posicionam conforme um plano (NEVILLE, 1997, p. 132). Farias e Palmeira (2007, p. 493) também explicam que “Partículas alongadas ou lamelares tendem a se acomodar segundo um plano e se rompem em flexão quando compactadas, funcionando como pequenas vigas bi-apoiadas sobre outras partículas.”.

A textura, por sua vez, depende da “[...] dureza, granulação e porosidade da rocha matriz e da sua subsequente exposição à ação de atrito.” (MEHTA, MONTEIRO, 1994, p. 266). Os autores classificam materiais de textura vítrea as escórias densas, de textura lisa os pedregulhos e areias, de textura áspera os agregados resultantes de britagem de basalto, granito e calcário e, ainda, materiais que possuem textura celular.

A textura influencia tanto a água requerida para a mistura (principalmente para os agregados miúdos) e a aderência entre o agregado e a pasta de cimento (NEVILLE, 1997, p. 132). Apesar de modificarem a trabalhabilidade dos concretos, Farias e Palmeira (2007, p. 494) e Mehta e Monteiro (1994, p. 266) relatam que a força da aderência entre a pasta de cimento e agregados de textura áspera é maior. Essa aderência influencia na resistência à flexão do concreto com pouca idade, mas que pode ser menos importante em idades mais avançadas, quando passa a existir a aderência química (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 266).

Com relação ao estado fresco do concreto, Mehta e Monteiro (1994, p. 264) explicam que “[...] comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto.”. Por sua vez, com relação ao estado endurecido, a textura e forma dos agregados influenciam significativamente nas propriedades mecânicas, e esta influência é maior na resistência à flexão, comparativamente com a resistência à compressão (NEVILLE, 1997, p. 133).

A superfície específica do agregado depende de suas características geométricas. Este índice relaciona a área superficial com o volume das partículas (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 494). Os autores comparam que a superfície específica de uma partícula arredondada é 90% da cúbica, e muito maior em muitas partículas pequenas do que em um elemento muito grande. Mehta e Monteiro (1994, p. 266) acrescentam que a área específica é maior em partículas achatadas e alongadas do que em partículas esféricas. Neville (1997, p. 131) conclui dizendo que partículas com elevadas áreas específicas exigem maior quantidade de água de mistura para manter a trabalhabilidade do concreto.

4.4.3 Massa Específica

A massa específica absoluta é a relação entre a massa de material e o volume ocupado pelo sólido, desconsiderando-se todos os poros, enquanto que a massa específica aparente considera os poros impermeáveis (NEVILLE, 1997, p. 141). O autor comenta que geralmente a massa específica aparente é determinada com o agregado na condição saturado superfície seca, é utilizada para dosar a quantidade de agregados para determinado volume de concreto, e não é parâmetro para identificar a qualidade do agregado. Indica ainda que massa específica absoluta tem difícil determinação. Porém, Mehta e Monteiro (1994, p. 257) expõem que a massa específica real não é necessária para o cálculo de dosagem.

Os valores de massa específica das rochas normalmente utilizadas variam de 2.600 a 2.700 kg/m³, conforme Mehta e Monteiro (1994, p. 257). Neville (1997, p. 142) indica que a massa específica aparente do arenito está entre 2,6 a 2,9 kg/dm³. Os ensaios de massa específica são determinados pelas NBR NM 52 E NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b, 2009c) para os agregados miúdos e graúdos, respectivamente.

4.4.4 Massa Unitária

A massa unitária também é a relação entre a massa e o volume, mas considerando-se os vazios entre as partículas (MEHTA, MONTEIRO 1994, p. 257). A massa unitária é utilizada para a transformação do traço em massa para o traço em volume (AMBROZEWICZ, 2012, p. 41). Neville (1997, p. 143) indica que “A massa unitária real do agregado depende não somente das características do material que determinam o grau potencial de adensamento, mas também da compactação conseguida no caso.”. O autor indica que tais características são a forma e distribuição dos tamanhos das partículas.

Os valores de massa unitária dos agregados variam entre 1300 a 1750 kg/m³ (MEHTA, MONTEIRO 1994, p. 257). A NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a) trata da determinação da massa unitária dos agregados, grãos e miúdos.

4.4.5 Porosidade e Absorção

Os poros possuem diferentes tamanhos e, alguns deles são apenas internos, enquanto que outros têm ligação com a superfície (NEVILLE, 1994, p. 144). O autor explica que a viscosidade da pasta de cimento limita a profundidade de penetração desse material nos poros menores do agregado, mas que a água pode percolar, dependendo do volume, tamanho e continuidade dos poros. Indica ainda que a porosidade de arenitos pode variar entre 0 e 48%.

A porosidade modifica a massa específica aparente dos grãos e, conseqüentemente a dosagem do agregado para um volume de concreto (NEVILLE, 1997, p. 144). O autor indica que, pelo fato do agregado constituir grande parte do volume do concreto, sua porosidade também influencia a porosidade do concreto. Farias e Palmeira (2007, p. 490) revelam que a porosidade aparente (poros interligados) dos agregados está intimamente ligada com sua capacidade de absorção. Cordeiro (2013, p. 37) complementa que a porosidade influencia, além da absorção, também as propriedades de módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos, entre outras.

A absorção de água dos agregados miúdos, por sua vez, é determinada pela NBR NM 30 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b, p. 1), a qual define este

conceito como “[...] o processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido.”. Esta Norma considera a absorção como a água existente na condição superfície saturada seca relacionada ao total de massa seca, em porcentagem. A norma que trata da absorção dos agregados graúdos é a NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009c).

Leite (2001, p. 71-72) comenta que, por possuírem uma baixa porosidade, a absorção de água de agregados convencionais não influencia significativamente a mistura de concretos, mas que em misturas com agregados reciclados essa influência é importante. Mehta e Monteiro (1994, p. 258) apontam que o conhecimento da umidade superficial e da capacidade absorviva é necessário para se corrigir a quantidade de água do concreto.

Larrard⁷ (1999, apud CORDEIRO, 2013, p. 37) relata que “[...] todas as propriedades do concreto, em especial, as relacionadas à reologia do concreto fresco, são afetadas pela absorção de água do agregado caso este seja utilizado na condição seca.”. Neville (1997, p. 146) descreve que, nos traços pobres, agregados na condição seca tornam-se saturados por absorverem a água da mistura e, desta maneira, reduzem a relação água/cimento. O mesmo autor acrescenta que, em traços ricos, a pasta de cimento envolve rapidamente os agregados e, desta maneira, impede que ocorra a penetração de água e a consequente saturação dos grãos, processo que mantém a quantidade de água na mistura tal qual foi adicionada. Barra⁸ (1996, apud LEITE, 2001, p. 72) comenta que “Quanto mais seco, poroso, de menor dimensão for o agregado e quanto maior a fluidez da pasta, ou argamassa, maior será a quantidade de água absorvida.”. Essa absorção e índice de vazios elevados em agregados reciclados “[...] diminui a água livre da mistura, conferindo com isto um aumento na resistência à compressão, contribuindo ainda para uma ‘cura interna’ do concreto.” (LATTERZA; MACHADO JÚNIOR, 2003, p. 56).

⁷ LARRARD, F. de. **Concrete Mixture Proportioning**: a scientific approach. Londres: E & FN Spon, 1999.

⁸ BARRA, M. **Estudio de la Durabilidad del Hermigón de Árido Reciclado em su Aplicación como Hermigón Armado**. 1996. 233 p. Tese (doutorado) – Escola Técnica Superior d’Enginyers de Camin, Canal i Ports, Universitat Politècnica de la Catalunya, Barcelona, 1996.

4.4.6 Teor de Umidade

A umidade é a porcentagem de água existente em relação à massa de sólidos secos (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 488). Pelos mesmos autores, são definidas quatro condições de umidade:

- a) ambiente, também chamada seca ao ar: a água é absorvida do ambiente no qual a rocha está exposta (lençol freático, chuva ou ar), e geralmente não ocorre a saturação;
- b) condição saturada superfície úmida: consiste no agregado saturado internamente, ou seja, com os poros preenchidos, e com sua superfície envolta por um filme de água;
- c) condição saturada superfície seca: é caracterizado pelo agregado saturado internamente, mas com a superfície seca, sendo obtida por uma leve secagem do material na condição saturada superfície úmida;
- d) seca: quando inexistente umidade no agregado, sendo obtida esta condição com a secagem em estufa a aproximadamente 105 °C até que o peso se torne constante.

Porém, Neville (1997, p. 146) comenta que a quantidade total de água em um agregado úmido é a soma da absorção (representada pela quantidade de água na condição saturado superfície seca) e da umidade (representada pela quantidade de água excedente). O autor acrescenta que agregados graúdos apresentam menores variações deste fator e retém menor quantidade de umidade comparativamente com os agregados miúdos.

Os agregados graúdos possuem a umidade total determinada pela NBR 9.939 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011c), enquanto que os agregados miúdos têm a umidade superficial determinada pela NBR 9.775 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011a).

Em areias, existe ainda o processo denominado inchamento. Nele, dependendo da granulometria e da umidade, o volume aparente da areia pode aumentar pelo afastamento das partículas devido à tensão superficial da água (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 259). Neville (1997, p. 148) relaciona que areias finas possuem maior inchamento que areias grossas, e que a areia natural possui menor inchamento que os agregados miúdos provenientes de britagens. O autor acrescenta que, neste caso, o proporcionamento dos materiais deve ser corrigido. A NBR 6.467 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006b) determina o método de ensaio para verificar o inchamento de agregados miúdos.

4.4.7 Distribuição Granulométrica

A distribuição do tamanho das partículas corresponde à composição granulométrica de uma mistura de agregados (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 500; MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 260). A determinação dessa distribuição granulométrica por peneiramento consiste na passagem do agregado por uma série de peneiras normatizadas, e o resultado é expresso em porcentagem (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 500-501). Os mesmos autores acrescentam que os resultados são expressos em gráficos, formando curvas que permitem identificar algumas características desta mistura de agregados. Definem curva contínua como aquela que possui uma quantidade de agregados com todas as dimensões. Relatam que, se uma fração intermediária for inexistente, existe um patamar, que é característico de uma curva descontínua. Por fim, indicam que a curva uniforme é caracterizada como aquela que possui predominância de partículas com um mesmo diâmetro.

A dimensão máxima característica do agregado também é um conceito importante, e corresponde ao diâmetro da peneira de ensaio em que foi retido, em massa, 5% ou menos do total (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 503). Mehta e Monteiro (1994, p. 261) citam que com um agregado com dimensão máxima elevada, a superfície específica necessária a ser coberta pela pasta é menor.

O módulo de finura (MF) é definido como a “[...] soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, divididas por 100, número que é interpretado como o tamanho médio ponderado da peneira na qual o material é retido [...]” (FARIAS; PALMEIRA, 2007, p. 503). Frazão (2002, p. 42) classifica as areias em finas (MF menor que 2,4), médias (MF entre 2,4 e 3,9) e grossas (MF acima de 3,9). Porém, Neville (1997, p. 169) comenta que um mesmo valor de MF pode representar diferentes curvas granulométricas por não representar uma distribuição, apenas uma média.

A determinação da composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura são apresentados na NBR 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Também pode ser determinada a porcentagem de material fino (passante na peneira de abertura de malha de 0,075mm) presente no material, por lavagem, como determina a NBR NM 46 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a).

Neville (1997, p. 169) indica que uma curva granulométrica satisfatória depende dos seguintes fatores: “[...] a área superficial do agregado, que determina a quantidade de água necessária para molhagem completa dos sólidos; o volume relativo ocupado pelo agregado; a trabalhabilidade da mistura e a tendência à segregação.”. O autor comenta que para que a mistura possua trabalhabilidade e coesão, é necessário uma quantidade mínima de materiais com tamanho menor que 0,3 mm e, desta maneira, o agregado miúdo é necessário em menor quantidade em misturas mais ricas em cimento do que nas demais. Acrescenta também que o ar incorporado corresponde à metade do volume de partículas finas da mistura. Mehta e Monteiro (1994, p. 260-261) relacionam areias grossas com concretos pouco trabalháveis e areias finas com a necessidade do aumento de água e cimento. Ao se relacionar granulometria e trabalhabilidade, tem-se que (NEVILLE, 1997, p. 175):

[...] a granulometria do agregado é um fator importante na trabalhabilidade da mistura. A trabalhabilidade, por sua vez, tem influência sobre as demandas de água e de cimento, controla a segregação, tem algum efeito sobre a exsudação e tem influência sobre o lançamento e o acabamento do concreto. Esses fatores representam as importantes características do concreto fresco e influenciam também suas propriedades no estado endurecido: resistência, retração e durabilidade.

Mehta e Monteiro (1994, p. 261) comentam que uma granulometria ideal para formar concretos com trabalhabilidade e também econômicos é aquela na qual não existam partículas de apenas uma dimensão ou com dimensões intermediárias inexistentes. Farias e Palmeira (2007, p. 500) acrescentam que não são utilizados agregados de granulometrias uniformes, pois possuem excesso de vazios entre os grãos, e também porque sua resistência é menor devido à reduzida estabilidade. Neville (1997, p. 171) acrescenta que o volume de vazios de uma mistura será menor quanto maior a variedade de tamanhos de partículas, desde as partículas finas até as de tamanho máximo. O autor relata que a procura pela maior ocupação de volume pelos agregados tem caráter econômico, pois a pasta é mais cara que o agregado, e técnico, pois um traço rico é indesejável, além do fato que a ocupação maior de um volume aumenta a massa específica e, conseqüentemente, a resistência.

Lobo Carneiro⁹ (1943, apud BOGGIO, 2000, p. 74) comenta que a compacidade máxima em concretos com relações água/cimento e consistências idênticas está relacionada com uma granulometria ideal, com a qual o consumo de cimento é mínimo, há uma trabalhabilidade adequada e a resistência é maior. Por Boggio (2000, p. 74):

⁹ LOBO CARNEIRO, F. L. **Dosagem de Concretos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1953.

A maior resistência não é consequência direta da melhoria da granulometria, mas sim, de seus efeitos na diminuição da quantidade de água de amassamento (e a consequente redução da porosidade da pasta) e no decréscimo da quantidade de vazios e das possíveis imperfeições da massa de concreto quando lançado e adensado.

Recena (2008, p. 100) aponta que na pasta ocorre retração e, portanto, a estabilidade volumétrica de um material com aglomerantes depende da quantidade de agregado nele presente. Este autor ainda defende que a areia utilizada em argamassas também deve ter granulometria contínua, a qual pode ser obtida pela mistura de uma areia média e fina, de modo a obter uma melhor trabalhabilidade. Acrescenta que também deve possuir baixo teor de finos para que seja demandada uma menor quantidade de água, pois indica que, para uma mesma trabalhabilidade, a substituição de uma areia média por fina em argamassas aumenta a demanda de água em 50%, devido à maior adsorção dos grãos pela maior superfície específica. Dessa forma, o autor comenta que argamassas constituídas por areias finas apresentam maior coesão e acabamento, mas possuem maior retração e fissuração (pela evaporação de uma quantidade de água maior e redução significativa de volume), e menor resistência de aderência e mecânica.

Frazão (2002, p. 36) aponta que “O material pulverulento aumenta a quantidade de água de amassamento e influi, portanto, na trabalhabilidade e na resistência mecânica.”. Porém, o mesmo autor relata que quando tais partículas possuem tamanho correspondente às de silte, pode ocorrer um ajuste da granulometria do cimento ou do agregado miúdo, atuando beneficentemente. O autor comenta que o acréscimo de 7% de calcário sobre o peso de cimento pode aumentar a resistência do concreto à compressão em 10%.

Os minerais de tamanho entre 0,005 e 0,075mm são denominados como agregados finos ou fílers e, por possuírem dimensões semelhantes às do cimento, interessam tanto por sua superfície específica quanto pela finura (PETRUCCI, 1998, p. 45-46). Neville (1997, p. 106) aponta que a ação de tais materiais é física e que, desta maneira, os cimentos utilizados devem ser compatíveis (como exemplo, devem possuir elevada finura quando utilizados teores altos de fíler).

Neville (1997, p. 105-106) indica que “O fíler [...], devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência à fissuração.” e acrescenta que tais

materiais podem funcionar como focos de nucleação, deflagrando as reações de hidratação do cimento. Pereira (2010, p. 96-97) aponta que ocorre o refinamento dos produtos resultantes da hidratação e dos poros, além de uma redução na porosidade, devido à adição destes materiais finos. Petrucci (1998, p. 48) exemplifica que tais materiais são utilizados na colmatação dos vazios em concretos com baixa quantidade de cimento. Por Pereira (2010, p. 140):

Os fíleres e os microfíleres permitem aumentar a densidade de empacotamento e, quando adicionados em proporções inferiores aos vazios remanescentes das partículas maiores, propiciam o aumento da resistência e da fluidez simultaneamente. Além disso, ao aumentar a densidade da pasta, a segregação dos agregados graúdos é reduzida e se obtém um concreto mais coeso.

4.4.8 Propriedades Mecânicas

Com relação às propriedades mecânicas importantes de agregados, Mehta e Monteiro (1994, p. 259) citam que “A resistência à compressão, a resistência à abrasão e módulo de elasticidade são propriedades inter-relacionadas, que são muito influenciadas pela porosidade.”. Os autores dizem que as resistências à compressão dos agregados geralmente são altas, da ordem de 210 a 310 MPa, mas que no caso de rochas sedimentares, em particular o arenito, os resultados podem variar de 48 MPa a 240 MPa.

Neville (1997, p. 136) comenta que uma baixa resistência pode ser devida à baixa resistência das partículas ou, mesmo que resistentes, não estão bem vinculadas entre si. O mesmo autor indica que a resistência de arenitos americanos resultou em valores entre 44 e 240 MPa, sendo o valor médio para as 79 amostras de 131 MPa.

Ambrozewicz (2012, p. 47) recomenda que “[...] as rochas utilizadas na produção da brita tenham resistência à compressão simples superior que 2,5 ou 3 vezes a resistência à compressão do concreto a ser produzido.”. O autor comenta que o motivo dessa alta resistência dos agregados em comparação com a pasta é para que haja um completo aproveitamento do cimento, que é o constituinte mais caro.

O módulo de elasticidade do concreto é proporcional ao dos agregados e essa característica pode influenciar a retração e a fluência do material ao qual foi incorporado (NEVILLE, 1997, p. 136). O autor pondera que uma diferença significativa entre o módulo de elasticidade da pasta e do agregado pode gerar microfissuras no contato entre os dois materiais, e que

agregados com menores módulos de elasticidade e resistência podem absorver as tensões internas do concreto devido às variações de volume de origem térmica ou hidráulica. Mehta e Monteiro (1994, p. 90) relacionam que o módulo de elasticidade de rochas porosas como o arenito está entre 21 a 48 GPa.

Frazão (2002, p. 56) indica que a abrasão será maior em rochas com menor dureza, a qual é definida como a oposição ao risco ou penetração de um material mais duro, e que depende da compactidade e dureza dos minerais. A resistência à abrasão é uma característica importante em concretos utilizados em pisos e pavimentação (NEVILLE, 1997, p. 139).

4.5 NORMA

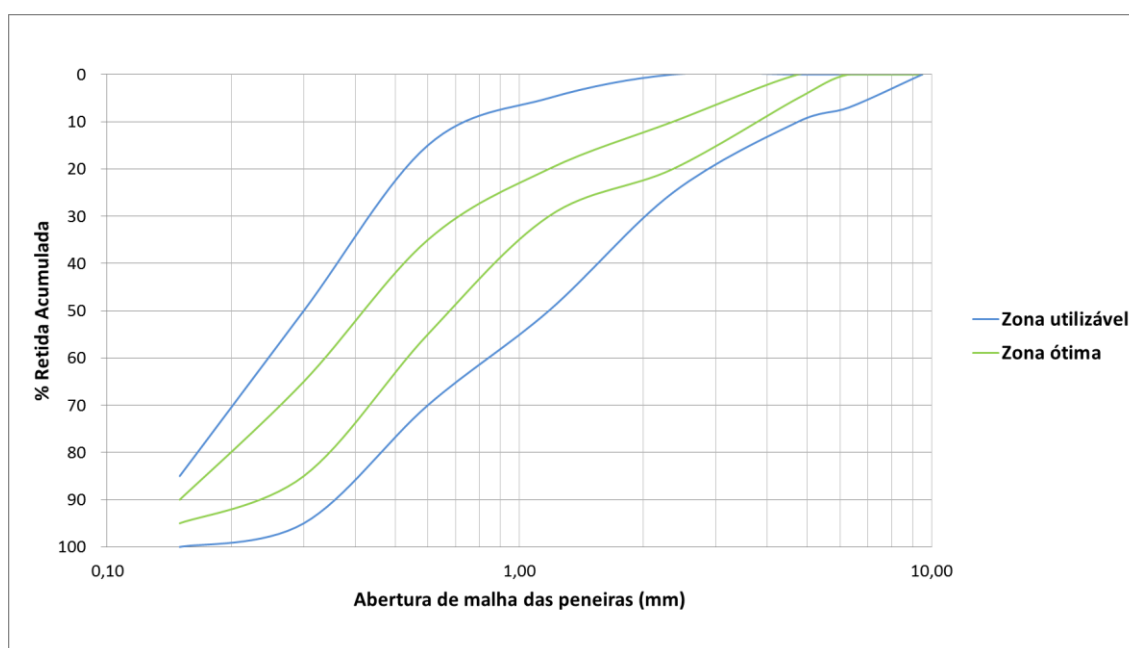
A NBR 7.211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009d) estabelece especificações acerca dos agregados utilizados em concreto. Na tabela 1 e figura 2 são apresentados os limites da distribuição granulométrica para os agregados miúdos e na tabela 2 são apresentados os limites do módulo de finura.

Tabela 1 – Limites da composição granulométrica de agregados miúdos

NBR 7211/2009				
Abertura de malha da peneira (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,50	0	0	0	0
6,30	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,60	15	35	55	70
0,30	50	65	85	95
0,00	85	90	95	100
	100	100	100	100

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009d, p. 5)

Figura 2 – Limites da composição granulométrica de agregados miúdos



(fonte: baseada em ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009d, p. 5)

Tabela 2 – Limites do módulo de finura de agregados miúdos

NBR 7211/2009	
Módulo de Finura	
Zona ótima	2,2-2,9
Zona utilizável inferior	1,55-2,2
Zona utilizável superior	2,9-3,5

(fonte: adaptada de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009d, p. 5)

Esta mesma norma também identifica o limite de substâncias nocivas que o agregado pode apresentar. Dentre elas, a quantidade de material pulverulento (passante na peneira de abertura de malha de 0,075mm) é limitado em 3% para materiais com desgaste superficial, e 5% para aquelas que estão protegidos dessa característica. Porém, acrescenta que, se tal material fino foi gerando somente durante o processo de britagem da rocha, tal quantidade pode ser de 10% para o primeiro caso e de 12% para o segundo, mas deve-se confirmar que os grãos com mais de 0,15mm não produzam partículas que afetem as propriedades do material ao qual foi incorporado.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito o programa experimental deste trabalho. É apresentada a metodologia do estudo, a caracterização dos materiais utilizados e a descrição dos ensaios executados. A maior parte dos ensaios foi realizada no Lamtac/Norie/UFRGS.

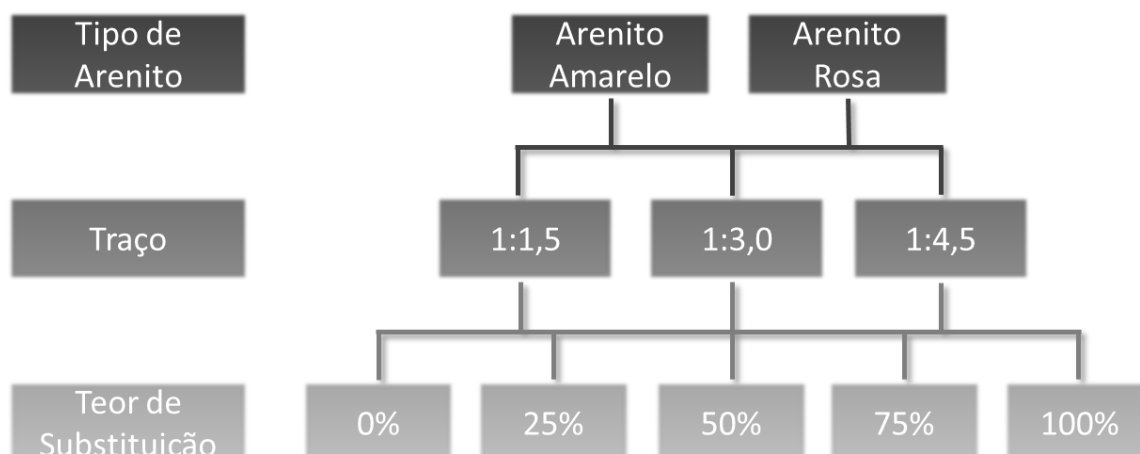
5.1 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa, proposta neste trabalho para verificar o comportamento da substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito, foi desenvolvida com base nos estudos de Moura (2000) e Masuero (2001), os quais pesquisaram sobre os resíduos escória de cobre e de aciaria elétrica, respectivamente. Ambos seguem o princípio de trabalhar com o resíduo em argamassas de cimento, buscando o teor ótimo de substituição para depois utilizá-lo em concretos. No caso deste trabalho, o estudo foi realizado apenas em argamassas de cimento a fim de permitir, posteriormente, a continuidade da pesquisa em concretos.

Os traços (cimento:agregado miúdo, em massa) foram os mesmos empregados por Moura (2000, p. 75), sendo um rico (1:1,5), um intermediário (1:3,0) e um pobre (1:4,5), os quais reproduzem aqueles normalmente utilizados em estudos sobre argamassas de cimento. Adotaram-se as seguintes proporções de substituição do agregado natural pelo de arenito: 0% (referência, constituído apenas de agregado miúdo natural), 25%, 50%, 75% e 100% (constituído apenas de agregado miúdo de arenito). Essa substituição foi calculada em volume, utilizando a massa específica dos materiais como base para o cálculo.

A partir das definições citadas anteriormente, foi formada a matriz experimental (figura 3), na qual estão identificadas as variáveis do estudo (tipo de arenito, traço e teor de substituição) e suas diversas combinações.

Figura 3 – Matriz experimental



(fonte: elaborado pela autora)

A consistência de todas as argamassas foi mantida constante de modo a possibilitar a comparação entre as diversas variáveis em estudo. O valor adotado foi de $225 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, baseado na recomendação da NBR 7.215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), de $225 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$.

Para avaliar a real influência da adição do arenito como substituição ao agregado, optou-se por manter fixa a relação água/cimento, além da consistência. Para tanto, foi necessária a adoção de um aditivo superplastificante.

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item são apresentados os materiais utilizados e os ensaios realizados para determinação de suas características físicas e químicas.

5.2.1 Cimento

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). Segundo a NBR 5.733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991), este cimento possui 100% a 95% de clínquer e sulfato de cálcio, e 0% a 5% de material carbonático. Tal composição o caracteriza como um dos cimentos mais puros disponível no mercado atualmente, motivo pelo qual foi escolhido para este trabalho.

A massa específica do cimento foi determinada em laboratório conforme a NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a) e resultou em um valor de 3,15 g/cm³. As características físicas e químicas do cimento, obtidas com o fabricante do mesmo, são apresentadas na tabela 3. Foi também realizada a caracterização química deste material através do ensaio de fluorescência de raios X no laboratório Lacer/UFRGS, cujo resultado está apresentado na tabela 4.

Tabela 3 – Características físicas e químicas do cimento

Cimento CPV ARI		
Ensaio		Resultados
Características Físicas		
Finura – # 200 (%)		0,16
Finura – # 375 (%)		1,9
Finura – método de Blaine (g/cm ²)		4.571
Início de pega (min.)		180
Fim de pega (min.)		285
Resistência à compressão	01 dia (MPa)	23,1
	03 dias (MPa)	37,5
	07 dias (MPa)	42,3
Características Químicas		
Teor de MgO (%)		1,98
Perda ao fogo (%)		2,58
Teor SO ₃ (%)		3,23

(fonte: adaptado de INTERCEMENT, 2014)

Tabela 4 – Caracterização química do cimento por fluorescência de raios X

Caracterização Química do Cimento	
Composto	%
CaO	60,50
SiO₂	20,56
SO₃	5,75
Fe₂O₃	3,76
Al₂O₃	3,25
K₂O	1,31
MgO	0,96
SrO	0,63
TiO₂	0,40
P₂O₅	0,19
MnO	0,06
CO₂	2,62

(fonte: elaborado pela autora)

5.2.2 Agregado Miúdo

Foram utilizados dois agregados miúdos neste trabalho. Um deles, a areia natural, é considerado o material de referência, enquanto que o outro, o agregado miúdo de arenito, é o material testado neste trabalho.

5.2.2.1 Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo natural utilizado foi uma areia quartzosa média proveniente do Rio Jacuí/RS, cujas características estão apresentadas na tabela 5. Esta areia não teve sua composição granulométrica alterada de modo significativo para a realização dos ensaios, apenas foi descartada a fração retida na peneira de 6,3 mm, visto que o material está sendo considerado como agregado miúdo. Toda a areia utilizada foi seca em estufa até constância de massa e embalada para protegê-la do contanto com a umidade.

Na curva granulométrica da areia natural (tabela 5 e figura 4), obtida conforme a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b), existe uma grande quantidade de material retida na peneira com abertura de malha de 0,3 mm, e uma quantidade muito pequena tanto retida nas peneiras de abertura de malha entre 4,8 mm e 1,8 mm, quanto

passante na peneira de abertura de malha de 0,15 mm. Ou seja, é possível verificar que a curva granulométrica da areia natural possui uma carência de materiais pulverulentos.

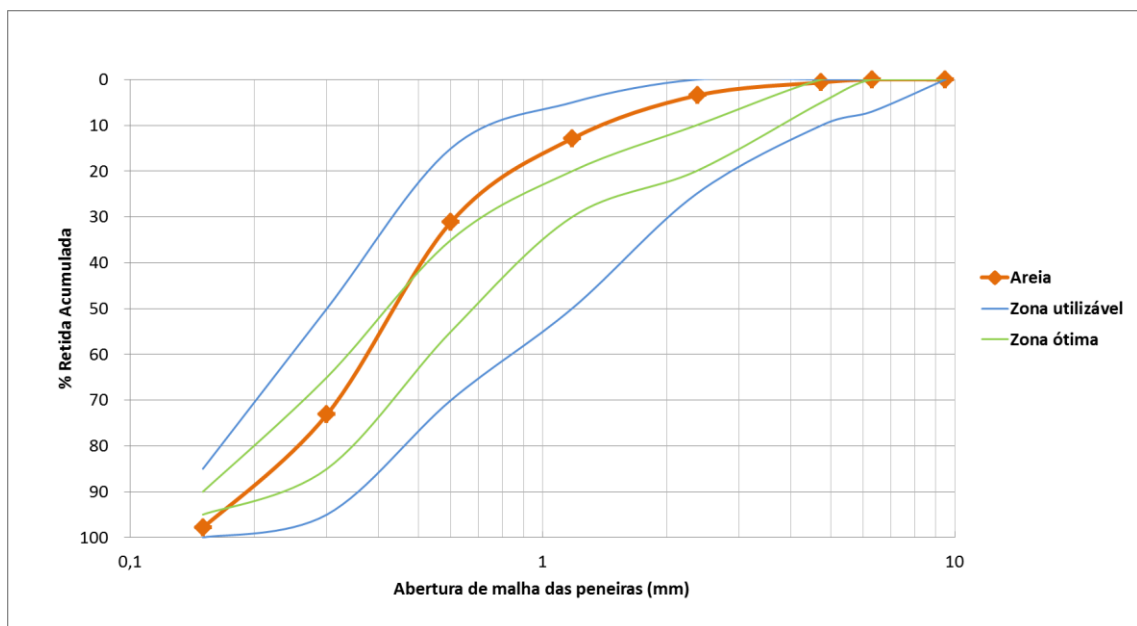
Tabela 5 – Caracterização física do agregado miúdo natural

Agregado Miúdo - Areia Natural		
Caracterização Física		
Ensaio	Resultados	Norma
Massa específica (g/cm ³)	2,64	NBR NM 52/2009
Massa unitária (g/cm ³)	1,51	NBR NM 45/2006
Absorção (%)	1,1	NBR NM 30/2001
Dimensão Máxima (mm)	2,38	NBR NM 248/2003
Módulo de Finura	2,20	NBR NM 248/2003

	Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	
Granulometria	4,75	1	1	NBR NM 248/2003
	2,36	3	4	
	1,18	9	13	
	0,6	18	31	
	0,3	42	73	
	0,15	25	98	
	Fundo	2	100	

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 4 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural



(fonte: elaborado pela autora)

5.2.2.2 Agregado Miúdo de Arenito

Neste item é descrito os processos de extração e de beneficiamento do arenito Botucatu, os quais geram, por consequência, o resíduo. Na sequência, é descrito como tal material foi coletado e processado de modo a formar o agregado miúdo utilizado neste trabalho e são identificados os ensaios de caracterização realizados e seus respectivos resultados.

5.2.2.2.1 Extração e Beneficiamento do Arenito Botucatu

O resíduo de arenito é proveniente da Pedreira Santa Cruz, localizada no km 37 da RS 020, na cidade de Taquara/RS (figura 5). Possui Licença de Operação Municipal e registro no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). É considerada uma pedreira de porte médio, com produção mensal de, aproximadamente, 200 m³ (informação verbal)¹⁰. Nela são obtidos, principalmente, blocos com dimensões entre 20 e 25 cm de altura e espessura, e de 40 a 45 cm de comprimento.

Figura 5 – Pedreira em Taquara/RS, local onde foi coletado o resíduo de arenito



(fonte: foto da autora)

O processo de extração do arenito inicia com a abertura de frentes de mineração com o uso de explosivos, acompanhado por geólogos. Com isso, são realizadas diversas tentativas na

¹⁰ Informação obtida com o proprietário da pedreira, Sr. Mário Moreira da Silva.

procura de um plano mais frágil existente na estratificação do arenito, de modo a facilitar a separação entre o material inferior e superior, visto que o processo é realizado manualmente.

A extração inicia com a abertura de fendas no material até a profundidade do plano frágil. Essa atividade é realizada com o auxílio de um martelete manual, que desagrega o arenito e torna possível sua remoção (figura 6). Pode-se visualizar que o material retirado é totalmente fragmentado, de modo que é descartado. Com esse sistema, uma grande área de extração é reduzida em menores áreas. Estas ainda são reduzidas por outros processos até o tamanho que torne possível a extração do maciço manualmente, utilizando-se uma cunha e uma alavanca, conforme demonstrado na figura 7. Por fim, o material é beneficiado através do corte em blocos.

Figura 6 – Abertura de fendas no arenito



(fonte: foto da autora)

Figura 7 – Extração do bloco de arenito com auxílio de cunha e alavanca



(fonte: foto da autora)

Os resíduos são inerentes ao processo, gerados tanto na extração quanto no beneficiamento do arenito. A estimativa é de que a pedreira produza, aproximadamente, 30% de resíduos sobre a quantidade total de material extraído (informação verbal)¹¹.

5.2.2.2.2 Coleta e Processamento do Resíduo

Em uma mesma jazida, foram coletadas duas tipologias do resíduo de arenito, uma rosa e outra amarela, separadamente. Teve-se o cuidado de coletar o material extraído recentemente, de modo a evitar que o resíduo estivesse contaminado com matéria orgânica, por exemplo. A quantidade de arenito recolhida foi de, aproximadamente, meia tonelada para cada um dos tipos. Tal quantidade está de acordo com a NBR NM 26 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), que recomenda um mínimo de 150 kg de agregado miúdo de cada tipo, para a realização de estudos em concretos quanto à dosagem e verificação da resistência.

Ao chegar ao laboratório, o resíduo (figura 8 e 9) foi quarteado para posterior análise de sua granulometria. A granulometria original (figura 10) de ambos os materiais coletados foi similar, variando de mais de 75 mm até menos de 0,075mm, com grande quantidade de materiais retidos nas peneiras de abertura de malha de 50 mm e 37,5 mm, o que demonstra a necessidade da britagem deste material para sua posterior utilização como agregado miúdo. É

¹¹ Informação obtida com o proprietário da pedreira, Sr. Mário Moreira da Silva.

importante salientar que esta distribuição granulométrica é específica apenas para o resíduo coletado neste trabalho, uma vez que este material pode ser muito variável e apresentar fragmentos maiores que os coletados.

Figura 8 – Aspecto do arenito amarelo coletado



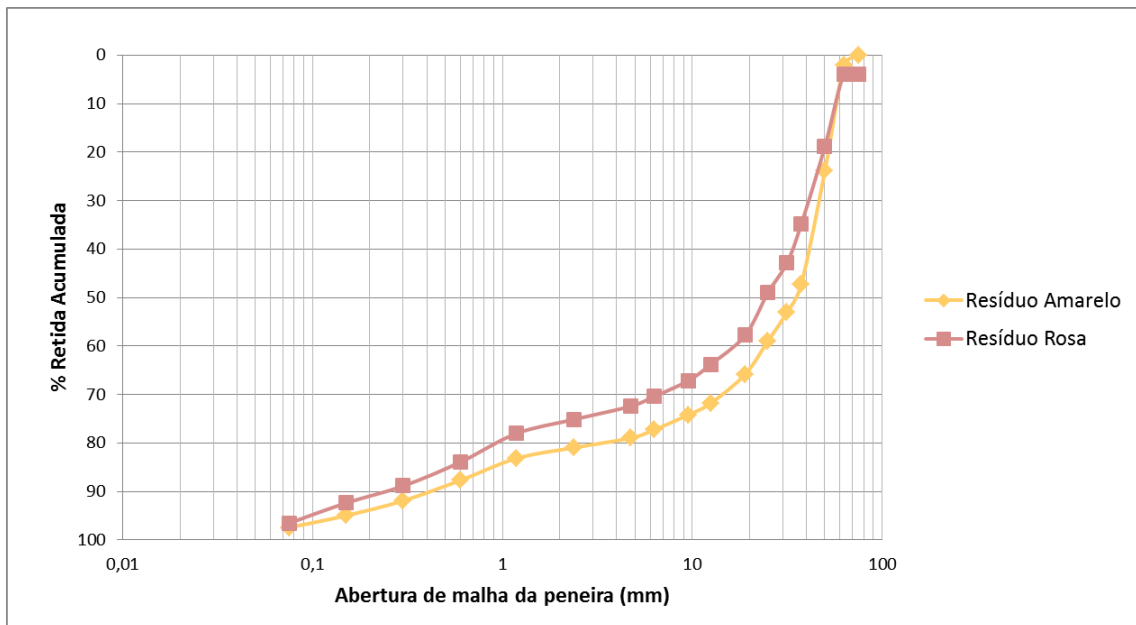
(fonte: foto da autora)

Figura 9 – Aspecto do arenito rosa coletado



(fonte: foto da autora)

Figura 10 – Distribuição granulométrica dos resíduos sem beneficiamento

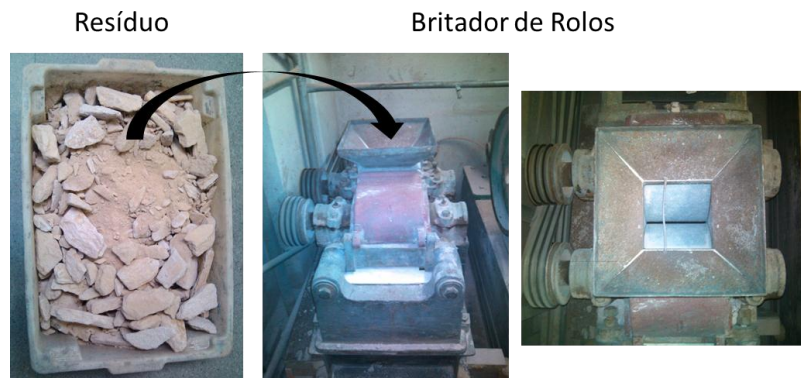


(fonte: elaborado pela autora)

Os resíduos foram então fragmentados em um britador de rolos, existente no LTM/UFRGS, de forma a atingir a granulometria de agregado miúdo. O processo consistiu nos seguintes passos (figuras 11 e 12):

- a) britar o resíduo de arenito;
- b) peneirar o material proveniente da primeira britagem na peneira com abertura de malha 6,3mm;
- c) armazenar o material passante na peneira 6,3 mm como B1;
- c) britar o material retido na peneira 6,3mm, armazenando-o, em seguida, como B2, sem peneirar.

Figura 11 – Início da britagem do resíduo, com detalhe do britador de rolos



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 12 – Esquema do procedimento realizado com o resíduo britado



(fonte: elaborado pela autora)

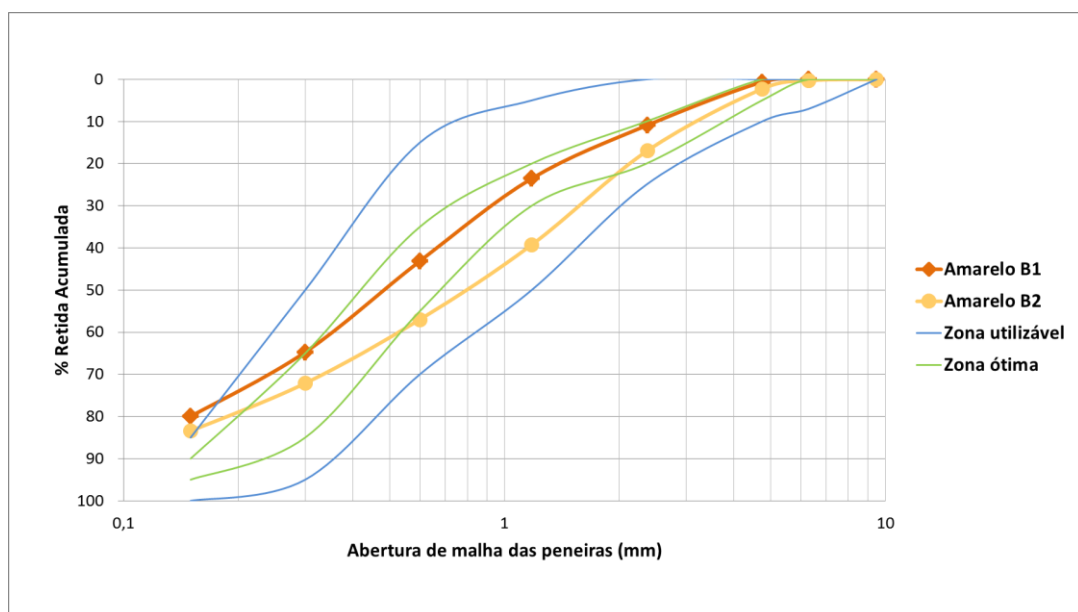
Os materiais britados, B1 e B2, para cada tipologia, foram secos em estufa até atingirem constância de massa, e então armazenados em embalagens que os protegesse da umidade. Foi determinada a curva granulométrica desses materiais, para o arenito amarelo (tabela 6 e figura 13) e rosa (tabela 7 e figura 14), conforme a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b).

Tabela 6 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito amarelo britado B1 e B2

Resíduo de Arenito Amarelo Britado					
Caracterização Física					
Ensaio	Resultados - B1		Resultados B2		
Dimensão Máxima (mm)	4,75		4,75		
Módulo de Finura	2,24		2,70		
	Abertura da Peneira (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
Granulometria	4,75	1	1	2	2
	2,36	10	11	15	17
	1,18	13	24	22	39
	0,6	20	43	18	57
	0,3	22	65	15	72
	0,15	15	80	11	83
	Fundo	20	100	17	100

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 13 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito amarelo britado B1 e B2



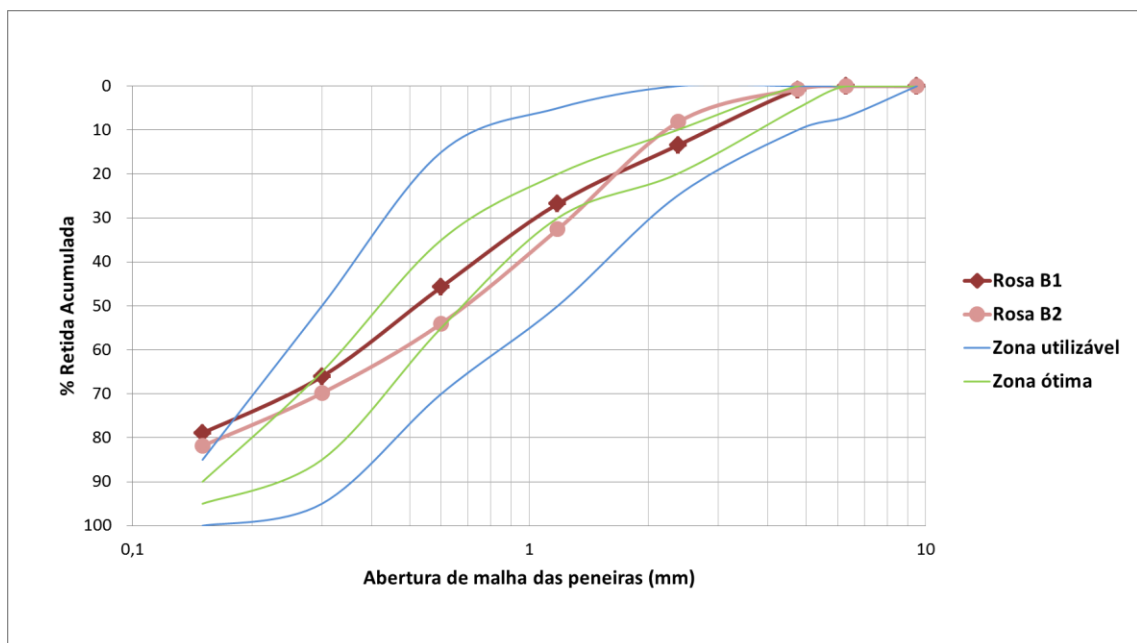
(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 7 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito rosa britado B1 e B2

Resíduo de Arenito Rosa Britado					
Caracterização Física					
Ensaíos		Resultados - B1		Resultados - B2	
Dimensão Máxima (mm)		4,75		4,75	
Módulo de Finura		2,32		2,48	
Granulometria	Abertura da Peneira (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
	4,75	1	1	1	1
	2,36	13	13	7	8
	1,18	13	27	25	33
	0,6	19	46	21	54
	0,3	20	66	16	70
	0,15	13	79	12	82
	Fundo	21	100	18	100

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 14 – Distribuição granulométrica do resíduo de arenito rosa britado B1 e B2



(fonte: elaborado pela autora)

As distribuições granulométricas dos materiais resultantes da primeira (B1) e segunda (B2) britagem apresentaram comportamentos semelhantes para os arenitos amarelo e rosa. Também é possível observar que a quantidade de materiais finos, passantes na peneira de 0,15 mm, é expressiva.

A similaridade de comportamento entre as duas parcelas, B1 e B2, resultou na escolha de sua união, porém a quantidade desses materiais era demasiadamente grande para haver uma mistura homogênea. Desta maneira, verificou-se o volume total de material B1 e B2 e, utilizando-se da massa unitária de cada uma destas parcelas, resultado obtido conforme a NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a), o material britado foi unido de acordo com a porcentagem em massa de B1 e B2 (tabela 8). Por fim, foi misturado homogeneamente em uma betoneira, resultando no agregado miúdo de arenito amarelo ou rosa.

Tabela 8 – Porcentagem de mistura de B1 e B2

Mistura de B1 e B2		
Material	B1	B2
Adotado		
Volume (m³)	0,15	0,11
% em Volume	56	44
Arenito Amarelo		
Massa Unitária (g/cm³)	1,35	1,27
% em Massa	57,4	42,6
Arenito Rosa		
Massa Unitária (g/cm³)	1,38	1,28
% em Massa	57,7	42,3

(fonte: elaborado pela autora)

Optou-se por utilizar o agregado miúdo de arenito com a composição granulométrica gerada após britagem e mistura de B1 e B2. A escolha foi motivada de forma a minimizar a quantidade de energia aplicada sobre o material e a geração de possíveis resíduos a partir de um possível beneficiamento. Como exemplo, a lavagem do material para retirada da fração fina produziria uma água contaminada e o peneiramento do material exigiria demanda de energia. Apenas foi descartado, assim como foi feito para o agregado miúdo natural, o material retido na peneira de abertura de malha de 6,3mm, o qual representa menos de 1% da massa total.

5.2.2.2.3 Caracterização Física dos Agregados Miúdos de Arenito

Conforme a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b), foram determinadas as distribuições granulométricas dos agregados miúdos de arenito

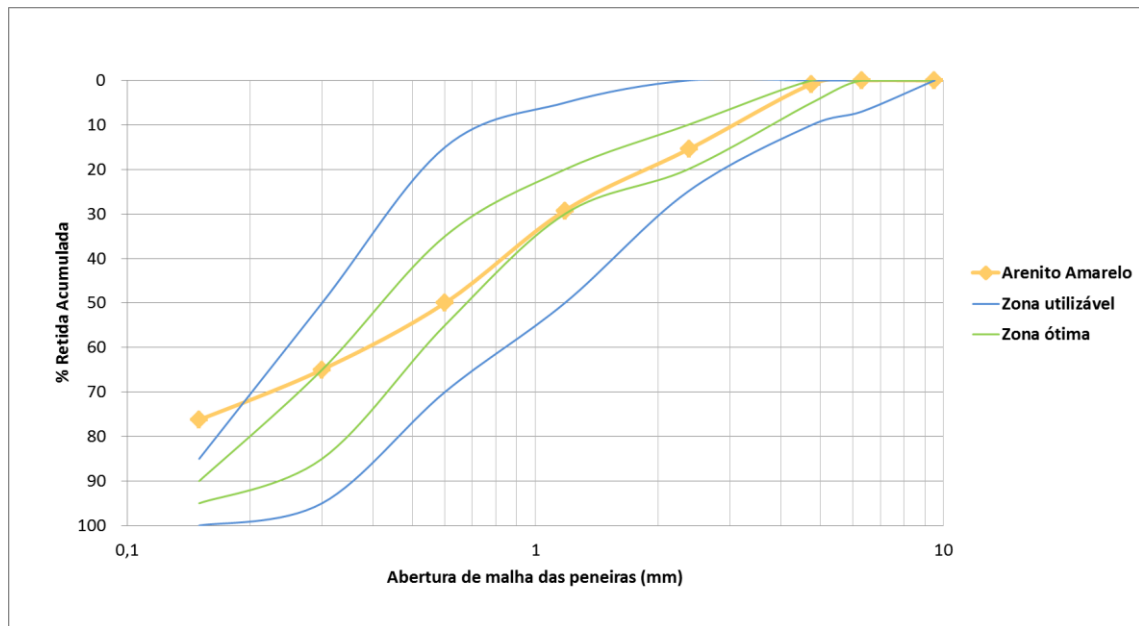
(resultantes da mistura de B1 e B2), as quais podem ser identificadas como bem graduadas, ou seja, contínuas e desuniformes, e que se aproximam de uma curva ideal (tabelas 9 e 10 e figuras 15 e 16). A porcentagem retida nas peneiras de abertura de malha de 4,75 a 0,3 mm é similar e a quantidade de material passante na peneira de abertura de malha de 0,15 mm é expressiva, ou seja, existe uma quantidade expressiva de materiais finos. Este comportamento é identificado para ambas as tipologias de arenito, amarela e rosa.

Tabela 9 – Caracterização física do agregado miúdo de arenito amarelo

Agregado Miúdo de Arenito Amarelo				
Caracterização Física				
Ensaio	Resultados	Norma		
Massa específica (g/cm ³)	2,62	NBR NM 52/2009		
Massa unitária (g/cm ³)	1,35	NBR NM 45/2006		
Absorção (%)	4,7	NBR NM 30/2001		
Dimensão Máxima (mm)	4,75	NBR NM 248/2003		
Módulo de Finura	2,36	NBR NM 248/2003		
% Passante na Peneira 200	15	NBR NM 46/2003		
	Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	
	4,75	1	1	
	2,36	14	15	
Granulometria	1,18	14	29	NBR NM 248/2003
	0,6	21	50	
	0,3	15	65	
	0,15	11	76	
	Fundo	24	100	

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 15 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de arenito amarelo



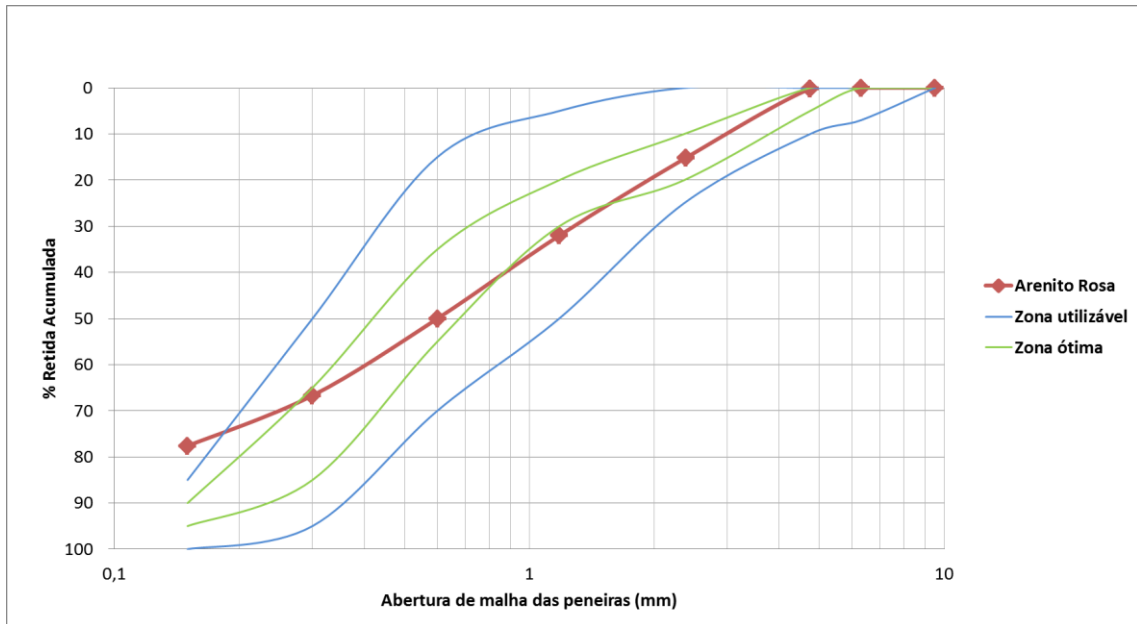
(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 10 – Caracterização física do agregado miúdo de arenito rosa

Agregado Miúdo de Arenito Rosa				
Caracterização Física				
Ensaio	Resultados	Norma		
Massa específica (g/cm ³)	2,63	NBR NM 52/2009		
Massa unitária (g/cm ³)	1,35	NBR NM 45/2006		
Absorção (%)	5,4	NBR NM 30/2001		
Dimensão Máxima (mm)	4,75	NBR NM 248/2003		
Módulo de Finura	2,42	NBR NM 248/2003		
% Passante na Peneira 200	13	NBR NM 46/2003		
	Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	
	4,75	0	0	
	2,36	15	15	
Granulometria	1,18	17	32	NBR NM 248/2003
	0,6	18	50	
	0,3	17	67	
	0,15	11	78	
	Fundo	22	100	

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 16 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de arenito rosa



(fonte: elaborado pela autora)

Embora os dois agregados miúdos de arenito não possuam uma distribuição granulométrica situada dentro da zona utilizável devido à quantidade de materiais passantes na peneira de abertura de 0,15 mm, a curva granulométrica da areia natural (figura 4) possui uma carência exatamente desses materiais.

A dimensão máxima característica dos arenitos amarelo e rosa é 4,75 mm (tabelas 9 e 10) e da areia natural é 2,38 mm (tabela 5). Isso indica que os arenitos possuem, comparativamente com a areia, uma quantidade maior de material retido na peneira com maior abertura de malha.

O módulo de finura dos arenitos é próximo, sendo de 2,36 para o amarelo e 2,42 para o rosa (tabelas 9 e 10), o que provavelmente está relacionado com a existência de uma parcela de grãos retidos em peneiras com maior abertura de malha, como pode ser observado no valor de sua dimensão máxima característica. A areia possui um valor menor para este indicador, de 2,20 (tabela 5), resultante, neste caso, da existência de uma porcentagem de frações finas mais expressivas comparativamente com a porcentagem de frações mais grossas. Todos os valores de módulo de finura estão dentro da faixa estabelecida pela NBR 7.211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009d).

O ensaio de peneiramento por lavagem, realizado conforme a NBR NM 46 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a), permitiu identificar a quantidade de material pulverulento (passantes na peneira 200, de 0,075 mm de abertura de malha) existente nos agregados de arenito. Resultou em valores elevados, de 13% e 15% do total de material para o agregado miúdo de arenito amarelo e rosa, respectivamente (tabelas 9 e 10).

Os ensaios de massa unitária foram realizados conforme a NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a) e os de massa específica, segundo a NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), e estão indicados nas tabelas 5, 9 e 10.

A massa específica dos três materiais é muito próxima, de 2,64 na areia natural e de 2,62 e 2,63 nos agregados miúdos de arenito amarelo e rosa, respectivamente. Por sua vez, a massa unitária da areia, de 1,51, é maior que a dos agregados miúdos de arenitos, de 1,35. Enquanto a areia possui grãos com formatos esféricos, o agregado miúdo de arenito possui uma forma lamelar, decorrente do processo de britagem. Essa forma das partículas dificulta o preenchimento do vazio entre elas, o que pode vir a explicar a menor massa unitária dos arenitos em relação à da areia.

Para ambos os materiais, a absorção de água foi determinada segundo a NBR NM 30 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b), e está indicada nas tabelas 5, 9 e 10. Embora a absorção dos agregados miúdos de arenito amarelo e rosa sejam um pouco diferentes, de 4,7% e 5,41%, respectivamente, são maiores que da areia natural, de 1,05%.

5.2.2.2.4 Caracterização Química dos Agregados Miúdos de Arenito

Os resultados do ensaio de fluorescência de raios-x (tabela 11), realizado no Lacer/UFRGS, mostram que a composição química de ambos os arenitos é muito semelhante e que são constituídos, em sua grande parte, por sílica (SiO_2). O que os difere principalmente é a quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Este último está presente em maior quantidade no arenito rosa, e é responsável pela tonalidade deste material.

Tabela 11 – Caracterização química dos arenitos por fluorescência de raios X

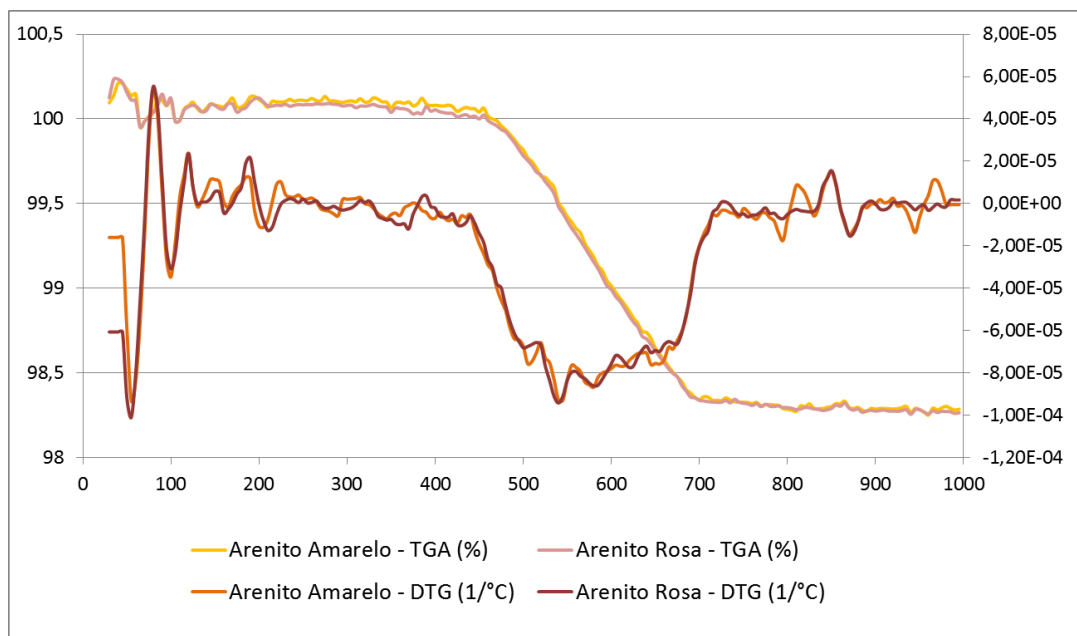
Caracterização Química dos Arenitos		
Composto	%	
	Arenito Amarelo	Arenito Rosa
SiO ₂	84,90	83,31
Al ₂ O ₃	9,14	10,07
K ₂ O	1,98	1,93
Fe ₂ O ₃	0,49	1,33
TiO ₂	0,29	0,31
SO ₃	0,09	0,20
CaO	0,08	0,18
P ₂ O ₅	0,08	0,12
ZrO ₂	0,04	0,05
SrO	0,02	0,02
CO ₂	2,82	2,50

(fonte: elaborado pela autora)

5.2.2.2.5 Caracterização Físico-Química dos Agregados Miúdos de Arenito

A caracterização físico-química dos arenitos consistiu na análise termogravimétrica dos dois arenitos (figura 17), realizada no Lacer/UFRGS. É possível verificar que os dois tipos de arenito possuem resultados muito próximos e que ocorre perda de massa entre 500 e 700°C.

Figura 17 – Análise termogravimétrica dos arenitos amarelo e rosa

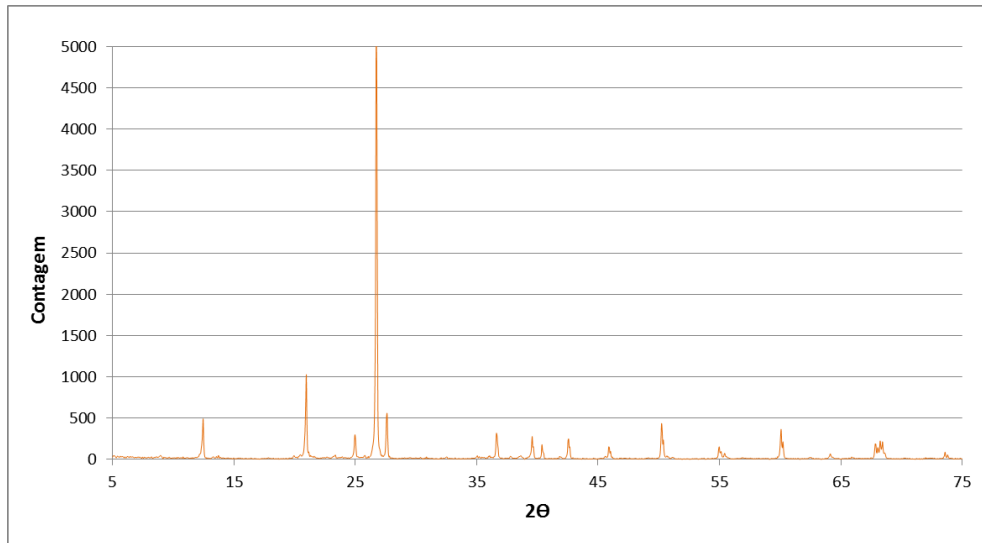


(fonte: elaborado pela autora)

5.2.2.2.6 Caracterização Mineralógica dos Agregados Miúdos de Arenito

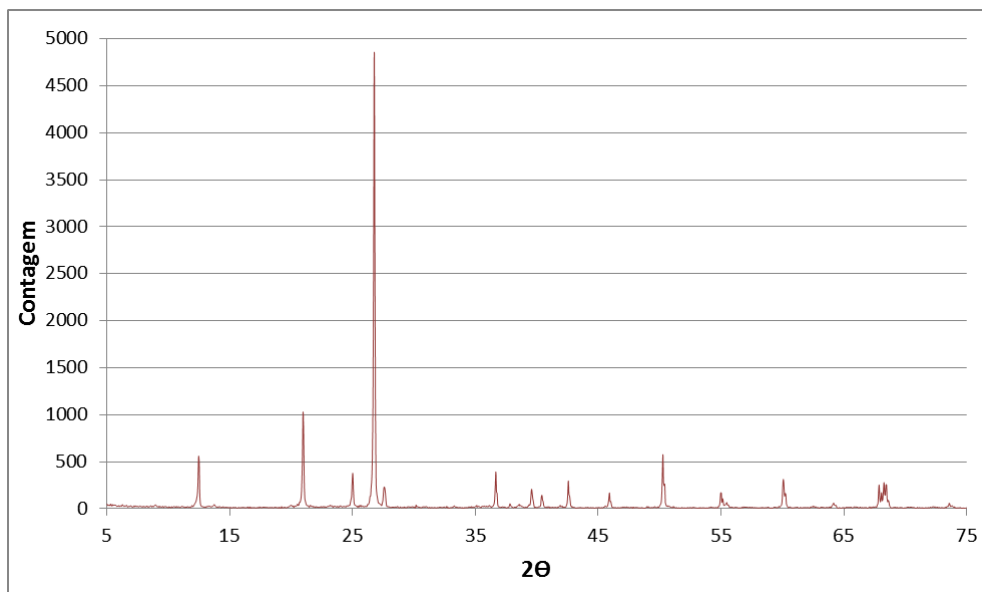
Através do ensaio de difração de raios-x, realizado no Lacer/UFRGS, pode-se afirmar que, tanto o arenito amarelo quanto o rosa, apresentam uma estrutura cristalina, evidenciada pela predominância de picos nos difratogramas (figura 18 e 19).

Figura 18 – Difratograma de raios X do arenito amarelo



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 19 – Difratograma de raios X do arenito rosa



(fonte: elaborado pela autora)

5.2.3 Água

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento do DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto – em Porto Alegre.

5.2.4 Aditivo

Para aumentar a trabalhabilidade das argamassas foi utilizado um aditivo superplastificante, cujas características foram obtidas do fabricante e são apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 – Características do aditivo superplastificante

Aditivo Superplastificante	
Características	
Base Química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido branco turvo
pH	5 - 7
Densidade (g/cm³)	1,055 - 1,085
Sólidos (%)	29 - 32
Dosagem (%) sobre o peso do cimento	0,2 - 1,2

(fonte: adaptado de BASF S. A., 2009)

5.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

A produção das argamassas compreendeu o cálculo da quantidade de materiais e os procedimentos de mistura, dosagem, ensaio de consistência, moldagem e cura. É discorrido sobre cada um deles a seguir.

5.3.1 Quantidade de Material

A quantidade de materiais secos para a mistura na argamassadeira foi fixada em, no máximo, 1,5 kg. Com esta quantidade é possível obter uma mistura homogênea e suficiente para o preenchimento de três corpos de prova 5 x 10 cm.

A quantidade de cimento foi calculada conforme cada um dos três traços e a quantidade de areia natural também. A substituição de agregado natural pelo resíduo de arenito foi feita em volume, ou seja, foi utilizada a massa de material necessária para ocupar o mesmo volume. Tal conversão era realizada de acordo com a massa específica dos dois materiais (equação 1).

$$m_{\text{arenito}} = m_{\text{areia}} \times (\gamma_{\text{arenito}}/\gamma_{\text{areia}}) \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

m_{arenito} = massa de agregado miúdo de arenito;

m_{areia} = massa da areia natural;

γ_{arenito} = massa específica do agregado miúdo de arenito;

γ_{areia} = massa específica da areia natural.

5.3.2 Mistura

A mistura da argamassa foi realizada de acordo com a NBR 7.215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996). Foi utilizada uma argamassadeira, que segue os preceitos da Norma citada anteriormente. No quadro 3 estão identificados tempo, velocidade da mistura e o procedimento realizado em cada período.

Quadro 3 – Processo de mistura da argamassa

Mistura - NBR 7.215/1996		
Tempo	Procedimento	Velocidade
30 s	Adicionar o cimento à água	Baixa
30 s	Adicionar o agregado miúdo	Baixa
30 s	Mistura da argamassa	Alta
15 s	Remover materiais aderidos à cuba	-
75 s	Argamassa em repouso, coberta por pano úmido	-
60 s	Mistura da argamassa	Alta

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996)

Nos casos em que era necessário acrescentar o aditivo, esta adição foi realizada em duas etapas. Metade do aditivo era misturado na água, no início da mistura, enquanto o restante era adicionado à mistura após a adição do agregado miúdo.

5.3.3 Ensaio de Consistência

O ensaio de consistência foi realizado conforme a NBR 13.276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a). Foi o parâmetro utilizado para a dosagem da água ou do aditivo das argamassas. O quadro 4 identifica o procedimento deste ensaio, bem como as figuras 20 e 21.

Quadro 4 – Procedimento do ensaio de consistência

Ensaio de Consistência - NBR 13.276/2005
Procedimento
Umedecer o molde e a mesa de consistência
Posicionar o molde no centro da mesa
Preenchê-lo em 3 camadas de alturas iguais
Aplicar, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com soquete
Rasar a superfície com régua
Retirar o molde
Acionar a queda da mesa 30 vezes em 30 segundos
Realizar três medidas do espalhamento da argamassa

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a)

Figura 20 – Molde da forma tronco-cônica empregada no ensaio de consistência



(fonte: foto da autora)

Figura 21 – Medidas de três diâmetros ortogonais do espalhamento da argamassa após 30 golpes na mesa de consistência



(fonte: foto da autora)

5.3.4 Dosagem

Primeiramente, foi dosada a água necessária para se atingir a consistência de $225 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ nos traços com 100% de areia natural, utilizados como referência para os dois arenitos. A relação água/cimento encontrada foi mantida constante para argamassas de mesmo traço que possuíam substituição da areia por arenito e, nelas, foi adicionada a quantidade de aditivo necessária para se chegar à consistência fixada. Todas as argamassas feitas com arenito necessitaram de aditivo superplastificante para atingir a consistência. A relação água/cimento (a/c) e a relação aditivo/cimento (ad/c) de cada argamassa são indicadas na tabela 12 e a consistência é indicada na tabela 13.

Tabela 12 – Relação água/cimento e aditivo/cimento das argamassas em função do traço e do teor de substituição de agregado natural por resíduo de arenito

Água/Cimento e Aditivo/Cimento										
% Substituição	0		25		50		75		100	
Arenito Amarelo										
Traço	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)
1:1,5	0,36	-	0,36	0,10	0,36	0,33	0,36	0,52	0,36	0,82
1:3,0	0,50	-	0,50	0,29	0,50	0,64	0,50	1,17	0,50	2,08
1:4,5	0,73	-	0,73	0,26	0,73	0,55	0,73	1,21	0,73	2,16
Arenito Rosa										
Traço	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)	a/c	ad/c (%)
1:1,5	0,36	-	0,36	0,03	0,36	0,30	0,36	0,47	0,36	0,60
1:3,0	0,50	-	0,50	0,16	0,50	0,59	0,50	0,88	0,50	1,44
1:4,5	0,73	-	0,73	0,11	0,73	0,33	0,73	0,77	0,73	1,47

(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 13 – Consistência das argamassas para os diferentes traços e teores de substituição de agregado natural por resíduo de arenito

Consistência (mm)						
Arenito Amarelo						
% Substituição		0	25	50	75	100
Traço	1:1,5	232	217	221	226	217
	1:3,0	219	221	218	218	231
	1:4,5	231	230	217	225	217
Arenito Rosa						
% Substituição		0	25	50	75	100
Traço	1:1,5	232	220	218	224	227
	1:3,0	219	222	230	225	228
	1:4,5	231	222	228	224	228

(fonte: elaborado pela autora)

5.3.5 Moldagem

A argamassa era moldada em três corpos de prova 5 cm x 10 cm, que possuíam aplicação prévia de desmoldante. No quadro 5 está indicado o procedimento de moldagem, realizado conforme a NBR 7.215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), e que pode ser visualizado nas figuras 22 e 23.

Quadro 5 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova

Moldagem - NBR 7.215/1996
Procedimento
Preencher o molde em 4 camadas de alturas iguais
Aplicar 30 golpes de soquete em cada camada
Rasar a superfície com régua
Identificar o corpo de prova

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996)

Figura 22 – Realização da moldagem



(fonte: foto da autora)

Figura 23 – Acabamento superficial



(fonte: foto da autora)

5.3.6 Cura

Assim que moldados, os corpos de prova foram deixados sobre uma bancada e cobertos por uma lona plástica, de modo a evitar a perda de água. Após 24 horas, foram desmoldados e levados para uma câmara de água e cal hidratada, local onde foi realizado o procedimento de cura submersa, conforme preconizado pela NBR 7.215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996). Foram mantidos nessa condição por 28 dias, com exceção

daqueles que seriam utilizados para o ensaio de densidade de massa, ultrassom e absorção de água, os quais foram retirados aos 23 dias.

5.4 ENSAIOS

Neste item são apresentados os ensaios realizados sobre a argamassa, as normas e diretrizes adotadas em cada um deles, e a descrição do procedimento.

5.4.1 Compressão Axial

Neste ensaio, foram utilizados seis corpos de prova com dimensões 5 cm x 10 cm, para cada combinação. Três deles foram originados no processo de dosagem da argamassa, enquanto que os outros três foram moldados exclusivamente para este procedimento, em outro dia. As exceções foram os três traços referências, para os quais foram moldados nove corpos de prova no total.

Antes de submetidos ao ensaio de resistência à compressão, as superfícies horizontais dos corpos de prova foram tornadas planas e paralelas, através do processo de retificação, o que resultou na variação de sua altura. Sendo assim, foram medidas duas alturas e dois diâmetros de cada corpo de prova, para realizar a posterior correção da resistência à compressão.

Aos 28 ± 1 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos, no estado saturado em que se encontravam na câmara úmida, ao ensaio de compressão axial. Tal ensaio foi realizado em um equipamento da marca Emic, cujo limite é 200kN. A velocidade de aplicação da carga foi de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, conforme preconizado pela NBR 7.215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

O valor da carga obtida no ensaio de resistência à compressão foi corrigido de acordo com as recomendações da NBR 5.739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), a qual indica a multiplicação da força de ruptura por um fator de correção, obtido de acordo com a relação entre a altura (h) e o diâmetro (d) de cada corpo de prova. Na tabela 14 estão apresentados os fatores de correção, os quais devem ser interpolados linearmente se a relação entre altura e diâmetro for diferente das indicadas. A correção foi utilizada pois

“Quanto menor a relação entre a altura e o diâmetro de um corpo de prova, mais elevada deverá ser a carga aplicada no ensaio para que ocorra a ruptura, dando a falsa ideia de que a resistência do material é mais elevada.” (RECENA, 2008, p. 57).

Tabela 14 – Fator de correção da força de ruptura

NBR 5.739/2007					
Relação h/d	2	1,75	1,5	1,25	1
Fator de correção	1	0,98	0,96	0,93	0,87

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

Utilizando-se a força (kN) corrigida, foi calculada a resistência (MPa) de cada um dos corpos de prova, dividindo a força pela área da seção que recebeu a aplicação da carga. Conhecidas as resistências individuais, foram calculados a média e o desvio padrão para cada uma das 27 misturas. Foram desconsiderados aqueles que se afastavam mais que 2 desvios padrão da média.

5.4.2 Absorção de Água por Capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade foi utilizado o procedimento da NBR 9.779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) adaptado por Venquiaruto et al. (2014, p. 104), no qual é realizado o processo adicional de selamento da lateral do corpo de prova visto que, sem esta proteção, ocorre uma maior absorção da umidade.

Foram moldados, para este ensaio, três corpos de prova de cada combinação e retirados, conforme dito anteriormente, aos 23 dias da câmara úmida. A parte inferior do corpo de prova, local que entrou em contato com o desmoldante da fôrma, foi limpa com esponja e sabão e recebeu um banho de água quente. Após este procedimento, todos os corpos de prova foram deixados por dois dias em estufa a 100 °C e por mais seis dias a 60 °C. A cada dia, eram pesados, até constância de massa. Quando atingido este patamar, foram retirados da estufa e mantidos em uma caixa fechada com sílica gel.

Assim que esfriavam, os corpos de prova recebiam a aplicação de fita crepe na sua parte inferior até uma altura de 5 ± 1 mm (figura 24), de modo a isolar a área de ensaio para não

contaminá-la. No dia seguinte a este procedimento, foi realizado o selamento dos corpos de prova através da aplicação de uma resina epóxi em toda a lateral (figura 25) e, ainda com a resina fresca, retirava-se a fita crepe. Após 24 horas, a resina epóxi era aplicada na parte superior do corpo de prova. Em seguida, era realizado um lixamento leve, com uma lixa de referência 40, na base das amostras. Para retirar o pó, foi utilizado um compressor de ar. Esse processo foi realizado para eliminar eventuais contaminações com resina epóxi do local que seria realizado o ensaio. Entre todos os processos descritos, as amostras permaneceram em uma caixa fechada com sílica gel, de modo a evitar a absorção de umidade.

Figura 24 – Vedação da base do corpo de prova



(fonte: foto da autora)

Figura 25 – Corpo de prova com resina epóxi aplicada



(fonte: foto da autora)

Após a secagem completa da resina epóxi, em 24 horas, iniciava-se o ensaio propriamente dito. Os corpos de prova foram inseridos em uma caixa com tampa, onde era mantida uma lâmina de água com $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de altura (figura 26). As amostras eram pesadas no momento da colocação e após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h em contato com esta lâmina de água. Em seguida à última pesagem, eram rompidos por compressão diametral, de modo a verificar a altura de ascensão da água.

A absorção de água (g/cm^2) foi calculada dividindo-se a quantidade absorvida de água por cada corpo de prova pela área de sua seção transversal. Neste caso, todos os dados foram considerados para a análise.

Figura 26 – Vista dos corpos de prova durante o ensaio de absorção por capilaridade



(fonte: foto da autora)

5.4.3 Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido

Embora empregada para ensaio de argamassa de revestimento de tetos e paredes, foi utilizada a NBR 13.280 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b) como base para este ensaio. Os três corpos de prova utilizados para medir a densidade de massa aparente no estado endurecido foram os mesmos moldados para o ensaio de absorção de água por capilaridade. Retirados aos 23 dias da cura úmida, como citado anteriormente, foram deixados por dois dias em estufa a 100 °C. No terceiro dia, cada corpo de prova teve sua altura e diâmetro medidos em dois pontos. A pesagem foi realizada uma vez ao dia, durante todo o tempo em que os corpos de prova permaneceram na estufa e, para o cálculo da densidade de massa, foi utilizado o menor valor da pesagem.

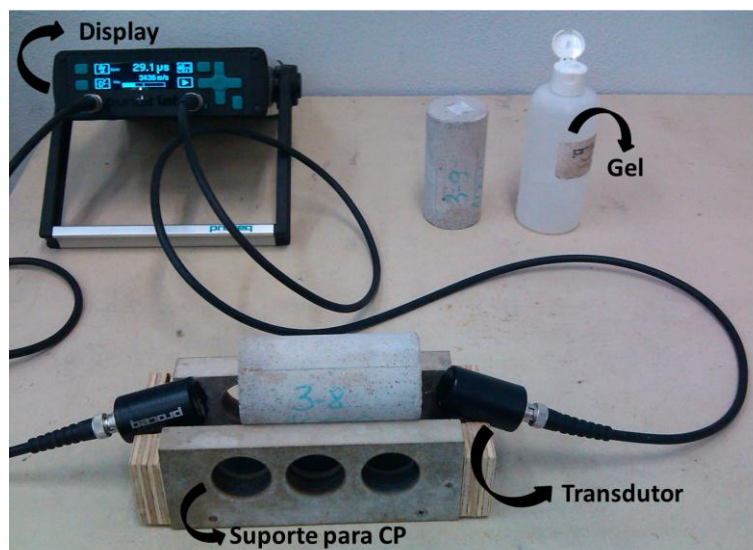
A densidade de massa aparente (kg/m^3) foi calculada como a razão entre a massa do corpo de prova e seu volume.

5.4.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Embora a NBR 8.802 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) oriente sobre a medida da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em concreto, tal norma não contempla o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico. Desta maneira, o ensaio

de ultrassom foi realizado conforme a NBR 15.630 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b), com os mesmos três corpos de prova moldados para o ensaio de absorção por capilaridade. Após dois dias em estufa a 100° C, as amostras foram resfriadas até atingirem a temperatura ambiente. O aparelho para medição da onda ultrassônica, da marca Proceq, contava com transdutores com 150 kHz de frequência e 2,8 cm de diâmetro. Primeiramente, o equipamento era calibrado e, em seguida, eram feitas três medidas em cada corpo de prova, do tipo transmissão direta. O processo consistia em aplicar o gel nos receptores, encostá-los nas duas extremidades do corpo de prova e pressionar levemente, até que o equipamento fornecesse o valor da velocidade de propagação da onda (figura 27). Após este procedimento, as extremidades das amostras foram limpas com uma esponja úmida e água quente e, em seguida, retornadas para a estufa a 60°C.

Figura 27 – Vista do equipamento e corpo de prova utilizado no ensaio de ultrassom



(fonte: foto da autora)

A velocidade de propagação de onda ultrassônica ($\text{mm}/\mu\text{s}$) foi calculada como a divisão entre o comprimento do corpo de prova e o tempo que a onda levou para atravessá-lo. Por fim, o módulo de elasticidade dinâmico foi calculado (fórmula 2) conforme a NBR 15.630 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b).

$$E_d = v^2 \times \rho \times ((1+\mu) \times (1-2 \times \mu))/(1-\mu) \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico, em MPa;

v = velocidade de propagação da onda ultrassônica, em mm/ μ ;

ρ = densidade de massa aparente do corpo de prova, em kg/m³;

μ = coeficiente Poisson, adotado 0,2.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

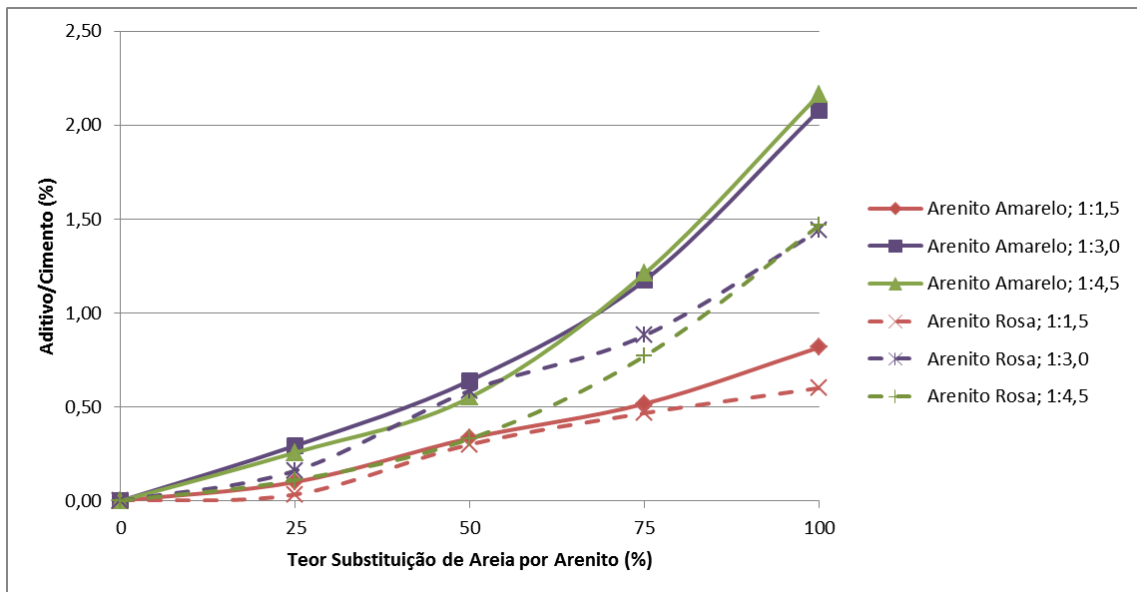
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados neste trabalho, bem como a análise dos mesmos.

Os dados foram explorados com auxílio do software Statistica 7.0 através da Análise de Variância (ANOVA), com a qual foram avaliadas as variáveis deste trabalho, individualmente ou combinadas, verificando se possuíam ou não efeitos significativos sobre os resultados, com um intervalo de confiança de 95%. Com os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, densidade de massa aparente no estado endurecido e módulo de elasticidade dinâmico, foram calculadas as médias e desvios padrão para cada uma das 27 misturas. Para a análise, foram desconsiderados os valores espúrios.

6.1 EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO NA CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA

Conforme a porcentagem de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito aumenta, há um acréscimo do consumo de aditivo (figura 28). Este comportamento era esperado, uma vez que o agregado miúdo de arenito possui, além de uma maior absorção que a areia natural, uma grande quantidade de materiais finos, e conseqüentemente, uma grande superfície específica. Com tais características, a demanda de água necessária para manter a trabalhabilidade aumenta (NEVILLE, 1997) e, no caso deste trabalho, esta demanda foi suprida pelo uso de aditivo superplastificante, para que não houvesse redução da resistência pela incorporação de água.

Figura 28 – Influência do teor de substituição da areia natural por arenito e do traço da argamassa na quantidade de aditivo empregado para manter uma mesma consistência



(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 28, pode-se perceber que a demanda de aditivo no traço mais rico é muito menor que a demanda no traço intermediário e no traço mais pobre. Uma das explicações pode estar no fato de que o traço 1:1,5 possui uma quantidade de cimento muito alta, o que acaba também por reduzir a razão aditivo/cimento. Além disso, os outros dois traços possuem uma quantidade maior de agregado miúdo, ou seja, existe uma maior massa de grãos na mistura, o que aumenta a área específica e também a absorção total, resultando na necessidade de uma quantidade maior de água para o molhamento e para uma trabalhabilidade adequada.

Ainda na figura 28 é possível observar que o arenito amarelo necessitou de uma quantidade maior de aditivo para chegar à mesma trabalhabilidade que o arenito rosa, principalmente quando a substituição foi de 100%. No caso do traço mais rico, essa diferenciação ocorreu apenas com 100% de substituição. Para o traço intermediário e pobre, a diferença da quantidade de aditivo incorporado para os dois tipos de arenito passou a ser visualizada a partir dos 75% de substituição.

6.2 ANÁLISE DO RESULTADO DOS ENSAIOS

A seguir serão analisados os resultados dos quatro ensaios realizados com as argamassas confeccionadas para este trabalho.

6.2.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão média é apresentada na tabela 15.

Tabela 15 – Resistência à compressão média das argamassas com diferentes teores de substituição e proporcionamentos

Resistência Média (MPa)						
% Substituição		0	25	50	75	100
Arenito Amarelo						
Traço	1:1,5	60,89	54,88	57,59	55,85	62,19
	1:3,0	38,62	37,24	42,15	42,10	43,86
	1:4,5	21,16	22,36	26,52	31,02	32,92
Arenito Rosa						
Traço	1:1,5	60,89	54,83	54,30	60,22	55,54
	1:3,0	38,62	38,88	39,93	44,45	51,19
	1:4,5	21,16	23,00	25,39	27,85	33,79

(fonte: elaborado pela autora)

Os valores de resistências à compressão foram aplicados no software Statistica e avaliados conforme a Análise de Variância. A tabela 16 apresenta o resultado desta análise e indica que existe influência significativa do traço, do percentual de substituição e da interação entre estes dois fatores sobre a resistência à compressão obtida.

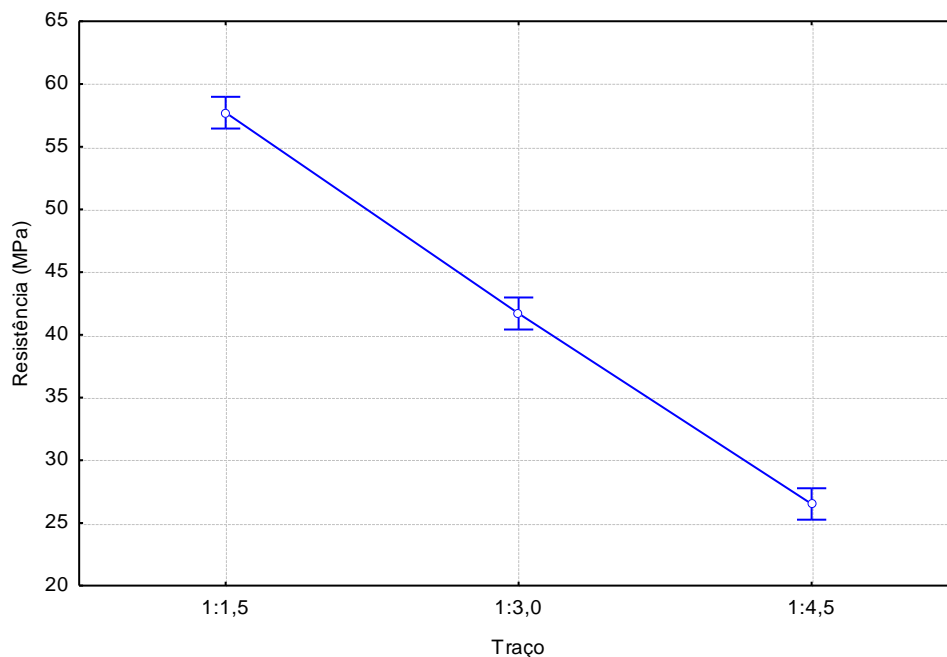
Tabela 16 – ANOVA: resultados da resistência à compressão

Resistência à Compressão						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Arenito	0,10	1	0,10	0,00	0,9502	Não
Traço	31.016,95	2	15.508,47	598,48	0,0000	Sim
% Substituição	1.457,68	4	364,42	14,06	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x Traço	76,10	2	38,05	1,47	0,2333	Não
Tipo de Arenito x % Substituição	63,73	4	15,93	0,61	0,6525	Não
Traço x % Substituição	914,43	8	114,30	4,41	0,0001	Sim
Tipo de Arenito x Traço x % Substituição	327,44	8	40,93	1,58	0,1346	Não
Erro	4.223,81	163	25,91	-	-	-

(fonte: elaborado pela autora)

A influência do traço sobre a resistência à compressão ocorreu como esperado (figura 29). As resistências são maiores para o traço mais rico (1:1,5), decrescem no traço intermediário (1:3,0) e mais ainda no traço pobre (1:4,5).

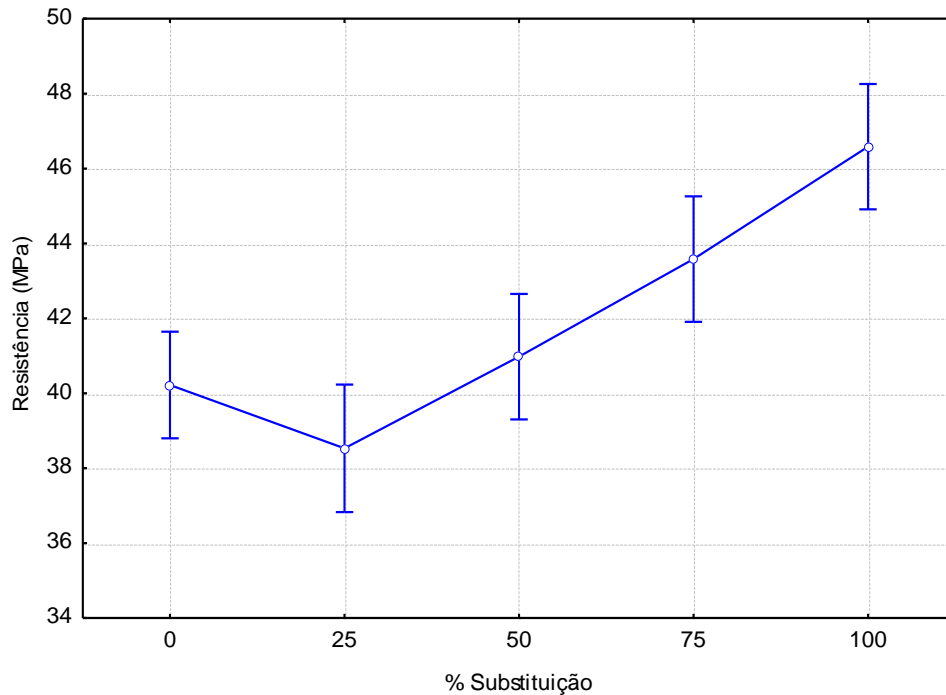
Figura 29 – Influência do traço na resistência à compressão das argamassas, aos 28 dias de idade



(fonte: elaborado pela autora)

Por sua vez, a figura 30 indica a influência do teor de substituição na resistência à compressão. A resistência se mantém com pouca diferença entre 0% e 50%, mas existe um aumento entre 25% e 100%.

Figura 30 – Influência do teor de substituição da areia natural pelo agregado miúdo de arenito na resistência à compressão de argamassas, aos 28 dias de idade



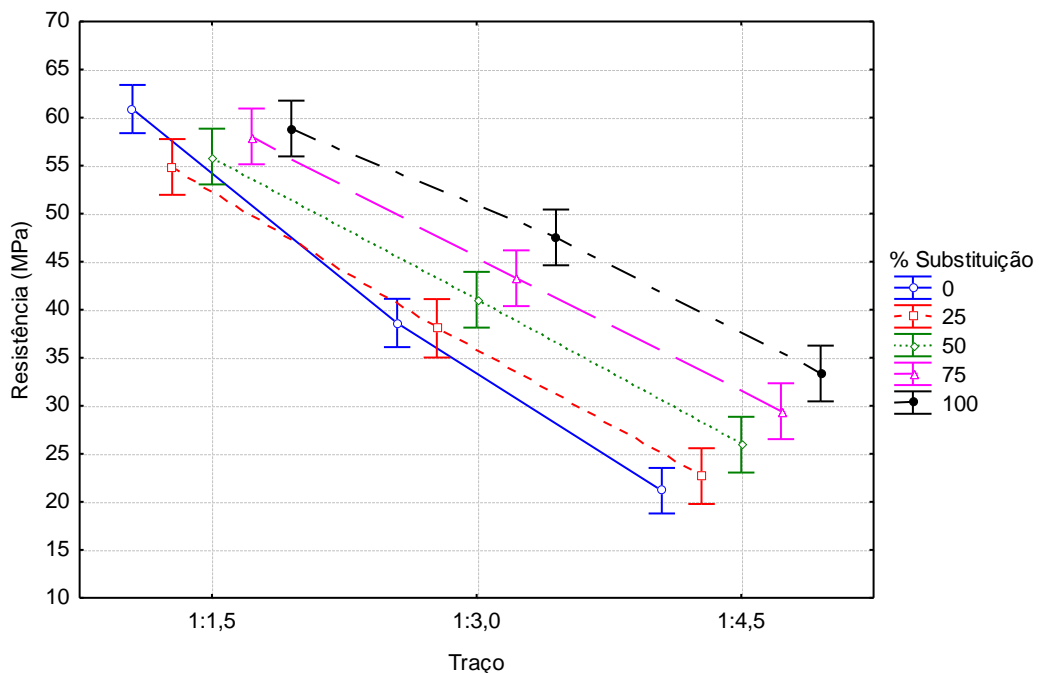
(fonte: elaborado pela autora)

Com o aumento do percentual de substituição da areia natural por arenito, pode ocorrer um possível ajuste da granulometria do agregado miúdo, que acaba por torná-lo mais compacto e, por consequência, também a argamassa, resultando no aumento da resistência à compressão. Aliado a isso, os materiais pulverulentos presentes no arenito podem ter ocasionado o “efeito filer”, ou seja, podem ter melhorado o empacotamento da mistura e gerado uma argamassa com maior resistência à compressão.

Além disso, tem-se o efeito da absorção diferencial dos materiais, que é maior no arenito se comparado com a areia. Com o acréscimo do teor de arenito, este material pode ter absorvido uma quantidade de água da mistura proporcional a este crescimento. Desta maneira, a relação água/cimento real pode ser menor do que a calculada, o que levaria, consequentemente, a um aumento da resistência à compressão. A água absorvida pelo arenito também pode ter sido liberada gradativamente durante o período de cura, funcionando como um agente na cura interna. Estas últimas conclusões também foram encontradas quando utilizado o RCD como agregado graúdo em concretos, por Latterza e Machado Júnior (2003, p. 56).

A figura 31 revela a influência do traço e da porcentagem de substituição sobre a resistência à compressão do concreto. Pode-se observar que, em um traço mais rico, que possui uma menor quantidade de agregado miúdo, a resistência à compressão é pouco modificada com a variação do teor de substituição por arenito. Porém, nos outros dois traços, percebe-se uma variação maior da resistência à compressão entre os cinco diferentes teores de substituição.

Figura 31 – Influência do traço e do teor de substituição na resistência à compressão de argamassas, aos 28 dias de idade



(fonte: elaborado pela autora)

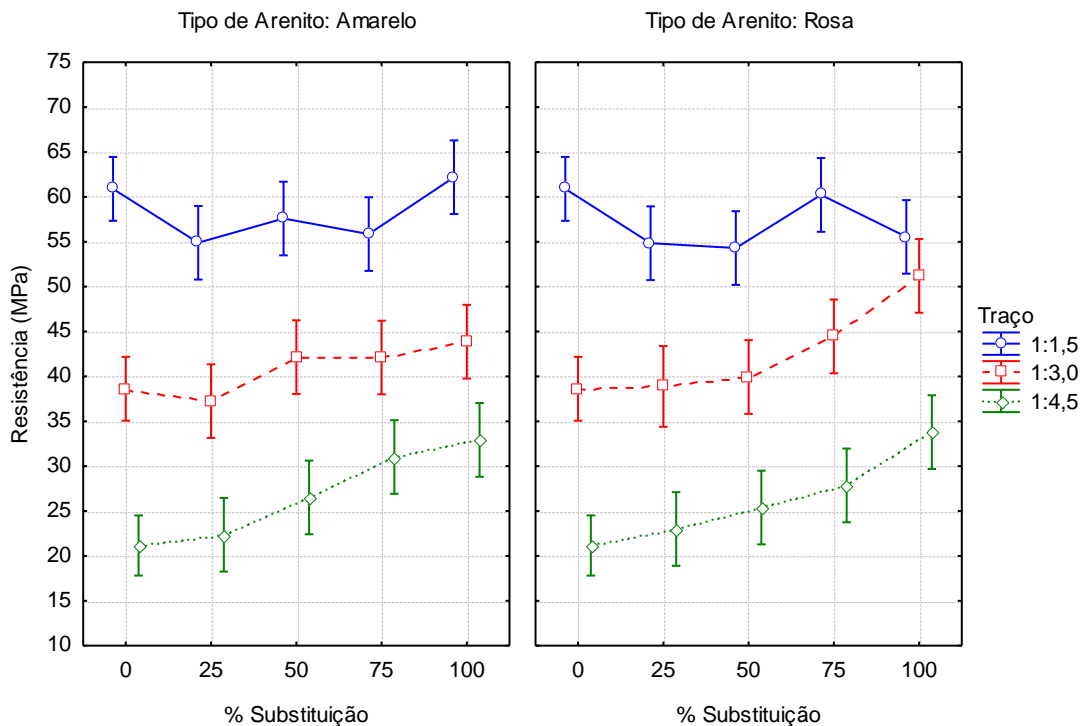
A explicação para este fenômeno pode estar baseada no que foi dito anteriormente tanto sobre o efeito filer quanto sobre a absorção do arenito.

No traço mais rico a quantidade de cimento é alta e, portanto o efeito decorrente das partículas pulverulentas do agregado será menor. Nos outros dois traços, que possuem uma quantidade menor de cimento, os materiais pulverulentos do agregado miúdo podem ter gerado o “efeito filer”, ou seja, um melhor empacotamento e preenchimento dos espaços vazios (que no traço rico era determinado pelo próprio cimento) e, conseqüentemente, promoveram maiores resistências que as do traço referência.

Quanto à absorção, no traço rico a quantidade de agregado miúdo é menor, portanto será absorvida uma menor quantidade de água por este material. Desta maneira, a relação água/cimento será mais próxima daquela calculada, o que mantém a resistência à compressão muito próxima, mesmo com diferentes teores de substituição. Por sua vez, no traço intermediário e pobre, a quantidade de agregado miúdo é maior, o que amplia a influência deste material sobre a argamassa. Ou seja, quanto maior for o teor de substituição, maior é a absorção pelos agregados, menor é a relação água/cimento e, por consequência, maior é a resistência.

A figura 32 demonstra a influência do traço, porcentagem de substituição e tipo de arenito sobre a resistência à compressão, e nela pode-se identificar o mesmo conceito apresentado anteriormente. No traço rico, as resistências se mantêm em um intervalo de valores próximos. Por sua vez, no traço intermediário e pobre, parece existir uma tendência de crescimento da resistência em função do aumento do teor de substituição da areia pelo arenito.

Figura 32 – Influência do tipo de arenito, traço e do teor de substituição na resistência à compressão de argamassas, aos 28 dias de idade



(fonte: elaborado pela autora)

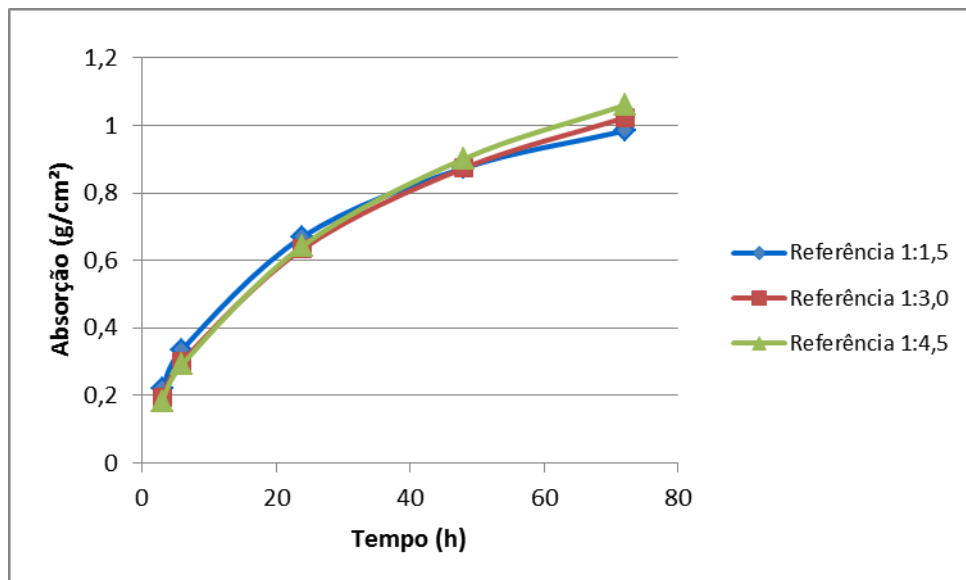
6.2.2 Absorção de Água por Capilaridade

Este item apresenta a análise da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, a Análise de Variância da absorção final (após 72 horas) e da altura de ascensão da água.

6.2.2.1 Absorção de Água por Capilaridade ao Longo do Tempo

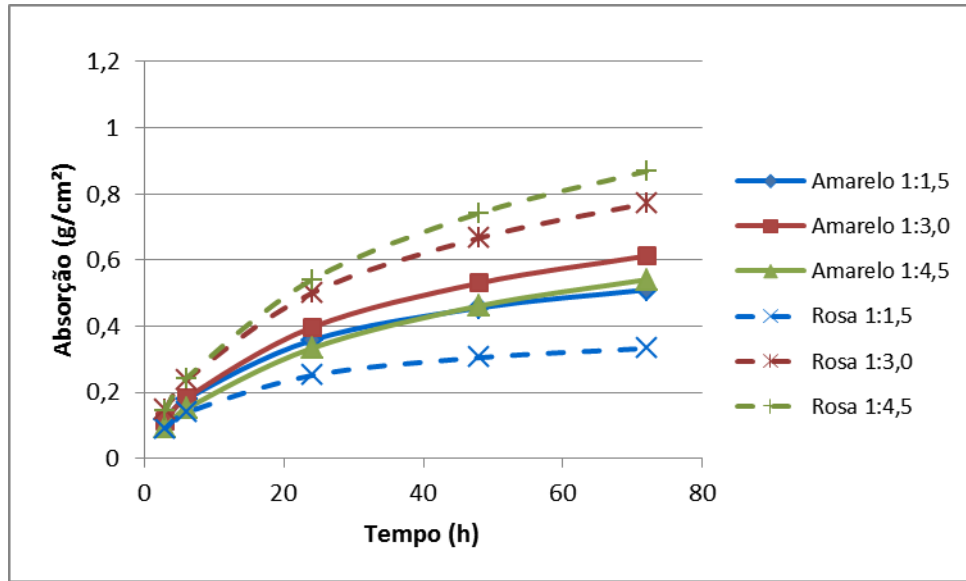
As figuras 33 a 37 mostram a evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, em 0, 3, 6, 24, 48 e 72 horas, para cada teor de substituição. Como era esperado, existe um padrão de crescimento ao longo do tempo, para todos os casos.

Figura 33 – Absorção por capilaridade das argamassas confeccionadas apenas com agregado miúdo natural



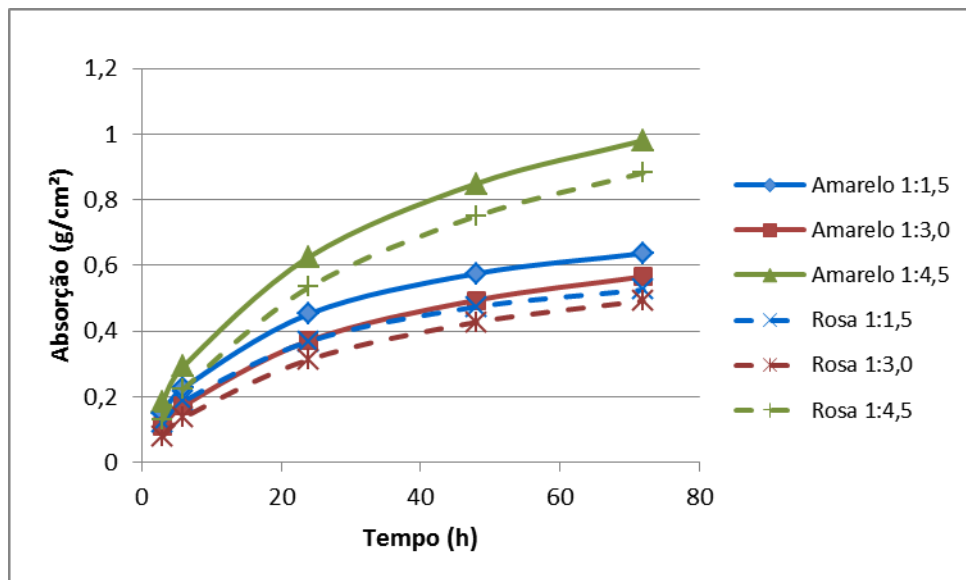
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 34 – Absorção por capilaridade das argamassas com 25% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito



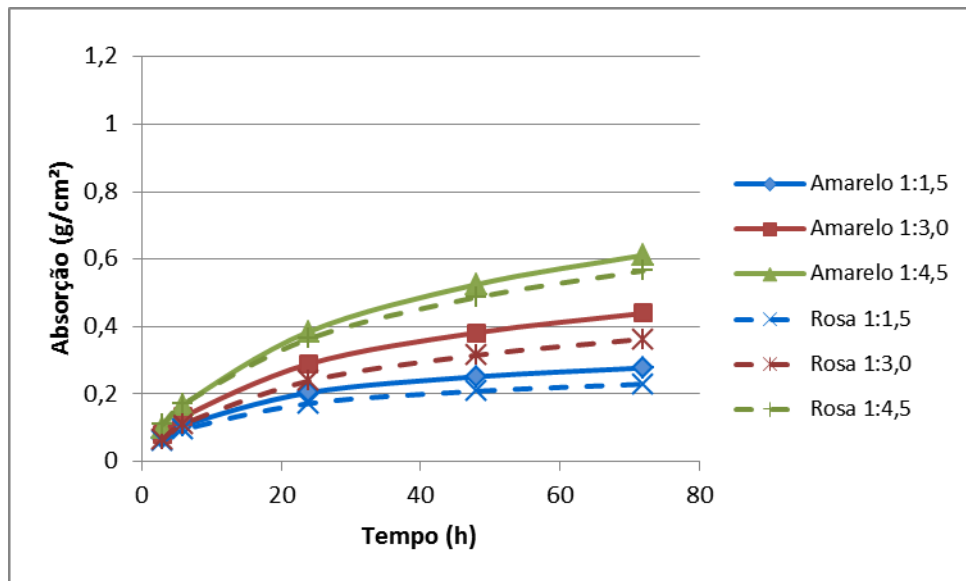
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 35 – Absorção por capilaridade das argamassas com 50% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito



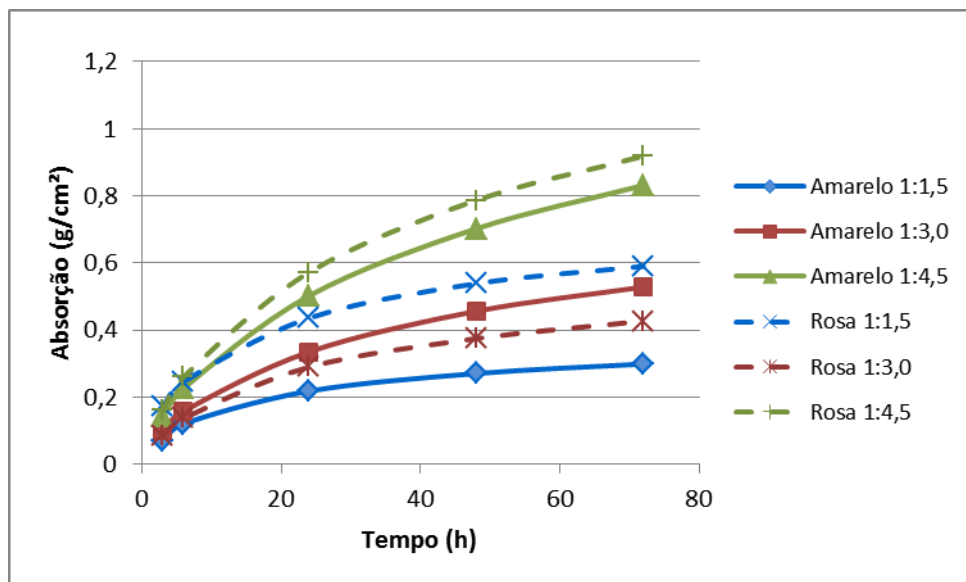
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 36 – Absorção por capilaridade das argamassas com 75% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 37 – Absorção por capilaridade das argamassas com 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo de arenito



(fonte: elaborado pela autora)

6.2.2.2 Absorção de Água por Capilaridade

A absorção de água por capilaridade correspondente à média dos valores de absorção após 72 horas de contato dos corpos de prova com a água é apresentada na tabela 17.

Tabela 17 – Absorção de água por capilaridade média das argamassas

Absorção (g/cm ²)						
% Substituição	0	25	50	75	100	
Arenito Amarelo						
Traço	1:1,5	0,98	0,51	0,64	0,28	0,30
	1:3,0	1,02	0,61	0,57	0,44	0,53
	1:4,5	1,06	0,54	0,98	0,61	0,83
Arenito Rosa						
Traço	1:1,5	0,98	0,33	0,53	0,23	0,59
	1:3,0	1,02	0,77	0,49	0,36	0,43
	1:4,5	1,06	0,87	0,88	0,57	0,92

(fonte: elaborado pela autora)

A tabela 18 apresenta o resultado da Análise de Variância, na qual verifica-se que, novamente, há influência significativa do traço e teor de substituição, bem como da interação destas duas variáveis, sobre a absorção de água por capilaridade obtida.

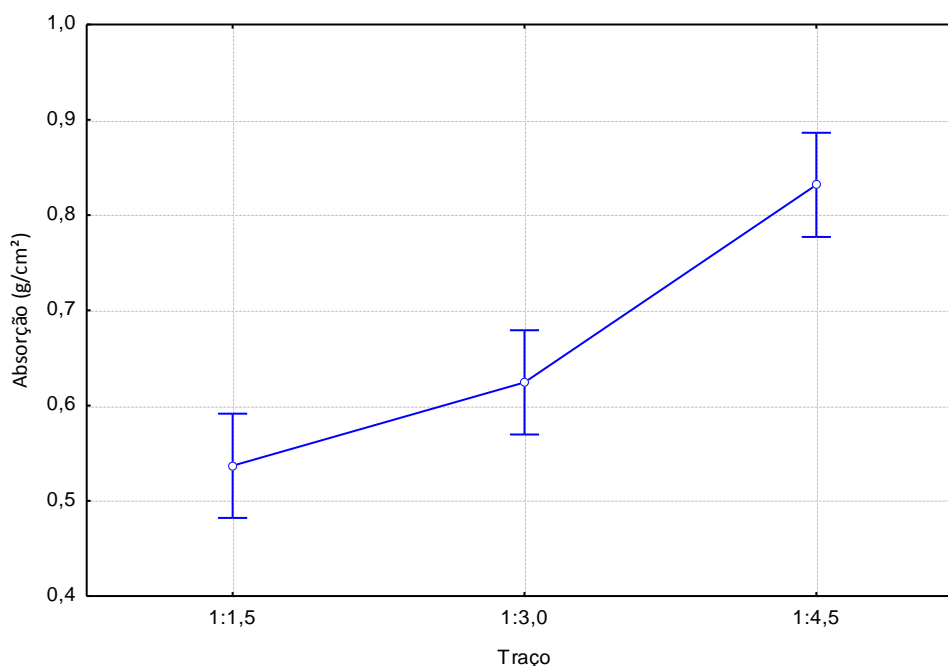
Tabela 18 – ANOVA: resultados da absorção de água por capilaridade

Absorção de Água por Capilaridade						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Arenito	0,00	1	0,00	0,08	0,7804	Não
Traço	1,38	2	0,69	30,68	0,0000	Sim
% Substituição	3,57	4	0,89	39,78	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x Traço	0,02	2	0,01	0,52	0,5972	Não
Tipo de Arenito x % Substituição	0,14	4	0,03	1,55	0,1991	Não
Traço x % Substituição	0,55	8	0,07	3,05	0,0060	Sim
Tipo de Arenito x Traço x % Substituição	0,29	8	0,04	1,63	0,1351	Não
Erro	1,35	60	0,02	-	-	-

(fonte: elaborado pela autora)

A variação da absorção com relação ao traço está apresentada na figura 38. O traço mais rico possui uma menor absorção, a qual cresce à medida que o traço fica mais pobre. Este resultado era esperado, uma vez que a absorção é proporcional à relação água/cimento da mistura: quanto maior for esta relação, também maior será a absorção. Pode-se perceber também que há uma pequena diferença de absorção entre o traço 1:1,5 e 1,3,0, enquanto que, se comparados estes dois com o traço 1:4,5, a diferença é maior.

Figura 38 – Influência do traço na absorção de água por capilaridade das argamassas

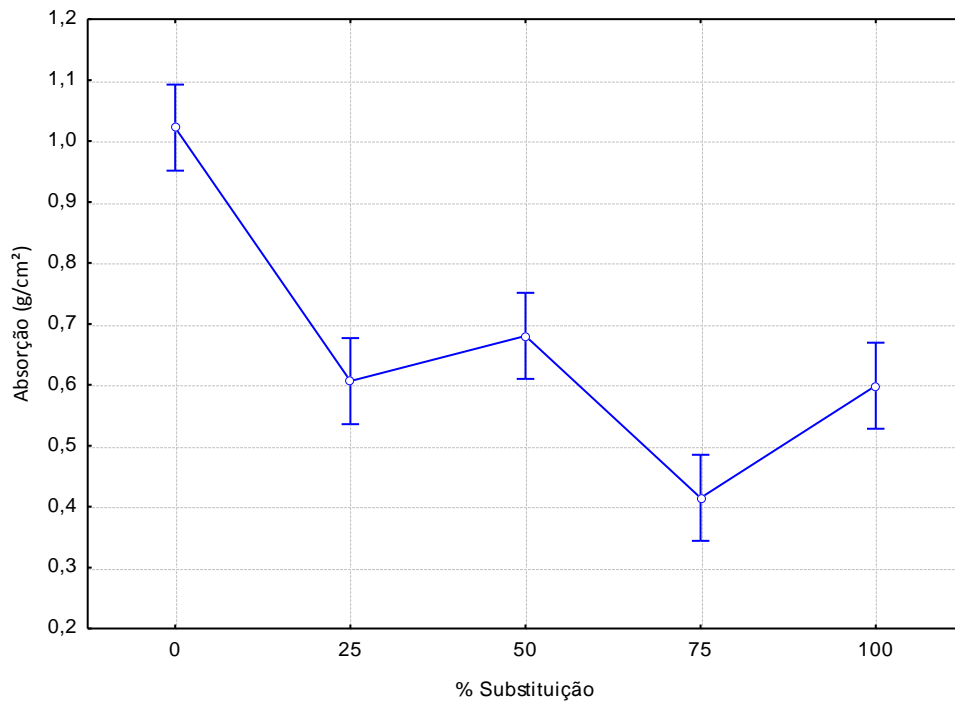


(fonte: elaborado pela autora)

A figura 39 relaciona o teor de substituição com a absorção e demonstra grande variação entre a absorção das argamassas com 0% de substituição e as demais, variações pequenas entre os teores de 25%, 50% e 100%, e uma diferença maior entre estas três e o teor de 75%. A menor absorção das argamassas com agregado miúdo de arenito, em relação àquelas constituídas apenas de areia natural, é benéfica, uma vez que este ensaio constitui um indicador da durabilidade do concreto (VENQUIARUTO et al., 2014, p. 101). Portanto, pode-se inferir que a adição do arenito às argamassas parece ter reduzido a absorção e, por consequência, pode ter tornado o material mais durável.

Este resultado também pode ser explicado pelos motivos que ocasionaram o aumento da resistência à compressão: possível melhoria da composição granulométrica, “efeito filler” e redução da relação água/cimento devido à maior absorção pelos agregados.

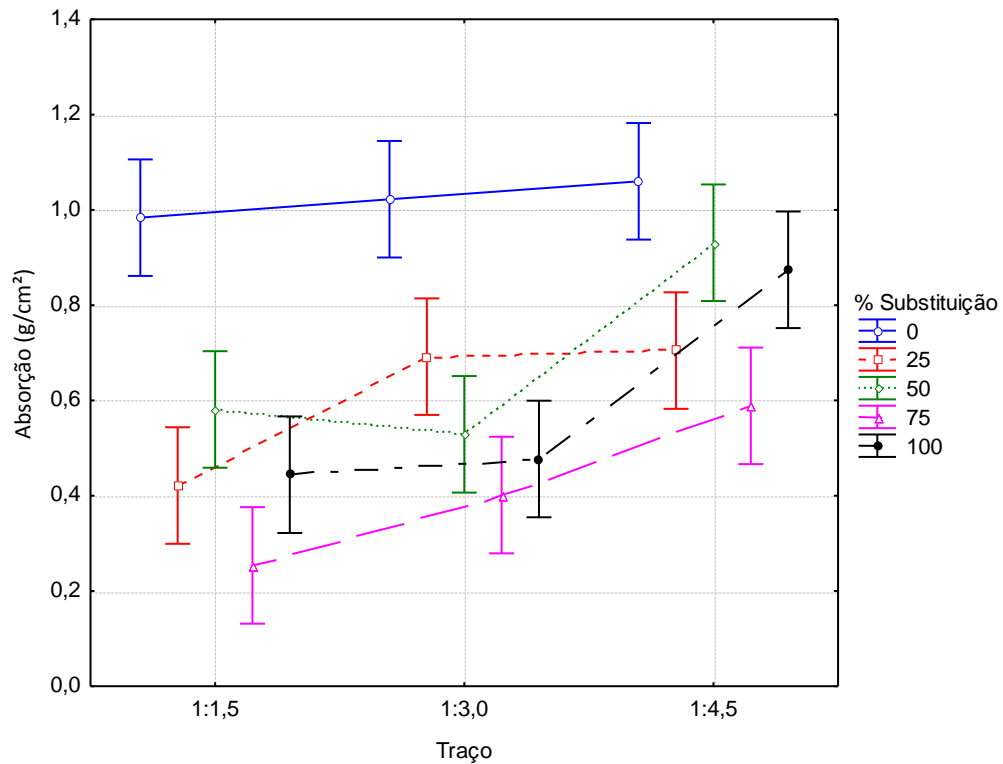
Figura 39 – Influência do teor de substituição da areia natural pelo agregado miúdo de arenito na absorção de água por capilaridade das argamassas



(fonte: elaborado pela autora)

Na relação entre o traço e a porcentagem de substituição com a absorção (figura 40), parece ter ocorrido uma menor absorção das argamassas com agregado miúdo de arenito, comparativamente com aquelas formadas apenas de areia natural. No traço mais rico e intermediário, essa diferença é expressiva. Porém, no traço pobre, a diferença de absorção entre a argamassa composta apenas de areia com a argamassa com diferentes teores de substituição parece ser menor do que a evidenciada nos demais. Ainda, pode-se observar que a variação da absorção entre as argamassas que possuem arenito é pequena.

Figura 40 – Influência do traço e do teor de substituição na absorção de água por capilaridade das argamassas



(fonte: elaborado pela autora)

6.2.2.3 Altura de Absorção

A altura média de absorção de água por capilaridade está identificada na tabela 19.

Tabela 19 – Altura média de absorção de água por capilaridade das argamassas

Altura de Absorção (mm)						
% Substituição		0	25	50	75	100
Arenito Amarelo						
Traço	1:1,5	68,68	35,04	45,15	20,01	20,54
	1:3,0	72,81	48,08	42,99	32,42	40,59
	1:4,5	77,09	43,35	65,26	45,48	55,39
Arenito Rosa						
Traço	1:1,5	68,68	26,11	34,46	20,01	37,74
	1:3,0	72,81	57,10	41,08	26,61	31,31
	1:4,5	77,09	66,00	59,08	41,23	61,38

(fonte: elaborado pela autora)

Na tabela 20 está apresentado o resultado da Análise de Variância da altura de absorção, o qual indica que somente o traço e a porcentagem de substituição tiveram influência significativa sobre a característica avaliada.

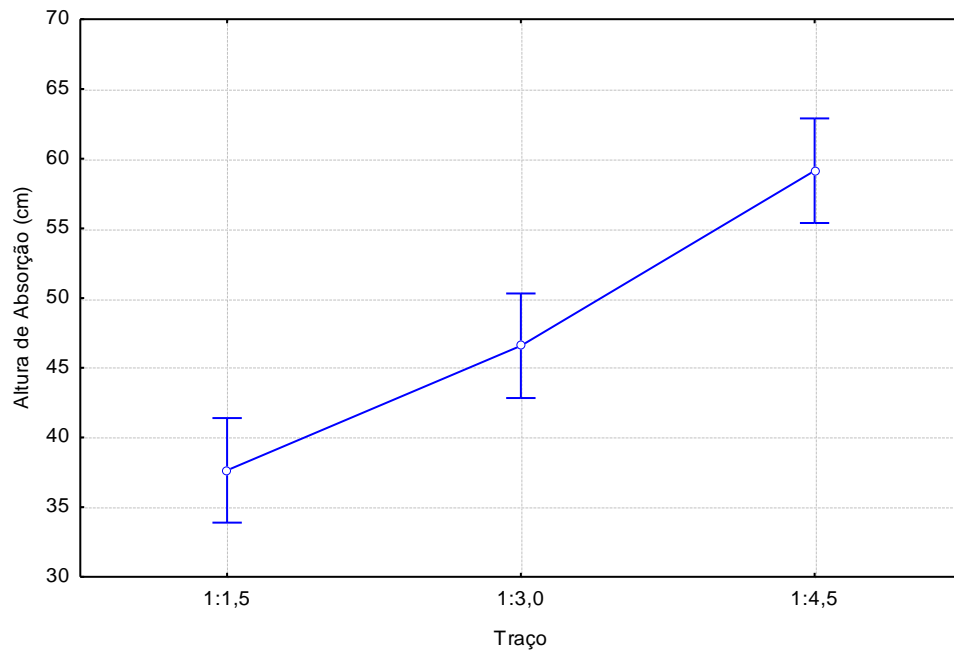
Tabela 20 – ANOVA: resultados da altura de absorção de água por capilaridade

Altura de Absorção						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Arenito	6,10	1	6,10	0,06	0,8107	Não
Traço	6.993,46	2	3.496,73	33,16	0,0000	Sim
% Substituição	17.264,49	4	4.316,12	40,93	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x Traço	114,22	2	57,11	0,54	0,5846	Não
Tipo de Arenito x % Substituição	576,05	4	144,01	1,37	0,2566	Não
Traço x % Substituição	1.641,91	8	205,24	1,95	0,0693	Não
Tipo de Arenito x Traço x % Substituição	1.253,41	8	156,68	1,49	0,1815	Não
Erro	6.327,10	60	105,45	-	-	

(fonte: elaborado pela autora)

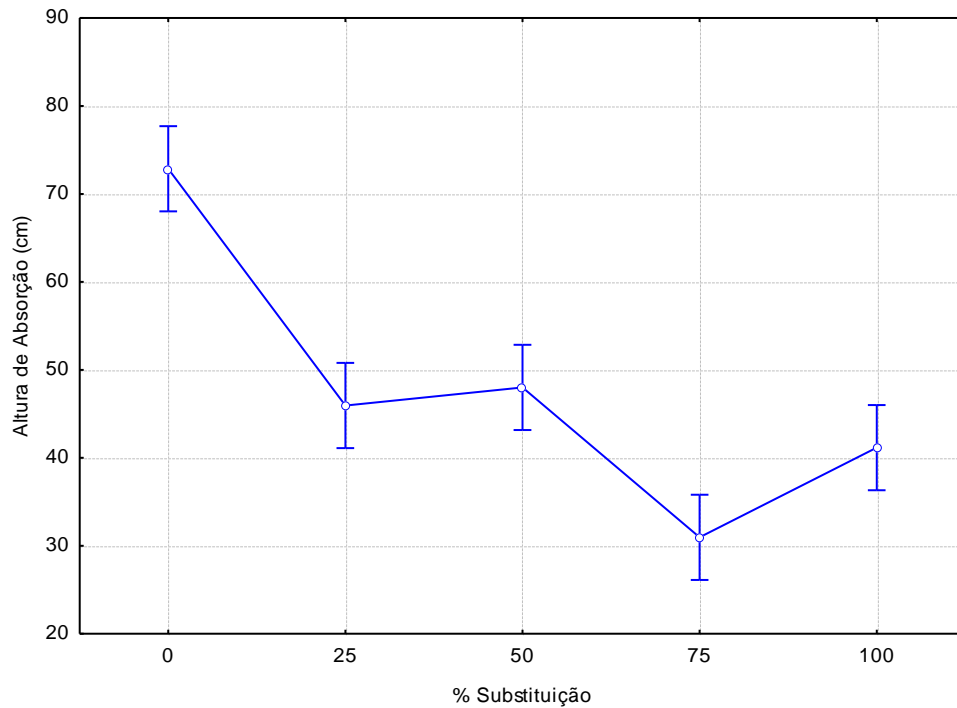
O comportamento da altura máxima de absorção, tanto na análise da influência do traço (figura 41), quanto do percentual de substituição (figura 42) apresentou-se semelhante ao da absorção. Porém, neste caso, a diferença da altura máxima de absorção entre o traço 1:1,5 e 1:3,0 é maior. Isto pode estar relacionado com a presença de poros capilares, sua distribuição e tamanho. Para uma verificação mais detalhada desta hipótese é necessário a realização de ensaios mais detalhados.

Figura 41 – Influência do traço na altura de absorção de água por capilaridade das argamassas



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 42 – Influência do teor de substituição da areia natural pelo agregado miúdo de arenito na altura de absorção de água por capilaridade das argamassas



(fonte: elaborado pela autora)

6.2.3 Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido

O valor médio da densidade de massa aparente no estado endurecido, para cada variável, está identificado na tabela 21.

Tabela 21 – Densidade de massa aparente no estado endurecido
média das argamassas

Densidade de Massa (kg/m ³)						
% Substituição	0	25	50	75	100	
Arenito Amarelo						
Traço	1:1,5	2.060,05	2.035,68	2.031,78	2.034,46	2.009,97
	1:3,0	2.001,31	2.002,41	1.991,19	2.017,50	2.018,06
	1:4,5	1.932,20	1.934,52	1.903,46	1.961,71	1.921,44
Arenito Rosa						
Traço	1:1,5	2.060,05	2.058,49	2.016,52	2.044,40	2.026,24
	1:3,0	2.001,31	2.014,71	1.966,66	2.032,63	2.032,81
	1:4,5	1.932,20	1.968,10	1.927,11	1.944,30	1.962,26

(fonte: elaborado pela autora)

A Análise de Variância (tabela 22) identificou que quase todas as variáveis analisadas, separadas e em conjunto, são significativas, exceto a interação entre as variáveis tipo de arenito e traço.

Tabela 22 – ANOVA: resultados da densidade de massa aparente
no estado endurecido

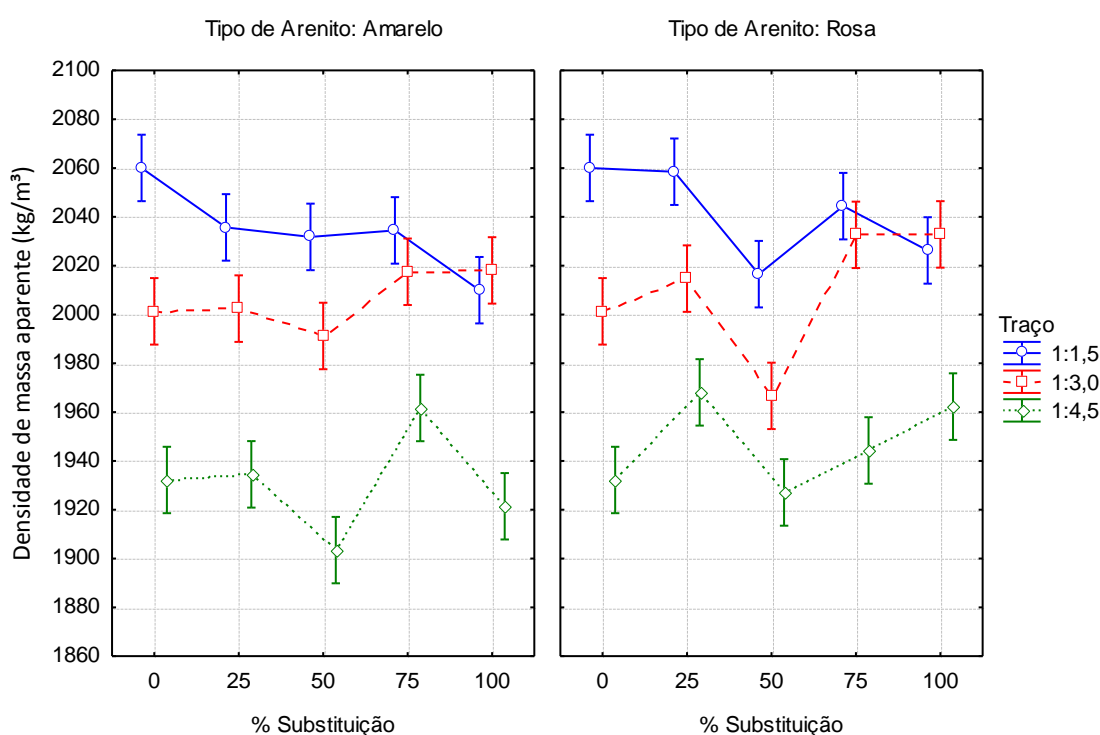
Densidade de Massa						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Arenito	1.744,02	1	1.744,02	12,54	0,0008	Sim
Traço	154.815,58	2	77.407,79	556,52	0,0000	Sim
% Substituição	12.101,32	4	3.025,33	21,75	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x Traço	642,61	2	321,31	2,31	0,1080	Não
Tipo de Arenito x % Substituição	3.355,97	4	838,99	6,03	0,0004	Sim
Traço x % Substituição	9.544,39	8	1.193,05	8,58	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x Traço x % Substituição	3.216,86	8	402,11	2,89	0,0086	Sim
Erro	8.345,49	60	139,09	-	-	-

(fonte: elaborado pela autora)

A figura 43 indica a relação entre as três variáveis deste trabalho com a massa específica aparente no estado endurecido. Visualiza-se que o traço 1:1,5 aparenta possuir uma maior compactidade, seguido pelos demais.

Para todos os traços realizados com o arenito rosa, e para o traço 1:4,5 com arenito amarelo, ocorre uma queda na massa específica aparente quando o teor de substituição é de 50%.

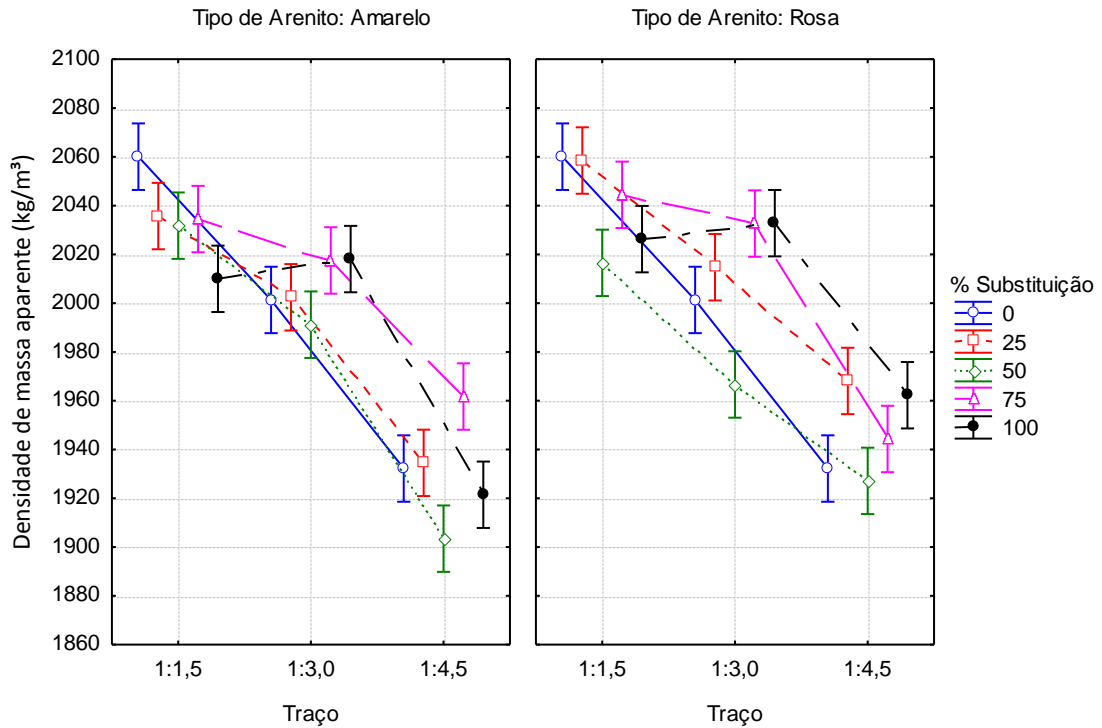
Figura 43 – Influência do tipo de arenito, traço e teor de substituição na densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas



(fonte: elaborado pela autora)

As três variáveis estudadas estão relacionadas com a massa específica aparente na figura 44. Nela, pode-se visualizar que o comportamento dos materiais com 75% e 100% de substituição no traço 1:1,5 é divergente do comportamento dos demais teores, os quais mantêm uma tendência linear nos três traços. A explicação pode estar baseada no fato de que, com esses altos teores de substituição, passa a existir na argamassa, além de uma grande quantidade de cimento, uma grande quantidade de materiais tão finos quanto, provenientes do arenito. O excesso desses materiais pode causar um maior volume de ar incorporado, visto que este último fator é quantificado como metade do volume de partículas finas por Neville (1997, p. 170).

Figura 44 – Influência do tipo de arenito, traço e teor de substituição na densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas



(fonte: elaborado pela autora)

6.2.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A média do módulo de elasticidade dinâmico está apresentada na tabela 23.

Tabela 23 – Média do módulo de elasticidade das argamassas

Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)						
% Substituição		0	25	50	75	100
Arenito Amarelo						
Traço	1:1,5	31,47	29,95	28,77	29,09	27,66
	1:3,0	27,60	27,19	26,87	27,58	25,72
	1:4,5	20,26	21,14	21,00	23,94	21,32
Arenito Rosa						
Traço	1:1,5	31,47	30,38	28,39	29,18	27,96
	1:3,0	27,60	28,53	25,99	27,77	27,82
	1:4,5	20,26	23,90	21,40	23,81	22,48

(fonte: elaborado pela autora)

A Análise de Variância (tabela 24) verificou que há influência significativa das variáveis tipo de arenito, traço e teor de substituição, sozinhas e em conjunto, sobre o módulo de elasticidade dinâmico.

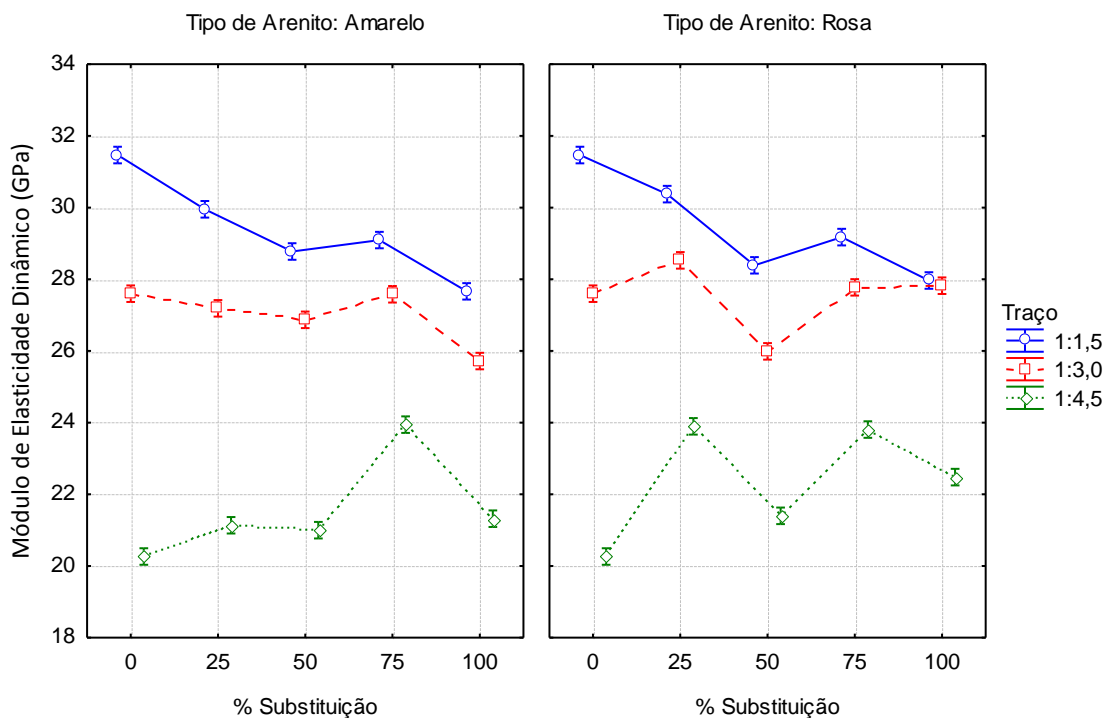
Tabela 24 – ANOVA: resultados do módulo de elasticidade dinâmico

Módulo de Elasticidade Dinâmico						
Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias Quadradas	Teste F	p-nível	Significância
Tipo de Arenito	5,42	1	5,42	136,08	0,0000	Sim
Traço	889,13	2	444,57	11.165,23	0,0000	Sim
% Substituição	37,67	4	9,42	236,51	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x Traço	2,16	2	1,08	27,18	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x % Substituição	11,53	4	2,88	72,41	0,0000	Sim
Traço x % Substituição	65,01	8	8,13	204,10	0,0000	Sim
Tipo de Arenito x Traço x % Substituição	5,76	8	0,72	18,08	0,0000	Sim
Erro	2,39	60	0,04	-	-	-

(fonte: elaborado pela autora)

O comportamento obtido no ensaio de módulo de elasticidade dinâmica apresenta-se muito semelhante ao da massa específica aparente no estado endurecido, como pode-se observar comparando as figuras 45 e 43. O traço mais pobre, 1:4,5, apresenta um menor módulo de elasticidade dinâmico do que os demais traços. Este resultado era esperado, uma vez que traços com maior a/c tendem a ser menos rígidos devido ao aumento da porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 90). Na figura 45, principalmente para o arenito rosa, é identificado um menor módulo de elasticidade para o traço de 50%, que pode estar relacionado com o aumento da porosidade do material, como também foi observado no ensaio de massa específica aparente.

Figura 45 – Influência do tipo de arenito, traço e teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico



(fonte: elaborado pela autora)

6.3 ANÁLISE QUANTITATIVA E DE CUSTO

Nesse item é analisada a quantidade de resíduo de arenito produzido e o custo das argamassas com a incorporação deste material.

6.3.1 Análise da Quantidade de Resíduo Produzido

A pedreira de arenito visitada, de porte médio, produz mensalmente 200m³ de arenito, e a quantidade estimada de resíduo gerado é de, aproximadamente, 30% deste valor (informação verbal)¹², ou seja, 60m³. Considerando que se estima a existência de 620 pedreiras (em fase de elaboração)¹³ e supondo que possuam produção semelhante, em um mês seriam gerados

¹² Informações obtidas com o proprietário da pedreira, Sr. Mário Moreira da Silva.

¹³ Informação obtida no trabalho Aproveitamento do Resíduo de Corte do Arenito, elaborado pelo mestrando Mauro Mario, sob a orientação de Angela Borges Masuero, para uma das disciplinas da Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS).

37.200 m³ de resíduo por todas. Esta quantidade demonstra que existe espaço para desenvolver tecnologias que possibilitem a utilização deste material em larga escala.

6.3.2 Análise do Custo das Argamassas

Primeiramente foi calculado o consumo de cimento para cada um dos três traços utilizados (tabela 25) e, a partir dele, foram calculadas as demais quantidades de material por m³ de argamassa.

Tabela 25 – Consumo de cimento referente aos três traços de argamassa

Traço	Consumo de Cimento (Kg)
1:1,5	802,80
1:3,0	511,82
1:4,5	362,93

(fonte: elaborado pela autora)

A análise foi simplificada, levando em conta apenas o custo dos insumos, sem considerar transporte, trabalho, taxas e impostos. Os custos unitários estão identificados na tabela 26. É importante ressaltar que o valor do arenito foi considerado nulo, por se tratar de um resíduo que não é utilizado.

Tabela 26 – Custos unitários dos insumos

Material	Unidade	R\$
Cimento	Kg	0,62
Areia	Kg	0,04
Arenito	Kg	0,00
Água	m ³	2,62
Aditivo	l	12,00

(fonte: elaborado pela autora)

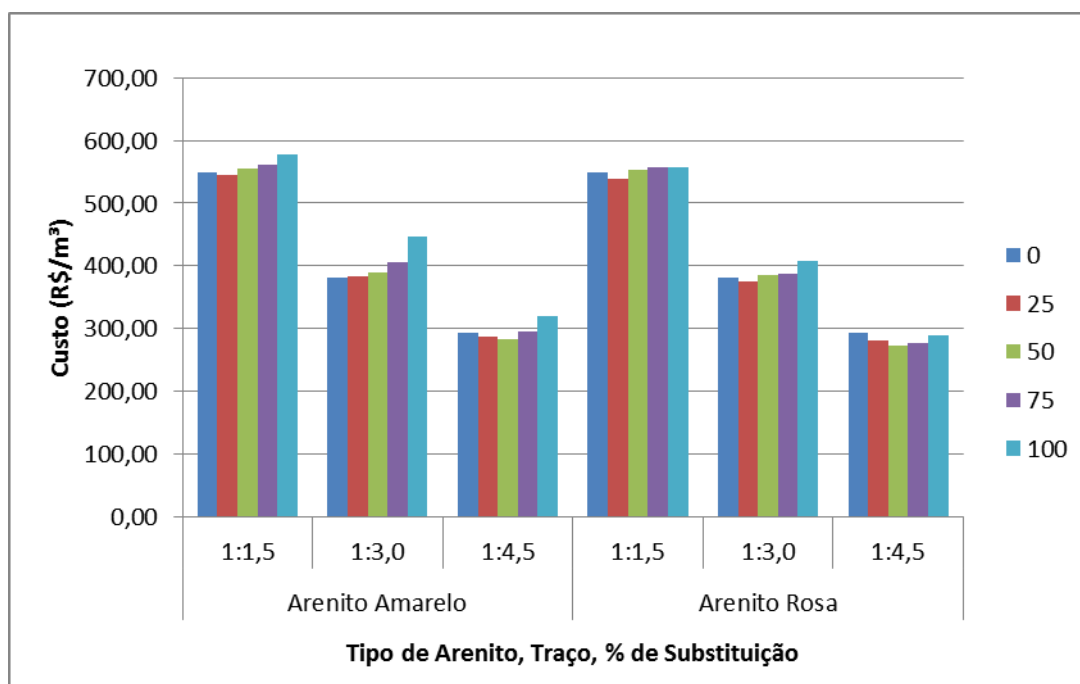
De acordo com a análise do custo da argamassa por m³ (tabela 27 e figura 46), percebe-se que os valores se mantêm próximos. As argamassas constituídas somente por agregado miúdo de arenito possuem valores maiores que o traço referência devido, principalmente, ao consumo de aditivo necessário para lhes conferir trabalhabilidade e o alto custo desse insumo. O caso

mais extremo é relativo ao arenito amarelo, traço 1:3,0 com 100% de substituição, que possuiu um aumento de 17,11% no custo em relação ao traço de referência. Em alguns casos, as argamassas com substituição possuem valores menores que a argamassa de referência, como é o caso do traço 1:4,5 com arenito rosa.

Tabela 27 – Custo por m³ das argamassas

% Substituição		Custo (R\$/m ³)					Variação (%)				
		0	25	50	75	100	0	25	50	75	100
Arenito Amarelo											
Traço	1:1,5	548,34	545,71	555,93	561,33	577,97	-	-0,48	1,38	2,37	5,40
	1:3,0	381,05	383,43	389,08	406,21	446,26	-	0,63	2,11	6,60	17,11
	1:4,5	292,60	287,14	283,29	295,40	320,29	-	-1,86	-3,18	0,96	9,47
Arenito Rosa											
Traço	1:1,5	548,34	539,29	552,72	556,51	557,10	-	-1,65	0,80	1,49	1,60
	1:3,0	381,05	375,24	385,81	388,19	406,95	-	-1,52	1,25	1,88	6,80
	1:4,5	292,60	280,76	273,71	276,24	289,95	-	-4,05	-6,45	-5,59	-0,90

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 46 – Custo por m³ das argamassas

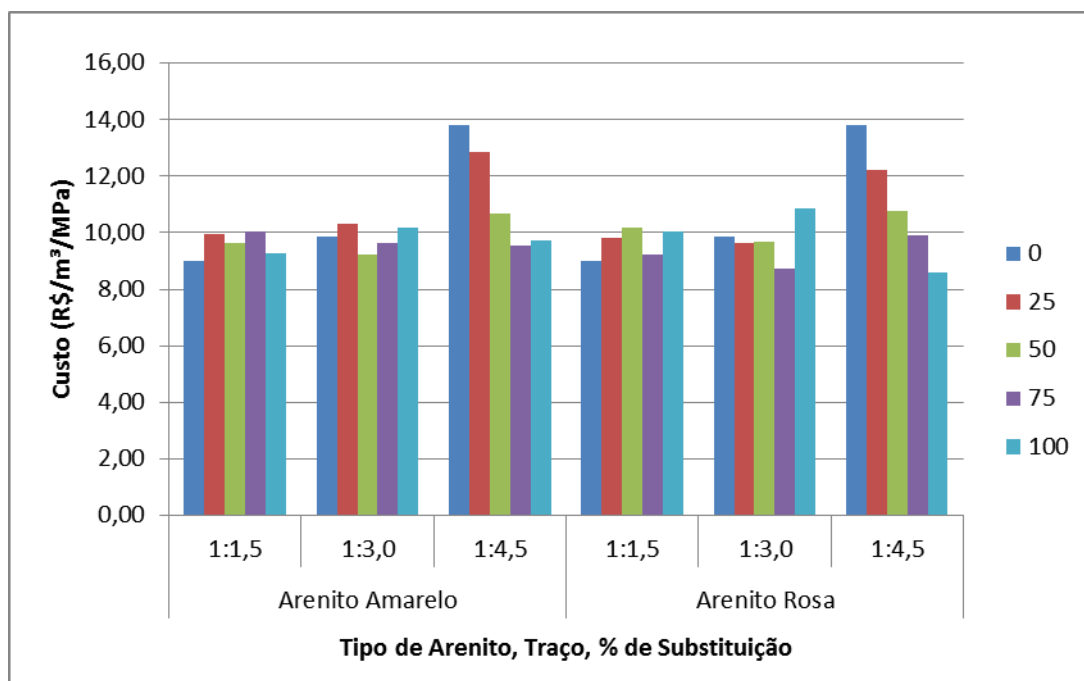
(fonte: elaborado pela autora)

Porém, com base na figura 32, é possível verificar que a substituição do agregado natural pelo resíduo proporciona um aumento de resistência. Desta forma, foi calculado o custo/m³/MPa, o qual pode ser observado na tabela 28 e figura 47. Para o traço 1:1,5, a argamassa de referência possui o menor valor por resistência. No traço 1:3,0, as substituições de 25%, 50% e 75% apresentaram custos menores que o material de referência (com exceção do custo do arenito amarelo com 25% de substituição). Por fim, para o traço 1:4,5, todas as argamassas com arenito apresentaram redução expressiva no custo com relação à composta apenas por areia natural, que ocorreu devido ao aumento da resistência à compressão das argamassas conforme era incorporado o arenito. Cabe ressaltar que o traço 1:3 é um comumente empregado na construção civil em argamassas de assentamento de pisos e rochas ou para o chapisco tradicional.

Tabela 28 – Custo por m³ e por resistência à compressão das argamassas

		Custo (R\$/m ³ /MPa)					Variação (%)				
		0	25	50	75	100	0	25	50	75	100
Arenito Amarelo											
Traço	1:1,5	9,01	9,94	9,65	10,05	9,29	-	10,41	7,19	11,59	3,20
	1:3,0	9,87	10,30	9,23	9,65	10,17	-	4,35	-6,44	-2,22	3,11
	1:4,5	13,83	12,84	10,68	9,52	9,73	-	-7,11	-22,73	-31,12	-29,64
Arenito Rosa											
Traço	1:1,5	9,01	9,83	10,18	9,24	10,03	-	9,21	13,03	2,62	11,37
	1:3,0	9,87	9,65	9,66	8,73	10,88	-	-2,18	-2,07	-11,49	10,29
	1:4,5	13,83	12,21	10,78	9,92	8,58	-	-11,71	-22,03	-28,27	-37,94

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 47 – Custo por m³ e por resistência à compressão das argamassas

(fonte: elaborado pela autora)

7 CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas restringem-se aos materiais e metodologias utilizados neste trabalho. Alterações nessas condições podem provocar variações nos resultados.

A britagem do arenito resultou em um agregado miúdo com uma grande porcentagem de material fino. Além disso, o material apresenta uma absorção muito maior quando comparada com a da areia natural. Estes dois fatores provocaram o aumento da demanda de água das argamassas, a qual foi suprida por aditivo superplastificante neste trabalho, o que aumentou expressivamente o custo do material.

As mudanças no comportamento das argamassas estudadas foram provocadas pela variação de tipo de arenito, traço e porcentagem de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo de arenito.

Quanto aos dois tipos de agregado miúdo de arenito utilizados, rosa e amarelo, embora possuam tonalidades diferentes e caracterização um pouco diferente, apresentaram comportamentos semelhantes frente aos ensaios realizados.

A resistência à compressão aumentou nos traços pobre e intermediário com o aumento da substituição de areia natural por arenito. A diferença na resistência à compressão com relação ao material de referência foi expressiva para o teor de 75% e 100% de substituição. No traço rico, as resistências pouco variaram.

A absorção de água por capilaridade nas argamassas com substituição foi menor do que nas argamassas compostas apenas por areia natural nos traços rico e intermediário, enquanto que o traço mais pobre obteve resultados próximos da argamassa de referência. Foi também observada uma redução expressiva da absorção em argamassas com 75% de substituição. Estes resultados são positivos, uma vez que indicam que o agregado miúdo de arenito pode auxiliar na durabilidade dos materiais aos quais foram incorporados.

As conclusões acerca da densidade de massa aparente são semelhantes às do módulo de elasticidade dinâmico. As argamassas com traço mais rico mostraram-se mais densas e com menos vazios que as dos demais traços. Com 50% de substituição de areia natural por arenito,

parece existir uma queda na densidade de massa aparente e também do módulo de elasticidade dinâmico, indicando-o como um material mais leve e com mais vazios que os demais teores.

Em geral, a utilização do agregado miúdo de resíduo de arenito em argamassas de cimento mostrou-se viável tecnicamente. O desempenho obtido com tais argamassas foi próximo ou, em alguns casos, até mesmo superior ao obtido com argamassas de cimento constituídas apenas de areia natural, utilizadas como referência neste trabalho.

Constatou-se que existe disponibilidade do resíduo gerado. Embora este seja considerado com valor de custo zero, as argamassas com agregado miúdo de arenito apresentaram um maior valor por m^3 em função da demanda de aditivo superplastificante, o qual possui um alto preço no mercado. Como mencionado anteriormente, parte desta demanda está relacionada com a grande quantidade de finos existentes no agregado miúdo de arenito. Desta maneira, um processo de britagem mais adequado pode reduzir a produção de finos e reduzir o custo relacionado com a utilização do aditivo plastificante.

Porém, em alguns casos, as argamassas com arenito apresentaram valores menores de custo/ m^3/MPa , comparativamente com as argamassas apenas de areia natural. No caso do traço 1:4,5, as diferenças entre os valores são expressivas.

Desta maneira, quando analisados desempenho e custo, o traço 1:3,0 com 75% de substituição e o traço 1:4,5 com 75% e 100% de substituição apresentaram resultados satisfatórios. Ambos apresentaram maior resistência à compressão, menor absorção e menor custo/ m^3/MPa que a argamassa de referência. No traço 1:1,5 não houve uma diferenciação importante de algum teor de substituição.

O passo seguinte a este trabalho é a verificação da viabilidade de utilização do agregado miúdo de arenito em concretos. O desafio será controlar as características deste material, como o elevado teor de finos e a alta absorção, de forma a executar um concreto que possua propriedades mecânicas e de durabilidade interessantes e que seja economicamente viável, para uma possível utilização em larga escala.

Embora tenham sido abordados diversos ensaios neste trabalho, este resíduo deve ser ainda avaliado quanto a outros critérios, como pozolanicidade e reatividade álcali-agregado. Por

possuir uma granulometria com um grande teor de finos, este material também poderia ser utilizado de modo a compensar areias grossas e em concretos auto adensáveis. Tais avaliações ficam como sugestão para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. Ação ilegal de dragas causa danos ambientais ao Rio Jacuí, no RS. **G1**, Porto Alegre, não paginado, 13 jan. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/01/acao-ilegal-de-dragas-causa-danos-ambientais-ao-rio-jacui-no-rs.html>>. Acesso em: 14 set. 2013.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção**: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. 1. ed. São Paulo: Pini, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7.215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 66**: agregados – constituintes mineralógicos dos agregados naturais – terminologia. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. **NBR NM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. **NBR NM 46**: agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR 10.004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13.276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 13.280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **NBR 6.467**: agregados – determinação do inchamento de agregado miúdo – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **NBR 7.809**: agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006c.

_____. **NBR 5.739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 15.577-3**: agregados – reatividade álcali-agregado. Parte 3: análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do cimento. Rio de Janeiro, 2008a.

_____. **NBR 15.630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR NM 26**: agregados – amostragem. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR 7.211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009d.

_____. **NBR 7.389-1**: agregados – análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009e.

_____. **NBR 7.389-2**: agregados – análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2009f.

_____. **NBR 9.775**: agregado miúdo – determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011a.

_____. **NBR 9.935**: agregados – terminologia. Rio de Janeiro, 2011b.

_____. **NBR 9.939**: agregado graúdo – determinação do teor de umidade total – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011c.

_____. **NBR 9.779**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 8.802**: concreto endurecido — determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ÂNGULO, S. C. ZORDAN, S. E. JOHN, V. M. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2001. p. 43-56.

BARBOSA, N. S. F.; FERREIRA, X. C. Regularização Ambiental de Atividade de Mineração: a Experiência de Taquara. In: BENJAMIN, A. H. (Org.). **Direitos Humanos e Meio Ambiente**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2006. p. 233-239. v. 1. Disponível em:
<http://www.planetaverde.org/arquivos/biblioteca/arquivo_20140211190403_8818.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2014.

BASF S. A. **MasterGlenium® 51**. [S. l.], 2009. Disponível em: <<http://www.basf-cc.com.br/PT/produtos/aditivos/MasterGlenium51/Documents/MasterGlenium%C2%AE%20%2051.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2014.

BETIOLLO, L. M. **Caracterização Estrutural, Hidrogeológica e Hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral no Nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BOGGIO, A. J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CALMON, J. L. Resíduos Industriais e Agrícolas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1591-1627. v. 2.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Guia da Produção Mais Limpa: faça você mesmo**. Rio de Janeiro, [2002?]. Disponível em: <<http://aplicativos.sebrae-rs.com.br/download2.asp?arquivoCaminho=/files/arq.ptg.6.1.22969.pdf&arquivoNome=/files/arq.ptg.6.1.22969.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2014.

CORDEIRO, L. de N. P. **Análise dos Parâmetros Principais que Regem a Variabilidade de Concretos Produzidos com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ESTRELLA, S. P. **Diagnóstico de Resíduos Sólidos Industriais em Santa Catarina: Perspectivas de Uso na Construção Civil**. 1996. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

FARIAS, M. M. de; PALMEIRA, E. M. Agregados para a Construção Civil. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 481-523. v. 1.

FRASCÁ, M. H. B. de O. Rocha como Material de Construção. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 437-479. v. 1.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil**. São Paulo: ABGE, 2002.

GONÇALVES, M. M. **Resíduos com Aplicação na Construção Civil: sistematização da análise quanto ao potencial deletério e métodos de ensaio**. 2013. 67 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para Desenvolvimento de Reciclagem de Resíduos. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. (Ed.). **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. 1. ed. Porto Alegre: ANTAC, 2003. p. 8-71. v. 4.

LATTERZA, L. M.; MACHADO JÚNIOR, E. F. **Concreto com Agregado Graúdo Reciclado: Propriedades no Estado Fresco e Endurecido e Aplicação em Pré-Moldados Leves**. São Carlos: USP, 2003. Cadernos de Engenharia de Estruturas n. 21. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee21.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2014.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. Materiais Reciclados na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1630-1657. v. 2.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 4. ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2011.

MARIANO, N. Retirada de areia impacta área em Viamão. **Zero Hora**, Porto Alegre, p. 1-3, 13 set. 2013. Disponível em: <<http://zerohora.clicrbs.com.br/rs/economia/noticia/2013/09/retirada-de-areia-impacta-area-em-viamao-4267456.html>>. Acesso em: 14 set. 2013.

MASUERO, A. B. **Estabilização das Escórias de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento**. 2001. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEDERO, G. M. **Comportamento de um Solo Colapsível Artificialmente Cimentado**. 2005. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MOURA, W. A. **Utilização de Escória de Cobre como Adição e como Agregado Miúdo para Concreto**. 2000. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

PASSUELO, A. C. B. **Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em Embalagens Descartáveis Para Frutas**: Estudo de Caso. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Recursos

Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PEREIRA, T. A. da C. **Concreto Auto-Adensável, de Alta Resistência, com Baixo Consumo de Cimento Portland e com Adições de Fibras de Lã de Rocha ou Poliamida**. 2010. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

PIERINI, C. **Caracterização de Paleossolos Aluviais em Bacias Sedimentares Mesozóicas: determinação dos controles sedimentares e implicações paleoambientais**. 2006. 186 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo a Argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008.

REIS, G. dos S. **A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná): como análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ROHDE, G. M. Cinzas de Carvão no Brasil: Restrições Ambientais e Medidas Mitigadoras. In: _____ (Org.). **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: aspectos técnicos e ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: Cientec, 2006. p. 137-186. v. 1.

SANTOS, C. R. dos. **Estudo da Utilização de Rejeitos de Carvão na Fabricação de Blocos de Concreto para Pavimentação em Substituição ao Agregado Miúdo Natural**. 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SBRIGHI NETO, C. A Importância dos Conceitos Tecnológicos na Seleção dos Agregados para Argamassas e Concretos. **Areia & Brita**. São Paulo, n. 12, p. 26-28, out./nov./dez. 2000. Disponível em: < http://anepac.org.br/wp/pdf_revistas/Revista12.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2014.

TIECHER, F. **Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado**. 2010. 287 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

VENQUIARUTO, S.; OSSORIO, A.; ZANINI, C.; PASSUELLO, A.; KIRCHHEIM, A. P.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. Aproveitamento de Resíduos de Ágata Reciclada em Materiais Cimentícios Sustentáveis. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. da; DONATO, M. (Orgs.). **Tecnologia e Inovação em Gemas, Joias e Mineração**. 1. ed. Porto Alegre: IGeo/UFRGS, 2014. p. 99-106.

VIEIRA, C. L. **Emprego de Técnicas Mecânico-Vegetativas em Ravinamento no Areal em São Francisco de Assis - Sudoeste do Rio Grande do Sul**. 2012. 164 f. Dissertação

(Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

**APÊNDICE A– Cálculo da Quantidade de Material para a Mistura
das Argamassas e Moldagem de Três Corpos de Prova**

Quantidade de material nas misturas												
Nº	Traço	% Substituição	Cimento (kg)	Areia Natural (kg)	Arenito Amarelo (kg)	Arenito Rosa (kg)	Total (kg)	Água (kg)	Água/Cimento	Aditivo (g)	Aditivo/Cimento (%)	Consistência (mm)
1	1:1,5	0	1	0,9000	-	-	1,5000	0,216	0,3600	-	-	231,667
2	1:3,0	0	0	1,1250	-	-	1,5000	0,188	0,5000	-	-	219,333
3	1:4,5	0	0	1,2273	-	-	1,5000	0,200	0,7333	-	-	231,000
4	1:1,5	25	1	0,6750	0,2233	-	1,4983	0,216	0,3600	0,600	0,10	217,000
5	1:3,0	25	0	0,8438	0,2791	-	1,4979	0,188	0,5000	1,100	0,29	22066,67%
6	1:4,5	25	0	0,9205	0,3045	-	1,4977	0,200	0,7333	0,700	0,26	230,333
7	1:1,5	50	1	0,4500	0,4466	-	1,4966	0,216	0,3600	2,000	0,33	22133,33%
8	1:3,0	50	0	0,5625	0,5582	-	1,4957	0,188	0,5000	2,400	0,64	218,333
9	1:4,5	50	0	0,6136	0,6090	-	1,4954	0,200	0,7333	1,500	0,55	216,667
10	1:1,5	75	1	0,2250	0,6699	-	1,4949	0,216	0,3600	3,100	0,52	226,333
11	1:3,0	75	0	0,2813	0,8374	-	1,4936	0,188	0,5000	4,400	1,17	218,333
12	1:4,5	75	0	0,3068	0,9135	-	1,4930	0,200	0,7333	3,300	1,21	224,667
13	1:1,5	100	1	-	0,8932	-	1,4932	0,216	0,3600	4,900	0,82	21733,33%
14	1:3,0	100	0	-	1,1165	-	1,4915	0,188	0,5000	7,800	2,08	231,000
15	1:4,5	100	0	-	1,2180	-	1,4907	0,200	0,7333	5,900	2,16	21666,67%
16	1:1,5	25	1	0,6750	-	0,2241	1,4991	0,216	0,3600	0,200	0,03	220,333
17	1:3,0	25	0	0,8438	-	0,2802	1,4989	0,188	0,5000	0,600	0,16	222,333
18	1:4,5	25	0	0,9205	-	0,3057	1,4988	0,200	0,7333	0,300	0,11	221,667
19	1:1,5	50	1	0,4500	-	0,4483	1,4983	0,216	0,3600	1,800	0,30	218,333
20	1:3,0	50	0	0,5625	-	0,5604	1,4979	0,188	0,5000	2,200	0,59	230,000
21	1:4,5	50	0	0,6136	-	0,6113	1,4977	0,200	0,7333	0,900	0,33	22766,67%
22	1:1,5	75	1	0,2250	-	0,6724	1,4974	0,216	0,3600	2,800	0,47	224,333
23	1:3,0	75	0	0,2813	-	0,8406	1,4968	0,188	0,5000	3,300	0,88	22500,00%
24	1:4,5	75	0	0,3068	-	0,9170	1,4965	0,200	0,7333	2,100	0,77	224,333
25	1:1,5	100	1	-	-	0,8966	1,4966	0,216	0,3600	3,600	0,60	226,667
26	1:3,0	100	0	-	-	1,1207	1,4957	0,188	0,5000	5,400	1,44	228,333
27	1:4,5	100	0	-	-	1,2226	1,4954	0,200	0,7333	4,000	1,47	228,333

**APÊNDICE B – Resistência à Compressão dos Corpos de
Prova de Argamassa de Cimento**

Resistência à compressão dos corpos de prova										
Identificação	Tipo de Arenito	Traço	% Substituição	Força (kN)	Relação h/d	Fator de correção	Força corrigida (kN)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	Referência	1:1,5	0	123,50	1,95	1,000	123,50	62,52	60,89	2,31
	Referência	1:1,5	0	120,90	1,92	0,993	120,09	59,27		
	Referência	1:1,5	0	121,90	1,90	0,992	120,89	59,18		
	Referência	1:1,5	0	121,20	1,84	0,988	119,69	58,68		
	Referência	1:1,5	0	117,00	1,91	0,993	116,15	58,26		
	Referência	1:1,5	0	96,00	1,82	0,986	94,63	46,29*		
	Referência	1:1,5	0	125,20	1,94	0,995	124,58	63,47		
	Referência	1:1,5	0	126,90	1,88	0,990	125,67	61,67		
2	Referência	1:1,5	0	126,80	1,92	0,994	126,02	64,04	38,62	1,52
	Referência	1:3,0	0	79,40	1,90	0,992	78,79	38,99		
	Referência	1:3,0	0	60,50	1,94	1,000	60,50	30,66*		
	Referência	1:3,0	0	73,60	1,96	1,000	73,60	37,36		
	Referência	1:3,0	0	74,20	1,90	0,992	73,63	37,40		
	Referência	1:3,0	0	76,10	1,90	0,992	75,48	37,39		
	Referência	1:3,0	0	82,70	1,84	0,987	81,62	40,09		
	Referência	1:3,0	0	78,80	1,87	0,990	77,99	39,55		
3	Referência	1:3,0	0	76,50	1,87	0,989	75,69	37,08	21,16	1,51
	Referência	1:3,0	0	81,60	1,88	0,990	80,81	41,08		
	Referência	1:4,5	0	37,70	1,89	0,991	37,38	18,99		
	Referência	1:4,5	0	42,90	1,93	0,994	42,64	21,35		
	Referência	1:4,5	0	39,20	1,96	1,000	39,20	19,75		
	Referência	1:4,5	0	43,50	1,80	0,984	42,82	21,10		
	Referência	1:4,5	0	46,00	1,88	0,990	45,56	23,04		
	Referência	1:4,5	0	45,30	1,82	0,986	44,66	22,01		
4	Referência	1:4,5	0	44,30	1,92	0,993	44,00	22,37	54,88	6,27
	Referência	1:4,5	0	39,50	1,83	0,987	38,97	19,23		
	Referência	1:4,5	0	45,00	1,87	0,990	44,55	22,60		
	Amarelo	1:1,5	25	106,90	1,96	1,000	106,90	54,12		
	Amarelo	1:1,5	25	89,10	1,91	0,993	88,46	43,62		
	Amarelo	1:1,5	25	109,40	1,89	0,991	108,47	52,99		
	Amarelo	1:1,5	25	113,60	1,94	1,000	113,60	58,64		
	Amarelo	1:1,5	25	119,70	1,89	0,991	118,65	59,94		
5	Amarelo	1:1,5	25	123,60	1,86	0,988	122,17	59,97	37,24	5,07
	Amarelo	1:3,0	25	73,10	1,94	1,000	73,10	36,92		
	Amarelo	1:3,0	25	68,60	1,89	0,991	68,02	33,51		
	Amarelo	1:3,0	25	60,30	1,90	0,992	59,82	29,20		
	Amarelo	1:3,0	25	83,00	1,92	0,993	82,46	41,76		
	Amarelo	1:3,0	25	82,60	1,93	0,994	82,14	41,63		
	Amarelo	1:3,0	25	80,40	1,90	0,992	79,75	40,40		
	Amarelo	1:4,5	25	43,10	1,90	0,992	42,74	20,98		
6	Amarelo	1:4,5	25	46,90	1,90	0,992	46,52	22,84	22,36	1,56
	Amarelo	1:4,5	25	42,60	1,92	0,994	42,34	21,33		
	Amarelo	1:4,5	25	43,80	1,87	0,990	43,35	22,07		
	Amarelo	1:4,5	25	44,30	1,90	0,992	43,94	21,67		
	Amarelo	1:4,5	25	52,30	1,81	0,985	51,49	25,26		
	Amarelo	1:1,5	50	114,50	1,95	1,000	114,50	58,04		
	Amarelo	1:1,5	50	100,00	1,92	0,993	99,34	49,67		
	Amarelo	1:1,5	50	112,00	1,90	0,992	111,08	54,79		
7	Amarelo	1:1,5	50	128,60	1,87	0,990	127,26	62,48	57,59	4,84
	Amarelo	1:1,5	50	113,30	1,94	0,995	112,74	58,24		
	Amarelo	1:1,5	50	128,20	1,87	0,990	126,91	62,31		
	Amarelo	1:3,0	50	77,20	1,93	0,994	76,75	37,26		
	Amarelo	1:3,0	50	89,30	1,94	0,995	88,86	43,64		
	Amarelo	1:3,0	50	85,10	1,90	0,992	84,39	41,13		
	Amarelo	1:3,0	50	79,40	1,91	0,993	78,83	39,99		
	Amarelo	1:3,0	50	89,80	1,87	0,989	88,84	45,06		
8	Amarelo	1:3,0	50	91,20	1,90	0,992	90,45	45,78	42,15	3,27
	Amarelo	1:4,5	50	43,80	1,89	0,991	43,41	21,34		
	Amarelo	1:4,5	50	52,40	1,90	0,992	52,00	26,32		
	Amarelo	1:4,5	50	51,70	1,90	0,992	51,29	26,02		
	Amarelo	1:4,5	50	59,20	1,80	0,984	58,23	28,53		
	Amarelo	1:4,5	50	57,80	1,86	0,989	57,16	29,00		
	Amarelo	1:4,5	50	55,50	1,87	0,990	54,92	27,89		
	Amarelo	1:4,5	50	55,50	1,87	0,990	54,92	27,89		

* Valores espúrios

Resistência à compressão dos corpos de prova										
Identificação	Tipo de Arenito	Traço	% Substituição	Força (kN)	Relação h/d	Fator de correção	Força corrigida (kN)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
10	Amarelo	1:1,5	75	108,80	1,94	0,995	108,24	54,39	55,85	9,83
	Amarelo	1:1,5	75	122,40	1,94	0,995	121,80	61,75		
	Amarelo	1:1,5	75	78,60	1,90	0,992	78,00	38,21		
	Amarelo	1:1,5	75	123,50	1,91	0,993	122,61	62,07		
	Amarelo	1:1,5	75	105,90	1,90	0,992	105,03	53,36		
11	Amarelo	1:1,5	75	129,60	1,92	0,994	128,77	65,33	42,10	7,42
	Amarelo	1:3,0	75	67,50	1,89	0,992	66,93	32,74		
	Amarelo	1:3,0	75	92,50	1,94	0,995	92,05	46,84		
	Amarelo	1:3,0	75	90,00	1,95	1,000	90,00	45,71		
	Amarelo	1:3,0	75	98,50	1,86	0,989	97,40	47,91		
12	Amarelo	1:3,0	75	67,30	1,82	0,985	66,31	32,40	31,02	4,91
	Amarelo	1:3,0	75	93,50	1,86	0,989	92,49	47,03		
	Amarelo	1:4,5	75	56,90	1,92	0,994	56,56	28,58		
	Amarelo	1:4,5	75	57,80	1,93	0,994	57,47	29,04		
	Amarelo	1:4,5	75	46,30	1,93	0,994	46,03	23,23		
	Amarelo	1:4,5	75	69,80	1,96	1,000	69,80	35,30		
13	Amarelo	1:4,5	75	69,60	1,97	1,000	69,60	35,28	62,19	3,72
	Amarelo	1:4,5	75	68,50	1,97	1,000	68,50	34,67		
	Amarelo	1:1,5	100	117,50	1,89	0,991	116,45	57,12		
	Amarelo	1:1,5	100	126,60	1,93	0,995	125,92	63,57		
	Amarelo	1:1,5	100	130,10	1,92	0,994	129,27	64,02		
	Amarelo	1:1,5	100	130,10	1,93	0,994	129,32	66,65		
14	Amarelo	1:1,5	100	119,60	1,86	0,989	118,29	58,17	43,86	9,16
	Amarelo	1:1,5	100	131,10	1,86	0,989	129,67	63,61		
	Amarelo	1:3,0	100	96,20	1,93	0,994	95,65	48,06		
	Amarelo	1:3,0	100	96,90	1,93	0,995	96,40	48,45		
	Amarelo	1:3,0	100	63,00	1,87	0,989	62,32	30,41		
15	Amarelo	1:3,0	100	101,30	1,87	0,990	100,25	50,86	32,92	0,87
	Amarelo	1:3,0	100	68,90	1,90	0,992	68,35	34,10		
	Amarelo	1:3,0	100	100,10	1,90	0,992	99,31	51,29		
	Amarelo	1:4,5	100	66,80	1,95	1,000	66,80	33,91		
	Amarelo	1:4,5	100	66,20	1,92	0,994	65,80	33,29		
	Amarelo	1:4,5	100	68,80	1,92	0,994	68,38	33,73		
16	Amarelo	1:4,5	100	63,00	1,90	0,992	62,52	31,74	54,83	8,08
	Amarelo	1:4,5	100	63,60	1,87	0,990	62,95	32,15		
	Amarelo	1:4,5	100	67,30	1,87	0,989	66,58	32,71		
	Rosa	1:1,5	25	114,70	1,89	0,991	113,70	55,76		
	Rosa	1:1,5	25	85,80	1,93	0,994	85,31	43,17		
17	Rosa	1:1,5	25	97,10	1,95	1,000	97,10	48,85	38,88	1,15
	Rosa	1:1,5	25	126,10	1,89	0,991	124,98	62,79		
	Rosa	1:1,5	25	131,80	1,89	0,991	130,60	64,31		
	Rosa	1:1,5	25	105,10	1,92	0,993	104,42	54,13		
	Rosa	1:3,0	25	78,90	1,91	0,993	78,32	39,70		
	Rosa	1:3,0	25	78,40	1,91	0,993	77,87	39,12		
18	Rosa	1:3,0	25	51,70	1,95	1,000	51,70	26,25*	23,00	2,60
	Rosa	1:3,0	25	75,50	1,89	0,991	74,81	37,90		
	Rosa	1:3,0	25	82,10	1,89	0,991	81,38	40,19		
	Rosa	1:3,0	25	74,10	1,92	0,994	73,64	37,49		
	Rosa	1:4,5	25	50,90	1,95	1,000	50,90	25,85		
	Rosa	1:4,5	25	48,70	1,91	0,993	48,36	23,81		

* Valores espúrios

Resistência à compressão dos corpos de prova										
Identificação	Tipo de Arenito	Traço	% Substituição	Força (kN)	Relação h/d	Fator de correção	Força corrigida (kN)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
19	Rosa	1:1,5	50	82,80	1,89	0,991	82,04	39,45	54,30	9,52
	Rosa	1:1,5	50	99,00	1,90	0,992	98,22	48,33		
	Rosa	1:1,5	50	118,50	1,94	1,000	118,50	60,03		
	Rosa	1:1,5	50	130,00	1,91	0,993	129,03	65,43		
	Rosa	1:1,5	50	103,80	1,93	0,994	103,19	52,25		
	Rosa	1:1,5	50	120,20	1,89	0,991	119,10	60,30		
20	Rosa	1:3,0	50	85,30	1,89	0,991	84,55	41,50	39,93	6,60
	Rosa	1:3,0	50	80,40	1,90	0,992	79,74	39,55		
	Rosa	1:3,0	50	55,70	1,93	0,994	55,37	27,13		
	Rosa	1:3,0	50	88,80	1,90	0,992	88,08	44,55		
	Rosa	1:3,0	50	92,20	1,91	0,993	91,53	45,08		
	Rosa	1:3,0	50	82,40	1,95	1,000	82,40	41,76		
21	Rosa	1:4,5	50	50,60	1,91	0,993	50,25	25,48	25,39	3,52
	Rosa	1:4,5	50	51,30	1,90	0,992	50,88	24,78		
	Rosa	1:4,5	50	50,40	1,93	0,994	50,11	25,40		
	Rosa	1:4,5	50	59,90	1,82	0,986	59,04	28,71		
	Rosa	1:4,5	50	57,70	1,88	0,991	57,16	28,82		
	Rosa	1:4,5	50	39,70	1,84	0,987	39,18	19,15		
22	Rosa	1:1,5	75	122,90	1,91	0,993	122,02	62,23	60,22	7,58
	Rosa	1:1,5	75	137,90	1,89	0,991	136,70	67,29		
	Rosa	1:1,5	75	136,50	1,88	0,991	135,24	68,37		
	Rosa	1:1,5	75	106,30	1,88	0,990	105,28	51,41		
	Rosa	1:1,5	75	100,30	1,98	1,000	100,30	50,82		
	Rosa	1:1,5	75	125,80	1,87	0,990	124,52	61,18		
23	Rosa	1:3,0	75	100,40	1,91	0,993	99,66	49,06	44,45	5,31
	Rosa	1:3,0	75	70,60	1,88	0,991	69,95	34,44		
	Rosa	1:3,0	75	100,00	1,89	0,991	99,10	48,66		
	Rosa	1:3,0	75	87,90	1,87	0,990	86,99	43,88		
	Rosa	1:3,0	75	90,10	1,92	0,994	89,56	45,18		
	Rosa	1:3,0	75	90,50	1,89	0,991	89,72	45,48		
24	Rosa	1:4,5	75	46,10	1,88	0,991	45,67	22,45	27,85	4,13
	Rosa	1:4,5	75	60,30	1,94	1,000	60,30	30,94		
	Rosa	1:4,5	75	43,90	1,94	1,000	43,90	22,63		
	Rosa	1:4,5	75	62,10	1,86	0,989	61,39	30,23		
	Rosa	1:4,5	75	62,00	1,84	0,988	61,23	29,96		
	Rosa	1:4,5	75	59,60	1,94	1,000	59,60	30,91		
25	Rosa	1:1,5	100	121,50	1,89	0,991	120,43	59,28	55,54	9,55
	Rosa	1:1,5	100	102,20	1,90	0,992	101,38	51,37		
	Rosa	1:1,5	100	128,50	1,90	0,992	127,47	64,17		
	Rosa	1:1,5	100	83,30	1,93	0,994	82,83	42,84		
	Rosa	1:1,5	100	99,30	1,88	0,990	98,32	48,36		
	Rosa	1:1,5	100	139,30	1,82	0,986	137,30	67,24		
26	Rosa	1:3,0	100	104,00	1,93	0,994	103,42	52,24	51,19	4,14
	Rosa	1:3,0	100	86,40	1,94	0,995	85,99	43,40		
	Rosa	1:3,0	100	105,00	1,94	0,995	104,46	52,83		
	Rosa	1:3,0	100	110,90	1,88	0,990	109,84	53,98		
	Rosa	1:3,0	100	108,90	1,93	0,995	108,31	54,67		
	Rosa	1:3,0	100	96,50	1,95	1,000	96,50	50,04		
27	Rosa	1:4,5	100	69,30	1,97	1,000	69,30	34,92	33,79	1,39
	Rosa	1:4,5	100	63,70	1,89	0,991	63,12	31,21		
	Rosa	1:4,5	100	68,00	1,91	0,993	67,50	33,31		
	Rosa	1:4,5	100	70,40	1,86	0,989	69,61	34,04		
	Rosa	1:4,5	100	71,50	1,86	0,989	70,71	34,79		
	Rosa	1:4,5	100	68,60	1,91	0,992	68,08	34,47		

* Valores espúrios

**APÊNDICE C – Absorção de Água por Capilaridade dos
Corpos de Prova de Argamassa de Cimento**

Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova													
Nº	Material	Traço	% Substituição	Absorção (g/cm ³)					Altura de Absorção (cm)				
				3h	6h	24h	48h	72h	Média 72h	Desvio Padrão 72h	Altura Máxima	Média	Desvio Padrão
1	Referência	1:1,5	0	0,195	0,317	0,687	0,924	1,056	0,984	0,119	64,87	68,68	14,28
	Referência	1:1,5	0	0,269	0,385	0,715	0,931	1,049			84,48		
	Referência	1:1,5	0	0,193	0,307	0,609	0,765	0,846			56,69		
2	Referência	1:3,0	0	0,180	0,292	0,644	0,900	1,059	1,022	0,032	74,93	72,81	2,49
	Referência	1:3,0	0	0,210	0,315	0,641	0,865	1,005			73,43		
	Referência	1:3,0	0	0,193	0,296	0,620	0,855	1,004			70,07		
3	Referência	1:4,5	0	0,176	0,277	0,611	0,853	1,006	1,060	0,047	76,74	77,09	0,34
	Referência	1:4,5	0	0,168	0,274	0,643	0,921	1,092			77,12		
	Referência	1:4,5	0	0,208	0,325	0,678	0,929	1,081			77,41		
4	Amarelo	1:1,5	25	0,147	0,222	0,417	0,524	0,585	0,510	0,293	42,93	35,04	22,84
	Amarelo	1:1,5	25	0,035	0,058	0,130	0,165	0,186			9,31		
	Amarelo	1:1,5	25	0,165	0,259	0,525	0,677	0,758			52,89		
5	Amarelo	1:3,0	25	0,104	0,178	0,414	0,560	0,652	0,612	0,087	50,88	48,08	5,21
	Amarelo	1:3,0	25	0,103	0,164	0,336	0,446	0,513			42,07		
	Amarelo	1:3,0	25	0,128	0,207	0,439	0,584	0,673			51,28		
6	Amarelo	1:4,5	25	0,180	0,277	0,563	0,759	0,880	0,541	0,299	65,89	43,35	20,03
	Amarelo	1:4,5	25	0,042	0,073	0,180	0,260	0,313			27,58		
	Amarelo	1:4,5	25	0,061	0,102	0,258	0,364	0,430			36,58		
7	Amarelo	1:1,5	50	0,148	0,217	0,437	0,551	0,608	0,636	0,027	47,16	45,15	1,95
	Amarelo	1:1,5	50	0,144	0,223	0,450	0,574	0,638			43,27		
	Amarelo	1:1,5	50	0,160	0,241	0,470	0,600	0,663			45,02		
8	Amarelo	1:3,0	50	0,093	0,152	0,337	0,448	0,513	0,566	0,055	38,51	42,99	5,29
	Amarelo	1:3,0	50	0,110	0,174	0,370	0,492	0,562			41,63		
	Amarelo	1:3,0	50	0,125	0,193	0,405	0,542	0,623			48,82		
9	Amarelo	1:4,5	50	0,166	0,272	0,602	0,824	0,954	0,980	0,028	63,45	65,26	2,80
	Amarelo	1:4,5	50	0,188	0,298	0,631	0,850	0,977			63,84		
	Amarelo	1:4,5	50	0,203	0,309	0,643	0,872	1,010			68,48		
10	Amarelo	1:1,5	75	0,031	0,047	0,083	0,102	0,113	0,278	0,239	8,78	20,01	15,97
	Amarelo	1:1,5	75	0,052	0,075	0,127	0,151	0,168			12,96		
	Amarelo	1:1,5	75	0,126	0,200	0,404	0,502	0,552			38,30		
11	Amarelo	1:3,0	75	0,095	0,155	0,339	0,444	0,507	0,440	0,090	36,43	32,42	5,86
	Amarelo	1:3,0	75	0,053	0,091	0,216	0,292	0,338			25,70		
	Amarelo	1:3,0	75	0,094	0,154	0,314	0,409	0,473			35,14		
12	Amarelo	1:4,5	75	0,104	0,192	0,457	0,625	0,729	0,612	0,103	52,73	45,48	6,44
	Amarelo	1:4,5	75	0,102	0,165	0,362	0,490	0,572			43,28		
	Amarelo	1:4,5	75	0,091	0,151	0,337	0,459	0,535			40,43		
13	Amarelo	1:1,5	100	0,131	0,197	0,350	0,429	0,472	0,299	0,183	31,27	20,54	10,69
	Amarelo	1:1,5	100	0,079	0,122	0,227	0,286	0,317			20,46		
	Amarelo	1:1,5	100	0,000	0,044	0,076	0,096	0,107			9,90		
14	Amarelo	1:3,0	100	0,151	0,230	0,437	0,571	0,650	0,528	0,110	45,63	40,59	5,95
	Amarelo	1:3,0	100	0,080	0,132	0,306	0,428	0,499			42,11		
	Amarelo	1:3,0	100	0,070	0,112	0,261	0,368	0,436			34,03		
15	Amarelo	1:4,5	100	0,162	0,263	0,582	0,809	0,952	0,831	0,237	60,57	55,39	13,80
	Amarelo	1:4,5	100	0,183	0,285	0,610	0,838	0,982			65,86		
	Amarelo	1:4,5	100	0,076	0,130	0,314	0,459	0,558			39,75		

Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova													
Nº	Material	Traço	% Substituição	Absorção (g/cm²)					Altura de Absorção (cm)				
				3h	6h	24h	48h	72h	Média 72h	Desvio Padrão 72h	Altura Máxima	Média	Desvio Padrão
16	Rosa	1:1,5	25	0,085	0,130	0,233	0,283	0,311	0,333	0,123	23,66	26,11	8,18
	Rosa	1:1,5	25	0,079	0,112	0,176	0,207	0,222			19,44		
	Rosa	1:1,5	25	0,110	0,174	0,343	0,423	0,466			35,24		
17	Rosa	1:3,0	25	0,089	0,153	0,352	0,471	0,544	0,772	0,198	43,04	57,10	12,18
	Rosa	1:3,0	25	0,169	0,267	0,560	0,747	0,867			63,92		
	Rosa	1:3,0	25	0,189	0,291	0,589	0,782	0,904			64,35		
18	Rosa	1:4,5	25	0,146	0,238	0,532	0,729	0,855	0,869	0,102	65,81	66,00	6,14
	Rosa	1:4,5	25	0,106	0,202	0,477	0,662	0,775			59,96		
	Rosa	1:4,5	25	0,184	0,288	0,612	0,834	0,977			72,23		
19	Rosa	1:1,5	50	0,199	0,291	0,547	0,701	0,779	0,526	0,321	48,78	34,46	20,50
	Rosa	1:1,5	50	0,126	0,207	0,439	0,570	0,634			43,63		
	Rosa	1:1,5	50	0,038	0,060	0,120	0,150	0,164			10,98		
20	Rosa	1:3,0	50	0,081	0,135	0,312	0,423	0,486	0,492	0,129	36,05	41,08	4,69
	Rosa	1:3,0	50	0,063	0,106	0,237	0,320	0,366			41,85		
	Rosa	1:3,0	50	0,096	0,168	0,391	0,536	0,624			45,34		
21	Rosa	1:4,5	50	0,126	0,224	0,560	0,797	0,941	0,882	0,051	61,92	59,08	2,51
	Rosa	1:4,5	50	0,138	0,231	0,528	0,728	0,849			57,17		
	Rosa	1:4,5	50	0,129	0,216	0,512	0,726	0,855			58,16		
22	Rosa	1:1,5	75	0,065	0,102	0,205	0,252	0,276	0,230	0,042	21,81	20,01	2,84
	Rosa	1:1,5	75	0,059	0,093	0,148	0,176	0,194			16,74		
	Rosa	1:1,5	75	0,056	0,090	0,164	0,198	0,219			21,48		
23	Rosa	1:3,0	75	0,106	0,181	0,361	0,470	0,541	0,363	0,154	37,84	26,61	9,73
	Rosa	1:3,0	75	0,041	0,072	0,176	0,239	0,277			21,10		
	Rosa	1:3,0	75	0,050	0,084	0,180	0,237	0,272			20,88		
24	Rosa	1:4,5	75	0,078	0,122	0,261	0,355	0,417	0,565	0,212	30,80	41,23	14,27
	Rosa	1:4,5	75	0,156	0,244	0,523	0,698	0,808			57,49		
	Rosa	1:4,5	75	0,094	0,147	0,308	0,407	0,472			35,40		
25	Rosa	1:1,5	100	0,193	0,272	0,463	0,567	0,619	0,590	0,048	40,07	37,74	2,66
	Rosa	1:1,5	100	0,182	0,258	0,454	0,562	0,615			38,32		
	Rosa	1:1,5	100	0,138	0,207	0,388	0,486	0,535			34,84		
26	Rosa	1:3,0	100	0,065	0,109	0,226	0,280	0,316	0,426	0,111	23,07	31,31	7,84
	Rosa	1:3,0	100	0,084	0,134	0,286	0,373	0,426			32,18		
	Rosa	1:3,0	100	0,107	0,167	0,357	0,470	0,537			38,68		
27	Rosa	1:4,5	100	0,150	0,250	0,560	0,785	0,928	0,918	0,029	62,03	61,38	2,50
	Rosa	1:4,5	100	0,145	0,241	0,558	0,790	0,941			63,48		
	Rosa	1:4,5	100	0,183	0,290	0,597	0,783	0,885			58,62		

**APÊNDICE D – Densidade de Massa, Velocidade de Propagação de Ondas
Ultrassônicas e Módulo de Elasticidade Dinâmico dos
Corpos de Prova de Argamassa de Cimento**

Densidade de massa aparente, velocidade de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico										
Nº	Material	Traço	% Substituição	Densidade de massa aparente (kg/m ³)			Velocidade de Propagação da Onda Ultrassônica (mm/μs)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)		
				Densidade	Média	Desvio Padrão		Módulo	Média	Desvio Padrão
1	Referência	1:1,5	0	2053,02	2060,05	9,08	4,12	31,33	31,47	0,12
	Referência	1:1,5	0	2070,29			4,11	31,49		
	Referência	1:1,5	0	2056,83			4,13	31,57		
2	Referência	1:3,0	0	2007,47	2001,31	6,64	3,90	27,53	27,60	0,13
	Referência	1:3,0	0	1994,28			3,93	27,75		
	Referência	1:3,0	0	2002,19			3,91	27,52		
3	Referência	1:4,5	0	1918,68	1932,20	11,79	3,42	20,24	20,26	0,03
	Referência	1:4,5	0	1937,51			3,41	20,30		
	Referência	1:4,5	0	1940,39			3,41	20,26		
4	Amarelo	1:1,5	25	2042,71	2035,68	6,09	4,05	30,14	29,95	0,30
	Amarelo	1:1,5	25	2032,52			4,02	29,60		
	Amarelo	1:1,5	25	2031,82			4,06	30,11		
5	Amarelo	1:3,0	25	2000,53	2002,41	8,30	3,88	27,17	27,19	0,14
	Amarelo	1:3,0	25	2011,49			3,87	27,06		
	Amarelo	1:3,0	25	1995,22			3,90	27,33		
6	Amarelo	1:4,5	25	1932,40	1934,52	2,59	3,48	21,01	21,14	0,39
	Amarelo	1:4,5	25	1933,73			3,52	21,57		
	Amarelo	1:4,5	25	1937,41			3,46	20,83		
7	Amarelo	1:1,5	50	2013,43	2031,78	15,94	3,98	28,68	28,77	0,09
	Amarelo	1:1,5	50	2042,19			3,96	28,86		
	Amarelo	1:1,5	50	2039,73			3,96	28,78		
8	Amarelo	1:3,0	50	1978,11	1991,19	13,85	3,86	26,56	26,87	0,29
	Amarelo	1:3,0	50	1989,75			3,89	27,14		
	Amarelo	1:3,0	50	2005,69			3,86	26,91		
9	Amarelo	1:4,5	50	1911,54	1903,46	10,56	3,50	21,03	21,00	0,03
	Amarelo	1:4,5	50	1907,31			3,50	21,00		
	Amarelo	1:4,5	50	1891,51			3,51	20,97		
10	Amarelo	1:1,5	75	2045,15	2034,46	9,41	3,99	29,30	29,09	0,28
	Amarelo	1:1,5	75	2027,42			4,00	29,21		
	Amarelo	1:1,5	75	2030,81			3,97	28,78		
11	Amarelo	1:3,0	75	2023,60	2017,50	15,05	3,90	27,71	27,58	0,38
	Amarelo	1:3,0	75	2000,36			3,88	27,15		
	Amarelo	1:3,0	75	2028,54			3,91	27,88		
12	Amarelo	1:4,5	75	1973,33	1961,71	14,94	3,67	23,86	23,94	0,12
	Amarelo	1:4,5	75	1966,94			3,67	23,90		
	Amarelo	1:4,5	75	1944,86			3,71	24,07		
13	Amarelo	1:1,5	100	2005,27	2009,97	17,40	3,92	27,70	27,66	0,33
	Amarelo	1:1,5	100	2029,23			3,91	27,97		
	Amarelo	1:1,5	100	1995,40			3,90	27,32		
14	Amarelo	1:3,0	100	2008,75	2018,06	8,28	3,78	25,88	25,72	0,22
	Amarelo	1:3,0	100	2020,80			3,74	25,46		
	Amarelo	1:3,0	100	2024,63			3,76	25,81		
15	Amarelo	1:4,5	100	1917,58	1921,44	4,42	3,50	21,16	21,32	0,15
	Amarelo	1:4,5	100	1920,47			3,52	21,46		
	Amarelo	1:4,5	100	1926,26			3,51	21,34		

Densidade de massa aparente, velocidade de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico										
Nº	Material	Traço	% Substituição	Densidade de massa aparente (kg/m³)			Velocidade de Propagação da Onda Ultrassônica (mm/μs)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)		
				Densidade	Média	Desvio Padrão		Módulo	Média	Desvio Padrão
16	Rosa	1:1,5	25	2059,64	2058,49	1,90	4,05	30,38	30,38	0,07
	Rosa	1:1,5	25	2056,30			4,05	30,30		
	Rosa	1:1,5	25	2059,54			4,05	30,44		
17	Rosa	1:3,0	25	2030,96	2014,71	21,74	3,95	28,54	28,53	0,17
	Rosa	1:3,0	25	1990,01			3,98	28,36		
	Rosa	1:3,0	25	2023,17			3,97	28,69		
18	Rosa	1:4,5	25	1992,51	1968,10	22,33	3,66	24,04	23,90	0,26
	Rosa	1:4,5	25	1948,69			3,70	24,04		
	Rosa	1:4,5	25	1963,09			3,65	23,60		
19	Rosa	1:1,5	50	2031,07	2016,52	12,86	3,94	28,30	28,39	0,16
	Rosa	1:1,5	50	2011,83			3,97	28,58		
	Rosa	1:1,5	50	2006,66			3,96	28,29		
20	Rosa	1:3,0	50	1958,71	1966,66	6,99	3,84	26,01	25,99	0,32
	Rosa	1:3,0	50	1969,44			3,80	25,66		
	Rosa	1:3,0	50	1971,84			3,85	26,30		
21	Rosa	1:4,5	50	1920,92	1927,11	7,43	3,51	21,28	21,40	0,12
	Rosa	1:4,5	50	1935,35			3,50	21,39		
	Rosa	1:4,5	50	1925,06			3,52	21,52		
22	Rosa	1:1,5	75	2043,80	2044,40	2,04	3,96	28,90	29,18	0,28
	Rosa	1:1,5	75	2042,72			3,98	29,17		
	Rosa	1:1,5	75	2046,67			4,00	29,46		
23	Rosa	1:3,0	75	2056,37	2032,63	21,57	3,87	27,75	27,77	0,08
	Rosa	1:3,0	75	2014,22			3,92	27,86		
	Rosa	1:3,0	75	2027,30			3,90	27,71		
24	Rosa	1:4,5	75	1933,33	1944,30	13,97	3,70	23,79	23,81	0,12
	Rosa	1:4,5	75	1960,04			3,68	23,94		
	Rosa	1:4,5	75	1939,53			3,68	23,69		
25	Rosa	1:1,5	100	2025,67	2026,24	8,57	3,91	27,93	27,96	0,07
	Rosa	1:1,5	100	2017,98			3,92	27,92		
	Rosa	1:1,5	100	2035,08			3,91	28,05		
26	Rosa	1:3,0	100	2029,02	2032,81	3,58	3,90	27,77	27,82	0,07
	Rosa	1:3,0	100	2036,12			3,90	27,91		
	Rosa	1:3,0	100	2033,29			3,90	27,79		
27	Rosa	1:4,5	100	1964,60	1962,26	6,86	3,57	22,48	22,48	0,05
	Rosa	1:4,5	100	1954,53			3,57	22,42		
	Rosa	1:4,5	100	1967,64			3,57	22,53		