

UNIS – CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA CIVIL
LEANDRO FERNANDES BORGES

**USO DE RESÍDUOS DE QUARTZITO COMO AGREGADO MIÚDO E AGREGADO
GRAÚDO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Varginha
2019

LEANDRO FERNANDES BORGES

**USO DE RESÍDUOS DE QUARTZITO COMO AGREGADO MIÚDO E AGREGADO
GRAÚDO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro
Universitário do Sul de Minas-UNIS, como parte dos
requisitos para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Ivan Francklin Junior.

**Varginha
2019**

LEANDRO FERNANDES BORGES

**USO DE RESÍDUOS DE QUARTZITO COMO AGREGADO MIÚDO E AGREGADO
GRAÚDO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro
Universitário do Sul de Minas-UNIS, como parte dos
requisitos para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Ivan Francklin Junior

Aprovado em: ___/___/___

Prof. Me. Ivan Francklin Junior (Orientador)

Prof. (Banca Examinadora)

Prof. (Banca Examinadora)

OBS.:

Dedico este trabalho ao meu pai Paulo Fernando (in memoriam) e minha mãe Eliete pelo apoio emocional e o suporte necessário para realizar mais esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e proteção durante as lutas diárias, ao meu pai Paulo Fernando Borges (in memoriam) e a minha mãe Eliete Maria Fernandes Borges que me motivaram a cada passo durante esta jornada, aos meus amigos que fiz durante essa caminhada e que vão continuar presentes em minha vida, ao meu orientador Prof. Me. Ivan Francklin Junior pela ajuda e orientação ao longo deste trabalho, aos meus professores que me proporcionaram o conhecimento que me ajudou chegar até aqui. E por fim agradeço a empresa Siox, Tecnologia e Reciclagem de Minério, pela contribuição na realização deste trabalho.

“A coragem é a primeira das qualidades humanas, porque é a que garante todas as outras.”

Aristóteles

RESUMO

Este trabalho analisou o comportamento do quartzito como agregado graúdo e agregado miúdo no concreto de cimento Portland branco por meio de ensaios de resistência mecânica e de durabilidade. Tal abordagem se fez necessária para proporcionar a utilização da grande quantidade de resíduos gerados durante extração do quartzito, que são descartados incorretamente no entorno do município de São Thomé das Letras. Este propósito foi alcançado por meio do comparativo entre os resultados obtidos em ensaios laboratoriais dos agregados e do concreto com os parâmetros estabelecidos pelas normas da construção civil. Para os agregados foram realizados os seguintes ensaios: granulometria, massa unitária, índice de vazios, índice forma, massa específica, teor de materiais pulverulentos, teor de argila em torrões e materiais friáveis, teor de umidade total e absorção de água. E para o concreto branco foram realizados os ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e a reação álcali-agregado (RAA), e também foram realizadas comparações entre os valores obtidos do concreto referência e concreto branco, considerando para ambos o mesmo traço e frações granulométricas. A pesquisa comprovou que o quartzito como agregado no concreto atende aos parâmetros estabelecidos pela norma e pelo referencial literário, no qual foram alcançadas classificações de excelente a bom. Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto branco foram satisfatórios, no qual a resistência do cimento utilizado na produção era inferior ao que a empresa informou, assim o concreto obteve valores compatíveis com a resistência real do cimento e não ao que foi estipulado no estudo de dosagem. Em relação ao ensaio de RAA foi obtido valores de expansões acima de 0,19%, a partir da idade de 49 a 56 dias, assim, conforme os parâmetros estabelecidos em norma, classificou-se o material como potencialmente reativo de grau R1, no entanto, por meios de ações mitigadoras, essas expansões podem ser controladas.

Palavras-Chave: Quartzito. Resíduos. Concreto Branco.

ABSTRACT

This work analyzed the behavior of quartzite as coarse aggregate and fine aggregate in white Portland cement concrete through mechanical strength and durability tests. Such an approach was necessary to provide the use of the large amount of waste generated during quartzite extraction, which is incorrectly disposed of in the surroundings of São Thomé das Letras. This purpose was achieved by comparing the results obtained in laboratory tests of aggregates and concrete with the parameters established by construction standards. For aggregates, the following tests were performed: particle size, unit mass, void index, shape index, specific mass, powdery material content, clay content in lumps and friable materials, total moisture content and water absorption. And for the white concrete, tests were performed to determine the consistency by tapering of the trunk, compression strength, tensile strength by diametral compression and the alkali-aggregate reaction (RAA), and comparisons were also made between the values obtained. reference concrete and white concrete, considering for both the same trace and particle size fractions. The research proved that quartzite as aggregate in concrete meets the parameters established by the standard and the literary reference, in which excellent to good ratings were achieved. The values obtained in the compressive strength test of white concrete were satisfactory, in which the strength of the cement used in the production was lower than the company reported, thus the concrete obtained values compatible with the actual strength of the cement and not as stipulated. in the dosage study. Regarding the RAA assay, expansion values above 0.19% were obtained, from the age of 49 to 56 days, thus, according to the parameters established in the standard, the material was classified as potentially reactive grade R1, in the However, by mitigating actions, these expansions can be controlled.

Keywords: Quartzite. Waste. White Concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Utilização do quartzito como material de acabamento	20
Figura 2 - Cores das Pedras São Thomé.....	22
Figura 3 – Pilhas de resíduos de quartzitos	23
Figura 4 – Distribuição granulométrica.....	27
Figura 5 - Forma dos agregados, conforme NBR 7389:2009.....	29
Figura 6 – Vista do Edifício Flexotronics e detalhes das fachadas, em Sorocaba, SP.....	33
Figura 7 – Fase de construção, Vista Aérea e Fachada do Condomínio Panamerica Park, em São Paulo, SP.....	33
Figura 8 – Vista do Museu Iberê Camargo, detalhe da fachada e vista interior, em Porto Alegre SC.	34
Figura 9 – Município de São Thomé das Letras.....	43
Figura 10 – Extração de quartzito em São Thomé das Letras	44
Figura 11 - Redução da amostra	44
Figura 12 -Procedimento de ensaio de granulometria	45
Figura 13 - Recipiente com as amostras	46
Figura 14 – Medição por paquímetro	47
Figura 15 - Material em ensaio	48
Figura 16 - Procedimentos do ensaio	51
Figura 17 - Ensaio de NM 52 - Agregado miúdo	52
Figura 18 - Ensaio do teor de umidade superficial	54
Figura 19 – Amostras e amostras submersas.....	55
Figura 20 - Processo de Método ABCP/ACI.....	56
Figura 21 – Curva de Abrams.....	57
Figura 22 - Procedimento de abatimento.....	61
Figura 23 - Tipos de rupturas	62
Figura 24 – Procedimentos de ensaio do RAA.....	65
Figura 25 – Leitura das barras de argamassa.....	66
Figura 26 -Curva granulométrica - Agregado graúdo	68
Figura 27 – Material retidos nas peneiras – agregado graúdo	68
Figura 28 - Curva granulométrica - Agregado miúdo	71
Figura 29 – Material retidos na peneiras - agregado miúdo	72
Figura 30 – Corpos de prova	75
Figura 31 – Resistência dos cimentos ensaiados	76
Figura 32 - Teste de abatimento dos concretos	78
Figura 33 -Corpos de prova para ensaio.....	80
Figura 34 - Prensa usado no ensaio de resistência a compressão	80
Figura 35 –Resultados de ensaio de compressão aos 7 dias.....	81
Figura 36 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	82
Figura 37 – Gráfico dos resultados de ensaio de tração por compressão diametral	83
Figura 38 – Expansibilidade das barras de argamassa	84
Figura 39 – Material produzido em laboratório.....	85
Figura 40 -Vista das fachadas e interior da Igreja Dives in Misericordia, em Roma, Itália. ...	96
Figura 41 -Fase de construção e vistas aéreas do Auditório Tenerife, em Santa Cruz de Tenerife, Espanha.	96
Figura 42 -Fachadas externas e internas do Aeroporto de Dulles, em Virginia, EUA.....	96
Figura 43 -Fachadas externas das Torres do Tombo, em Lisboa, Portugal.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa dos rejeitos acumulados nas áreas do município de São Thomé das Letras	22
Tabela 2 - Classificação dos agregados segundo a sua obtenção	25
Tabela 3 – Classificação do agregado quanto a massa unitária.....	26
Tabela 4 - Classificação das areias quanto ao módulo de finura.....	27
Tabela 5 - Classificação das britas quanto à dimensão dos grãos	27
Tabela 6 - Avaliação da qualidade do agregado.....	31
Tabela 7 – Ensaio e especificações para agregado graúdos.....	31
Tabela 8 – Limites de composição dos cimentos Portland branco.....	34
Tabela 9 - Requisitos físicos e mecânicos	35
Tabela 10 – Resistência à compressão de concretos moldados com cimento branco e cinza (CPV-ARI).....	36
Tabela 11 – Propriedades mecânicas de concretos moldados com cimento branco e cinza	37
Tabela 12 – Classificação da estrutura	39
Tabela 13 – Classificação do grau de reatividade do agregado.....	40
Tabela 14 – Grau de risco de ocorrência da RAS.....	40
Tabela 15 – Grau de intensidade da medida preventiva.....	40
Tabela 16 – Medidas de mitigação da expansão devida a RAS	41
Tabela 17 – Quantidade materiais	55
Tabela 18 – Desvio-padrão do concreto	58
Tabela 19 – Estimativa do consumo de água	58
Tabela 20 - Volume de agregado graúdo por m ³ de concreto	59
Tabela 21- Valores de ψ_6	63
Tabela 22– Granulometria requerida do material para ensaio.....	65
Tabela 23 – Massa específica seca, saturada e aparente – Agregado graúdo.....	69
Tabela 24 – Massa unitária e índice de vazios – Agregados graúdos	69
Tabela 25 – Material pulverulentos	70
Tabela 26 – Material torrões e materiais friáveis	70
Tabela 27 – Material pulverulentos	70
Tabela 28 – Massa específica seca, saturada e aparente – Agregado miúdo.....	72
Tabela 29 – Massa unitária e índice de vazios – Agregados miúdo.....	73
Tabela 30 -Valores obtidos para absorção de água	73
Tabela 31 - Resultados do teor de umidade superficial.....	74
Tabela 32 - Resumo dos resultados	74
Tabela 33 – Valores da resistência dos cimentos	76
Tabela 34 - Características dos materiais para o concreto referencia.....	77
Tabela 35 - Parâmetros do concreto	77
Tabela 36 – Consumo de materiais.....	78
Tabela 37 - Primeiro traço para o concreto branco	78
Tabela 38 - Segundo traço para o concreto branco	78
Tabela 39 – Traço para o concreto referência	79
Tabela 40: Apresentação do traço em (kg) para produzir 22,6 dm ³ cada traço.....	79
Tabela 41: Resultados do ensaio de compressão.....	81
Tabela 42: Resistência aos 28 dias	81
Tabela 43: Resultados do ensaio de tração axial	82
Tabela 44: Resultados do ensaio de tração axial	84
Tabela 45: Limites da composição granulométrica do agregado miúdo	93

Tabela 46: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo	93
Tabela 47: Valores obtido no ensaio de granulometria do agregado graúdo	95
Tabela 48: Valores obtido no ensaio de granulometria do agregado miúdo	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIROCHA	Associação Brasileira da Indústria de Rocha
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPB	Cimento Portland Branco
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DMC	Dimensão Máxima Característica
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente do Belo Horizonte
IRAM	<i>Instituto Argentino de Normalización y Certificación</i>
MF	Módulo de Finura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PF	Perda ao fogo
RI	Resíduo insolúvel

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
t	Tonelada
mm	Milímetros
µm	Micrometros
FeS ₂	Fórmula química da pirita
Na ₂ O	Fórmula química do óxido de sódio
K ₂ O	Fórmula química do óxido de potássio
g	Gramas
cm ³	Centímetro cúbico
MgSO ₄	Fórmula química do sulfato de magnésio
MPa	Megapascal
MgSO	Fórmula química do óxido de magnésio
SO ₃	Fórmula química do trióxido de enxofre
CO ₂	Fórmula química do anidrido carbônico
min	Minutos
kg	Quilograma
m ³	Metro cúbico
cm	Centímetro
GPa	Gigapascal
ml	Mililitros
C _{ag}	Consumo de água
C _c	Consumo de cimento
C _a	Consumo de agregados
l	Litros
dm ³	Decímetro cúbico
tf	Tonelada-Força
mm ²	Milímetros quadrados
N	Newton
°	Graus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	18
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivos Geral	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	Produção de quartzitos	20
3.1.1	Propriedades básicas dos quartzitos	21
3.1.2	Características mineralógicas, texturais e estruturais do quartzito	21
3.2	Rejeitos de quartzito produzido em São Thomé Das Letras	22
3.3	Resíduos de quartzitos como agregado	23
3.4	Agregado na produção do concreto branco	24
3.4.1	Classificação dos agregados para produção do concreto	25
3.4.1.1	Origem	25
3.4.1.2	Dimensão dos grãos	25
3.4.1.3	Massa unitária	25
3.4.2	Características dos agregados que influenciam no concreto	26
3.4.2.1	Composição granulometria	26
3.4.2.2	Absorção de água e Inchamento	28
3.4.2.3	Forma dos grãos	28
3.4.2.4	Resistência à compressão e resistência à abrasão	29
3.4.2.5	Índices de sulfatos	30
3.4.2.6	Reatividade dos agregados	30
3.4.3	Parâmetros de qualidades dos agregados	30
3.5	Concreto de cimento Portland branco	32
3.5.1	Aplicabilidade	32
3.5.2	Principais materiais constituintes no concreto branco	34
3.5.2.1	Cimento Portland branco	34
3.5.2.2	Agregados	35
3.5.3	Propriedades mecânicas do concreto branco	36
3.5.4	Durabilidade	37
3.5.4.1	Reação álcali-agregado (RAA)	38
3.5.5	Dosagem do concreto branco	41
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43

4.1	Estudos de caracterização dos agregados.....	43
4.1.1	Preparação das amostras	43
4.1.1.1	Local de estudo.....	43
4.1.1.2	Redução da amostra (ABNT NBR NM 27:2001)	44
4.1.2	Ensaio para agregado graúdo e agregado miúdo.....	45
4.1.2.1	Granulometria (ABNT NBR NM 248:2003)	45
4.1.2.2	Massa unitária e índice de vazios (ABNT NBR NM 45:2003).....	46
4.1.3	Ensaio para agregado graúdo	47
4.1.3.1	Índice de forma (ABNT NBR 7809:2019).....	47
4.1.3.2	Massa específica seca, aparente e absorção de água (ABNT NBR NM 53:2009).....	47
4.1.3.3	Teor de materiais pulverulentos (ABNT NBR NM 46:2003).....	49
4.1.3.4	Teor de argila em torrões e materiais friáveis (ABNT NBR 7218:2010)	50
4.1.3.5	Teor de umidade total (ABNT NBR 9939:2012)	50
4.1.4	Ensaio para agregado miúdo	51
4.1.4.1	Massa específica, aparente e absorção de água (ABNT NBR NM 52:2009).....	51
4.1.4.2	Absorção de água (ABNT NBR NM 30:2000).....	53
4.1.4.3	Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman (ABNT NBR 9775:2012)	53
4.2	Estudos de caracterização do cimento	54
4.2.1	Cimento utilizado nos experimentos.....	54
4.2.2	Resistência à compressão do cimento Portland (ABNT: NBR 7215:2019)	55
4.3	Estudos de dosagem e produção do concreto.....	56
4.3.1	Método de dosagem ABCP/ACI.....	56
4.3.1.1	A relação água/cimento (a/c).....	57
4.3.1.2	Estimativa do consumo de água (C _{ag})	58
4.3.1.3	Estimativa do consumo de cimento (C _c).....	58
4.3.1.4	Estimativa do consumo de agregados (C _a)	59
4.3.1.5	Determinação do traço.....	60
4.3.1.6	Cálculo do volume de amostragem	60
4.3.2	Produção de Concreto em laboratório (ABNT NBR 12821:2009).....	60
4.3.3	Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998)	61
4.4	Estudos de resistência do concreto.....	61
4.4.1	Resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018).....	61
4.4.2	Resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011)	63
4.5	Estudos de durabilidade do concreto.....	64
4.5.1	Ensaio de reatividade álcali-sílica no concreto (ABNT NBR 15577-4:2018).....	64

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1	Caracterização dos agregados	67
5.1.1	Resultados obtidos do agregado graúdo	67
5.1.1.1	Índice de forma.....	67
5.1.1.2	Composição da granulometria.....	67
5.1.1.3	Massa específica seca, aparente e absorção de água	69
5.1.1.4	Massa unitária e índice de vazios	69
5.1.1.5	Teor de materiais pulverulentos	70
5.1.1.6	Teor de argila em torrões e materiais friáveis	70
5.1.1.7	Teor de umidade total.....	70
5.1.2	Resultados obtidos do agregado miúdo	71
5.1.2.1	Composição da granulometria.....	71
5.1.2.2	Massa específica seca, aparente	72
5.1.2.3	Massa unitária e índice de vazios	73
5.1.2.4	Absorção de água	73
5.1.2.5	Teor de umidade superficial.....	73
5.1.3	Resumo dos resultados.....	74
5.2	Caracterização do cimento	75
5.2.1	Ensaio de resistência do cimento	75
5.3	Dosagem do concreto.....	76
5.3.1	Caracterização do Materiais.....	77
5.3.2	Determinação da relação água e cimento	77
5.3.3	Consumo dos materiais.....	77
5.3.4	Apresentação e correções do traço.....	78
5.3.4.1	Quantidade para produção.....	79
5.4	Produção do concreto.....	79
5.4.1	Resultados obtidos nos ensaios de compressão	80
5.4.2	Resultados obtidos no ensaio de tração por compressão diametral	82
5.5	Durabilidade do concreto.....	83
5.5.1	Resultados obtidos no ensaio de RAA.....	83
5.6	Resultados estéticos	85
6	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE A – Valores limites para a curva granulométrica do agregado graúdo e agregado miúdo.....	93

APÊNDICE B – Valores coletados para determinação do índice de forma do agregado graúdo	94
APÊNDICE C – Valores coletados para determinação da curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos	95
ANEXO A – Figuras de diversas obras em concreto branco	96
ANEXO B – Laudo do cimento branco disponibilizado pela empresa.....	97

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado para realização de obras no Brasil e no mundo, isso em virtude da sua versatilidade, durabilidade, economia e alta resistência à água. E por seu grande consumo, pesquisas foram intensificadas. A possibilidade de incorporar colorações a este material vem conquistando cada vez mais adeptos, principalmente entre os arquitetos e engenheiros (PETRY, 2015).

As estruturas arquitetônicas elaboradas com o concreto convencional, acabam ficando limitada a uma cor acinzentada, considerado monótona por muitos projetistas. Este fator é devido, principalmente, pela cor característica dos cimentos Portland, aglomerante utilizado na composição do concreto, além dos agregados graúdo e miúdo. Devido a esta dificuldade do concreto convencional, o concreto branco acabou ganhando força (SILVA FILHO *et al.*, 2004).

Segundo Kirchheim (2003), o emprego do concreto branco nas obras estruturais é justificado por motivos estéticos, podendo-se eliminar o revestimento, bem como trabalhar com texturas e pigmentos. A sua composição basicamente é uma mistura de cimento Portland branco com agregado graúdo e agregado miúdo e em alguns casos a utilização de aditivos para facilitar a aplicação e melhorar a trabalhabilidade do concreto.

Contudo, o concreto branco precisa de um controle mais rigoroso na escolha de seus agregados, principalmente os miúdos. Desta forma, os agregados de cores claras são utilizados para favorecer o controle da aparência superficial dos elementos executados com este material. Afim de atender esse requisito há possibilidade de empregar agregados com coloração branca, provenientes de rochas como o quartzito, o calcário, o mármore ou o granito (PETRY, 2015).

E o Brasil por estar entre os cinco maiores produtores mundiais de rochas ornamentais e revestimentos, que compreendem diversos tipos, como mármore, granito e entre outros (EDUCAÇÃO, 2007). E devido a essa posição do Brasil, a possibilidade de adoção de diferentes tipos rochas como agregado na produção do concreto branco se aumenta.

No concreto, o quartzito como agregado já é citado por autores como Petry (2015) e Deschamps (2002) e será o enfoque deste estudo, o emprego deste material no concreto branco. No Brasil, a maior parte da produção brasileira de quartzito está no estado de Minas Gerais, sendo o município de São Thomé das Letras o valor mais expressivo na produção do estado, a frente de Alpinópolis, Ouro Preto e Diamantina (FERNANDES *et al.* 2003).

Com a produção de 1,3 milhões de toneladas de quartzitos no município de São Thomé das Letras em 2008, 900 mil toneladas dessa produção é rejeito, sendo 80% descartado junto à frente de lavra (FEAM F. E., 2009).

O aproveitamento de resíduo na construção civil traz uma alternativa para solucionar este impacto ambiental. E pelo fato de possuir uma coloração branca, produz um agregado graúdo e um agregado miúdo com potencial para utilização em concreto de cimento Portland branco.

Para viabilizar o emprego do agregado de quartzito no concreto com cimento Portland branco realizou-se ensaios de caracterização do agregado e para avaliar a viabilidade técnica do concreto, no que se refere às solicitações mecânicas realizou-se ensaios de resistência a compressão, resistência a tração por compressão diametral, além disso, a análise da reação álcali-agregado.

1.1 Justificativa

Este estudo se faz necessário para disponibilizar à construção civil local conhecimento técnico sobre a utilização do concreto de cimento Portland branco, objetivando o uso de quartzito como agregado na composição. Além de possibilitar uma alternativa para o uso dos resíduos de quartzito acumulado em bota-fora no município de São Thomé das Letras., contribuindo com a diminuição da poluição visual e ambiental no entorno da cidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Geral

O objetivo geral deste trabalho é a análise o comportamento do quartzito como agregado graúdo e agregado miúdo no concreto de cimento branco através de ensaios de resistência mecânica e de durabilidade pelo método de reatividade álcali-agregado.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivo específicos citam-se:

- Proceder a amostragem dos resíduos de quartzito;
- Analisar as propriedades físicas e mecânicas de agregados de quartzitos;
- Caracterizar os materiais componentes do concreto;
- Desenvolver estudo de dosagem e produzir os concretos em laboratório;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto branco confeccionado com os agregados de quartzitos;
- Avaliar as propriedades de durabilidade por meio ensaio de reatividade álcali-agregado do concreto branco confeccionado com os agregados de quartzitos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Produção de quartzitos

As rochas de quartzito compreendem os materiais geológicos naturais que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados por meio de aparelhos específicos com o objetivo de transformá-los em produtos destinados a aplicações ornamentais ou de revestimento. Seus principais campos de aplicação, quanto a edificações, destaca-se os revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, dentre outros, como pode ser visto na Figura 1 (CHIODI F. C., 1995).

Figura 1 - Utilização do quartzito como material de acabamento



Fonte: Autor (2019)

No Brasil, a rocha de quartzito está na quarta posição de produção, ficando atrás de ardósia, mármore e granito. No ano de 2017, segundo a Abirocha (2018), a produção total de rochas ornamentais e de revestimento foi de 9.200,00 toneladas. A região sudeste é a principal região produtora de rochas ornamentais do Brasil com mais de 70% da produção nacional. Minas Gerais é o segundo estado em termos de produção, ficando apenas atrás do Espírito Santo.

O estado de Minas Gerais é responsável por maior parte da extração brasileira de quartzitos, com quatro centros de lavras. Segundo Fernandes *et al.* (2003), o município mais expressivo na extração é o centro de São Thomé das Letras, seguindo-se Alpinópolis, Ouro Preto e Diamantina. No qual a economia da cidade de São Thomé das Letras gira em torno do comércio, da agricultura, do turismo e, principalmente, da lavra de quartzitos para revestimentos na construção civil (FLEISCHER, 2006). Sua produção tem como suporte na

atividade econômica da região, gerando empregos para parte da população local e para os moradores das cidades vizinhas.

3.1.1 Propriedades básicas dos quartzitos

As rochas de quartzitos são consideradas rochas metamórficas, que segundo Fontes (1984), são formadas da transformação de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares por meio de submissão a parâmetros térmicos, mecânicos e químicos sem ocorrer fusão da rocha. No caso do quartzito a rocha pré-metamórficas são as rochas sedimentares de arenitos.

Segundo Popp (2017), a principal diferença entre a rocha de arenito e a rocha de quartzito é a presença de minerais micáceo no quartzito. Ainda os quartzitos são mais duros e quando quebrados os minerais de quartzo são seccionados ao meio, enquanto nos arenitos eles apenas se deslocam, continuando inteiros.

3.1.2 Características mineralógicas, texturais e estruturais do quartzito

Segundo Teixeira *et al.* (2009), os quartzitos são rochas maciças ou foliadas, com textura granoblásticas, ou seja, com arranjo dos minerais na forma de grãos que tendem a ser equidimensionais, poligonizados, a lenticulados e orientados quando dão origem a uma foliação por achatamento de grãos. Além disso, o quartzito possui uma granulação fina a grossa com estruturas maciça, foliada, com quartzo como mineral predominante e moscovita, biotita e granada como minerais acessórios da rocha. O mineral quartzo e a moscovita, respectivamente, os principais minerais no quartzito.

As características das rochas dependem dos minerais presentes na rocha matriz, bem como das características do meio onde ocorreu o processo de metamorfismo de acordo com a temperatura, pressão e composição química (FONTES, 1984). A composição do quartzito, segundo Chiodi *et al.* (2005) revelam que a constituição mineralógica dos quartzitos São Thomé é marcada pela total dominância de quartzo (95-98%) e quantidades razoáveis de moscovita (3-5%). Os outros minerais identificados ocorrem em quantidades acessórias, destacando-se turmalina, opacos e hidróxidos de ferro, sempre com menos de 1%.

Os quartzitos apresentam grande variedade de cor e aspectos, normalmente colorações esbranquiçadas tendo-se variações para amarelado, esverdeado, rosado/amarronzado,

acinzentado etc., variações estas determinadas pelos minerais acessórios presentes e pelos diferentes graus de oxidação e transformação dos mesmos.

Segundo Gomes (2000), nas pedreiras, ao redor do município de São Thomé das Letras é extraído um quartzito micáceo, geralmente com aspecto laminado, causado por uma xistosidade bem desenvolvida. No município afloram, segundo Fernando *et al.* (2003), quartzitos de coloração predominantemente esbranquiçada, amarelada e rosada, designados comercialmente de pedra são thomé branco, amarelo e rosa, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Cores das Pedras São Thomé



Fonte: Autor (2019)

3.2 Rejeitos de quartzito produzido em São Thomé Das Letras

De acordo com a Feam (2009), a extração de quartzito no centro São Thomé das Letras no ano de 2008 foi de 1,3 milhões de toneladas de lavra bruta, sendo que desse total cerca de 900 mil toneladas são considerados rejeitos, usando apenas 400 mil toneladas com finalidade ao comércio, assumindo assim um índice de aproveitamento de aproximadamente 30% da extração.

Para a apuração do volume de rejeitos de lavra acumulados nas pilhas existentes no município de São Thomé das Letras, mostrado na Tabela 1, considerou-se, segundo dados históricos, que: a produção bruta evoluiu de uma média anual de 200 mil toneladas, na década de 1950, para 1,2 milhão de toneladas na década 2000; a taxa de recuperação da lavra evoluída de 10 % na década de 1950, para 30% na década de 2000; e que 80% do rejeito permanece em São Thomé das Letras no período de 1950 a 2009 (FEAM, 2009).

Tabela 1 - Estimativa dos rejeitos acumulados nas áreas do município de São Thomé das Letras

Período Considerado	Produção Bruta Média Anual de Lavra (milhão t)	Taxa de Perda na Lavra (%)	Taxa De Acumulação local (%)	Total Acumulado no Período (milhão t)
1950-59	0,2	90	80	1,5
1960-69	0,4	90	80	2,9

(Continua)

Continuação da Tabela 1 - Estimativa dos rejeitos acumulados nas áreas do município de São Thomé das Letras

1970-79	0,6	90	80	4,1
1980-89	0,8	85	80	5,1
1990-99	1	80	80	6,4
2000-09	1,2	70	80	6,7
Total				26,7

Fonte: Feam (2009)

3.3 Resíduos de quartzitos como agregado

Com a preocupação ambiental e com as leis ambientais mais rígidas, as empresas produtoras de rochas, procuram pesquisas sobre como dar um destino mais apropriado para os resíduos formados durante o processo de beneficiamento das rochas, pois devido à falta de tecnologia, as mineradoras locais extraem pedras somente próximo à superfície, assim as jazidas avançam horizontalmente, ocupando cada vez mais área de mata nativa, conforme apresentado na Figura 3. (RUSSO, 2011).

Figura 3 – Pilhas de resíduos de quartzitos



Fonte: Autor (2019)

E diversos grupos de pesquisadores veem estudando a aplicação de resíduos de rochas ornamentais (mármore, granito, ardósia, quartzito, gnaisse e xisto) em diversos tipos de materiais de construção (cerâmica vermelha, porcelanato, adições pozolânicas, estruturas de pavimentos e agregados) como é mencionado por (RUSSO, 2011).

Ao se tratar da produção de quartzito, autores como Francklin Junior (2009) verificaram a utilização dos materiais depositados como rejeitos no bota-foras de minerações de quartzito para uso em concretos e Deschamps *et al.* (2002) para o uso de blocos sílica-cal ainda destaca que além da aplicação do revestimento ornamental na construção civil, tem-se também a exploração do mesmo com o objetivo exclusivo de se empregá-lo como fonte de quartzo para

diversas finalidades, como por exemplo tijolos refratários, eletrodos e osciladores de frequência, tintas e etc.

3.4 Agregado na produção do concreto branco

Segundo Bauer (2013) agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituída de misturas de partículas de vários tamanhos. O termo “agregado” é uso generalizado na tecnologia do concreto, nos outros ramos da construção é conhecido, conforme cada caso, pelo nome específico, como, por exemplo, fíler, pedra britada, bica-corrída, rachão. A ABNT NBR 9935:2011, define como material granular, sem forma ou volume estabelecido, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a utilização de argamassas e concretos.

Os agregados em concretos são utilizados como enchimento, que podem ocupar de 80% do seu peso e 20% do custo, exercendo influência sobre a estabilidade dimensional, durabilidade, resistência. Também tem papel relevante na determinação do custo e trabalhabilidade das misturas (BAUER, 2013).

Os agregados apresentam características que podem apresentar comportamentos significativas nas propriedades das matrizes cimentícias, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Destaca-se que a forma e a textura superficial das partículas influenciam mais nas propriedades do concreto no estado fresco, como a trabalhabilidade, do que no estado endurecido. Há uma relação direta entre granulometria e trabalhabilidade, desta maneira a relação água/aglomerante do concreto é parcialmente dependente da granulometria do agregado (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Segundo Passuelo (2004), na produção do concreto branco são utilizados agregados miúdos e agregados graúdos de cores esbranquiçadas. Também é usado o cimento Portland branco, que apresenta esta coloração por não possuir em sua composição óxidos de ferro e manganês, responsáveis pela cor cinza do cimento Portland convencional. O mesmo autor ainda afirma que o simples uso de cimento branco não necessariamente irá atender as exigências de coloração, pois a cor final do concreto depende dos materiais envolvidos no processo. Que de acordo com Fonseca e Nunes (1998), pode se considerar que o agregado graúdo tem um papel menos importante por não fica visível na superfície do concreto ele apresenta pouca influência sobre a cor, isto ocorre porque a argamassa da mistura cobre o agregado graúdo propiciando a coloração final dominada por sua cor. Entretanto o mesmo não é válido para o agregado miúdo, pois estes têm grande influência na cor da mistura

3.4.1 Classificação dos agregados para produção do concreto

Segundo Bauer (2013), os agregados podem ser classificados de acordo com a sua origem, as dimensões dos grãos e segundo a sua massa específica.

3.4.1.1 Origem

Segundo Ribeiro (2013), os agregados podem ser obtidos de duas formas, conforme a Tabela 2, podendo ser diretamente na natureza, em leitos de rios ou barrancos, no caso de areias e pedregulhos, ou por processos artificiais, como a fragmentação ou a trituração de materiais provenientes de extração, no caso britas e areias artificiais.

Tabela 2 - Classificação dos agregados segundo a sua obtenção

Classificação	Obtenção	Exemplos
Naturais	Rochas fragmentadas pela ação do vento, das chuvas, das variações de temperatura etc. e encontradas na natureza sob forma de agregados	Areias, Pedregulhos
Artificiais	Materiais que foram fragmentados ou triturados com auxílio de britadores ou outro meio artificial	Areias artificiais e britas de granitas, gnaisse, calcário, quartzo, etc.

Fonte: Ribeiro (2013)

3.4.1.2 Dimensão dos grãos

Ao se tratar da dimensão dos seus grãos os agregados podem ser classificados em miúdos e graúdos. De acordo com a ABNT NBR 9935:2011, o agregado graúdo é o material cujo os grãos passam pela peneira de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm e para o agregado miúdo, os grãos passam pela peneira de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 150 μ m. Essa definição pode ser obtida através do ensaio de granulometria estabelecida pela ABNT NBR NM 248:2003.

3.4.1.3 Massa unitária

Segundo Ribeiro (2013) os agregados podem ser classificados de acordo com a sua massa unitária, que é a relação entre a massa e o volume aparente, incluindo os vazios entre os grãos. Podendo ser classificado com normais, leves ou pesados, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação do agregado quanto a massa unitária

Classificação	Massa Unitária (γ_a) (kg/dm ³)	Exemplos	Exemplos de utilização
Leves	$\gamma_a < 1$	Escória de alto-forno, lodo de esgoto, argila expandida	Pré-moldados
Normais	$1 < \gamma_a < 1$	Areia, brita e pedregulho	Obras correntes
Pesados	$\gamma_a > 1$	Barita, limonita, magnetita	Concretos de estruturas especiais: blindagem contra radiação

Fonte: Ribeiro (2013)

3.4.2 Características dos agregados que influenciam no concreto

Dentre as características dos agregados destaca-se as resistências mecânica, forma dos grãos, superfície específica, distribuição granulométrica, módulo de finura, teor de umidade, absorção de água, inchamento, compactidade, porosidade, índice de vazios e resistência aos sulfatos (BAUER, 2013).

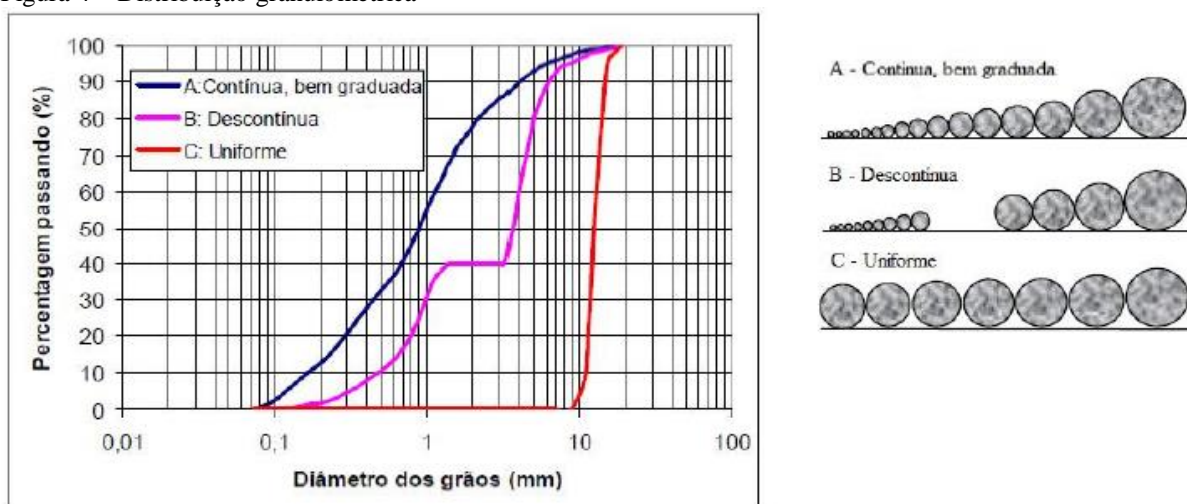
Embora não considerada uma característica, os agregados para serem utilizados na produção do concreto, precisam ser inertes, deste modo eles não devem reagir com os demais constituintes, principalmente com os álcalis presentes no cimento, visto que, se isso ocorrer, pode se ter a reação álcali-agregado. Logo, outra característica que também deve ser investigada é a reatividade do agregado (PETRY, 2015).

3.4.2.1 Composição granulometria

Segundo Bauer (2013), o agregado é composto por mistura de grãos de extensa gama de tamanhos. Se um determinado agregado é retido em peneira de abertura a, e passa na peneira de abertura de dimensão b, pode ser denominado agregado a/b. Logo, esta relação denomina-se graduação do agregado, recebendo as dimensões a e b o nome genérico de diâmetro.

Segundo Farias (2007), o traçado da curva granulométrica permite ainda que se analise a distribuição das partículas. Quanto mais bem graduado o agregado, ou seja, quando existem partículas de tamanhos variados de modo que os vazios sejam reduzidos, melhores serão os concretos e as argamassas produzidos, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Distribuição granulométrica



Fonte: Farias e Palmeira (2007)

Além da curva granulométrica é possível determinar a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF). A dimensão máxima característica é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, que corresponde a abertura da peneira, em milímetros, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada, igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura também é uma grandeza obtida a partir da distribuição granulométrica, que é definido com a soma das porcentagens retidas, acumuladas, em massa de um agregado, nas peneiras da série normal dividido por 100 (FRAZÃO E. B., 2002).

Segundo Ribeiro (2013), o valor do módulo de finura pode definir o tipo de agregado miúdo, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação das areias quanto ao módulo de finura

Tipos	Módulo de Finura – MF	Utilização
Areia grossa	MF > 3,3	Concreto e chapisco
Areia média	2,4 ≤ MF ≤ 3,3	Emboço e concreto
Areia fina	MF < 2,4	Reboco

Fonte: Ribeiro (2013)

Ainda segundo Ribeiro (2013), o tipo de agregados graúdo pode ser nomeado comercialmente de acordo com determinadas faixas de peneiras, mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação das britas quanto à dimensão dos grãos

Classificação	Peneiras Normalizadas	Utilização
Brita 0	4,8 – 9,5 mm	Concreto Convencional
Brita 1	9,5 – 19,0 mm	

(Continua)

Continuação Tabela 5 - Classificação das britas quanto à dimensão dos grãos

Brita 2	19,0 – 25,0 mm	Concreto Convencional
Brita 3	25,0 – 38,0 mm	Concreto massa
Brita 4	38,0 – 64,0 mm	
Pedra mão	>76 mm	Fundação

Fonte: Ribeiro (2013)

3.4.2.2 Absorção de água e Inchamento

A absorção de água representa, segundo Frazão (2002), a capacidade de absorção e retenção de líquidos da rocha, que é uma importante propriedade da rocha. A absorção sempre é estipulada para o grau de saturação dos poros pelo líquido, portanto, o máximo de teor de umidade alcançável pela rocha. As propriedades das rochas são extremamente influenciadas pelo grau de absorção d'água, quanto maior absorção maior será a massa específica aparente saturada e maior será condutividade térmica, porém sua resistência mecânica diminui, devido ao enfraquecimento das ligações intergranulares.

Os vazios do agregado miúdo podem-se encontrar parcial ou totalmente cheios de água. Se parcialmente cheios, o agregado denomina-se úmido; se totalmente cheios, o agregado denomina-se saturado. Nos agregados miúdos podem possuir os tamanhos dos vazios da ordem, ou até menores, que a espessura de película da água de absorção; água adere às superfícies dos grãos. Por isso, o agregado pode ter seus grãos afastados uns dos outros pela película de água. É o fenômeno do inchamento. Segundo Ribeiro (2013) o fenômeno de inchamento deve ser considerado para que não haja deficiência de areia no concreto, uma vez que esse fenômeno pode alterar a quantidade de água e o volume de areia calculados para a confecção do concreto. Nos agregados graúdos, os tamanhos dos vazios são muito maiores que a espessura da película de água, não ocorrendo o inchamento (BAUER, 2013).

3.4.2.3 Forma dos grãos

Segundo Ribeiro (2013), a forma que os agregados possuem podem influenciar nas características do concreto ou argamassa em que são aplicados, principalmente a trabalhabilidade dos mesmos.

A ABNT NBR 7389:2009 define que a avaliação deve ser feita de maneira visual, a olho nu ou com um auxílio de instrumento óptico e classificando os agregados quanto ao grau de

esfericidade (alto ou baixo) e ao grau de arredondamento (ângulo, subanguloso, subarredondado ou arredondado). A Figura 5 orienta como avaliar corretamente os grãos.

Figura 5 - Forma dos agregados, conforme NBR 7389:2009



Fonte: Petry (2015)

3.4.2.4 Resistência à compressão e resistência à abrasão

De acordo com a utilização do agregado deve ser analisado a resistência de compressão, tração, choque ou abrasão do material utilizado. Segundo Bauer (2013) a resistência à tração e choque depende da direção do esforço, relativamente ao veio da pedra, na confecção do concreto esta característica dos agregados não necessita ser levado em consideração. No caso da resistência à compressão os agregados possuem uma resistência muito superior à da argamassa de concreto (BAUER, 2013).

A resistência à abrasão se trata do desgaste superficial sofrido no agregado graúdo, deve ser levado em conta em alguns casos, ele deve ser avaliado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva. A resistência à abrasão mede a capacidade o agregado tem de não se alterar quando manuseado no carregamento, basculamento, estocagem (RIBEIRO, 2013). A destruição da estrutura do material se processa pelo rompimento dos grãos, sendo que o agregado mais duro é mais resistente ao desgaste. Segundo a ABNT NBR 7211:2009, a abrasão “Los Angeles” deverá ser inferior a 50%, em peso, do material.

3.4.2.5 Índices de sulfatos

A participação de sulfato em quantidades suficientes, ou quando em ambientes saturados e úmidos, sulfatos podem reagir com componentes do cimento resultando em uma expansão excessiva, culminando com a ruptura do concreto. O sulfato pode também ter origem interna. A fonte de sulfato pode estar no clínquer, devido as várias formas de adição sulfato de cálcio (SKALNY *et al.*, 2002).

No caso de agregados contendo sulfetos, geralmente na forma de pirita (FeS_2), quando sofrem oxidação podem liberar íons sulfato, caracterizando o ataque de dentro para fora. Ou podem ocorrer de maneira externa que entre os vários sais que possuem efeito deletério ao concreto está o sulfato, que pode ser encontrado em águas naturais, no solo, no mar, chuvas ácidas, águas de pântanos, efluentes industriais, esgotos, entre outros, e é considerado um dos mais deteriorantes agentes da estrutura de concreto (COSTA, 2004).

3.4.2.6 Reatividade dos agregados

A reatividade é a característica que alguns minerais de uma rocha apresentam ao reagir com certas substâncias da pasta de cimento. Há diversos tipos de reação passíveis de acontecer entre o agregado e o cimento. As reações que prejudicam ao concreto são basicamente denominadas de reações álcali-agregado, que dos tipos mais frequentes são: reação álcali-sílica; reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato (FRAZÃO E. B., 2002).

Segundo Ribeiro (2013), o tipo mais comum de reação álcali-agregado é a reação entre os hidróxidos originados dos álcalis (Na_2O e K_2O) do cimento e alguns minerais silicosos do agregado. Esta reação pode provocar a expansões, fissurações e outras manifestações prejudiciais às estruturas de concreto.

3.4.3 Parâmetros de qualidades dos agregados

Os agregados ainda devem satisfazer alguns limites e especificações, em relação as características físicas e mecânicas, conforme a Tabela 6. Estes limites segundo Verhoef e Van de Wall (1998 apud GOMES, 2000), encontrados através de parâmetros comparativos de resultados de ensaios laboratoriais para avaliar a qualidade do agregado.

Tabela 6 - Avaliação da qualidade do agregado

Ensaio	Excelente	Bom	Razoável	Ruim
Massa específica seca (g/cm ³)	>2,9	2,6- 2,9	2,3 – 2,6	<2,3
Absorção d'água (%)	<0,5	0,5 – 2,0	2,0 – 6,0	>6,0
Porosidade (%)	<2,0	2 – 3	3 – 4	>4
Sanidade MgSO ₄	<2,0	2 – 12	12 – 30	>30
Congelamento e degelo (%)	<0,1	0,1 – 0,5	0,5 – 2,0	>2,0
Res. a compressão simples (MPa)	>200	100-200	50-100	<50
Res. à carga pontual (MPa)	>8,0	4,0-8,0	1,5-4,0	<1,5
Res. ao esmagamento (%)	<20,0	20-25	25-30	>30
Res. a abrasão “Los Angeles” (%)	<40,0	40-45	45-50	>50

Fonte: Verhoef e Van De Wall (1998 apud Gomes, 2000)

Já na Tabela 7 Frazão e Paraguassu (1998) definem os parâmetros de avaliação segundo a norma ABNT NBR 7211:2009– Agregados para concreto – Especificações.

Tabela 7 – Ensaios e especificações para agregado graúdos

Ensaios	Agregados para concreto NBR 7211
Abrasão Los Angeles	Máx. 50%
Esmagamento	Máx. 30%
Massa específica	n. e.
Porosidade	n.e.
Absorção de água	n.e.
Índice de forma	Máx. 3
Material pulverulento	Máx. 1 %
Torrões de argila	Máx. 3%
Fragmento macios e friáveis	Máx. 3%
Granulometria	Ver norma
Compressão uniaxial	n.e.
Análise petrográfica	n.e.
Apreciação petrográficas	n.e.
*n.e. = não especificado	

Fonte: Frazão e Paraguassu (1998)

3.5 Concreto de cimento Portland branco

Atualmente a execução de concreto aparentes usando cimento Portland branco, com ou sem pigmento, surge como uma proposta atraente e moderna, que fornece novas possibilidades arquitetônicas, expandindo a aceitação do concreto como elemento de composição estética. A utilização dos concretos brancos ou pigmentados não é novidade, o cimento Portland branco tem sido muito empregado na confecção de peças, normalmente não estruturais, como, por exemplo peças pré-fabricadas de concreto, painéis de fechamento, elementos de pavimentação e argamassas de revestimento (KIRCHHEIM *et al.*,2011)

De maneira geral Nero e Nunes (1999), descrevem que a prescrição ou adoção de concreto branco usualmente está associado a três objetivos principais:

- Satisfação de um sentido plástico ou estético;
- Eliminação de revestimento;
- Garantia de durabilidade;

Ainda que estes parâmetros possam ser considerados características fundamentais de um concreto aparente de boa qualidade, a experiência internacional revela que o seu atendimento só se torna possível através da implantação de um sistema de controle de execução bastante qualificado, para que seja considerado uma diversificação de fatores na execução (PASSUELO, 2004).

A qualidade de um concreto, segundo Petrucci (1987), dependerá das características dos materiais envolvidos na produção e do controle da sua execução. Para que um concreto apresente uma boa qualidade tanto no estado fresco e no estado endurecido dependerá, portanto, principalmente de seus materiais constituintes e do emprego de técnicas adequadas para a mistura, compactação e cura.

Segundo a *Potland Cement Association* (2005), as misturas de concreto branco, devem ser considerados os efeitos de todos os componentes na composição da cor final. Entre os fatores que podem modificar a cor podem ser mencionados o tipo e cor do cimento; o tipo e dosagem do pigmento; tipo, graduação, cor e limpeza dos agregados graúdos e miúdos e tipo e dosagem de adições (PASSUELO, 2004).

3.5.1 Aplicabilidade

Kirchhheim (2003, p. 22) diz que “além de proporcionar uma diferencial frente sua beleza no projeto arquitetônico, o concreto branco possui vantagens frente à refletância da radiação solar”. Devido a essas vantagens, a autora afirma que o concreto branco tem sido

experimentado e utilizado em obras de alguns países, inclusive do Brasil (DELLINGHAUSEN, 2009).

No caso do Brasil, no ano de 2000, em Sorocaba, no Estado de São Paulo, foi executada a primeira edificação usando painéis pré-moldados de concreto branco, mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Vista do Edifício Flexotronics e detalhes das fachadas, em Sorocaba, SP.



Fonte: Arcoweb (2002)

Dois anos depois, na cidade de São Paulo, foi executado um condomínio totalmente em concreto de cimento branco, visto na Figura 7. Essa obra apresentou um diferencial executivo interessante pela exposição do agregado branco por meio da técnica de jato de areia, alterando, desta forma, o resultado estético da superfície (KIRCHHEIM *et al.*,2011).

Figura 7 – Fase de construção, Vista Aérea e Fachada do Condomínio Panamerica Park, em São Paulo, SP.



Fonte: Adarquitectura (2001)

Segundo Kirchheim *et al* (2011) a obra do Museu Iberê Camargo, localizado na cidade de Porto Alegre, inaugurado no ano de 2008, se destaca de todas as obras realizadas em concreto branco até o momento no Brasil. Onde no projeto do museu, de autoria do arquiteto português Álvaro Siza, evidência o uso estético do concreto branco, como mostra a Figura 8. A obra foi marcada por um considerável investimento no desenvolvimento de uma tecnologia de aplicação adequada a esse novo material. Essa obra serviu como um estudo de caso, onde forneceu grande parte dos dados disponíveis hoje, no país, sobre esse tipo de material (KIRCHHEIM *et al.*,2011).

Figura 8 – Vista do Museu Iberê Camargo, detalhe da fachada e vista interior, em Porto Alegre SC.



Fonte: (ARCHDAILY, Fundação Iberê Camargo / Alvaro Siza, 2011)

No anexo A é possível ver uma série de imagens que ilustra outros exemplos da utilização corrente do concreto branco em obras de diversos lugares, como, por exemplo, Portugal, Estados Unidos, Espanha e entre outros. Analisando esse conjunto, pode-se verificar que as aplicações desse material são bastante variados e que todas as obras construídas são marcadas por um apelo estético muito grande.

3.5.2 Principais materiais constituintes no concreto branco

3.5.2.1 Cimento Portland branco

O cimento Portland branco é um cimento que se diferencia dos outros tipos de cimento devido a sua coloração. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês e por condições especiais durante a sua fabricação, especialmente na questão do resfriamento e à moagem do produto (ABCP, 2002).

No Brasil, o cimento Portland branco é regulamentado pela norma ABNT NBR 16697:2018, sendo classificado em dois subtipos: cimento Portland branco e cimento Portland branco não estrutural, que define os limites de componentes e exigências químicas do cimento Portland branco, conforme mostrando na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites de composição dos cimentos Portland branco

Tipo de Cimento Portland	Limite de componentes (% em massa)		Limite químico (% em massa)				
	Clínquer branco + gesso	Material carbonático	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)	Anidrido carbônico (CO ₂)
CPB estrutural	75-100	0-25	≤3,5	≤12,0	≤6,5	≤4,5	≤12,0
CPB não estrutural	74-50	26-50	≤7,0	≤27,0	≤10,0	≤4,5	≤27,0

Fonte: ABNT NBR16697:2018

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento Portland branco estrutural é usado em concretos brancos para fins arquitetônicos, possuindo as classes de resistência 25, 32 e 40 MPa, parecido às dos outros tipos de cimentos existente no mercado. O cimento Portland branco não estrutural não tem indicação de classe e é aplicado em rejuntamento de azulejos e na fabricação de ladrilhos hidráulicos, ou seja, em aplicações sem finalidade estrutural, sendo esse aspecto ressaltado na sacaria para evitar uso indevido por parte do consumidor. As diferenças dos requisitos físicos e mecânicos, para o cimento Portland estrutural e não estrutural pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Requisitos físicos e mecânicos

Sigla	Classe	Finura Resíduo na peneira 75 μ m	Tempo de início de pega (min)	Expansibilid ade a quente (mm)	Resistência a compressão (MPa)			Índice de brancura \geq
					3 dias	7 dias	28 dias	
CPB estrutural	25	≤ 12	≥ 60	≤ 5	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	≥ 78
	32	≤ 12	≥ 60	≤ 5	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	
	40	≤ 12	≥ 60	≤ 5	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$	
CPB não estrutural	-	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	$\geq 5,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$	≥ 82

Fonte: ABNT NBR16697:2018

3.5.2.2 Agregados

Os agregados têm, segundo Bauer (2013) tem a função de enchimento do concreto, que podem ocupar de 80% do seu peso e 20% do custo, exercendo influência sobre a estabilidade dimensional, durabilidade, resistência. Também tem papel relevante na determinação do custo e trabalhabilidade das misturas.

No concreto branco, os agregados miúdos têm grande influência na cor final. Estas granulometrias acabam agindo como um corante, pintando a mistura de concreto com sua cor característica. A fração miúda tem uma atuação determinante na coloração final do concreto e recomendado que se tenha atenção especial com a regularidade e limpeza destes agregados (KIRCHHEIM A. P., 2003).

De acordo com Fonseca e Nunes (1998), o agregado graúdo tem uma atuação menos relevante, pois normalmente não é visível na superfície do concreto e tem pouco influência sobre a cor. Logo, teoricamente, poderia utilizar o uso de agregados graúdos com cores mais escuras. Porém, o mesmo autor ressalta que a tonalidade destes materiais tem de ser considerada

ao se dimensionar o teor de argamassa do concreto, pois a tonalidade final da superfície poderá ser prejudicada com sombreados devido ao uso do agregado graúdo com cores fortes. A opção por agregados mais claros acaba facilitando o controle da aparência superficial de estruturas em concreto branco.

3.5.3 Propriedades mecânicas do concreto branco

Aos se tratar das propriedades mecânicas, diversos pesquisadores (HAMD, 1995; KATZ, 2002; BENITEZ *et al*, 2003 entre outros) concluem que o concreto branco com o cimento Portland estrutural resultados de resistência mecânica similar e até superiores aos encontrados em concretos e argamassas com cimento cinza, nas mesmas situações de dosagem (KIRCHHEIM A. P., 2003).

Benitez *et al.* (2002), realizaram estudos com concreto de cimento branco e cinza que corresponde ao CPV-ARI de igual categoria, em dosagem de alto desempenho, fixando o consumo de cimento em $410 \pm 4 \text{ kg / m}^3$ e abatimento de $18 \pm 2 \text{ cm}$, obtendo relação a/c de 0,35 e 0,40 para o concreto de cimento branco e cinza, respectivamente. Os valores de resistência à compressão podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 – Resistência à compressão de concretos moldados com cimento brancos e cinza (CPV-ARI)

Resistência à compressão (Mpa)	Idade	Norma IRAM	Concreto com cimento branco	Concreto com cimento cinza
	3 dias	1546	$45,4 \pm 0,1$	$37,7 \pm 0,6$
	7 dias		$56,0 \pm 1,2$	$47,9 \pm 0,6$
	28 dias		$60,0 \pm 3,9$	$53,4 \pm 2,7$

Fonte: Benitez *et al.* (2002)

De acordo com os autores, estes valores de resistência poderiam ser considerados comparáveis em função da diferença obtida na relação água/cimento, já que esta variou em virtude da fixação do abatimento.

E Katz (2002) fixou o valor de água/cimento (0,55) quando comparou concretos com emprego de cimento cinza e de cimento branco. O referido autor obteve resultados significativamente maiores para os concretos moldados com cimento branco. Os valores de resistência mecânica encontrados podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas de concretos moldados com cimento branco e cinza

	Idade	Concreto com cimento branco	Concreto com cimento cinza
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	36,8	21,6
	28 dias	42,1	34,6
	90 dias	58,9	-
Resistência à Flexão (MPa)		6,7	6,1
Resistência ao cisalhamento (MPa)		5,0	3,3
Módulo de elasticidade (GPa)		23,1	22,7

Fonte: Katz (2002)

Para os valores das propriedades mecânicas avaliadas por Katz (2002) o módulo de elasticidade, resistência ao cisalhamento, resistência à flexão, os concretos moldados com cimento branco obtiveram valores superiores que os moldados a partir do cimento cinza.

Para Kirchheim (2003) existe um número razoável de trabalhos que avaliaram a resistência à compressão de concretos de cimento Portland branco, porém para outras propriedades mecânicas, como, por exemplo, módulo de elasticidade, resistência ao cisalhamento, resistência à flexão e etc, existindo lacunas referentes à caracterização das propriedades mecânicas deste tipo de cimento.

3.5.4 Durabilidade

Segundo Isaia (2011) a durabilidade conceitua-se como o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Logo, não é uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto. Uma mesma estrutura pode ter variados comportamentos, ou seja, diferentes funções de durabilidade no tempo, segundo suas diversas partes, até dependente da forma de utilizá-la. Desse modo, conforme Rougeau e Guiraud (2014), a durabilidade do concreto pode ser definida como a sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão, instabilidade volumétrica, reação álcali-agregado, dentre outros

Um dos tipos de degradação do concreto pouco estudo atualmente é a reação álcali-agregado, e mais ainda se tratando na produção de concreto a partir de cimento Portland branco com quartzitos. E por esse motivo esse mecanismo será maior aprofundado nos subitens que seguem.

3.5.4.1 Reação álcali-agregado (RAA)

Segundo Hasparyk (2011), a reação álcali-agregado (RAA) é nome que se dá a algumas reações químicas que ocorrem internamente ao concreto e que envolve minerais reativos presentes nas rochas usadas como agregado em concretos e álcalis da solução dos poros, presentes nos cimentos.

Conforme a ABNT NBR 15577-1:2018, a RAA é dividida em dois tipos: reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC), pois considera a reação álcali-silicato como um tipo específico de RAS. A definição dada a cada tipo de RAA pela norma é:

Reação álcali-carbonato (RAC): reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, e certos agregados calcários dolomíticos argilosos que sob certas condições pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa.

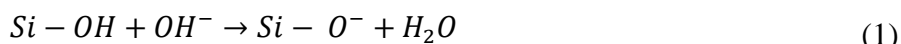
Reação álcali-sílica (RAS): reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland ou outras fontes com certas rochas silicosas ou minerais silicosos, como opalas, cherts, quartzo microcristalino, quartzo deformado, vidro vulcânico, vidros reciclados, e outras, presentes em alguns agregados, que gera, como produto da reação, gel álcali-sílica, que pode causar expansão anormal e fissuração do concreto em serviço.

Reação álcali-silicato é reconhecida atualmente como um tipo lento de reação álcali-sílica.

Segundo Neville (2016), na RAA a reação química que ocorre é do tipo ácido-base, ou seja, um ácido e uma base reagem para a formação de um sal e liberação de água. A RAA começa com o ataque realizado pelos hidróxidos alcalinos da água de poros (derivados do Na_2O e do K_2O) aos materiais silicosos dos agregados. O resultado dessa reação é o desenvolvimento de um gel álcali-silicato (Si-ONa) nos poros dos agregados ou nas faces das partículas. Quando a formação do gel se dá na superfície das partículas, a aderência entre o agregado e a pasta de cimento fica frágil.

De acordo com Gomes e Barreto (2013), um dos fatores essenciais para o desenvolvimento da RAA é a umidade interna e a umidade externa de tal modo que a reação química pode formar um gel higroscópico que na presença da umidade pode causar expansão e consequente fissuração e até trincas no concreto, comprometendo sua estabilidade, sua capacidade portante e a sua durabilidade.

A reação de forma simplificada, funciona da seguinte maneira, primeira fase do RAA, o grupo silanol (Si-OH), presente na superfície da sílica, é atacado pelos íons hidroxilas (OH^-), liberando água Equação (1). Os cátions presentes no concreto (representados pelo Na^+ na Equação (2) são associados ao grupo silanol, formando um gel sílico-alcalino (Si-ONa) (NEVILLE, 2016).



Os álcalis segundo a ABNT são definidos como sais sódio e/ou potássio, provenientes qualquer fonte interna ou externa ao concreto, que, quando em contato com água são solubilizáveis imediatamente ou ao longo do tempo. Uma forma de controlar os álcalis do cimento é adotar o “Na₂O equivalente”, ou abreviando, Na₂O_{eq}, que de acordo com o ACI Commitee 221 (1998), o Na₂O_{eq} é muito útil na prevenção da RAA e pode ser calculado pela Equação 3.

$$Na_2O_{eq} = (\%Na_2O) + 0,658x(\%K_2O) \quad (3)$$

ACI Commitee 221 (1998) descreve que cimentos com limite de 0,60% para o Na₂O_{eq} (cimentos com baixa alcalinidade) podem ser utilizados para minimizar a deterioração do concreto quando agregados reativos são usados, porém, comenta que excessivas expansões já ocorrem com cimentos contendo 0,58% de Na₂O_{eq}.

E no caso de um material tenha reatividade, a redução dos efeitos da reação álcali-agregado é estabelecida através da norma ABNT NBR 15577-1. No qual estabelece critérios de mitigação através de classificações dos materiais, de valores obtidos em ensaio. A primeira classificação que é necessária é referente ao tipo de estrutura, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Classificação da estrutura

Classificação da estrutura	Consequências da RAS	Exemplos
Classe A	Consequências pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.	Estruturas temporárias (menor que 5 anos de vida útil) elementos não estruturas no interior de edifícios, canteiros de obras.
Classe B	Consequências moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança apenas se ocorrer deterioração generalizada.	Calçadas, calhas, telhas, muros, etc.
Classe C	Consequências significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Pavimentos de concreto, elementos de fundação, tubos, postes, alvenarias de vedação, tubulões, barreiras de segurança, elementos pré-fabricados com altos custos de reposição, estradas de baixo volume de tráfego, dormentes etc.
Classe D	Consequências sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Grandes pontes estádios, hidrelétricas, estruturas de obras de arte, barragens, instalações nucleares, torres eólicas, instalações de tratamento de água, instalações de tratamento de resíduos, túneis, elementos estruturais de difícil inspeção ou reparo.

Fonte: ABNT NBR 1557-1:2018

E o com o ensaio estabelecido na ABNT NBR 15577-4 através do método “acelerado” define-se a porcentagem da expansão das barras de argamassa. Com esse valor de expansão em 30 dias classifica o grau de reatividade do agregado, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Classificação do grau de reatividade do agregado

Classificação da reatividade potencial do agregado ^c	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias ^a	Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias ^b
	%	%
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19 %	Menor que 0,04 %
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19 a 0,40 %	Entre 0,04 e 0,12 %
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41 a 0,60%	Entre 0,13 e 0,24 %
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60%	Maior que 0,24%

^a Valores com base na experiência brasileira

^b Valores extraídos da ASTM C 1778-16

^c Até o momento de edição desta Norma, não se dispunha de dados estatísticos suficiente para classificar o grau de reatividade do agregado segundo o método acelerado de prismas de concreto previsto na ABNT NBR 15577-7.

Fonte: ABNT NBR 1557-1:2018

Definido o grau de reatividade do agregado define-se o grau de risco de ocorrência de acordo com o tipo de estrutura e com a classe de reatividade do agregado. Este grau pode ser determinado através da Tabela 14.

Tabela 14 – Grau de risco de ocorrência da RAS

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco ^a	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Maciço ^b em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas, expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito alto
Todas as estruturas em contato com álcalis ^c em condições de serviço	Desprezível	Alto	Muito alto	Muito alto

^a Ambiente seco corresponde ao ambiente com umidade relativa do ar menor que 60%, geralmente encontrado nos interiores das edificações

^b Elemento maciço é aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1m.

^c Exemplos de estruturas expostas a álcalis em serviço incluem estruturas em contato com a água do mar, solos contaminados, lençóis freáticos sais alcalinos, entre outros.

Fonte: ABNT NBR 1557-1:2018

Definido o grau de risco de ocorrência define-se o grau de intensidade da medida preventiva de acordo com a classe de estrutura e com o grau de risco de ocorrência. Este grau de intensidade pode ser determinado através da Tabela 15.

Tabela 15 – Grau de intensidade da medida preventiva

Risco de ocorrência	Classe de estrutura			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Desprezível	MP 0	MP 0	MP 0	MP 0
Mínimo	MP 0	MP 0	MP 1	MP 2
Moderado	MP 0	MP 1	MP 2	MP 3

(Continua)

Continuação Tabela 15 – Grau de intensidade da medida preventiva

Alto	MP 0	MP 3	MP 4	MP 4
Muito Alto	MP 0	MP 4	MP 4	MP 4

Fonte: ABNT NBR 1557-1:2018

E por fim, define-se medida de mitigação da expansão indica de acordo com o grau de intensidade da medida preventiva, onde a Tabela 16 da norma descreve três opções para a mitigação da expansão. Além das maneiras citadas, muitos estudos têm demonstrado que a reação álcali-agregado (RAA) pode ser controlada usando compostos de lítio. No qual estes estudos demonstram que vários sais de lítio podem reduzir a expansão quando usados em quantidades suficientes (GOMES E BARRETO, 2013).

Tabela 16 – Medidas de mitigação da expansão devida a RAS

Grau de intensidade da medida preventiva	Opção 1	Opção 2	Opção 3
MP 0		Nenhuma ação é necessária	
MP 1	Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m ³ de Na ₂ O equivalente	Utilizar cimentos: <ul style="list-style-type: none"> • CP II-E ou CP II-Z, conforme a ABNT NBR 11578, ou • CP III, conforme a ABNT NBR 11578, ou • CP IV, conforme ABNT NBR 5736 	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 2.
MP 2	Utilizar cimento CP III, com no mínimo 60 % de escória, conforme ABNT NBR 5735	Utilizar cimento CP IV com no mínimo 30% de pozolana, conforme ABNT NBR 5736.	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 3.
MP 3	Utilizar materiais inibidores comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio acelerado.	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio de prismas de concreto aos dois anos.	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 4.
MP 4	Utilizar materiais inibidores comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio acelerado.	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio de prismas de concreto aos dois anos.	Trocar o agregado.

Fonte: ABNT NBR 1557-1:2018

3.5.5 Dosagem do concreto branco

O processo de elaboração do concreto inicia-se pela dosagem do concreto que, segundo Recena (2011), consiste no processo de escolha dos materiais disponíveis com preços adequados, determinando a proporção entre os materiais: cimento, agregado miúdo, agregado

gráudo, água, aditivos e adições, para obter um concreto com certas características mínimas, especialmente a consistência e a resistência e a durabilidade.

Ainda de acordo com a Recena (2011) existe uma grande quantidade de métodos de dosagem, que são divididos em métodos empíricos e métodos experimentais. Os empíricos são aqueles realizados sem ensaiar os materiais, usando de maneira arbitrárias, experiências anteriores e tradições, tal método só é permitido em obras de pequeno vulto. Já o método experimental é utilizado em laboratório, onde os componentes e a mistura ideal são encontradas a partir de ensaios.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos experimentais realizados nesta pesquisa seguiram os procedimentos estabelecidos pelas normas da construção civil, e seguiram as seguintes etapas: caracterização do agregado graúdo; caracterização do agregado miúdo; caracterização do cimento; estudo de dosagem do concreto; a produção do concreto branco e os ensaios de resistência e de durabilidade do concreto.

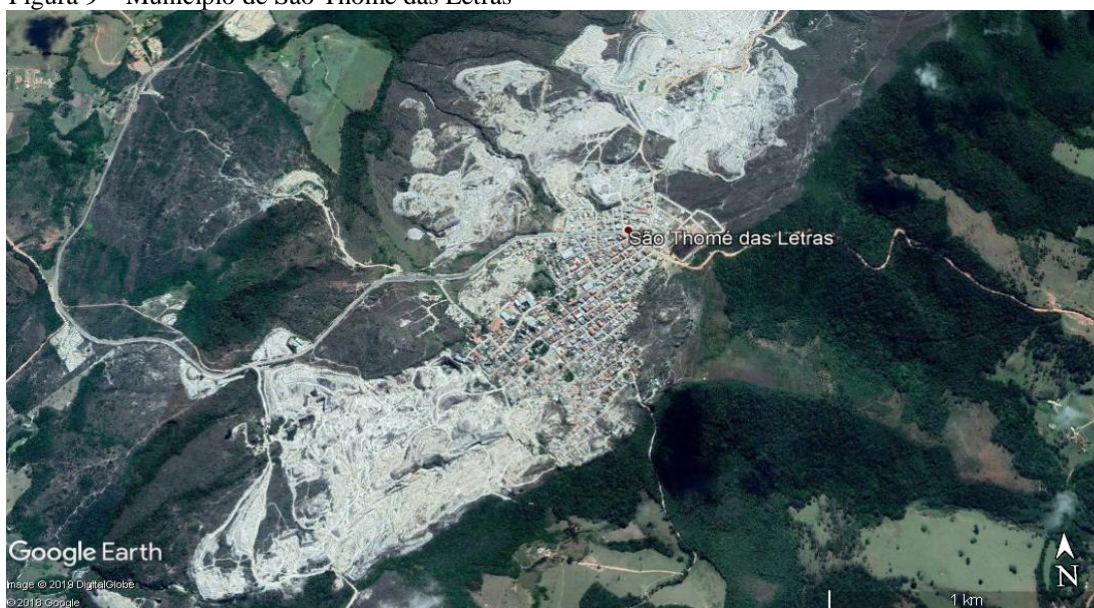
4.1 Estudos de caracterização dos agregados

4.1.1 Preparação das amostras

4.1.1.1 Local de estudo

Os materiais utilizados como agregados na confecção do concreto branco foram do município de São Thomé das Letras, mostrado na Figura 9, localizado no sul de Minas Gerais, onde possui a produção de quartzito, comumente utilizado como revestimentos na construção civil. Os materiais para a produção dos concretos foram disponibilizados pela empresa Siox - Tecnologia e reciclagem de minério.

Figura 9 – Município de São Thomé das Letras



Fonte: Google Earth (2019)

A extração de quartzito em São Thomé das Letras é realizada com lavra a céu aberto, como pode ser visto na Figura 10a, em bancadas, de maneira direta, visto na Figura 10b. No

qual, segundo Frazão *et al* (2014), a obtenção de placas diretamente do maciço é feita de modo mais artesanal, aproveitando-se planos de fraqueza naturais de rochas estratificados.

Figura 10 – Extração de quartzito em São Thomé das Letras

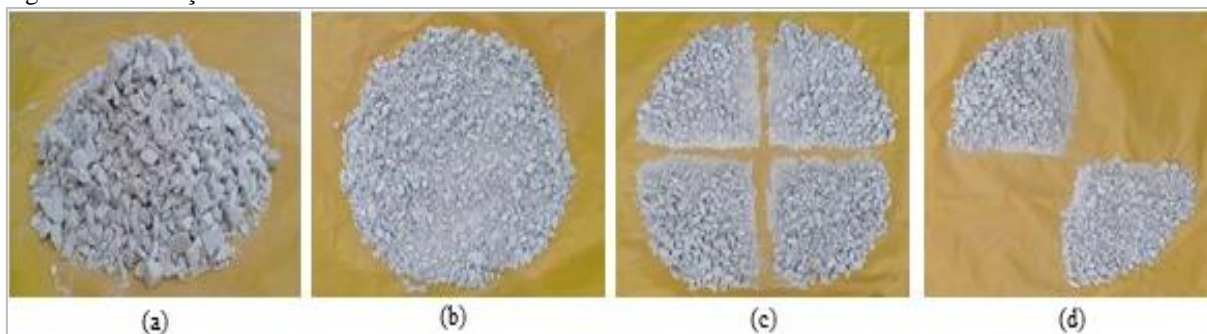


Fonte: Autor (2019)

4.1.1.2 Redução da amostra (ABNT NBR NM 27:2001)

Para realização dos ensaios em laboratório foi necessário a redução do material de campo, a norma que define requisitos de redução de amostragem é a ABNT NBR NM 27:2001. O procedimento se deu da seguinte maneira: o material foi colocado em uma superfície rígida, limpa e plana; homogeneizada por 3 vezes, e na última virada juntou o material em formato de cone, como mostra a Figura 11a; depois achatou-o cuidadosamente, como mostra a Figura 11b; dividiu-o em quatro partes iguais, como mostra a Figura 11c; eliminou duas partes, como mostra a Figura 11d; e por fim agrupou as duas restantes, em sentido diagonal, e repetir essa operação até reduzir a amostra.

Figura 11 - Redução da amostra



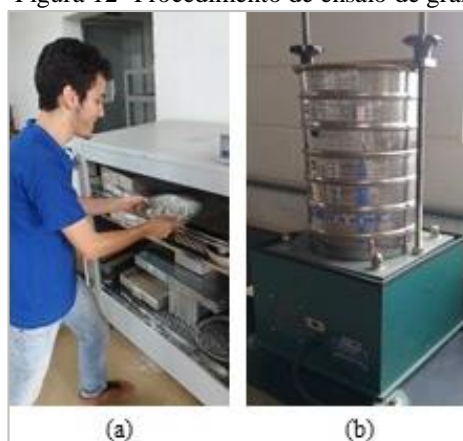
Fonte: Autor (2019)

4.1.2 Ensaios para agregado graúdo e agregado miúdo

4.1.2.1 Granulometria (ABNT NBR NM 248:2003)

Para determinação da granulometria foi realizado o ensaio de acordo com os procedimentos descritos na ABNT NBR NM 248:2003. Para obter a amostra utilizada no ensaio foi utilizado os procedimentos de redução de amostra conforme a ABNT NM 27:2001 e depois de reduzida foi colocado na estufa até massa constante, como mostra a Figura 12a. Os ensaios foram realizados no vibrador mecânico conforme pode ser visto na Figura 12b.

Figura 12 -Procedimento de ensaio de granulometria



Fonte: Autor (2019)

Foram realizados dois ensaios, um ensaio para o agregado graúdo com amostra de 500g, para as peneiras de 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,75mm. E outro ensaio para o agregado miúdo com 300g, com as peneiras de 4,75mm, 2,36 mm, 1,18mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm .

O resultado do ensaio de granulometria deve estar dentro das proporções exigido pela norma ABNT NBR 7211:2009 que pode ser visto no apêndice A.

Além de determinar as proporções entre a peneiras com esse ensaio é foi determinado o diâmetro máximo característico (DMC) e o módulo de finura dos materiais ensaiados. Segundo ABNT NBR NM 248:2003, o diâmetro máximo característico é definido como a grandeza referente a malha da peneira da série normal ou intermediário, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. E a mesma norma define que o módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal, dividido por 100.

4.1.2.2 Massa unitária e índice de vazios (ABNT NBR NM 45:2003)

Para a determinação dos valores de massa unitária e de índice de vazios dos agregados graúdo e agregado miúdo seguiu-se os procedimentos definidos pela ABNT NBR NM 45:2003. No ensaio foi utilizado o recipiente cilíndrico com o volume de 10 dm³, conforme a Figura 13. Foi realizada a pesagem da amostra e recipiente para determinar m_{af} e depois a pesagem somente do recipiente para determinar o m_r .

Figura 13 - Recipiente com as amostras



Fonte: Autor (2019)

Determinados os valores de massa e volume foram aplicados na Equação 4 e Equação 5, mostrado abaixo, e obtidos os parâmetros de massa unitária e índice de vazios.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{af} - m_r}{V} \quad (4)$$

Onde ρ_{ap} = é a massa unitária do agregado (kg/m³);

m_{af} = é a massa do recipiente mais o agregado (kg);

m_r = é a massa do recipiente vazio (kg);

V = é volume do recipiente (m³).

Determinado o valor de massa unitária foi aplicado na Equação 5, mostrado abaixo, e obtidos o parâmetro de índice de vazios.

$$E_v = \frac{100[(d_1 \cdot \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \cdot \rho_w} \quad (5)$$

Onde E_v = é o índice de volume de vazios dos agregados (%);

d_1 = é a massa específica relativa do agregado seco, de acordo com as ABNT NBR NM 52 e ABNT NBR NM53;

ρ_{ap} = é a massa unitária média do agregado (kg/m³);

ρ_w = é a massa unitária de água (kg/m³);

4.1.3 Ensaios para agregado graúdo

4.1.3.1 Índice de forma (ABNT NBR 7809:2019)

A partir do índice de forma é possível determinar a qualidade de um agregado graúdo, levando em consideração que o agregado com grãos em formato cúbico é compreendido como a forma ideal para os agregados visto que apresentam resistência elevada (FRAZÃO E. B., 2002).

Os procedimentos para determinar o índice de forma foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7809:2019, no qual utiliza-se o paquímetro para obter as medidas de comprimento (C), como pode ser visto na Figura 1474a, e de espessura (e), como mostrado na Figura 14b, de 200 grãos de agregados graúdos em massa constante.

Figura 14 – Medição por paquímetro



Fonte: Autor (2019)

4.1.3.2 Massa específica seca, aparente e absorção de água (ABNT NBR NM 53:2009)

A massa específica é dada pela relação da massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros permeáveis à água. A massa específica aparente é dada pela relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis à água. Tais propriedades dos agregados são importantes na dosagem de concretos.

Os valores de massa específica, massa aparente e absorção de água do agregado graúdo em estudo foi obtida partir do método estabelecido pela norma ABNT NBR NM 53:2009. No

qual foi reduzido o agregado graúdo conforme a ABNT NBR 27:2001 até a massa de 4000g, conforme a Figura 15a. Em seguida, foi colocado a amostra na estufa até que alcance massa constante e pesado, obtendo-se a massa seca em estufa. Posteriormente, colocou a amostra em um tanque submerso em água por 24 horas, conforme a Figura 15b, para total saturação do agregado. Passado o tempo necessário, o material foi pesado em uma balança hidrostática, obtendo a massa em água, conforme a Figura 15c. E por fim, pesou o material em condição saturada superfície seca, que é massa enxugada como um pano depois de retirada da água.

Figura 15 - Material em ensaio



Fonte: Autor (2019)

Os valores obtidos no ensaio foram aplicados nas equações para determinação das massas. A massa específica seca foi determinada através da Equação 5.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (6)$$

Onde: d = é a massa específica do agregado seco (g/cm^3);

m = é a massa ao ar da amostra seca (g);

m_a = é a massa em água da amostra (g).

Com a Equação 7 determinou a massa específica do agregado em condição saturado superfície seca.

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (7)$$

Onde: d_s = é a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm^3);

m_s = é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a = é a massa em água da amostra (g).

Com a Equação 8 determinou a massa específica aparente do agregado seco.

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (8)$$

Onde: d_a = é a massa específica aparente do agregado seco (g/cm³);

m = é a massa ao ar da amostra seca (g);

m_s = é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a = é a massa em água da amostra (g).

Com a Equação 9 determinou o valor da absorção de água do material.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (9)$$

Onde: A = é a absorção da água (%);

m = é a massa ao ar da amostra seca (g);

m_s = é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

4.1.3.3 Teor de materiais pulverulentos (ABNT NBR NM 46:2003)

O teor de material pulverulento é determinado pela Equação 10 onde os valores são obtidos pelo método de lavagem do agregado. Onde o material mais fino que passa através da peneira de 75 μ m por lavagem pode provocar alterações de porosidade e reduzir a resistência do concreto.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (10)$$

Onde: m = é porcentagem de material fino que passa pela peneira 75 μ m (%);

m_i = é a massa original da amostra seca (g);

m_f = é a massa da amostra seca após a lavagem (g);

Para a obtenção dos valores seguiu o procedimento de lavagem com água mencionado na ABNT NBR NM 46:2003. Primeiramente o material foi colocado na estufa até massa constante; pesado e colocado em um recipiente com água; agitou a amostra vigorosamente para a separação do material mais fino que 75 μ m, passou pelas peneiras 4,75 mm e 75 μ m. A peneira de malha 4,75mm foi para proteção da peneira menos de 75 μ m.

4.1.3.4 Teor de argila em torrões e materiais friáveis (ABNT NBR 7218:2010)

A ABNT NBR 7218:2010 especifica que o teor de argila em torrões e materiais friáveis em agregados deve conter no máximo 1% de substâncias nocivas. Para determinação do teor de argila em torrões o método utilizado é por lavagem do agregado de acordo com a mesma norma e pela Equação 11.

$$m_t = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (11)$$

Onde: m_t = teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)

m_i = é a massa inicial do intervalo granulométrico (g)

m_f = é a massa após peneiramento via úmida (g)

4.1.3.5 Teor de umidade total (ABNT NBR 9939:2012)

O teor de umidade total é definido como o quociente percentual entre a massa total de água do agregado e a sua massa seca. A massa total da água é inclusa: as massas da água da superfície, a dos poros permeáveis e a dos demais vazios do agregado.

Para realização deste ensaio seguiu a ABNT NBR 9939:2012 que especifica um método por secagem para determinação da umidade total. O valor pode ser determinado através da Equação 12.

$$h = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (12)$$

Onde: h = é o teor de umidade total, arredondado ao décimo mais próximo (%);

m_i = é a massa inicial da amostra (g);

m_f = é a massa final da amostra seca (g);

Como estabelece a norma foi pesado uma massa inicial de 4000g devido à dimensão máxima característica ser de 25 mm. Em seguida, foi colocado a amostra na estufa até a massa constante, conforme a Figura 16a, e depois retirado e pesado conforme a Figura 16b.

Figura 16 - Procedimentos do ensaio



Fonte: Autor (2019)

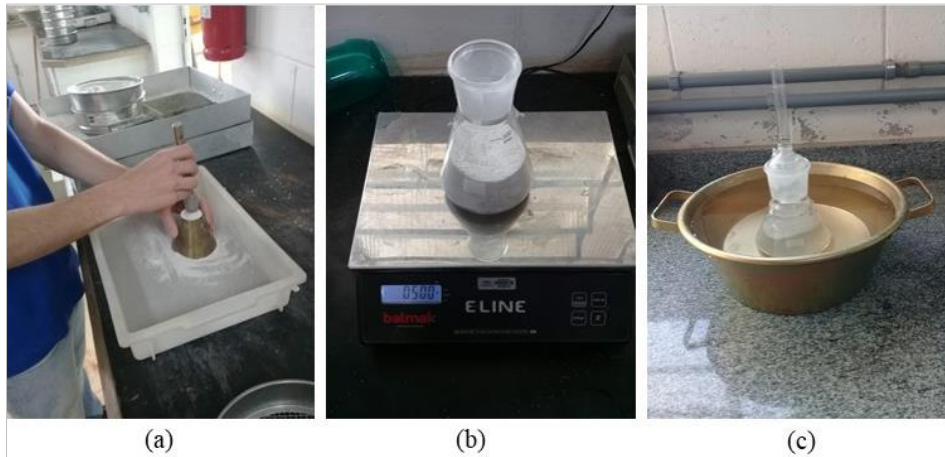
4.1.4 Ensaios para agregado miúdo

4.1.4.1 Massa específica, aparente e absorção de água (ABNT NBR NM 52:2009)

Foi utilizado como referência a ABNT NBR NM 52:2009 para a determinação dos valores de massa específica, massa específica aparente do agregado miúdo. Utilizou 1000g de amostra para realização do ensaio. O material foi coberto de água e deixado de repouso por 24 horas. Depois de tempo do necessário, colocou a amostra em superfície plana para secagem. Depois do tempo necessário verificou-se através do molde de cone se o material estava em estado de saturado com superfície seca, que é quando material desmoronar quando retirado o cone, como mostra a Figura 17a.

Após obtido a condição de superfície seca colocou 500g do material com água no frasco de vidro, como mostra a Figura 17b; deixou-o em repouso em banho mantendo com água por 1 hora, como mostra a Figura 17c; decorrido o tempo necessário completou com água até a marca de 500cm³ e determinou a sua massa. Em seguida o material foi para estufa até massa constante, e depois foi de retirado da estufa e pesado o material.

Figura 17 - Ensaio de NM 52 - Agregado miúdo



Fonte: Autor (2019)

Para determinar a massa específica aparente foi utilizado a Equação 13 com os valores obtidos no ensaio.

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (13)$$

Onde: d_1 = é a massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

m = é a massa da amostra seca em estufa (g);

V = é o volume do frasco (cm^3);

V_a = é o volume de água adiciona ao frasco, de acordo com a Equação 14 (cm^3);

$$V_a = \frac{m_1 - m_2}{\rho_a} \quad (14)$$

Onde: m_1 = é a massa do conjunto (frasco + agregado) (g);

m_2 = é a massa total (frasco + agregado + água) (g);

ρ_a = é a massa específica da água (g/cm^3);

Para determinar a massa específica do agregado superfície seca foi utilizado a Equação 15 com os valores obtidos no ensaio.

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (15)$$

Onde: d_2 = é a massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3);

m_s = é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = é o volume do frasco (cm^3);

V_a = é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a (Equação 14) (cm^3)

Para determinar a massa específica do agregado superfície seca foi utilizado a Equação 16 com os valores obtidos no ensaio.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_s) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (16)$$

Onde: d_3 = é a massa específica do agregado (g/cm³);

m = é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_s = é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = é o volume do frasco (cm³);

V_a = é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a (Equação 14) (cm³)

ρ_a = é a massa específica da água (g/cm³);

4.1.4.2 Absorção de água (ABNT NBR NM 30:2000)

A absorção é o processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Foi utilizado a ABNT NBR NM 30:2000 para determinação do valor de absorção do agregado miúdo que é definida pela Equação 17.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (17)$$

Onde: A = é a absorção da água (%);

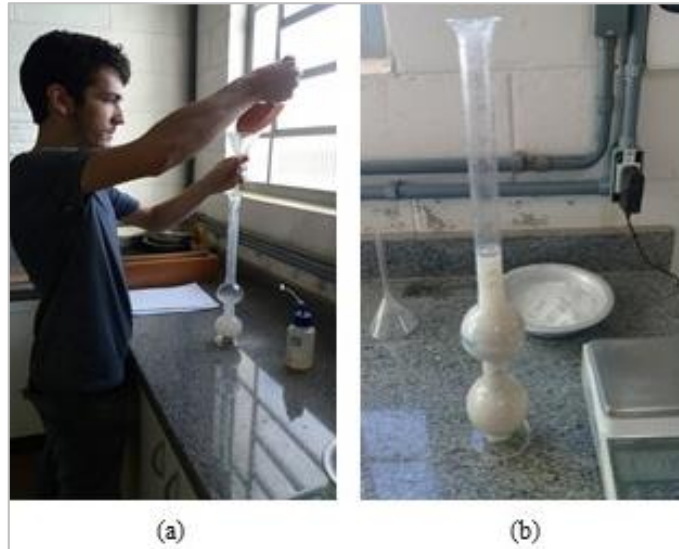
m = é a massa ao ar da amostra seca (g);

m_s = é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g);

4.1.4.3 Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman (ABNT NBR 9775:2012)

O teor de umidade é o quociente percentual entre a massa de água aderente à superfície dos grãos do agregado com a massa do agregado na condição saturada de superfície seca (SSS). Foi utilizado a ABNT NBR 9775:2011 que determina os procedimentos de determinação do teor de umidade superficial em agregado miúdo pelo frasco de Chapman, como é mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Ensaio do teor de umidade superficial



Fonte: Autor (2019)

O valor do teor de umidade superficial é determinado pela Equação 18 a que tem como variável principal o volume (200ml de água e 500g de agregado) obtido no frasco de Chapman. A água foi colocada até a marca de 200ml, como mostra a Figura 18a; depois colocou o agregado; homogeneizou os materiais; deixou de repouso por 45 segundo e anotou o valor obtido no frasco.

$$h = \frac{[(v - 200) \times \gamma] - 500}{(v - 700) \times \gamma} \times 100 \quad (18)$$

Onde: h = é o teor de umidade superficial (%) da massa de agregado miúdo na condição saturada de superfície seca (SSS). O resultado deve ser arredondado ao décimo mais próximo;

v = é a leitura do frasco de Chapman (volume ocupado pelo conjunto de água-agregado miúdo) (ml);

γ = é a densidade na condição saturada de superfície seca (SSS) do agregado miúdo (g/ml)

4.2 Estudos de caracterização do cimento

4.2.1 Cimento utilizado nos experimentos

O cimento branco não foi encontrado na região do sul de Minas Gerais e devido a esse motivo a compra foi realizada em uma empresa do estado de São Paulo, LPC Argos, no qual ela não produz o cimento, somente exporta de uma cimenteira (Adana), localizado na Turquia.

A empresa LPC Argos disponibilizou o laudo, conforme o Anexo B, com informações das características físicas e químicas que segundo a empresa seria do cimento utilizado, porém não há nenhuma nomenclatura que comprove ser do cimento branco fornecido.

Para a produção do concreto referência foi utilizado o cimento CP III de 32 MPa da Holcim, no qual não foi solicitado o laudo das composições químicas e físicas por não ser enfoque desta pesquisa.

4.2.2 Resistência à compressão do cimento Portland (ABNT: NBR 7215:2019)

Para a validação da resistência do cimento Portland branco foi realizado o ensaio de resistência à compressão por meio de corpos cilíndricos, conformes os procedimentos descritos na ABNT: NBR 7215:2019.

O método mencionado na norma consiste na elaboração de corpos de prova cilíndricos com argamassa composta de uma parte de cimento e três de areia normalizada, em massa, e com relação água/cimento de 0,48, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 – Quantidade materiais

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	
- fração grossa	468 ± 0,3
- fração média grossa	468 ± 0,3
- fração média fina	468 ± 0,3
- fração fina	468 ± 0,3

Fonte: ABNT NBR 7215:2019

Para a produção da argamassa é utilizado um misturador mecânico e moldes de 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Os moldes que contêm os corpos de prova devem ser conservados em atmosfera úmida para cura inicial. Em seguida, os corpos de prova são desmoldados e submetidos à cura submersa saturada de cal até a data de ruptura, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Amostras e amostras submersas



Fonte: Autor (2019)

Depois de realizado a cura e desmoldarem dos copos de provas seguiu-se para determinação de força de ruptura, ou seja, a força máxima indicada pela máquina de ensaio. Para este estudo foi realizado os rompimentos para as idades de ruptura de 24 horas, 3 dias, 7 dias e 28 dias.

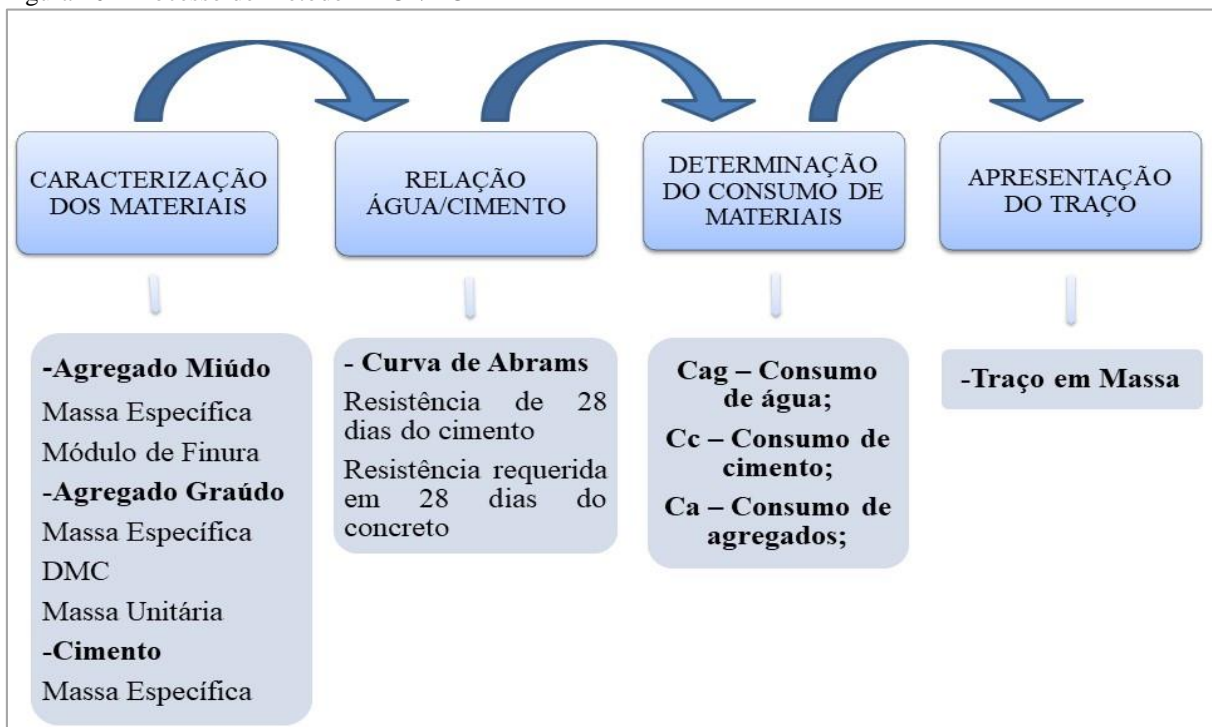
4.3 Estudos de dosagem e produção do concreto

Para a produção do concreto foi realizado a dosagem estabelecido pelo o método ABCP/ACI, que proporcionou as quantidades necessárias dos materiais: cimento agregado miúdo, agregado graúdo e água.

4.3.1 Método de dosagem ABCP/ACI

O método ABCP/ACI foi publicado em 1984 pela Associação Brasileira de Cimento Portland, baseado na Norma ACI 211.1-81 *Standard Practice For Selections For Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, com adaptações para as especificações brasileiras regidas na norma ABNT NBR 7211:2009 - Agregados para concreto. Este método fornece uma aproximação do quantitativo de materiais, devendo-se ainda realizar misturas experimentais. Para encontrar o a dosagem experimental, o método pode ser dividido em 4 etapas, simplificadas na Figura 20.

Figura 20 - Processo de Método ABCP/ACI

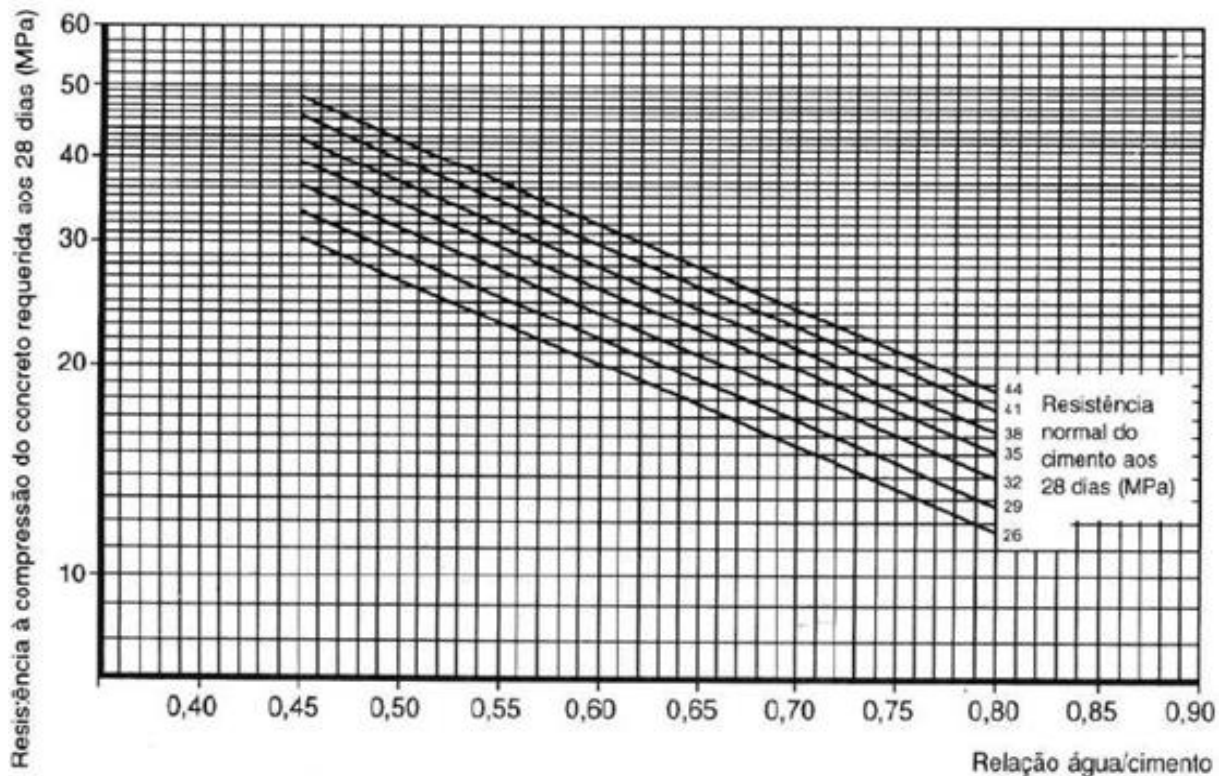


Fonte: Autor (2019)

4.3.1.1 A relação água/cimento (a/c)

A relação água/cimento é determinada através da curva Abrams, mostrado na Figura 21, em função da resistência normal do cimento aos 28 dias e a resistência à compressão do concreto requerida aos 28 dias. A resistência do cimento é de acordo com o tipo de cimento utilizado, já a resistência do concreto é determinada pela Equação 19.

Figura 21 – Curva de Abrams



Fonte: Bucher (1989)

A resistência de dosagem do concreto é encontrada com um acréscimo devido ao desvio padrão segundo as condições de preparo do concreto e é obtido conforme a Equação 19.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.S_d \quad (19)$$

Onde: f_{c28} = é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de “j” dias, em MPa.

f_{ck} = é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

S_d = é o desvio padrão da dosagem, em MPa especificado conforme na Tabela 18 da norma ABNT NBR 12655:2015 (MPa)

Tabela 18 – Desvio-padrão do concreto

Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto	
Sd = 4,0 MPa	Condição A – o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigido em função da umidade dos agregados
Sd = 5,5 MPa	Condição B – O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume.
Sd = 7,0 MPa	Condição C – O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados da determinação da consistência do concreto.

Fonte: ABNT NBR 12655:2015

4.3.1.2 Estimativa do consumo de água (C_{ag})

O consumo de água para a produção do concreto com determinada consistência, é estimada pela medida do abatimento de tronco de cone. Que conforme com Rodrigues (1998), o volume de água depende da granulometria, da forma e textura dos grãos do agregado graúdo da mistura. E devido à dificuldade em determinar o volume de água por meio equação, este autor estima o consumo de água por metro cúbico de concreto obtido através da Tabela 19.

Tabela 19 – Estimativa do consumo de água

Abatimento do tronco de cone	Dimensão máxima característica do agregado				
	9,5 mm	19,0 mm	25,0 mm	32,0 mm	38,0 mm
40 a 60 mm	220 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	1850 l/m ³	180 l/m ³
60 a 80 mm	225 l/m ³	200 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³
80 a 100 mm	230 l/m ³	205 l/m ³	200 l/m ³	200 l/m ³	190 l/m ³

Fonte: Rodrigues (1998)

4.3.1.3 Estimativa do consumo de cimento (C_c)

Determinado o consumo de água por metro cúbico de concreto, consegue-se estimar a quantidade de cimento através da Equação 20.

$$C_c = \frac{C_{ag}}{a/c} \quad (20)$$

Onde: C_c = é o consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³)

C_{ag} = é o consumo de água por metro cúbico de concreto (l/m³)

a/c = é o consumo de água por metro cúbico de concreto (l/m^3)

4.3.1.4 Estimativa do consumo de agregados (Ca)

A estimativa do consumo de agregado graúdo da mistura é determinada priorizando o volume de vazios inter-grãos possíveis. Os valores podem ser determinados através da Tabela 20 que apresenta os volumes de agregado graúdo seco compactado por metro cúbico de concreto, de acordo com o módulo de finura do agregado miúdo e o diâmetro máximo característico do agregado graúdo.

Tabela 20 - Volume de agregado graúdo por m^3 de concreto

Módulo de finura da areia	Dimensão máxima característica do agregado graúdo				
	9,5 mm	19,0 mm	25,0 mm	32,0 mm	38,0 mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Rodrigues (1998)

O volume de agregado miúdo (C_a), é encontrado por 1,0 metro cúbico de concreto aplicando a Equação 21.

$$C_b = V_b \cdot \gamma_b \quad (21)$$

Onde: C_b = Consumo de brita por metro cúbico de concreto (kg/m^3)

V_b = Volume do agregado seco compactado por metro cúbico de concreto (l/m^3)

γ_b = é a massa unitária do agregado compactado (kg/m^3)

O volume de agregado miúdo (C_a), é encontrado por 1,0 metro cúbico de concreto aplicando a Equação 22.

$$V_a = 1 - \frac{C_c + C_b + C_{ag}}{\gamma_c + \gamma_b + \gamma_{ag}} \quad (22)$$

Onde: V_a = Volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto (m^3)

γ_c = Massa específica do cimento, agregado graúdo e da água respectivamente

4.3.1.5 Determinação do traço

Para determinar o traço em massa o consumo dos materiais é determinado em razão do consumo de cimento, sendo aplicado a Equação 23.

$$\frac{C_c : C_a : C_b : C_{ag}}{C_c : C_c : C_c : C_c} \quad (23)$$

Onde: C_c = consumo de cimento (kg/m³)

C_a = consumo de agregado miúdo (kg/m³)

C_b = consumo de agregado graúdo (kg/m³)

C_{ag} = consumo de água (kg/m³)

4.3.1.6 Cálculo do volume de amostragem

Para calcular a quantidade das matérias de acordo com volume definido para a produção dos concretos em laboratório, foi utilizado a Equação 24 para definir a quantidade de cimento e depois, de acordo com o traço, os outros materiais.

$$C = \frac{Vp}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + \frac{ag}{\gamma_{ag}}} \quad (24)$$

Onde: C = consumo de cimento para determinado volume a ser produzido de concreto (kg)

Vp = volume de concreto a ser produzido (dm³)

γ_c = massa específica do cimento (g/cm³)

γ_a = massa específica do agregado miúdo (g/cm³)

γ_b = massa específica do agregado graúdo (g/cm³)

γ_{ag} = massa específica da água (g/cm³)

(1, a, b, ag) = traço do concreto em massa de acordo com item 4.3.1.5.

4.3.2 Produção de Concreto em laboratório (ABNT NBR 12821:2009)

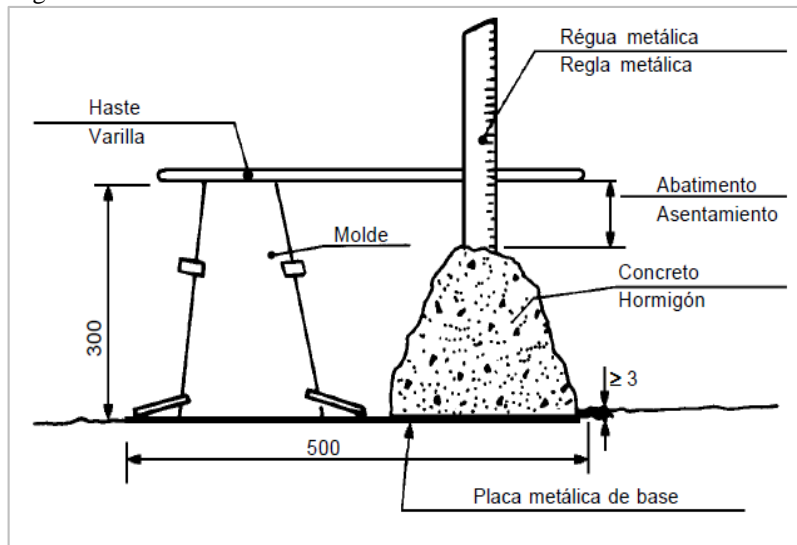
Os concretos foram produzidos conforme recomendações da ABNT NBR 12821:2009, que estabelece os procedimentos para produção de concretos em laboratórios. Para moldagem

e cura dos corpos de provas seguiu-se a norma ABNT NBR 5738:2015 que determina os procedimentos necessários.

4.3.3 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998)

Para verificar se o concreto está em boa condição de consistência foi realizado o procedimento conforme a ABNT NBR NM 67:1998 que avalia o concreto através do abatimento. O concreto é colocado em camadas no molde, a cada camada é compactado com 25 golpes com haste de socamento, conforme a simplificação a Figura 22

Figura 22 - Procedimento de abatimento



Fonte: ABNT NBR NM 67:1998

4.4 Estudos de resistência do concreto

4.4.1 Resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018)

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a ABNT NBR 5739:2018. Após a cura dos corpos de provas estes devem ser submetidos aos ensaios de rompimentos em intervalos diferentes de cura. Para cada lote e tempo de cura deve ser ensaiado 2 corpos de provas para encontrar uma média entre os dois.

Para determinação da resistência à compressão, a carga de maior valor obtida pelos dois corpos de provas ensaiados pelo deve ser dividida pela área da seção transversal do corpo de

prova aplicando a Equação 25. Conforme a ABNT NBR 5739:2018 existem cinco tipos de rupturas possíveis sendo elas conforme demonstrado na Figura 23.

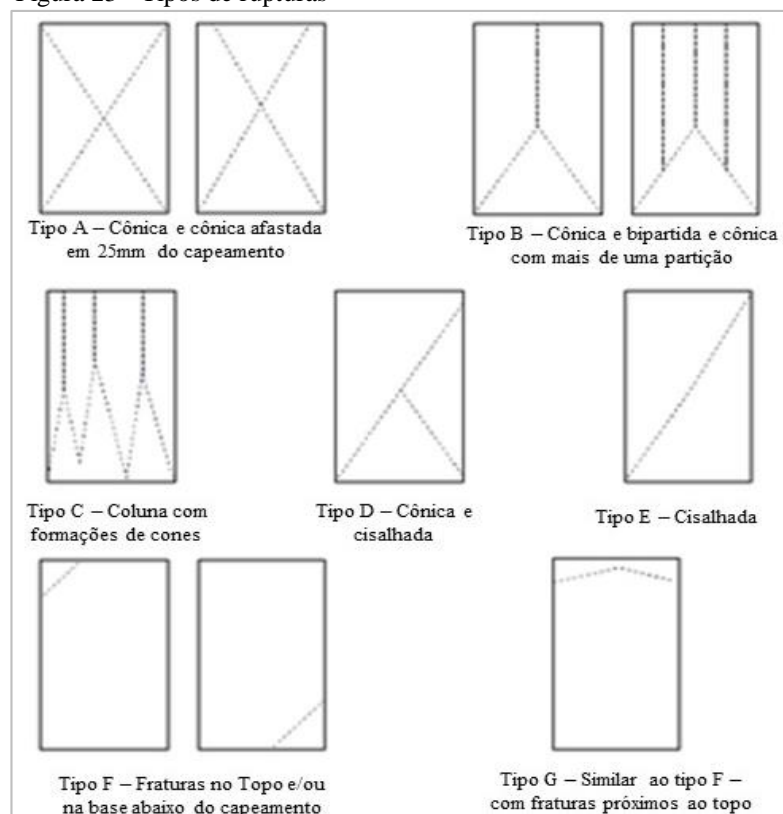
$$\delta = \frac{(CP \cdot 10000)}{A} \quad (25)$$

Onde: δ = é resistência suportada (MPa)

CP = Carga suportada no ensaio de compressão, maior valor encontrada (tf)

A = Área do corpo de prova (mm²)

Figura 23 - Tipos de rupturas



Fonte: ABNT NBR 5739:2018

Para caso com ensaio que obtenham diferentes valores a norma ABNT NBR 12655:2015 descreve a Equação 26 para determinar o valor estimado da resistência característica à compressão.

$$f_{Ck,est} = 2x \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m - 1} - f_m \quad (26)$$

Onde: $f_{Ck,(est)}$ = é o valor estimado da resistência suportada (MPa)

f_1, f_2, \dots, f_m = são os valores das resistências dos exemplares, em ordem crescente.

m = é igual a $n/2$. Despreza-se o valor mais alto de n , se for ímpar.

n = número de exemplares

Deve ser observado que o valor utilizado para $f_{ck,(est)}$ não deve ser que $\psi_6 \cdot f_1$, adotando valores da Tabela 21, em função da condição de preparo do concreto e do número de exemplares da amostras.

Tabela 21- Valores de ψ_6

Condições de Preparo	Número de exemplares (n)										
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	≥16
A	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
B ou C	0,75	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02

NOTA Os valores de n entre 2 e 5 são empregados para os casos excepcionais

Fonte: ABNT NBR 12655:2015

A norma ABNT NBR 6118:2014, cita a Equação 27 para caso de verificação da resistência em data inferior a 28 dias de idade.

$$f_{cd} = \beta_1 x \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad (27)$$

Onde: f_{cd} = é o valor da resistência do concreto (MPa);

β_1 = é a relação $f_{ck,j}/f_{ck}$ que pode ser obtido pela Equação 28 ;

f_{ck} = é a resistência do concreto em 28 dias;

γ_C = coeficiente de ponderação da resistência

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right] \right\} \quad (28)$$

Onde: $s =$ 0,38 para concreto de cimento de CPII e CPIV

0,25 para concreto de cimento de CPI e CPII

0,20 para concreto de cimento CPV- ARIs

t = idade efetiva do concreto, em dias

4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011)

Para a realização do ensaio de tração por compressão diametral foi seguido as recomendações da ABNT NBR 7222:2011. Neste ensaio os aparelhos são os mesmos aparelhos utilizados em ensaios de resistência à compressão. Os corpos de prova devem ter relação entre 1 e 2 quanto ao comprimento/diâmetro. O contato entre corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio, se dá com utilização de duas geratrizes opostas ao diâmetro do corpo de prova. É

permitido adaptações na máquina uma vez que o corpo de prova deve ficar em repouso ao longo das geratrizes.

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral o cálculo é feito pela Equação 29, conforme recomendações ABNT NBR 7222:2011.

$$V_{t,D} = \frac{(2 \cdot F)}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (29)$$

Onde: $V_{t,D}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F = Carga média suportada de ensaio (N)

d = Diâmetro do corpo-de-prova (mm)

L = Altura do corpo-de-prova (mm)

A resistência à tração também pode ser encontrada de forma direta a partir de cálculos utilizando os resultados de resistência à compressão (f_{ck}), encontrando valores que conforme a ABNT NBR 6118:2014 estabelece o limite superior e inferior de resistência à tração, conforme a Equação 30, onde f_{ck} é a média entre os valores de $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$.

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \text{ (MPa)} \quad (30)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm} \text{ (MPa)} \quad (31)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ctm} \text{ (MPa)} \quad (32)$$

4.5 Estudos de durabilidade do concreto

Para o estudo de durabilidade do concreto foi realizado o ensaio de reatividade álcali-silica (RAS) estabelecido pela ABNT NBR 15577 – Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. E com valores obtidos no ensaio foi correlacionada com os parâmetros citada na ABNT NBR 15577 – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto

4.5.1 Ensaio de reatividade álcali-silica no concreto (ABNT NBR 15577-4:2018)

Foi utilizado como referência a norma ABNT NBR 15577 – Parte 4 para determinação da expansão em barras de argamassas pelo método acelerado. No qual, esta norma estabelece o

método de ensaio acelerado para determinar, por meio da variação de comprimento de barras de argamassa, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis (sódio e potássio), fazendo-se uso de um cimento-padrão.

A norma descreve que é necessário moldar pelo menos três barras de argamassa para ensaio. Considerando a dosagem de uma parte de cimento para 2,25 partes em massa de agregado classificado e relação água/cimento (a/c) igual a 0,47 em massa. A norma também disponibiliza a quantidade de material em massa conforme a granulometria do agregado, como mostra a Tabela 22.

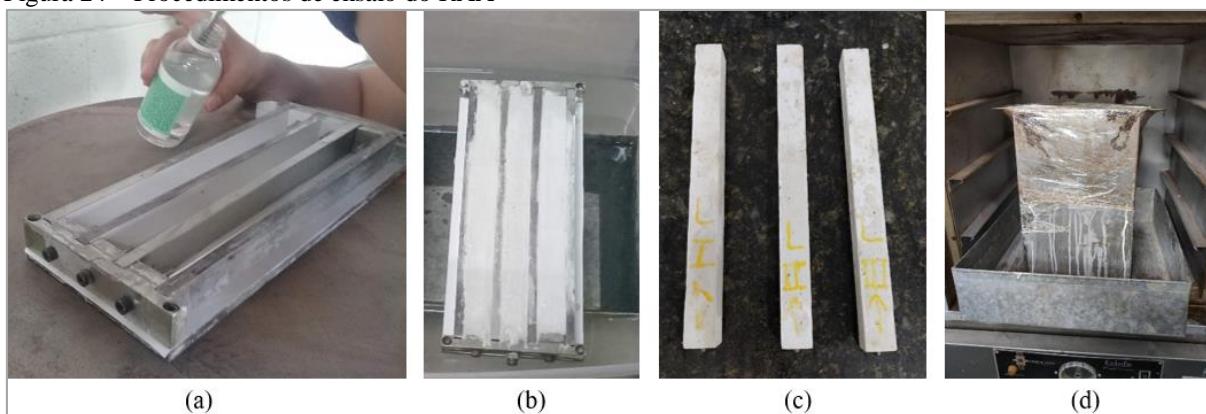
Tabela 22– Granulometria requerida do material para ensaio

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: ABNT NBR 1557-4:2018

Para a produção da argamassa é utilizado um misturador mecânico e moldes umedecidos com dimensões de $(25,0 \pm 0,7)$ mm de lado e 285 mm de comprimento, conforme a Figura 24a. Os moldes que contêm os corpos de prova devem ser conservados em atmosfera úmida para cura inicial em câmara úmida a (23 ± 2) ° C durante (24 ± 1) horas, conforme Figura 24b. Em seguida, os corpos de prova são desmoldados e submetidos a um recipiente selado de armazenamento com solução de NaOH 1N e colocado na estufa a (80 ± 2) ° C, como mostra na Figura 24c e 24d.

Figura 24 – Procedimentos de ensaio do RAA



Fonte: Autor (2019)

Depois de produzido a barras de argamassa foi realizado as leituras através de um aparelho comparador de comprimento, como mostra a Figura 25. No qual é realizado a leitura da barra-padrão primeiro e em seguida realizado a leitura das barras de argamassa. Cada barra de argamassa deve ser colocada no comparador na mesma posição, girada lentamente 360° no mesmo sentido e anotando a menor leitura.

Figura 25 – Leitura das barras de argamassa



Fonte: Autor (2019)

As leituras foram realizadas conforme citado na norma e seguiu para a determinação da variação do comprimento de cada barra. O valor de variação de cada dia medido das barras de argamassa foi obtido através da média das três barras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram analisados os valores obtidos nos ensaios do agregado graúdo e agregado miúdo, verificando o nível de qualidade do material e os parâmetros para sua aplicação no concreto de cimento Portland branco. Além disso, foram analisados os resultados determinados nos ensaios de resistência a compressão e de reatividade álcali-agregado do concreto branco.

5.1 Caracterização dos agregados

5.1.1 Resultados obtidos do agregado graúdo

5.1.1.1 Índice de forma

O índice de forma obtido do agregado graúdo foi de acordo com ensaio que determinado pela relação entre a média dos valores do maior comprimento (C) e a espessura (e) de 200 grão analisados, conforme poder ser visto na Equação 33.

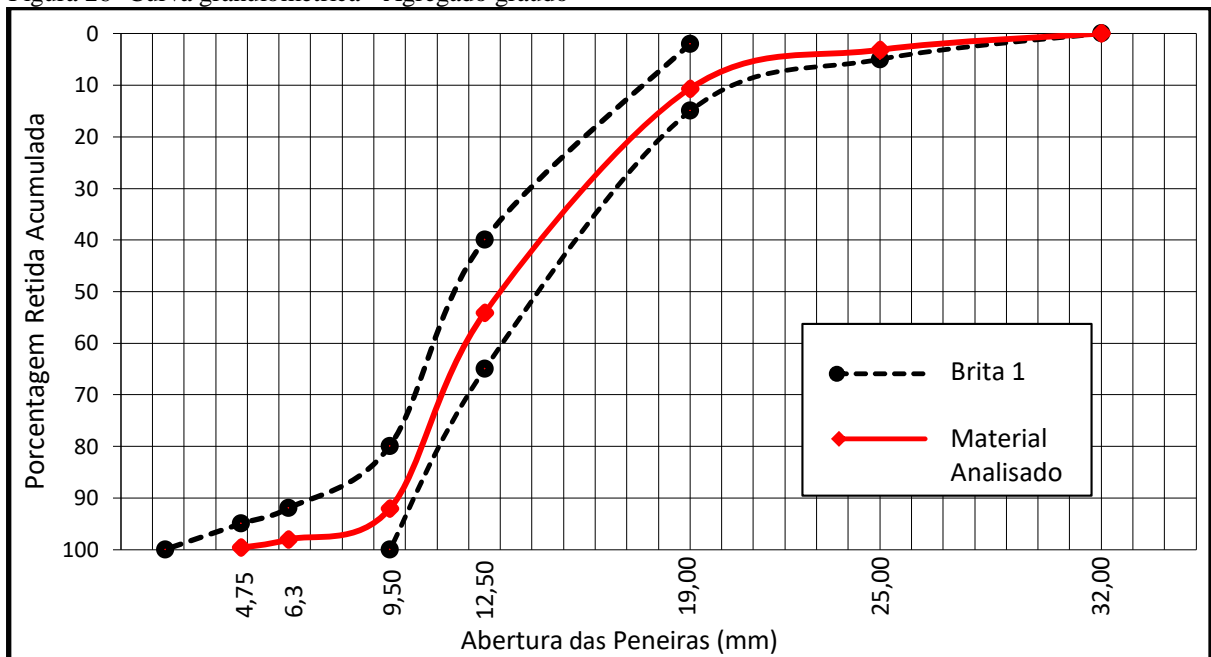
$$I = \frac{c_{\text{médio}}}{e_{\text{médio}}} = \frac{28,253}{14,80} = 1,9 \quad (33)$$

A amostra estudada obteve resultado inferior a 3,0, o que é estabelecido pela ABNT NBR 7211:2009 como máximo, enquadrando-se na condição de aceitável. No Apêndice B é disponibilizado os dados utilizados para os cálculos de índice de forma.

5.1.1.2 Composição da granulometria

O resultado obtido da análise granulométrica para a amostra de agregado graúdo está demonstrado na Figura 26 e na Figura 27, e no apêndice C. Com a Figura 26, pode-se analisar o resultado do agregado graúdo de quartzito, onde a sua distribuição granulométrica consegue ficar dentro do limite da granulometria mencionado na norma ABNT NBR 7211:2009, sendo essa faixa considerada brita 1.

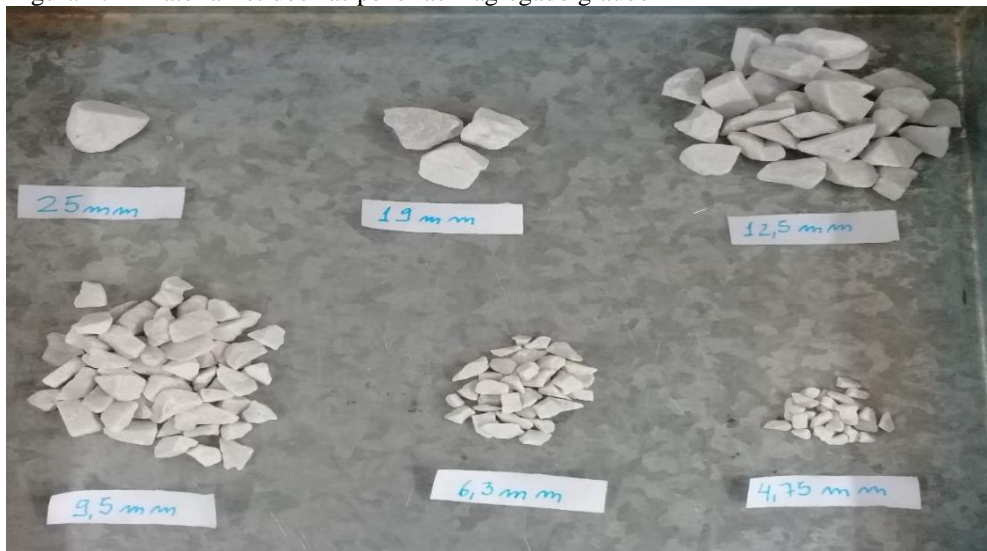
Figura 26 -Curva granulométrica - Agregado graúdo



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 27 é possível visualizar as proporções para cada peneira com a amostra de 500g de agregado graúdo utilizado no ensaio.

Figura 27 – Material retidos nas peneiras – agregado graúdo



Fonte: Autor (2019)

Ainda para esse ensaio obteve-se a peneira de 25 mm para dimensão máxima característica do material e o valor de 2,024 para o módulo de finura.

5.1.1.3 Massa específica seca, aparente e absorção de água

Os valores obtidos para o material ensaiado foi conforme o item 4.1.3.2, especificado pelo o método na ABNT NBR NM 53:2003 estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Massa específica seca, saturada e aparente – Agregado graúdo

Determinação das Massas	
m = Massa ao ar da amostra seca (g)	4000
m_a = Massa em água da amostra (g)	2503,5
m_s = Massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g)	4011
d = Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,673
d_s = Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	2,661
d_a = Massa específica aparente do agregado seco (g/cm ³)	2,653
A = Absorção da água (%)	0,275

Fonte: Autor (2019)

5.1.1.4 Massa unitária e índice de vazios

Os valores obtidos para o agregado graúdo foi conforme o item 4.1.2.2, especificado pelo o método na ABNT NBR NM 45:2006 estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Massa unitária e índice de vazios – Agregados graúdos

Massa unitária e índice de vazios	
m_{af} = é a massa do recipiente mais o agregado (kg)	15,580
m_r = é a massa do recipiente vazio (kg)	0,956
V = é volume do recipiente (m ³);	0,01
d_1 = é a massa específica relativa do agregado seco, determinada conforme a NM53	2,673
ρ_{ap} = é a massa unitária do agregado (23°) (kg/m ³)	1462,4
ρ_w = é a massa unitária de água (kg/m ³)	997,54
E_v = é o índice de volume de vazios nos agregados (%)	45,16

Fonte: Autor (2019)

5.1.1.5 Teor de materiais pulverulentos

Os valores obtidos para o agregado graúdo foi conforme o item 4.1.3.3, especificado pelo o método na ABNT NBR NM 46:2003 estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Material pulverulentos

Material Pulverulentos	
m_i = é a massa original da amostra seca (g);	1000,19
m_f = é a massa da amostra seca após a lavagem (g);	995,7
m = é porcentagem de material fino que passa pela peneira 75 μm (%);	0,45

Fonte: Autor (2019)

5.1.1.6 Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Os valores obtidos para o agregado graúdo foi conforme o item 4.1.3.4, especificado pelo o método na ABNT NBR 7218:2010 estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Material torrões e materiais friáveis

Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis	
m_i = é a massa inicial do intervalo granulométrico (g)	2000,0
m_f = é a massa apos peneiramento via úmida (g)	1999,2
m_t = teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,04

Fonte: Autor (2019).

5.1.1.7 Teor de umidade total

Os valores obtidos para o agregado graúdo foi conforme o item 4.1.3.5, especificado pelo o método na ABNT NBR 9939:2012 estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Material pulverulentos

Material Pulverulentos	
m_i = é a massa inicial da amostra (g);	4000
m_f = é a massa final da amostra seca após estufa (g);	3998
h = é o teor de umidade total, arredondado ao décimo mais próximo (%);	0,05

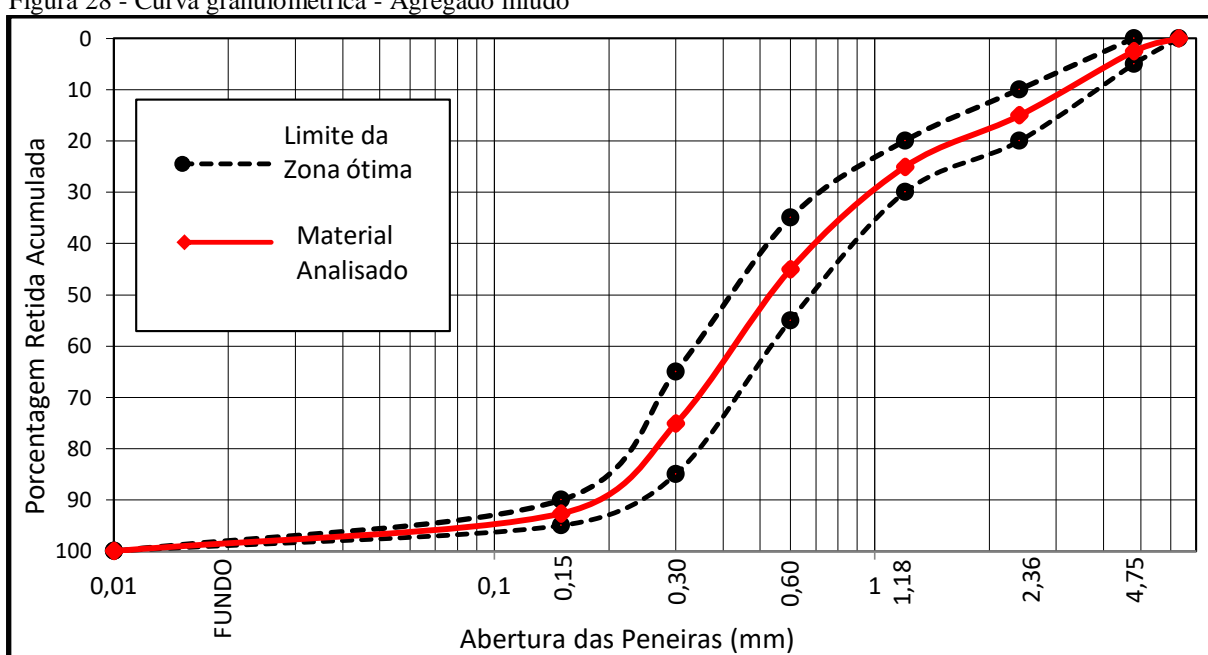
Fonte: Autor (2019)

5.1.2 Resultados obtidos do agregado miúdo

5.1.2.1 Composição da granulometria

O resultado obtido da análise granulométrica do agregado miúdo está demonstrado na Figura 28 e na Figura 29, e no apêndice C. Com a Figura 28, pode-se analisar o resultado do da sua curva granulométrica, onde a sua distribuição granulométrica também consegue ficar dentro do limite da granulometria mencionado na norma ABNT NBR 7211:2009

Figura 28 - Curva granulométrica - Agregado miúdo

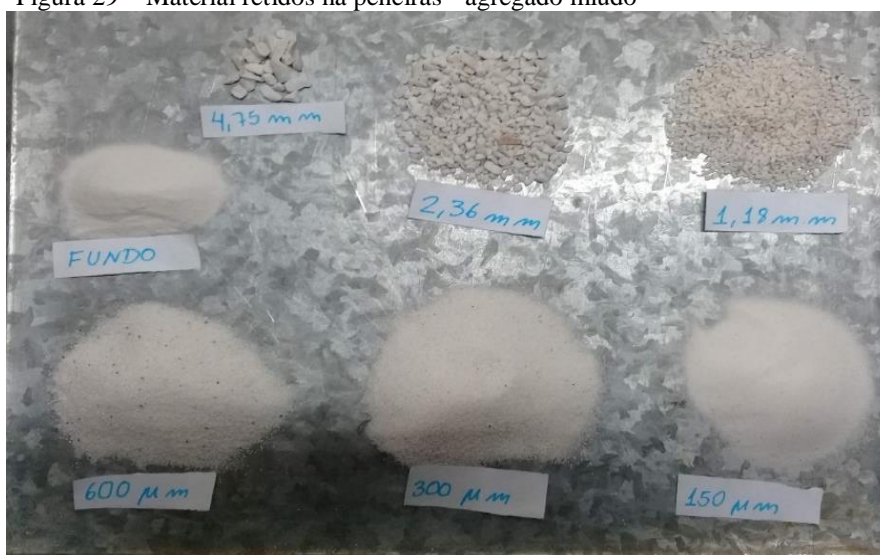


Fonte: Autor (2019)

Na Figura 29 é possível visualizar as proporções para cada peneira com a amostra de 300g de agregado miúdo utilizado no ensaio.

Ainda para esse ensaio obteve-se a peneira de 4,75 mm para dimensão máxima característica do material e o valor de 3,548 para o módulo de finura. Que, segundo a literatura de Ribeiro (2013), pode ser considerado uma areia grossa, devido o módulo de finura maior de 3,3, sendo ideal para uso em concreto.

Figura 29 – Material retidos na peneiras - agregado miúdo



Fonte: Autor (2019)

5.1.2.2 Massa específica seca, aparente

Os valores obtidos para o agregado miúdo foi conforme o item 4.1.4.1, especificado pelo o método na ABNT NBR NM 52:2009 estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Massa específica seca, saturada e aparente – Agregado miúdo

Determinação das Massas	
V = é o volume do frasco (cm ³)	500,00
m = é a massa da amostra seca em estufa (g)	500,02
m_1 = é a massa do conjunto (frasco + agregado) (g)	735,08
m_2 = é a massa total (frasco + agregado + água) (g)	1044,41
m_s = é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)	500,09
ρ_a = é a massa específica da água (g/cm ³)	1,00
V_a = é o volume de água adicionada ao frasco (cm ³)	309,33
d_1 = é a massa específica aparente do agregado seco (g/cm ³)	2,622
d_2 = é a massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,623
d_3 = é a massa específica do agregado (g/cm ³)	2,673

Fonte: Autor (2019)

5.1.2.3 Massa unitária e índice de vazios

Os valores obtidos para o agregado miúdo foi conforme o item 4.1.2.2, especificado pelo o método na ABNT NBR NM 45:2003 estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Massa unitária e índice de vazios – Agregados miúdo

Massa unitária e índice de vazios	
m_{af} = é a massa do recipiente mais o agregado (kg)	16,520
m_r = é a massa do recipiente vazio (kg)	0,956
V = é volume do recipiente (m ³);	0,01
d_1 = é a massa específica relativa do agregado seco, determinada conforme a NM52	2,622
ρ_{ap} = é a massa unitária do agregado (kg/m ³)	1556,4
ρ_w = é a massa unitária de água (23°) (kg/m ³)	997,54
E_v = é o índice de volume de vazios nos agregados (%)	40,49

Fonte: Autor (2019)

5.1.2.4 Absorção de água

Os valores obtidos para o agregado miúdo foi conforme o item 4.1.4.2, especificado pelo o método na ABNT NBR NM 30:2000 estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 -Valores obtidos para absorção de água

Determinação da Absorção	
m = Massa ao ar da amostra seca (g)	500,02
m_s = Massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g)	501,50
A = Absorção da água (%)	0,295

Fonte: Autor (2019)

5.1.2.5 Teor de umidade superficial

O teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman é obtido através do item 4.1.4.3, onde o resultado para o ensaio da amostra de agregado miúdo de quartzito pode ser visto na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados do teor de umidade superficial

Determinação das Massas	
v_1 = Primeira leitura do frasco de Chapman	388,5
v_2 = Segunda leitura do frasco de Chapman	388,0
γ = é a densidade na condição saturada superfície seca, segundo a ABNT NM52	2,622
h_1 = Resultado da primeira leitura do frasco de Chapman	0,70
h_2 = Resultado da segunda leitura do frasco de Chapman	0,86
h = Resultado teor de umidade superficial	0,78

Fonte: Autor (2019)

5.1.3 Resumo dos resultados

Na Tabela 32, pode ser visto o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização obtido com as rochas de quartzitos para agregado graúdo e agregado miúdo. Os valores apresentados auxiliam para a melhor análise comparativa entre os resultados e as classificações das amostras foram baseadas de acordo com item 3.4.3.

Com os resultados obtidos nos ensaios realizados pode se afirmar que os agregados a partir do rejeito da extração de Quartzito São Thomé atendem as especificações da norma ABNT NBR 7211:2009 Agregados para concreto – Especificações e as recomendações citado por Verhoef e Van de Wall (1998).

Tabela 32 - Resumo dos resultados

Tipo	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Índice de forma	1,9	N.A
	Aceitável	N.A
Granulometria	Brita 01	Areia Grossa
	Aceitável	Aceitável
Dimensão Máxima Característica (DMC)	25 mm	4,75 mm
Módulo de finura	2,024	3,548
	N.E	N.E
Massa específica seca (g/cm³)	2,673	2,673
	Bom	Bom
Massa específica saturado superfície seca (g/cm³)	2,661	2,623
	N.E	N.E
Massa específica aparente (g/cm³)	2,653	2,622
	N.E	N.E

(Continua)

Continuação Tabela 32 - Resumo dos resultados

	0,275	0,295
Absorção d'água (%)	Excelente	Excelente
Massa unitária (kg/m³)	1462,4 N.E	1556,4 N.E
Índice de vazios (%)	45,16 N.E	40,49 N.E
Materiais pulverulentos (%)	0,45 Aceitável	N.A N.A
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,04 Aceitável	N.A N.A
Teor de umidade total (%)	0,05 N.E	0,78 N.E

Fonte: Autor (2019)

Nota: N.E.= não especificado. N.A = não aplicável;

5.2 Caracterização do cimento

5.2.1 Ensaio de resistência do cimento

Para o ensaio de resistência à compressão do cimento foi realizado quatro amostras para o cimento branco e quatro amostras para cimento cinza, conforme a Figura 30. Os procedimentos de ensaio foram conforme o item 4.2.2.

Figura 30 – Corpos de prova



Fonte: Autor (2019)

Os valores obtidos no ensaio estão demonstrados na Tabela 33. No qual pode ser observado que o valor da resistência do cimento foi menor que o cimento cinza, isso se deu devido ao fato de que o cimento branco não era realmente 32 MPa, conforme foi informado pela empresa que forneceu o material.

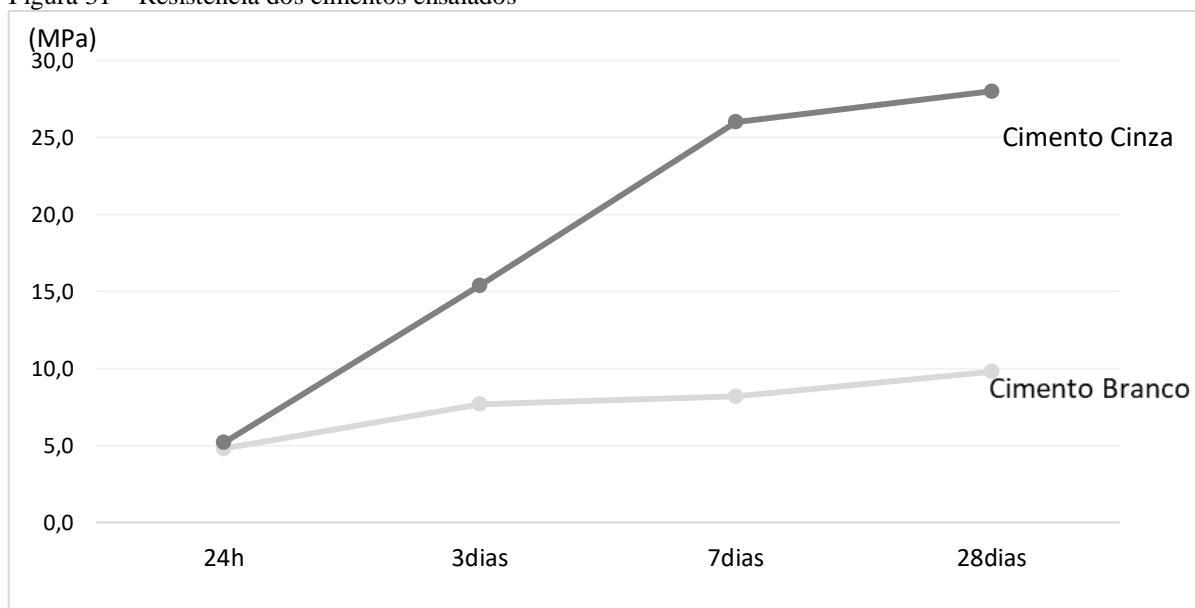
Tabela 33 – Valores da resistência dos cimentos

Idade	Cimento Branco		Cimento Cinza	
	Força de Ruptura (kgf)	Tensão de Ruptura (MPa)	Força de Ruptura (kgf)	Tensão de Ruptura (MPa)
24h	950,0	4,8	1020,0	5,2
3dias	1520,0	7,7	3025,0	15,4
7dias	1610,0	8,2	5090,0	26,0
28dias	1925,0	9,8	5500,0	28,0

Fonte: Autor (2019)

Pode ser observado na Figura 31, a diferença entre as resistências do cimento cinza e do cimento branco.

Figura 31 – Resistência dos cimentos ensaiados



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 31 pode ser observado que o cimento cinza se aproximou a resistência de 32,0 MPa, já o cimento branco obteve valor próximo a 10,0 MPa para 28 dias, diferente ao que foi informado pela empresa e diferente ao que consta no laudo disponibilizado.

5.3 Dosagem do concreto

Para realização da dosagem dos concretos seguiu o Método ABCP/ACI, mencionado no item 4.3.1. Foi realiza dosagem para dois tipos de concreto, um concreto branco com cimento Portland branco para uma resistência de compressão de 25 MPa aos 28 dias e outro concreto referência, com cimento Portland cinza com o mesmo traço para efeito de comparação dos resultados.

5.3.1 Caracterização do Materiais

As características dos materiais utilizados na confecção do concreto foram obtidas através de ensaios laboratoriais, conforme citado anteriormente. Para a dosagem do concreto branco foram utilizados os parâmetros mostrados na Tabela 32.

Para as características dos materiais utilizados na confecção do concreto referência também foram obtidas através de ensaios laboratoriais. Para a dosagem do concreto referência utilizado neste estudo foram utilizados os valores mostrados na Tabela 34.

Tabela 34 - Características dos materiais para o concreto referencia

	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Cimento
Tipo	Areia Natural	Brita (Gnaisse)	Cimento CII – 32MPa
Massa específica (kg/dm³)	2,689	2,89	3,04
Módulo de Finura	2,58	-	-
DMC (mm)	-	25	-
Massa Unitária Compactada (kg/dm³)	-	1,53	-

Fonte: Autor (2019)

5.3.2 Determinação da relação água e cimento

Para a determinação do valor da relação água cimento para a produção do concreto branco foi utilizado a curva de abrams, conforme o item 4.3.1.1, e valores estão na Tabela 35.

Tabela 35 - Parâmetros do concreto

f_{ck} (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Abatimento (mm)	f_{c28} (MPa)	Relação Água/Cimento
25,0	4,0	70,0	31,6	0,47

Fonte: Autor (2019)

5.3.3 Consumo dos materiais

Para a produção de concreto branco determinou o consumo de água, de acordo com o item 584.3.1.2; o consumo do cimento, de acordo com item 4.3.1.3; o consumo de agregado graúdo e agregado miúdo, de acordo com item 4.3.1.4. Os resultados obtidos para cada material podem ser vistos na Tabela 36.

Tabela 36 – Consumo de materiais

C_{ag} (litros)	C_c (kg/m ³)	C_b (kg/m ³)	C_a (kg/m ³)
195	414,89	913,75	857,72

Fonte: Autor (2019)

5.3.4 Apresentação e correções do traço

Determinado o consumo de material foi definido o traço em massa. Para o concreto branco foi determinado o primeiro traço mostrado na Tabela 37.

Tabela 37 - Primeiro traço para o concreto branco

Cimento	Agr. Miúdo	Agr. Graúdo	Água
1	2,07	2,20	0,47

Fonte: Autor (2019)

Porém, durante a produção, o concreto não passou na verificação do abatimento como mostra na Figura 32a, pois não atendeu ao parâmetro estabelecido de 70 +ou - 10mm, conforme o item 4.3.2.

Figura 32 - Teste de abatimento dos concretos



Fonte: Autor (2019)

Logo determinou o segundo traço para o concreto, que pode ser visto na Tabela 38 que atendeu a verificação do abatimento como mostra a Figura 39b.

Tabela 38 - Segundo traço para o concreto branco

Cimento	Agr. Miúdo	Agr. Graúdo	Água
1	1,46	1,56	0,47

Fonte: Autor (2019)

Para o concreto referência foi realizado uma correlação com o traço do concreto branco, da Tabela 39, ajustando de acordo com as características dos materiais usados no concreto referência, areia e gnaisse, obtendo o traço que pode ser visto na Tabela 40. E com este traço o concreto referência atendeu a exigência do abatimento, conforme a Figura 32c.

Tabela 39 – Traço para o concreto referência

Cimento	Agr. Miúdo	Agr. Graúdo	Água
1	1,58	1,67	0,47

Fonte: Autor (2019)

5.3.4.1 Quantidade para produção

Foi calculado de acordo com o item 4.3.1.6, o consumo de materiais nas proporções adequadas para produzir 22,6 dm³ de concreto branco e o mesmo para o concreto referência, o consumo de material em (kg) pode ser visto na Tabela 40. O agregado foi pesado proporcional para obter a curva granulométrica, conforme o item 4.1.2.1.

Tabela 40: Apresentação do traço em (kg) para produzir 22,6 dm³ cada traço.

Tipo	Cimento (kg)	Agr. Miúdo (kg)	Agr. Graúdo (kg)	Água (kg)
Concreto Branco	14,63	21,44	22,84	6,89
Concreto Referência	12,96	20,45	21,85	6,09

Fonte: Autor (2019)

5.4 Produção do concreto

Após toda a etapa de cálculo, com a relação dos materiais determinadas, foram produzidas em laboratório os concretos, de acordo com a ABNT NBR 12821:2009. Foram feitas as pesagens dos materiais nas proporções calculadas.

Para produção do concreto foi utilizado uma betoneira estacionária. Os materiais foram colocados na seguinte ordem, um terço da água, agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e o restante da água.

No processo de moldagem foi utilizado um haste de adensamento metálica aplicando 10 golpes a duas camadas colocada no molde. Deixando durante 24 horas no molde e depois colocar submerso em água até completar o dias necessário para rompimento.

Foram realizados 16 amostras no total, sendo 8 para realização do ensaio de compressão e 8 para realização do ensaio de tração por compressão diametral. O mesmo foi realizado para o concreto referência para efeito de comparação de valores, como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 -Corpos de prova para ensaio



Fonte: Autor (2019)

5.4.1 Resultados obtidos nos ensaios de compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2007, por uma prensa elétrica-hidráulica, com capacidade para 100 toneladas e indicador digital Figura 34.

Figura 34 - Prensa usado no ensaio de resistência a compressão



Fonte: Autor (2019)

Após a cura dos corpos de provas estes foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão na idade de 7 dias. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 41, onde o valor de resistência do concreto foi considerando a relação determinada no item 4.4.1.

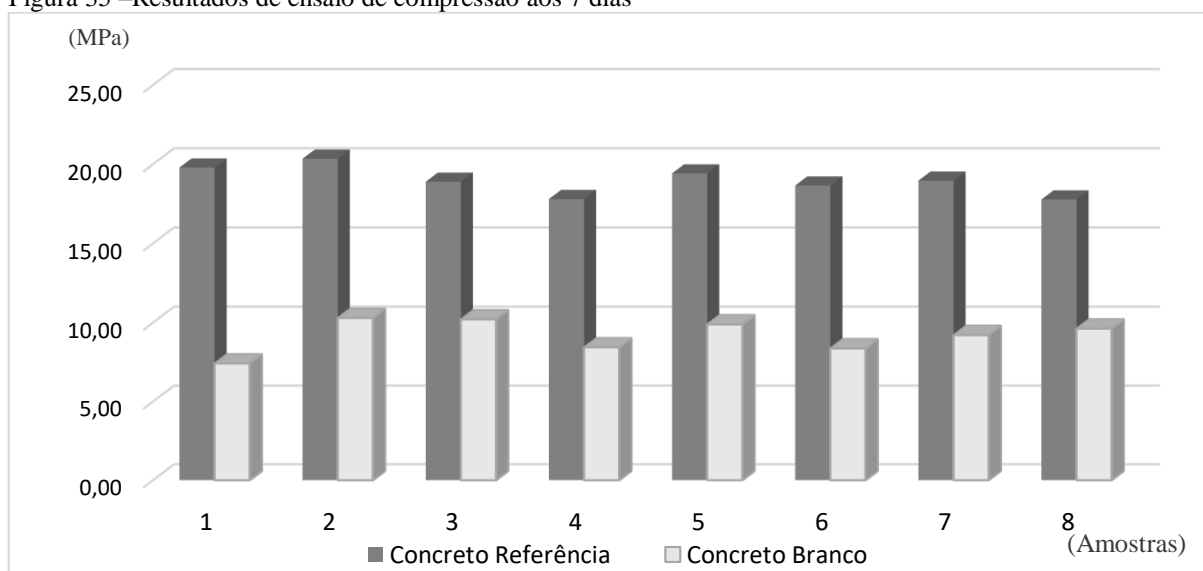
Tabela 41: Resultados do ensaio de compressão

Amostra	Concreto Branco			Concreto Referência		
	Força (tf)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Força (tf)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)
1	5,83	7861,84	7,42	15,54	7857,12	19,78
2	8,09	7860,27	10,29	15,98	7860,27	20,33
3	8,02	7858,27	10,21	14,84	7846,13	18,91
4	6,63	7866,55	8,43	13,98	7857,12	17,79
5	7,77	7855,55	9,89	15,25	7847,70	19,43
6	6,58	7861,84	8,37	14,65	7860,27	18,64
7	7,24	7858,55	9,21	14,89	7860,27	18,94
8	7,56	7846,13	9,64	13,96	7847,70	17,79

Fonte: Autor (2019)

Pode ser observado na Figura 35 que os resultados de resistência a compressão do concreto branco tiveram valores menores do que o concreto referência que possui a mesma dosagem, porém materiais diferentes.

Figura 35 – Resultados de ensaio de compressão aos 7 dias



Fonte: Autor (2019)

Com o material ensaiado foi determinado a resistência média entre os resultados obtidos, para tal, foi utilizado a Equação 26, demonstrada no item 4.4.1, e o resultado pode ser visto na Tabela 42.

Tabela 42: Resistência aos 28 dias

Tipo	Resistência do conjunto de 8 amostras em 7 dias (MPa)
Concreto Branco	6,91
Concreto Cinza	17,26

Fonte: Autor (2019)

Pode ser observado que a resistência do concreto não foi conforme a norma e ao concreto de referência. Isso foi devido ao fato do cimento branco utilizado na produção do concreto ser de baixa resistência, conforme o item 5.2.1 da página 75.

5.4.2 Resultados obtidos no ensaio de tração por compressão diametral

Os corpos de provas que foram submetidos a ensaio de resistência à tração por compressão diametral de acordo com recomendações da ABNT NBR 7222:2011, com idade de cura de 7 dias. Este ensaio consiste na utilização do mesmo aparelho utilizado no ensaio de resistência à compressão. Os corpos de prova devem ter relação maior que 2,06 quanto ao comprimento/diâmetro. O contato entre corpo de prova com a superfície da máquina de ensaio, se dá com utilização de duas geratrizes opostas ao diâmetro do corpo de prova, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2019)

Para obtenção da resistência à tração por compressão diametral o cálculo como mencionado no item 4.4.2, conforme recomendações ABNT NBR 7222:2011, os resultados obtidos no ensaio podem ser vistos na Tabela 43.

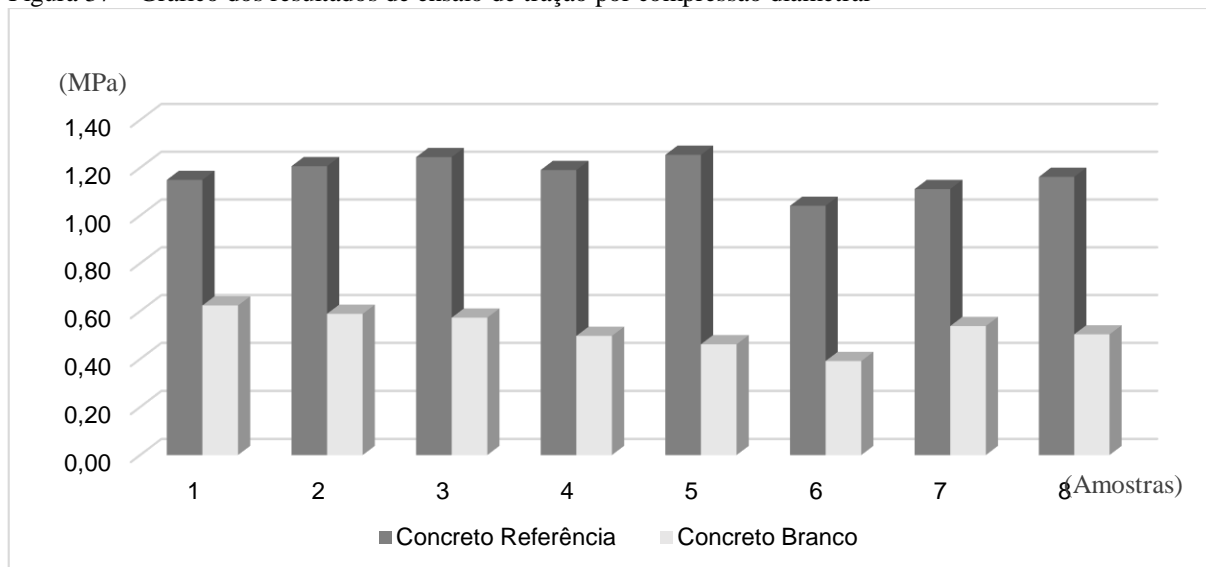
Tabela 43: Resultados do ensaio de tração axial

Amostra	Concreto Branco		Concreto Referência	
	Força (tf)	Resistência Tração (MPa)	Força (tf)	Resistência (MPa)
1	1,96	0,62	3,61	1,15
2	1,85	0,59	3,79	1,21
3	1,84	0,57	3,91	1,24
4	1,56	0,50	3,74	1,19
5	1,45	0,46	3,94	1,25
6	1,23	0,39	3,27	1,04
7	1,69	0,54	3,49	1,11
8	1,58	0,50	3,65	1,16

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 37 pode ser visto uma comparação dos resultados do concreto referência e do concreto branco.

Figura 37 – Gráfico dos resultados de ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2019)

No qual o mesmo ocorreu para o ensaio de tração por compressão diametral, em que os resultados de resistência à tração do concreto branco tiveram valores menores do que o concreto referência.

5.5 Durabilidade do concreto

5.5.1 Resultados obtidos no ensaio de RAA

Primeiramente, foi determinado o valor de Na_2O_{eq} do cimento utilizado no estudo que foi obtido através da Equação 3 citado no item 3.5.4.1, no qual as porcentagens de Na_2O e K_2O foi coletado no laudo disponibilizado pela empresa que forneceu o cimento, que está no Anexo B. O resultado pode ser visto na Equação 34, abaixo.

$$Na_2O_{eq} = (0,91\%) + 0,658 \times (0,35\%) = 0,5488\% \quad (34)$$

O valor alcançado está dentro do limite que ACI Committee 221 (1998) recomenda para o cimento, considerando-o como um cimento de baixa alcalinidade.

Para o ensaio de expansões das barras pelo método de acordo com a ABNT NBR 15577-4:2018, foi obtido os resultados conforme é demonstrado na Tabela 44. No qual, pode ser observado que as barras houveram expansão progressivas ao longo do tempo. A norma exige que seja realizado o ensaio até 30 dias após a produção, porém como foi observado um

crescimento na expansão ao longo das leituras optou-se em continuar as medições das expansões até 56 dias.

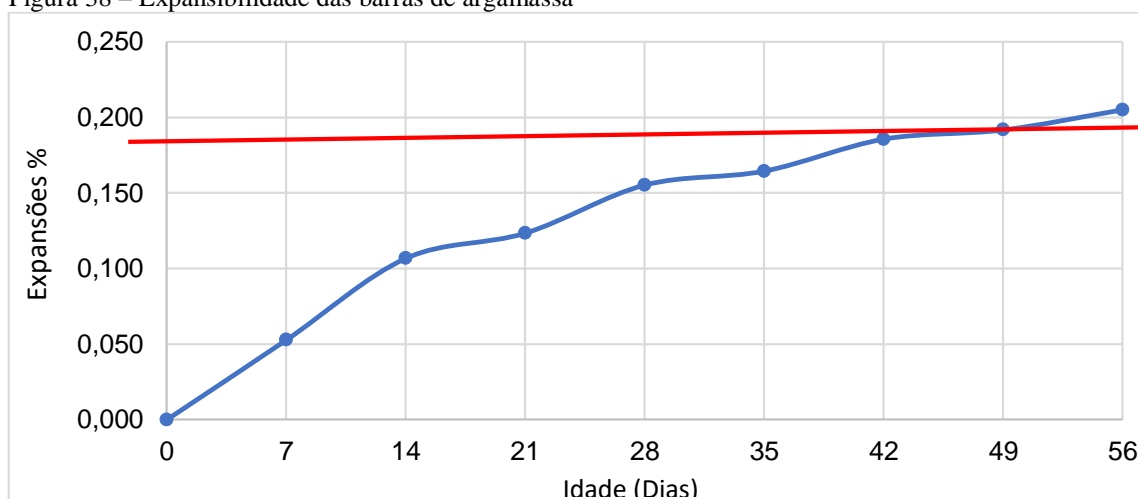
Tabela 44: Resultados do ensaio de tração axial

Idade (Dias)	Expansibilidade das barras (mm)	
	Comprimento Final (mm)	(%)
1	285,000	0,000
7	285,150	0,053
14	285,304	0,107
21	285,352	0,124
28	285,443	0,155
35	285,469	0,165
42	285,529	0,186
49	285,547	0,192
56	285,585	0,205

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 38 pode ser observado o crescimento da expansibilidade das barras de argamassa.

Figura 38 – Expansibilidade das barras de argamassa



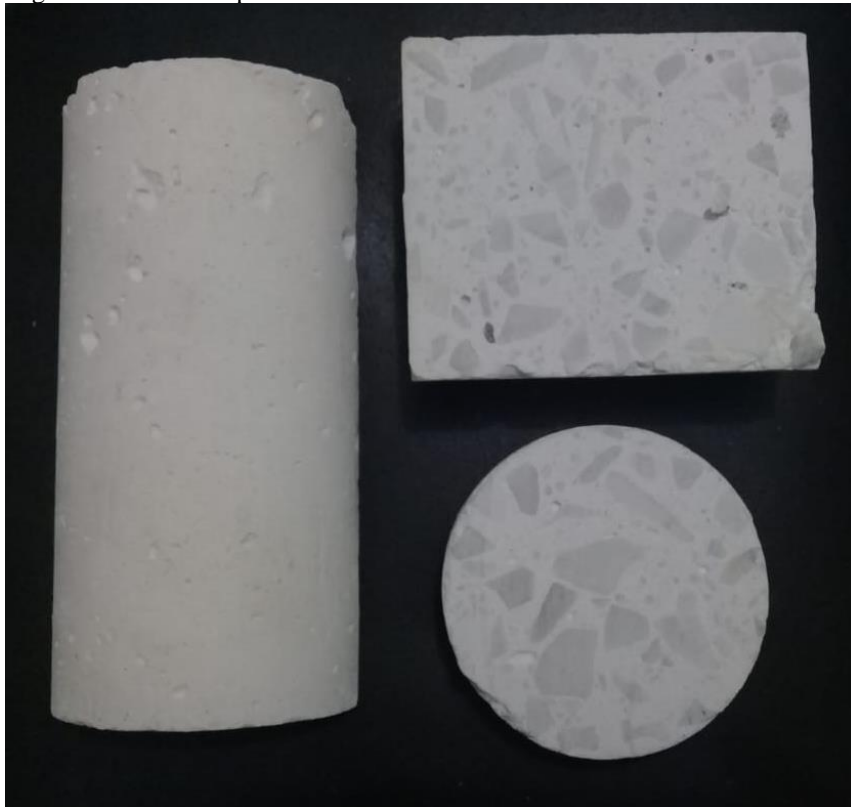
Fonte: Autor (2019)

Pode ser observado na Figura 38 que houve um crescimento progressivo nas expansões. E que entre os dias 42 e 49 a expansão passou da percentagem de 0,19%, no qual a ABNT NBR 15577-1 considera esse valor como um agregado potencialmente reativo R1, conforme é explicitado na item 3.5.4.1. No entanto, por meios de ações mitigadoras, essas expansões podem ser controladas. Estas ações mitigadoras estão citadas na Tabela 16 no item 3.5.4.1, como, por exemplo, limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores.

5.6 Resultados estéticos

Uma das características importante para o concreto branco está relacionado ao quesito estético, que para o concreto com o resíduo de quartzito como agregado graúdo e agregado miúdo a sua aparência atendeu perfeitamente, com a textura e tonalidades adequadas. Na Figura 39 mostra três peças do material produzido em laboratório, sendo que uma peça que pode ser analisado a textura externa e as outras duas peças com cortes pode ser analisado o agregado graúdo no corpo.

Figura 39 – Material produzido em laboratório



Fonte: Autor (2019)

6 CONCLUSÃO

É oportuno ressaltar que o resíduo do quartzito produzido em São Thomé das Letras é considerado um grande agente causador de problemas ambientais, devido à grande quantidade de rejeitos originados em sua extração. A utilização do resíduo como agregado possibilita uma solução de reaproveitamento deste material, onde foram realizados ensaios para comprovação dessa viabilidade.

No qual os ensaios de caracterização dos agregados obtiveram resultados satisfatórios uma vez que, não ocorreu nenhuma discrepância entre os valores. Também mostrou que os resultados obtidos para o agregado graúdo e para o agregado miúdo foram bem próximos. Obtiveram resultado como bom e excelente em características como: índice de forma, granulometria, massa específica seca, absorção de água, materiais pulverulentos e outros.

Para o ensaio de granulometria dos agregados as amostras de quartzito obtiveram a curva dentro do que é estabelecido na norma ABNT NBR 7211:2009 e isso favorece a trabalhabilidade do concreto, apontando assim, que os mesmos são viáveis para produção do concreto de cimento Portland branco.

Nos ensaios realizados para analisar o comportamento de resistência do concreto quando submetido a compressão não foram obtidos resultados esperados, devido o cimento Potland branco fornecido pela empresa LPC Argos não possuir realmente a resistência informada, o que ocasionou o concreto não alcançar valores próximo ao que foi determinado na dosagem.

Visualmente, o concreto com o quartzito obteve uma coloração branca desejada, reafirmado a ideia de que os agregados de quartzito podem ser utilizados na produção do concreto branco, ampliando a possibilidade de novos tipos de agregados na produção do concreto branco.

E na questão do ensaio de durabilidade do concreto a reação álcali-sílica obteve uma classificação de R1, que conforme a norma responsável o agregado com a pasta pode vir a expandir, porém a mesma norma especifica maneiras de mitigação desta expansão, que pode ser através da mudança da composição do cimento ou controle através de lítio.

Em geral, foram alcançados resultados satisfatórios e pode-se concluir que o resíduo de quartzito pode ser utilizado como agregado no concreto branco, em se deve observar as questões de mitigação da RAA de acordo com a sua utilização. E o valor da resistência deste estudo foi de valor baixo devido à resistência do cimento e não ao quartzito, logo se utilizar cimento de maiores resistências o concreto também obterá valores proporcionais.

E uma possibilidade de estudo futuro seria a utilização de rejeito de quartzito para produção do cimento branco, devido ao fato deste cimento não ser encontrado na nossa região e possibilitar mais uma opção de aproveitamento do rejeito de quartzito.

REFERÊNCIAS

- AATT. (2006). *Associação dos Amigos da Torre do Tombo*. Acesso em 27 de maio de 2019, disponível em <http://www.aatt.org/site/index.php>
- ADARQUITETURA. (2001). Acesso em 27 de maio de 2019, disponível em Panamérica Park - Condomínio Corporativo: <http://www.adarquitectura.com.br/pt/projetos.asp?codigo=256>
- AGUIAR, C. A. (2006). *Concreto cimento Portland branco estrutural: análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão*. Trabalho de conclusão (mestrado profissional) - Universidades Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ARCHDAILY. (2009). *Church of 2000 / Richard Meier & Partners*. Acesso em 27 de Maio de 2019, disponível em <https://www.archdaily.com/20105/church-of-2000-richard-meier>
- ARCHDAILY. (2011). *Fundação Iberê Camargo / Alvaro Siza*. Acesso em 27 de maio de 2019, disponível em Archdaily: https://www.archdaily.com.br/br/01-2498/fundacao-ibere-camargo-alvaro-siza/2498_2503
- ARCOWEB. (2002). *Prêmio AsBEA 2002: Premiados*. Acesso em 27 de maio de 2019, disponível em <https://arcoweb.com.br/projetodesign/especiais/premio-asbea-2002-edificios-industriais-sidonio-porto-01-12-2002>
- Associação Brasileira da Indústria de Rocha. (2018). Acesso em 31 de Março de 2019, disponível em O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais: http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Producao_Brasileira_Lavra_b.pdf
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (2002). *Guia básico de utilização do cimento portland* (7ed ed.). São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998). *NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). *NBR NM 27 - Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório*. Rio de Janeiro .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2003). *NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro .
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). *NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro .

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR 12821 - Preparação de concreto em laboratório - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR 7389 - Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR NM 26 - Agregados - Amostragem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR NM 53 - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *ABNT NBR 9775 - Agregado miúdo - Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapaman - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 9939 - Agregado graúdo - Determinação do teor de umidade total - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 7809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de vazios pelo método do paquímetro*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011). *NBR 9935 - Agregados Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011). *NBR 7222 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro.
- BAUER, L. A. (2013). *Materiais de Construção* (5ª ed., Vol. v.1). (J. F. Dias, Ed.) Rio de Janeiro: LTC.

- BENITEZ, A., BALZAMO, H., MIGOYA, E., & XXX. (2002). In: *4º Jornadas de desarrollo e innovación*. Acesso em janeiro de 2003, disponível em Homígones de alta prestación elaborados com cemento gris y cemento blanco: <http://www.inti.gov.ar/cgi-bin/htsearch>
- BUCHER, H. R. (1989). *Estimativa da resistências à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação a/c*. ABCP, São Paulo.
- CHIODI, F. C. (1995). *Aspectos Técnicos e Econômicos do Setor de Rochas Ornamentais*. Rio de Janeiro: CNPq/CETEM.
- CHIODI, F. C., ARTUR, A. C., RODRIGUES, E. d., & xxxxxxx. (2005). *Aspectos geológicos, petrográficos e químicos de interesse para o aproveitamento economico dos quartzitos foliados de São Thomé das Letras - MG*. UNESP, São Paulo.
- COSTA, R. M. (2004). *Análise de Propriedades Mecânicas do Concreto Deteriorado Pela Ação de Sulfato Mediante Utilização do UPV*. (Vol. 246 f). Belo Horizonte: Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
- DELLINGHAUSEN, L. d. (2009). *Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento portland branco e escória de altor forno*. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- DESCHAMPS, E., MAIA JUNIOR, B., COSTA, C., SANTOS, M. G., KELLER, W. S., CARVALHO FILHO, C. A., . . . PINTO, C. L. (2002). *Controle ambiental na mineração de quartzito - Pedra São Tomé* (Vol. 204p.). Belo Horizonte: Segrag editora e gráfica limitada.
- DULLES. (2009). *Dulles Internacional*. Acesso em 27 de maio de 2019, disponível em <https://www.flydulles.com/iad/portuguese-portugu%C3%AAs>
- EDUCAÇÃO, M. D. (2007). *Rochas Ornamentais*. Secretária de Educação Profissional e Tecnológica, Brasília.
- FARIAS, M. M., & PALMEIRA, E. M. (2007). *Agregados para a construção civil*. Inbracon, São Paulo.
- FEAM. (2009). *Plano de ação para sustentabilidade do setor de rochas ornamentais-quartzito São Thomé das Letras*. Belo Horizonte.
- FEAM, F. E. (2009). *Plano de Ação para Sustentabilidade do Setor de Rochas Ornamentais - Quartzito São Thomé das Letras*. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Fundação do Meio Ambiente .

- FERNANDES, T. M., GODOY, A. M., & FERNANDES, N. H. (2003). *Aspectos geológicos e tecnológicos dos quartzitos do centro produtor de São Thomé das Letras (MG)*. UNESP, Geociências, São Paulo.
- FLEISCHER, D. I. (2006). *São Thomé das Letras e Lagoa Santa: mineração, turismo e risco ao patrimônio histórico e natural*. Cadernos de Campo, São Paulo .
- FONSECA, A. A., & NUNES, Â. (1998). *Betão branco: fabrico, características e utilização estrutural*. In: 2ª Jornada de Estruturas de Betão. Portugal: Anais.
- FONTES, M. P. (1984). *Introdução ao estudo de minerais e rochas*. Imprensa Universitária da UFV. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV 23p.
- FRANCKLIN, I. J. (2009). *Estudo Tecnológico em rejeitos de quartzitos do sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto* (Vol. Dissertação (mestrado)). Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia .
- FRAZÃO, E. B. (2002). *Tecnologia de rochas na construção civil*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental .
- FRAZÃO, E. B., & Paraguassu, A. B. (1998). *Geologia do Brasil*. (A. M. Oliveira, & S. Brito, Eds.) São Paulo: ABGE.
- FRAZÃO, E. B., PARAGUASSÚ, A. B., RODRIGUES, J. E., & RIBEIRO, R. P. (2014). *Indústria da Pedra: da extração à aplicação final*. EESC-USP, São Carlos.
- GOMES, M. A. (2000). *Redução de impacto ambiental através da melhoria do processo de lavra de quartzito micáceo no município de São Thomé das Letras - Minas Gerais* (Vol. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas)). Belo Horizonte, MG.: Escola de Engenharia .
- GOMES, R. L. (2000). *Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimento entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da bacia do Paraná*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- KATZ, A. (2002). *Propeties of concrete made with recycled aggregate freom partially hydrated ol concrete*. Cement and Concrete Research.
- KIRCHHEIM , A., PASSUELLO, A., DAL MOLIN, D. C., & SILVA FILHO, L. P. (2011). *Concreto: Ciência e Tecnologia* (1ª ed., Vol. II). São Paulo: IBRACON.
- KIRCHHEIM, A. P. (2003). *Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da cabornatação e absorção capilar*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Porto Alegre.

- MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. J. (2008). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini.
- NERO, J. M., & NUNES, A. (1999). *Betão Branco: Fundamentos para prescrição e utilização do betão branco*. Lisboa - Portugal: Secil Cimentos.
- PASSUELO, A. (2004). *Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concreto à base de cimento branco*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- PERI. (2005). Acesso em 27 de maio de 2019, disponível em Auditorio de Tenerife, Spain: <https://www.peri.com/en/projects/cultural-buildings/auditorio-de-tenerife.html>
- PETRUCCI, E. G. (1987). *Concreto de cimento Portland* (11ed ed.). Rio de Janeiro: Globo.
- PETRY, N. d. (2015). *Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- POPP, J. H. (2017). *Geologia geral* (7º ed.). (LTC, Ed.) Rio de Janeiro.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. (2005). *CONCRETE TECHNOLOGY TODAY*. Acesso em 25 de abril de 2019, disponível em What is white cement?: <http://www.cement.org>
- RECENA, F. A. (2011). *Dosagem e controle da qualidade de concretos* (3ª ed.). Porto Alegre: Porto Alegre.
- RIBEIRO, C. C. (2013). *Materiais de Construção Civil* (4ª ed.). Belo Horizonte: UFMG: Escola de Engenharia da UFMG.
- RODRIGUES, P. P. (1998). *Parâmetros de dosagem do concreto*. IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo.
- RUSSO, M. L. (2011). *Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartzito* (Vol. Tese de Doutorado). (UFMG, Ed.) Belo Horizonte: Escola de Engenharia.
- SILVA FILHO, L. C., DAL MOLIN, D. C., KIRCHHEIM, A. P., PASSUELO, A., & PASS, V. F. (novembro de 2004). USO DO CONCRETO BRANCO ESTRUTURAL: Museu Iberê Camargo. *II Seminário de Patologia das Edificações: "Novos Materiais e Tecnologias Emergentes"*, p. 11.
- SKALNY, J., MARCHAND, J., ODLER, I., & xxxx. (2002). *Sulfate Attack on Concrete*. (1ª Edição. ed.). London and New York:: Son Press.
- TEXEIRA, W., FAIRCHILD, T. R., TOLEDO, M. C., & TAIOLI, F. x. (2009). *Decifrando a Terra* (2ed. ed.). São Paulo: Companhia Editora Nacional.

APÊNDICE A – Valores limites para a curva granulométrica do agregado graúdo e agregado miúdo

Tabela 45: Limites da composição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5mm	0	0	0	0
6,3mm	0	0	0	7
4,75mm	0	0	5	10
2,36mm	0	10	20	25
1,18mm	5	20	30	50
600µm	15	35	55	70
300µm	50	65	85	95
150µm	85	90	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211:2009

Tabela 46: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75mm	-	-	-	-	0-5
63mm	-	-	-	-	5-30
50mm	-	-	-	0-5	75-100
37,5mm	-	-	-	5-30	90-100
31,5mm	-	-	0-5	75-100	95-100
25mm	-	0-5	5-25	87-100	-
19mm	-	2-15	65-95	95-100	-
12,5mm	0-5	40-65	92-100	-	-
9,5mm	2-15	80-100	95-100	-	-
6,3mm	40-65	92-100	-	-	-
4,75mm	80-100	95-100	-	-	-
2,36mm	95-100	-	-	-	-

Fonte: ABNT NBR 7211:2009

**APÊNDICE B – Valores coletados para determinação do índice de forma do agregado
gráudo**

Comp	Esp	23,23	16,17	27,06	16,75	35,01	14,34	26,84	21,41
31,42	9,42	19,92	10,24	35,72	16,09	26,86	15,5	26,83	22,21
27,84	19,44	29,85	9,92	26,34	10,76	27,57	17,89	27,73	16,13
21,01	19,33	35,05	17,35	22,96	9,62	26,84	21,41	22,98	19,84
25,23	16,16	27,31	13,42	25,14	14,41	26,83	22,21	24,94	19,91
26,76	20,45	27,12	21,6	29,08	20,74	27,73	16,13	29,42	9,02
36,33	8,76	24,74	14,42	26,45	13,85	22,98	19,84	27,57	17,89
32,32	10,61	35,61	13,7	28,59	7,05	29,08	20,74	26,84	21,41
26,78	10,78	37,09	15,68	22,38	19,62	26,45	13,85	26,83	22,21
29,09	11,74	27,94	13,93	25,26	16,28	28,59	7,05	27,73	16,13
34,62	11,6	22,11	19,3	25,14	13,13	22,38	19,62	22,98	19,84
35,01	14,34	25,14	14,41	28,93	13,3	25,26	16,28	24,94	19,91
26,86	15,5	29,08	20,74	37,05	15,75	25,14	13,13	29,42	9,02
27,57	17,89	26,45	13,85	33,12	14,32	27,97	12,91	25,22	13,27
26,84	21,41	28,59	7,05	27,57	17,89	21,96	18,17	27,97	12,91
26,83	22,21	22,38	19,62	26,84	21,41	24,77	15,4	21,96	18,17
27,73	16,13	25,26	16,28	26,83	22,21	31,19	8,62	24,77	15,4
22,98	19,84	25,14	13,13	27,73	16,13	28,72	10,26	31,19	8,62
24,94	19,91	28,93	13,3	22,98	19,84	31,42	9,42	28,72	10,26
29,42	9,02	37,05	15,75	24,94	19,91	27,84	19,44	27,05	11,28
25,22	13,27	33,12	14,32	29,42	9,02	21,01	19,33	30,6	12,21
27,97	12,91	19,98	19,61	25,22	13,27	25,23	16,16	27,06	16,75
21,96	18,17	31,68	12,67	27,97	12,91	26,76	20,45	35,72	16,09
24,77	15,4	34,36	14,33	21,96	18,17	36,33	8,76	36,48	16,22
31,19	8,62	27,53	17,08	24,77	15,4	32,32	10,61	36,33	8,76
28,72	10,26	27,94	13,93	31,19	8,62	26,78	10,78	32,32	10,61
27,05	11,28	22,11	19,3	28,72	10,26	29,09	11,74	26,78	10,78
30,6	12,21	25,14	14,41	27,05	11,28	34,62	11,6	29,09	11,74
27,06	16,75	29,08	20,74	30,6	12,21	35,01	14,34	34,62	11,6
35,72	16,09	26,45	13,85	27,06	16,75	26,86	15,5	35,01	14,34
26,34	10,76	28,59	7,05	35,72	16,09	27,57	17,89	26,86	15,5
22,96	9,62	22,38	19,62	26,34	10,76	26,84	21,41	27,57	17,89
29,46	14,16	25,26	16,28	22,96	9,62	26,83	22,21	26,84	21,41
47,05	11,35	25,14	13,13	29,46	14,16	27,73	16,13	22,11	19,3
36,48	16,22	27,97	12,91	47,05	11,35	22,98	19,84	25,14	14,41
31,21	9,29	21,96	18,17	36,48	16,22	24,94	19,91	29,08	20,74
31,57	15,42	24,77	15,4	36,33	8,76	29,42	9,02	26,45	13,85
31,48	11,31	31,19	8,62	32,32	10,61	28,93	13,3	Média	
19,2	13,42	28,72	10,26	26,78	10,78	37,05	15,75	28,25	14,90
26,61	17,87	27,05	11,28	29,09	11,74	33,12	14,32		
26,61	21,12	30,6	12,21	34,62	11,6	27,57	17,89		

APÊNDICE C – Valores coletados para determinação da curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos

Tabela 47: Valores obtido no ensaio de granulometria do agregado graúdo

AGREGADO GRAÚDO			
Peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	%Retida Acumulada
25	16,0	3,2	3,2
19	34,0	6,8	10,0
12,5	220,0	44,0	54,0
9,5	192,0	38,4	92,4
6,3	30,0	6,0	98,4
4,8	8,00	1,6	100,0
Total	500,0		
Dimensão Máxima Característica (DMC) =			25
Módulo de Finura =			2,024

Fonte: Autor (2019)

Tabela 48: Valores obtido no ensaio de granulometria do agregado miúdo

AGREGADO MIÚDO			
Peneira (mm)	Massa (g)	% Retida	%Retida Acumulada
4,8	8,00	2,6	2,6
2,4	38,00	12,5	15,2
1,2	30,00	9,9	25,1
0,6	60,00	19,8	45
0,3	90,00	29,7	75
0,15	54,00	17,8	92
Fundo	20,00	7,6	100
Total	300,0		
Dimensão Máxima Carcterística (DMC) =			4,75
Módulo de Finura =			3,548

Fonte: Autor (2019)

ANEXO A – Figuras de diversas obras em concreto branco

Figura 40 -Vista das fachadas e interior da Igreja Dives in Misericordia, em Roma, Itália.



Fonte: (ARCHDAILY, Church of 2000 / Richard Meier & Partners, 2009)

Figura 41 -Fase de construção e vistas aéreas do Auditório Tenerife, em Santa Cruz de Tenerife, Espanha.



Fonte: (PERI, 2005)

Figura 42 -Fachadas externas e internas do Aeroporto de Dulles, em Virginia, EUA.




Fonte: (DULLES, 2009)

Figura 43 -Fachadas externas das Torres do Tombo, em Lisboa, Portugal.



Fonte: (AATT, 2006)

ANEXO B – Laudo do cimento branco disponibilizado pela empresa

		ANALİZ RAPORU <i>Analysis Report</i>		
Rapor Tarihi <i>Report Date</i>	28/02/2019			
Rapor No <i>Report No</i>	70660			
NUMUNENİN ADI <i>Sample Type</i>	CEM I 52,5 R (TS EN 197-1:2012) - BPC 52,5 R / 85 (TS 21:2015)			
YÜKLENEN MİKTAR <i>Loaded Quantity</i>	270.000 KGS			
KONŞİMENTO TARİH&NO <i>Date&No. Of B/L</i>	28.01.2019 & HLCUIZ1190158943			
YÜKLEME LİMANI <i>Port Of Loading</i>	MERSİN PORT			
BOŞALTIMA LİMANI <i>Port Of Discharge</i>	SANTOS, SP, BRAZIL			
KİMYASAL ÖZELLİKLER <i>CHEMICAL REQUIREMENTS</i>		ELDE EDİLEN DEĞERLER <i>Obtained Results</i>	TS EN 197-1 SINIR DEĞERLERİ <i>EN 197-1 Standard Limit Values</i>	DENEY METODLARI <i>Test Methods</i>
Kükürt Trioksit (SO ₃) <i>Sulfur Trioxid</i>	%	3,29	Max. 4,0	TS EN 196-2
Klorür (Cl ⁻) <i>Chloride</i>	%	0,0047	Max. 0,1000	TS EN 196-2
Kızdırma Kaybı <i>Loss on Ignition</i>	%	3,74	Max. 5,0	TS EN 196-2
Çözünmeyen Kalıntı <i>Insoluble Residue</i>	%	0,11	Max. 5,0	TS EN 196-2
Sodyum Oksit (Na ₂ O)* <i>Sodium Oxide*</i>	%	0,91	-	TS EN 196-2
Potasyum Oksit (K ₂ O)* <i>Potassium Oxide*</i>	%	0,35	-	TS EN 196-2
Toplam Alkali (Na ₂ O Eşdeğeri) <i>Total Alkali (Na₂O Equivalent)</i>	%	1,14	-	TS EN 196-2
Beyazlık <i>Whiteness</i>	%	85,57	Min. 85	TS 21
FİZİKSEL ÖZELLİKLER <i>PHYSICAL REQUIREMENTS</i>				
Özgül ağırlık <i>Specific Gravity</i>	gr/cm ³	3,05	-	TS EN 196-6
Özgül Yüzey <i>Specific Surface</i>	cm ² /g	4480	-	TS EN 196-6
Priz Başlangıcı <i>Initial Setting Time</i>	dakika <i>minute</i>	115	Min. 45	TS EN 196-3
Hacim Genleşmesi <i>Soundness (Le Chatelier)</i>	mm	1	Max. 10	TS EN 196-3
2 Günlük Basınç Dayanımı <i>2 Days Compressive Strength</i>	MPa	35,1	Min. 30,0	TS EN 196-1
28 Günlük Basınç Dayanımı <i>28 Days Compressive Strength</i>	MPa		Min. 52,5	TS EN 196-1
Kalite Kontrol ve Proses Yöneticisi <i>Quality Control and Process Supervisor</i>		Kalite Kontrol Mühendisi <i>Quality Control Engineer</i>		
<p>Bu rapor deney laboratuvarının izni olmadan çoğaltılamaz. <i>This report cannot be copied without permission of the test laboratory.</i></p> <p>Deney sonuçları yukarıda tanımlanan numuneye aittir. <i>Test results belong to the sample defined above.</i></p> <p>*Harmonize ürün standardında tanımlı bir gereklilik bulunmamaktadır. <i>There is no defined requirement in the harmonized standard.</i></p>				