

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RICARDO RODRIGUES FERREIRA

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO PRODUZIDO COM A AREIA
NATURAL E AREIA ARTIFICIAL**

Goiânia, GO
2019

Ricardo Rodrigues Ferreira

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO PRODUZIDO COM A AREIA
NATURAL E AREIA ARTIFICIAL**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Campus Goiânia, como parte dos
requisitos necessários para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Civil**

**Orientador: Prof. MSc. Humberto
Rodrigues Mariano.**

**Goiânia, GO
2019**

F383p Ferreira, Ricardo Rodrigues.

Propriedades mecânicas de concreto produzido com a areia natural e areia artificial / Ricardo Rodrigues Ferreira. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.

116 f. : il.

Orientador: Prof. MSc. Humberto Rodrigues Mariano.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Departamento das Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Concreto – propriedades mecânicas. 2. Areia natural. 3. Areia artificial. I. Mariano, Humberto Rodrigues (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 691

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: RICARDO RODRIGUES FERREIRA

Matrícula: 20151011050012

Título do Trabalho: PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO PRODUZIDO COM A AREIA NATURAL E AREIA ARTIFICIAL

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia - GO, 27/03/2021
Local Data

Ricardo Rodrigues Ferreira

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ricardo Rodrigues Ferreira

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO PRODUZIDO COM A AREIA
NATURAL E AREIA ARTIFICIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, Campus
Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Civil

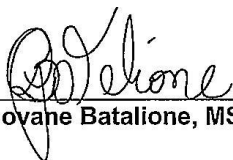
Aprovado em 18 de dezembro de 2019:



Humberto Rodrigues Mariano, MSc. (IFG)
(Orientador)



Matilde Batista Melo, MSc. (IFG)



Giovane Batalione, MSc. (IFG)

Goiânia, GO
2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, como criador, por nos conceder a vida e sabedoria para alcançarmos nossos objetivos.

Aos meus pais, Dona Rosa e Francisco que sempre me apoiaram de forma incondicional. À minha irmã Luciana pelo apoio sempre que necessário. Ao meu filho Caio pelo amor compartilhado.

Aos familiares que compreenderam a importância da realização desta pesquisa e pacientemente relevaram as ausências em decorrência do tempo dedicado.

Ao professor Msc. Humberto Rodrigues Mariano, que desde o início soube conduzir a pesquisa, esclarecendo pontualmente às dúvidas e questionamentos acerca do tema proposto, sempre contribuindo de maneira produtiva.

Aos técnicos Sérgio Azevedo Coelho e Alfredo Jardim Portella, do Laboratório de materiais de construção do IFG – Campus Goiânia, sem os quais não seria possível a conclusão desta pesquisa. Estes contribuíram ativamente para a realização deste estudo não medindo esforços para a execução dos ensaios.

Às estagiárias Káren Cristina de Oliveira Farias e Luar de Souza Carmo do Laboratório de materiais de construção do IFG – Campus Goiânia, pela ajuda dedicada à realização desta pesquisa.

À empresa Redimix, representada pelo Engenheiro Luis Carlos, que acreditou na pesquisa proposta disponibilizando a brita e a areia artificial necessárias à realização desta.

Aos professores examinadores Msc. Matilde Batista de Melo e Msc. Giovane Batalione pela avaliação construtiva da pesquisa.

RESUMO

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO PRODUZIDO COM A AREIA NATURAL E AREIA ARTIFICIAL

AUTOR: Ricardo Rodrigues Ferreira
ORIENTADOR: Humberto Rodrigues Mariano

A pesquisa propõe a verificação das propriedades mecânicas do concreto produzido com a areia natural e areia artificial. Em virtude dos aspectos relacionados ao concreto, dentre os quais destacam-se: ser largamente utilizado na construção civil; possuir como um dos seus principais componentes a areia; aumento de restrições legais impostas à exploração da areia natural embasadas, principalmente, pelo grande impacto ambiental causado pela atividade; e o crescente aumento nos custos do produto decorrente do esgotamento das jazidas próximas aos centros consumidores. Diante deste cenário, tornam-se relevantes estudos envolvendo materiais, que possam substituir esse agregado miúdo na mistura. Uma das alternativas é a utilização de areia artificial em substituição à areia natural na produção do concreto. Porém, essa substituição não pode ser feita de forma aleatória. Então, neste estudo foram produzidos três traços diferentes de concreto para os dois tipos de areia. Para tanto, foram executados ensaios de caracterização dos materiais conforme as normas pertinentes, dosagem do concreto pelo método IPT/EPUSP e ensaios para determinação da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Finalmente, foram analisadas as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com a areia natural e a areia artificial. Verificou-se então, que o concreto produzido com areia artificial apresentou melhores propriedades mecânicas nos traços pobre e básico, ante o abatimento determinado e as características dos materiais utilizados. Considera-se que o objetivo da pesquisa foi contemplado, comprovando-se a possibilidade de substituição total da areia natural pela areia artificial na produção de concreto.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas do concreto. Areia natural. Areia artificial.

ABSTRACT

MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE PRODUCED WITH NATURAL SAND AND ARTIFICIAL SAND

AUTHOR: Ricardo Rodrigues Ferreira
ADVISOR: Humberto Rodrigues Mariano

The research proposes the verification of the mechanical properties of the concrete produced with natural sand and artificial sand. Due to aspects related to concrete, among which the following stand out: being widely used in civil construction; having sand as one of its main components; increase in legal restrictions imposed on the exploitation of natural sand based mainly on the great environmental impact caused by the activity; and the growing increase in product costs due to the exhaustion of deposits near consumer centers. In view of this scenario, studies involving materials that can replace this fine aggregate in the mixture become relevant. One of the alternatives is the use of artificial sand to replace natural sand in the production of concrete. However, this substitution cannot be done at random. So, in this study, three different concrete strokes were produced for the two types of sand. For this purpose, tests were carried out to characterize the materials according to the relevant standards, dosage of the concrete by the IPT / EPUSP method and tests to determine the compressive strength, tensile strength by diametrical compression and modulus of elasticity. Finally, the mechanical properties of the concretes produced with natural sand and artificial sand were analyzed. It was found, then, that the concrete produced with artificial sand had better mechanical properties in the poor and basic lines, given the determined slump and the characteristics of the materials used. It is considered that the objective of the research was contemplated, proving the possibility of total substitution of natural sand by artificial sand in the production of concrete.

Keywords: Mechanical properties of concrete. Natural sand. Artificial sand.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Fluxograma de fabricação do cimento Portland.....	16
Figura 2.2 -	Nomenclatura do cimento Portland.....	19
Figura 2.3 -	Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.....	20
Figura 2.4 -	Extração de areia natural.....	30
Figura 2.5 -	Extração de cascalho.....	30
Figura 2.6 -	Produção de areia de brita.....	31
Figura 2.7 -	Escoria de alto-forno.....	31
Figura 2.8 -	Pedra britada.....	32
Figura 2.9 -	Curvas de distribuição granulométrica.....	33
Figura 2.10 -	Fluxograma de uma usina convencional de britagem de rocha compacta para produção de agregado.....	41
Figura 2.11 -	Ensaio de tração direta.....	59
Figura 2.12 -	Disposição do corpo de prova.....	60
Figura 2.13 -	Dispositivo de ensaio.....	62
Figura 2.14 -	Ruptura fora do terço médio.....	62
Figura 2.15 -	Módulo de deformação tangente inicial.....	63
Figura 3.1 -	Planejamento dos ensaios.....	65
Figura 4.1 -	Valores médios de resistência à compressão do cimento.....	72
Figura 4.2 -	Resultado do ensaio de composição granulométrica da areia natural.....	75
Figura 4.3 -	Resultado do ensaio de composição granulométrica da areia artificial.....	76
Figura 4.4 -	Resultado do ensaio de composição granulométrica da brita.....	85
Figura 4.5 -	Resistência à compressão do traço básico.....	93
Figura 4.6 -	Módulo de elasticidade do traço básico.....	94
Figura 4.7 -	Resistência à tração por compressão diametral do traço básico...	94
Figura 4.8 -	Resistência à compressão do traço pobre.....	95
Figura 4.9 -	Módulo de elasticidade do traço pobre.....	96
Figura 4.10 -	Resistência à tração por compressão diametral do traço pobre....	96
Figura 4.11 -	Resistência à compressão do traço rico.....	97
Figura 4.12 -	Módulo de elasticidade do traço rico.....	98
Figura 4.13 -	Resistência à tração por compressão diametral do traço rico.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Propriedades dos principais componentes do clínquer.....	17
Tabela 2.2 -	Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.....	19
Tabela 2.3 -	Determinações facultativas.....	20
Tabela 2.4 -	Limites de composição do cimento Portland.....	21
Tabela 2.5 -	Requisitos físicos e mecânicos.....	27
Tabela 2.6 -	Requisitos químicos do cimento Portland.....	27
Tabela 2.7 -	Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária.....	35
Tabela 2.8 -	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	36
Tabela 2.9 -	Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material.....	37
Tabela 2.10 -	Limite da composição granulométrica do agregado graúdo.....	42
Tabela 2.11 -	Classificação das britas.....	43
Tabela 2.12 -	Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do material.....	44
Tabela 4.1 -	Resultados obtidos no Aparelho Vicat.....	73
Tabela 4.2 -	Dimensões do recipiente – areia natural.....	77
Tabela 4.3 -	Dimensões do recipiente – areia artificial.....	79
Tabela 4.4 -	Massas da primeira determinação – areia natural.....	81
Tabela 4.5 -	Massas da segunda determinação – areia natural.....	82
Tabela 4.6 -	Massas da primeira determinação – areia artificial.....	83
Tabela 4.7 -	Massas da segunda determinação – areia artificial.....	83
Tabela 4.8 -	Dimensões do recipiente – brita.....	86
Tabela 4.9 -	Valores das massas seca, saturada e submersa.....	88
Tabela 4.10 -	Traço básico produzido com areia natural.....	90
Tabela 4.11 -	Traço básico produzido com areia artificial.....	90
Tabela 4.12 -	Traço pobre produzido com areia natural.....	91
Tabela 4.13 -	Traço pobre produzido com areia artificial.....	91
Tabela 4.14 -	Traço rico produzido com areia natural.....	92
Tabela 4.15 -	Traço rico produzido com areia artificial.....	92
Tabela 5.1 -	Massa específica do concreto.....	100
Tabela 5.2 -	Abatimento e relação água/cimento (a/c) dos concretos.....	100
Tabela 5.3 -	Consumo de água dos concretos.....	101
Tabela 5.4 -	Variação da resistência à compressão.....	102
Tabela 5.5 -	Variação do módulo de elasticidade.....	103
Tabela 5.6 -	Variação da resistência à tração por compressão diametral.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Água/cimento
CAA	Concreto autoadensável
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CP	Cimento Portland
CRF	Concreto reforçado com fibras
DMC	Dimensão máxima característica
E_{ci}	Módulo de deformação tangente inicial
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EVA	Etileno Acetato de Vinila
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
Fig.	Figura
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
VUP	Vida útil de projeto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Problema.....	14
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	Justificativa.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1	Cimento Portland.....	17
2.1.1	Conceito.....	17
2.1.2	Fabricação do cimento Portland.....	18
2.1.3	Tipos de cimento Portland.....	20
2.1.3.1	Cimento Portland comum.....	23
2.1.3.2	Cimento Portland composto.....	24
2.1.3.3	Cimento Portland de alto-forno.....	24
2.1.3.4	Cimento Portland pozolânico.....	24
2.1.3.5	Cimento Portland de alta resistência inicial.....	25
2.1.3.6	Cimentos especiais.....	25
2.1.3.6.1	Cimento Portland resistente a sulfatos.....	25
2.1.3.6.2	Cimento Portland de baixo calor de hidratação.....	25
2.1.3.6.3	Cimento Portland branco.....	25
2.1.3.6.4	Cimento para poços petrolíferos.....	26
2.1.4	Propriedades.....	26
2.1.4.1	Finura.....	26
2.1.4.2	Tempo de pega.....	27
2.1.4.3	Expansibilidade.....	27
2.1.4.4	Calor de hidratação.....	27
2.1.4.5	Resistência à compressão.....	28
2.1.4.6	Retração.....	30
2.1.5	Armazenamento.....	30
2.2	Agregados.....	31
2.2.1	Conceito.....	31
2.2.2	Classificação.....	31
2.2.2.1	Quanto à origem.....	31
2.2.2.1.1	Naturais.....	32
2.2.2.1.2	Artificiais.....	32
2.2.2.2	Segundo a dimensão de suas partículas.....	33
2.2.2.2.1	Agregados miúdos.....	33
2.2.2.2.2	Agregados graúdos.....	34
2.2.2.3	Segundo a massa específica.....	34
2.2.2.3.1	Agregados leves.....	34
2.2.2.3.2	Agregados médios.....	34
2.2.2.3.3	Agregados pesados.....	35
2.2.3	Caracterização e propriedades dos agregados.....	35
2.2.3.1	Agregados miúdos.....	36
2.2.3.1.1	Massa específica e peso unitário.....	36
2.2.3.1.2	Umidade e absorção.....	36
2.2.3.1.3	Granulometria.....	37

2.2.3.1.4	Impurezas.....	39
2.2.3.1.5	Inchamento.....	40
2.2.3.1.6	Areia natural.....	40
2.2.3.1.7	Areia artificial.....	42
2.2.3.2	Agregados graúdos.....	44
2.2.3.2.1	Granulometria.....	44
2.2.3.2.2	Impurezas.....	45
2.2.3.2.3	Forma dos grãos.....	46
2.2.3.2.4	Massa específica e massa unitária.....	47
2.2.3.2.5	Resistência.....	48
2.3	Água de amassamento.....	48
2.4	Produção do concreto.....	49
2.4.1	Caracterização dos materiais.....	49
2.4.2	Dosagem.....	51
2.4.3	Proporcionamento.....	52
2.4.4	Mistura.....	52
2.4.5	Transporte.....	53
2.4.6	Lançamento.....	54
2.4.7	Adensamento.....	55
2.4.8	Cura.....	55
2.4.9	Tipos de concreto.....	56
2.4.9.1	Convencional.....	56
2.4.9.2	Concreto de alto desempenho.....	57
2.4.9.3	Concreto autoadensável.....	58
2.4.9.4	Concreto reforçado com fibras.....	59
2.5	Propriedades mecânicas do concreto.....	59
2.5.1	Resistência à compressão.....	59
2.5.2	Resistência à tração.....	60
2.5.2.1	Resistência à tração direta.....	61
2.5.2.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	61
2.5.2.3	Resistência à tração na flexão.....	62
2.5.3	Módulo de elasticidade.....	65
3	METODOLOGIA.....	67
3.1	Planejamento dos ensaios.....	67
3.2	Variáveis independentes.....	68
3.2.1	Método de dosagem.....	68
3.2.2	Abatimento do tronco de cone.....	69
3.2.3	Tipo de cimento.....	69
3.2.4	Tipos de agregado miúdo.....	69
3.2.5	Tipo de agregado graúdo.....	70
3.2.6	Água de amassamento.....	70
3.2.7	Moldagem dos corpos de prova.....	70
3.2.8	Tipo de cura.....	70
3.3	Variáveis dependentes.....	70
3.3.1	Resistência à compressão.....	70
3.3.2	Módulo de elasticidade.....	71
3.3.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	71
3.4	Caracterização dos materiais.....	72
3.4.1	Cimento.....	72
3.4.2	Agregado miúdo.....	72

3.4.3	Agregado graúdo.....	73
3.4.4	Concreto no estado fresco.....	73
3.4.5	Concreto no estado endurecido.....	73
4	RESULTADOS.....	74
4.1	Caracterização dos materiais.....	74
4.1.1	Cimento.....	74
4.1.1.1	Determinação da resistência à compressão.....	74
4.1.1.2	Determinação da pasta de consistência normal.....	75
4.1.1.3	Determinação dos tempos de pega.....	76
4.1.1.4	Determinação da finura do cimento Portland por meio da peneira nº 200.....	76
4.1.2	Agregados miúdos.....	77
4.1.2.1	Determinação da composição granulométrica – areia natural.....	77
4.1.2.2	Determinação da composição granulométrica – areia artificial.....	78
4.1.2.3	Determinação da massa unitária – areia natural.....	79
4.1.2.4	Determinação da massa unitária – areia artificial.....	80
4.1.2.5	Determinação da massa específica – areia natural.....	83
4.1.2.6	Determinação da massa específica – areia artificial.....	85
4.1.3	Agregado graúdo.....	86
4.1.3.1	Determinação da composição granulométrica.....	86
4.1.3.2	Determinação da massa unitária.....	88
4.1.3.3	Determinação da massa específica.....	89
4.2	Produção do concreto.....	91
4.2.1	Traço básico.....	91
4.2.2	Traço pobre.....	93
4.2.3	Traço rico.....	94
4.3	Ensaio de concreto.....	95
4.3.1	Traço básico.....	95
4.3.2	Traço pobre.....	97
4.3.3	Traço rico.....	99
5	DISCUSSÕES.....	101
5.1	Resistência à compressão do cimento.....	101
5.2	Tempos de início e fim de pega.....	101
5.3	Massa específica do concreto.....	102
5.4	Relação água/cimento.....	102
5.5	Ensaio do concreto no estado endurecido.....	103
5.5.1	Resistência à compressão.....	104
5.5.2	Módulo de elasticidade.....	105
5.5.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	106
6	CONCLUSÃO.....	108
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

Metha e Monteiro (1994) destacam três razões principais que justificam o concreto ser o material mais utilizado na engenharia: possui excelente resistência à água, que representa uma vantagem perante o aço comum e a madeira, por exemplo; fácil moldagem de elementos estruturais, numa variedade de formas e tamanhos; e, baixo custo de produção com rápida disponibilidade no canteiro.

Geralmente, é constituído por cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água. As variações nas características destes materiais bem como em suas proporções conferem propriedades específicas ao concreto. Além disso, a necessidade de melhorias em suas características, fez com que se acrescentassem outros constituintes à mistura, materiais estes, destinados a proporcionar propriedades especiais ao concreto, tanto em seu estado fresco quanto no endurecido, denominados de aditivos e/ou adições.

A qualidade do concreto dependerá primeiramente da qualidade dos materiais componentes. De posse de materiais de boa qualidade, é preciso misturá-los nas proporções adequadas. Neste proporcionamento, deve-se ter em conta a relação entre cimento e agregado, a divisão do agregado em miúdo e graúdo e, principalmente, a relação água/cimento. Necessária ainda se torna, a homogeneização da mistura. Após a mistura, deve o concreto ser transportado, lançado nas fôrmas e adensado corretamente. Um último cuidado se faz ainda necessário: a hidratação do cimento continua por tempo bastante longo, e é preciso que as condições ambientais favoreçam as reações que então se processam. É o que se denomina a cura do concreto (PETRUCCI, 1983, p.3).

1.1 Problema

A produção de areia natural é concentrada na extração em leito de rios, sendo uma pequena parte proveniente de outras fontes (várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, pegmatitos e arenitos decompostos). O escasseamento de áreas passíveis de extração, próximas aos mercados consumidores, e as restrições impostas pelos órgãos de fiscalização ambiental, têm como consequência a exploração de areia em locais cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos, o que impacta diretamente o preço final da areia natural, visto que grande parte do seu valor final depende do frete (ALMEIDA, 2005).

Esse cenário tem levado construtoras e concreteiras a buscarem alternativas viáveis para substituir, de forma parcial ou total, a areia natural do concreto. Uma das

possibilidades é utilizar como agregado miúdo a areia artificial. Porém, essa substituição deve ser embasada em ensaios, necessários para verificar se o concreto obtido atende às características pretendidas.

1.2 Objetivos

Os objetivos do trabalho são divididos em geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Determinar as propriedades mecânicas do concreto produzido com a areia artificial e areia natural, a partir dos materiais previamente caracterizados.

1.2.2 Objetivos específicos

Acerca dos objetivos específicos, pretende-se:

- Avaliar a resistência à compressão do concreto produzido com a areia natural e areia artificial;
- Avaliar o módulo de elasticidade do concreto produzido com a areia natural e areia artificial;
- Avaliar a resistência à tração por compressão diametral do concreto produzido com a areia natural e areia artificial.

1.3 Justificativa

Segundo Teodoro (2013), o elevado consumo de areia (aproximadamente 30% do volume do concreto é constituído por areia) no processo de fabricação de concreto e argamassa, principalmente nos grandes centros, associado ao cenário atual de restrições legais e aumento crescente do custo da areia natural nestes locais, incentivam o mercado consumidor a buscar alternativas viáveis para a substituição.

A constante demanda pela produção de concreto, reforçada pela predominância do uso do concreto armado como método construtivo no Brasil, tem incentivado estudos relacionados à busca de opções viáveis e seguras como alternativa à utilização da areia natural como agregado miúdo.

Essa motivação está fundamentada em questões ambientais decorrentes do processo de extração da areia natural, bem como na diminuição dos custos de produção. Neste caso específico, grande parte do valor final da areia natural provém do transporte das jazidas até as concreteiras, revendedores e canteiros de obras.

Diante deste cenário, esta pesquisa pretende comparar as propriedades do concreto obtidas com a produção utilizando a areia natural e areia artificial.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os aspectos relevantes para a produção do concreto foram detalhados como forma de contextualizar o estudo proposto, facilitando seu entendimento.

2.1 Cimento Portland

Segundo Neville e Brooks (2013), os Gregos e os Romanos foram, possivelmente, os primeiros povos a utilizarem um cimento hidráulico para produção de concreto, sendo o cimento hidráulico descrito pelos autores como um material que através da reação com a água endurece. A reação do cimento sob a ação da água, e o fato do concreto apresentar resistência ao contato com a mesma, inclusive por longo período de tempo, foram às características mais importantes para o seu uso como material de construção.

O cimento portland foi criado por um construtor inglês, Joseph Aspdin, que o patenteou em 1824. Nessa época, era comum na Inglaterra construir com pedra de Portland, uma ilha situada no sul desse país. Como o resultado da invenção de Aspdin se assemelhasse na cor e na dureza a essa pedra de Portland, ele registrou esse nome em sua patente. É por isso que o cimento é chamado cimento portland (ABCP, 2002, p.5).

2.1.1 Conceito

Cimento portland é um aglomerante hidráulico obtido da moagem de clínquer, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, normalmente com uma pequena adição de sulfato de cálcio. O clínquer é um material granular de 3 a 25 mm de diâmetro de um material sinterizado, produzido quando uma mistura de calcário, argila e de componentes químicos como o silício, o alumínio e o ferro é aquecida a altas temperaturas (METHA E MONTEIRO, 1994).

De acordo com Malhotra e Mehta (1996), o concreto de cimento Portland é, hoje, o material mais utilizado na construção civil no mundo todo. Utilizado em grandes barragens, plataformas marinhas, aquedutos e altos edifícios de concreto armado ou protendido, este material encontra aplicação em uma grande variedade de estruturas, mostrando-se, na grande maioria dos casos, uma alternativa viável economicamente,

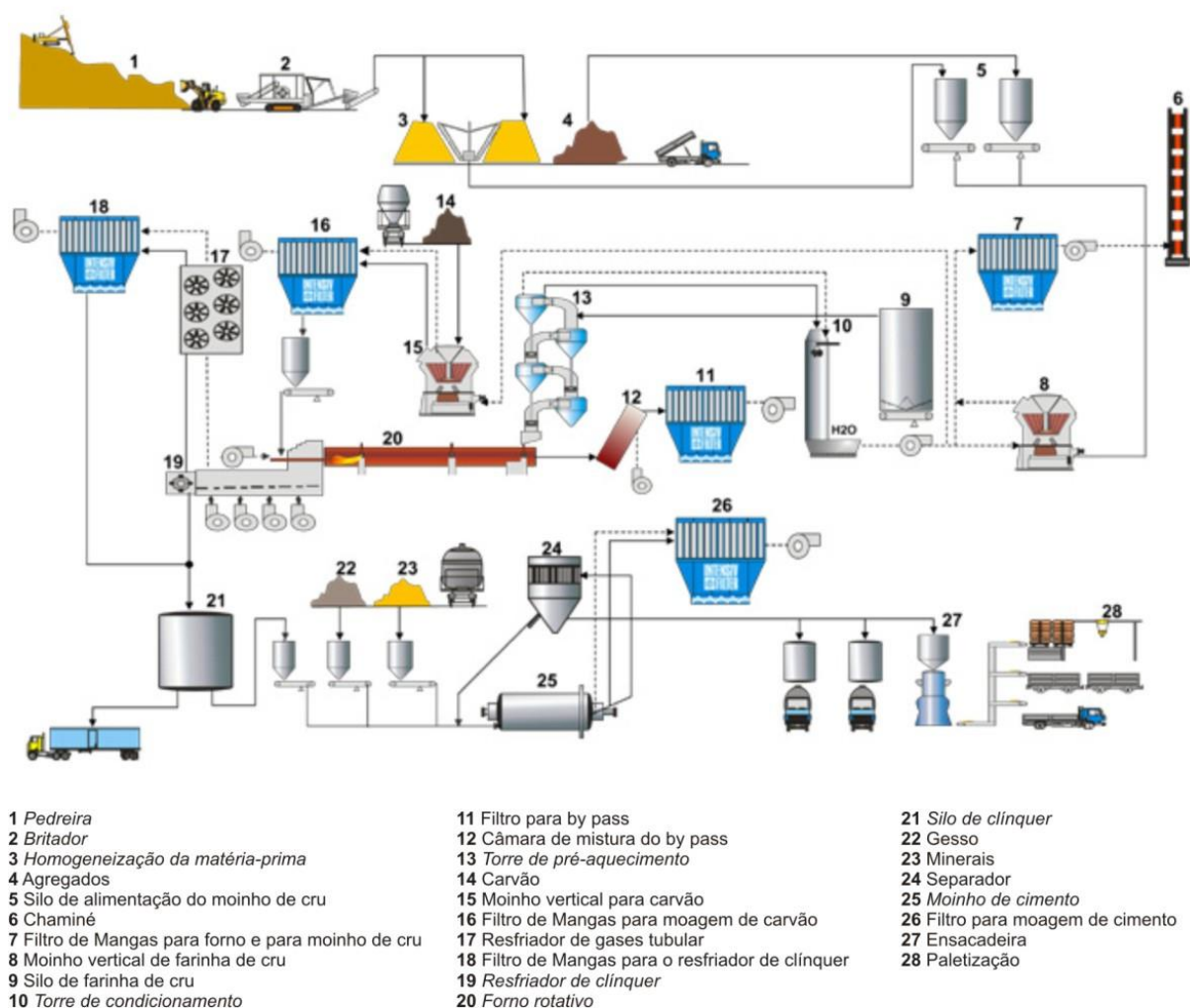
com resistência e durabilidade satisfatórias, e que, em comparação com outros materiais, não exige grande quantidade de energia em sua produção.

O cimento portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento portland. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento (ABCP, 2002, p.6).

2.1.2 Fabricação do cimento Portland

Na Figura 2.1 é representado um fluxograma de fabricação do cimento Portland.

Figura 2.1 – Fluxograma de fabricação do cimento Portland.



Fonte - Cimento Portland e Impactos Ambientais, 2010.

A fabricação do cimento tem como principais matérias primas: calcário (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). A mistura destes componentes é moída e posteriormente introduzida em fornos rotativos horizontais para a queima (clínquerização), onde a temperatura chega a 1450°C , obtendo-se o clínquer. Este tem como principais compostos: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) e aluminato tricálcico (C_3A). As propriedades físicas dos principais compostos do clínquer são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades dos principais compostos do clínquer.

Compostos	Fórmula abreviada	Fórmula química	Variação no clínquer (%)	Propriedades físicas
ALITA Silicato Tricálcico	C_3S	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	50 - 65	Alto calor de hidratação. Alta resistência inicial. Endurecimento rápido.
BELITA Silicato Bicálcico	C_2S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	15 - 25	Baixo calor de hidratação. Baixa resistência inicial. Endurecimento lento.
ALUMINATO Aluminato Tricálcico	C_3A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	6 - 10	Alto calor de hidratação e baixa resistência final. Pega rápida e alta retração. Não resiste aos meios sulfatados.
FERRITA Ferro Aluminato Tetracálcico	C_4AF	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	3 - 8	Não contribui para resistência. Cor escura e endurecimento lento. Resiste aos meios sulfatados.
Cal Livre	C	CaO	0,5 - 1,5	Aceitável apenas em pequenas quantidades. Em elevadas quantidades causam expansibilidade, desprendimento de calor e fissuração.
Sódio	Na	Na_2O	0,3 - 1,5	Expansibilidade por reações Álcali-agregado.
Potássio	K	K_2O	0,3 - 1,5	Expansibilidade por reações Álcali-agregado.
Magnésio	Mg	MgO	0,8 - 6	Pode ocasionar aumento de volume.

Fonte – Ambrozewicz, 2012 (adaptado).

Uma quantidade de gesso (3 a 5%) é adicionada ao clínquer para regular a pega do cimento e então a mistura é novamente moída sendo adicionados outros materiais. Essas adições, usadas em variadas proporções, dão ao cimento propriedades específicas como redução de impermeabilidade, resistência a sulfatos e ambientes agressivos, melhor desempenho e

acabamento. Por fim, o cimento é armazenado em silos, podendo ser enviado a granel ou em sacos para os locais de consumo (COSTA, 2012, p.101).

Além da adição de gesso, que está presente em todos os tipos de cimento portland, o clínquer pode ser misturado ainda às escórias de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos. Cada adição e sua proporção determina o tipo de cimento que será produzido.

Os materiais corretivos mais empregados na indústria do cimento são areia, bauxita e minério de ferro. A areia é utilizada quando ocorre deficiência em SiO_2 ; a mistura de óxidos de alumínio hidratados é utilizada quando ocorre deficiência em alumínio nas matérias primas; e o minério de ferro (geralmente hematita) é utilizada quando ocorre deficiência em ferro (Balanço Mineral Brasileiro, 2001, p.1).

São utilizados dois métodos para produção do cimento. O processo de extração e britagem dos materiais é semelhante nos dois. As particularidades estão no processo de mistura, moagem e queima. No processo úmido, a mistura é moída com adição de aproximadamente 40% de água, entrando no forno em forma de pastosa. No processo seco, a mistura é moída totalmente seca e vai para o forno em forma de pó. O produto final obtido é o mesmo em ambos processos, porém no seco economiza-se energia por não haver água adicionada para evaporar na queima.

2.1.3 Tipos de cimento Portland

A nomenclatura dos cimentos é precedida da sigla CP que corresponde à abreviatura de Cimento Portland, seguida por algarismos romanos de I a V, que indicam o tipo de cimento. Posteriormente, são representadas por letras as adições feitas em sua produção e finalmente a resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias em MPa representa a classe do mesmo. Na Tabela 2.2 são apresentados a designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland. O significado da sigla que identifica o tipo de cimento pode ser observado na Figura 2.2. Na Tabela 2.3 são apresentadas as determinações facultativas do cimento Portland e na Figura 2.3 estão representadas as evoluções médias de resistência à compressão em função do tempo dos principais tipos de cimento Portland.

Tabela 2.2 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b —
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	—
	Não estrutural	CPB	—	

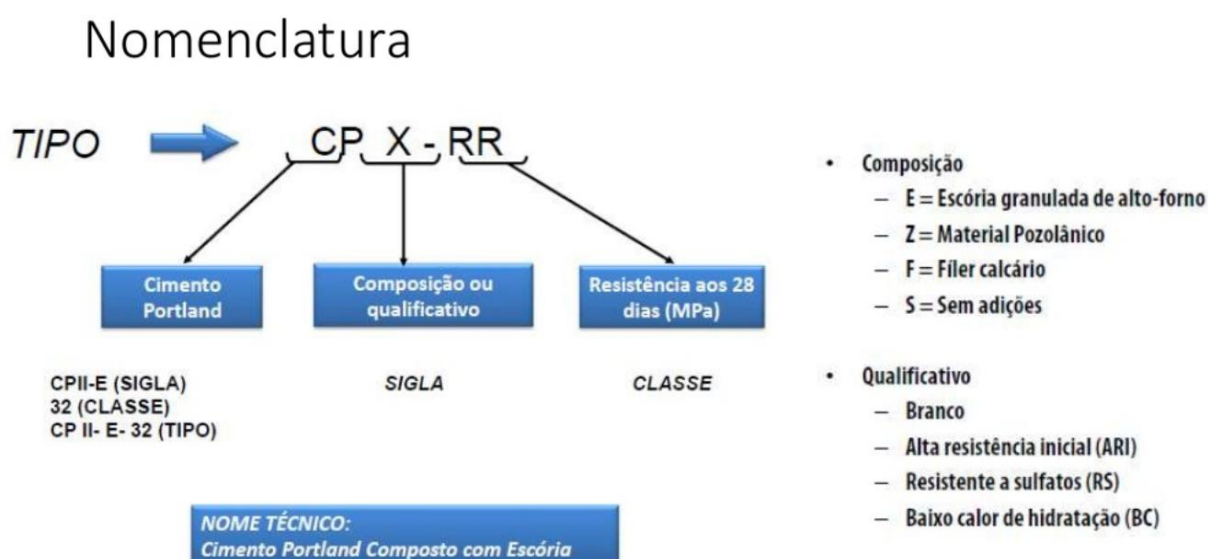
^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte – ABNT NBR 16697, 2018.

Figura 2.2 – Nomenclatura do cimento Portland.

Fonte - Honório, 2015.

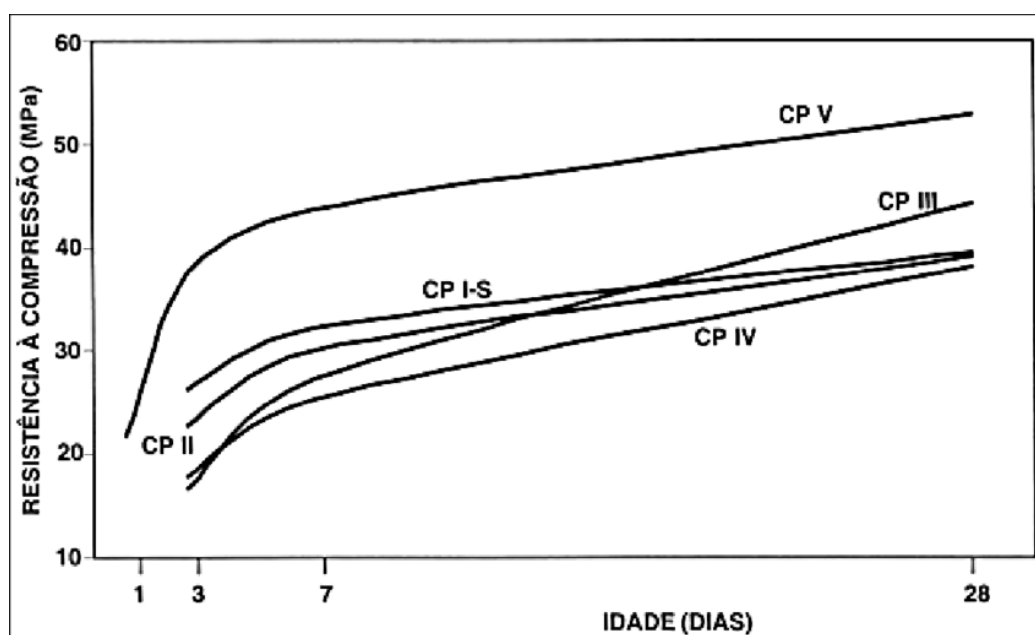
Tabela 2.3 – Determinações facultativas.

Sigla ^a	Classe	Enxofre na forma de sulfeto %	Tempo de fim de pega min	Expansi- bilidade a frio mm	Resistência à compressão aos 91 dias MPa	Anidrido carbônico (CO ₂) %
CP I	25, 32 ou 40	-	≤ 600	≤ 5	-	≤ 3,0%
CP I-S						≤ 5,5%
CP II-E	25, 32 ou 40	≤ 0,5				≤ 7,5%
CP II-F	25, 32 ou 40	-				≤ 11,5%
CP II-Z						≤ 7,5%
CP III	25	≤ 1,0	≤ 720		≥ 32,0	≤ 5,5%
	32				≥ 40,0	
	40				≥ 48,0	
CP IV	25	-			≥ 32,0	≤ 5,5%
	32				≥ 40,0	
	40			≥ 48,0		
CP V	ARI	-	≤ 600	-	≤ 5,5%	
CPB Estrutural	25, 32 ou 40	-	≤ 600	≤ 5	-	≤ 12,0
CPB Não estrutural	-	-			-	≤ 27,0

^a Estes requisitos podem ser aplicáveis também aos cimentos resistentes aos sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla original seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

Fonte – ABNT NBR 16697, 2018.

Figura 2.3 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.



Fonte - ABCP, 2002.

Na Tabela 2.4 são apresentados os limites de composição do cimento Portland, com porcentagens em massa.

Tabela 2.4 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa).

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozzolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozzolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno ^b	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozzolânico ^c	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	—	75 – 100	—	—	0 – 25
	Não estrutural			50 – 74	—	—	26 – 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozzolânicos.

^b O teor máximo da soma de adições (escória granulada de alto-forno e material carbonático) deve ser de 75%.

^c O teor máximo da soma de adições (material pozzolânico e material carbonático) deve ser de 55%.

Fonte – ABNT NBR 16697, 2018.

2.1.3.1 Cimento Portland comum

Este tipo de cimento portland conhecido como CP I é produzido com adição de gesso, que tem a função de regular o tempo de pega, e até 5% de material pozzolânico. Existe também o cimento portland comum com adição de 6 a 10% de material carbonático (CP I-S). Atualmente, o CP I não é comercializado no Brasil.

2.1.3.2 Cimento Portland composto

Os cimentos Portland compostos são obtidos a partir de adições de material pozolânico (CP II-Z), escória granulada de alto-forno (CP II-E) ou material carbonático-fíler (CP II-F). Suas principais vantagens em relação ao CP I são: menor calor de hidratação e maior resistência ao ataque de sulfatos. As classes 25, 32 ou 40 representam as resistências mínimas em MPa que deverão ser obtidas no ensaio de compressão realizado após 28 dias da moldagem dos corpos de prova.

2.1.3.3 Cimento Portland de alto-forno

O cimento Portland alto-forno (CP III) é obtido pela adição de escória granulada de alto-forno, que é um rejeito siderúrgico. As escórias são tidas como material hidráulico. Entretanto, suas reações de hidratação são muito lentas e, para que seu emprego seja possível, são necessários ativadores físicos e químicos. A ativação física obtém-se com a finura, decorrente da moagem da escória separada ou conjuntamente com o clínquer (AMBROZEWICZ, 2012). A ativação química ocorre pela ação da cal liberada durante a hidratação do clínquer. Esta adição proporciona a alteração da microestrutura do concreto, reduzindo sua permeabilidade, influenciando na melhora das propriedades de resistência a ação de sulfatos e da reação álcali-agregados.

2.1.3.4 Cimento Portland pozolânico

O cimento portland pozolânico (CP IV) é obtido pela adição de 15 a 50% de material pozolânico ao clínquer e até 10% de material carbonático.

Os materiais pozolânicos, ao contrário das escórias granuladas de alto-forno, não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a compostos com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação deste (ABCP, 2002, p.11).

2.1.3.5 Cimento Portland de alta resistência inicial

O cimento portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) difere-se dos anteriormente mencionados principalmente por atingir altas resistências já nos primeiros dias após a aplicação. Esta característica é obtida pela alteração nas quantidades de calcário e argila adicionados ao clínquer conjuntamente à moagem mais fina do cimento. Pode ser aplicado em situações que demandam tempo reduzido para desforma ou utilização, por exemplo na indústria de pré-moldados, concreto protendido e pisos industriais.

2.1.3.6 Cimentos especiais

2.1.3.6.1 Cimento Portland resistente a sulfatos

Os cimentos portland resistentes aos sulfatos são aqueles que têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados. Sua nomenclatura original é precedida da sigla RS. Seu uso é indicado para construções em ambientes tais como os encontrados nas redes de esgotos e de efluentes industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos (ABCP, 2002).

2.1.3.6.2 Cimento Portland de baixo calor de hidratação

Este tipo de cimento é normalmente utilizado em obras que demandam grandes volumes na concretagem, o que pode gerar fissuras de origem térmica em função do aumento da temperatura desenvolvido pela hidratação do cimento, pois este tem a propriedade de retardar o desprendimento de calor.

2.1.3.6.3 Cimento Portland branco

O cimento portland branco é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas que contêm baixíssimos teores manganês e ferro, utilização do caulim no lugar da argila e por condições especiais durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e a moagem do produto. A fabricação do cimento Portland branco é regulamentada

pela norma NBR 16697, sendo classificado em dois subtipos: cimento portland branco estrutural e cimento portland branco não estrutural (ABCP, 2002).

O cimento portland branco estrutural é utilizado em concretos brancos com fins arquitetônicos. O cimento portland branco não estrutural é indicado para rejunte de cerâmicas, na fabricação de ladrilhos hidráulicos e na composição de acabamentos (AMBROZEWICZ, 2012).

2.1.3.6.4 Cimento para poços petrolíferos

O cimento para poços petrolíferos é um tipo de cimento Portland de aplicação bastante específica, utilizado na cimentação de poços petrolíferos. Na sua composição são utilizados o clínquer e gesso para retardar o tempo de pega e, em sua fabricação, são tomadas precauções especiais para garantir plasticidade em condições ambientes de elevadas pressões e temperaturas (AMBROZEWICZ, 2012).

2.1.4 Propriedades

2.1.4.1 Finura

A finura do cimento influencia a sua reação com a água pois quanto mais fino o cimento maior será sua área específica de contato, mais rápido ele reagirá e maior será a resistência à compressão, principalmente nos primeiros dias. Além disso, uma maior finura diminui a exsudação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão dos concretos. Entretanto, a finura aumenta o calor de hidratação e a retração, aumentando a fissuração. A finura pode ser aumentada com uma moagem mais intensa, porém, o custo de moagem e o calor de hidratação estabelecem os limites de finura (METHA E MONTEIRO, 1994).

Devido à complexidade e altos custos da determinação da granulometria do cimento através de ensaio de sedimentação e difração a laser, realizam-se os ensaios para a determinação da finura de cimento Portland com o emprego da peneira 75 μm (nº 200) e determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).

2.1.4.2 Tempo de pega

A partir da adição de água ao cimento a pasta formada demora um certo tempo para começar a solidificação. Esse momento é denominado início de pega. Após este estágio, o lançamento, adensamento e regularização tornam-se difíceis. Então, a pasta solidifica-se de maneira gradual até deixar de ser deformável para pequenas solicitações, momento denominado fim de pega.

2.1.4.3 Expansibilidade

A expansibilidade do cimento é medida em laboratório empregando-se a agulha de Le Chatelier. É um fenômeno que pode ocorrer em seu estado endurecido, ao longo do tempo, provocando fissuras. Isto poderá ocorrer em função do processo de fabricação, quando, na obtenção do clínquer, o teor de magnésio ou cal livre for elevado (RIBEIRO, 2002).

O sulfato de cálcio, em sua forma hidratada, dá origem ao gesso (gipsita). Este composto causa expansão do cimento devido à formação do sulfoaluminato de cálcio (etringita) em cimentos endurecidos.

O mau proporcionamento das matérias primas, moagem e homogeneização inadequadas, e a temperatura ou o tempo de permanência insuficientes na zona de calcinação do forno estão entre os principais fatores que contribuem para a presença de óxido de cálcio livre ou cristalino no clínquer do cimento portland (MEHTA E MONTEIRO, 1994, p.197).

Esta, por encontrar-se intercrystalizada com outros compostos no clínquer, demora para hidratar-se ocasionando sua expansibilidade após a cura.

Teores excessivos de magnésio (MgO) também causam expansibilidade no cimento. Porém, tais efeitos ocorrem de forma tardia pois o magnésio após ser submetido à clinquerização torna-se inerte à hidratação inicial.

2.1.4.4 Calor de hidratação

A reação química dos compostos do cimento com a água provoca a liberação do calor de hidratação, silicato de cálcio, hidróxido de cálcio, etringita etc. Tal processo ocorre nas primeiras horas posteriores a aplicação do concreto. A liberação do calor

conjuntamente às substâncias causa a elevação da temperatura da massa do concreto.

Quando um grande volume de concreto é empregado em uma mesma peça, o calor gerado enfrenta dificuldades para dissipar-se, fato que pode causar tricas, fissuras e aumentar sua porosidade. Algumas medidas devem ser adotadas para amenizar esses efeitos, tais como:

- Evitar a concretagem em horários muito quentes;
- Manter a peça umedecida durante a cura;
- Buscar soluções (aditivos) que reduzam a porção de cimento na dosagem;
- Concretar peças com grandes volumes por camadas;
- Substituir parte da água por gelo na produção do concreto.

2.1.4.5 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão deve ser feita por um método de ensaio normalizado pela NBR 7215 (ABNT, 2019). O método consiste em preparar, sob condições padronizadas de laboratório, uma argamassa com a proporção de uma parte de cimento para três partes de areia normalizada, em massa, e com relação água/cimento igual a 0,48. São moldados para cada idade de cura (são três idades: 1, 3 e 7 dias para o cimento portland de alta resistência inicial e 3, 7 e 28 dias para os demais tipos) quatro corpos cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que são ensaiados após o tempo de cura em uma prensa de compressão.

Nas Tabelas 2.5 e 2.6 são apresentados os limites estabelecidos de requisitos químicos, físicos e mecânicos para os diferentes tipos de cimento. As exigências químicas visam a limitar o teor de adições, a pré-hidratação e falhas no processo de fabricação, enquanto que as exigências físico-mecânicas garantem o desempenho mecânico e reológico quando da aplicação em pastas, argamassas e concretos (ABCP, 2002).

Tabela 2.5 – Requisitos físicos e mecânicos.

Sigla ^a	Classe	Finura	Tempo de início de pega min	Expansibilidade a quente mm	Resistência à compressão MPa				Índice de brancura
		Resíduo peneira 75 µm %			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	-
CP I	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
CP I-S	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
CP II-E	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-F									
CP II-Z									
CP III	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
CP IV	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	-
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-
CPB Estrutural	25	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 78
	32	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPB Não estrutural	-	≤ 12,0 ^b	≥ 60	≤ 5	-	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0	≥ 82

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes aos sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b Resíduo na peneira 45 µm

Fonte – ABNT NBR 16697, 2018.

Tabela 2.6 – Requisitos químicos do cimento Portland (em porcentagem de massa).

Sigla ^a	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP IV	--	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V ^b	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivado do cimento tipo CPV, não há limitação para RI e MgO.

Fonte – ABNT 16697, 2018.

2.1.4.6 Retração

Na pasta de cimento, a densidade é um valor variável com o tempo, aumentando com a evolução da hidratação. Tal fenômeno, de natureza extremamente complexa, é conhecido pelo nome de retração. Esta ocorre desde seu estado fresco até idade mais avançadas nas pastas, argamassas e concretos (BAUER, 2000).

A retração no cimento aumenta: em função do teor de aluminato; à medida que cresce seu grau de finura; com o aumento do fator água/cimento; com a redução da umidade relativa do ar; em função da quantidade percentual de agregado miúdo; com uso de substâncias retardadoras de pega; com uso de substâncias para reduzir a permeabilidade do concreto.

A retração no cimento diminui: com o aumento do módulo de elasticidade do agregado; em função do aumento do tempo de cura.

2.1.5 Armazenamento

O cimento é um produto perecível muito reativo à presença de água e umidade. Sob essas condições o mesmo pode endurecer perdendo suas propriedades antes do uso. A forma usual de embalagem, em sacos de papel kraft de múltiplas folhas, oferece baixa proteção à umidade e contato direto com água. Portanto, alguns cuidados devem ser adotados para evitar o desperdício do material bem como garantir a qualidade especificada das argamassas e concretos produzidos. Dentre as recomendações destacam-se:

- O local de estocagem deve ser coberto, ter suas laterais vedadas da ação das chuvas e estar seco.
- Os sacos devem ser depositados em pilhas de no máximo 10 unidades em altura com base apoiada em tablado de madeira e estarem a uma distância mínima de 30 cm em relação ao piso e as paredes.
- Deve-se compatibilizar a quantidade de cimento adquirida com a demanda da obra para evitar que este fique armazenado por longos períodos, visto que seu prazo de validade a partir da fabricação é de três meses.

2.2 Agregados

De acordo com Petrucci (1983), agregado é definido como material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. Bauer (2010) complementa esta definição dizendo que é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos.

Entretanto, Neville (2016) diz que apesar de a princípio os agregados serem tidos como materiais inertes, é possível adotar uma visão contrária e considerá-los um material de construção ligado a um todo coeso por meio da pasta de cimento, já que suas propriedades físicas, térmicas e, algumas vezes, químicas influenciam o desempenho do concreto. O autor ainda complementa que, como pelo menos 75% do volume do concreto é composto pelos agregados, sua qualidade e suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

2.2.1 Conceito

Conforme a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado é o material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto, tais como, a pedra britada, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de rocha, além das argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, produtos industriais, entre outros.

2.2.2 Classificação

Os agregados podem ser classificados em função da origem, das dimensões das partículas e da massa específica.

2.2.2.1 Quanto à origem

Em função da origem os agregados são classificados em naturais e artificiais.

2.2.2.1.1 Naturais

Os agregados naturais são os que se encontram em forma particulada na natureza: areia, cascalho ou pedregulho natural. A extração de areia natural e cascalho podem ser observadas, respectivamente, nas Figuras 2.4 e 2.5.

Figura 2.4 – Extração de areia natural.



Fonte – Cimento Itambé, 2014.

Figura 2.5 – Extração de cascalho.

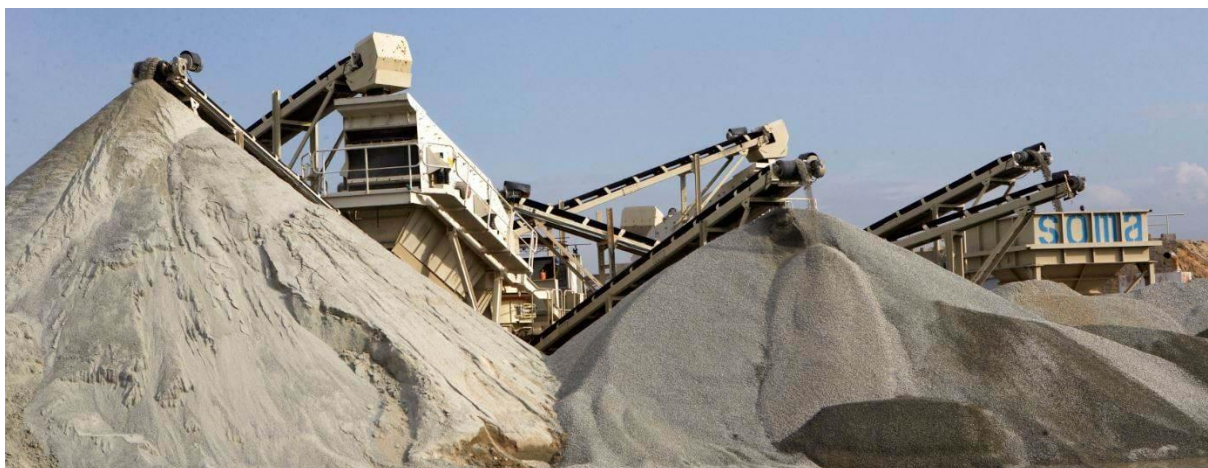


Fonte – Tyba, 2006.

2.2.2.1.2 Artificiais

Os agregados artificiais são aqueles obtidos a partir de processos industriais, como as areias artificiais (Figura 2.6), pedrisco ou pedra resultante do britamento, argilas expandidas, escórias de alto-forno (Figura 2.7), entre outros.

Figura 2.6 – Produção de areia de brita.



Fonte – Ohashi, 2018.

Figura 2.7 – Escória de alto-forno.



Fonte - Minas logística, 2018.

2.2.2.2 Segundo a dimensão de suas partículas

A NBR 7211 (ABNT, 2009) define os critérios de separação dos agregados em função de sua granulometria. Essa é classificação principal que os divide em agregados miúdos e agregados graúdos.

2.2.2.2.1 Agregados miúdos

Agregado miúdos são aqueles cujos grãos passam (máximo de 15% ficam retidos) pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm .

2.2.2.2 Agregados graúdos

Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 152 mm e ficam retidos (máximo de 15% passando) na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

2.2.2.3 Segundo a massa específica

Conforme a densidade do material que constitui as partículas, os agregados são classificados em leves, médios e pesados (BAUER, 2000).

2.2.2.3.1 Agregados leves

Agregados constituídos de material com massa específica inferior a 1.000 Kg/m³, como a argila expandida, pérolas de isopor, vermiculita e fragmentos de EVA.

2.2.2.3.2 Agregados médios

Agregados constituídos de material com massa específica variando de 1.000 Kg/m³ a 2.000 Kg/m³, como seixos rolados e pedra britada (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Pedra britada.



Fonte – Silva, 2015.

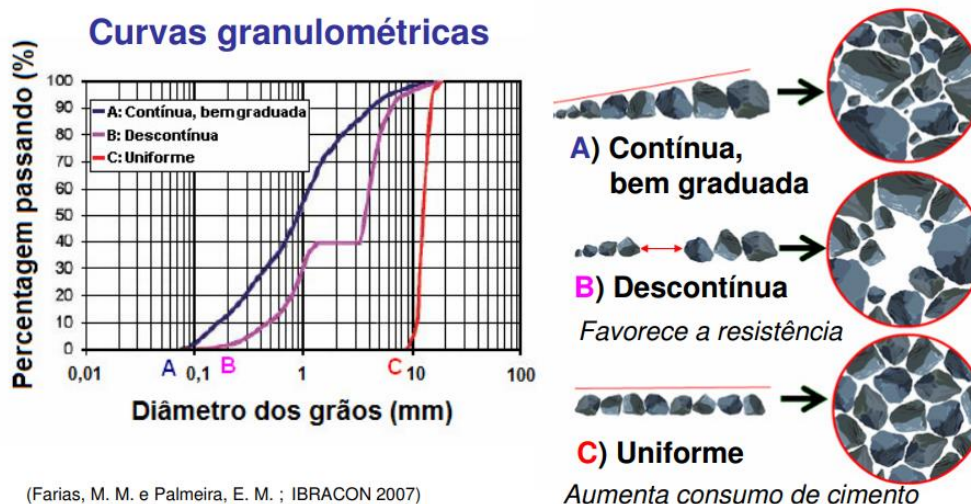
2.2.2.3.3 Agregados pesados

Agregados constituídos de material com massa específica superior a 2.000 Kg/m³, como hematita, magnetita, granalha de aço e barita.

2.2.3 Caracterização e propriedades dos agregados

A classificação granulométrica é realizada por meio da sua curva de distribuição granulométrica. Essa distribuição granulométrica é representada por uma curva que indica para cada diâmetro de grão qual é a sua porcentagem do solo que possui grãos menores ou maiores. A curva de distribuição granulométrica é apresentada em gráfico semi logarítmico, onde as abscissas mostram as aberturas das peneiras em escala logarítmica e as ordenadas representam as porcentagens acumuladas passantes (SOUZA, 2015).

Figura 2.9 – Curvas de distribuição granulométrica.



Fonte – Farias e Palmeira, 2007.

Observa-se na Figura 2.9 que na curva 'A' os grãos são distribuídos de forma contínua, ou seja, o material é retido em várias peneiras resultando em uma amostra que tem distribuição bem graduada. Na curva 'B' nota-se que a quantidade retida nas peneiras é desproporcional, o que demonstra descontinuidade na distribuição dos grãos. Na curva 'C' o material é retido em poucas peneiras, demonstrando uma

distribuição uniforme dos grãos, ou seja, a maioria deles possui dimensões aproximadas (SOUZA, 2015).

2.2.3.1 Agregados miúdos

2.2.3.1.1 Massa específica e peso unitário

Para o material sob a forma de agregado miúdo deve-se levar em consideração o conceito de duas espécies de massa específica: a massa específica real e a massa específica aparente. A massa específica real dos grãos é a massa da unidade de volume, excluindo deste os vazios permeáveis e os vazios entre os grãos; sua determinação é feita através do picnômetro, da balança hidrostática e frasco de Chapman. Já a massa específica aparente é o peso da unidade de volume, incluindo neste os vazios, permeáveis ou impermeáveis, contidos nos grãos. O peso unitário é o peso da unidade de volume aparente, isto é, incluindo no volume os vazios entre os grãos (PETRUCCI, 1983, p. 48).

2.2.3.1.2 Umidade e absorção

A determinação do teor de umidade dos agregados miúdos é bastante relevante quando destinados à produção de argamassas e concretos. Em virtude dos agregados miúdos serem recebidos em estados de umidade variados, tornam-se necessárias as determinações periódicas de seu teor de umidade, para correção das proporções da mistura. A massa de água livre carregada pelo agregado deve ser descontada da massa de água adicionada à mistura, e a massa do agregado úmido deve ser aumentado proporcionalmente. Nas areias, a presença de umidade pode provocar o aumento do seu volume aparente, fenômeno conhecido como inchamento (PETRUCCI, 1983).

Em função do teor de umidade, podemos considerar o agregado nos seguintes estados: seco em estufa, na qual a água evaporável foi removida por um aquecimento a 100°C; seco ao ar, quando não apresenta umidade superficial, tendo, porém, umidade interna, sem estar, todavia, saturada; saturado superfície seca (SSS), quando não há um filme de água na superfície, estando, porém, preenchidos os poros permeáveis das partículas de agregados; saturado, quando há umidade livre na superfície e o agregado está saturado. A relação entre o aumento de massa e a massa seca, expressa em porcentagem, é denominada absorção (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.2.3.1.3 Granulometria

Composição granulométrica de um agregado miúdo é a proporção relativa, expressa em porcentagem, das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões. A composição granulométrica ou granulometria do agregado, como é usualmente conhecida, é determinada por peneiração. São utilizadas peneiras da série normal com abertura quadrada de malha: 0,15 – 0,30 – 0,60 – 1,20 – 2,40 e 4,80 mm (PETRUCCI, 1983). Na Tabela 2.7 estão representados os conjuntos de peneiras das séries normal e intermediária.

Tabela 2.7 – Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Série normal	Série intermediária
75 mm	–
–	63 mm
–	50 mm
37,5 mm	–
–	31,5 mm
–	25 mm
19 mm	–
–	12,5 mm
9,5 mm	–
–	6,3 mm
4,75 mm	–
2,36 mm	–
1,18 mm	–
600 µm	–
300 µm	–
150 µm	–

Fonte – ABNT NBR 7211, 2009.

Segundo o Manual de Agregados para Construção Civil, areia é o material natural, de propriedades adequadas, de granulometria inferior a 2,0 mm e superior a 0,075 mm. Esta pode ser classificada em: areia grossa: granulometria de 2 a 1,2 mm; areia média: granulometria de 1,2 a 0,42 mm e areia fina: granulometria de 0,42 a 0,075 mm.

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) define módulo de finura como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Na Tabela 2.8 são apresentados os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Os dados obtidos dos ensaios de granulometria são geralmente utilizados para construir as curvas granulométricas. Com o uso de um gráfico, é possível verificar se a granulometria de um determinado agregado atende às especificações pretendidas, ou se ele está fora dos limites estabelecidos, ou ainda se é deficiente em uma dimensão específica. Geralmente, nas curvas granulométricas, as ordenadas representam as porcentagens acumuladas do agregado que tem seus grãos menores do que um dado diâmetro, e as abscissas mostram as aberturas das peneiras em escala logarítmica. Como as aberturas das peneiras da série padrão têm relação de 1/2, a escala logarítmica mostra essas aberturas em um espaçamento constante (NEVILLE, 2016).

Tabela 2.8 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100
NOTAS 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90. 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.				

Fonte – ABNT NBR 7211, 2009.

2.2.3.1.4 Impurezas

Há três categorias principais de substâncias nocivas possíveis de serem encontradas nos agregados: impurezas, que interferem no processo de hidratação do cimento; películas, que impedem o desenvolvimento de uma boa aderência entre o agregado e a pasta de cimento hidratada; e algumas partículas específicas que são fracas ou instáveis. O agregado como um todo, ou parte dele, também pode ser nocivo, devido ao desenvolvimento de reações químicas entre ele e a pasta de cimento (NEVILLE, 2016, p. 142).

Na Tabela 2.9 estão estabelecidos os limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material.

Tabela 2.9 - Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material.

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo %
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218		3,0
Materiais carbonosos ¹⁾	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento)	ABNT NBR NM 46	Concreto submetido a desgaste superficial	3,0
		Concretos protegidos do desgaste superficial	5,0
Impurezas orgânicas ²⁾	ABNT NBR NM 49		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução-padrão
	ABNT NBR 7221	Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos	10 %
¹⁾ Quando não for detectada a presença de materiais carbonosos durante a apreciação petrográfica, pode-se prescindir do ensaio de quantificação dos materiais carbonosos (ASTM C 123). ²⁾ Quando a coloração da solução obtida no ensaio for mais escura do que a solução-padrão, a utilização do agregado miúdo deve ser estabelecida pelo ensaio previsto na ABNT NBR 7221.			

Fonte – ABNT NBR 7211, 2009.

O material pulverulento é constituído de partículas de argila que possui dimensões menores que 2 µm e silte com dimensões entre 2 e 60 µm. A argila, por ser um material fino, contribui para preencher os vazios da areia interferindo na

aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Se a argila forma uma película envolvendo cada grão e não se separa durante a mistura, sua ação é altamente prejudicial, ainda que se encontre em pequena proporção. A argila pode ser removida por lavagem. Porém, se por um lado, a água pode eliminar impurezas, aumentando então a resistência da argamassa, por outro, com a lavagem, podem ser arrastados os grãos mais finos da areia, aumentando o índice de vazios, o que resultará em menor resistência da argamassa. Assim, é imprescindível controlar o teor de finos nos agregados (PETRUCCI, 1983).

Além de argila, silte e matéria orgânica, podem as areias conter outras substâncias como torrões de argila, gravetos, grânulos tenros friáveis, mica, materiais carbonosos e sais, principalmente sulfatos e cloretos, que podem prejudicar a resistência e a durabilidade das argamassas e concretos (PETRUCCI, 1983, p. 61).

2.2.3.1.5 Inchamento

Denomina-se de inchamento a variação de volume aparente que sofre o agregado, pela absorção de água livre pelos seus grãos. O procedimento para determinação do inchamento é, em síntese, o seguinte: a amostra é previamente seca em estufa, sendo seus pesos específicos aparentes determinados para diversos teores de umidade. Para cada teor de umidade é calculado o coeficiente de inchamento. A NBR 6467 (ABNT, 2009) descreve o método de ensaio de determinação do inchamento.

O coeficiente de inchamento serve para medir a variação entre o volume úmido e seco de uma mesma massa de agregado. A umidade crítica representa, em valores percentuais, o teor de umidade a partir do qual o coeficiente de inchamento é considerado constante.

2.2.3.1.6 Areia natural

A areia natural pode ser definida como uma matéria-prima mineral granular, inconsolidada, composta por grãos predominantemente quartzosos, com ampla faixa de dimensões de partículas entre 50µm e 5mm. Mas dependendo da composição da rocha da qual é originada, outros minerais também podem estar presentes na composição das areias, em quantidades variáveis, a depender da natureza geológica

do depósito, como feldspato, mica, magnetita, óxidos e hidróxidos de ferro (BUENO, 2010).

Os métodos de lavra empregados na extração de areia para a construção civil são basicamente três e dependem da natureza do depósito que está sendo lavrado: dragagem é feita em leitos de rio ou em cavas inundadas, onde a areia em lavra se encontra abaixo do nível freático; desmonte hidráulico é usado em cavas secas e em mantos de alteração de maciços rochosos; método de lavra por tiras é usado em depósitos homogêneos e de maior extensão horizontal (ALMEIDA, 2009).

Na lavra de areia em leitos de rio o método de extração mais apropriado é com a utilização de dragas de sucção com escarificador, instaladas em plataformas flutuantes. O material que é extraído do leito do rio é armazenado nos silos existentes nas dragas e conduzido até o porto. A descarga é feita em tubulações onde o material é bombeado para o depósito de estocagem, passando por peneiramento, ficando assim a areia pronta para ser expedida (GRUPO HOBI, 2012).

Na lavra em cava inundada há uma etapa anterior de preparação da frente de lavra que consiste no decapeamento da área, com o uso de equipamentos (trator de esteira, carregadeiras frontais, escavadeiras e caminhões) para remover a vegetação e a camada superficial do solo que são descartados. A seguir, tem-se a extração do material arenoso que é aproveitado até o nível freático, quando então as pás carregadeiras usadas na extração da areia, dão lugar às dragas que passam a alargar e aprofundar a cava da etapa anterior. Então, a areia extraída na cava inundada é bombeada para uma caixa, na qual é colocada uma grelha fixa no seu topo com de 2,4 a 3 mm de abertura. O retido constitui a fração mais grossa (cascalho, concreções, troncos, matéria orgânica) que é descartada e o passante é o produto para ser estocado em silo e comercializado. O material mais fino, overflow da caixa, é descarregado por uma tubulação na parte superior, retornando para cava inundada (ALMEIDA, 2009).

A lavra em cavas secas com desmonte hidráulico é bastante empregado para depósitos horizontais e sub-horizontais de matérias primas minerais com elevado conteúdo de areia de quartzo que se desagrega com facilidade e em locais onde exista disponibilidade de água (PISSATO, 2009).

Esse método de lavra inicia-se com retirada do capeamento estéril, com o auxílio de retroescavadeira. O material de superfície do solo decapeado poderá ser usado na reabilitação da área minerada, na construção do maciço de barragens

existentes na área da mineração ou ser disposto em área reservada para o bota-fora do porto de areia. A seguir, tem-se a lavra da camada arenosa que é feita por desmonte hidráulico, com o auxílio de jatos hidráulicos. A matéria prima desmontada e a partir de então, na forma de polpa, é drenada por gravidade para a bacia de acumulação. Nesta utiliza-se bomba centrífuga de polpa que realiza o bombeamento desta, diretamente para a unidade de beneficiamento (ALMEIDA, 2009).

2.2.3.1.7 Areia artificial

A obtenção dos materiais é feita através de um conjunto de operações (Figura 2.10) que permitem a retirada de pedra natural da jazida e reduz a formas e tamanhos compatíveis para o uso e aplicação em obras de engenharia. O desmonte e a britagem da rocha compreendem os seguintes processos (GRUPO HOBI, 2012):

- Decapagem do terreno - Nesse processo é efetuada a limpeza das bancadas, com máquinas e caminhões a fim de remover a argila e outros materiais impróprios para a britagem.
- Desmonte da rocha - É feito pela ação de explosivos, são executadas perfurações na rocha, previamente calculadas no plano de fogo. Onde em seguida é realizado o carregamento com explosivos e posteriormente detonação.
- Transporte da mina para a britagem - O carregamento do material detonado é feito com escavadeira hidráulica em caminhões basculantes que transportam o material da mina até britagem primária.
- Britagem primária - O material proveniente da mina é descarregado na baía de alimentação e lançado para dentro do britador de mandíbulas, onde é triturado.
- Britagem secundária - Esse processo tem como função receber o material proveniente da britagem primária, onde é lançado para dentro do britador Hydrocone e triturado de acordo com a abertura do britador, reduzindo ainda mais suas dimensões.
- Britagem terciária - O material gerado no processo anterior é conduzido ao britador de impacto vertical (VSI). Nesse processo o material é arremessado dentro de um compartimento circular fechado, onde

A lavagem é realizada para remoção da quantidade excessiva de finos (material pulverulento). A produção de areia industrial tem como matéria prima o material passante na peneira 4,8 mm denominado comercialmente como pó de brita. Este material que é resíduo do processo de produção de brita é coletado e conduzido, através de uma calha, para um sistema de eliminação do excesso de material pulverulento (VIACELLI, 2012).

2.2.3.2 Agregados graúdos

Alguns aspectos relevantes da caracterização e propriedades dos agregados graúdos serão tratados a seguir.

2.2.3.2.1 Granulometria

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) define dimensão máxima característica (DMC) como a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Na Tabela 3.4 estão indicados os limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 2.10 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica $d/D^{1)}$				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ²⁾	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ²⁾	65 ²⁾ – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ²⁾ – 65 ²⁾	92 – 100	-	-

9,5 mm	2 - 15 ²⁾	80 ²⁾ - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ²⁾ - 65 ²⁾	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 ²⁾ - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-
¹⁾ Zona granulométrica correspondente à menor (<i>d</i>) e à maior (<i>D</i>) dimensões do agregado graúdo. ²⁾ Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.					

Fonte – ABNT NBR 7211, 2009.

A britagem é o processo de fragmentação da rocha extraída da mina. O produto resultante, denominado de brita, é classificado em função da sua granulometria. A separação é realizada por peneiração no local de produção. Uma classificação, de acordo com suas dimensões nominais, é dada na Tabela 2.11, sendo diâmetro mínimo a abertura da peneira a qual corresponde uma porcentagem retida igual ou imediatamente superior a 95%.

Tabela 2.11 – Classificação das britas.

Brita 0	4,8mm a 9,5mm
Brita 1	9,5mm a 19mm
Brita 2	19mm a 25mm
Brita 3	25mm a 50mm
Brita 4	50mm a 76mm
Brita 5	76mm a 100mm

Fonte – Adaptado de Petrucci (1983).

2.2.3.2.2 Impurezas

Dentre as impurezas que podem apresentar os agregados, destacam-se a argila e outros materiais finos, denominados pulverulentos, dentre os quais destacam-se o silte e o pó de britagem. A argila tem pouca resistência e absorve água em demasia. O material pulverulento tem dois inconvenientes principais: formando uma película superficial nos grãos do agregado, prejudicam a aderência; por outro lado, possuindo elevada área superficial, aumentam a demanda de água para a molhagem

de todas as partículas da mistura, aumentando então, a relação água/cimento, acarretando perda de resistência dos concretos (PETRUCCI, 1983).

Na Tabela 2.12 estão estabelecidos os limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do material.

Tabela 2.12 — Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do material.

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado graúdo %
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218	Concreto aparente	1,0
		Concreto sujeito a desgaste superficial	2,0
		Outros concretos	3,0
Materiais carbonosos ¹⁾	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento) ^{2), 3)}	ABNT NBR NM 46		1,0

¹⁾ Quando não for detectada a presença de materiais carbonosos durante a apreciação petrográfica, pode-se prescindir do ensaio de quantificação dos materiais carbonosos (ASTM C 123).

²⁾ Para agregados produzidos a partir de rochas com absorção de água inferior a 1%, determinados conforme a ABNT NBR NM 53, o limite de material fino pode ser alterado de 1% para 2%.

³⁾ Para agregado total, definido conforme 3.6, o limite de material fino pode ser composto até 6,5%, desde que seja possível comprovar, por apreciação petrográfica, realizada de acordo com a ABNT NBR 7389, que os grãos constituintes não interferem nas propriedades do concreto. São exemplos de materiais inadequados os materiais micáceos, ferruginosos e argilo-minerais expansivos.

Fonte – ABNT NBR 7211, 2009.

2.2.3.2.3 Forma dos grãos

A forma refere-se às características geométricas do grão, que podem ter relação com as dimensões, formatos e textura superficial, tais como: cúbico, lamelar, alongado, arredondado, liso e áspero.

A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais as propriedades do concreto fresco do que endurecido. Comparadas às partículas arredondadas, as partículas alongadas ou lamelares requerem mais pasta de cimento

para produzir misturas trabalháveis e geram mais vazios entre os grãos (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Partículas formadas por atrito tendem a ser arredondadas, pela perda de vértices e arestas, como por exemplo, areias de depósitos eólicos, assim como areias e pedregulhos de zonas marítimas ou leitos de rio. Agregados de rochas intrusivas britadas, como calcários estratificados, arenitos e folhelho, possuem vértices e arestas bem definidos e são chamados de angulosos. Aquelas partículas cuja espessura é relativamente pequena em relação a outras dimensões, são chamadas de lamelares ou achatadas, enquanto aquelas cujo comprimento é consideravelmente maior do que as outras duas dimensões são chamadas de alongadas (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.2.3.2.4 Massa específica e massa unitária

A determinação da massa específica e massa unitária do agregado graúdo são feitas conforme as prescrições da NBR NM 53 (ABNT, 2009). A primeira pode ser calculada nas condições: seca e saturado superfície seca.

A massa específica do agregado seco (d) é obtida pela razão entre a massa da amostra seca (m) pela diferença entre a massa da amostra na condição saturada superfície seca (m_s) e a massa em água da amostra (m_a).

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (1)$$

A massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (d_s) é obtida pela razão entre a massa da amostra na condição saturada superfície seca (m_s) pela diferença entre a massa da amostra na condição saturada superfície seca (m_s) e a massa em água da amostra (m_a).

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (2)$$

A massa unitária (d_a) é obtida pela razão entre a massa da amostra seca em estufa (m) pela diferença entre a massa da amostra seca em estufa (m) e a massa em água da amostra saturada (m_a).

$$d_a = \frac{m}{m - m_a} \quad (3)$$

2.2.3.2.5 Resistência

A resistência à compressão varia conforme o esforço de compressão se exerça paralela ou perpendicularmente ao veio da pedra (diaclase). O ensaio se faz em corpos de prova cúbicos de 4cm de lado. A resistência à tração também depende da direção do esforço, relativamente ao veio da pedra. É determinada pelo ensaio diametral, em que um corpo de prova cilíndrico é submetido a um esforço perpendicular ao eixo do cilindro. A resistência à abrasão mede a capacidade do agregado de resistir quando sofrem atrição. Esta é medida, conforme determinações da NBR NM 51 (ABNT, 2001), na máquina “Los Angeles”, que consta de um cilindro oco, de eixo horizontal, dentro do qual a amostra é girada juntamente com bolas de ferro fundido e depois medido o percentual de desgaste (BAUER, 2000).

2.3 Água de amassamento

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a água pode ser encontrada em vários estados dentro da mistura de concreto. Além do vapor nos poros vazios não ocupados ou parcialmente preenchidos, existe água na pasta de cimento hidratada nos estados: água capilar, presente nos vazios maiores, chamada de água livre (uma vez que sua remoção não causa qualquer alteração no volume do concreto); água adsorvida, que se encontra próxima à superfície do agregado, sob influência das forças de atração dos sólidos da pasta de cimento hidratada. A perda desta água é responsável pela retração da pasta de cimento; água interlamelar, associada com a estrutura do C-S-H; água quimicamente combinada, aquela que faz parte da estrutura de vários produtos hidratados do cimento.

A água de amassamento não deve conter substâncias orgânicas indesejáveis ou constituintes inorgânicos em quantidades excessivas. Em muitas especificações,

a qualidade da água é estabelecida por uma cláusula que cita que a água deve ser potável. Como regra, a água com pH entre 6,0 e 8,0 é adequada para uso (NEVILLE, 2016).

2.4 Produção do concreto

A seleção dos materiais componentes dos concretos é o primeiro passo na busca da obtenção de concretos com certas e desejadas características de desempenho (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.4.1 Caracterização dos materiais

Dentre os materiais empregados no concreto, certamente o que maior influência tem nas suas características é o cimento. Assim, é de todo recomendável o procedimento de ensaios do cimento empregado, como estabelecem as normas técnicas. Os ensaios mais comumente realizados são os de verificação das características físicas do cimento (BAUER, 2000).

A fabricação do cimento exige um controle rigoroso, e inúmeros ensaios são realizados nos laboratórios das fábricas para garantir a qualidade desejada e o atendimento às exigências das normas. É recomendável, entretanto, que compradores ou laboratórios independentes realizem ensaios de aceitação ou examinem as propriedades de um cimento a ser utilizado para um fim específico (NEVILLE, 2016).

A caracterização do cimento Portland é feita a partir dos ensaios:

- Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos - NBR 7215 (ABNT, 2019).
- Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal - NBR 16606 (ABNT, 2018).
- Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega - NBR 16607 (ABNT, 2018).
- Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) - NBR 11579 (ABNT, 2013).

- Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier - NBR 11582 (ABNT, 2016).

Os agregados constituem um componente importante no concreto. Suas características apresentam larga gama de variação, o que os leva, na tecnologia do concreto, a serem submetidos a ensaios de várias propriedades tanto antes como durante a execução da obra. Não devem reagir deletariamente perante o cimento e ser estáveis perante os agentes que irão entrar em contato com o concreto. Devem ser excluídos os agregados provenientes de rochas macias, friáveis ou de baixa resistência à compressão, ou que contenham pirita, gesso, e componentes ferrosos; devem ser isentos de argila e matéria orgânica, ou de materiais que interfiram na aderência à pasta de cimento ou influenciem a pega e o endurecimento (BAUER, 2000).

A caracterização dos agregados é feita a partir dos ensaios:

- Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios - NBR NM 45 (ABNT, 2006).
- Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem - NBR NM 46 (ABNT, 2003).
- Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas - NBR NM 49 (ABNT, 2001).
- Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água - NBR NM 53 (ABNT, 2009).
- Agregados - Determinação da composição granulométrica - NBR NM 248 (ABNT, 2003).
- Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água - NBR 6458 (ABNT, 2017).
- Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio - NBR 6467 (ABNT, 2009).
- Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - NBR 7218 (ABNT, 2010).

A água para emprego no concreto deve ser potável. Havendo dúvida quanto à sua qualidade, deverão ser procedidos ensaios de qualidade através da moldagem de

18 cilindros (5 X 10 cm) com argamassa preparada com água potável e outros 18 com a água a ser testada. Os resultados dos ensaios aos 3, 7 e 28 dias indicam a qualidade da água. Considera-se aceitável quando a redução da resistência não ultrapassa 10% (BAUER, 2000).

2.4.2 Dosagem

O proporcionamento dos materiais do concreto, também conhecido por dosagem do concreto, é um dos processos através do qual é obtida a melhor proporção entre cimento, agregados, água e aditivos para produzir um concreto que atenda a certas especificações prévias, sendo a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido a uma idade definida, os requisitos normalmente mais importantes (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Embora o projeto estrutural normalmente não leve a dosagem em consideração, o projeto impõe dois parâmetros para a dosagem: resistência e durabilidade do concreto. É importante mencionar que a trabalhabilidade deve ser adequada às condições de lançamento. As exigências de trabalhabilidade não se aplicam somente ao abatimento no momento da descarga da betoneira, mas também ao limite de perda de abatimento conforme a duração do lançamento do concreto (NEVILLE, 2016).

Além disso, a seleção das proporções dos componentes deve levar em conta o método de transporte do concreto, especialmente se for previsto o bombeamento. Outros critérios importantes são: tempo de pega, exsudação e facilidade de acabamento, três fatores que estão interligados. Podem surgir dificuldades consideráveis caso esses critérios não sejam corretamente considerados durante a seleção das proporções do concreto ou durante o ajuste dessas proporções (NEVILLE, 2016).

Vários métodos podem ser usados para dosagem do concreto. Dentre estes, alguns são mais utilizados atualmente no Brasil:

- Método de dosagem de concreto EPUSP/IPT;
- Método de dosagem de concreto da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland / ACI – American Concrete Institute;
- Método de dosagem de concreto do ITERS – Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul, proposto por Eládio Petrucci;

- Método de dosagem INT – Instituto Nacional de Tecnologia, no Rio de Janeiro, proposto por Fernando Luiz Lobo Carneiro;

2.4.3 Proporcionamento

A maioria das especificações recomendam que a medição dos materiais para produzir o concreto seja feita em massa, ao invés de ser em volume. A razão desta recomendação se deve ao inchamento da areia úmida que ocasiona erros nas medições. Água e aditivos líquidos podem ser medidos com precisão tanto em volume quanto em massa (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.4.4 Mistura

É fundamental que os ingredientes da mistura sejam adequadamente misturados para que se produza um concreto fresco, em que as superfícies de todas as partículas de agregados sejam revestidas pela pasta de cimento, que seja homogêneo em macroescala e, como consequência, que possua propriedades uniformes. A mistura é praticamente sempre realizada por meios mecânicos (NEVILLE, 2016).

Dependendo de considerações de custo, tipo de construção e quantidade de concreto necessária, a operação de mistura pode ser feita no local ou em uma usina de produção de concreto localizada fora do canteiro de obra (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

No canteiro, costuma-se misturar o concreto tão rápido quanto possível. Em razão disso, é importante conhecer o tempo mínimo de mistura necessário para a produção de um concreto de composição uniforme e, conseqüentemente, de resistência adequada. Esse tempo varia conforme o tipo de betoneira e, na realidade, não é o tempo de mistura que define sua qualidade, mas o número de rotações da betoneira. Em razão de existir uma velocidade de mistura ótima recomendada pelo fabricante, o número de rotações e o tempo de mistura são interdependentes (NEVILLE, 2016).

O amassamento manual do concreto, a empregar-se excepcionalmente em pequenos volumes ou em obras de pouca importância, deverá ser realizado sobre um estrado ou superfície plana impermeável e resistente. Mistura-se primeiramente, a

seco, os agregados e o cimento, de maneira a obter-se uma mistura uniforme; em seguida, adiciona-se aos poucos a água necessária, prosseguindo-se a mistura até conseguir-se massa de aspecto uniforme (BAUER, 2000).

O concreto dosado em central é especialmente útil em canteiros onde exista pouco espaço para a produção de concreto e para estoque de agregados ou em concretagens que demandam grandes volumes. Entretanto, talvez a maior vantagem do concreto produzido em central seja o fato de que ele é produzido em melhores condições de controle do que as normalmente possíveis em qualquer canteiro de obras. O controle deve ser obrigatório, mas, como a central opera em condições industriais, é possível um controle bastante rigoroso de todas as operações de produção do concreto fresco (NEVILLE, 2016).

2.4.5 Transporte

De acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2012), o concreto dosado em central é aquele misturado em equipamento estacionário ou em caminhão betoneira, transportado por caminhão betoneira ou outro tipo de equipamento, dotado ou não de agitação, para entrega antes do início de pega do concreto, em local e tempo determinados, para que se processem as operações subsequentes à entrega, necessárias à obtenção de um concreto endurecido com as propriedades pretendidas.

O sistema de transporte de concreto, do equipamento de sua fabricação ao local de aplicação, depende do tipo, da localização e do volume da obra, e impõe, muitas vezes, a trabalhabilidade com que o concreto tem que ser utilizado. A condição principal imposta ao sistema de transporte é a de manter a homogeneidade do material. Em geral, a segregação se dá porque o concreto é uma mistura de materiais heterogêneos em dimensões, pesos e densidades: portanto, logo após sua fabricação, há forças internas e externas atuando para separar esses materiais. Essa separação deve ser impedida, e nunca corrigida após sua ocorrência (BAUER, 2000).

A NBR 7212 (ABNT, 2012) estabelece ainda que o tempo de transporte do concreto decorrido entre o início da mistura, a partir do momento da primeira adição de água, até a entrega do concreto deve ser: inferior a 90 min, no caso do emprego de caminhão betoneira; inferior a 40 min, no caso de veículo não dotado de equipamento de agitação.

O bombeamento é um meio de transporte do concreto que exige o uso de misturas com propriedades especiais. Existem bombas de diferentes capacidades, e, da mesma forma, tubos de vários diâmetros são utilizados, mas o diâmetro do tubo deve ser, no mínimo, três vezes maior do que a dimensão máxima do agregado. Bombas de tubo deformável transportam concreto por distâncias de até 90 metros horizontalmente ou 30 metros verticalmente. Entretanto, com a utilização de bombas de pistão, o concreto pode ser transportado por até 1.000 metros horizontalmente ou 120 metros verticalmente – ou por uma combinação entre altura e distância (NEVILLE, 2016).

2.4.6 Lançamento

Após chegar no canteiro de obras, o concreto pré-misturado deve ser lançado o mais próximo possível da sua posição final. Para minimizar a segregação, o concreto não deve ser transportado ao longo de grandes distâncias enquanto está sendo lançado em fôrmas ou lajes. Geralmente, o concreto é depositado em camadas horizontais de espessura uniforme, e cada camada é inteiramente adensada antes da próxima ser lançada. A velocidade de lançamento deve ser rápida o suficiente para que a última camada adensada esteja ainda plástica quando a nova camada for lançada. Isto previne as juntas frias, juntas de concretagem e planos de fratura, que resultam quando o concreto fresco é lançado sobre o concreto já endurecido (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A altura da queda livre não poderá ultrapassar 2 m. Quando a altura da queda for superior a 2 m, medidas especiais deverão ser tomadas, para evitar a segregação. Entre elas destacam-se: a abertura de janelas nas fôrmas, que permitam diminuir a altura de lançamento e facilitam o adensamento; a colocação de trombas de chapas ou de lona no interior da fôrma (BAUER, 2000).

De acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2012), o lançamento e o adensamento devem ser: iniciados em até 30 min após a chegada do caminhão betoneira na obra. Em situações onde este tempo de início de descarga não possa ser cumprido, o contratante deve avaliar previamente a melhor solução técnica junto a empresa prestadora dos serviços de concretagem. Não se admite adição suplementar de água; realizados em tempo inferior a 150 min, contado a partir da primeira adição de água, no caso do emprego de caminhão betoneira; realizados em tempo inferior a 60 min,

contados a partir da primeira adição de água, no caso de veículo não dotado de equipamento de agitação.

2.4.7 Adensamento

O objetivo da compactação do concreto, é a obtenção de um concreto com a maior massa específica possível. O método usual de adensamento é a vibração. Logo após o concreto ser lançado na fôrma, as bolhas de ar podem ocupar entre 5% e 20%. A vibração tem o efeito de fluidificar a parte de argamassa da mistura, de modo que o atrito interno é reduzido, ocorrendo, então, a acomodação dos agregados graúdos e a expulsão da maior parte do ar aprisionado. A vibração deve ser aplicada uniformemente em toda massa de concreto, senão algumas partes podem não ser totalmente adensadas, enquanto outras podem apresentar segregação devido á vibração excessiva (NEVILLE, 2016).

De acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2012), o tempo de transporte do concreto decorrido entre o início da mistura, a partir do momento da primeira adição de água, até a entrega do concreto deve ser fixado de forma que o fim do adensamento não ocorra após o início da pega do concreto lançado e das camadas ou partes contíguas e essa remessa (evitando-se a formação de “junta fria”).

2.4.8 Cura

Entendemos por “cura do concreto” um conjunto de medidas que têm por objetivo evitar a evaporação da água utilizada na mistura do concreto e que deverá reagir com o cimento, hidratando-o. Em climas frios a cura abrange também aquelas medidas de proteção contra o congelamento dessa água. As várias qualidades desejáveis num bom concreto – resistência mecânica à ruptura e ao desgaste, impermeabilidade e a resistência ao ataque de agentes agressivos – são extremamente favorecidas e até mesmo somente conseguidas através de uma boa cura (BAUER, 2000).

Há dois tipos principais de procedimentos de cura que podem ser descritos, de forma geral, como cura úmida e cura por membrana, respectivamente. O primeiro método consiste em disponibilizar água que possa ser absorvida pelo concreto. Esse procedimento exige que a superfície do concreto esteja permanentemente em contato

com a água por um período especificado, iniciando assim que a superfície do concreto não esteja mais sujeita a danos. O segundo método de cura consiste na prevenção de perda de água da superfície do concreto sem a possibilidade de ingresso do meio externo. As técnicas utilizadas incluem a cobertura da superfície do concreto com lâminas de polietileno sobrepostas ou com papel reforçado. Outra técnica consiste na aplicação por aspersão de agentes de cura que formam uma película (NEVILLE, 2016).

2.4.9 Tipos de concreto

2.4.9.1 Convencional

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água. O agregado é o material granular, tal como a areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno, usado com um meio cimentante, para formar um concreto ou uma argamassa de cimento hidráulico. O termo agregado graúdo se refere a partículas de agregado maiores do que 4,8mm (peneira nº 4) e o termo agregado miúdo se refere a partículas de agregado menores que 4,8mm, porém maiores que 75 µm (peneira nº 200) (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

O Concreto de Cimento Portland é o material resultante da mistura, em determinadas proporções, de um aglomerante - cimento Portland, com um agregado miúdo - geralmente areia lavada, um agregado graúdo - geralmente brita e água. Pode-se ainda, se necessário, usar aditivos. A água e o cimento, quando misturados, desenvolvem um processo denominado hidratação e formam uma pasta que adere as partículas dos agregados. Nas primeiras horas após o preparo é possível dar a essa mistura o formato desejado. Algumas horas depois ela endurece e, com o passar dos dias, adquire grande resistência mecânica, convertendo-se num material monolítico dotado das mesmas características de uma rocha (ARAÚJO, 2000).

2.4.9.2 Concreto de alto desempenho

Os concretos de alto desempenho (CAD) têm diversas características que o diferenciam dos concretos comuns: atingem resistências mecânicas muito maiores, chegando até mesmo a superar a casa dos 100 MPa, e apresentam maior durabilidade/ melhor desempenho frente a meios potencialmente agressivos. Dessa forma, como primeira aplicação ocorre quase que de imediato seu emprego em obras ou elementos que necessitam de elevada resistência mecânica do concreto e/ou seções mais reduzidas dos elementos estruturais, incluindo edifícios muito altos, pontes ou viadutos com extensão acentuada, monotrilhos, obras hidráulicas e estruturas off-shores (THOMAZ, 2016).

O concreto de alto desempenho contém os seguintes componentes: cimento Portland; agregados de boa qualidade; sílica ativa, em geral entre 5 e 15% da massa total de material cimentício; eventualmente outros materiais cimentícios, como cinza volante ou escória granulada de alto-forno; e sempre um aditivo superplastificante. A dosagem de superplastificante é alta, entre 5 e 15 litros por m³ de concreto, dependendo do teor de sólidos do aditivo, bem como de sua natureza. Essa dosagem possibilita reduções da quantidade de água da ordem 45 a 75 litros por m³ de concreto. Outros aditivos também podem ser utilizados como polímeros, epóxios, fibras e agregados artificiais como a areia de bauxita calcinada (NEVILLE, 2016).

Desde a publicação da Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) os chamados concretos duráveis e de alto desempenho vêm ampliando seu mercado no Brasil, ainda que timidamente. Uma das razões é que a norma técnica prescreve um tempo mínimo de vida útil às estruturas de concreto, o que deve ser estabelecido em projeto – a chamada vida útil de projeto (VUP). Esse tempo, de acordo com a Norma de Desempenho, deve ser igual a 50 anos, 63 anos ou 75 anos, respectivamente, para níveis de desempenho mínimo, intermediário ou superior (SANTOS, 2017).

Mas não é apenas a exigência normativa que estimula o uso de concretos de alta resistência (CAR) e de concretos de alto desempenho (CAD). A necessidade de se criar espaço nas edificações, por conta de terrenos cada vez menores para a construção de prédios, também leva os projetistas a optarem por materiais com essas características, já que eles permitem seções estruturais mais esbeltas, resultando em ganho de área útil. Além disso, os ambientes urbanos cada vez mais agressivos, por

conta da poluição, e as áreas litorâneas – tradicionalmente ameaçadoras ao concreto – igualmente estimulam um consumo maior de concretos especiais (SANTOS, 2017).

2.4.9.3 Concreto autoadensável

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017), define que o concreto autoadensável (CAA) é aquele capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

O CAA apresenta geralmente em sua composição uma grande quantidade de finos, o que gera um alto volume de pasta e reduzido volume de agregado graúdo. No entanto, um grande volume de pasta necessita de uma grande quantidade de cimento, gerando assim alto custo e alto calor de hidratação no concreto. Para contornar tal situação, são utilizados fíleres e/ou pozolanas para substituir parte do cimento (CAVALCANTI, 2006).

As características do CAA são obtidas a partir do uso de aditivo superplastificante à base de policarboxilatos que permite a obtenção de uma fluidez elevada, mesmo com relações água/cimento muito baixas. Apesar da fluidez, o CAA se mantém homogêneo, viscoso, sem segregação ou exsudação. Verifica-se, também, que se faz necessário uma composição adequada do concreto, considerando-se a exigência de uma quantidade maior de finos - partículas $\leq 0,125$ mm (CALADO, 2015).

Dentre as vantagens, um grande destaque deve ser dado ao fato de que o uso de CAA garante excelente compactação do material no estado fresco, mesmo em áreas densamente armadas, evitando-se, assim, a presença de nichos no interior do elemento estrutural e garantindo excelente acabamento ao concreto. Essa situação permite a produção de uma estrutura mais durável. A eliminação da etapa de vibração do concreto também é vantajosa, pois evita o ruído causado pelo vibrador, o que melhora a qualidade do ambiente de trabalho e possibilita a redução no tempo de concretagem. Uma terceira consequência benéfica da elevada fluidez é a possível diminuição da equipe de trabalho para realização das atividades de lançamento e espalhamento do concreto, que se auto compacta (KLEIN, 2008).

2.4.9.4 Concreto reforçado com fibras

O concreto contendo um cimento hidráulico, água, agregados miúdos ou graúdos e fibras discretas descontínuas é chamado concreto reforçado com fibras (CRF). Ele pode também conter pozolanas e outros aditivos normalmente usados em concreto convencional. Têm sido usadas fibras de várias formas e tamanhos, produzidas em aço, plástico, vidro e materiais naturais; entretanto, para a maioria das peças estruturais e não estruturais, as fibras de aço são as mais utilizadas (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A incorporação de fibras em misturas cimentícias promove uma melhora significativa em diversas propriedades mecânicas, com destaque para a tenacidade à flexão e a resistência à fadiga e ao impacto. Sua principal função é aumentar a capacidade de absorção de energia, pois atuam como ponte de transferência de tensões através das fissuras, reduzindo sua propagação e expansão. Além disso, concreto reforçado com fibras apresenta maior ductilidade em relação às matrizes não reforçadas, que se tornam deficientes após a formação de primeira fissura (SALVADOR, 2013).

Atualmente, o mercado brasileiro de fibras é centralizado em aplicações de baixo consumo de fibras e estruturas contínuas. Num levantamento realizado pelo autor junto aos principais fabricantes e representantes nacionais de fibras para reforço do concreto, foi possível verificar que as aplicações do CRF são muito concentradas. O mercado de fibras de aço tem como principal aplicação os pavimentos industriais. Em segundo lugar vem o concreto projetado e, em terceiro, os pré-moldados (FIGUEIREDO, 2011).

2.5 Propriedades mecânicas do concreto

Nesta seção são abordadas as principais propriedades mecânicas do concreto.

2.5.1 Resistência à compressão

Resistência é a medida da tensão exigida para romper o material. No projeto das estruturas de concreto, considera-se o concreto como material mais adequado para resistir a carga de compressão; é por isso que a resistência à compressão do

material é geralmente especificada. A resposta do concreto às tensões aplicadas não depende somente do tipo de solicitação, mas também de como a combinação de vários fatores afeta a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concreto. Tais fatores incluem propriedades e proporções dos materiais que compõem o traço do concreto, grau de adensamento e condições de cura. Do ponto de vista da resistência, a relação água/cimento-porosidade é indiscutivelmente o fator mais importante porque, independentemente de outros fatores, ela afeta a porosidade tanto da matriz pasta de cimento como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A resistência à compressão simples é a propriedade mecânica mais importante do concreto, não só porque o concreto trabalha predominantemente à compressão, como também, porque fornece outros parâmetros físicos que podem ser relacionados empiricamente à resistência à compressão. Geralmente, a resistência à compressão simples é medida em corpos de prova cilíndricos padronizados, de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, curados em câmara úmida à 20°C, e ensaiados com idade de 28 dias (ANDOLFATO, 2002).

Quanto ao procedimento para moldagem, cura e ensaios para determinação da resistência à compressão em concreto, segue-se as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 5739 (ABNT, 2018) (MAPA DA OBRA, 2019).

2.5.2 Resistência à tração

A resistência à compressão do concreto é, normalmente, a propriedade considerada no dimensionamento estrutural, mas, para alguns fins, a resistência à tração pode ser o objeto de interesse. O dimensionamento ao cisalhamento feito no caso das estruturas de concreto simples, como barragens, em condições de terremotos e a resistência à fissuração são alguns exemplos. A ausência de fissuração é de importância considerável para a manutenção da continuidade de uma estrutura e, em muitos casos, para a prevenção da corrosão das armaduras. Outras estruturas como pavimentos rodoviários e de pistas de pouso, são projetadas com base na resistência à flexão, que implica em resistência à tração (NEVILLE, 2016).

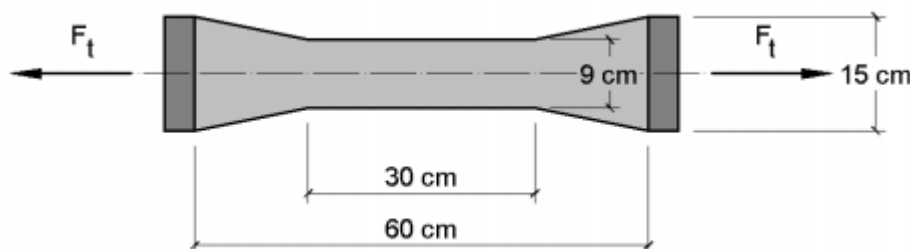
As resistências à tração e à flexão típicas do concreto são da ordem de 10 a 15%, respectivamente, da resistência à compressão. A razão desta grande diferença entre resistência à tração e à compressão é atribuída à estrutura heterogênea e

complexa do concreto. Os ensaios de tração direta do concreto são raramente realizados, principalmente porque os dispositivos de fixação do corpo-de-prova introduzem tensões secundárias que não podem ser ignoradas. Os ensaios mais comumente usados para estimar a resistência à tração do concreto são o de tração por compressão diametral, e o de tração por flexão com carregamento nos terços de vão (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.5.2.1 Resistência à tração direta

Neste ensaio, considerado o de referência, a resistência à tração direta, f_{ct} , é determinada aplicando-se tração axial, até a ruptura, em corpos-de-prova de concreto simples (Figura 2.11). A seção central é retangular, medindo 9cm por 15cm, e as extremidades são quadradas, com 15cm de lado (PINHEIRO, 2007)

Figura 2.11 – Ensaio de tração direta.



Fonte – Pinheiro, 2007.

2.5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Neste ensaio, um corpo de prova cilíndrico, como o utilizado nos ensaios à compressão, é posicionado com seu eixo horizontal entre os pratos de uma máquina de ensaio (Figura 2.12), e a carga é aumentada até ocorrer a ruptura por tração indireta na forma de fendimento ao longo do diâmetro vertical (NEVILLE, 2016).

Segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), a carga deve ser aplicada continuamente e sem choques, com crescimento constante da tensão de tração a uma velocidade de

(0,05 ± 0,02) MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada pela expressão:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d \ell} \quad (4)$$

onde

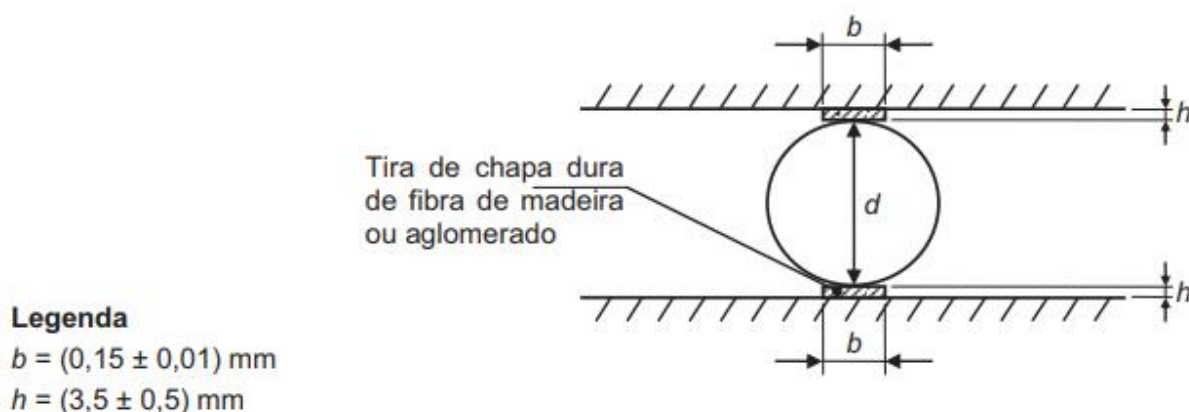
$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

F é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

d é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

ℓ é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Figura 2.12 – Disposição do corpo de prova.



Fonte – ABNT NBR 7222, 2011.

2.5.2.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio para determinação da tração na flexão é normalizado, no Brasil, pela NBR 12142 (ABNT, 2010). Nesse ensaio, um prisma de concreto simples é submetido à flexão, com a utilização de um carregamento em dois pontos simétricos, até a ruptura. A tensão de tração teórica máxima atingida na face inferior do prisma é conhecida como módulo de ruptura (NEVILLE, 2016).

De acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010), a máquina de ensaio deve ser equipada com um dispositivo de flexão que assegure a aplicação da força

perpendicularmente às faces superior e inferior do corpo de prova, sem excentricidades. Na Figura 2.13 está detalhado esquematicamente o dispositivo auxiliar para a realização do ensaio a ser acoplado em máquinas que não sejam equipadas para esta finalidade. A resistência à tração na flexão deve ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot \ell}{b \cdot d^2} \quad (5)$$

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de ℓ (ver Figura 2.14) calcular a resistência à tração na flexão pela expressão:

$$f_{ct,f} = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (6)$$

onde

$f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascals (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

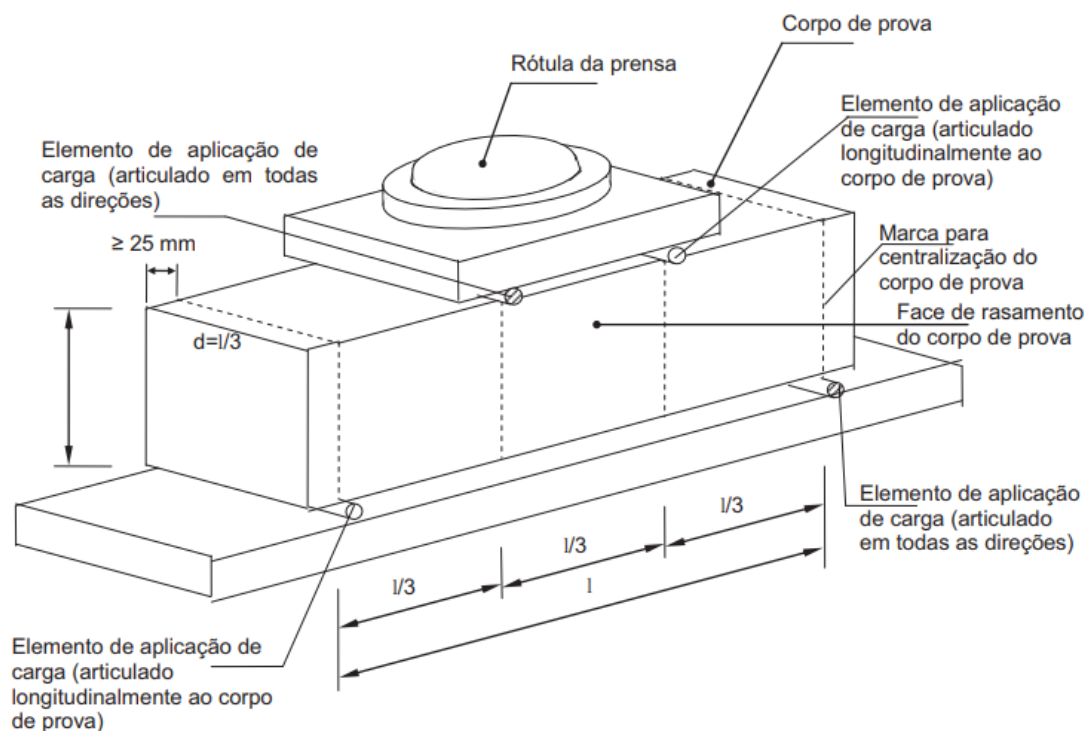
ℓ é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

b é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

d é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

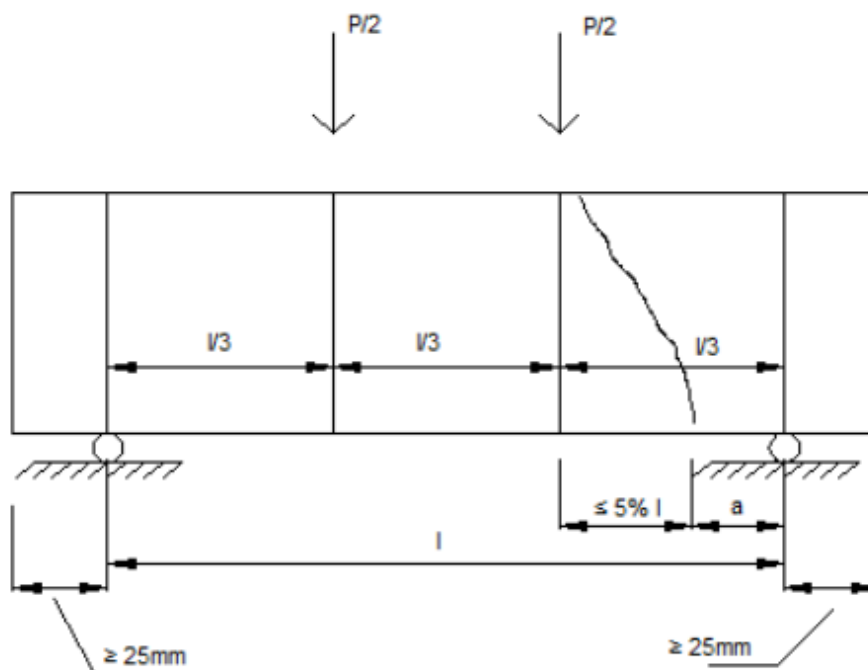
a é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).

Figura 2.13 – Dispositivo de ensaio.



Fonte – ABNT NBR 12142, 2010.

Figura 2.14 – Ruptura fora do terço máximo.



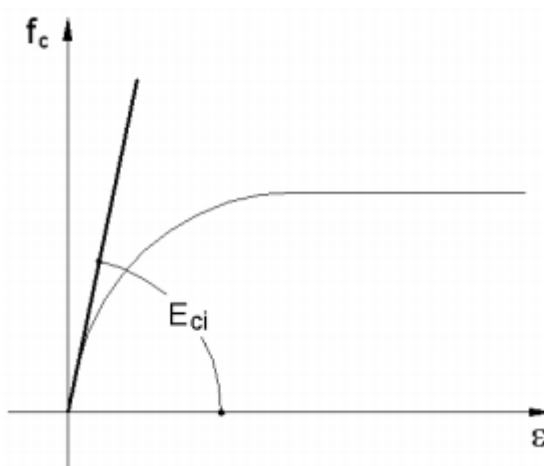
Fonte – ABNT NBR 12142, 2010.

2.5.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão e a deformação elástica. Em materiais homogêneos, o módulo de elasticidade é a medida das forças de ligação interatômicas e não é afetada por mudanças microestruturais. Isto não é válido para materiais multifásicos como o concreto. O módulo de elasticidade à compressão do concreto, varia de 14×10^3 a 40×10^3 MPa. O significado do limite de elasticidade em projeto estrutural é devido ao fato dele representar a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Para o concreto a expressão do Módulo de Elasticidade é aplicada somente à parte retilínea da curva tensão-deformação ou, quando não existir uma parte retilínea, a expressão é aplicada à tangente da curva na origem. Neste caso, tem-se o Módulo de Deformação Tangente Inicial, E_{ci} (Figura 2.15). O módulo de deformação tangente inicial é obtido segundo ensaio descrito na NBR 8522 (ABNT, 2017) (PINHEIRO, 2007).

Figura 2.15 - Módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).



Fonte – Pinheiro, 2007.

Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto, para a idade de referência de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando a expressão:

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (7)$$

onde E_{ci} e f_{ck} são dados em MPa. O Módulo de Elasticidade Secante, E_{cs} , a ser utilizado nas análises elásticas do projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de limites de serviço, deve ser calculado pela expressão:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci} \quad (8)$$

Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou de uma seção transversal, pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante (E_{cs}) (PINHEIRO, 2007).

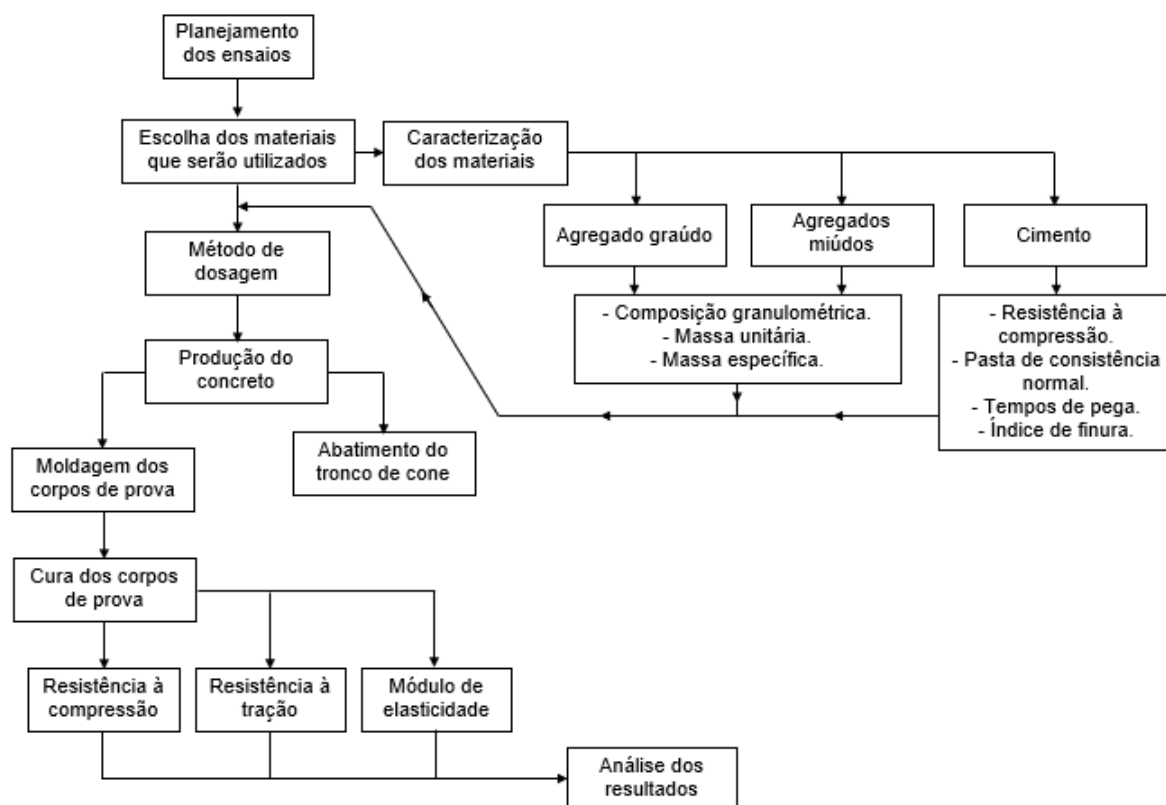
3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados o método de dosagem que foi utilizado para a realização da pesquisa, bem como os materiais escolhidos e os ensaios que foram realizados para caracterizá-los.

3.1 Planejamento dos ensaios

A partir dos ensaios necessários para a caracterização dos materiais e obtenção dos resultados foi elaborado um fluxograma (Figura 3.1) que retrata resumidamente as etapas realizadas, bem como a sequência de realização das atividades.

Figura 3.1 - Planejamento dos ensaios.



Fonte – Própria.

3.2 Variáveis independentes

As variáveis independentes analisadas foram: método de dosagem; abatimento do tronco de cone; tipo do cimento; tipos de agregado miúdo; tipo de agregado graúdo; água de amassamento; moldagem dos corpos de prova; tipo de cura.

3.2.1 Método de dosagem

O método de dosagem adotado foi o IPT/EPUSP, que tem como ponto principal o estabelecimento do teor ótimo de argamassa da mistura, que é aquele que leva ao acabamento desejado. O método apresenta como vantagens: ser de fácil dosagem; não requerer caracterização prévia dos materiais e ser totalmente experimental.

O conceito principal do método é a busca das curvas que expressam o comportamento dos materiais e não isoladamente um traço para determinada resistência ou f_{ck} . Para tanto, adotam-se três traços com a mesma trabalhabilidade e teor de argamassa, o que possibilita que se gerem as curvas características. São necessários então, três pontos para poder montar o diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento.

Para se obter o primeiro traço, determinou-se o teor de argamassa (α), que foi de 57%. Procedeu-se a determinação das proporções de cimento, areia e brita do traço, descrito pela escala 1:a:p, sendo “1” a parte de cimento; “a” a parte de areia e “p” a parte de brita. Inicialmente foi utilizado o traço básico, em que $a + p = 5$. Assim, obteve-se as porções de areia e pedra com a equação:

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + a + p} \quad (9)$$

Adotou-se um valor fixo de brita de 46 kg. A relação a/c pré-estabelecida foi de 50%. Seguiu-se então, a mistura em betoneira do traço básico 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa), em que $5 = a + p$. Foram analisados o teor de argamassa seca e a relação a/c por meio de observações visuais da mistura, associada ao manuseio do concreto para verificar o aspecto de trabalhabilidade, além da realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, verificando-se a

necessidade de alterar o teor de argamassa e/ou a relação a/c. A partir das informações obtidas do traço básico, foram confeccionados o traço rico (1:3,5) e traço pobre (1:6,5).

3.2.2 Abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento seguiu as prescrições da NBR NM 67 (ABNT, 1998). O molde deve ter a forma de um tronco de cone oco, com diâmetro da base inferior de 200 mm, diâmetro da base superior de 100 mm e altura de 300 mm. Inicialmente, coloca-se o concreto no molde em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde, compactando cada camada com 25 golpes da haste de socamento. Então retira-se o molde e obtém-se o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova. O ensaio foi realizado para os seis traços produzidos e os resultados apresentados na seção 4.2.

3.2.3 Tipo de cimento

O cimento utilizado para a produção dos traços de concreto objetos deste estudo foi o Tocantins CP II-F-32 (Cimento Portland composto com fíler) normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

3.2.4 Tipos de agregado miúdo

A areia natural que foi utilizada como agregado miúdo é proveniente da região do município de Faina-GO. A escolha foi feita devido a sua reconhecida qualidade no mercado.

A areia artificial que foi utilizada como agregado miúdo é proveniente de processos de britagem de rochas de granito da Pedreira Anhanguera, localizada no Município de Caturaí-GO.

3.2.5 Tipo de agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi brita de número 1 proveniente de rochas de granito da Pedreira Anhanguera, localizada no Município de Caturaí-GO.

3.2.6 Água de amassamento

A água utilizada nos ensaios deve ser potável e foi fornecida pela SANEAGO.

3.2.7 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova seguiu as determinações da NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram utilizados 29 moldes com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, que conjuntamente com suas bases foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral. O concreto foi introduzido nos moldes em três camadas de volumes aproximadamente iguais e adensadas utilizando a haste, com 12 golpes por camada.

3.2.8 Tipo de cura

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram por 24 horas nos moldes. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e deu-se início ao processo de cura dos mesmos conforme as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016). Permaneceram submetidos à cura úmida até o momento dos ensaios.

3.3 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes analisadas foram: a resistência à compressão; módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.

3.3.1 Resistência à compressão

O ensaio para determinação da resistência à compressão axial seguiu as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018). Preliminarmente, capearam-se as bases dos

corpos de prova garantindo que estivessem planas e perpendiculares. Antes do ensaio, as faces do corpo de prova e dos pratos da máquina de ensaio foram limpas. Os corpos de prova foram colocados centralizados no prato inferior da prensa, de modo que seu eixo coincida com o eixo da prensa.

O carregamento de ensaio foi aplicado continuamente com velocidade de 0,45 MPa/s e cessado quando ocorreu a ruptura dos corpos de prova. Obteve-se a força máxima aplicada para a ruptura expressa em newtons. A resistência à compressão axial, expressa em MPa, foi obtida dividindo-se a força aplicada pela área da seção transversal em mm².

3.3.2 Módulo de elasticidade

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade do concreto seguiu as determinações da NBR 8522 (ABNT, 2017). Realizou-se o ensaio em 4 corpos de prova cilíndricos, curados em câmara úmida, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Estes foram posicionados ao centro da prensa, e submetidos a três carregamentos e descarregamentos sucessivos entre a tensão inicial de 0,5 MPa e a tensão limite máxima de 0,3*f_c, determinada previamente em quatro corpos de prova ensaiados a compressão axial conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), quando então foram tomadas as medidas de deformação, sendo o módulo de elasticidade calculado a partir da inclinação de reta tangente imaginária, traçada paralela à reta secante construída com dados da curva tensão-deformação, obtida no ensaio.

3.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiu as determinações da NBR 7222 (ABNT, 2011). Posicionou-se cada um dos quatro corpos de prova com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm com o eixo horizontal entre os pratos da prensa, sendo aplicada uma força até a sua ruptura por tração indireta. A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela equação:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d \ell} \quad (10)$$

onde

F é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

d é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

ℓ é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

3.4 Caracterização dos materiais

Após a escolha dos materiais é imprescindível a caracterização dos mesmos para definir suas características e assim vincular os resultados obtidos ao tipo de material utilizado.

3.4.1 Cimento

Foram realizados os seguintes ensaios:

- Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos - NBR 7215 (ABNT, 2019).
- Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal - NBR 16606 (ABNT, 2018).
- Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega - NBR 16607 (ABNT, 2018).
- Cimento portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) - NBR 11579 (ABNT, 2013).

3.4.2 Agregado miúdo

Foram realizados os seguintes ensaios:

- Determinação da composição granulométrica dos agregados - NBR MN 248 (ABNT, 2003).
- Agregados - Determinação da massa unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006).
- Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica - NBR 6458 (ABNT, 2017).

3.4.3 Agregado graúdo

Foram realizados os seguintes ensaios:

- Determinação da composição granulométrica dos agregados - NBR MN 248 (ABNT, 2003).
- Agregados - Determinação da massa unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006).
- Agregado graúdo - Determinação da massa específica - NBR NM 53 (ABNT, 2009).

3.4.4 Concreto no estado fresco

Foi realizado o seguinte ensaio:

- Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR NM 67 (ABNT, 1998).

3.4.5 Concreto no estado endurecido

Foram realizados os seguintes ensaios:

- Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - NBR 5739 (ABNT, 2018).
- Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão - NBR 8522 (ABNT, 2017).
- Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos - NBR 7222 (ABNT, 2011).

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados. Trata-se da caracterização dos materiais, produção do concreto e ensaios do concreto no estado endurecido.

4.1 Caracterização dos materiais

Os materiais caracterizados foram: cimento, areia natural, areia artificial e brita.

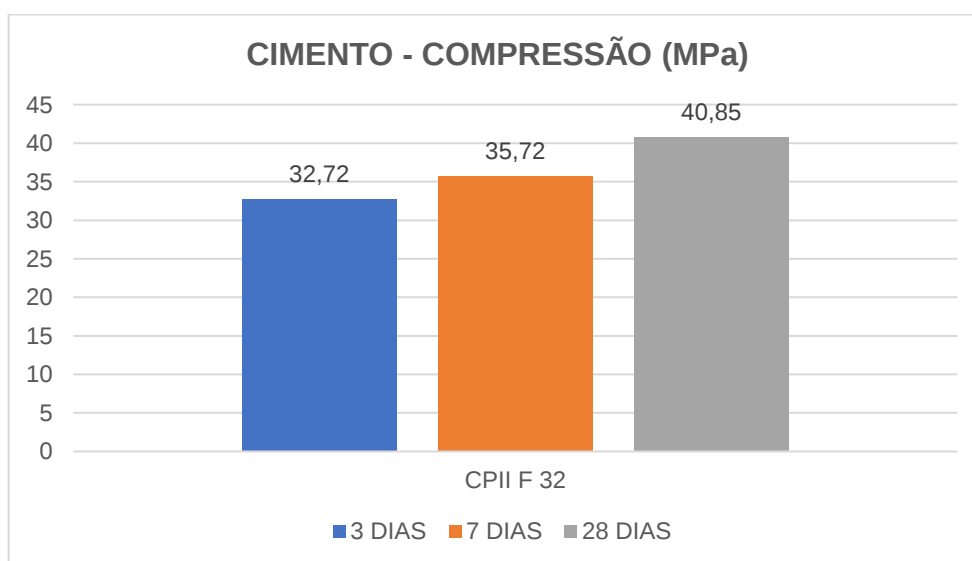
4.1.1 Cimento

Para a caracterização do cimento foram realizados os seguintes ensaios: determinação da resistência à compressão; determinação da pasta de consistência normal; determinação dos tempos de pega e determinação da finura por meio da peneira nº 200.

4.1.1.1 Determinação da resistência à compressão

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova produzidos com o cimento Portland CP II-F-32.

Figura 4.1 – Valores médios de resistência à compressão do cimento.



Fonte – Própria.

A determinação da resistência à compressão de corpos cilíndricos é realizada conforme as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram moldados doze corpos de prova e estes ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

4.1.1.2 Determinação da pasta de consistência normal

Na Tabela 4.1 estão representados os resultados obtidos nos ensaios executados no aparelho Vicat para determinação da pasta de consistência normal, realizados conforme a NBR 16606 (ABNT, 2018).

Tabela 4.1 – Resultados obtidos no Aparelho Vicat.

Volume H ₂ O (ml)	Medida (mm)
150	29,0
155	16,0
159	13,0
162	10,5
165	12,0
170	7,5
175	6,0

Fonte – Própria.

O resultado final obtido foi de 6,0 mm, que está dentro do intervalo esperado (entre 5 e 7 mm) para esse experimento. O percentual de água para a obtenção da pasta de consistência normal para o cimento Portland é calculado com a seguinte expressão:

$$A = (\text{massa de água} / \text{massa de cimento}) * 100$$

$$A = (175/500) * 100$$

$$A = 35\%$$

O percentual de água (em massa) necessário para obtenção da Pasta de Consistência Normal para o Cimento Portland CPII F 32 da amostra analisada é de 35%.

4.1.1.3 Determinação dos tempos de pega

O ensaio para determinação dos tempos de início e fim de pega é realizado conforme a NBR 16607 (ABNT, 2018). O tempo de início de pega é o intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetra na pasta até uma distância de (4 ± 1) mm da placa base. O tempo de fim de pega é o intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat penetra 0,5 mm na pasta.

Dessa forma, segundo os resultados obtidos, verificou-se o início de pega da pasta de cimento em estudo após 190 minutos, sendo verificada a distância de 4 mm entre a agulha de Vicat e a base de vidro. Já o fim de pega, foi constatado com um tempo de 240 minutos, com a agulha de Vicat penetrando menos de 0,5 mm na pasta.

4.1.1.4 Determinação da finura do cimento Portland por meio da peneira nº 200

A determinação da finura do cimento Portland CII F 32 por peneiramento é realizada conforme as prescrições da NBR 11579 (ABNT, 2013). O índice de finura do Cimento Portland (F) é calculado com a expressão:

$$F = \left(\frac{\text{resíduo retido}}{\text{massa de cimento}} \right) * 100$$

$$F = \left(\frac{0,30g}{50g} \right) * 100$$

$$F = 0,6\%$$

A amostra do cimento Portland CII F 32 apresentou índice de finura de 0,6%, o que atende ao requisito da NBR 16697 (ABNT, 2018), que determina que o índice de finura não seja superior a 12%.

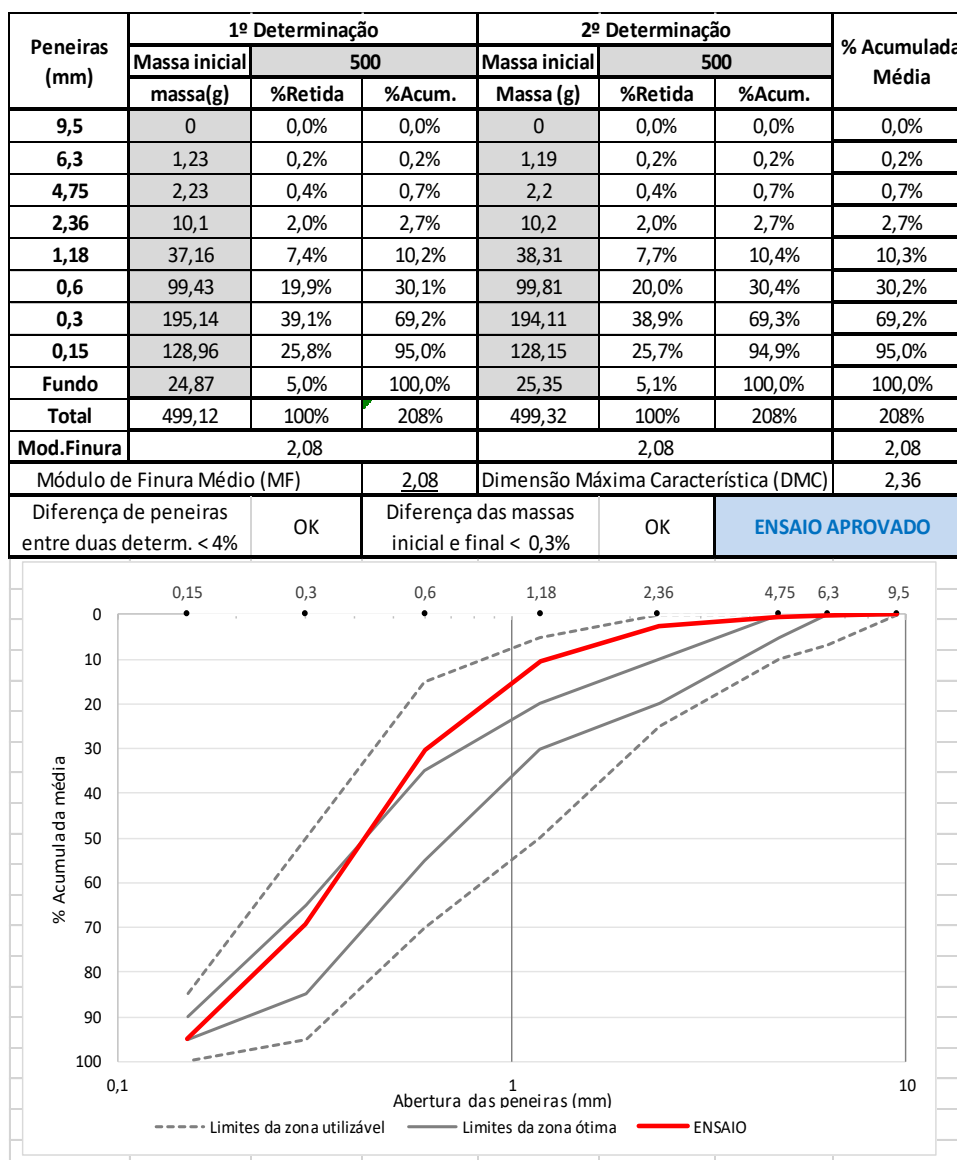
4.1.2 Agregados miúdos

Para a caracterização dos agregados miúdos foram realizados os seguintes ensaios: determinação da composição granulométrica; determinação da massa unitária e determinação da massa específica.

4.1.2.1 Determinação da composição granulométrica – areia natural

Na Figura 4.2 são apresentados o resultado do peneiramento, realizado em duas determinações, e a respectiva curva granulométrica da areia natural utilizada.

Figura 4.2 – Resultado do ensaio de composição granulométrica da areia natural.



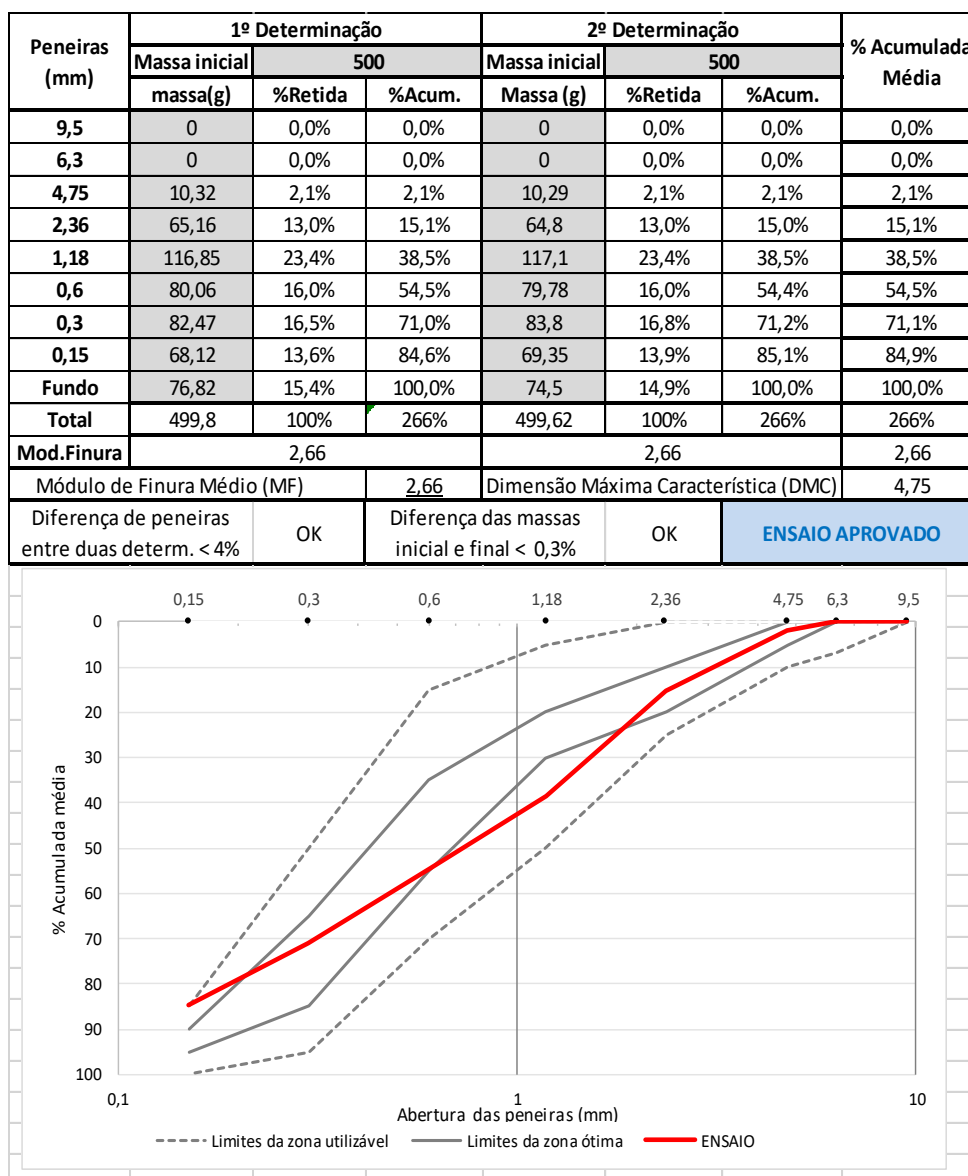
Fonte – Laboratório de materiais de construção, IFG.

A determinação da composição granulométrica da areia natural é realizada conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Observou-se que a amostra apresentou Dimensão Máxima Característica (DMC) igual a 2,36 mm. O módulo de finura foi igual a 2,08. Verificou-se que a curva granulométrica ficou dentro dos limites da zona utilizável.

4.1.2.2 Determinação da composição granulométrica – areia artificial

Na Figura 4.3 são apresentados o resultado do peneiramento, realizado em duas determinações, e a respectiva curva granulométrica da areia artificial utilizada.

Figura 4.3 – Resultado do ensaio de composição granulométrica da areia artificial.



Fonte – Laboratório de materiais de construção, IFG.

A determinação da composição granulométrica da areia artificial é realizada conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Constatou-se que a amostra apresentou Dimensão Máxima Característica (DMC) igual a 4,75 mm. O módulo de finura foi igual a 2,66. Observou-se que a curva granulométrica ficou dentro dos limites da zona utilizável.

4.1.2.3 Determinação da massa unitária – areia natural

A NBR NM 45 (ABNT, 2006) estabelece o método para a determinação da densidade a granel de agregados miúdos, graúdos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Este método se aplica aos agregados com dimensão máxima característica igual ou menor que 75 mm. A massa unitária (M_u) é calculada com a seguinte expressão:

$$M_u = \frac{M_{(r+a)} - M_r}{V} \quad (11)$$

onde $M_{(r+a)}$ é a massa do recipiente mais o agregado em quilogramas; M_r é a massa do recipiente vazio em quilogramas e V é o volume do recipiente em decímetros cúbicos.

Foi utilizado um recipiente com 7,37 kg (M_r). As dimensões do mesmo são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dimensões do recipiente – areia natural.

Largura (dm)	Comprimento (dm)	Altura (dm)
3,17	3,17	1,50

Fonte – Própria.

O volume do recipiente foi calculado multiplicando-se suas dimensões:

$$V = largura \times comprimento \times altura$$

$$V = 3,17 \times 3,17 \times 1,50$$

$$V = 15,07 \, dm^3$$

Foram realizadas três determinações e os resultados são apresentados a seguir.

- Primeira determinação: $M_{(r+a)} = 30,60 \text{ kg}$; $M_r = 7,37 \text{ kg}$; $V = 15,07 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com expressão 11:

$$Mu = \frac{30,60 - 7,37}{15,07}$$

$$Mu = 1,54 \text{ kg/dm}^3$$

- Segunda determinação: $M_{(r+a)} = 30,78 \text{ kg}$; $M_r = 7,37 \text{ kg}$; $V = 15,07 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com a expressão 11:

$$Mu = \frac{30,78 - 7,37}{15,07}$$

$$Mu = 1,55 \text{ kg/dm}^3$$

- Terceira determinação: $M_{(r+a)} = 30,74 \text{ kg}$; $M_r = 7,37 \text{ kg}$; $V = 15,07 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com a expressão 11:

$$Mu = \frac{30,74 - 7,37}{15,07}$$

$$Mu = 1,55 \text{ kg/dm}^3$$

O valor da massa unitária da areia natural foi obtido pela média das três determinações.

$$Mu = \frac{1,54 + 1,55 + 1,55}{3}$$

$$Mu = 1,55 \text{ kg/dm}^3$$

O valor médio da massa unitária da areia natural obtido no ensaio foi de 1,55 kg/dm³. A variação da massa unitária do agregado foi de 0,65% em relação ao valor médio da massa unitária medida nos três ensaios, o que atende a NBR NM 45 (ABNT, 2006) que permite variação de até 1%.

4.1.2.4 Determinação da massa unitária – areia artificial

A NBR NM 45 (ABNT, 2006) estabelece o método para a determinação da densidade a granel de agregados miúdos, grãos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Este método se aplica aos agregados com dimensão máxima característica igual ou menor que 75 mm. A massa unitária (Mu) é calculada com a expressão 11.

Foi utilizado um recipiente com 7,37 kg (Mr). As dimensões do mesmo são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dimensões do recipiente – areia artificial.

Largura (dm)	Comprimento (dm)	Altura (dm)
3,17	3,17	1,50

Fonte – Própria.

O volume do recipiente foi calculado multiplicando-se suas dimensões:

$$V = largura \times comprimento \times altura$$

$$V = 3,17 \times 3,17 \times 1,50$$

$$V = 15,07 \text{ dm}^3$$

Foram realizadas três determinações e os resultados são apresentados a seguir.

- Primeira determinação: $M_{(r+a)} = 32,94 \text{ kg}$; $M_r = 7,37 \text{ kg}$; $V = 15,07 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com expressão 11:

$$Mu = \frac{32,94 - 7,37}{15,07}$$

$$Mu = 1,70 \text{ kg/dm}^3$$

- Segunda determinação: $M_{(r+a)} = 33,30 \text{ kg}$; $M_r = 7,37 \text{ kg}$; $V = 15,07 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com a expressão 11:

$$Mu = \frac{33,30 - 7,37}{15,07}$$

$$Mu = 1,72 \text{ kg/dm}^3$$

- Terceira determinação: $M_{(r+a)} = 33,24 \text{ kg}$; $M_r = 7,37 \text{ kg}$; $V = 15,07 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com a expressão 11:

$$Mu = \frac{33,24 - 7,37}{15,07}$$

$$Mu = 1,72 \text{ kg/dm}^3$$

O valor da massa unitária da areia artificial foi obtido pela média das três determinações.

$$Mu = \frac{1,70 + 1,72 + 1,72}{3}$$

$$Mu = 1,71 \text{ kg/dm}^3$$

O valor médio da massa unitária da areia artificial obtido no ensaio foi de 1,71 kg/dm³. A variação da massa unitária do agregado foi de 0,6% em relação ao valor médio da massa unitária medida nos três ensaios, o que atende a NBR NM 45 (ABNT, 2006) que permite variação de até 1%.

4.1.2.5 Determinação da massa específica – areia natural

A determinação da massa específica dos agregados miúdos é feita conforme as determinações da NBR 6458 (ABNT, 2017).

A massa específica do agregado miúdo (γ_{am}) é calculada com a seguinte expressão:

$$\gamma_{am} = \frac{(Bv + \text{areia}) - Bv}{\text{areia} + (Bv + \text{água}) - (Bv + \text{areia} + \text{água})} \quad (12)$$

onde Bv é a massa do balão volumétrico em gramas.

A massa específica da areia natural (γ_{an}) foi calculada com a expressão 12. Foram realizadas duas determinações e os resultados são apresentados a seguir.

- Primeira determinação

Utilizando a expressão 12 e os dados apresentados na Tabela 4.4, calculou-se o valor da massa específica da areia natural.

Tabela 4.4 – Massas da primeira determinação – areia natural.

Balão volumétrico (Bv)	211,76 g
Bv + areia	271,76 g
Bv + água	709,08 g
Bv + areia + água	746,18 g

Fonte – Própria.

$$\gamma_{an1} = \frac{271,76 - 211,76}{60 + (709,08) - (746,18)}$$

$$\gamma_{an1} = \frac{60}{22,90}$$

$$\gamma_{an1} = 2,62 \text{ g/cm}^3$$

- Segunda determinação

Utilizando a expressão 12 e os dados apresentados na Tabela 4.5, calculou-se o valor da massa específica da areia natural.

Tabela 4.5 – Massas da segunda determinação – areia natural.

Balão volumétrico (Bv)	212,97 g
Bv + areia	272,97 g
Bv + água	710,23 g
Bv + areia + água	747,29 g

Fonte – Própria.

$$\gamma_{an2} = \frac{272,97 - 212,97}{60 + (710,23) - (747,29)}$$

$$\gamma_{an2} = \frac{60}{22,94}$$

$$\gamma_{an2} = 2,62 \text{ g/cm}^3$$

O valor da massa específica da areia natural (γ_{an}) foi obtida pela média das duas determinações.

$$\gamma_{an} = \frac{2,62 + 2,62}{2}$$

$$\gamma_{an} = 2,62 \text{ g/cm}^3$$

A temperatura da água medida durante a realização do ensaio foi de 29,1°C. Para essa temperatura o fator de correção é 0,9959, conforme determinado na Tabela 2 da NBR 6458 (ABNT, 2017). Então, chega-se ao valor da massa específica corrigida da areia natural (γ_{an}).

$$\gamma_{an} = 2,62 * 0,9959$$

$$\gamma_{an} = 2,61 \text{ g/cm}^3$$

4.1.2.6 Determinação da massa específica – areia artificial

A massa específica da areia artificial (γ_{aa}) foi calculada com a expressão 12. Foram realizadas duas determinações e os resultados são apresentados a seguir.

- Primeira determinação

Utilizando a expressão 12 e os dados apresentados na Tabela 4.6, calculou-se o valor da massa específica da areia artificial.

Tabela 4.6 – Massas da primeira determinação – areia artificial.

Balão volumétrico (Bv)	181,35 g
Bv + areia	241,35 g
Bv + água	677,77 g
Bv + areia + água	715,12 g

Fonte – Própria.

$$\gamma_{aa1} = \frac{241,35 - 181,35}{60 + (677,77) - (715,12)}$$

$$\gamma_{aa1} = \frac{60}{22,65}$$

$$\gamma_{aa1} = 2,65 \text{ g/cm}^3$$

- Segunda determinação

Utilizando a expressão 12 e os dados apresentados na Tabela 4.7, calculou-se o valor da massa específica da areia artificial.

Tabela 4.7 – Massas da segunda determinação – areia artificial.

Balão volumétrico (Bv)	133,96 g
Bv + areia	193,96 g
Bv + água	630,89 g
Bv + areia + água	668,19 g

Fonte – Própria.

$$\gamma_{aa2} = \frac{193,96 - 133,96}{60 + (630,89) - (668,19)}$$

$$\gamma_{aa2} = \frac{60}{22,70}$$

$$\gamma_{aa2} = 2,64 \text{ g/cm}^3$$

O valor da massa específica da areia artificial (γ_{aa}) foi obtida pela média das duas determinações.

$$\gamma_{aa} = \frac{2,65 + 2,64}{2}$$

$$\gamma_{aa} = 2,64 \text{ g/cm}^3$$

A temperatura da água medida durante a realização do ensaio foi de 29,1°C. Para essa temperatura o fator de correção é 0,9959, conforme determinado na Tabela 2 da NBR 6458 (ABNT, 2017). Então, chega-se ao valor da massa específica corrigida da areia artificial (γ_{aa}).

$$\gamma_{aa} = 2,64 * 0,9959$$

$$\gamma_{aa} = 2,63 \text{ g/cm}^3$$

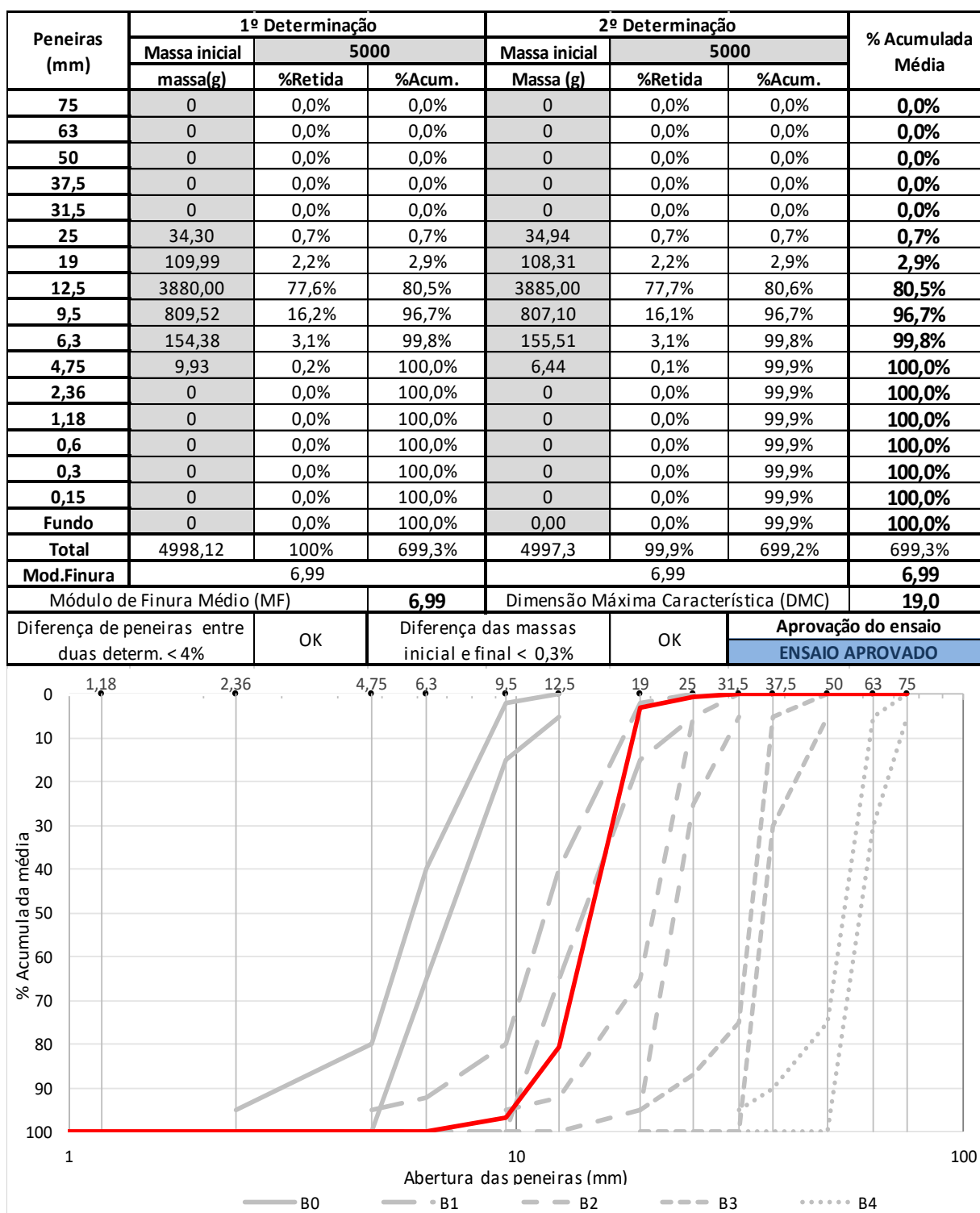
4.1.3 Agregado graúdo

Para a caracterização do agregado graúdo foram realizados os seguintes ensaios: determinação da composição granulométrica; determinação da massa unitária e determinação da massa específica.

4.1.3.1 Determinação da composição granulométrica

A determinação da composição granulométrica da brita é realizada conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na Figura 4.4 são apresentados os resultados do peneiramento, realizado em duas determinações, e a respectiva curva granulométrica da brita. Observou-se que a amostra apresentou Dimensão Máxima Característica (DMC) igual a 19 mm, portanto brita de número 1. O módulo de finura foi igual a 6,99.

Figura 4.4 – Resultado do ensaio de composição granulométrica da brita.



Fonte – Laboratório de materiais de construção, IFG.

4.1.3.2 Determinação da massa unitária

A NBR NM 45 (ABNT, 2006) estabelece o método para a determinação da densidade a granel de agregados miúdos, graúdos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Este método se aplica aos agregados com dimensão máxima característica igual ou menor que 75 mm. A massa unitária (M_u) é calculada com a expressão 11.

Foi utilizado um recipiente com 8,82 kg (M_r). As dimensões do mesmo são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Dimensões do recipiente - brita.

Largura (dm)	Comprimento (dm)	Altura (dm)
3,17	3,17	2,00

Fonte – Própria.

O volume do recipiente foi calculado multiplicando-se suas dimensões:

$$V = largura \times comprimento \times altura$$

$$V = 3,17 \times 3,17 \times 2,00$$

$$V = 20,10 \, dm^3$$

Foram realizadas três determinações e os resultados são apresentados a seguir.

- Primeira determinação: $M_{(r+a)} = 39,82 \, kg$; $M_r = 8,82 \, kg$; $V = 20,10 \, dm^3$

A massa unitária é calculada com expressão 11:

$$M_u = \frac{39,82 - 8,82}{20,10}$$

$$M_u = 1,54 \, kg/dm^3$$

- Segunda determinação: $M_{(r+a)} = 39,92 \text{ kg}$; $M_r = 8,82 \text{ kg}$; $V = 20,10 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com a expressão 11:

$$Mu = \frac{39,92 - 8,82}{20,10}$$

$$Mu = 1,55 \text{ kg/dm}^3$$

- Terceira determinação: $M_{(r+a)} = 39,80 \text{ kg}$; $M_r = 8,82 \text{ kg}$; $V = 20,10 \text{ dm}^3$

A massa unitária é calculada com a expressão 11:

$$Mu = \frac{39,80 - 8,82}{20,10}$$

$$Mu = 1,54 \text{ kg/dm}^3$$

O valor da massa unitária do agregado gráúdo foi obtido pela média das três determinações.

$$Mu = \frac{1,54 + 1,55 + 1,54}{3}$$

$$Mu = 1,54 \text{ kg/dm}^3$$

O valor médio da massa unitária da brita obtido no ensaio foi de $1,54 \text{ kg/dm}^3$. A variação da massa unitária do agregado foi de 0,65% em relação ao valor médio da massa unitária medida nos três ensaios, o que atende a NBR NM 45 (ABNT, 2006) que permite variação de até 1%. Quanto à classificação, o agregado é normal, pois a massa unitária obtida está entre 1 e 2 kg/dm^3 .

4.1.3.3 Determinação da massa específica

A NBR NM 53 (ABNT, 2009) estabelece o método de determinação da massa específica do agregado gráúdo, na condição seco, destinados ao uso em concreto.

Este método se aplica aos agregados cuja maior parte de suas partículas fica retida na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ou a porção retida nessa mesma peneira, através da realização de pelo menos dois ensaios. A massa específica do agregado gráúdo (γ_{ag}) é calculada com a seguinte expressão:

$$\gamma_{ag} = \frac{\text{massa seca}}{(\text{massa saturada} - \text{massa submersa})} \quad (13)$$

Os valores das massas utilizadas nas duas determinações realizadas são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Valores das massas seca, saturada e submersa.

Massa (g)	1ª Determinação	2ª Determinação
Seca	374,41	543,40
Saturada	375,79	545,60
Submersa	235,77	341,17

Fonte – Própria.

Foram realizadas duas determinações e os resultados são apresentados a seguir.

- Primeira determinação

Utilizando a expressão 13 e os dados apresentados na Tabela 4.9, calculou-se o valor da massa específica da brita.

$$\gamma_1 = \frac{374,41}{(375,79 - 235,77)}$$

$$\gamma_1 = 2,67 \text{ g/cm}^3$$

- Segunda determinação

Utilizando a expressão 13 e os dados apresentados na Tabela 4.9, calculou-se o valor da massa específica da brita.

$$\gamma_2 = \frac{543,40}{(545,60 - 341,17)}$$

$$\gamma_2 = 2,66 \text{ g/cm}^3$$

O valor da massa específica da brita (γ_b) foi obtida pela média das duas determinações.

$$\gamma_b = \frac{2,67 + 2,66}{2}$$

$$\gamma_b = 2,66 \text{ g/cm}^3$$

Os valores obtidos na primeira e na segunda determinações para a massa específica tiveram uma variação de 0,01 g/cm³. Com isso o resultado obtido foi satisfatório, já que a NBR NM 53 (ABNT, 2009) prevê que a diferença entre os valores obtidos nas duas determinações para a massa específica não seja superior a 0,02 g/cm³.

4.2 Produção do concreto

O método de dosagem utilizado foi o IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992). Foram produzidos os traços:

- básico, pobre e rico com areia natural;
- básico, pobre e rico com areia artificial.

4.2.1 Traço básico

A mistura em betoneira do traço básico foi realizada na proporção 1:5 (cimento : agregados secos totais, em massa), em que 5 = areia + pedra.

Na Tabela 4.10 são apresentados os dados referentes ao traço básico produzido com areia natural.

Tabela 4.10 – Traço básico produzido com areia natural.

Teor de argamassa (α)	0,57
Traço (cimento : areia : pedra)	(1 : 2,42 : 2,58)
Relação água/cimento	0,65
Abatimento (cm)	10,00
Massa de brita (kg)	46,00
Massa de areia (kg)	43,15
Massa de cimento (kg)	17,83
Massa de água (kg)	11,54
Massa específica do concreto (kg/dm ³)	2,29

Fonte – Própria.

Na Tabela 4.11 são apresentados os dados referentes ao traço básico produzido com areia artificial.

Tabela 4.11 – Traço básico produzido com areia artificial.

Teor de argamassa (α)	0,57
Traço (cimento : areia : pedra)	(1 : 2,42 : 2,58)
Relação água/cimento	0,59
Abatimento (cm)	10,00
Massa de brita (kg)	46,00
Massa de areia (kg)	43,15
Massa de cimento (kg)	17,83
Massa de água (kg)	10,51
Massa específica do concreto (kg/dm ³)	2,37

Fonte – Própria.

4.2.2 Traço pobre

A mistura em betoneira do traço pobre foi realizada na proporção 1:6,5 (cimento : agregados secos totais, em massa), em que 6,5 = areia + pedra.

Na Tabela 4.12 são apresentados os dados referentes ao traço pobre produzido com areia natural.

Tabela 4.12 – Traço pobre produzido com areia natural.

Teor de argamassa (α)	0,57
Traço (cimento : areia : pedra)	(1 : 3,28 : 3,22)
Relação água/cimento	0,89
Abatimento (cm)	9,00
Massa de brita (kg)	46,00
Massa de areia (kg)	46,56
Massa de cimento (kg)	14,29
Massa de água (kg)	12,68
Massa específica do concreto (kg/dm ³)	2,25

Fonte – Própria.

Na Tabela 4.13 são apresentados os dados referentes ao traço pobre produzido com areia artificial.

Tabela 4.13 – Traço pobre produzido com areia artificial.

Teor de argamassa (α)	0,57
Traço (cimento : areia : pedra)	(1 : 3,28 : 3,22)
Relação água/cimento	0,72
Abatimento (cm)	9,50
Massa de brita (kg)	46,00
Massa de areia (kg)	46,56
Massa de cimento (kg)	14,29
Massa de água (kg)	10,32
Massa específica do concreto (kg/dm ³)	2,34

Fonte – Própria.

4.2.3 Traço rico

A mistura em betoneira do traço rico foi realizada na proporção 1:3,5 (cimento : agregados secos totais, em massa), em que 3,5 = areia + pedra.

Na Tabela 4.14 são apresentados os dados referentes ao traço rico produzido com areia natural.

Tabela 4.14 – Traço rico produzido com areia natural.

Teor de argamassa (α)	0,57
Traço (cimento : areia : pedra)	(1 : 1,56 : 1,94)
Relação água/cimento	0,46
Abatimento (cm)	9,00
Massa de brita (kg)	46,00
Massa de areia (kg)	36,99
Massa de cimento (kg)	23,71
Massa de água (kg)	10,91
Massa específica do concreto (kg/dm ³)	2,32

Fonte – Própria.

Na Tabela 4.15 são apresentados os dados referentes ao traço rico produzido com areia artificial.

Tabela 4.15 – Traço rico produzido com areia artificial.

Teor de argamassa (α)	0,57
Traço (cimento : areia : pedra)	(1 : 1,56 : 1,94)
Relação água/cimento	0,46
Abatimento (cm)	10,00
Massa de brita (kg)	46,00
Massa de areia (kg)	36,99
Massa de cimento (kg)	23,71
Massa de água (kg)	11,00
Massa específica do concreto (kg/dm ³)	2,34

Fonte – Própria.

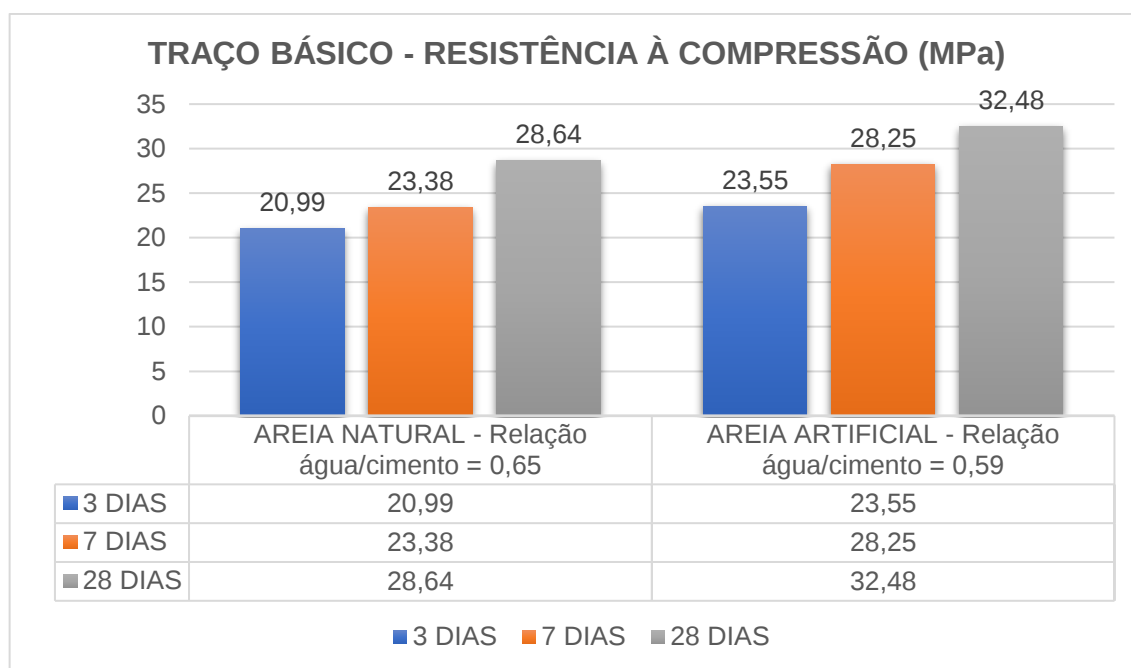
4.3 Ensaios de concreto

Foram realizados os ensaios de compressão, determinação do módulo de elasticidade e determinação da resistência à tração por compressão diametral.

4.3.1 Traço básico

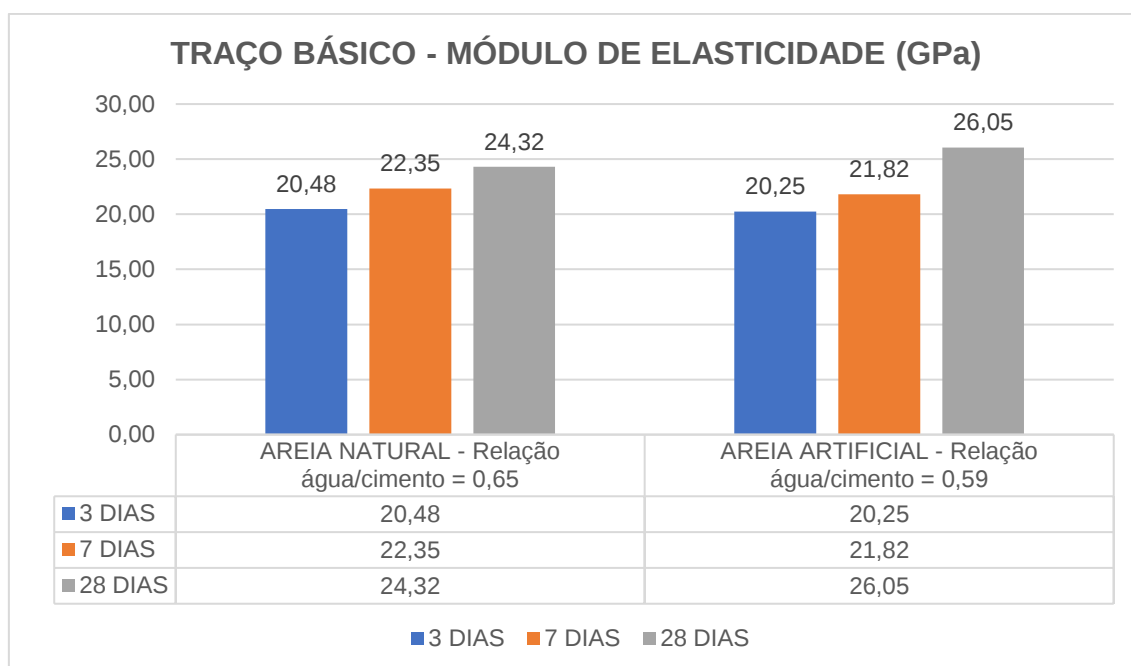
Na Figura 4.5 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova do traço básico: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Foram moldados vinte e nove corpos de prova de cada traço. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

Figura 4.5 – Resistência à compressão do traço básico.



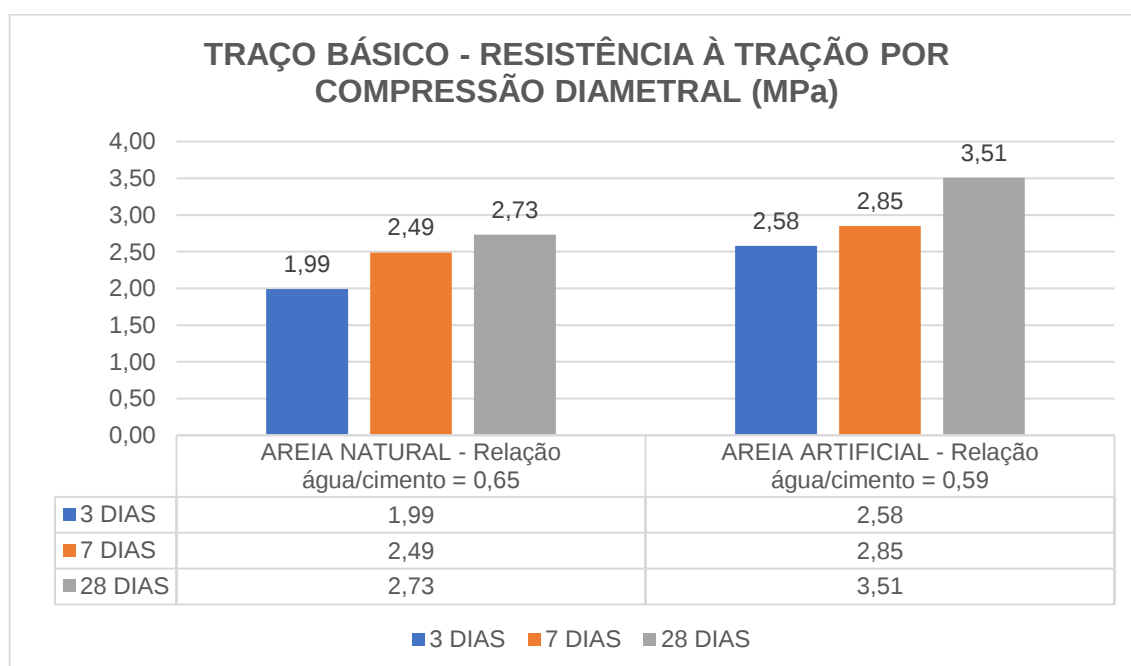
Fonte – Própria.

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade dos corpos de prova do traço básico: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

Figura 4.6 – Módulo de elasticidade do traço básico.

Fonte – Própria.

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova do traço básico: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

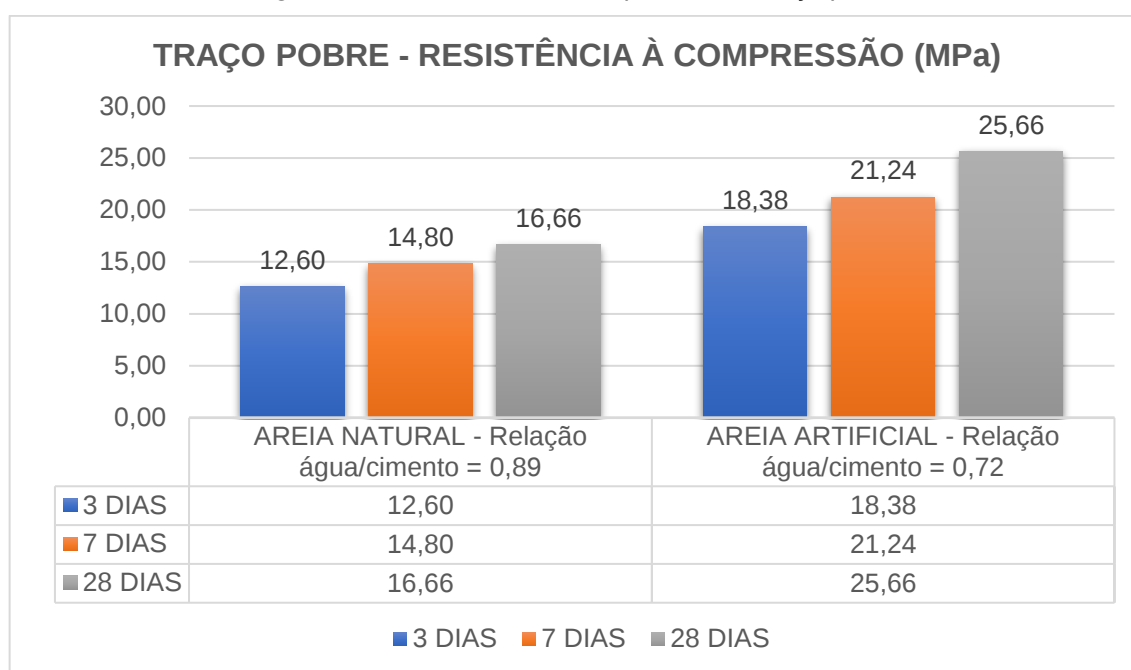
Figura 4.7 – Resistência à tração por compressão diametral do traço básico.

Fonte – Própria.

4.3.2 Traço pobre

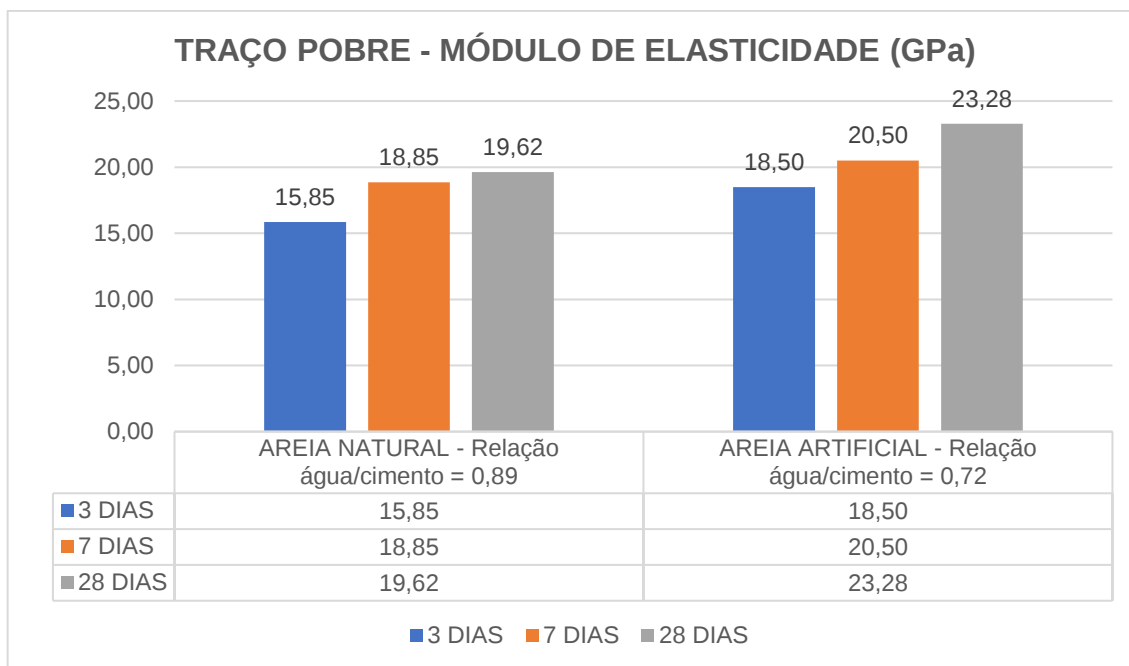
Na Figura 4.8 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova do traço pobre: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Foram moldados vinte e nove corpos de prova de cada traço. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

Figura 4.8 – Resistência à compressão do traço pobre.



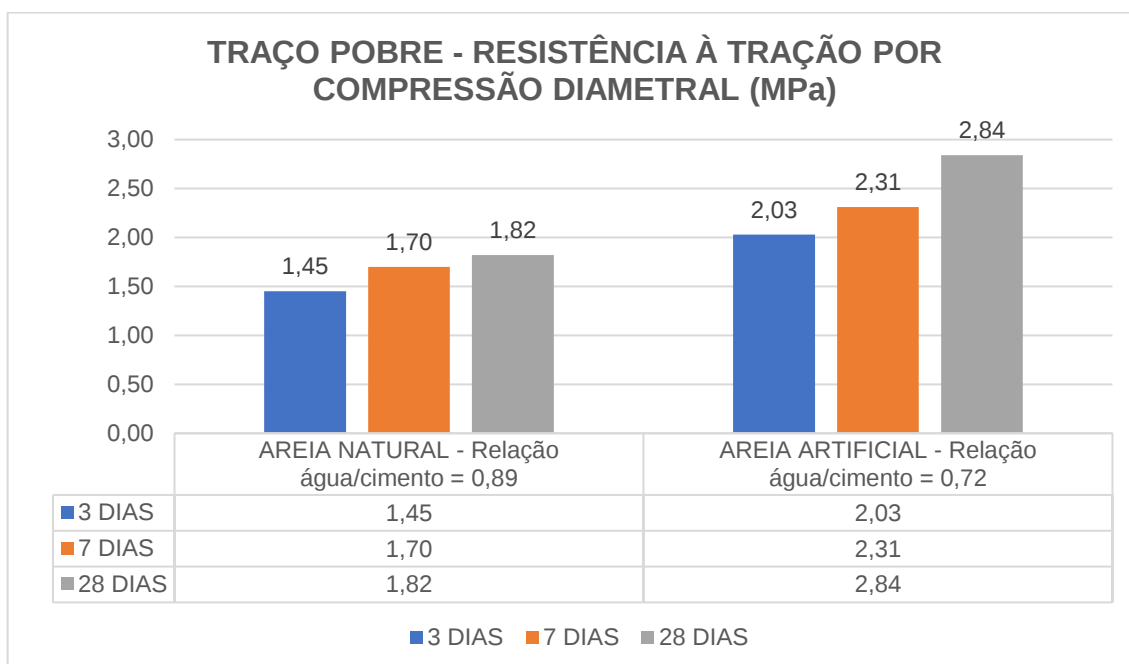
Fonte – Própria.

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade dos corpos de prova do traço pobre: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

Figura 4.9 – Módulo de elasticidade do traço pobre.

Fonte – Própria.

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova do traço pobre: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

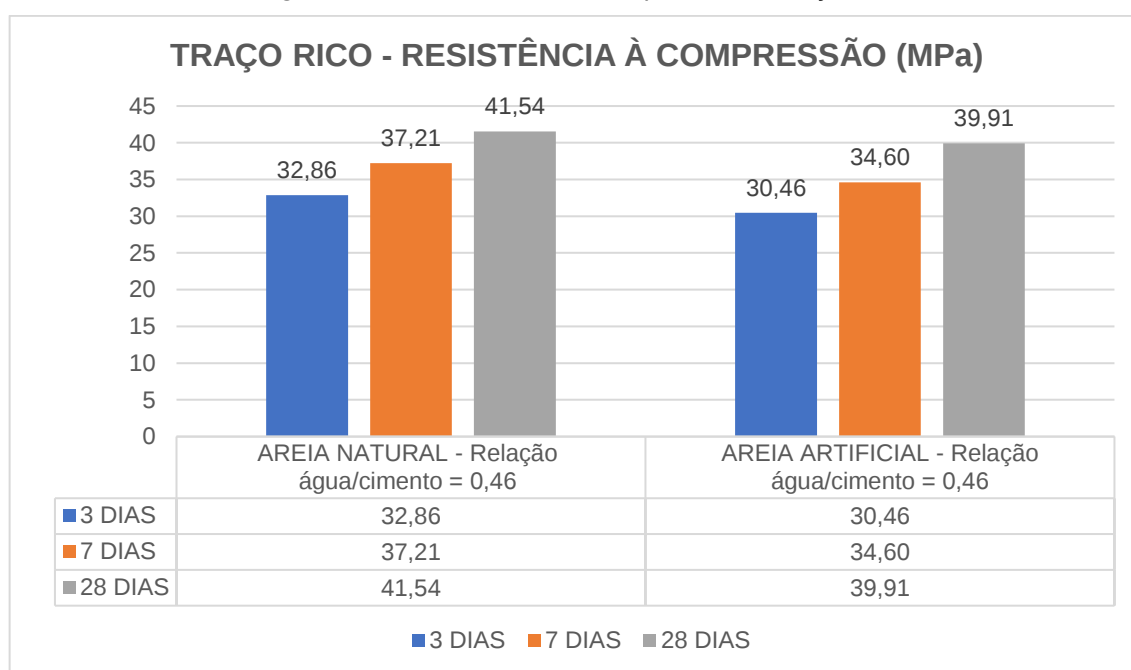
Figura 4.10 – Resistência à tração por compressão diametral do traço pobre.

Fonte – Própria.

4.3.3 Traço rico

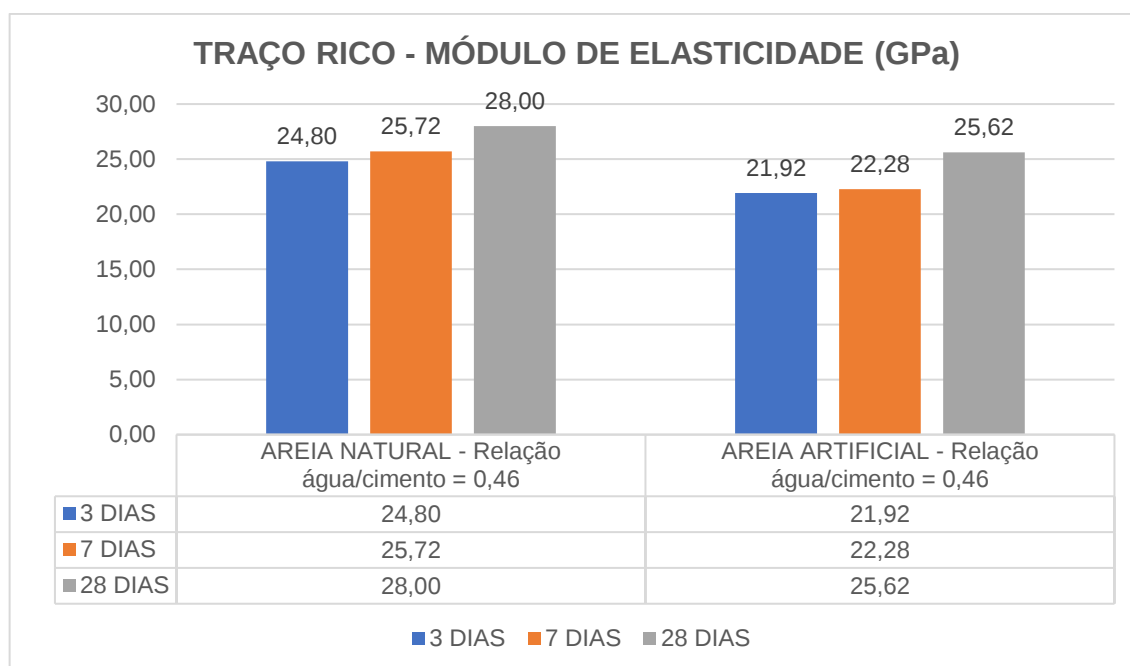
Na Figura 4.11 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova do traço rico: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Foram moldados vinte e nove corpos de prova de cada traço. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

Figura 4.11 – Resistência à compressão do traço rico.



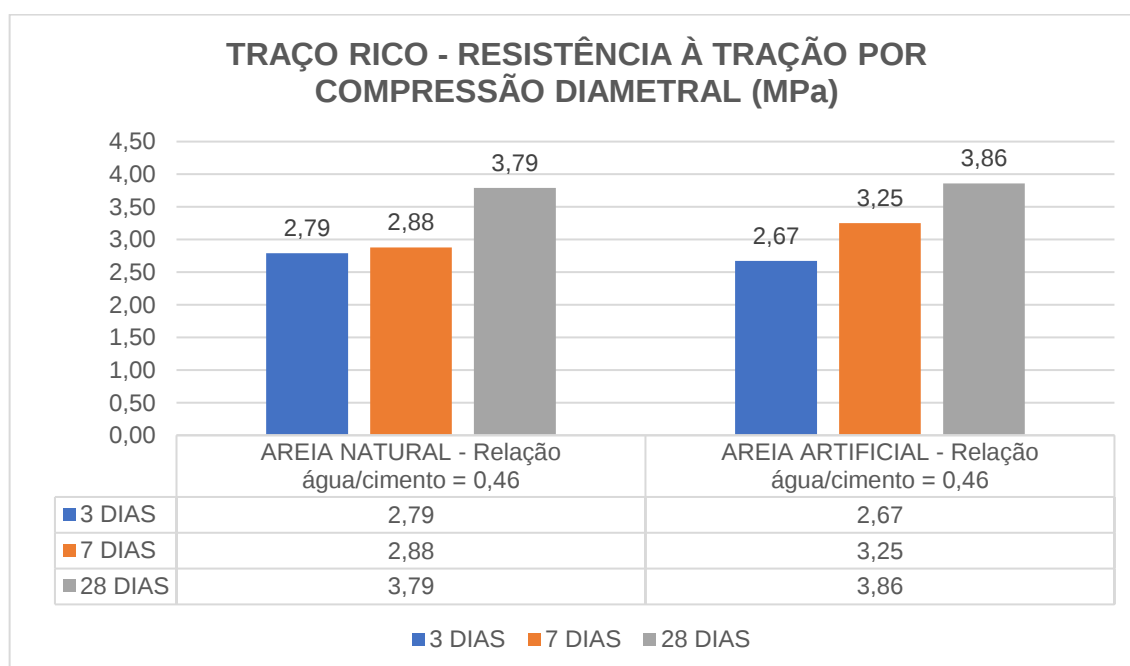
Fonte – Própria.

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade dos corpos de prova do traço rico: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

Figura 4.12 – Módulo de elasticidade do traço rico.

Fonte – Própria.

Na Figura 4.13 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova do traço rico: produzidos com areia natural e produzidos com areia artificial. Estes foram ensaiados com idades de 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos de prova de cada idade.

Figura 4.13 – Resistência à tração por compressão diametral do traço rico.

Fonte – Própria.

5 DISCUSSÕES

Nesta seção são analisados os resultados apresentados. Trata-se da resistência à compressão do cimento, tempos de início e fim de pega, massa específica do concreto, relação água/cimento e ensaios do concreto no estado endurecido.

5.1 Resistência à compressão do cimento

As resistências à compressão obtidas nos ensaios dos corpos de prova produzidos com o cimento Portland CP II-F-32 nas idades de 3, 7 e 28 dias são apresentados na Figura 4.1. Na Tabela 2.5 estão determinados os valores mínimos de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade.

O resultado alcançado no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova aos 3 dias foi de 32,72 Mpa. Portanto, comprovou-se um acréscimo de 227% em relação ao mínimo determinado para estas idade e classe de cimento.

O resultado obtido no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias foi de 35,72 Mpa. Assim, notou-se um acréscimo de 78,6% em relação ao mínimo determinado para estas idade e classe de cimento.

O resultado atingido no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias foi de 40,85 Mpa. Logo, verificou-se um acréscimo de 27,6% em relação ao mínimo determinado para estas idade e classe de cimento.

5.2 Tempos de início e fim de pega

Conforme estabelecido na Tabela 2.5, o tempo de início de pega para o cimento CP II-F-32 deve ser igual ou superior a 60 minutos. Observou-se o início de pega da pasta de cimento em estudo após 190 minutos, período que atende à determinação da NBR 16697 (ABNT, 2018).

De acordo com o apresentado na Tabela 2.3, o tempo de fim de pega para o cimento CP II-F-32 não deve exceder 600 minutos. Verificou-se o fim de pega da pasta de cimento em estudo após 240 minutos, período que atende à determinação da NBR 16697 (ABNT, 2018).

5.3 Massa específica do concreto

Percebeu-se que os concretos produzidos com areia artificial apresentaram massas específicas maiores que os concretos produzidos com areia natural. Constatou-se ainda, que areia natural possui massa específica de 2610 kg/m³ (Item 4.1.2.5) e que a areia artificial possui massa específica de 2630 kg/m³ (Item 4.1.2.6). Portanto, os resultados indicaram que a maior massa específica da areia artificial influenciou no aumento da massa específica dos concretos produzidos. Na Tabela 5.1 são apresentados os valores das massas específicas dos traços básico, pobre e rico, produzidos com as areias natural e artificial.

Tabela 5.1 – Massa específica do concreto.

	Traço básico	Traço pobre	Traço rico
Areia natural	2290 kg/m ³	2248 kg/m ³	2320 kg/m ³
Areia artificial	2370 kg/m ³	2340 kg/m ³	2340 kg/m ³

Fonte – Própria.

5.4 Relação água/cimento

Percebeu-se que a opção de estabelecer o abatimento dos concretos produzidos em 10 ± 2 cm influenciou as relações a/c dos traços básico e pobre. Na Tabela 5.2 são apresentados os valores de abatimento obtidos nos ensaios e as relações a/c dos traços básico, pobre e rico utilizando areia natural ou areia artificial.

Tabela 5.2 – Abatimento e relação água/cimento (a/c) dos concretos.

	Traço básico		Traço pobre		Traço rico	
	Abatimento (cm)	Relação a/c	Abatimento (cm)	Relação a/c	Abatimento (cm)	Relação a/c
Areia natural	10,00	0,65	9,00	0,89	9,00	0,46
Areia artificial	10,00	0,59	9,50	0,72	10,00	0,46

Fonte – Própria.

Na Tabela 5.3 estão representadas as massas de água utilizadas na produção dos traços básico, pobre e rico utilizando areia natural ou areia artificial.

Tabela 5.3 – Consumo de água dos concretos.

	Traço básico	Traço pobre	Traço rico
Areia natural	11,54 kg	12,68 kg	10,91 kg
Areia artificial	10,51 kg	10,32 kg	11,00 kg

Fonte – Própria.

Conforme os dados apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3, verificou-se um aumento de 9,8% no consumo de água no traço básico produzido com areia natural em comparação ao produzido com areia artificial obtendo-se, nos dois casos, o mesmo valor de abatimento.

Percebeu-se também que no traço pobre o consumo de água foi 22,9% superior quando produzido com areia natural em comparação ao produzido com areia artificial. Ainda assim, o abatimento obtido foi 0,5 cm menor no traço pobre executado com areia natural.

Notou-se que no traço rico houve uma redução de 0,8% no consumo de água quando produzido com areia natural em comparação ao produzido com areia artificial. Neste caso, o abatimento obtido foi 1,0 cm menor utilizando-se areia natural.

Os resultados verificados nos traços produzidos apontam que a areia natural utilizada demanda maior massa de água em comparação à areia artificial, para um mesmo valor de abatimento.

5.5 Ensaio do concreto no estado endurecido

Nesta seção são analisados os resultados apresentados. Trata-se da resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.

5.5.1 Resistência à compressão

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores de resistência à compressão para cada traço estudado e a respectiva variação percentual. Obteve-se a variação percentual entre os resultados tomando a resistência à compressão com areia natural como referência.

Tabela 5.4 – Variação da resistência à compressão.

Traço	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)		Variação %
		Areia natural	Areia artificial	
Pobre	3	12,60	18,38	+45,9
	7	14,80	21,24	+43,5
	28	16,66	25,66	+54,0
Básico	3	20,99	23,55	+12,2
	7	23,38	28,25	+20,8
	28	28,64	32,48	+13,4
Rico	3	32,86	30,46	-7,3
	7	37,21	34,60	-7,0
	28	41,54	39,91	-3,9

Fonte – Própria.

Nos resultados mostrados na Tabela 5.4, nota-se que nos traços pobre e básico o concreto com agregado artificial apresentou maior resistência à compressão em comparação ao concreto com agregado natural. Entretanto, percebe-se a tendência de redução desta diferença à medida que se aumenta o teor de cimento.

Reforçando tal análise, observa-se que no traço rico o concreto com areia natural apresentou maior resistência à compressão em relação ao concreto com areia artificial.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que o concreto para uso estrutural com armadura passiva deve ser da classe C20 ou superior. Para uso estrutural com armadura ativa deve ser da classe C25 ou superior. Os números indicadores das classes representam a resistência característica à compressão especificada em MPa para a idade de 28 dias.

Observa-se então na Tabela 5.4, que o concreto do traço pobre produzido com areia natural apresentou resultados de 16,66 MPa aos 28 dias. Por isso, só pode ser

usado em obras provisórias ou sem finalidade estrutural. Os outros concretos podem ser utilizados em estruturas com armaduras passiva e ativa.

Os resultados indicam que para valores de abatimento de 10 ± 2 cm o concreto produzido com areia artificial apresenta melhores resultados em comparação ao produzido com areia natural nos traços pobre e básico. Para o mesmo abatimento, no traço rico o concreto com areia natural apresentou melhor resultado em relação ao concreto com areia artificial.

Diante dos resultados apresentados, pode-se afirmar que ocorreu um aumento contínuo das resistências à compressão em todos os concretos analisados.

Observa-se na Tabela 5.2 que nos concretos dos traços pobre e básico, a relação a/c é menor com areia artificial em relação à areia natural. No traço rico os valores da relação a/c são iguais. Sugere-se deduzir que houve uma correlação dos resultados superiores de resistência à compressão com areia artificial nos traços pobre e básico com as menores relações a/c.

5.5.2 Módulo de elasticidade

Na Tabela 5.5 estão representados os valores do módulo de elasticidade dos traços ensaiados e a respectiva variação percentual. Calculou-se a variação percentual entre os resultados adotando o módulo de elasticidade com areia natural como referência.

Tabela 5.5 – Variação do módulo de elasticidade.

Traço	Idade (dias)	Módulo de elasticidade (GPa)		Variação %
		Areia natural	Areia artificial	
Pobre	3	15,85	18,50	+16,7
	7	18,85	20,50	+8,8
	28	19,62	23,28	+18,7
Básico	3	20,48	20,25	-1,1
	7	22,35	21,82	-2,37
	28	24,32	26,05	+7,1
Rico	3	24,80	21,92	-11,6
	7	25,72	22,28	-13,4
	28	28,00	25,62	-8,5

Fonte – Própria.

A partir dos dados apresentados, observa-se que no traço pobre o concreto com areia artificial apresentou módulo de elasticidade superior em comparação ao concreto com areia natural. No traço rico o resultado foi favorável à areia natural.

No traço básico, os resultados foram ligeiramente favoráveis à areia natural nos ensaios com idade de 3 e 7 dias. Entretanto, aos 28 dias o concreto com areia artificial apresentou módulo de elasticidade maior em comparação ao concreto com areia natural.

Contudo, o resultado do ensaio do concreto produzido com areia artificial aos 28 dias do traço básico apresentou valor incompatível com as expectativas, não favorecendo a análise assertiva.

Ainda assim, supõe-se que o fator determinante para variação observada do módulo de elasticidade foi o teor de cimento. Nota-se que, com o aumento do teor de cimento do traço, há uma melhora do módulo de elasticidade do concreto com areia natural em comparação ao concreto com areia natural.

5.5.3 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 5.6 são apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral dos traços ensaiados e a respectiva variação percentual. Calculou-se a variação percentual entre os resultados adotando o módulo de elasticidade com areia natural como referência. Ainda são apresentadas as razões entre a resistências à tração e a resistência à compressão.

Tabela 5.6 – Variação da resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Idade (dias)	Areia natural		Areia artificial		Variação %
		Resistência à tração (MPa)	% da resistência à compressão	Resistência à tração (MPa)	% da resistência à compressão	
Pobre	3	1,45	11,5	2,03	11,0	+40,0
	7	1,70	11,5	2,31	10,9	+35,9
	28	1,82	10,9	2,84	11,1	+56,0
Básico	3	1,99	9,5	2,58	11,0	+29,6
	7	2,49	10,7	2,85	10,1	+14,5
	28	2,73	9,5	3,51	10,8	+28,6
Rico	3	2,79	8,4	2,67	8,8	-4,5
	7	2,88	8,8	3,25	9,4	+12,8
	28	3,79	9,1	3,86	9,7	+1,8

Fonte – Própria.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão é da ordem de 10%.

Nos resultados apresentados na Tabela 5.6, percebe-se que as razões entre as resistências estão próximas ao valor proposto por Mehta e Monteiro (1994). Estas variam de 8,4% a 11,5%.

Observa-se que nos traços pobre e básico o concreto com areia artificial apresentou maior resistência à tração em comparação ao concreto com areia natural. Nota-se ainda, que ocorreu um aumento contínuo das resistências à tração com os dois tipos de areia em todos os traços.

No traço rico, verificam-se menores oscilações entre os valores. Percebe-se que aos 3 dias, o concreto com areia natural apresentou maior resistência à tração em comparação ao concreto com areia artificial. Porém, aos 7 e 28 dias o resultado foi favorável à areia artificial.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados e discussões constatou-se que a utilização da areia artificial, proveniente de britagem de rocha de granito, conferiu aos concretos produzidos propriedades mecânicas satisfatórias em relação aos produzidos com areia natural.

Os valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios aos 28 dias, expressos em MPa, do concreto produzido com areia natural foram: 16,66 (traço pobre); 28,64 (traço básico) e 41,54 (traço rico). Utilizando-se areia artificial os valores foram: 25,66 (traço pobre); 32,48 (traço básico) e 39,91 (traço rico).

Constatou-se que a resistência à compressão do concreto, produzido com areia artificial em relação ao produzido com areia natural, foi 54% e 13,4% maior, respectivamente, nos traços pobre e básico aos 28 dias. Contudo, no traço rico este resultado foi 3,9% menor. Assim, verificou-se uma tendência de melhores resultados de resistência à compressão com a areia artificial associada à menores teores de cimento e à menor relação água/cimento. Percebeu-se que o aumento da proporção de cimento no concreto, bem como as relações água/cimento iguais favoreceram à utilização de areia natural.

Porém, deve-se considerar que o aumento do teor de cimento no concreto eleva o custo de produção e aumenta o calor de hidratação. Então, sugere-se que utilizar aditivos no concreto para aumentar a resistência à compressão seja uma alternativa melhor em comparação ao aumento do teor de cimento, apontando que na prática evita-se a produção do traço rico. Portanto, conclui-se que o concreto produzido com areia artificial apresentou melhores resultados de resistência à compressão em relação ao produzido com areia natural para o abatimento determinado, observadas as características dos materiais utilizados.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios aos 28 dias, expressos em GPa, do concreto produzido com areia natural foram: 19,62 (traço pobre); 24,32 (traço básico) e 28,00 (traço rico). Utilizando-se areia artificial os valores foram: 23,28 (traço pobre); 26,05 (traço básico) e 25,62 (traço rico).

Verificou-se que os resultados, obtidos aos 28 dias, do módulo de elasticidade do concreto produzido com areia artificial em comparação ao produzido com areia natural, foram 18,6% e 7,1% maiores, respectivamente, nos traços pobre e básico. Entretanto, no traço rico este resultado foi 8,5% menor. Percebeu-se uma tendência

de singularidade no comportamento dos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade face às variações do teor de cimento e relações água/cimento.

Analogamente, conclui-se que o concreto produzido com areia artificial apresentou melhores resultados de módulo de elasticidade em relação ao produzido com areia natural.

Os valores de resistência à tração por compressão diametral obtidos nos ensaios aos 28 dias, expressos em MPa, do concreto produzido com areia natural foram: 1,82 (traço pobre); 2,73 (traço básico) e 3,79 (traço rico). Utilizando-se areia artificial os valores foram: 2,84 (traço pobre); 3,51 (traço básico) e 3,86 (traço rico).

Nota-se que o concreto com agregado artificial apresentou maior resistência à tração por compressão diametral em comparação ao concreto com agregado natural nos traços pobre, básico e rico. Entretanto, percebe-se a tendência de redução desta diferença à medida que se aumenta o teor de cimento e diminui a diferença na relação água/cimento.

A resistência à tração por compressão diametral do concreto, produzido com areia artificial em relação ao produzido com areia natural, foi 56%, 28,6% e 1,8% maior, respectivamente, nos traços pobre, básico e rico aos 28 dias. Então, conclui-se que o concreto produzido com areia artificial apresentou, para esta propriedade mecânica, melhores resultados em relação ao produzido com areia natural.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando-se que na presente pesquisa foram analisados concretos convencionais sem aditivos. Propõe-se como sugestão de trabalho futuro, realizar estudo sobre concretos produzidos com utilização de aditivos.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Controle tecnológico básico do concreto**. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – UNESP. Ilha Solteira, 2002. (Apostila)

ALMEIDA, S. L. M.; SILVA, J. A. **Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional dos agregados**. II SUFFIB – SEMINÁRIO: O Uso da Fração Fina da Britagem. São Paulo, 2005.

ALMEIDA, Salvador L. M.; LUZ, Adão Benvindo da. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 228 p.

ALVES, José Dafico. **Materiais de construção** / José Dafico Alves. – 7. ed. – Goiânia: Ed. da UFG; Ed. do CEFET-GO, 1999.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, L.H.V.; FREITAS, E.G.A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro, 2000. (Apostila)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106) Disponível em: http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf. Acesso em: 13 março 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 49**. Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 51**. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 53**. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 6467.** Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7211.** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7218.** Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 12142.** Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7222.** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9935.** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 11768.** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7212.** Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11579.** Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6118.** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12653.** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 5738.** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 11582.** Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458.** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 8522.** Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823.** Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 5739.** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16606.** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607.** Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697.** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 7215.** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

BALANÇO MINERAL BRASILEIRO, 2001. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-cimento/view>. Acesso em: 13 março 2019.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção.** Volume 1, 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BUENO, Rafael Ivens da Silva. **Aproveitamento da areia gerada em obra de desassoreamento** – caso: Rio Paraibuna/SP / R.I.S. Bueno. – ed. rev. – São Paulo, 2010. 109 p.

CALADO, C. F. A; CAMÕES, A; JALALI, S; JUNIOR, B. B. **Concreto autoadensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC).** Recife: EDUPE, 2015.

CAVALCANTI, Diogo Jatobá de Holanda. **Contribuição ao Estudo de Propriedades do Concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais /** Diogo Jatobá de Holanda Cavalcanti - Maceió, 2006.

CIMENTO ITAMBÉ. **Mineradores de areia tentam reinventar o mercado.** 2014. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/tipos-de-cimento-portland/>. Acesso em: 15 março 2019.

CIMENTO PORTLAND E IMPACTOS AMBIENTAIS. **Cimento Portland.** Disponível em: <http://gestaoambientalcimento.blogspot.com/2010/06/cimento-portland.html>. Acesso em: 14 março 2019.

COSTA, Bruno Luís de Carvalho da. **Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil.** Rio de Janeiro, 2012, 190 p. (Dissertação de Mestrado apresentado ao programa de 64 Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE- Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia- UFRJ, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil).

FARIAS M. M.; PALMEIRA, E. M., **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência para Construção Civil**, IBRACON 2007, v.01, p.481 – 503, Ed. Ipsis, São Paulo, 2007.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/T.3.2012.tde-18052012-112833. Acesso em: 30 maio 2019.

FREITAS, José de Almeida Jr. **Materiais de Construção - Aditivos e Adições Minerais para Concreto**. José de Almeida Freitas Jr., Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Departamento de Construção Civil, 2018. Disponível em: http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/d/db/2_Aditivos_2018.pdf. Acesso em: 01 maio 2019.

GABRICH, Marco Fernando. **Estudo da influência das adições minerais no comportamento do concreto sob a ação do fogo**. Belo Horizonte, 2008. (Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG).

GRUPO HOBI. Disponível em: <http://www.grupohobi.com.br/mineracao/>. Acesso em: 23 abril 2019.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HONÓRIO, Priscila. **Cimento**. Notas de aula, 2015. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/PriscilaHonorio/cimento-50439262/10>. Acesso em: 14 março 2019.

KLEIN, Nayara Soares. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto autoadensável** / Nayara Soares Klein. – Londrina, 2008.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

Manual de utilização de aditivos para concreto dosado em central. 1ª Edição, Instituto Brasileiro de Impermeabilização. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.casadaagua.com/wp-content/uploads/2014/02/MANUAL-DE-ADITIVOS-PARA-CONCRETO.pdf>. Acesso em: 01 maio 2019.

Mapa da Obra – **Norma comentada: ABNT NBR 5738:2015 Versão corrigida:2016**. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/norma-comentada-abnt-nbr-5738/>. Acesso em: 31 maio 2019.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura Propriedades e Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Pini, 2008.

MINAS LOGÍSTICA. **Escória**. 2018. Disponível em: <https://www.minaslogistica.com/produtos/escoria-3/>. Acesso em: 05 novembro 2019.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** / A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. – 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.

OHASHI, Toshihiko. **Areia de brita ganha espaço na construção civil**. Infraroi, 2018. Disponível em: <http://infraroi.com.br/areia-de-brita-ganha-espaco-na-construcao-civil/>. Acesso em: 05 novembro 2019.

PETRUCCI, Eládio Geraldo Requião. **Concreto de cimento portland** / Eládio G. R. Petrucci. – 10. ed. atualizada e ver. / por Vladimir Antônio Paulon. – Porto Alegre – Rio de Janeiro: Globo, 1983.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: EESC-USP, 2007.

PISSATO, E. **Gestão da mineração de areia no município de Guarulhos: aproveitamento de resíduos finos em cerâmica vermelha**. Tese de Doutorado pela EPUSP, 115 p, São Paulo, 2009.

RIBEIRO, Carmen Couto. **Materiais de construção civil**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Escola de Engenharia da UFMG, 2002.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. **Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço**. Revista Matéria, v. 18, n. 2, pp. 1273 – 1285, 2013.

SANTOS, Altair. **Concreto de alto desempenho se solidifica no Brasil**. Massa Cinzenta, 2017. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/concreto-alto-desempenho-brasil/>. Acesso em: 29 maio 2019.

SILVA, Leandro Gustavo Fonseca Ferreira da. **Compras e aquisições de materiais**. Notas de aula. 2015. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/leandrogffs/compras-e-aquisies-de-materiais-aula-1>. Acesso em: 05 novembro 2019.

SILVA, Maristela Gomes da; “et al.” **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. ed. G. C. Isaia. São Paulo, IBRACON, 2007. Volume1.

SOUZA, Jéssica Siqueira. **Mecânica dos solos** / NT Editora. -- Brasília: 2015.

TEODORO, Sabrina Bastos. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural**. Juiz de Fora: UFJF, 2013. Disponível em: <http://www.ufjf.br/engenhariacivil/files/2012/10/TCC-AVALIA%C3%87%C3%83O-DO-USO-DA-AREIA-DE-BRITAGEM-NA-COMPOSI%C3%87%C3%83O-DO-.pdf>. Acesso em: 06 junho 2019.

THOMAZ, Ercio. Concreto de alto desempenho. Revista téchné, julho de 2016. Disponível em: <https://techne.pini.com.br/2016/07/o-que-caracteriza-o-concreto-de-alto-desempenho-qual-e-sua-aplicacao-e-como-o-mercado-tem-usado-essa-alternativa/>. Acesso em: 29 maio 2019.

TYBA. **Balsa dragando o fundo do Rio Branco para extração de cascalho.** Caracará, 2006. Disponível em: http://tyba.com.br/br/registro/cd205_177.jpg/-Assunto-Balsa-dragando-o-fundo-do-Rio-Branco-para-extracao-de-cascalho---Local--Perto-de-Caracarai---Roraima---Brasil---Data-Janeiro-de-2006-. Acesso em: 05 novembro 2019.

VIACELLI, Luana. **Estudo da viabilidade da utilização do agregado miúdo britado em concreto convencional.** Pato Branco, 2012. (Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso Superior de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR).