

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL
MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA E DA GRANULOMETRIA DOS
AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO

LUCIMAR DIAS DE OLIVEIRA HADDAD

Belo Horizonte
2015

H126e

Haddad, Lucimar Dias de Oliveira.

Estudo da influência da forma e da granulometria dos agregados nas propriedades das argamassas de revestimento [manuscrito] / Lucimar Dias de Oliveira Haddad. – 2015.
xix, 115 f., enc.: il.

Orientador: Antônio Neves de Carvalho Júnior.
Coorientador: White José dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.114-115.

Bibliografia: f.105-113.

1. Construção civil - Teses. 2. Argamassa - Teses. 3. Revestimentos- Teses. I. Carvalho Júnior, Antônio Neves de. II. Santos, White José dos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)

Lucimar Dias de Oliveira Haddad

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA E DA GRANULOMETRIA DOS
AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Linha de pesquisa: Agregados e Argamassas

Orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior

Coorientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2015

Lucimar Dias de Oliveira Haddad

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA E GRANULOMETRIA DOS
AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

D. Sc. Maria Teresa Paulino Aguilari
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

D. Sc. Antônio Neves de Carvalho Júnior
DEMC/UFMG - Orientador

D. Sc. White José dos Santos
DEMC/UFMG - Coorientador

D. Sc. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco
DEMC/UFMG - Avaliador

D. Sc. Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga
UFV - Avaliadora

Belo Horizonte, 28 de maio de 2015

DEDICATÓRIA

Aos meus orientadores, Professores Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior e Dr. White José dos Santos pela eficiente orientação disponibilizada a esta pesquisa. Ao meu amado marido, José Antônio, pelo apoio dispensado e aos meus queridos e amados filhos, Sofia, Tiago e Artur, pela compreensão e amor dedicados e, sobretudo, pelos sorrisos oferecidos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, e, especialmente:

A Deus, por sempre iluminar minha vida e facilitar minhas tarefas;

À Santíssima, Nossa Senhora, por renovar minhas energias e por me reerguer sempre que preciso;

À UFMG, pela disponibilidade das instalações, material didático e equipamentos necessários ao desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus orientadores, Professores Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior e Dr. White José dos Santos, pela eficiente e dedicada orientação, prestação de auxílio, disponibilidade de atendimento, simplificação dos problemas, facilidade de interação e clareza de informações;

Aos funcionários dos laboratórios, bolsistas e estagiários que colaboraram com a execução dos ensaios;

Ao meu marido, José Antônio, pela paciência nos momentos necessários e por possibilitar que eu direcionasse todo meu tempo a esse trabalho;

Aos meus queridos e amados filhos: Sofia, Tiago e Artur, pela resignação à subtração de momentos de nossa convivência e ao adiamento de nossos compromissos pessoais e, principalmente, pelos sorrisos animadores;

A Lucinha, pelo apoio oferecido, combustível indispensável ao meu empenho e minha determinação em concluir este trabalho.

" A experiência não falha nunca, falham
somente os nossos juízos."

Leonardo da Vinci.

RESUMO

O desenvolvimento da construção civil cria demanda por produtos e tecnologias construtivas que garantam melhor desempenho e maior durabilidade. Neste sentido, este trabalho objetiva a verificação experimental da influência da granulometria e da forma do agregado miúdo no desempenho das argamassas de revestimento, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Foi avaliado o empacotamento das partículas através da massa unitária solta de diversas faixas granulométricas determinadas pela ABNT NBR 248:2003 e de variadas peneiras individualmente. Em seguida, foi feita a análise mecânica e de indicadores de durabilidade das argamassas através de corpos de prova confeccionados com argamassas com agregados naturais e artificiais, considerando as curvas de distribuição granulométricas: ABNT NBR 248:2003, Carneiro (1999) e Reed (1995). Os seguintes ensaios foram realizados nas idades de 7, 21 e 28 dias: massa unitária solta; consistência; densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco; resistências à compressão axial e à tração na flexão; módulo de elasticidade dinâmico; resistência potencial de aderência à tração; densidade de massa no estado endurecido; porosidade superficial; absorção de água por imersão e por capilaridade e imagens de lupa estereoscópica e microscópio óptico. De forma geral, foi atestada que a curva granulométrica e o tipo de agregado influenciam nas propriedades analisadas e devem ser considerados durante o processo de dosagem e especificação das argamassas.

Palavras Chave: Empacotamento, Forma, Agregado, Granulometria, Argamassa, Revestimento.

ABSTRACT

The development of construction creates demand for products and construction technologies that ensure better performance and durability. In this sense, this work aims to experimental verification of the influence of particle size and shape of the fine aggregate in the performance of coating mortars, both fresh, as in the hardened state. The particle packing was evaluated by loose bulk density of the size distribution curves of ABNT NBR 248:2003 and each sieve individually. Then the mechanical analysis and durability indicators of mortars through specimens made of natural and artificial aggregates was made, considering the particle size distribution curves: ABNT NBR 248:2003, Carneiro (1999) and Reed (1995). The following tests were performed at the ages of 7, 21 and 28 days: true density loose; consistency; mass density and entrained air content in the fresh state; resistance to axial compression and tensile strength in bending; dynamic modulus of elasticity; potential resistance to traction grip; bulk density in the hardened state; surface porosity; by water absorption and capillary and stereoscopic microscope and optical microscope images. In general, it was evidenced that the grain size distribution and type of aggregate influence the analyzed properties and should be considered during the dosing process and specification of these composites.

Keywords: Packaging, shape, aggregate, particle size, mortar, coating.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE GRÁFICOS	XIV
LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIATURAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	1
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	3
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA	3
2. AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	4
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS	4
2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	6
2.3.1 <i>Densidade de empacotamento</i>	6
2.3.2 <i>Otimização do arranjo granular</i>	7
2.3.3 <i>Modelo de empacotamento granular</i>	9
2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS QUE INFLUENCIAM NAS ARGAMASSAS	13
2.4.1 <i>Distribuição Granulométrica</i>	13
2.4.2 <i>Massa Específica Real e Massa Unitária</i>	20
2.4.3 <i>Porosidade, Absorção e Umidade Superficial</i>	21
2.4.4 <i>Forma, Textura e Aderência</i>	23
2.4.5 <i>Resistência à compressão</i>	25
2.4.6 <i>Módulo de Elasticidade</i>	25
2.4.7 <i>Sanidade</i>	25
2.4.8 <i>Substâncias deletérias presentes</i>	26
3. AGLOMERANTES	27
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
3.2 CIMENTO PORTLAND	27
3.2.1 <i>Considerações iniciais</i>	27
3.2.2 <i>Composição do Cimento Portland</i>	28
3.2.3 <i>Tipos de Cimento Portland</i>	29
3.2.4 <i>Propriedades do Cimento Portland</i>	30
3.3 CAL.....	32
3.3.1 <i>Considerações iniciais</i>	32
3.3.2 <i>Influência das propriedades da cal nos compósitos cimentícios</i>	32
4. ARGAMASSAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	34
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	34
4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS	34
4.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	36
4.3.1 <i>Trabalhabilidade</i>	36
4.3.2 <i>Consistência</i>	37
4.3.3 <i>Coesão e exsudação</i>	39
4.3.4 <i>Retenção de água</i>	39
4.3.5 <i>Resistência mecânica</i>	40
4.3.6 <i>Densidade de massa e teor de ar incorporado</i>	42
4.3.7 <i>Retração das Argamassas</i>	43
4.3.8 <i>Porosidade e capilaridade</i>	44

4.3.9	<i>Módulo de elasticidade</i>	45
4.3.10	<i>Análise de propensão à fissuração</i>	46
4.4	ZONA DE TRANSIÇÃO	46
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	48
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	48
5.2	MATERIAIS	48
5.2.1	<i>Cimento</i>	48
5.2.2	<i>Cal</i>	48
5.2.3	<i>Agregado</i>	48
5.2.4	<i>Curvas de Distribuição Consideradas nos experimentos</i>	52
5.2.5	<i>Água</i>	53
5.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
5.3.1	<i>Consistência</i>	54
5.3.2	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado da argamassa fresca</i>	55
5.3.3	<i>Resistência à compressão axial - f_c</i>	56
5.3.4	<i>Resistência à tração na flexão - f_t</i>	57
5.3.5	<i>Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)</i>	58
5.3.6	<i>Resistência potencial de aderência à tração</i>	59
5.3.7	<i>Densidade de massa no estado endurecido</i>	60
5.3.8	<i>Absorção de água por imersão e porosidade</i>	61
5.3.9	<i>Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade</i>	62
5.3.10	<i>Análise microestrutural através de lupa estereoscópica e de microscópio óptico</i> .63	
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1	ANÁLISE DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS PELAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS	64
6.2	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	68
6.2.1	<i>Ensaio de consistência</i>	68
6.2.2	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado da argamassa fresca</i>	70
6.2.3	<i>Densidade de massa no estado endurecido</i>	73
6.2.4	<i>Absorção de Água por Imersão e Porosidade</i>	75
6.2.5	<i>Análise microestrutural das argamassas</i>	78
6.2.6	<i>Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade</i>	81
6.2.7	<i>Resistência potencial de aderência à tração</i>	85
6.2.8	<i>Resistência à Tração na Flexão - f_t</i>	88
6.2.9	<i>Resistência à Compressão Axial - f_c</i>	91
6.2.10	<i>Módulo de Elasticidade Dinâmico - E_d</i>	94
7.	CONCLUSÃO	98
7.1	INTRODUÇÃO À CONCLUSÃO	98
7.2	CONCLUSÕES SOBRE AS PROPRIEDADES.....	98
7.2.1	<i>Massa específica unitária solta</i>	98
7.2.2	<i>Consistência</i>	98
7.2.3	<i>Densidade de massa nos estados fresco e endurecido e teor de ar incorporado</i>	99
7.2.4	<i>Análise microestrutural através de lupa estereoscópica e de microscópio óptico</i> ...	100
7.2.5	<i>Absorção de água por imersão e porosidade</i>	100
7.2.6	<i>Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade</i>	100
7.2.7	<i>Resistência potencial de aderência à tração - A_d</i>	101
7.2.8	<i>Resistência à tração na flexão - f_t</i>	101
7.2.9	<i>Resistência à compressão axial - f_c</i>	102
7.2.10	<i>Módulo de elasticidade dinâmico - E_d</i>	102
7.3	QUADRO COMPARATIVO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	103
7.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
9.	ANEXOS	114
9.1	ANEXO 1 - ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO CIMENTO CP-II-E32	114
9.2	ANEXO 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CAL HIDRATADA	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo da mistura granular.	8
Figura 2 – Conceito de classe dominante.	13
Figura 3 – Distribuição granulométrica e sua influência na retração plástica.	16
Figura 4 – Condições de umidade dos agregados e inchamento da areia.	22
Figura 5 – Influência da angulosidade do agregado sobre a porosidade.	24
Figura 6 – Consistência das argamassas.	37
Figura 7 – MEV dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição (a), representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento do concreto (b)	47
Figura 8 – Curvas de distribuição granulométrica.	50
Figura 9 – Imagem da forma dos agregados naturais (a) artificiais (b) com lupa estereoscópica.	51
Figura 10 – Imagem da forma dos agregados em microscópio óptico (a) AN e (b) AA. Escalas: 0,15mm: 50x e <0,15mm: 200x.	52
Figura 11 – Mesa de espalhamento para o ensaio de consistência.	55
Figura 12 – Execução do ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.	55
Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão axial.	56
Figura 14 – Montagem e realização do ensaio de resistência à tração na flexão	57
Figura 15 – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. .	58
Figura 16 – Ensaio de Resistência de Aderência à Tração: (a) corte do revestimento argamassado; (b) colagem da pastilha; (c) aplicação da carga; (d) tipo de ruptura 1; (e) tipo de ruptura 2; (f) tipo de ruptura 3.	60
Figura 17 – Ilustração da determinação da densidade de massa no estado endurecido: (a) Moldagem dos corpos de prova; (b) Corpos de prova desmoldados; (c) Aferição do comprimento	60
Figura 18 – Ensaio de absorção por imersão e massa específica.	61
Figura 19 – Ensaio de absorção de água por capilaridade. CP (a) e pesagem (b).	62
Figura 20 – Imagem das argamassas com lupa estereoscópica (a) AN e (b) AA	78
Figura 21 – Imagem das argamassas com microscópio óptico (a) AN e (b) AA - Esc. 1x100.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidades Aparentes Médias.	6
Tabela 2 – Influência da areia na retração da argamassa.	15
Tabela 3 – Influência da granulometria das areias nas propriedades das argamassas.	15
Tabela 4 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.	18
Tabela 5 – Massa específica aparente de diversos grupos de rocha (kg/dm^3). ...	21
Tabela 6 - Representação esquemática da umidade do agregado.	22
Tabela 7 – Coeficiente de Forma.	24
Tabela 8 – Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo em relação à massa do material.	26
Tabela 9 – Compostos principais do cimento Portland.	28
Tabela 10 - Composição dos Cimentos Portland.	30
Tabela 11 – Revestimentos de argamassas inorgânicas – classificação.	35
Tabela 12 – Influência teor de finos da mistura seca na plasticidade das argamassas.	37
Tabela 13 - Classificação das argamassas segundo a resistência à compressão.	41
Tabela 14 - Classificação das argamassas segundo a resistência à tração na flexão.	41
Tabela 15 - Resistência potencial de aderência à tração.	41
Tabela 16 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado fresco (γ_f).	42
Tabela 17 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado endurecido (γ_e).	43
Tabela 18 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade.	45
Tabela 19 - Análise de propensão à fissuração.	46
Tabela 20 – Características físicas da areia natural (AN)	49
Tabela 21 – Características físicas da areia artificial (AA).	50
Tabela 22 – Curvas granulométricas.	50
Tabela 23 - Composição do traço.	53
Tabela 24 – Relação de ensaios realizados.	54
Tabela 25 - Resultados dos ensaios consistência - <i>Flow Table</i>	68
Tabela 26 – Teste <i>t</i> para os resultado da consistência	69
Tabela 27 - Teor de ar Incorporado e massa específica fresca.	71
Tabela 28 – Teste <i>t</i> para os resultado de teor de ar incorporado.	72
Tabela 29 – Teste <i>t</i> para os resultados de massa específica fresca.	72
Tabela 30 - Densidade de massa no estado endurecido.	73
Tabela 31 – Teste <i>t</i> para os resultados de densidade de massa no estado endurecido.	74
Tabela 32 - Resultados dos ensaios de absorção por imersão e porosidade - areias natural e artificial	75
Tabela 33 – Teste <i>t</i> para os resultado de absorção de água por imersão.	77
Tabela 34 – Teste <i>t</i> para os resultado da porosidade superficial.	77
Tabela 35 - Resultados dos ensaios de absorção por capilaridade e coeficiente de capilaridade (CC) - Areias natural e artificial	82
Tabela 36 – Teste <i>t</i> para os resultado de CC	84

Tabela 37 - Resultados ensaios resistência potencial de aderência à tração aos 90 dias.....	85
Tabela 38 – Teste t para os resultado de A_d	86
Tabela 39 - Resultados dos ensaios de resistência à tração ao longo da idade: (a) areia natural - AN e (b) areia artificial - AA.....	89
Tabela 40 – Teste t para os resultado de f_t	90
Tabela 41 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão ao longo da idade - areia natural (AN) e areia artificial (AA)	91
Tabela 42 – Teste t para os resultado de f_c	92
Tabela 43 - Resultados dos ensaios aos dias 28 do módulo de elasticidade dinâmico.	94
Tabela 44 – Teste t para os resultado de E_d	95
Tabela 45 – Quadro comparativo de propriedades em função do tipo de distribuição granulométrica e da forma do agregado.....	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Massa unitária solta da AN (kg/l) - faixas granulométricas.	64
Gráfico 2 - Massa unitária solta da AA (kg/l) - faixas granulométricas.....	64
Gráfico 3 - Massa unitária solta da AN (kg/l) - peneiras.	65
Gráfico 4 - Massa unitária solta da AA (kg/l) - peneiras.	65
Gráfico 5 - Coeficiente de vazios (%) - AN - faixas granulométricas.	66
Gráfico 6 - Coeficiente de vazios (%) - AA - faixas granulométricas.....	66
Gráfico 7 - Coeficiente de vazios (%) - AN - peneiras.	67
Gráfico 8 - Coeficiente de vazios (%) - AA - peneiras.	67
Gráfico 9 - Resultados dos ensaios de consistência das areias natural e artificial	68
Gráfico 10 - Massa específica fresca das curvas com areias natural e artificial ..	71
Gráfico 11 - Teor de ar incorporado das curvas com areias natural e artificial	71
Gráfico 12 - Regressão entre a massa específica fresca e o teor de ar incorporado das curvas com areias natural e artificial aos 28 dias	73
Gráfico 13 – Densidade de massa no estado endurecido das areias natural e artificial	74
Gráfico 14 - Absorção de água por imersão - argamassas com areias natural e artificial.	76
Gráfico 15 - Porosidade superficial das argamassas com areias natural e artificial	76
Gráfico 16 – Absorção de água por capilaridade das argamassas com areia natural.....	82
Gráfico 17 – Absorção de água por capilaridade das argamassas com areia artificial.	82
Gráfico 18 - Coeficiente de capilaridade das areias natural e artificial.	84
Gráfico 19 - Resultados dos ensaios de resistência potencial de aderência à tração.....	85
Gráfico 20 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função das idades - AN.....	88
Gráfico 21 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função das idades - AA.	88
Gráfico 22 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função das idades - areia natural	91
Gráfico 23 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias - areia artificial.....	92
Gráfico 24 - Correlação linear entre compressão e tração na flexão aos 7, 21 e 28 dias de todas as curvas juntas	93
Gráfico 25 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das curvas com areias natural e artificial com limites de baixa e média fissurabilidade.....	95
Gráfico 26 – Relação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão para as curvas com areias natural e artificial com limites de baixa e média fissurabilidade	97

LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIATURAS

AN	Areia natural
AA	Areia artificial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
ARC	Agregado reciclado de concreto
ARM	Agregado reciclado misto
ASTM	American Society for Testing and Materials
ARI	Alta Resistência Inicial
Al_2O_3	Alumina
CaO	Óxido de cálcio
C_3S	Alita
C_2S	Belita
C_3A	Aluminato tricálcio
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de Cálcio, Portlandita
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Fe_2O_3	Óxido de ferro
K_2O	Óxido de potássio
IPT	Instituto Pesquisa Tecnológica
ISO	International Organization for Standardization
MgO	Magnésia
MEC	Método Empacotamento Compressível
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
MPT	Espessura máxima de pasta (maior distância existente entre duas partículas de agregado)
NM	Norma Mercosul
Na_2O	Óxido de sódio
SSS	Superfície Saturada Seca
SiO_2	Sílica

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área da seção transversal do corpo de prova (mm^2)
A'	Quantidade do material retido na peneira que possui a maior abertura imediatamente inferior à abertura máxima característica;
A ₁	Área da pastilha (mm^2)
A ₂	Massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água (g)
A _c	Absorção de água por capilaridade (%)
A _i	Absorção de água por imersão (%)
Ar	Teor de ar incorporado na argamassa no estado fresco (%)
a _{máx}	Tamanho máximo de partícula
a _{mín}	Tamanho mínimo de partícula
a/c	Relação água cimento
B	Massa do corpo de prova seco usado no cálculo da absorção de água por capilaridade (g)
CC	Coefficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^{2*} \text{min}^{1/2}$)
c ₁	Constante de ajuste=2,85
C/S	Relação cal/sílica
C _v	Coefficiente de vazios
d _i	Diâmetro médio do agregado (mm)
dm	Densidade de massa da argamassa no estado fresco (g/cm^3)
dt	Densidade de massa teórica da argamassa (g/cm^3)
Ed	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
f _c	Resistência à compressão axial (MPa)
F	Força máxima obtida no ensaio (N);
F _m	Distribuição cumulativa tamanhos menores "a" em base mássica;
F _f	Força máxima obtida no ensaio resistência à tração na flexão (N)
F	Força máxima obtida no ensaio resistência à compressão (N)
i	Determinada categoria de grãos
k	Índice de empacotamento
L	Distância entre os suportes (mm)

L'	Distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (km);
m	Massa de material (g)
m_c	Massa do recipiente e da argamassa de ensaio (g)
m_i	Massa de cada componente da argamassa (g)
m_v	Massa do recipiente cilíndrico vazio (g)
n_c	Número de categoria de grãos
n	Módulo de distribuição
M_{sat}	Massa do corpo de prova que ficou imerso em água com superfície seca (g)
M_{seca}	Massa do corpo de prova seco (g)
M_{sub}	Massa do corpo de prova submerso em água (g)
M_{90}	Massa do corpo de prova, após 90min de imersão em água (g)
M_{10}	Massa do corpo de prova, após 10min de imersão em água (g)
P'	Carga de ruptura (N)
P	Porosidade (%);
PF_c	Fração de empacotamento de partículas grossas
PF_m	Fração de empacotamento de partículas médias
PF_f	Fração de empacotamento de partículas finas
$PF_{máx}$	Fração de empacotamento máximo
Pr	Razão entre materiais retidos em cada peneira, $\neq 1$
Ra	Resistência de aderência à tração, em MPa
Rc_{28}	Resistência à compressão da pasta de cimento aos 28 dias (MPa)
R_f	Resistência à tração na flexão (MPa)
S	Área da seção transversal (cm ²)
Sn	Somatório da progressão geométrica
t	Tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s)
V	Velocidade com que a onda ultrassônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal (em km/s)
V_c	Volume de cheios
V_v	Volume de vazios
V_r	Volume do recipiente cilíndrico (cm ³)
V_t	Volume total

Símbolos Gregos

α	Constante de ajuste = 11,40
β_i	Densidade de empacotamento virtual
γ	Densidade de massa no estado endurecido (em kg/m ³)
γ_i	Massa específica de cada componente da argamassa (g/cm ³)
γ_r	Massa específica real (g/cm ³)
γ_u	Massa específica unitária (g/cm ³)
μ	Micra (10 ⁻³ mm)
ν	Coefficiente de Poisson
\int	Integral
v_{ar}	Volume de ar incorporado no volume unitário de concreto
v_c	Volume de cimento no volume unitário de concreto
v_w	Volume de água no volume unitário de concreto
φ	Densidade de empacotamento virtual

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O forte desempenho do setor da construção civil, desde as grandes construções até as menores, incluindo as obras de pavimentação e infraestrutura demonstram um sinal de crescimento, aquecimento da economia e desenvolvimento de um país. Paralelamente ao surgimento de novas edificações, o aumento do consumo de agregados tem posição de destaque, uma vez que esses materiais são utilizados em grande escala em concretos e argamassas (ANEPAC, 2012).

Os agregados utilizados na construção são insumos minerais essenciais na composição de concreto, pavimento asfáltico, infraestrutura, lastro ferroviário, revestimentos, dentre outros. Estão presentes na construção de praticamente todas as obras consideradas de melhoria da qualidade de vida, tais como: equipamentos urbanos e infraestrutura, saneamento básico, rodovias, ferrovias, portos, aeroportos além de outros (LACERDA e VALVERDE, 2013).

O crescimento do setor da construção em 2012 conferiu um aumento de 6% na demanda de agregados em relação ao ano de 2011, sendo que o consumo de areia para construção civil atingiu cerca de 424 milhões de toneladas em nível nacional (LACERDA e VALVERDE, 2013). Só na Região Metropolitana de São Paulo, o consumo de areia totalizou 51 milhões de toneladas. De acordo com os mesmos autores, em 2012, foi detectado aumento de 6,9% no consumo de cimento no Brasil em relação ao ano de 2011.

1.2 Justificativa

As argamassas de um modo geral, em especial as argamassas de revestimento e de assentamento, são produtos com grande utilização em edificações. A possibilidade de aprimorar as propriedades destes compósitos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, proporciona inúmeros benefícios à construção civil, tais como:

- produção de argamassas com menor propensão de fissuração à retração, através da utilização de granulometria adequada (CINCOTTO *et al.*, 1995)
- aproveitamento de partículas finas para confecção de argamassas menos porosas, menos suscetíveis a ataques de agentes externos e, portanto, mais duráveis (GOBLE, 1999), (KADRI e DUVAL, 2002);
- melhor utilização dos agregados miúdos, através de uma distribuição granulométrica adequada (SANTOS, 2011);
- estudo da influência da forma das partículas, viabilizando a utilização de agregados britados e colaborando para a sustentabilidade ambiental, uma vez que a extração de areia natural tem seus efeitos deletérios sobre o leito dos rios (CARDOSO, 2009) e (CARNEIRO *et al.*, 1999);
- verificação da possibilidade de confecção de argamassas com boa trabalhabilidade, reduzindo a mão de obra de produção e de aplicação; com melhor área de extensão e aderência, garantindo melhor desempenho (BAÍA e SABBATINI, 2008).
- maior eficiência no processo de dosagem, mistura, aplicação e durabilidade. Viabilidade de maior aproveitamento e aperfeiçoamento dos materiais disponíveis, a fim de gerar produtos de melhor desempenho, menor custo, com garantia de maior durabilidade, ecologicamente corretos, com menos necessidade de manutenção, além da redução do surgimento de patologias (SANTOS, 2014).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar experimentalmente os efeitos da granulometria e da forma dos agregados miúdos nas propriedades das argamassas de revestimento de paredes e de tetos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Para viabilizar ao objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- compor e avaliar de forma experimental quatro composições granulométricas, fornecidas por normas e bibliografias, nas condições de empacotamento de partículas e na confecção do traço de argamassa;
- estudar os efeitos da granulometria e da forma dos agregados nas propriedades mecânicas e de indicadores de durabilidade das argamassas, tais como: consistência; densidade de massa e teor de ar incorporado; resistências à compressão axial e à tração na flexão; módulo de elasticidade dinâmico; resistência potencial de aderência à tração; porosidade superficial; absorção de água por imersão e por capilaridade; imagens através de lupa estereoscópica e de microscópio óptico.

1.4 Limitações da Pesquisa

Em função da disponibilidade de recursos financeiros e tempo hábil para execução dos ensaios, a pesquisa limitou-se ao uso de somente dois agregados (natural e artificial), um tipo de cal hidratada e um tipo de cimento.

1.5 Estrutura da Pesquisa

Essa dissertação é composta de sete capítulos. O capítulo 1 engloba a introdução, cujo conteúdo está formado pelas considerações sobre a pesquisa, justificativa, objetivos geral e específicos, limitações da pesquisa e a estrutura propriamente dita. Nos capítulos segundo, terceiro e quarto são apresentados, respectivamente, revisão bibliográfica sobre agregados, aglomerante e argamassas. No capítulo 5, há dissertação sobre os materiais e métodos. No capítulo 6 são apresentados resultados e análises. No capítulo 7 são apresentadas as considerações finais e as conclusões sobre as propriedades.

2. AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1 Considerações iniciais

De acordo com Isaia (2010), agregados são partículas rochosas, conhecidas como areias e britas, com ampla faixa de tamanhos, desde blocos com grandes dimensões a partículas milimétricas, com ampla utilização na construção civil.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), não ocorrem reações entre os agregados, a água e aglomerantes, por esse motivo, são tradicionalmente considerados materiais inertes, uma vez que as propriedades do concreto são mais influenciadas pelas características físicas do agregado do que pelas químicas. Contudo, percebe-se que os agregados influenciam nas propriedades dos compósitos cimentícios, dependendo da composição mineralógica da rocha mãe e de sua estrutura morfológica: porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura, resistência, módulo de elasticidade e presença de material deletério.

De acordo com Lacerda e Valverde (2013), a previsão de consumo de agregados no Brasil é positiva. O consumo dos agregados no Brasil está ascendente desde o ano de 2000, com previsão para o ano de 2022 de um consumo de 1 bilhão e 100 milhões de toneladas, além disso, o consumo do agregado miúdo superará o consumo do agregado graúdo em cerca de 200 milhões de toneladas.

2.2 Classificação dos agregados

De acordo com Bauer (2000), o agregado é um material particulado, incoesivo, praticamente inerte, composto de misturas de partículas de vários tamanhos. No ramo da construção civil o termo “agregado” é muito conhecido quando se refere à fabricação de concreto, mas nos outros ramos da construção ele é mais conhecido, conforme cada utilização, como *filler*, bica-corrída, pedra britada, rachão, etc. Os agregados são classificados segundo a origem, dimensões das partículas e peso específico aparente.

Segundo a origem, os agregados podem ser naturais: encontrados naturalmente particulados (areias e cascalhos) ou industrializados: oriundos de rochas, escórias de alto forno e argila e são particulados através de procedimentos industriais.

Segundo a ABNT NBR 9935: 2011, os agregados são classificados quanto à natureza em:

- agregado natural: material granular utilizado sem a necessidade de ser beneficiado, podendo ser submetido à lavagem e à classificação;
- agregado artificial: material granular oriundo de processo industrial e que sofreu alteração físico-química para possibilitar seu uso como agregado em concretos ou argamassas;
- agregado reciclado: material granular obtido da reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, do setor da construção civil ou de agregados recuperados através de lavagem do concreto fresco e da mineração para posterior uso como agregado;
- agregado reciclado de resíduos de construção civil: material granular oriundo do beneficiamento dos resíduos (ou demolição) da construção civil, previamente triados e pertencentes à classe “A” da ABNT NBR 15116: 2004. Subdividem-se em: **agregado reciclado de concreto (ARC)**, com fração graúda (> 4,75mm) de no mínimo 90% em massa de fragmentos, à base de cimento Portland ou material pétreo e com propriedades que atendam à ABNT NBR 15116:2004, e em **agregado reciclado misto (ARM)**, cuja diferença para o ARC está na fração graúda (> 4,75mm) que deve ser menor do que 90%;
- agregado especial: aquele cujas propriedades confirmam ao concreto ou à argamassa um desempenho específico e desejado em aplicações não usuais.

Segundo as dimensões das partículas, os agregados são classificados em agregados miúdos (areias) cujos grãos passam pela malha de 4,75 mm da peneira e ficam retidos na malha de 0,15 mm, e graúdos (britas e cascalhos)

cujos grãos passam pela malha de 75 mm da peneira e ficam retidos na malha de 4,75 mm (ABNT NBR 9935: 2011 e BAUER, 2000).

Segundo o peso específico aparente, são classificados em leves, médios e pesados, conforme exemplos da Tabela 1.

Tabela 1 – Densidades Aparentes Médias.

Leves		Médios		Pesados	
Vermiculita	0,30	Calcário	1,40	Barita	2,90
Argila Expandida	0,80	Arenito	1,45	Hematita	3,20
Escória Granulada	1,00	Cascalho	1,60	Magnetita	3,30
		Granito	1,50		
		Areia	1,50*		
		Basalto	1,50		
		Escória	1,70		

Fonte: BAUER (2000).

De acordo com Isaia (2010), as normas técnicas apresentam valores diferentes de dimensões para as mesmas classes texturais dos materiais granulares. Assim, uma agregado pode ser considerado fino para uma norma e médio para outra, não havendo também concordância sobre os limites das subdivisões em agregado miúdo, graúdo, etc.

A ABNT NBR 7211:2009 especifica as características necessárias na recepção e produção de agregados miúdos e graúdos, sejam de origem natural ou britada, destinados à produção de concretos e argamassas. Eles devem ser constituídos de minerais compactos, com dureza adequada, duráveis e isentos de substâncias que tenham efeito deletério na hidratação e no endurecimento do cimento, na proteção da armadura contra corrosão, na durabilidade e até mesmo no aspecto visual do concreto, quando for requerido.

2.3 Empacotamento de partículas

2.3.1 Densidade de empacotamento

De Larrard (1999) define a densidade de empacotamento como o volume de um sólido em relação a uma unidade de volume. Ela influencia o bom desempenho dos compósitos cimentícios e depende, principalmente, da melhor distribuição dos grãos, da forma dos agregados e do método de processamento do

empacotamento, permitindo minimizar a porosidade da mistura e garantir o consumo mínimo possível de pasta de aglomerante para uma maior compacidade.

Para determinação de embalagem de empacotamento, de acordo com Weitz (2004), as partículas são classificadas em esféricas e não esféricas e há diversos estudos referentes à forma esférica, cujas principais conclusões são: a densidade de empacotamento, considerando um arranjo aleatório das partículas, é aproximadamente 0,64; para o estado solto, é de cerca de 0,56 e a mais alta densidade de empacotamento obtida com arranjo específico é da ordem de 0,74. Para estruturas cristalinas cúbicas de faces centradas, segundo Callister (2012), esse é o máximo empacotamento possível para esferas de mesmo diâmetro.

A maioria das misturas, em diversas áreas de conhecimento, se referem a partículas cujas formas são esféricas. Weitz (2004) ressalta que estudos considerando diferentes formas e tamanhos não são muito comuns e são mais complicados devido à necessidade de consideração de graus de rotação das partículas, carecendo de softwares e algoritmos específicos, que conseguem detectar com precisão o real contato entre as partículas. Esse autor descreve ainda que partículas com formato esférico estão sujeitas somente a movimentos de translação, enquanto partículas com formato esfero-cilíndricas estão sujeitas a movimentos de translação e rotação.

Após realização de experimentos, Meng *et al.* (2012) concluíram que a forma e o tamanho das partículas influenciam a densidade de empacotamento individualmente e desenvolveram equações matemáticas que consideram essa influência separadamente.

2.3.2 Otimização do arranjo granular

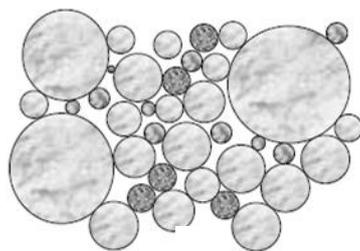
Os compósitos cimentícios são dosados através de metodologias convencionais, baseadas em procedimentos empíricos através dos testes de abatimento e resistência à compressão aos 28 dias. As dosagens estão limitadas aos materiais utilizados em sua composição e não adotam formulações específicas dos

agregados e por isso resultam em misturas heterogêneas de desempenho comprometido (GOMES e BARROS, 2009).

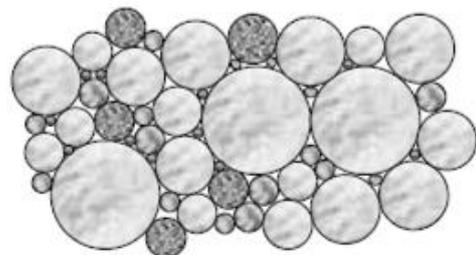
Para Formagini (2005), os métodos de dosagem dos compósitos cimentícios conhecidos não consideram uma otimização da mistura dos grãos, estão limitados ao uso de um número reduzido de materiais, resultando em uma mistura com desempenho baixo ou moderado. Para Peng *et al.* (2009), o empacotamento denso e a otimização da distribuição das partículas são fatores importantes para o melhor desempenho dos materiais cimentícios.

Segundo Formagini (2005), com o modelo de empacotamento compressível (MEC), há a possibilidade de otimizar a mistura granular, de forma a diminuir a porosidade, melhorar a coesão, aumentar a compacidade, e conseqüentemente, garantir melhor desempenho do produto. Os arranjos da mistura granular dosada através do método convencional e do método de empacotamento compressível estão mostrados nas Figuras 2 (a) e (b).

Estudos de Silva *et al.* (2005) mostraram que a presença de partículas finas confere maiores resistências à compressão e à tração na flexão, uma vez que elas melhoram o empacotamento das partículas. Li e Kwan (2013) compararam experimentalmente a densidade de empacotamento em misturas de concreto em condições seca e úmida e concluíram que a compactação de misturas secas fornece misturas com menos vazios (e maior densidade de empacotamento) do que a compactação de misturas sob condições úmidas. Por outro lado, tais autores concluíram que misturas sob condições úmidas podem proporcionar baixos índices de vazios quando há a incorporação de aditivo super-plastificante.



(a) Dosagem convencional



(b) Dosagem pelo MEC

Figura 1 – Arranjo da mistura granular.
Fonte: FORMAGINI (2005), adaptada.

Em estudos realizados por Peng *et al.* (2009), foi observado que a incorporação de dois ou três tipos de mistura mineral (em quantidade ótima) produz maior densidade de empacotamento do que a incorporação de apenas uma mistura.

Para Silva *et al.* (2005), a adição de finos na argamassa exige maior quantidade de água, provoca fissuras no revestimento, mas melhora as propriedades mecânicas. No entanto, experimentos realizados por Lange *et al.* (1997), nos quais analisaram a mistura de vários cimentos com finuras diferentes, mostraram que adição de cimentos com maior finura melhora a resistência à compressão, reduz a porosidade, propicia uma microestrutura muito homogênea, além de densa, e praticamente não causa micro-fissuras, favorecendo, dessa forma, a durabilidade das argamassas.

2.3.3 *Modelo de empacotamento granular*

O Modelo de Empacotamento Compressível desenvolvido por De Larrad (1999) é um modelo constituído por duas categorias. Há uma parte teórica, onde é estabelecida uma relação matemática que conduz à máxima compacidade possível da mistura (empacotamento virtual) através do arranjo de todos os grãos, um a um. Outra parte que trata das relações físicas e experimentais que conectam as propriedades virtuais às propriedades reais dos grãos submetidos ao procedimento de compactação, seja através de vibração, apiloamento, molhagem, etc. A relação entre o empacotamento real (físico) está relacionado com o empacotamento virtual através de índice de compactação característico do procedimento físico de empacotamento.

O MEC - Modelo de Empacotamento Compressível desenvolvido é utilizado para caracterizar a densidade de empacotamento de misturas granulares. De acordo com tal modelo, uma categoria de grãos “i” é classificada através do diâmetro médio “ d_i ” e a densidade de empacotamento virtual, “ β_i ”, é a relação entre o volume dos grãos existentes em uma unidade de volume, compactados com uma energia de compactação ideal, de forma que corresponderia a um valor máximo da densidade virtual. Assim, estaria representada a capacidade intrínseca de empacotamento da categoria de grãos.

A densidade de empacotamento virtual de uma mistura com “ n_c ” categorias de grãos, ϕ , é obtida através de um modelo matemático que considera “ β_i ”, “ i ”=1, “ n_c ”, fração volumétrica de várias categorias, algumas constantes que levam em conta os efeitos de afrouxamento e parede ocorridos em função de interações das partículas.

A densidade de empacotamento real (ϕ) depende da densidade virtual (ϕ) e do método de empacotamento, sendo possível utilizar um índice de empacotamento “ k ” que correlacione as duas densidades, de maneira que, à medida que “ k ” tende ao infinito, ϕ tende para ϕ . Para misturas que não sofrem compactação, $K = 4,5$; para mistura com água, $K = 6,7$ e $K = 9,0$ quando a vibração de compactação supera 10 KPa.

O MEC engloba diversos modelos para determinar as propriedades nos estados fresco e endurecidos do concreto.

O modelo para cálculo de resistência à compressão de compósitos cimentícios na idade de 28 dias e que leva em consideração a resistência à compressão (f_c) da pasta de cimento, a quantidade de cimento na pasta no estado fresco, efeitos da espessura da pasta e aderência entre a pasta e o agregado é expresso pela Equação 1:

$$f_c = \alpha R_{c28} \left[\frac{(v_c)}{(v_c) + (v_w) + (v_{ar})} \right]^{c_1} * MPT^{-0,13} \quad (1)$$

Onde: R_{c28} = resistência à compressão da pasta de cimento aos 28 dias;

v_c, v_w, v_{ar} = volumes de cimento, água e ar incorporado presentes em um volume unitário de concreto;

α e c_1 = constantes de ajustes da expressão; $\alpha = 11,40$ e $c_1 = 2,85$;

MPT = espessura máxima de pasta, ou seja, a maior distância existente entre duas partículas de agregado

De Larrard (2009), analisando sua própria teoria de empacotamento e baseando-se no fato de que ela não considerava capacidade de fluxo da mistura no estado fresco, fez experimentos adicionando água na dosagem ótima dos materiais

secos a fim de avaliá-la se ainda seria a melhor dosagem, chegando à conclusão, dentre outras, de que: ao adicionar água à mistura seca, as propriedades reológicas devem ser consideradas; a densidade de empacotamento da mistura granular seca influencia a viscosidade plástica; a tensão de escoamento é mais influenciada pelas partículas finas do que pela densidade de empacotamento e a quantidade de areia fina é reduzida com a presença de pasta;

Experimentos realizados por Gonçalves *et al.* (2007) mostraram que a resistência à compressão e a capacidade de absorção das argamassas são governadas pela densidade de empacotamento de forma independente da distribuição granulométrica e da forma do agregado miúdo. Além disso, os estudos constataram que foi possível fabricar uma argamassa com agregado britado e com 14,5% de micro finos que apresentou acréscimo de 23,5% na resistência, redução de 28% na absorvidade, sem perda considerável da trabalhabilidade quando comparada à argamassa com agregado natural.

Para Silva *et al.* (2004), a distribuição granulométrica e a morfologia influenciam a densidade de empacotamento e as propriedades físicas dos materiais compósitos cimentícios e dos sistemas refratários. De acordo com Cincotto *et al.* (2012), a granulometria descontínua não produz o melhor empacotamento de partículas e nem o menor índice de vazios, mas confere fluidez com menor teor de água de mistura em função da maior mobilidade e de menor atrito interno das partículas de agregado.

Cincotto *et al.* (2012) mostraram que tanto as granulometrias descontínuas quanto as granulometrias contínuas podem produzir argamassas com porosidade abaixo de 30%, sendo ambas, portanto, argamassas com aplicabilidade na obra e sem necessidade de utilização de grande quantidade de ligantes. Para esses autores, os resultados mecânicos satisfatórios das argamassas com granulometria descontínua e baixo teor de ligante dependem da adição de aditivos dispersantes, a fim de diminuir a água livre e o teor de partículas ultrafinas ($< 5 \mu\text{m}$), melhorar o empacotamento e não prejudicar muito a mobilidade dos sólidos.

Para esses autores, para que as propriedades mecânicas das argamassas dependam exclusivamente dos poros originados pela água livre, deve haver uma quantidade mínima de pasta que preencha os espaços vazios (e teóricos) originados pelo empacotamento dos grãos. Quando a quantidade de pasta for insuficiente, as argamassas, mesmo aquelas com porosidade abaixo de 30%, devem possuir volume mínimo de compostos hidratados de cimento ($\pm 10\%$), para que sejam alcançadas propriedades mecânicas satisfatórias.

Para Carneiro e Cincotto (1999), a permeabilidade das argamassas é reduzida quanto maior for a continuidade de distribuição dos agregados miúdos, uma vez que os vazios entre os grãos são reduzidos. Para Silva *et al.* (2004), o volume mínimo de vazios existente entre as partículas de mesmo tamanho é 26% do volume total em sistema de empacotamento de estruturas hexagonais compactas ou cúbicas de faces centradas. E ele independe do tamanho das partículas. Mas como os materiais granulares, mais precisamente os pós, são encontrados numa infinidade de tamanhos e formas, os tamanhos menores ocupam os interstícios das partículas maiores, maximiza o empacotamento, elevando a densidade do sistema.

De acordo com Gomes e Barros (2009), através do MEC, todos os materiais são caracterizados experimentalmente, os componentes da mistura seca são determinados em função do menor índice de vazios, mas considerando as características do processo de lançamento, adensamento e as determinações de projeto para o estado fresco e endurecido do concreto. A principal diferença para os outros métodos de dosagem está no embasamento teórico deste modelo. E ele pode ser utilizado para diferentes tipos de concreto, tais como: convencional, de alto desempenho, auto-adensável, pós-reativos, fibrosos, compactado com rolo, jateado, e também em dosagem de pasta de cimentação de poços de petróleo.

Outra determinação considerada no MEC é a classe de grãos dominantes. Uma classe granular é chamada dominante quando ela assegura a continuidade do esqueleto sólido da mistura granular, de forma que os grãos estejam ordenados em sequência e não apresentem segregação. Um exemplo de continuidade sólida de uma mistura com dois tamanhos de grãos, onde a continuidade sólida é

garantida pelos grãos de maior tamanho e os grãos menores preenchem os espaços vazios que são criados em função do empacotamento dos grãos maiores, conforme Figura 3 (DE LARRARD, 1999).

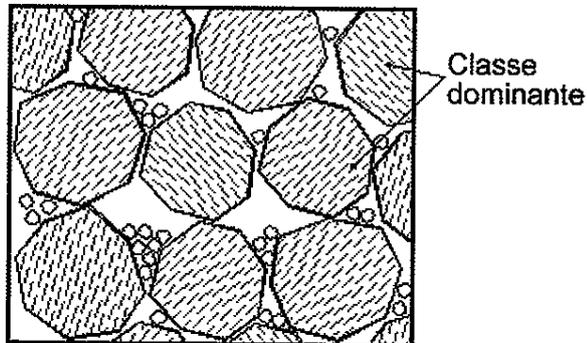


Figura 2 – Conceito de classe dominante.
Fonte: De Larrard (1999), adaptada.

De acordo com estudos de Casali e Prudêncio (2005), essa distribuição granulométrica da areia (com continuidade sólida granular) influencia a trabalhabilidade das argamassas de forma mais sistemática do que o teor de cal.

2.4 Propriedades dos agregados que influenciam nas argamassas

De acordo com Bauer (2005), quando o agregado é utilizado em argamassas, ele pode ser definido, em alguns casos, como o esqueleto dos sistemas de revestimentos executados com argamassa de cimento e areia, interferindo diretamente na resistência mecânica, no módulo de deformação, e em outras propriedades. Carasek (2007) afirma que o agregado garante certa resistência interna da mistura, com capacidade de suportar as tensões internas surgidas em função da variação volumétrica, quando a argamassa está em processo de secagem. Dessa forma, a areia é parcialmente responsável pela resistência à fissuração advinda da retração hidráulica.

2.4.1 Distribuição Granulométrica

A granulometria, segundo Mehta e Monteiro (2008), influencia a trabalhabilidade e o custo das misturas, de forma que areia muito grossa proporciona misturas ásperas e sem trabalhabilidade; areias muito finas exigem maior consumo de água e de cimento, sendo pouco econômicas e agregados com granulometria

contínua, ou seja, que não apresente grande ausência ou excesso de qualquer dimensão, produzem misturas mais trabalháveis e econômicas. Segundo esses autores, a distribuição granulométrica influencia as propriedades relacionadas ao teor de água, uma vez que ela influencia a demanda de água dos compósitos cimentícios e, além disso, a quantidade de água necessária para lubrificar a mistura é determinada pela área superficial do agregado.

De acordo com Sahmaran *et al.* (2009), a ductilidade e a resistência mecânica dos materiais compósitos são alteradas pela granulometria, pois ela determina a existência ou não de vazios entre os materiais granulares e influencia o consumo de cimento, podendo, no caso de uma granulometria uniforme, produzir compostos com alta porosidade.

A graduação de um agregado, de acordo com Bauer (2000), informa, de um modo geral, o diâmetro passante e o diâmetro retido de uma amostra em peneiras de malhas quadradas, através da relação das aberturas das malhas das peneiras. Assim, agregado 4,8/19,5 é aquele que passa na peneira de malha 19,5 e que fica retido na malha 4,8.

Este autor destaca que a graduação não é uma medida suficiente para caracterizar o agregado pelos seguintes motivos:

- os agregados possuem diâmetros muito variados, sendo insuficiente o conhecimento de somente duas dimensões;
- os agregados possuem forma muito irregular, de modo que um grão alongado pode ter uma dimensão maior do que a malha passante da graduação e mesmo assim ele poderá não ficar retido, se estiver em posição que favoreça sua passagem;
- parte do material com dimensões menores do que a malha inferior da graduação pode não passar por ela caso esteja aderido à superfície dos grãos de dimensões superiores à maior malha da graduação, ou até mesmo, se o tempo de peneiramento for insuficiente (rendimento de peneiramento menor do que 100%);

- agregados diferentes com mesma graduação não terão, necessariamente, as mesmas porcentagens de grãos de um determinado tamanho.

Estudos feitos por Carneiro e Cincotto (1999) mostraram que as argamassas com maior compacidade e menor consumo de água, maiores resistências mecânicas e módulos de deformação foram conseguidas através de série de peneiras com razão de aberturas igual a 1,19. Cincotto *et al.* (1995) demonstraram que existe uma influência benéfica da granulometria contínua nos efeitos da retração, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Influência da areia na retração da argamassa.

<i>Tipo de areia</i>	<i>Retração (%)</i>
Areia normalizada pela BS 1200	0,04
Areia fina com granulometria contínua	0,07
Areia grossa com granulometria descontínua	0,08
Areia fina com granulometria descontínua	0,11

Fonte: CINCOTTO *et al.* (1995).

O módulo de finura é o somatório das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras de série normal dividido por 100 (FIORITTO, 2009). Portanto, quanto mais grosso for o agregado, maior será o seu módulo de finura. Tal parâmetro, segundo Bauer (2005), influencia as propriedades da argamassa. Sabbatini (1998) apresenta na Tabela 3 uma sinopse qualitativa da influência dos parâmetros granulométricos nas principais propriedades das argamassas. O termo “variável” é aplicável quando não existe uma influência definitiva ou quando essa influência depende de outros fatores.

Tabela 3 – Influência da granulometria das areias nas propriedades das argamassas.

<i>Propriedade</i>	<i>Características da Areia</i>		
	<i>Quanto menor o módulo de finura</i>	<i>Quanto mais descontínua for a granulometria</i>	<i>Quanto maior o teor de grãos angulosos</i>
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Resiliência	Variável	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistências mecânicas	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: SABBATINI, 1998.

No entanto, Sabbatini (1998) também afirma que, em linhas gerais, a areia que apresenta melhor potencial de produzir uma argamassa adequada é a que tem granulometria contínua (corrida) e classificada como média (módulo de finura entre 1,8 e 2,8) e com predominância de grãos arredondados.

A análise granulométrica, ou granulometria, segundo Isaia (2010), é o estudo da distribuição dos variados tamanhos dos agregados em uma massa granular. As dimensões dos agregados graúdos e miúdos são aferidas através de peneiramento. A sedimentação é utilizada para aferição indireta do tamanho das partículas finas (menores do que 0,075 mm). Tem-se ainda a difração a *laser*, aplicável em partículas com dimensões de 0,05 a 3500 μm , caracterizada pela possibilidade de utilização em ar, suspensões, emulsões e aerossóis e pela rapidez na obtenção de resultados e desnecessidade de calibração (ZOPPAS, 2012).

De acordo com Malvern (2014) e Didoné (2011), a difração a *laser* mede as distribuições de tamanho das partículas através da medição da variação dos ângulos de intensidade da luz difundida, à medida que um feixe de *laser* incide nas partículas dispersas da amostra.

A granulometria da areia, segundo Carasek (2007) e Santos (2014), determina o volume de vazios que deverá ser preenchido pela pasta aglomerante, de forma que um aumento da pasta potencializa a ocorrência de retração da argamassa. A distribuição granulométrica das areias influencia a retração e conduz às classificações contínua, descontínua e uniforme, conforme mostra a Figura 3.

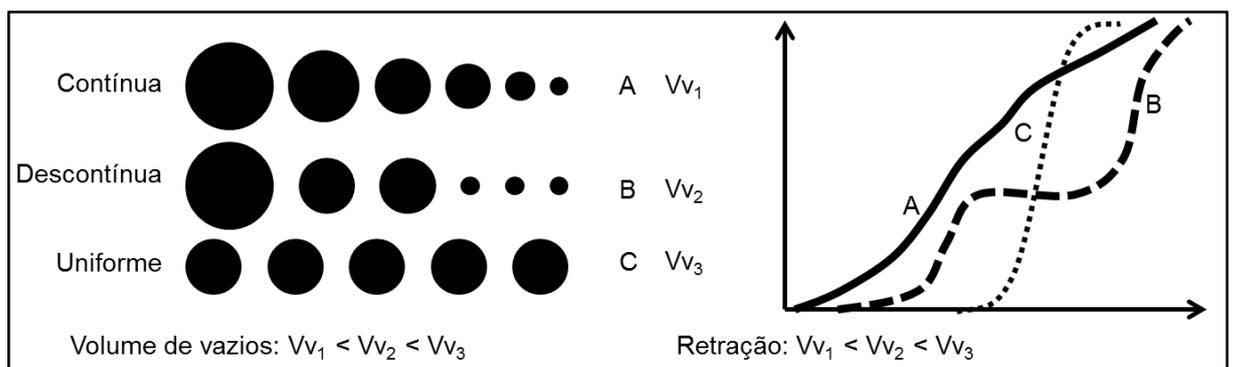


Figura 3 – Distribuição granulométrica e sua influência na retração plástica.
Fonte: adaptado de Carasek (2007) e Isaia (2010).

As curvas granulométricas possuem as seguintes denominações:

- **contínua:** possuem partículas de todos os diâmetros intermediários desde um valor mínimo até um valor máximo. Possui formato de “S” suave e alongado na horizontal. A curva contínua é dita **bem graduada** quando as frações menores preenchem os espaços existentes entre as frações maiores, de forma a propiciar o menor volume de vazios possível, situação em que além de bem graduada, ela é dita **densa ou fechada**. A graduação é dita **aberta** quando não há quantidade suficiente de finos para preencher todos os vazios;
- **descontínua:** quando falta alguma fração intermediária, cuja representação gráfica se dá através do patamar horizontal;
- **uniforme:** quando a maioria das partículas pertence a somente uma fração granulométrica. Possui forma de integral \int ou “S” alongado na vertical.

A capacidade de aderência das argamassas, conforme Isaia (2010), depende, além de outros fatores, da granulometria das areias. Areias muito grossas não conferem boa trabalhabilidade e proporcionam reduzida extensão de aderência, mas quando sua distribuição granulométrica permite boa trabalhabilidade, essas areias produzem argamassas com melhores resistências de aderência.

Destaca, também, que argamassas com altos teores de areia fina prejudicam a aderência ao substrato, uma vez que os finos tamponam os poros da base e prejudicam o travamento da argamassa. Além disso, há a teoria de que areias muito finas produzem argamassas com poros de raio médio muito pequeno (inferiores aos poros da base) impedindo o fluxo hidráulico da pasta aglomerante para o interior dos poros e reduzindo a aderência.

A ABNT NM 248:2003 indica distribuições granulométricas utilizando uma série de peneiras de forma a determinar a porcentagem de material retido em cada peneira, propiciando a determinação da curvas de distribuição granulométrica e permitindo classificar a areia dentro de quatro zonas: muito fina, fina, média e grossa. A ABNT NBR 7211:2009 determina os limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNTNBR 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

Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

Nota 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

Nota 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT NBR 7211:2009.

De acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, a dimensão máxima característica de um agregado é uma dimensão que está relacionada com a sua distribuição granulométrica e corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha quadrada da peneira, da série normal ou intermediária, referente à porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%, em massa.

No geral, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume a ser coberta por pasta de cimento para determinada relação água/cimento. Os autores ressaltam que a escolha da dimensão máxima do agregado deve levar em conta que as partículas grandes tendem a criar micro-fissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

A análise granulométrica dos agregados, para Isaia (2010), é representada graficamente através de curvas granulométricas, em que o eixo das ordenadas representa as porcentagens acumuladas que passam e o eixo das abscissas representa, em escalas logarítmicas, a abertura das peneiras ou o diâmetro das partículas.

Carneiro e Cincotto (1999) estabeleceram um método de dosagem de argamassas que visa ao aprimoramento da compacidade e eficiência das argamassas e está baseado na melhor utilização de curva granulométrica. Tal método possibilitou a substituição de uma parte das partículas de cimento por areia sem prejuízo da resistência e da compacidade, inclusive com redução do

consumo de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade, uma vez que o rolamento das partículas de diâmetros intermediários foi favorecida. A distribuição granulométrica foi obtida em função de uma equação geral de progressão geométrica (Equação 2) dos diâmetros dos agregados, em que os vazios entre os agregados de certo diâmetro são preenchidos por agregados de diâmetros menores sucessivamente.

$$S_n = A' \frac{(1 - Pr^n)}{(1 - Pr)} \quad (2)$$

Onde: ***S_n*** = somatório da progressão geométrica;

A' = quantidade do material retido na peneira que possui a maior abertura imediatamente inferior à abertura máxima característica;

Pr = razão entre materiais retidos em cada peneira. Não pode ser igual a 1;

n = número de peneiras da série adotada (peneiras da série normal com razão de abertura de malha igual a 1,19 ou a principal com razão de abertura de malha de 1,41 da ABNT NBR ISO 3310:2010 ou ainda a série da ABNT NBR 7211:2009 com razão de abertura de malha de 2,0).

A relação aglomerante/aglomerado é obtida através das formulações teóricas e considerações de que todo o material passante na peneira # 200 (0,075 mm) seja aglomerante e que o material retido nas peneiras com aberturas a partir e acima da # 200 seja agregado.

Devem ser feitos ajustes nas curvas e fixação da relação finos/grossos, de forma a obter valores de *Pr* maiores do que 0,7 (valor mínimo para haver distribuição granulométrica contínua). Quanto mais o valor de *Pr* se aproximar de 1, maior será a compacidade e mais contínua se apresentará a curva granulométrica.

Os traços em massa são obtidos através de álgebra elementar e de proporções dos materiais nas curvas granulométricas. Os resultados permitiram concluir que a fração fina influencia diretamente no consumo de aglomerantes e que também preenche os espaços vazios da fração grossa; que a massa específica aparente da argamassa pode ser mensurada através da massa unitária da areia utilizada; que a série completa de peneiras permitiu produzir argamassas com maiores

índices de retenção e de consistência, em função da maior utilização de aglomerantes.

O método de dosagem de argamassas proposto por Reed (1995) considera que um fator de empacotamento máximo das partículas depende do empacotamento das partículas grossas, médias e finas, através da Equação 3.

$$PF_{m\acute{a}x} = PF_c + (1 - PF_c)PF_m + (1 - PF_c)(1 - PF_m) PF_f \quad (3)$$

Onde: $PF_{m\acute{a}x}$ = fração de empacotamento máximo;

PF_c = fração de empacotamento de partículas grossas;

PF_m = fração de empacotamento de partículas médias;

PF_f = fração de empacotamento de partículas finas.

O autor refere-se a distribuições contínuas de outros autores e faz adaptações considerando porcentagens acumuladas de finos, conforme Equações 4 e 5:

$$Fm(a) = \left[\frac{a}{a_{m\acute{a}x}} \right]^n \quad (4)$$

$$Fm(a) = \frac{a^n - a_{m\acute{a}x}^n}{a_{m\acute{a}x}^n - a_{m\acute{m}n}^n} \quad (5)$$

Onde: F_m = distribuição cumulativa de tamanhos menores que "a" em base mássica;

$a_{m\acute{a}x}$ = tamanho máximo de partícula;

$a_{m\acute{m}n}$ = tamanho mínimo de partícula;

n = módulo de distribuição.

2.4.2 Massa Específica Real e Massa Unitária

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) e Neville e Brooks (2013), os agregados naturais são porosos e as porosidades variam de 2 a 5%, dependendo do tipo da rocha que deu origem ao agregado. Para a dosagem das misturas é importante ter conhecimento do volume referente às partículas dos agregados, inclusive os poros existentes nas próprias partículas. Sendo suficiente determinar a massa

específica, que é definida pela relação entre a massa do material (incluindo os poros internos) por unidade de volume. A massa unitária é conceituada como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume. Destacam que não há como empacotar os grãos de agregados de forma que não haja nenhum espaço vazio entre eles.

A maioria dos agregados naturais possui massa específica entre $2,6 \text{ g/cm}^3$ e $2,7 \text{ g/cm}^3$, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica aparente de diversos grupos de rocha (kg/dm^3).

Grupo	Massa Específica	Intervalo de Valores
Basalto	2,80	2,6 – 3,0
Granito	2,69	2,6 – 3,0
Arenito	2,69	2,6 – 2,9
Calcário	2,66	2,5 – 2,8
Quartzito	2,62	2,6 – 2,7

Fonte: Neville e Brooks (2013), adaptada.

Ressaltam que partículas de tamanho único não conferem boas condições de adensamento, mas ao adicionar partículas com dimensões variadas, elas preencherão os vazios, dando maior compacidade e aumentando a massa unitária.

2.4.3 Porosidade, Absorção e Umidade Superficial

De acordo com Neville e Brooks (2013), a porosidade, a permeabilidade e a absorção de água interferem na aderência do agregado com a pasta de cimento. A absorção de água de um agregado é expressa em porcentagem e mostra o acréscimo de massa de uma amostra seca em estufa após sua imersão em água durante vinte e quatro horas.

Para Mehta e Monteiro (2008), quando todos os poros do agregado estão preenchidos e inexistente filme de água na superfície (com a superfície seca), ele é dito saturado com superfície seca (SSS); quando o agregado está saturado e com umidade livre na superfície, ele está na condição úmida ou saturada; quando toda a água evaporável do agregado foi removida através de aquecimento a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, ele está na condição seca em estufa.

Absorção efetiva é a quantidade de água necessária para levá-lo da condição seca ao ar para SSS e a umidade superficial é a quantidade de água que excede aquela suficiente para levá-lo à condição SSS. No caso das areias, pode ocorrer o inchamento, que, dependendo do teor de umidade e da composição granulométrica, causa aumento considerável do volume aparente da areia. Tal fenômeno é mais comum nas areias finas, onde as partículas são mantidas separadas em função da tensão superficial da água. A umidade dos agregados e o inchamento das areias estão esquematizados na Figura 4 e na Tabela 6.

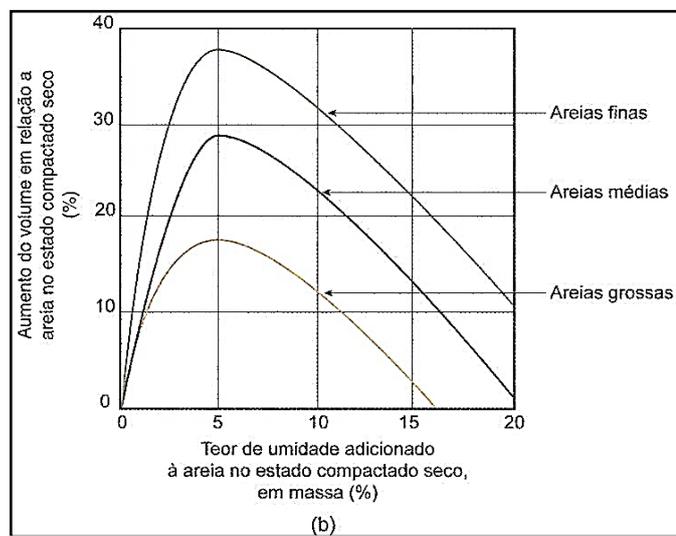


Figura 4 – Condições de umidade dos agregados e inchamento da areia. Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008).

Tabela 6 - Representação esquemática da umidade do agregado.

Condições do Agregado	Aspecto	Características
Seco em estufa		Agregado não possui nenhuma umidade
Seco ao ar		Agregado possui umidade interna e não possui a externa (a umidade é menor que a absorção potencial)
Saturado com superfície seca		Vazios permeáveis estão cheios de água (a umidade é igual à absorção potencial)
Saturado ou úmido		Possui água livre em sua superfície (umidade maior que a absorção potencial)

Fonte: Adaptado de NEVILLE e BROOKS, 2013.

2.4.4 Forma, Textura e Aderência

A forma dos agregados, de acordo com Neville e Brooks (2013), influencia as propriedades da mistura. Para Mehta e Monteiro (2008), ela está relacionada com a sua aparência alongada (quando o comprimento é bem superior às outras dimensões), arredondada (sem vértices e arestas), angulosa (com vértices e arestas bem definidos) ou lamelar/achatada (partículas que possuem pequenas espessuras quando comparadas às outras duas dimensões). As areias naturais são geralmente arredondadas em função do desgaste por atrito que culmina na perda das arestas, já as areias britadas são normalmente, angulosas pelo processo de britagem. A forma arredondada dos agregados, de acordo com Bauer (2000), melhora a compacidade, a trabalhabilidade das argamassas e influencia o ângulo de atrito interno.

Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que os agregados com superfície angulosa e alongada requerem mais pasta de cimento quando comparados aos agregados com superfície lisa e arredondada. As partículas angulosas produzem compósitos cimentícios mais resistentes, uma vez que possibilitam maior aderência entre elas, entretanto, devido à maior área específica, demandam maior quantidade de água para uma mesma trabalhabilidade (ISAIA, 2010).

Neville e Brooks (2013) definem esfericidade como a relação entre a área superficial das partículas e seu volume. Grãos com alta esfericidade demandam menos água para uma determinada trabalhabilidade. Para Silva *et al.* (2004), o aumento de quantidade de partículas não esféricas em uma dosagem implica na redução da densidade e afeta todas as propriedades relacionadas a elas. Entretanto, estudos desses autores mostraram que o efeito negativo da não esfericidade das partículas pode ser compensado pela existência de variadas dimensões na distribuição granulométrica.

De acordo com Bauer (2000), quanto às dimensões, os agregados estão classificados em alongado, cúbico, lamelar e discóide. Tais denominações dependem da relação entre as suas dimensões: comprimento (c), largura (l) e espessura (e), conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficiente de Forma.

	Cascalho e Areia	Material de britagem
Alongado	c/l 1,5 – l/e1,5	c/l 2 – l/e 2
Cúbico	c/l 1,5 – l/e1,5	c/l 2 – l/e 2
Lamelar	c/l 1,5 – l/e1,5	c/l 2 – l/e 2
Discóide	c/l 1,5 – l/e1,5	c/l 2 – l/e 2

Fonte: BAUER (2000).

Para Mehta e Monteiro (2008), a textura está relacionada ao aspecto visual do agregado e informa o quanto a sua superfície é lisa ou áspera. Nas primeiras idades, a resistência à flexão dos compósitos cimentícios é favorecida pela textura áspera do agregado em função da maior aderência mecânica formada entre a pasta de cimento e o agregado, mas em idades mais avançadas, a ocorrência de uma aderência química mais forte diminui a importância da aderência física garantida pela textura.

De acordo com Neville e Brooks (2013), a textura superficial, que depende das características da rocha mãe do agregado miúdo tem efeito determinante em sua aderência à pasta de cimento e na demanda de água de mistura. Além disso, a angulosidade de um agregado influencia a porosidade de uma mistura, de forma que o seu teor de vazios é reduzido com o acréscimo de partículas arredondadas, conforme Figura 5.

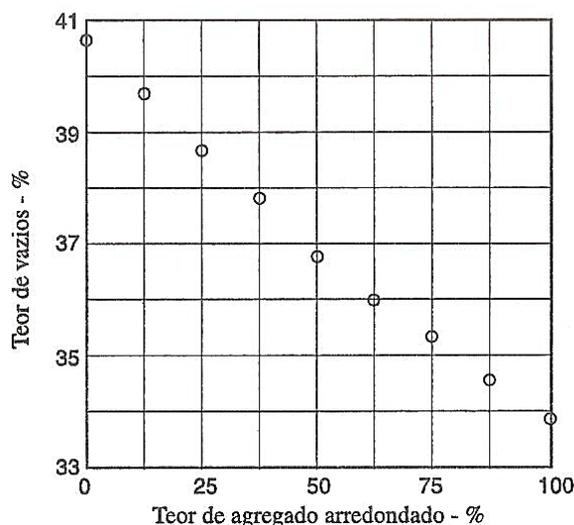


Figura 5 – Influência da angulosidade do agregado sobre a porosidade.
Fonte: NEVILLE e BROOKS (2013).

2.4.5 Resistência à compressão

A resistência à compressão de um compósito cimentício não pode ser muito superior à resistência dos agregados. Mas, como o ensaio de resistência à compressão dos agregados isoladamente é de difícil execução, ela é avaliada indiretamente através dos valores de resistência ao esmagamento do agregado em fragmentos, da força necessária para compactar o agregado fragmentado e do seu desempenho nos compósitos cimentícios. De forma que, se as partículas apresentarem-se danificadas após rompimento do corpo de prova, conclui-se que o agregado possui resistência inferior à resistência à compressão nominal do compósito cimentício (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Para Mehta e Monteiro (2008), os agregados encontrados na natureza são densos e resistentes e possuem altos valores de resistência à compressão (de 210 a 310 MPa) e, portanto, sua utilização nos compósitos cimentícios não limitam a resistência e as propriedades elásticas das misturas.

2.4.6 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade, assim como a resistência à abrasão e à compressão dos agregados estão inter-relacionadas e são altamente influenciados pela porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008). De forma que, um agregado poroso geralmente apresenta baixo valor de módulo de elasticidade (NEVILLE e BROOKS, 2013). Ressaltam que quanto maior o valor do módulo, maior será o poder de contenção da fluência da pasta de cimento hidratado que o agregado exerce sobre ela.

2.4.7 Sanidade

Agregado instável é aquele cuja variação volumétrica oriunda de intemperismos causa deterioração nos materiais compósitos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A instabilidade está relacionada à distribuição dos poros e não à porosidade total, de forma que se houver permeabilidade não ocorrerá pressão hidráulica interna ao agregado.

2.4.8 Substâncias deletérias presentes

Substâncias deletérias, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), são aquelas que ocorrem em pequenas quantidades nos agregados, mas que podem afetar a trabalhabilidade, a pega, o endurecimento e a durabilidade dos compósitos cimentícios.

Segundo Neville e Brooks (2013), há três categorias dessas substâncias encontradas no agregado: impurezas que afetam a hidratação do cimento; películas que prejudicam a aderência do agregado com a pasta de cimento e algumas partículas fracas ou não são.

A ABNT NBR 7211:2009 determina os limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas presentes nos agregados miúdos conforme relação da Tabela 8.

Tabela 8 – Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo em relação à massa do material.

<i>Determinação</i>	<i>Método de Ensaio</i>		<i>Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo (%)</i>
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218: 2009		3,0
Materiais carbonosos *	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: 2001	Concreto submetido a desgaste superficial	3,0
		Concretos protegidos do desgaste superficial	5,0
	ABNT NBR NM 49: 2001	A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução-padrão	
Impurezas orgânicas **	ABNT NBR 7221: 2009	Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos	10 %

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

** Quando a cor 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: 2009

Fonte: ABNT NBR 7211: 2009.

3. AGLOMERANTES

3.1 Considerações iniciais

Os aglomerantes são materiais com granulometria muito fina, em geral pulverulentos, que possuem propriedades ligantes e, que, após misturados com água, adquirem propriedades cimentantes devido a reações químicas que ocorrem entre seus componentes e a água (ISAIA, 2010).

Podem ser classificados pelo seu processo de endurecimento ou pela sua composição. Quanto ao processo de endurecimento, estão divididos em inertes e ativos. Os inertes são aqueles que endurecem por simples secagem, como as argilas e o betume. Os ativos são aqueles que endurecem devido a reações químicas e estão subdivididos em aglomerantes aéreos e hidráulicos (ISAIA, 2010).

Os aglomerantes aéreos, como o gesso e a cal, produzem pasta que endurece devido às reações de hidratação ou devido à ação química do CO_2 da atmosfera. Mas, após endurecida, a pasta não possui resistência satisfatória quando exposta à água. Os aglomerantes hidráulicos, tais como: o cimento natural e o cimento Portland, produzem pasta que endurece devido à sua reação com a água e após endurecida, a pasta possui resistência satisfatória quando exposta à água (ISAIA, 2010).

3.2 Cimento Portland

3.2.1 Considerações iniciais

A ABNT NBR NM 2:2000 define Cimento Portland como um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidratados e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio. Trata-se de um pó finamente moído (material pulverulento) com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da

água e depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais.

3.2.2 Composição do Cimento Portland

Usualmente, são considerados quatro compostos como os principais constituintes do cimento, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Compostos principais do cimento Portland.

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviação
Silicato Tricálcico (Alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico (Belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
FerroaluminatoTetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de NEVILLE e BROOKS (2013).

Conforme Bauer (2000), o silicato tricálcico (C_3S ou alita) é o grande responsável pela resistência em todas as idades, principalmente até o final do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico (C_2S ou belita) é o maior responsável no processo de endurecimento nas idades mais avançadas, a um ano ou mais. O aluminato tricálcico (C_3A) contribui para a resistência principalmente no primeiro dia. O ferro aluminato de cálcio (C_4AF) não fornece contribuição para a resistência. O aluminato de cálcio (C_3A) é o maior responsável pelo calor de hidratação, principalmente no início da cura. O silicato tricálcico é o segundo responsável pela liberação de calor e os outros componentes não contribuem muito para a liberação de calor.

Destaca que a rapidez da pega ocorre em função da presença do aluminato de cálcio na forma cristalina. O tempo de hidratação pode ser controlado pela adição conveniente de gesso. O silicato tricálcico é o segundo responsável pelo tempo de pega do cimento e os demais componentes possuem hidratação lenta e, portanto, não interferindo no tempo de pega.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os tipos, características e quantidades das quatro principais fases sólidas que estão geralmente presentes na pasta de cimento hidratado que podem ser observadas no microscópio eletrônico são:

- **Silicato de cálcio hidratado (C-S-H):** é um composto que não é bem definido, por isso, a abreviação de sua fórmula é hifenizada. A relação C/S varia entre 1,5 e 2,0 e o teor de água estrutural varia ainda mais. Constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, e, por isso, é a fase mais importante na determinação das propriedades da pasta. Sua morfologia varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino;
- **Hidróxido de Cálcio: Ca(OH)_2 (Portlandita):** é um composto com estequiometria bem definida com tendência à formação de cristais grandes de formato de prismas hexagonais distintos. Com morfologia bastante variada, apresentando desde formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas e que pode ser afetada pela temperatura de hidratação, espaço disponível, além de impurezas disponíveis no sistema. Constitui 20 a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada;
- **Sulfoaluminatos de cálcio:** constituem de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta de cimento endurecida, desempenhando menor importância na relação estrutura-propriedade. Nos primeiros estágios do processo de hidratação do cimento, a relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente beneficia a formação de trissulfato hidratado, $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$, conhecido como etringita, que possui cristais prismáticos aciculares. Eventualmente, em pastas de cimento Portland comum, a etringita transforma-se em monossulfato hidratado, $\text{C}_4\text{AS}_3\text{H}_{18}$ que cristaliza em placas hexagonais e a presença desse monossulfato no concreto de cimento Portland torna-o vulnerável ao ataque por sulfato. Tanto a etringita quanto o monossulfato contêm alguma quantidade de óxido de ferro e esse óxido pode substituir o óxido de alumínio na estrutura dos cristais.

3.2.3 Tipos de Cimento Portland

Os tipos de cimento atendem a várias utilizações, sendo a escolha especificada, segundo Isaia (2010) e Souza *et al.* (1996), conforme as necessidades de aplicação e do local. Assim, o cimento CPV ARI, pode garantir altas resistências

em baixas idades, é indicado em obras que necessitem dessa característica; os cimentos CP III e CP IV produzem menor calor de hidratação, maior resistência ao ataque de sulfatos e cloretos, maior resistência à compressão em altas idades e maior resistência à tração e à flexão, vide Tabela 10.

Tabela 10 - Composição dos Cimentos Portland.

<i>Tipo de Cimento Portland</i>	<i>Composição (% em massa)</i>				
	<i>Sigla</i>	<i>Clínquer + Gesso</i>	<i>Escória Granulada</i>	<i>Material Pozolânico</i>	<i>Material Carbonático</i>
COMUM	CPI	100	-	-	1 – 5
	CPI-S	99 – 95	-	-	1 – 5
	CPII-E	94 – 56	6 – 34	-	0 – 10
COMPOSTO	CPII-Z	94 – 76	-	6 – 14	0 – 10
	CPII-F	94 – 90	-	-	6 - 10
	CPIII	65 – 25	35 - 70	-	0 – 5
ALTO-FORNO	CPIV	85 – 45	-	15 - 50	0 – 5
POZOLÂNICO	CPV - ARI	100 - 95	-	-	0 - 5
ALTA RESISTÊNCIA INICIAL	Estrutural	100 – 75	-	-	0 - 25
	Não estrutural	74 - 50	-	-	26 - 50

Fonte: Adaptado de METHA e MONTEIRO, 2008 e ISAIA, 2007.

Segundo Carasek *et al.* (2001), argamassas confeccionadas com o cimento CPV ARI apresentam maiores valores de resistência de aderência que as demais, contudo um cuidado especial deve ser tomado, pois sua maior finura pode conduzir mais facilmente à fissuração. A ABCP (2002) recomenda como apropriados para utilização em argamassas de revestimento e assentamento de tijolos e blocos, os cimentos: Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV).

3.2.4 Propriedades do Cimento Portland

3.2.4.1 Densidade

A densidade aparente é muito utilizada para calcular o consumo de cimento nas misturas dosadas com base no volume dos materiais. Usualmente, a densidade do cimento Portland é considerada 3,15, apesar de que na realidade há pequenas variações para valores inferiores. A ABNT NBR NM 23:2001 descreve o processo de obtenção da massa específica a ser empregada no cálculo de dosagens de concretos e argamassas

3.2.4.2 Finura do Cimento

A finura do cimento, conforme Mehta e Monteiro (2008), afeta diretamente sua velocidade de reação e conseqüentemente o desenvolvimento da resistência, mas o custo de moagem e o calor liberado no processo de hidratação, que é uma reação exotérmica, estabelecem alguns limites para a finura do material.

Essa propriedade pode ser determinada através da peneira de malha nº 200: 0,075 mm (ABNT NBR 11579:2013); permeabilímetro ao ar de Blaine (ABNT NBR NM 76:1998) e granulometria a *laser*. O emprego da peneira nº 200 pode ser feito por procedimentos manuais e mecânicos e corresponde à porcentagem em massa de cimento cujas dimensões de grãos são superiores a 75 µm. A finura influencia o aumento do desenvolvimento de calor, de retração, da resistência ao longo do tempo e reduz a porosidade (LANGE *et al.*, 1997).

3.2.4.3 Hidratação do Cimento

De acordo com Neville e Brooks (2013), o cimento torna-se um agente ligante em função das reações que ocorrem na pasta de cimento e água. Na presença da água, os silicatos e os aluminatos, que são os principais compostos do cimento, formam produtos de hidratação que, ao passar do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente, que é a pasta de cimento endurecida.

A reação de hidratação do cimento é uma reação exotérmica e a velocidade de liberação de calor é um indicativo da velocidade de hidratação. Podem ocorrer durante meses, em função do consumo de cimento e/ou volume do compósito. A quantidade de calor gerado depende da composição química do cimento, quantidade e tipo de adições, finura, etc. Pode ser avaliada pelo procedimento descrito pela ABNT NBR 13116:1994.

3.2.4.4 Pega do Cimento

De acordo com Bauer (2000), a pega do cimento ocorre devido a um processo químico de hidratação dos grãos de cimento e compreende propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, que são

propriedades essencialmente físicas. É o momento em que a pasta de cimento responsável pela aglutinação dos agregados, tanto nas argamassas quanto nos concretos, adquire consistência tornando-a inadequada para um trabalho. Trata-se do início das reações de hidratação; a pasta de cimento vai aumentando a consistência até o endurecimento, sendo avaliada segundo o processo da ABNT NBR NM 65: 2003.

3.3 Cal

3.3.1 Considerações iniciais

De acordo com Isaia (2010), a cal é um aglomerante aéreo, possuindo, portanto, pouca resistência à exposição prolongada à água. São materiais consagrados na construção civil, havendo registros históricos que confirmam sua utilização há milhares de anos. São empregados em pastas e argamassas, apresentando inúmeras vantagens quando utilizados em conjunto com o cimento.

É um aglomerante inorgânico obtido pela calcinação dos calcários (CaCO_3) ou dolomitos ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), através de uma reação química de decomposição térmica.

3.3.2 Influência das propriedades da cal nos compósitos cimentícios.

A cal, como aglomerante, possui propriedades peculiares que a tornam imprescindível na construção civil, especialmente para as argamassas. Dentre elas, destacam-se a plasticidade conferida às pastas e argamassas que permite maiores deformações sem fissuração; além da retenção da água de amassamento que possibilita uma melhor aderência (ISAIA, 2010).

O endurecimento da cal depende da ação do CO_2 e é muito lento. Argamassa produzida com cal apresenta baixa resistência mecânica e reduzido módulo de elasticidade, e conseqüentemente, maior capacidade de deformação. Barbosa *et al.* (2013) mostraram que apesar de a cal não proporcionar aumento de resistência às argamassas, traços com cal produziram argamassas com mesma resistência do que os traços sem cal para argamassas mais pobres. Além disso,

Santos (2011) demonstrou que o emprego da cal proporcionou maior coesão e plasticidade às argamassas pobres.

Quanto às propriedades físicas, busca-se conhecer a finura da cal, referida na normalização brasileira apenas quanto ao peneiramento, detectando partículas grandes, maiores que 0,075 mm, que são indícios de hidratação incompleta e de impurezas minerais. O tamanho das partículas é uma característica importante, uma vez que, quanto menores as dimensões, maiores serão suas superfícies específicas. Conseqüentemente, as áreas de ataque no momento das reações serão maiores, ou seja, mais partículas poderão combinar-se entre si. Isaia (2010) destaca que área superficial da cal é 10 vezes maior do que a do cimento.

A normalização brasileira (ABNT NBR 6473:2003 e ABNT NBR 7175:2003) apresenta como principais determinações a serem realizadas numa cal para verificação de sua qualidade a composição química e a finura. A quantidade de óxidos presentes numa cal representa o seu grau de pureza e os teores de anidrido carbônico e resíduo insolúvel demonstram o nível de impureza.

Dentre os diversos empregos para a cal, citam-se: pinturas, tijolo ou bloco sílico-calcário, estabilização de solos e argamassa de revestimento e assentamento.

4. ARGAMASSAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

4.1 Considerações iniciais

O recente aquecimento da construção civil alavancou um maior consumo de materiais utilizados nas edificações, tendo como consequência o aumento do consumo de argamassa. A escolha do tipo de argamassa está relacionada com a sua aplicação na obra, devendo ser levado em conta a resistência mecânica necessária, o potencial de impermeabilização adequado, porosidade, etc., além de um desempenho adequado e de boa durabilidade.

A ABNT NBR 13.281:2005 e Carasek (2007) definem as argamassas como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosadas em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

4.2 Classificação das argamassas

A ABNT NBR 13281: 2005 tipifica as argamassas da seguinte forma:

- argamassa de assentamento em alvenaria de vedação, em que a argamassa liga os componentes de vedação, tendo função apenas de vedação;
- argamassa de assentamento em alvenaria estrutural, onde além da função de ligar os componentes, a argamassa também tem a função estrutural;
- argamassa utilizada no encunhamento que tem a função de fechar a alvenaria de vedação, após execução da última fiada de componentes;
- argamassa para revestimento interno: é caracterizada como camada de regularização (emboço + reboco ou camada única);
- argamassa para revestimento externo: utilizada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos que estejam em contato com o meio externo. É

caracterizada como camada de regularização (emboço + reboco ou camada única);

- argamassa de uso geral: indicada para assentamento de alvenaria que não tenha função estrutural e revestimento em ambientes internos e externos;
- argamassa para reboco: indicada para cobertura do emboço para garantir uma superfície fina, também conhecida como massa fina;
- argamassa decorativa em camada fina: argamassa de acabamento, em camada fina, indicada para revestimentos decorativos;
- argamassa decorativa em monocamada: argamassa de acabamento, decorativa, feita em camada única indicada para revestimentos de elementos em contato com o meio externo.

Cincotto *et al.* (1995) classificam as argamassas conforme Tabela 11:

Tabela 11 – Revestimentos de argamassas inorgânicas – classificação.

Tipo	Critério de Classificação
Argamassa Aérea	Número de Aglomerantes
Argamassa Hidráulica	
Argamassa de Cal	Tipo de Aglomerante
Argamassa de Cimento	
Argamassa de Cimento e Cal	
Argamassa Simples	Número de Aglomerantes
Argamassa Mista	
Argamassa Aditiva	
Argamassa Colante	
Argamassa de Aderência Melhorada	Propriedades Específicas
Argamassa Hidrófuga	
Argamassa de Proteção Radiológica	
Argamassa Redutora de Permeabilidade	
Argamassa Termo-isolante	
Argamassa de Chapisco	Função no Revestimento
Argamassa de Emboço	
Argamassa de Reboco	
Argamassa Dosada Central	
Argamassa Preparada em Obra	Forma de Preparo ou Fornecimento
Argamassa Industrializada	
Mistura Semi Pronta para Argamassa	

Fonte: CINCOTTO *et al.* (1995).

Isaia (2010) e a ABNT NBR 13529:2013 classificam as argamassas quanto: à natureza do aglomerante: aérea e hidráulica; ao número de aglomerantes:

simples e mista; ao tipo de aglomerante: cal, cimento e mista; à função do revestimento: chapisco, reboco e emboço; à forma de preparo ou fornecimento: dosada em central, preparada em obra, industrializada e semi-pronta; propriedades especiais: aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termo isolante; ao número de camadas de aplicação: uma ou duas camadas; ambiente de exposição: paredes internas e externas, contato com o solo; ao comportamento à umidade: hidrófuga, reduzida, permeabilidade, comum; ao comportamento à radiação: proteção radiológica; ao comportamento ao calor: termo isolante; ao acabamento da superfície: camurçado, chapiscado, desempenado, sarrafeado, travertino, lavado, raspado.

4.3 Propriedades das argamassas

4.3.1 Trabalhabilidade

De acordo com Carasek (2007), a trabalhabilidade é uma característica do estado fresco das argamassas responsável pela possibilidade de execução do revestimento, além do seu adequado desempenho, uma vez que somente uma trabalhabilidade adequada possibilitará uma correta aplicação, garantindo a existência da ocorrência de várias propriedades no estado endurecido, como é o caso da aderência.

Dessa forma, um revestimento de argamassa aplicado com colher de pedreiro deve ter consistência e plasticidade diferentes de uma aplicação através de bombeamento com mangote, na qual a argamassa é projetada na pistola com auxílio de ar comprimido, requerendo uma consistência bem fluida (CARASEK, 2007). A trabalhabilidade responde pela capacidade da argamassa conservar-se deformada depois da retirada das tensões de deformação. Está intimamente ligada a várias outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, consistência, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial.

Ainda de acordo com Carasek (2007), a plasticidade é influenciada pelos tipos e quantidades de aglomerantes utilizados na argamassa, pela energia da mistura, pela existência ou não de aditivo incorporador de ar. A quantidade de finos (partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm) da mistura seca influencia a plasticidade, conforme demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Influência teor de finos da mistura seca na plasticidade das argamassas.

<i>Plasticidade</i>	<i>% mínima de finos da argamassa</i>	
	<i>Sem aditivo plastificante</i>	<i>Com aditivo plastificante</i>
Pobre (áspera, magra)	< 15	< 10
Média (plástica)	15 a 25	10 a 20
Rica (gorda)	>25	>20

Fonte: CARASEK (2007).

4.3.2 Consistência

De acordo com Carasek (2007), consistência é a capacidade da argamassa deformar-se sob a ação de cargas; diz respeito a sua fluidez e está associada a sua capacidade de resistir ao escoamento.

Ela é dita “**seca**” quando aglomerante preenche o espaço existente entre os agregados, mas ainda permite o contato/atrito entre eles, característico de uma massa áspera; “**plástica**” quando há uma fina camada de pasta aglomerante envolvendo a superfície dos agregados, conferindo boa adesão entre eles e possuindo uma estrutura pseudo-sólida; “**fluida**” quando não há coesão interna, os agregados estão no interior a pasta aglomerante e possuem tendência à segregação. Os agregados não possuem nenhuma resistência ao deslizamento e a argamassa é tão líquida que não permite a execução do trabalho, pois se espalha. A Figura 6 esquematiza a consistência das argamassas.

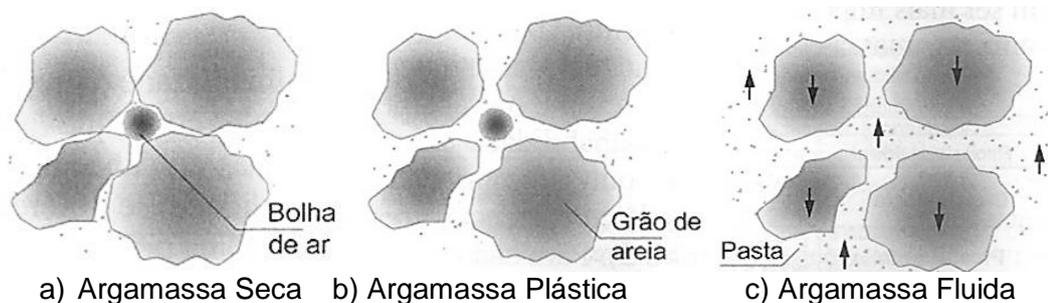


Figura 6 – Consistência das argamassas.

Fonte: ISAIA (2007), adaptada.

Ainda de acordo com Carasek (2007), a consistência e a plasticidade condicionam a trabalhabilidade, mas não são sinônimos dessa propriedade. O proporcionamento e a natureza dos materiais possibilita a consistência ótima da argamassa, que está relacionada com a quantidade ótima de água.

Experimentos realizados por Gonçalves *et al.* (2007) em traços de argamassa com diferentes formas e distribuições granulométricas de agregados miúdos mostraram que para um relação a/c de 0,5, e dentro do erro experimental de ± 10 mm, todos os traços apresentaram consistências similares, independentemente da forma ou da distribuição granulométrica das partículas.

Entretanto, no mesmo estudo, foi mostrado que para fatores a/c inferiores (0,4, por exemplo) já foi detectada a influência tanto da forma das partículas quanto da proporção dos finos. As argamassas com agregado britado apresentaram redução da consistência em comparação com a argamassa de agregado natural, atestando a influência direta da forma do agregado nessa propriedade. Além disso, os estudos mostraram também que há influência da granulometria na consistência (só que menos significativa do que a influência exercida pela forma dos agregados finos). Os traços com maiores quantidades de finos apresentaram maiores reduções da consistência, quando comparados ao padrão que possuía menos finos.

Os ensaios realizados para medir a consistência de uma argamassa através da penetração no interior dela quantificam, principalmente, a tensão de escoamento, como é o caso do Método de Penetração do Cone que, apesar de não avaliar a reologia e a trabalhabilidade com rigor, permite o controle de produção de argamassas em obra. E como é sensível à variação do teor de água, torna-se mais eficiente e prático para detectar variações de consistência do que o próprio ensaio método da mesa de espalhamento, conhecido como *Flow Table* (GAZOLA, 2007 e SANTOS, 2008) normatizado através da ABNT NBR 13276 (2005).

Sousa e Lara (2007) afirmam que o ensaio mais atual que avalia a trabalhabilidade das argamassas e mede o esforço de compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas é denominado *Squeeze-Flow* cuja vantagem sobre os ensaios tradicionais é a possibilidade de detectar

pequenas alterações reológicas (tensão de escoamento e viscosidade) dos materiais, pois permite a variação da taxa de cisalhamento e da magnitude das deformações. Suas limitações são o preço relativamente alto e a utilização possível somente em laboratório.

Outros métodos avaliam a trabalhabilidade das argamassas, tais como os testes de Vane, originalmente utilizado na mecânica dos solos e atualmente em uso pelos pesquisadores do Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (BAUER, 2005), e o *Gtec Test* que permite a avaliação da consistência, plasticidade e da coesão.

4.3.3 *Coesão e exsudação*

Segundo Cincotto (2013) e Freitas (2010), a coesão é a tendência de adesão entre as partículas em função da força de atração existente entre elas. É oriunda das forças capilares e intermoleculares das argamassas. Os ensaios de escoamento sob compressão, *Squeeze Flow*, *Pull-off* e *Flow Test* são utilizadas para avaliação dessa propriedade (CARDOSO, 2009).

A exsudação, segundo Santos (2008), consiste no fenômeno de separação de parte da água de amassamento de uma argamassa fresca mantida em repouso, sem qualquer tipo de vibrações ou choques. É uma forma de segregação, na qual os sólidos se sedimentam sob a força da gravidade, e a argamassa não retém a água da mistura em estado disperso enquanto os sólidos estiverem se assentando.

4.3.4 *Retenção de água*

De acordo com Carasek (2007), após a aplicação, a argamassa, principalmente a argamassa de assentamento, inicia um processo de perda de água, seja pela sucção dos componentes de alvenaria através dos poros da base, pela evaporação, ou pelo próprio processo de amassamento. Por esse motivo, a retenção é uma propriedade muito importante, pois regula o processo de perda de água garantindo que ela não seja muito rápida, e prejudique, ou até inviabilize sua utilização, dependendo do tipo de aplicação.

Além disso, a retenção da água interfere no comportamento da argamassa no estado fresco (acabamento e na retração plástica) e tem influência nas propriedades do estado endurecido, quando necessitam de uma adequada retenção de água para que as reações químicas de hidratação dos aglomerantes se completem adequadamente, influenciando também a resistência mecânica final, a durabilidade e a aderência.

Ao perder água muito rapidamente para o substrato, no caso de argamassa de revestimento, ou para os blocos, no caso de argamassa de assentamento, poderá faltar água para a adequada ligação dos elementos, pois parte dos aglomerantes foram dissipados juntamente com a água perdida, sendo necessário que haja uma adequada retenção de água para que as reações de hidratação possam ocorrer apropriadamente (CARASEK, 2007).

A avaliação de retenção pode ser determinada através da ABNT NBR 13277:2005, cujo ensaio consiste em succionar a argamassa com bomba a vácuo a baixa pressão em um funil de filtragem e medir a massa de água retida nessa amostra. A retenção de uma argamassa varia conforme sua composição e é crescente com os seguintes materiais: adição de cal e/ou aditivos incorporadores de ar e de aditivo retentor de água (ésteres de celulose, por exemplo).

Conforme Carneiro e Cincotto (1999), os agregados miúdos ao serem envolvidos na pasta através de ação mecânica formam capilares entre os vazios dos grãos de areia, contribuindo parcialmente para a retenção da água de amassamento. Para Mehta e Monteiro (2008), a pasta de cimento não tratada pode reter grande quantidade de água, dependendo da umidade ambiente e da sua porosidade, e ela pode estar presente na pasta através de várias formas. A classificação dessa água está relacionada ao grau de dificuldade ou facilidade de sua remoção e permite compreender as variações de volume da pasta de cimento que estão relacionadas com a água retida nos pequenos poros.

4.3.5 Resistência mecânica

A resistência mecânica da argamassa deve ser específica ao seu tipo de utilização. Ela é usualmente definida como a propriedade das argamassas de

suportarem as ações de diferentes naturezas como as oriundas da abrasão superficial, do impacto e de movimentação higroscópica e/ou estrutural. A resistência à compressão característica das argamassas de revestimento não deve ser superior à resistência do bloco (70%, segundo a ABNT NBR 15961:2011). Não são necessárias resistências altas à compressão da argamassa de assentamento para o bom desempenho de uma parede (CARASEK, 2007 e SANTOS, 2014). O aumento da resistência do revestimento torna os elementos muito rígidos e impede a deformação da estrutura promovendo a fissuração (SANTOS, 2014).

A ABNT NBR 13281:2005 classifica as argamassas segundo a resistência à compressão axial (Tabela 13), segundo a resistência à tração na flexão (Tabela 14) e segundo à resistência potencial de aderência a tração (Tabela 15). A ABNT NBR 13279:2005 define o procedimento experimental destes experimentos.

Tabela 13 - Classificação das argamassas segundo a resistência à compressão.

Classe	Resistência à Compressão Axial (MPa) – ABNT 13279 (2005)
P1	≤ 2,0
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,0 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	> 8,0

Fonte: ABNT NBR 13281: 2005.

Tabela 14 - Classificação das argamassas segundo a resistência à tração na flexão.

Classe	Resistência à Tração na Flexão (MPa) – ABNT 13279: 2005
R1	≤1,5
R2	1,0 a 2,0
R3	1,5 a 2,7
R4	2,0 a 3,5
R5	2,7 a 4,5
R6	> 3,5

Fonte: ABNT NBR 13281:2005.

Tabela 15 - Resistência potencial de aderência à tração.

Classe	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	Método de ensaio
A1	< 0,20	ABNT NBR 15258
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

SANTOS (2011) menciona que a resistência mecânica depende, basicamente, do consumo, da natureza dos agregados e dos aglomerantes empregados, além da

técnica de execução, sendo que essa última visa a compactar as argamassas durante a sua aplicação e acabamento. Há de se considerar, inclusive, a significativa influência da temperatura e da umidade no desempenho e na vida útil das argamassas, bem como a resistência, que é inversamente proporcional ao consumo de água (relação água/cimento) devido ao aumento do índice de vazios.

4.3.6 Densidade de massa e teor de ar incorporado

O ensaio de densidade de massa e do teor de ar incorporado na argamassa fresca é determinado conforme a ABNT NBR 13.278:2005. O teor de ar influencia a trabalhabilidade e pode impactar nos valores de resistência mecânica das argamassas, contudo, pode beneficiar a sua deformabilidade. Além disso, o teor de ar incorporado contribui para o impedimento da passagem de água para o interior pelo fenômeno da capilaridade, pois as bolhas de ar incorporado podem interromper parte dos poros capilares das argamassas (FREITAS, 2010). A ABNT NBR 13.281:2005 classifica as argamassas, segundo a densidade de massa aparente no estado fresco (γ_f), conforme ilustrado na Tabela 16.

Tabela 16 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado fresco (γ_f).

Classe	Densidade de massa aparente no estado fresco (kg/m ³)
D1	≤ 1400
D2	1200 a 1600
D3	1400 a 1800
D4	1600 a 2000
D5	1800 a 2200
D6	> 2000

Fonte: ABNT NBR 13.281:2005.

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido segue a norma ABNT NBR 13280:2005. A densidade de massa da argamassa é um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto; determina indiretamente o volume de vazios incorporados pelos aditivos e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação (FREITAS, 2010).

A ABNT NBR 13.281:2005 classifica as argamassas, segundo a densidade de massa aparente no estado endurecido (γ_e) - Tabela 17 - sendo a avaliação feita pela ABNT NBR 13.280:2005.

Tabela 17 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado endurecido (γ_e).

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)
M1	≤ 1200
M2	1000 a 1400
M3	1200 a 1600
M4	1400 a 1800
M5	1600 a 2000
M6	> 1800

Fonte: ABNT NBR 13.281: 2005.

Para Silva (2006), empregando-se areia natural ou britada em argamassas, foi possível constatar que o aumento na relação cal/cimento diminui a densidade de massa para ambos os casos e que para uma mesma relação agregado/aglomerante, o incremento no teor de cal reduz a densidade de massa além de aumentar o consumo de água.

4.3.7 *Retração das Argamassas*

De acordo com Carasek (2007), a retração é a consequência da redução volumétrica da pasta aglomerante, em função da perda rápida de água, causando surgimento de tensões internas e consequente fissuração. Ela é responsável por efeitos deletérios à argamassa, pois causa fissuração e compromete a estanqueidade, o desempenho e a durabilidade das argamassas no estado endurecido.

A retração é influenciada pela granulometria, de forma que a granulometria contínua de uma areia permitirá menor volume de vazios e, conseqüentemente, menos pasta de cimento (menos água para hidratar os grãos de cimento) para preencher os vazios e menos retração. Assim, argamassas muito ricas estarão mais sujeitas à retração (CARASEK, 2007). Argamassas com grande teor de finos (principalmente dimensões inferiores a 5 μ) possuem grande superfície específica e requerem grande quantidade de água de amassamento, o que causa muita retração acompanhada de fissuração (SANTOS, 2014).

Segundo Fiorito (2009), as argamassas perdem 80 a 90% de água evaporável aos sete dias, com permanência de 1% a 2% de umidade natural e a retração por secagem, aos vinte e oito dias, varia de 50% a 60% da retração total. Como a maior parte da fissuração por secagem ocorre aos 7 dias, conforme Carasek

(2007), a aplicação de revestimento cerâmico deve ser, no mínimo após este prazo, para que ele não esteja sujeito às tensões de retração e para que seja garantida a estabilidade dimensional das camadas de base. O ensaio de retração é padronizado pela ABNT NBR 15261:2005, em que é feita a medição da retração livre da argamassa através de corpos de prova em formato de prisma com dimensões de 25mm x 25 mm x 285 mm.

4.3.8 Porosidade e capilaridade

Conforme Mehta e Monteiro (2008), a resistência dos compósitos cimentícios é representada pela parte sólida e os vazios a prejudicam. A distribuição de tamanho dos poros (e não a porosidade capilar total) é a melhor condição para avaliar as características de vazios capilares chamados macro-poros (com dimensões maiores do que 50nm) e eles são prejudiciais à resistência e à impermeabilidade. Já os micro-poros, vazios menores do que 50nm, influenciam mais a retração por secagem e a fluência. Estudos em argamassas com cal hidráulica natural, realizados por Kalagri *et al.* (2013), demonstraram que a ausência de agregado de graduação mais elevada aumenta a porosidade e piora as propriedades mecânicas, uma vez que, para uma mesma consistência, há maior demanda por água. Para esses autores, há um valor de raio médio de poro, aproximadamente 0,05 μm , abaixo do qual a resistência à compressão aumenta rapidamente com a sua redução.

Para Mehta e Monteiro (2008), a água de amassamento responde indiretamente pela permeabilidade da pasta, uma vez que ela define o espaço vazio da pasta endurecida, após consumo necessário da água para que ocorram as reações de hidratação do cimento e após evaporação. Ao ser misturada, uma pasta de cimento possui coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, e não existe uma proporcionalidade direta entre porosidade e o coeficiente de permeabilidade, entretanto com o passar do tempo, o coeficiente de permeabilidade é reduzido (FREITAS, 2010 e BAIA E SABBATINI, 2008).

Segundo Silva (2006), nos traços de argamassas com mesma relação agregado/aglomerante, se houver aumento da relação cal/cimento, haverá

aumento também do coeficiente de capilaridade, devido à diminuição do raio dos capilares, uma vez que haverá o incremento do teor de material fino - responsável pela redução do diâmetro do poro. A Tabela 18 apresenta a classificação das argamassas segundo o seu coeficiente de capilaridade, segundo a ABNT NBR 13281:2005. A ABNT NBR 9779:2012 descreve o ensaio.

Tabela 18 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade.

Classe	Coeficiente de capilaridade (kg/m²/min^{1/2})
C1	≤ 1,5
C2	1,0 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	> 10,0

Fonte: ABNT NBR 13.281:2005.

4.3.9 Módulo de elasticidade

Consiste na capacidade de deformação da argamassa e está intimamente ligado às propriedades mecânicas e à porosidade desse compósito (CARASEK, 2007). Dependente da relação água/cimento e da disposição dos espaços entre as partículas dos agregados devido à forma, à rugosidade dos grãos e ao teor de material pulverulento (SILVA, 2006).

O módulo de elasticidade pode ser obtido, conforme Mehta e Monteiro (2008), pela declividade da curva tensão-deformação dos materiais compósitos sujeitos à tração ou compressão. O módulo de elasticidade dinâmico apresenta valores geralmente superiores (20 a 40%) ao módulo de elasticidade estático, corresponde a uma deformação imediata muito pequena e é representado aproximadamente pela declividade de uma linha traçada a partir da origem da curva tensão-deformação, ou seja, pelo módulo tangente inicial.

É utilizado para avaliar estruturas sujeitas a terremotos e impactos (YAMAN *et al.*, 2001). Carvalho Jr. (2005) ressalta que a metodologia de medida dinâmica está embasada na existência de relação entre a velocidade do som através do material e a frequência de ressonância e o módulo de elasticidade do material.

4.3.10 Análise de propensão à fissuração

Gomes (1995) afirma que existe uma correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração na flexão das argamassas, apontando para a propensão à fissuração das mesmas em função dos valores obtidos (CSTB, 1982) conforme reproduzido na Tabela 19.

Tabela 19 - Análise de propensão à fissuração.

Propriedade	Baixa Fissurabilidade	Média Fissurabilidade	Alta Fissurabilidade
E_d - Módulo de elasticidade dinâmico(MPa)	$E_d \leq 7000$	$7000 \leq E_d \leq 12000$	$E_d \geq 12000$
E_d / f_t	$E_d / f_t \leq 2500$	$2500 < E_d / f_t < 3500$	$E_d / f_t > 3500$

Fonte: Adaptado de CSTB, 1982 *apud* Gomes, 1995.

Para Peña (2004) quanto maior a resistência à tração, maior a capacidade do material resistir às solicitações de tração impostas pela estrutura do substrato. Logo, isto exige um interesse especial de melhorar a tração das argamassas, podendo reduzir o fator a/c e/ou colocar polímeros para este fim. Por outro lado, destaca que o módulo de elasticidade não pode ser muito alto porque pode resultar em estruturas muito rígidas, não permitindo a acomodações/deformações necessárias aos elementos construtivos.

4.4 Zona de transição

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), zona de transição é a região da pasta (cimento + água) que está em contato com os agregados. Apesar de ser uma região fina (espessura variando de 10 a 50 μ m para o concreto) e que se apresenta menos resistente do que a pasta e os agregados, exerce grande influência sobre o comportamento mecânico do concreto.

Analogamente à zona de transição ao redor do agregado graúdo, há também a zona de transição no entorno do agregado miúdo, apesar de ser menos espessa, seus efeitos interagem com os agregados maiores e influenciam a extensão final da zona de interface (NEVILLE e BROOKS, 2013).

De acordo com Meta e Monteiro (2008) e Isaia (2010), as características microestruturais da zona de transição estão relacionadas com o fator água/cimento, a natureza, qualidade, quantidade, dimensões e distribuição dos materiais, do procedimento executivo, condições do ambiente, além de outros. Geralmente, quanto maior o agregado, maior também será a relação água/cimento que envolve esse agregado na região da zona de transição, devido a sua exsudação interna. Essa maior quantidade de água e o maior espaço disponível permitem produção de produtos cristalinos de maiores dimensões, formando uma estrutura mais porosa, com tendência de fissuração ao longo do eixo "C" do hidróxido de cálcio, o qual está orientado perpendicularmente ao agregado, e, portanto, menos resistente do que a matriz pasta, como pode ser visto através da Figura 7 (a). Uma segunda geração de cristais menores de etringita e de hidróxido de cálcio é formada e preenche os espaços vazios, melhorando a resistência da zona de transição na interface, como mostra a Figura 7 (b).

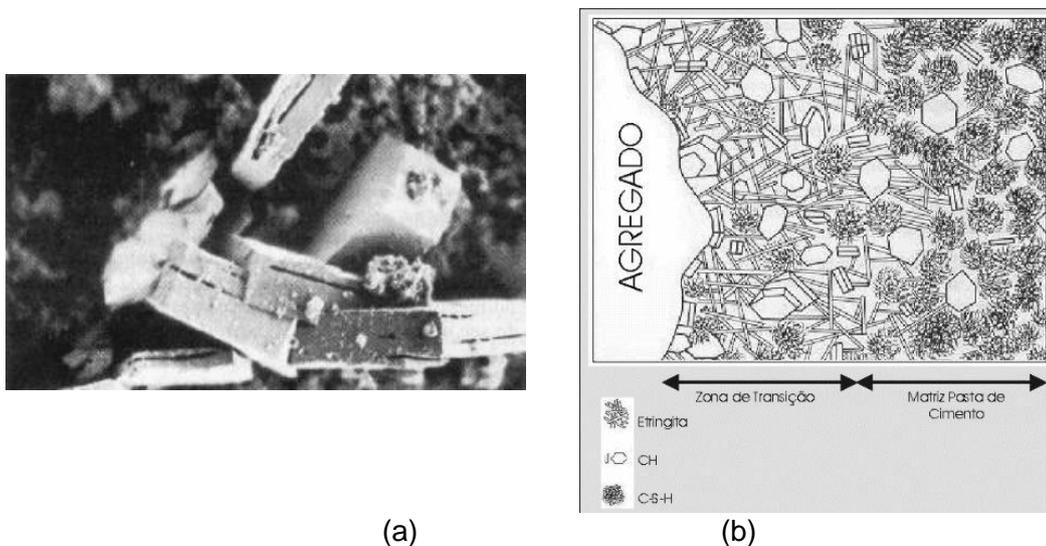


Figura 7 – MEV dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição (a), representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento do concreto (b)
 Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2004), adaptada.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Considerações iniciais

Com o objetivo de estudar a influência que a granulometria e a forma dos agregados miúdos exercem sobre as propriedades das argamassas mistas, no estado fresco e no estado endurecido, foram analisadas quatro curvas granulométricas e dois tipos agregados (areia natural quartzosa e artificial britada gnaisse).

5.2 Materiais

5.2.1 Cimento

O cimento utilizado nos experimentos foi o Cimento Portland CP II-E-32, fabricado pela HOLCIM do Brasil S.A. As características físicas e químicas desse material foram fornecidas pelo fabricante e estão descritas no ANEXO 1.

5.2.2 Cal

Foi utilizada Cal Hidratada, tipo CH I, fabricada pela ICAL Indústria de Calcinação Ltda na produção das argamassas. A composição química desse material foi fornecida pelo fabricante e está descrita no ANEXO 2.

5.2.3 Agregado

Foram utilizados agregado miúdo natural quartzoso e artificial de britagem de gnaisse, ambos provenientes da região metropolitana de Belo Horizonte.

O ensaios de Difração de Raios-X e Eflorescência de Raios-X apresentam os compostos minerais para o agregado natural: quartzo (SiO_2 ; trigonal) de forma abundante, ortoclásio ($\text{Na}_{0,8}\text{Ca}_{0,2}\text{Al}_{1,2}\text{Si}_{2,8}\text{O}_8$; triclínico) com percentual médio-baixo, albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; triclínico) com índice baixo, caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$; monoclínico) com teor baixo, ferro-hornblenda

$(Ca_2Fe^{2+}_4Al_{0.75}Fe^{3+}_{0.25}(Si_7AlO_{22})(OH)_2$; monoclinico) baixo, goethita ($FeO(OH)$, ortorrômbico) baixo-traço.

A areia artificial apresentou nos ensaios de Difração de Raios-X e Eflorescência de Raios-X os composto minerais: Oligoclásio (feldspato: $Na_{0.8}Ca_{0.2}Al_{1.2}Si_{2.8}O_8$; triclinico) de forma abundante, quartzo (SiO_2 ; trigonal) com percentual médio, Ferro-hornblenda (anfíbólio: $Ca_2Fe^{2+}_4Al_{0.75}Fe^{3+}_{0.25}(Si_7AlO_{22})(OH)_2$; monoclinico) com percentual médio-baixo, biotita (mica: $K(Mg,Fe^{2+})_3AlSi_3O_{10}(OH)_{1.75}F_{0.25}$; monoclinico) com percentual médio-baixo; chamosita (clorita: $Fe^{2+}_3Mg_{1.5}AlFe^{3+}_{0.5}Si_3AlO_{10}(OH)_8$; monoclinico) com teor baixo.

A caracterização dos agregados naturais e artificiais, suas distribuições granulométricas e dimensões máximas características estão expressas, respectivamente, nas Tabelas 20, 21 e 22. Apesar de composições mineralógicas semelhantes, o melhor arranjo cristalino dos minerais do agregado artificial de gnaiss confere maior massa específica real do que o agregado natural. As correspondentes curvas de distribuição granulométrica constam da Figura 8.

Tabela 20 – Características físicas da areia natural (AN)

Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003)				
PENEIRA – Abertura (mm)	% R. A. Curva 1	% R. A. Curva 2	% R. A. Curva 3	% R. A. Curva 4
4,8	3	0	0	0
2,4	15	20	27	0
1,2	25	36	82	0
0,6	45	49	96	76
0,3	75	88	99	94
0,15	93	90	100	99
0,075	100	92	100	100
<0,075	100	100	100	100
Diâmetro máximo (mm)	4,8	4,8	4,8	1,2
Módulo de finura	2,55	3,76	4,01	2,68
Massa específica real (kg/l)	2,590	2,590	2,590	2,590
Teor de argila (%)	Isento	Isento	Isento	Isento
Teor de material pulverulento(%)	0%	8%	0%	0%
Impureza orgânica (%)	<300p.p.m.	<300p.p.m.	<300p.p.m.	<300p.p.m.
Forma dos grãos	Arredondado	Arredondado	Arredondado	Arredondado

Referências normativas: Massa específica real (ABNT NBR NM 52: 2009)
 Massa específica unitária solta (ABNT NBR NM 45: 2006)
 Massa específica unitária compacta (ABNT NBR NM 45: 2006)
 Teor de argila (NBR 7218/2010)
 Teor de material pulverulento (ABNT NBR NM 46/2001)
 Impureza orgânica (ABNT NBR NM 49:2001)
 Absorção de água (ABNT NBR NM 30: 2000)
 R.A.: Retida acumulada

Tabela 21 – Características físicas da areia artificial (AA).

Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003)				
PENEIRA – Abertura (mm)	% R. A. Curva 1	% R. A. Curva 2	% R. A. Curva 3	% R. A. Curva 4
4,8	3	0	0	0
2,4	15	20	27	0
1,2	25	36	82	0
0,6	45	49	96	76
0,3	75	88	99	94
0,15	93	90	100	99
0,075	100	92	100	100
<0,075	100	100	100	100
Diâmetro máximo (mm)	4,8	4,8	4,8	1,2
Módulo de finura	2,55	3,76	4,01	2,68
Massa específica real (kg/l)	2,660	2,660	2,660	2,660
Teor de argila (%)	Isento	Isento	Isento	Isento
Teor de material pulverulento(%)	0%	8%	0%	0%
Impureza orgânica (%)	<300p.p.m.	<300p.p.m.	<300p.p.m.	<300p.p.m.
Forma dos grãos	Anguloso	Anguloso	Anguloso	Anguloso

Referências normativas: Massa específica real (ABNT NBR NM 52: 2009)
 Massa específica unitária solta (ABNT NBR NM 45: 2006)
 Massa específica unitária compacta (ABNT NBR NM 45: 2006)
 Teor de argila (NBR 7218/2010)
 Teor de material pulverulento (ABNT NBR NM 46/2001)
 Impureza orgânica (ABNT NBR NM 49:2001)
 Absorção de água (ABNT NBR NM 30: 2000)
 R.A.: Retida acumulada

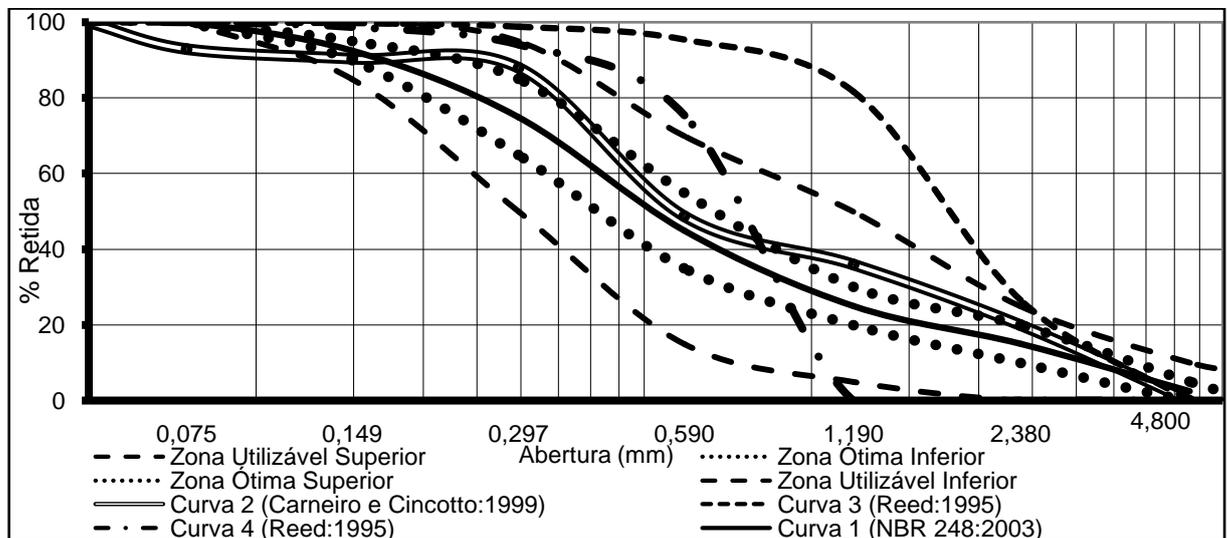


Figura 8 – Curvas de distribuição granulométrica.
 Fonte: Autora (2014)

Tabela 22 – Curvas granulométricas.

Curvas / Fonte	Dimensão Máx. Caract.
1: ABNT NBR 248:2003)	≤ 4,8 mm
2: Carneiro (1999)	< 4,8 mm
3: Reed (1995)	< 4,8 mm
4: Reed (1995)	< 1,2 mm

Fonte: Autora (2014).

As Figuras 9 e 10 ilustram a morfologia dos agregados naturais e artificiais obtidas através de lupa estereoscópica e de microscópio ótico.

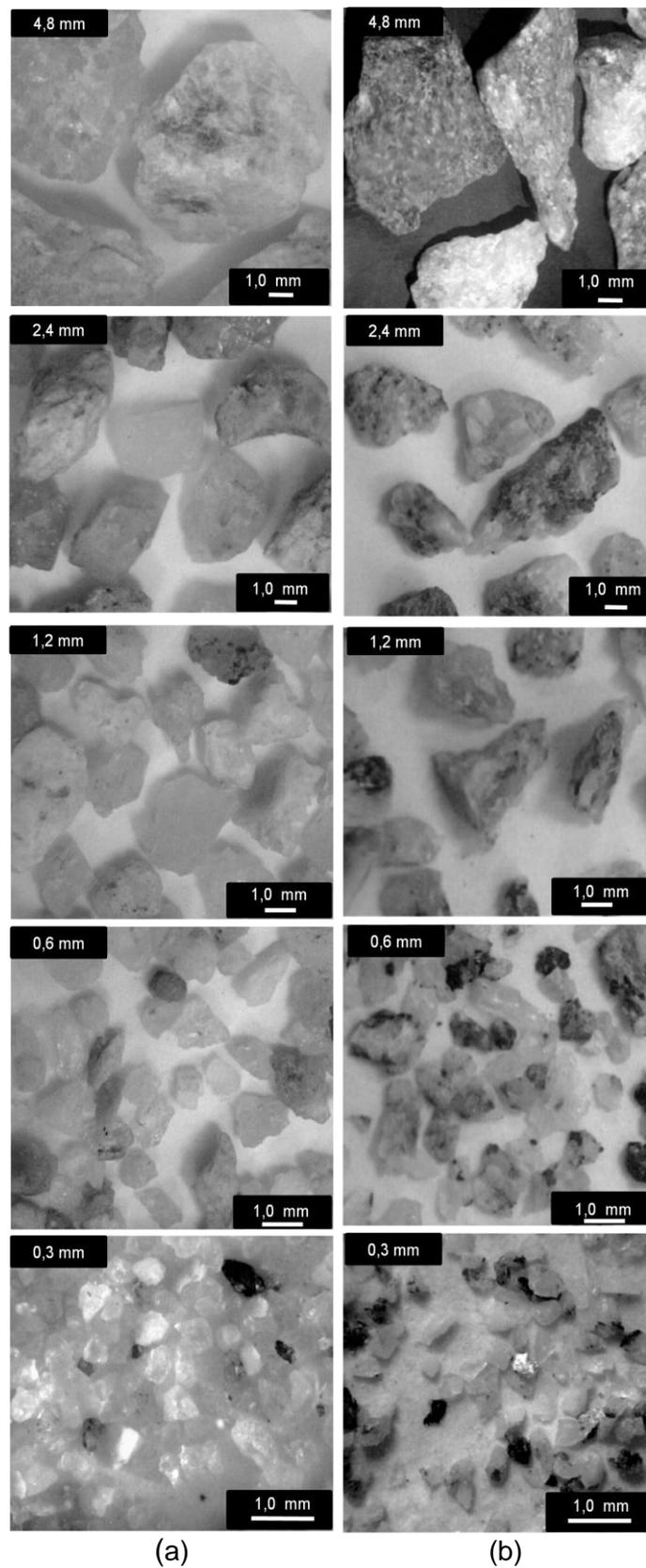


Figura 9 – Imagem da forma dos agregados naturais (a) artificiais (b) com lupa estereoscópica.

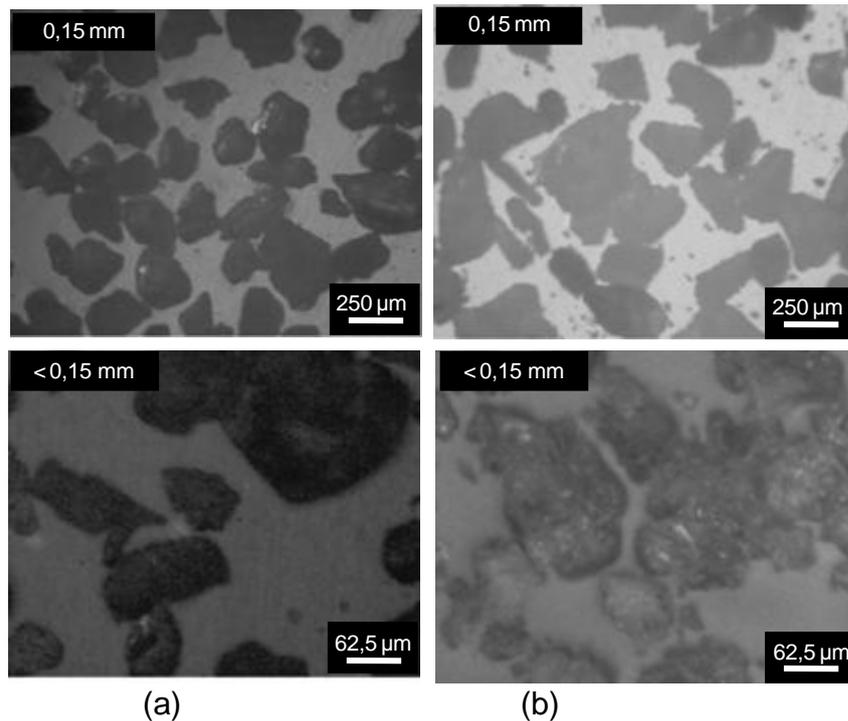


Figura 10 – Imagem da forma dos agregados em microscópio óptico (a) AN e (b) AA. Escalas: 0,15mm: 50x e <0,15mm: 200x
Fonte: Autora (2014).

5.2.4 *Curvas de Distribuição Consideradas nos experimentos*

Nesta pesquisa foram consideradas quatro curvas granulométricas. Uma curva da ABNT NBR NM 248: 2003, uma curva elaborada por Carneiro e Cincotto (1999) e duas curvas elaboradas por Reed (1995). Essas curvas são muito referenciadas bibliograficamente, possuem afinidades técnicas com os experimentos desenvolvidos e por esses motivos elas foram adotadas neste trabalho.

A distribuição granulométrica da ABNT NBR NM 248:2003 se refere ao ponto médio dos limites inferior e superior da zona ótima e está nomeada de Curva 1. A curva proposta por Carneiro e Cincotto (1999) está nomeada de Curva 2. O método de dosagem de argamassas proposto por Reed (1995) considera duas curvas e distribuição, nomeadas nesse trabalho de Curva 3 e de Curva 4.

5.2.5 Água

A água empregada na confecção das argamassas foi potável, proveniente da rede de distribuição de Belo Horizonte/MG e fornecida pela COPASA.

5.3 Programa Experimental

Objetivando produzir argamassas de revestimento de paredes e de tetos para avaliação de seu desempenho e indicativos de durabilidade, inicialmente, foram estudadas quatro composições granulométricas constantes em normatização brasileira e em bibliografias anteriormente descritas. Posteriormente foram confeccionados oito curvas de argamassa de revestimento (quatro com areia natural e quatro com areia artificial) compostas de cimento, cal e areia, baseadas no traço convencional em volume 1:1:6.

Cada uma das quatro curvas foi formulada com uma granulometria específica, conforme Tabelas 20 e 21 e Figura 8. A fim de atestar quais propriedades são influenciadas pela granulometria e/ou pela forma das partículas de agregados miúdos, foram consideradas na realização de ensaios as seguintes curvas: curva 1: ponto médio da zona ótima da ABNT NBR 248:2003; curva 2 (Carneiro e Cincotto:1999), curva 3 (Reed:1995) e curva 4 (Reed:1995). A composição do traço em massa foi baseado na traço em volume 1:1:6 para areia natural com definição do fator *a/c* para a curva 2 com areia natural. O fator *a/c* foi padronizado para todas as curvas. A Tabela 23 mostra o traço, padrão para todas as oito composições analisadas, transformado em massa.

Tabela 23 - Composição do traço.

Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Água (l)
1,000	0,294	5,824	1,090

Fonte: Autora (2014)

O programa experimental foi dividido em duas fases. A primeira corresponde à avaliação do empacotamento de partículas obtido através de ensaio de massas unitárias soltas, considerando dez faixas granulométricas e diversas aberturas de peneira. Na segunda fase, foi feita análise das argamassas produzidas com materiais que apresentam distribuição granular segundo quatro tipos de curvas

granulométricas anteriormente citadas. Tais curvas foram formuladas com areia natural (grãos mais arredondados) e com areia artificial (grãos mais angulosos) e as argamassas produzidas possibilitaram verificar as variações das propriedades mecânicas, além de indicativos de durabilidade em função da forma do agregado miúdo e de sua distribuição granulométrica. As propriedades analisadas estão descritas na Tabela 24.

Tabela 24 – Relação de ensaios realizados.

Ensaios	Idades (dias)
Consistência <i>Flow Table</i> – ABNT NBR 13276:2005.	0
Densidade de massa e do teor de ar incorporado na argamassa fresca – ABNT NBR 13.278:2005.	0
Resistência à compressão axial – ABNT NBR 13279:2005.	7, 21, 28
Resistência à tração na flexão – ABNT NBR 13279:2005.	7, 21, 28
Módulo de elasticidade dinâmico pelo ultrassom – ABNT NBR 15630:2009.	28
Resistência potencial de aderência à tração – ABNT NBR 13528:2010.	90
Densidade de massa no estado endurecido – ABNT NBR 13280:2005.	7, 21, 28
Porosidade - ABNT NBR NM 45:2006	28
Análise micro-estrutural através de lupa estereoscópica e de microscópio óptico	28
Absorção de água por imersão. ABNT NBR 9778:2009	28
Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade. ABNT NBR 15259:2005	28

Fonte: Autora (2014).

A seguir são apresentados os detalhamentos dos ensaios que foram realizados para a obtenção dos objetivos propostos.

5.3.1 Consistência

O ensaio de consistência realizado através da mesa de consistência (*Flow Table*) é normatizado pela ABNT NBR 13276:2005 e é válido para consistência plástica. As etapas de execução do ensaio de consistência na mesa de espalhamento estão demonstradas nas Figuras 11 (a), (b) e (c).

O valor da consistência foi obtido mediante cálculo da média aritmética de três aferições do diâmetro espalhado, após a devida aplicação de golpes através de manivela da mesa de espalhamento.



Figura 11 – Mesa de espalhamento para o ensaio de consistência.
Fonte: Autora (2014).

5.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado da argamassa fresca

O ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado é realizado através da determinação da massa específica das argamassas conforme determinações da norma da ABNT NBR 13278:2005. As etapas executivas do ensaio estão representadas nas Figuras 12 (a) compactação em camadas, (b) preenchimento do cilindro e (c) peso do cilindro cheio de argamassa. Seu cálculo pode ser obtido através da Equação 6.

$$dm = \frac{m_c - m_v}{V_r} \quad (6)$$

Onde: **dm** = Densidade de massa da argamassa fresca (g/cm^3);

m_c = Massa do recipiente e da argamassa de ensaio (g);

m_v = Massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

V_r =Volume do recipiente cilíndrico (cm^3).

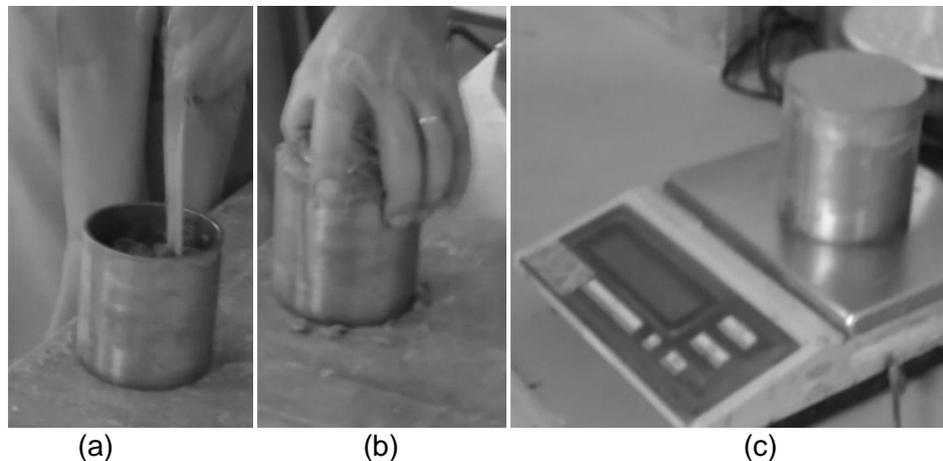


Figura 12 – Execução do ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.
Fonte: Autora (2014).

O teor de ar incorporado é obtido através da Equação 7:

$$Ar = 100 \left(1 - \frac{dm}{d_t}\right) \quad (7)$$

Onde: **Ar** = Teor de ar incorporado na argamassa no estado fresco (%);
dm = Densidade de massa da argamassa no estado fresco (g/cm³);
d_t = Densidade de massa teórica da argamassa (g/cm³).

A densidade de massa teórica é obtida através da Equação 8:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (8)$$

Onde: **d_t** = Densidade de massa teórica da argamassa (g/cm³);
m_i = Massa de cada componente da argamassa (g);
γ_i = Massa específica de cada componente da argamassa (g/cm³).

5.3.3 Resistência à compressão axial - f_c

O ensaio para aferição da resistência à compressão (f_c), realizado nas idades de 7, 21 e 28 dias com a prensa da Contenco, cuja carga máxima é de 5 toneladas força e precisão de 1 kgf, é normatizado pela ABNT NBR 13.279:2005 e está representado pelas Figuras 13 (a) posicionamento do corpo de prova na prensa e (b) rompimento do corpo de prova.

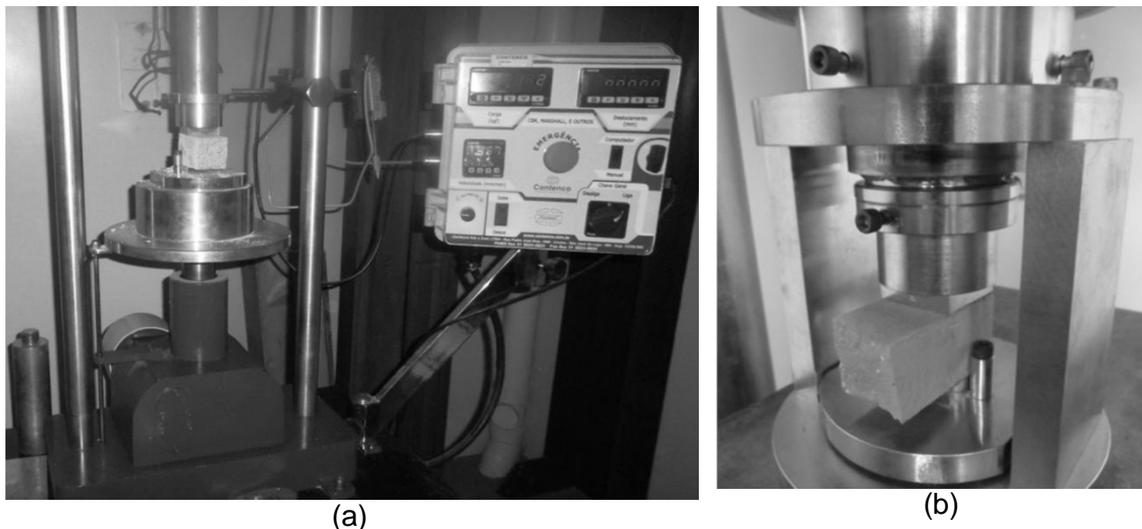


Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão axial.
 Fonte: Autora (2014).

O valor da resistência à compressão pode ser obtido através da Equação 9:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (9)$$

Onde: f_c = Resistência à compressão axial (MPa);

F = Força máxima obtida no ensaio (N);

A = Área da seção transversal do corpo de prova (mm^2).

5.3.4 Resistência à tração na flexão - f_t

Toda argamassa de revestimento está sujeita às tensões de tração e sua aferição foi feita através dos critérios da ABNT NBR 13279:2005 e com utilização da prensa Contenco de carga máxima de 5 toneladas força e precisão de 1 kgf. O ensaio foi executado nas idades de 7, 21 e 28 dias. As figuras 14 (a) Prensa Contenco, (b) moldagem dos corpos de prova e (c) rompimento mostram as etapas do ensaio.

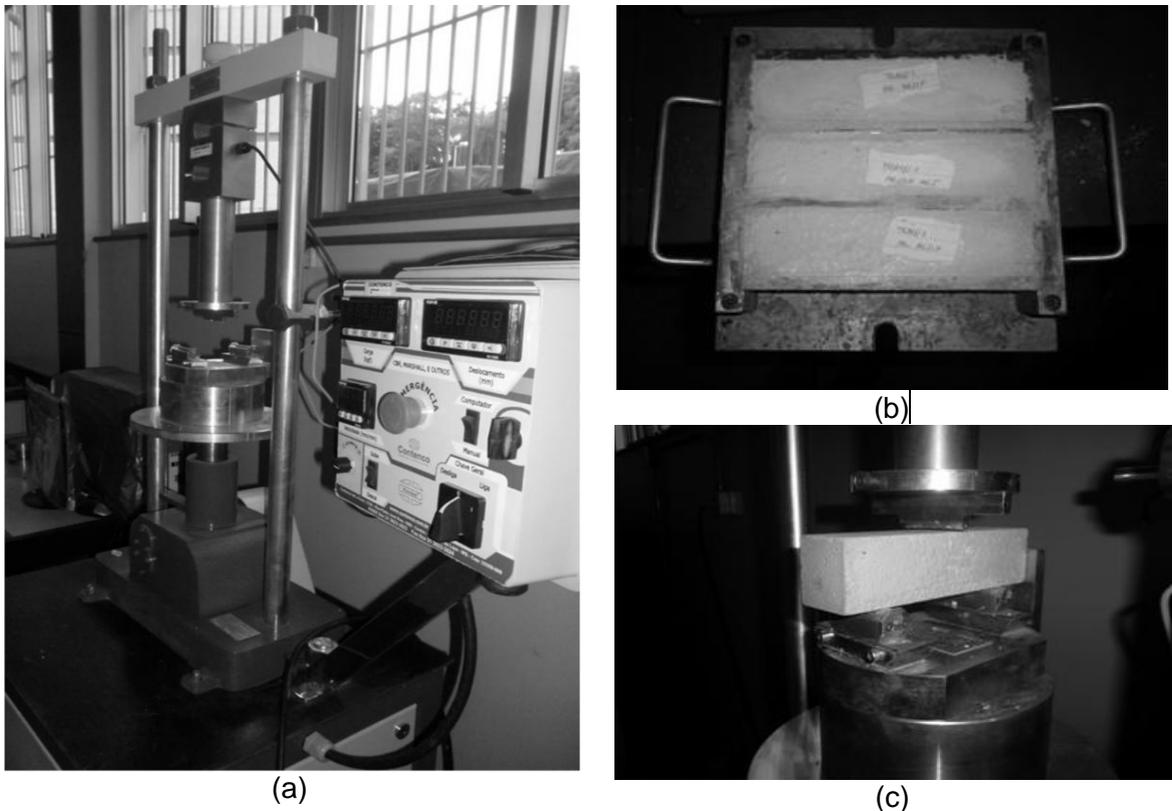


Figura 14 – Montagem e realização do ensaio de resistência à tração na flexão
Fonte: Autora (2014)

A resistência à tração na flexão pode ser obtida através da Equação 10.

$$f_t = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (10)$$

Onde: f_t = Resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = Força máxima obtida no ensaio (N);

L = Distância entre os suportes (mm).

5.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi determinado pelo método ultrassônico de acordo com a norma BS-1881 Part 203 e ABNT NM 58:1996, utilizando o equipamento TICO da PROCEQ com frequência de 54 KHz, conforme mostram as Figuras 15 (a) equipamento e (b) leitura do tempo decorrido desde a emissão da onda ultrassônica que percorre o comprimento do corpo de prova e a sua recepção.



(a)



(b)

Figura 15 – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

O valor módulo de elasticidade dinâmico pode ser calculado através da Equação 11.

$$E_d = \gamma \cdot V^2 \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{1-\nu} \quad (11)$$

Onde: E_d = módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

γ = densidade de massa no estado endurecido (em kg/m³);

V = velocidade com que a onda ultrassônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal (em km/s);

ν = coeficiente de Poisson.

A velocidade de propagação de ondas é determinada pela Equação 12.

$$V = \frac{L'}{t} \quad (12)$$

Onde: V = velocidade de propagação (km/s);

L' = distância entre os pontos de acoplamento centrais das faces transdutores (km);

t = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).

5.3.6 Resistência potencial de aderência à tração

A norma ABNT NBR 13528:2010 prescreve o ensaio de resistência potencial de aderência à tração e sua aferição é obtida pela carga de ruptura obtida através da Equação 13.

$$Ra = \frac{P'}{A_1} \quad (13)$$

Onde: Ra = Resistência de aderência à tração, em MPa;

P' = Carga de ruptura, em N;

A_1 = Área da pastilha, em mm².

O ensaio, que foi realizado através do aparelho Dyna Proceq, Haftprüfer Z16, além de suas etapas executivas estão apresentados através das Figuras 16 (a) corte do revestimento argamassado, (b) colagem da pastilha, (c) aplicação da carga, (d) e (d), (e) e (f) tipos de ruptura.

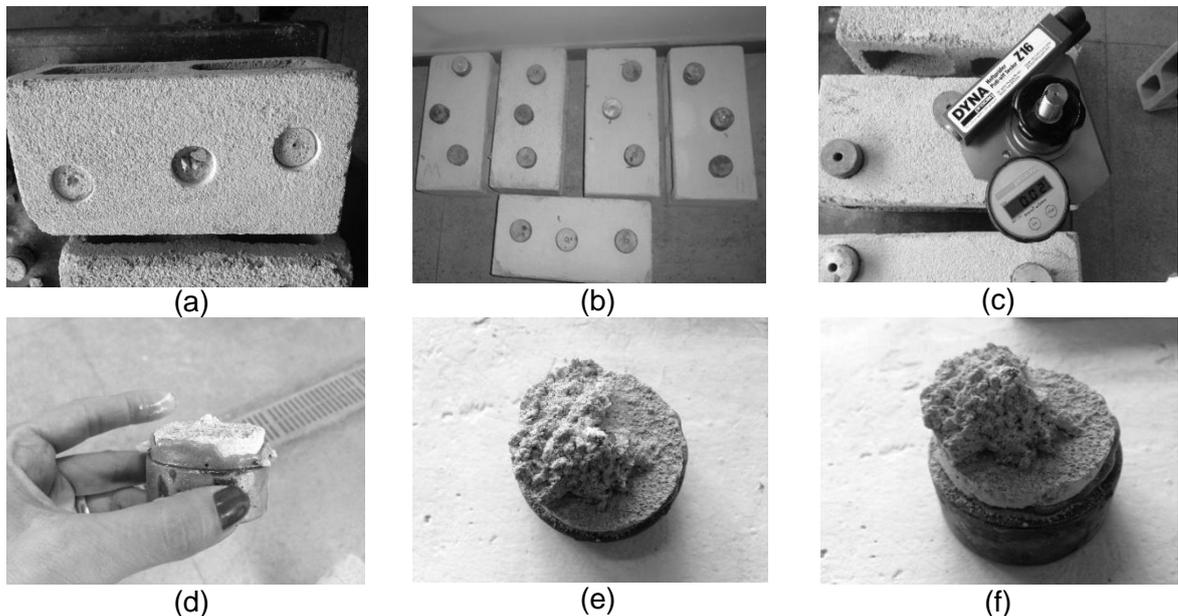


Figura 16 – Ensaio de Resistência de Aderência à Tração: (a) corte do revestimento argamassado; (b) colagem da pastilha; (c) aplicação da carga; (d) tipo de ruptura 1; (e) tipo de ruptura 2; (f) tipo de ruptura 3

Fonte: Autora (2004)

5.3.7 Densidade de massa no estado endurecido

A norma ABNT NBR 13280:2005 prescreve o ensaio de determinação de densidade de massa no estado endurecido, cuja definição é a relação entre a massa e o volume aparente da argamassa. As Figuras 17 (a), (b) e (c) representam as fases executivas do ensaio.

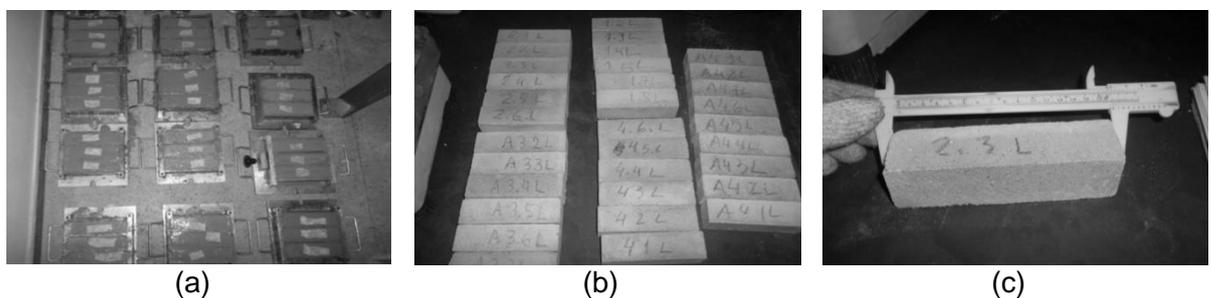


Figura 17 – Ilustração da determinação da densidade de massa no estado endurecido: (a) Moldagem dos corpos de prova; (b) Corpos de prova desmoldados; (c) Aferição do comprimento

Fonte: Autora (2014)

5.3.8 Absorção de água por imersão e porosidade

O ensaio de absorção de água por imersão é normatizado pela norma ABNT NBR 9778:2009 e indica a capacidade máxima de absorção de água da argamassa. O valor é obtido através da Equação 14.

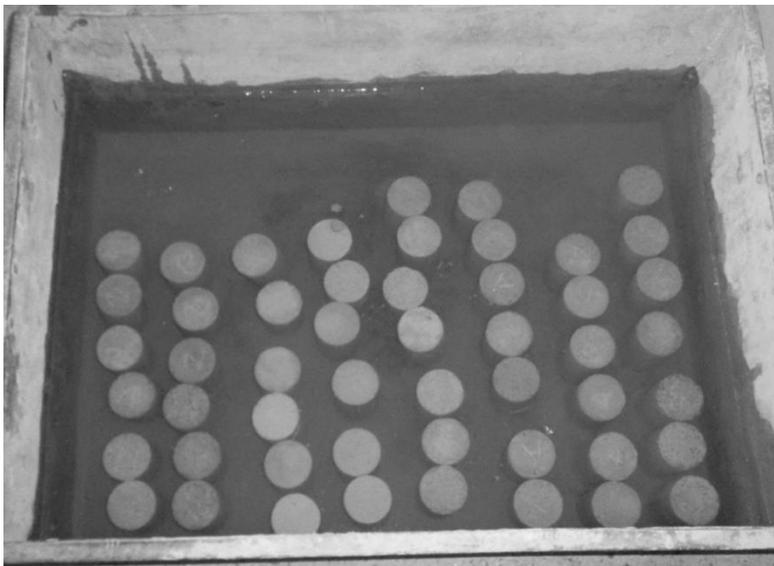
$$A_i = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad (14)$$

Onde: A_i = absorção de água por imersão (%);

M_{sat} = massa do corpo de prova que ficou imerso em água com superfície seca(g);

M_{seca} = massa do corpo de prova seco (g).

O ensaio de absorção por imersão e o de massa específica estão representados pelas Figuras 18 (a) e (b) nas quais são mostrados respectivamente os corpos de provas imersos em água, a balança com o cesto e a pesagem do corpo submerso em água.



(a)



(b)

Figura 18 – Ensaio de absorção por imersão e massa específica.

Fonte: Autora (2014)

Foi utilizado o procedimento de medir a quantidade da água absorvida no corpo de prova descrito pela ABNT NM 45:2006 para definir a porosidade das

argamassas. O valor da porosidade superficial pode ser obtido através da Equação 15.

$$P = \frac{M_{sat} - M_{seco}}{M_{seco} - M_{sub}} \quad (15)$$

Onde: P = Porosidade (%);

M_{seca} = Massa do corpo de prova seco (g);

M_{sat} = Massa do corpo de prova úmido com superfície seca(g);

M_{sub} = Massa do corpo de prova submerso em água (g);

M_{seca} = Massa do corpo de prova seco (g);

M_{sub} = Massa do corpo de prova submerso em água (g).

5.3.9 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade está prescrito na norma ABNT NBR 15259:2005, e seu cálculo, em g/cm², é obtido através da Equação 16:

$$A_c = \frac{A_2 - B}{S} \times 100 \quad (16)$$

Onde: A_c = absorção de água por capilaridade (%);

A_2 = massa do CP com uma das faces em contato com a água (g);

B = massa do corpo de prova seco (g);

S = área da seção transversal (cm²).

O citado ensaio está representado pelas Figuras 19 (a) e (b).

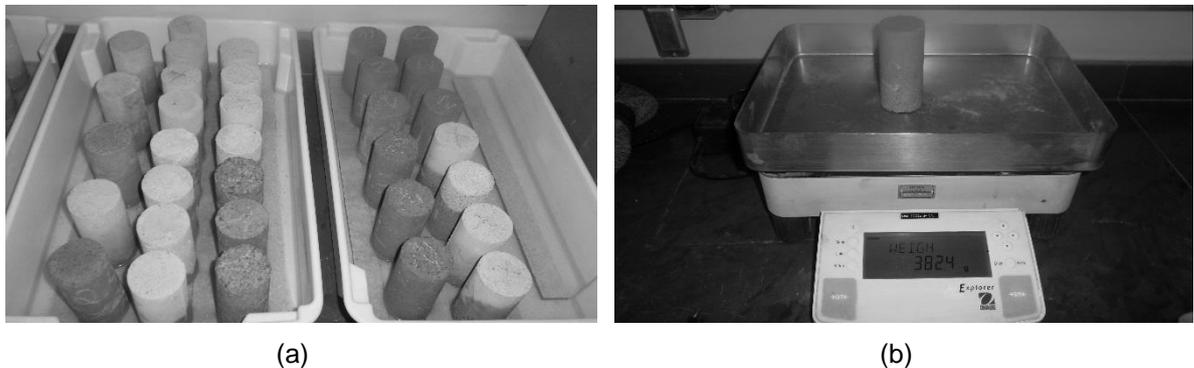


Figura 19 – Ensaio de absorção de água por capilaridade. CP (a) e pesagem (b).
Fonte: Autora (2014).

Através da Equação 17, é obtido o coeficiente de capilaridade.

$$C = M_{90} - M_{10} \quad (17)$$

Onde: C = Coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$);

M_{90} = Massa do corpo de prova, após 90min de imersão em água (g);

M_{10} = Massa do corpo de prova, após 10min de imersão em água (g).

5.3.10 Análise microestrutural através de lupa estereoscópica e de microscópio óptico

A distribuição dos poros das argamassas, a interface pasta agregado e a dimensão dos poros foram avaliadas visualmente através de lupa estereoscópica e de microscópio óptico.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise do empacotamento de partículas pelas curvas granulométricas

Objetivando verificar a variação do empacotamento das partículas de agregado nas variadas curvas granulométricas, foi aferida a massa unitária solta da areia natural e da areia britada. A areia natural quartzosa utilizada possui massa específica real de 2,59 kg/l e a areia artificial, gnaisse, possui massa específica real de 2,66 kg/l e ambas obtidas pelo Frasco de Chapman. Os valores de massa unitária solta para cada faixa granulométrica e para cada peneira separadamente estão mostradas nos Gráficos 1 a 4.

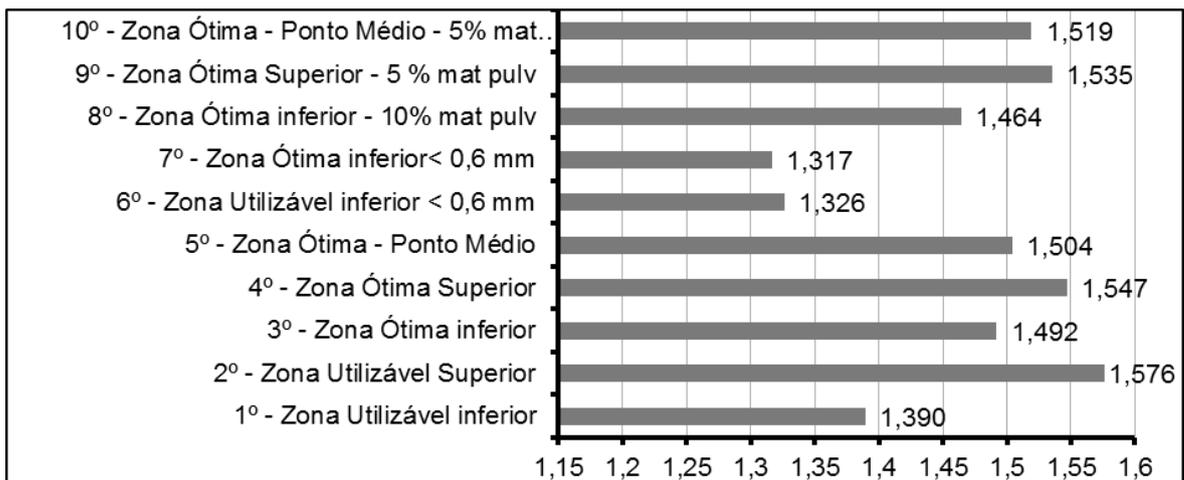


Gráfico 1 - Massa unitária solta da AN (kg/l) - faixas granulométricas.

Fonte: Autora (2014)

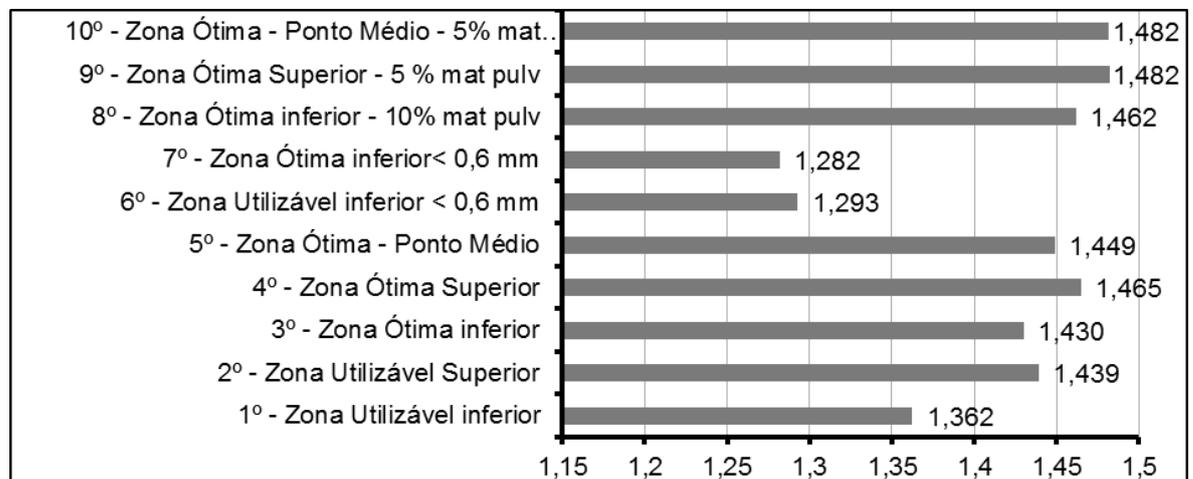


Gráfico 2 - Massa unitária solta da AA (kg/l) - faixas granulométricas.

Fonte: Autora (2014)

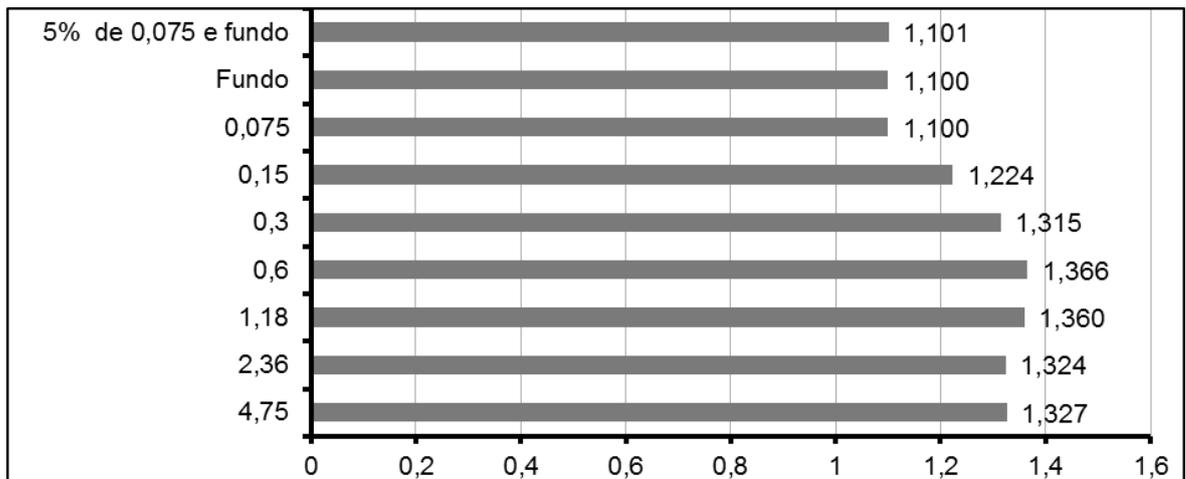


Gráfico 3 - Massa unitária solta da AN (kg/l) - peneiras.

Fonte: Autora (2014)

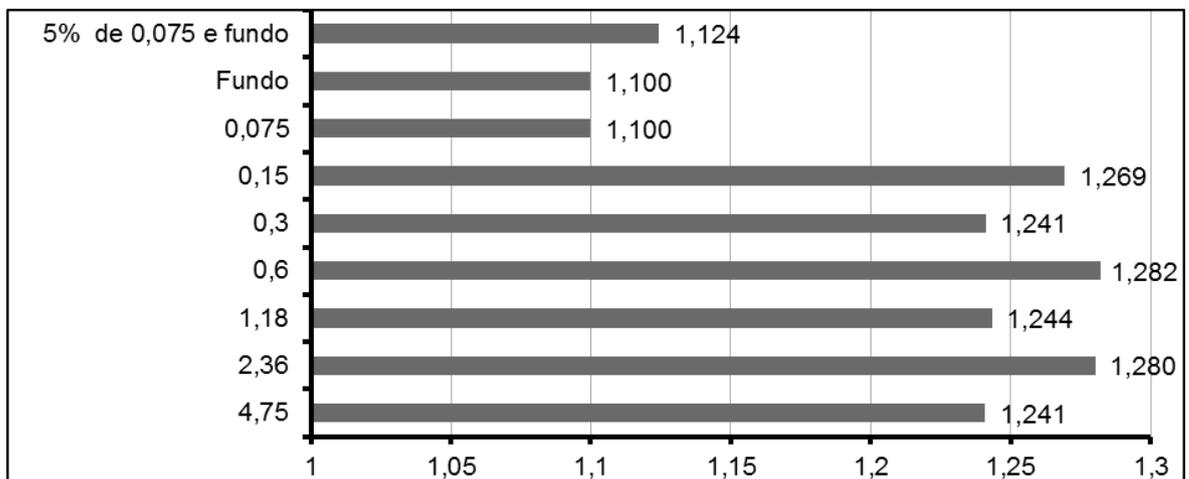


Gráfico 4 - Massa unitária solta da AA (kg/l) - peneiras.

Fonte: Autora (2014)

Houve consideração da ABNT NBR NM 248:2003 tanto para valores encontrados para faixas granulométricas quanto para seus pontos médios, além da granulometria de interesse para argamassa de revestimento (diâmetro menor do que 6 mm).

Foi possível constatar que apesar de a massa específica real ser maior na areia artificial do que na areia natural, o formato irregular das partículas impediu que elas se encostassem mais, gerando maior teor de vazios e redução do valor da massa unitária. Conseqüentemente, haverá maior consumo de aglomerante para o preenchimento destes vazios.

O coeficiente de vazios é obtido em função das massas específicas unitárias e reais (Equação 18). Através dessa equação, foram elaborados os Gráficos 5 a 8 que mostram o volume de vazios deixados pelos agregados.

$$C_v = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_t - V_c}{V_t} = 1 - \frac{V_c}{V_t} = 1 - \frac{m/\gamma_r}{m/\gamma_u} = 1 - \frac{\gamma_u}{\gamma_r} \quad (18)$$

Onde: C_v = Coeficiente de vazios;

V_v = Volume de vazios;

V_t = Volume total;

V_c = Volume de cheios;

m = Massa de material;

γ_r = Massa específica real;

γ_u = Massa específica unitária.

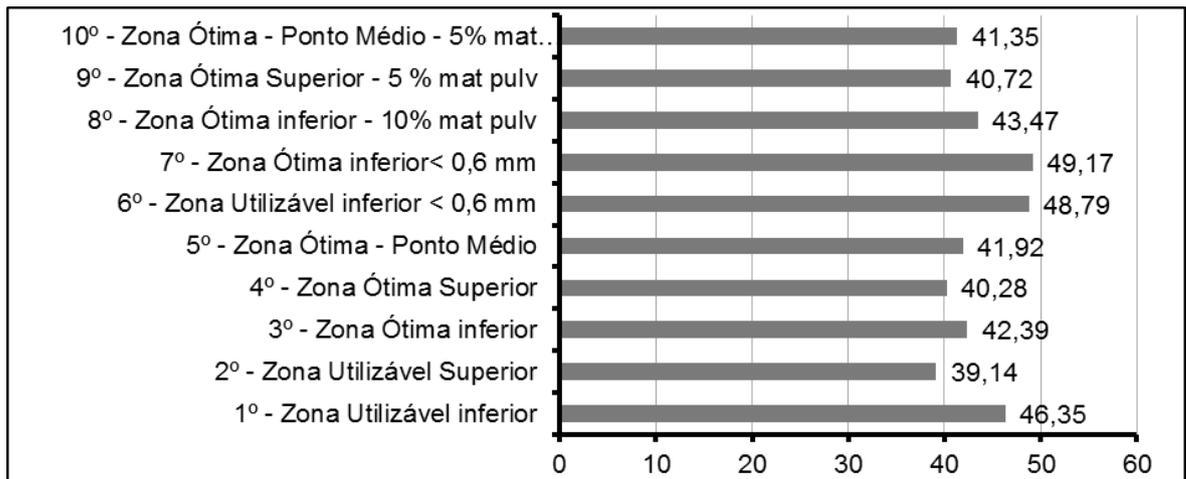


Gráfico 5 - Coeficiente de vazios (%) - AN - faixas granulométricas.

Fonte: Autora (2014)

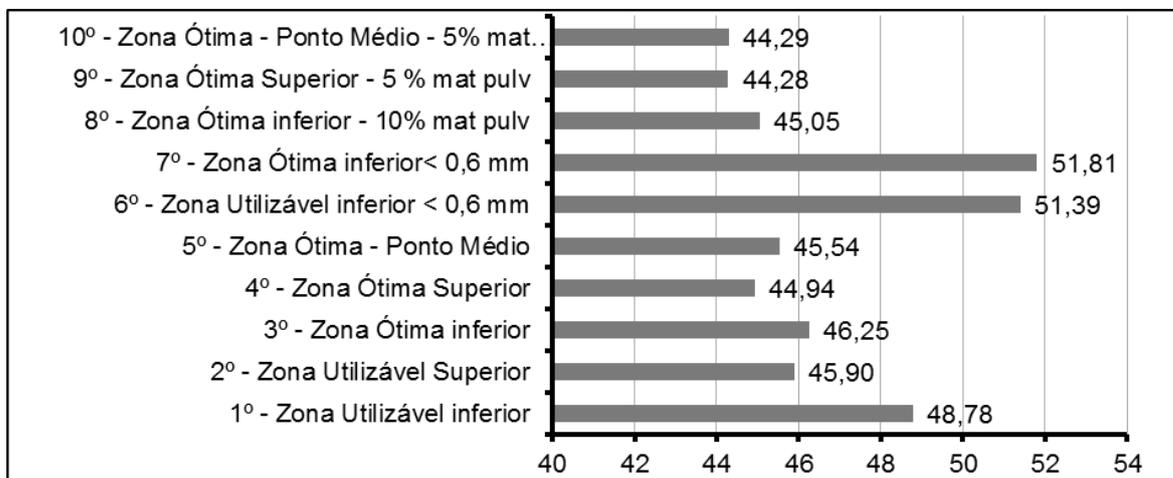


Gráfico 6 - Coeficiente de vazios (%) - AA - faixas granulométricas.

Fonte: Autora (2014)

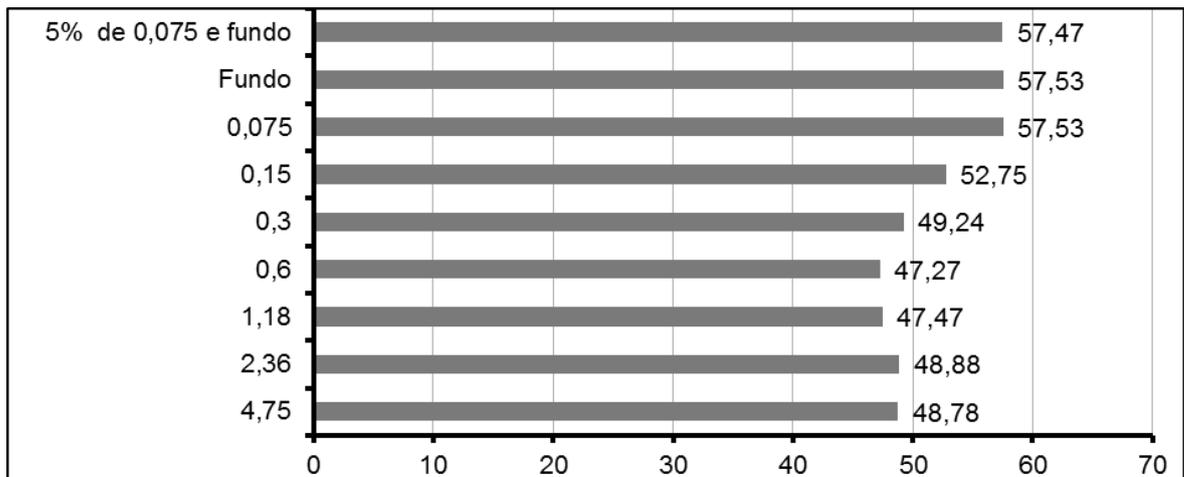


Gráfico 7 - Coeficiente de vazios (%) - AN - peneiras.

Fonte: Autora (2014)

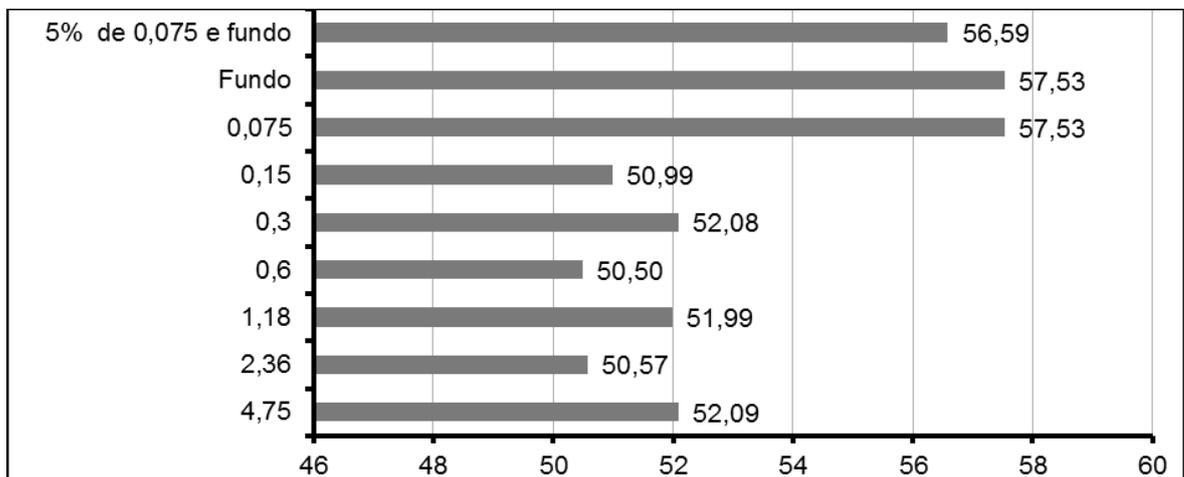


Gráfico 8 - Coeficiente de vazios (%) - AA - peneiras.

Fonte: Autora (2014)

Os resultados do ensaio de massa unitária solta mostraram que as distribuições granulométricas que possuem grãos maiores (limite superior) apresentam maior compactação, e, portanto, menor coeficiente de vazios, proporcionando um melhor empacotamento de partículas. Os agregados de maior diâmetro ($\geq 0,6\text{mm}$) apresentaram maior massa unitária. Logo, a produção de argamassas de reboco, cuja prática usual nas obras considera agregados com granulometria abaixo da peneira 0,6 mm, produz maior coeficiente de vazios, necessitando de maior quantidade de aglomerante para preenchê-los.

Portanto, foi atestado que a forma irregular e angulosa da areia artificial impede o empacotamento dos grãos, originando vazios, reduzindo a massa unitária e, conseqüentemente, criando demanda de maior consumo de aglomerante para

preenchimento. Com a determinação de curvas granulométricas adequadas, com diâmetros que possibilitem maiores massas unitárias, será possível produzir argamassas com melhor desempenho, mais resistentes, menos porosas e mais duráveis.

6.2 Análise das propriedades das argamassas

6.2.1 Ensaio de consistência

O ensaio de consistência foi realizado conforme norma ABNT NBR 13276:2005 e os resultados estão apresentados no Gráfico 9 e na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios consistência - *Flow Table*.

<i>Areia</i>	<i>Curvas</i>	<i>Consistência (mm)</i>
Areia Natural	1 (NBR 248:2003)	290
	2 (Carneiro e Cincotto)	290
	3 (Reed)	320
	4 (Reed)	250
Areia Artificial	1 (NBR 248:2003)	280
	2 (Carneiro e Cincotto)	310
	3 (Reed)	310
	4 (Reed)	280

Fonte: Autora (2014)

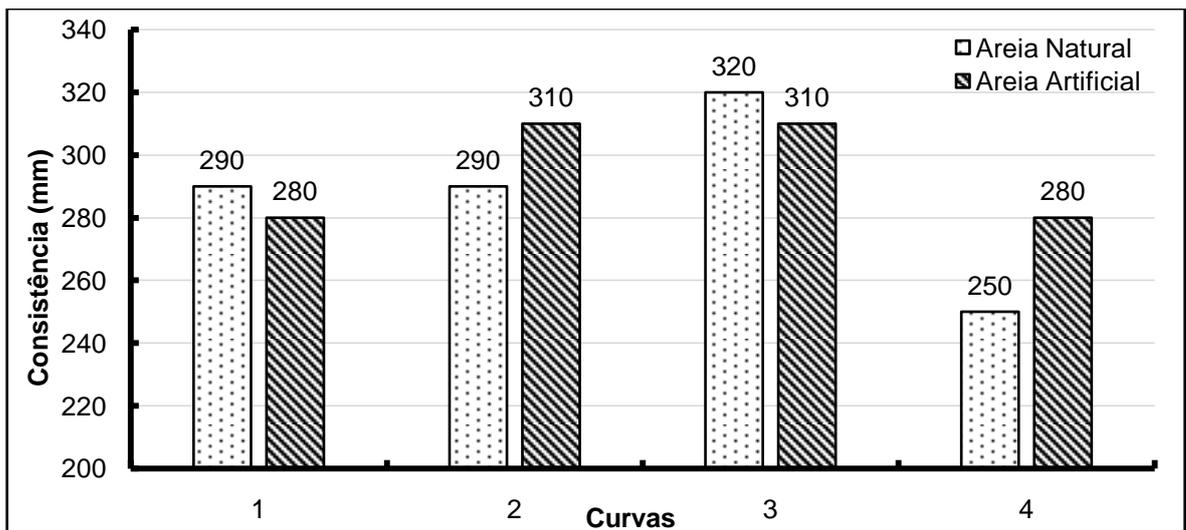


Gráfico 9 - Resultados dos ensaios de consistência das areias natural e artificial

Fonte: Autora (2014)

Para verificar se a diferença do valor da consistência entre as curvas foi significativa, foi realizado o Teste *t*, cujos resultados estão na Tabela 26.

Tabela 26 – Teste *t* para os resultado da consistência

Areia Natural	Teste <i>t</i>	Areia Artificial	Teste <i>t</i>	AA x AN	Teste <i>t</i>
AN1-AN2	**	AA1-AA2	**	AN1-AA1	**
AN1-AN3	**	AA1-AA3	**	AN2-AA2	**
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	**
AN2-AN3	**	AA2-AA3	**	AN4-AA4	*
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

Analisando as Tabelas 25 e 26 e o Gráfico 9, é possível constatar que as curvas com areia natural e areia artificial não apresentaram grandes variações nos resultados de consistência. No geral, os maiores valores foram obtidos através da curva 3 e os menores através da curva 4, sendo que a maior variação em função da forma do agregado foi obtida com da curva 4 (12% a mais para a areia artificial) e a menor variação foi obtida com as curvas 1 e 3 (3% a menos para a areia artificial).

A curva 1 possui distribuição granulométrica do tipo contínua, que favorece a consistência, mas é a única curva que possui granulometria 4,8mm. Os grãos da areia artificial possuem forma mais irregular do que os grãos da areia natural. Diante das Figuras 9 e 10, é possível notar que essa diferença de forma foi mais evidente na granulometria 4,8mm do que nas demais granulometrias. Tal fato contribuiu para reduzir a consistência da curva 1 com AA, uma vez que as arestas dificultaram o arranjo granular. Essa curva possui o menor módulo de finura de todas as curvas (2,55), o que criou maior demanda de água de amassamento devido à maior superfície específica. Como o fator *a/c* foi constante para todas as curvas, a água não foi totalmente adequada para envolver todos os grãos e reduziu a consistência. Além disso, a demanda de água do grão artificial, para uma mesma granulometria, é maior pois sua superfície fraturada absorve parte da água disponível, justificando a menor consistência da curva 1 com AA em relação à curva 1 com AN. E, durante os experimentos, foi possível observar que tal curva proporcionou uma argamassa bastante áspera.

A granulometria fundo presente na curva 2 aumentou a viscosidade da pasta e contribuiu para aumento da consistência, principalmente na curva AA2, que,

apesar de possuir grãos com arestas, possui grande quantidade de material mais fino devido ao processo de produção - britagem - do grão artificial (Figura 10), os quais reduziram o atrito grão a grão, melhoraram o arranjo granular e favoreceram a consistência, justificando o aumento dessa propriedade na curva AA2 em relação a curva AN2. A curva 2 apresenta distribuição granulométrica semelhante à da curva 1, mas não possui \varnothing 4,8mm, cujas angulosidades reduziriam a consistência.

A curva 3 é a que contém maior quantidade de grãos grosseiros, com o maior módulo de finura (4,01) de todas as curvas. Os agregados de maior diâmetro possuem superfície específica menor e, conseqüentemente, apresentam menor demanda de água de amassamento. Como a quantidade de água utilizada foi constante a todas as curvas, nessa dosagem a água foi superior à quantidade necessária, contribuindo para a produção de uma argamassa muito fluida e aumentando a consistência. Além disso, a distribuição granulométrica apresenta certa descontinuidade, em que a falta de determinados diâmetros reduziu o atrito grão a grão, aumentou a mobilidade granular e favoreceu a consistência. Essa curva apresentou os maiores valores de consistência e a redução do valor dessa propriedade para AA3 se justifica pelo aumento do atrito grão a grão e redução da mobilidade granular proporcionados pelas arestas da AA.

A curva 4 apresenta distribuição granulométrica tendente à uniformidade, com presença de pouca variedade de diâmetros, o que prejudicou o rolamento dos grãos, deixou o sistema granular enrijecido e reduziu a consistência tanto da AN quanto da AA. As arestas dos grãos artificiais serviram para reduzir o enrijecimento do sistema provocado pela distribuição uniforme e o material pulverulento aumentou a viscosidade da pasta, convergindo para aumento da consistência da curva AA4.

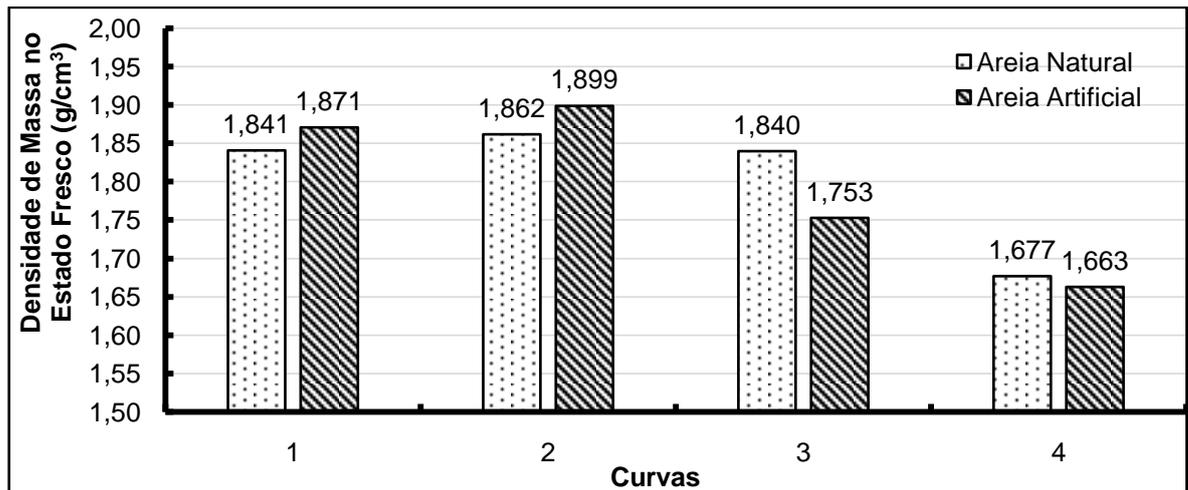
6.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado da argamassa fresca

Os resultados dos ensaios de massa específica no estado fresco e teor de ar incorporado da argamassa fresca são apresentados na Tabela 27 e nos Gráficos 10 e 11.

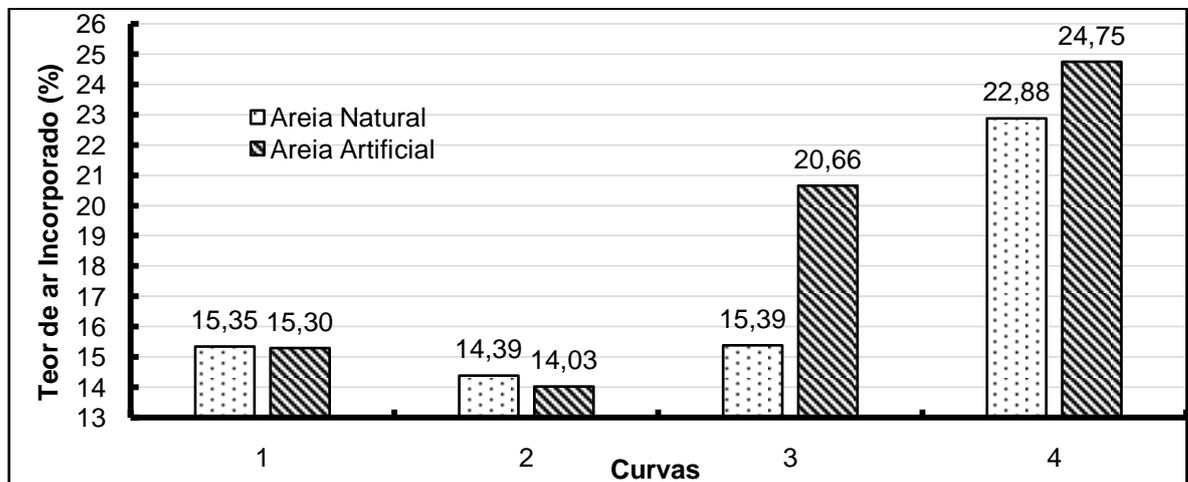
Tabela 27 - Teor de ar Incorporado e massa específica fresca.

Curvas	Teor de Ar Incorporado(%)		Densidade de Massa (g/cm ³)	
	Areia Natural	Areia Artificial	Areia Natural	Areia Artificial
1 (NBR 248:2003)	15,35	15,30	1,841	1,871
2 (Carneiro e Cincotto)	14,39	14,03	1,862	1,899
3 (Reed)	15,39	20,66	1,840	1,753
4 (Reed)	22,88	24,75	1,677	1,663

Fonte: Autora (2014)

**Gráfico 10** - Massa específica fresca das curvas com areias natural e artificial

Fonte: Autora (2014)

**Gráfico 11** - Teor de ar incorporado das curvas com areias natural e artificial

Fonte: Autora (2014)

O Teste t, cujos resultados estão respectivamente nas Tabelas 28 e 29, mostrou que, estatisticamente, a influência da forma dos agregados não foi muito expressiva nestas propriedades, mas a variação da distribuição granulométrica conferiu maior variação aos valores.

Tabela 28 – Teste *t* para os resultado de teor de ar incorporado

Areia Natural	Teste <i>t</i>	Areia Artificial	Teste <i>t</i>	AA x AN	Teste <i>t</i>
AN1-AN2	**	AA1-AA2	**	AN1-AA1	**
AN1-AN3	**	AA1-AA3	*	AN2-AA2	**
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	*
AN2-AN3	*	AA2-AA3	*	AN4-AA4	**
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

Tabela 29 – Teste *t* para os resultados de massa específica fresca

Areia Natural	Teste <i>t</i>	Areia Artificial	Teste <i>t</i>	AA x AN	Teste <i>t</i>
AN1-AN2	**	AA1-AA2	**	AN1-AA1	**
AN1-AN3	**	AA1-AA3	*	AN2-AA2	**
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	*
AN2-AN3	*	AA2-AA3	*	AN4-AA4	**
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

As curvas que apresentam características de distribuição contínua (1 e 2) conferiram melhor arranjo dos grãos, menor teor de ar incorporado e, conseqüentemente, maior densidade de massa às argamassas.

A curva 3 apresenta descontinuidade em sua distribuição, possui maior quantidade de areia grossa/média e pouca quantidade de areia fina, o que gerou empacotamento das partículas insatisfatório, principalmente na areia artificial, em que as arestas dos grãos artificiais prejudicaram ainda mais o arranjo entre os diferentes tamanhos dos agregados, causando aumento de 35% no teor de ar incorporado na curva AA3 quando comparada à curva AA1.

A curva 4 apresentou os resultados mais baixos, possibilitando inferir que a uniformidade de uma distribuição granulométrica contribui negativamente para o arranjo granular. A pouca variedade de diâmetros piorou o empacotamento e criou grandes espaços vazios, principalmente para AA4, reduzindo a massa específica fresca. Além disso, nas curvas AA3 e AA4 há a presença de material mais fino, apresentando maior quantidade total de finos (cimento + material

pulverulento) e tornando a fase matriz (cimento + pulverulento + água) mais viscosa e, portanto, com maior tendência a reter mais ar durante o amassamento.

De acordo com os critérios de classificação da densidade de massa no estado fresco da ABNT NBR 13281:2005, todas as curvas estão classificadas como D5 e D4, logo possuem densidades altas e médias.

Visando à verificação da relação entre a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar incorporado foi estruturado o Gráfico 12, onde é possível constatar uma relação de proporcionalidade indireta nessas duas propriedades, de forma que quanto mais ar incorporado, menos densa será a argamassa fresca.

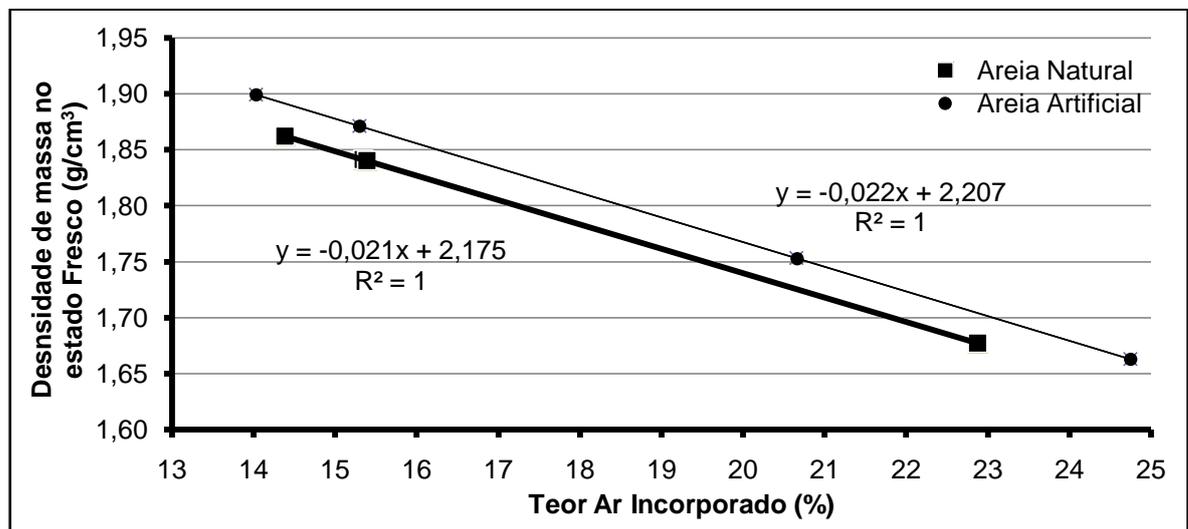


Gráfico 12 - Regressão entre a massa específica fresca e o teor de ar incorporado das curvas com areias natural e artificial aos 28 dias
Fonte: Autora (2014)

6.2.3 Densidade de massa no estado endurecido

Os resultados da densidade de massa no estado endurecido das argamassas ensaiadas estão apresentados através da Tabela 30 do Gráfico 13.

Tabela 30 - Densidade de massa no estado endurecido.

Curvas	Densidade de massa no estado endurecido (g/cm³)			
	Areia Natural	Erro	Areia Artificial	Erro
1 (NBR 248:2003)	1,782	0,01	1,785	0,01
2 (Carneiro e Cincotto)	1,821	0,01	1,836	0,01
3 (Reed)	1,779	0,01	1,816	0,01
4 (Reed)	1,642	0,00	1,613	0,00

Fonte: Autora (2014)

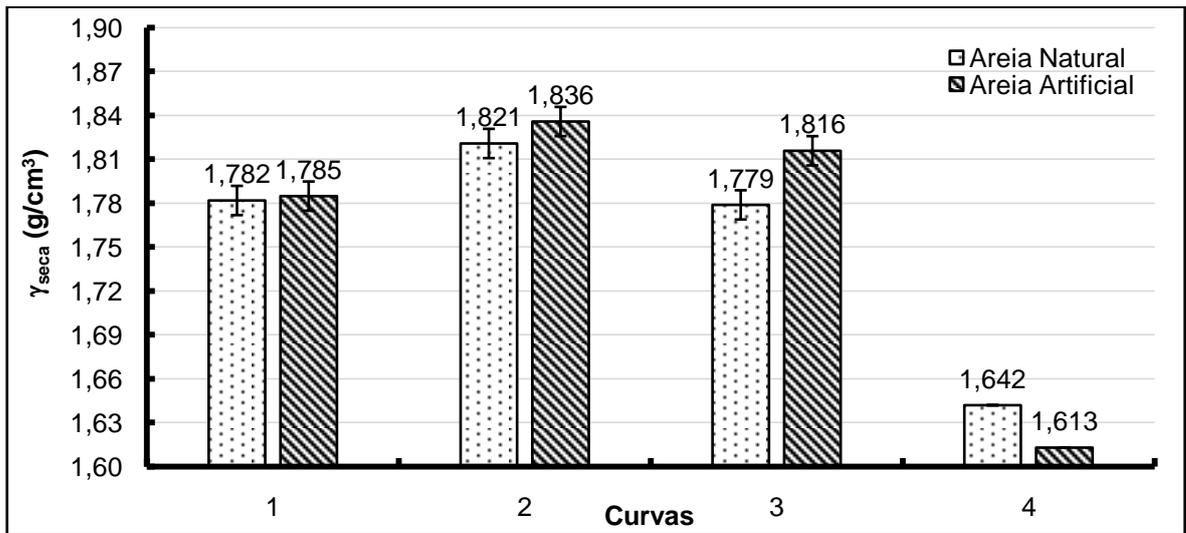


Gráfico 13 – Densidade de massa no estado endurecido das areias natural e artificial
Fonte: Autora (2014)

Para verificar se há diferença significativa de valores da densidade de massa no estado endurecido entre as curvas foi realizado o Teste *t*, cujos resultados estão na Tabela 31.

Tabela 31 – Teste *t* para os resultados de densidade de massa no estado endurecido

Areia Natural	Teste <i>t</i>	Areia Artificial	Teste <i>t</i>	AA x AN	Teste <i>t</i>
AN1-AN2	*	AA1-AA2	*	AN1-AA1	**
AN1-AN3	**	AA1-AA3	**	AN2-AA2	**
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	*
AN2-AN3	*	AA2-AA3	**	AN4-AA4	*
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo os valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

De acordo com Teste *t* acima, estatisticamente, os valores de densidade de massa no estado endurecido apresentaram variação considerável com a mudança de forma do agregado (AN e AA) somente para as curvas 3 e 4. Entretanto, maior variação foi verificada com a mudança do tipo de distribuição granulométrica.

A AA de origem gnaisse possui massa específica real de $2,66 \text{ g/cm}^3$ e a AN, de origem quartzosa, possui massa específica real de $2,59 \text{ g/cm}^3$, o que, no geral, contribuiu para maiores valores da densidade das curvas com AA. Além disso, as

arestas dos grãos artificiais contribuíram para melhoria da sua ancoragem à pasta.

Os melhores resultados foram obtidos através das curvas 1 e 2. A curva 1 apesar de possuir distribuição granulométrica favorável ao aumento da massa endurecida, apresentou menores valores do que a curva 2 em função da quantidade de água que foi padronizada e causou redução do poder de envolvimento do grão com pasta e piora da citada propriedade. Como a curva 2 possui maior MF do que a curva 1, e, portanto, menor área específica, ela foi mais favorecida pela quantidade de água disponível.

A curva 3, por apresentar maiores porcentagens de areias grossa e média (maior MF das quatro curvas), apresentou maiores valores de densidade de massa no estado endurecido possibilitados pela robustez do esqueleto sólido dessas areias.

A curva 4 possui menor quantidade de grãos grosseiros, além de distribuição granulométrica desfavorável (tendente à uniformidade), culminando em menores valores de densidade de massa no estado endurecido.

De acordo com os critérios de classificação da ABNT NBR 13281:2005, as curvas estão classificadas como M5 e M6, ou seja, alta densidade.

6.2.4 Absorção de Água por Imersão e Porosidade

A Tabela 32 e os Gráficos 14 e 15 apresentam os resultados de absorção de água por imersão e de porosidade superficial das argamassas.

Tabela 32 - Resultados dos ensaios de absorção por imersão e porosidade - areias natural e artificial

<i>Areia</i>	<i>Curva</i>	<i>Média da Absorção por Imersão (%)</i>	<i>Erro (%)</i>	<i>Média da Porosidade (%)</i>	<i>Erro (%)</i>
Areia Natural	1 (NBR 248:2003)	13,26	0,32	30,41	0,91
	2 (Carneiro e Cincotto)	12,29	0,54	29,59	1,59
	3 (Reed)	11,86	1,20	27,06	3,63
	4 (Reed)	12,69	0,05	28,91	0,24
Areia Artificial	1 (NBR 248:2003)	12,04	1,22	28,02	2,30
	2 (Carneiro e Cincotto)	12,19	1,02	28,52	2,50
	3 (Reed)	12,35	0,04	28,47	0,63
	4 (Reed)	12,75	0,67	26,03	1,45

Fonte: Autora (2014)

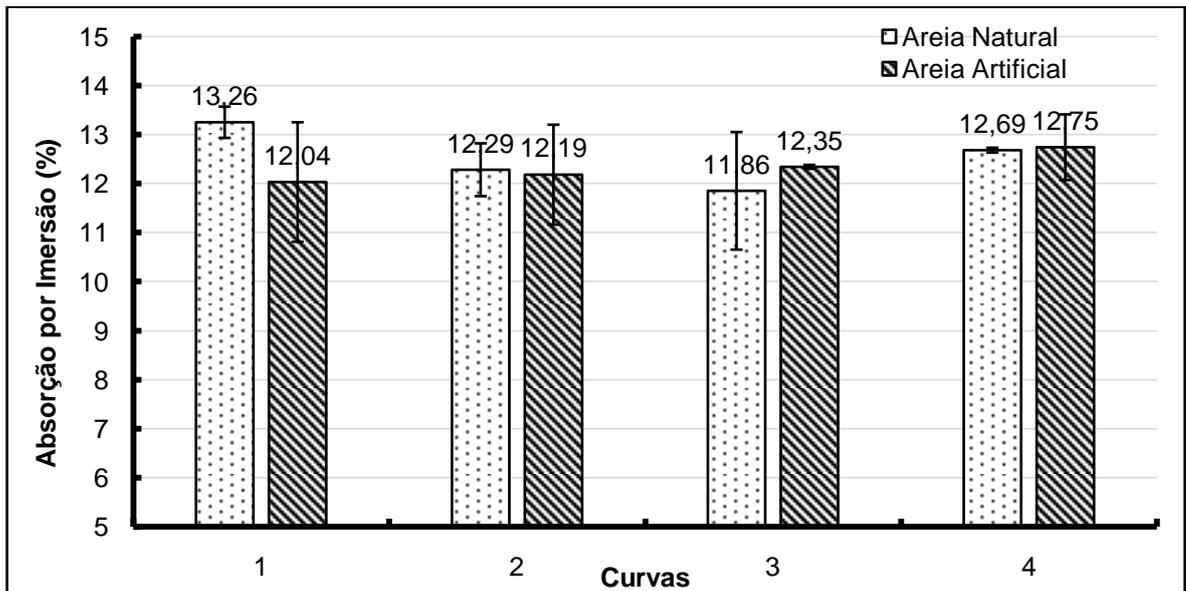


Gráfico 14 - Absorção de água por imersão - argamassas com areias natural e artificial.
Fonte: Autora (2014)

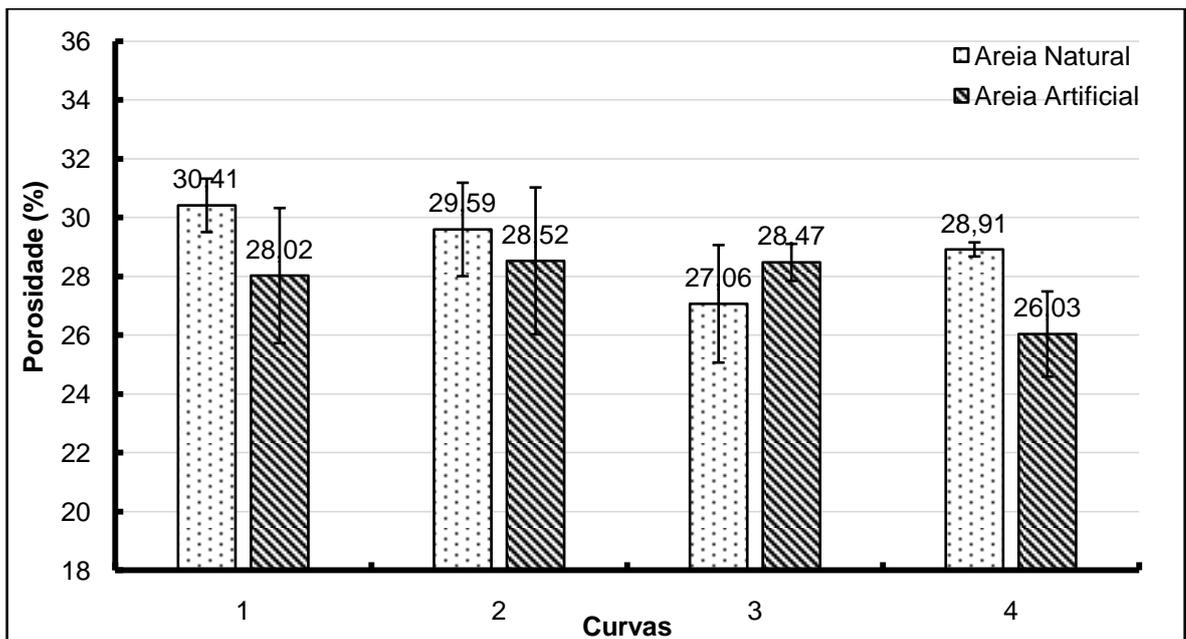


Gráfico 15 - Porosidade superficial das argamassas com areias natural e artificial
Fonte: Autora (2014)

O Teste t , cujos resultados estão respectivamente nas Tabelas 33 e 34, demonstrou que, estatisticamente, há pouca diferença entre os resultados dos ensaios, seja com areia natural ou artificial. Isso comprova que, estatisticamente, a variação das curvas granulométricas e da forma dos agregados não gerou diferenças significativas nas propriedades porosidade e absorção de água por imersão. Os resultados mostram que os valores dessas propriedades foram altos.

A justificativa está no fato de que nas argamassas de revestimento, a relação água/cimento é elevada para garantir a trabalhabilidade, o que gera grande quantidade de água livre e maior formação de vazios (poros) após evaporação da água livres. Tais poros são responsáveis pela maior absorção das argamassas. Grãos de mesma granulometria mas com formato arredondado, como os da areia natural, demandaram menos água (menor absorção) do que os grãos irregulares da areia artificial (processo de britagem gera fissuras nos agregados que permitem a percolação de água), propiciando mais água livre nas curvas com areia natural e ocasionando maior porosidade. Atestando, portanto, a influência da forma na porosidade. Além disso, a quantidade relativa de cimento/agregado nas dosagens com AA, em função da maior presença de material fino, é maior do que nas dosagens com AN, propiciando maior quantidade de produtos hidratados e menos vazios. Cabe lembrar que a forma influenciou a porosidade, gerando variação nos resultados, mas, estatisticamente, tal influência não foi significativa.

Tabela 33 – Teste *t* para os resultado de absorção de água por imersão.

Areia Natural	Teste <i>t</i>	Areia Artificial	Teste <i>t</i>	AA x AN	Teste <i>t</i>
AN1-AN2	**	AA1-AA2	**	AN1-AA1	**
AN1-AN3	*	AA1-AA3	**	AN2-AA2	**
AN1-AN4	**	AA1-AA4	**	AN3-AA3	**
AN2-AN3	*	AA2-AA3	**	AN4-AA4	*
AN2-AN4	**	AA2-AA4	**		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	**		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

Tabela 34 – Teste *t* para os resultado da porosidade superficial.

Areia Natural	Teste <i>t</i>	Areia Artificial	Teste <i>t</i>	AA x AN	Teste <i>t</i>
AN1-AN2	**	AA1-AA2	**	AN1-AA1	**
AN1-AN3	*	AA1-AA3	**	AN2-AA2	**
AN1-AN4	**	AA1-AA4	**	AN3-AA3	**
AN2-AN3	**	AA2-AA3	**	AN4-AA4	*
AN2-AN4	**	AA2-AA4	**		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	**		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

6.2.5 Análise microestrutural das argamassas

A microestrutura das argamassas pôde ser avaliada através das imagens ópticas por meio de lupa estereoscópica (Figura 20) e de microscópio óptico (Figura 21).

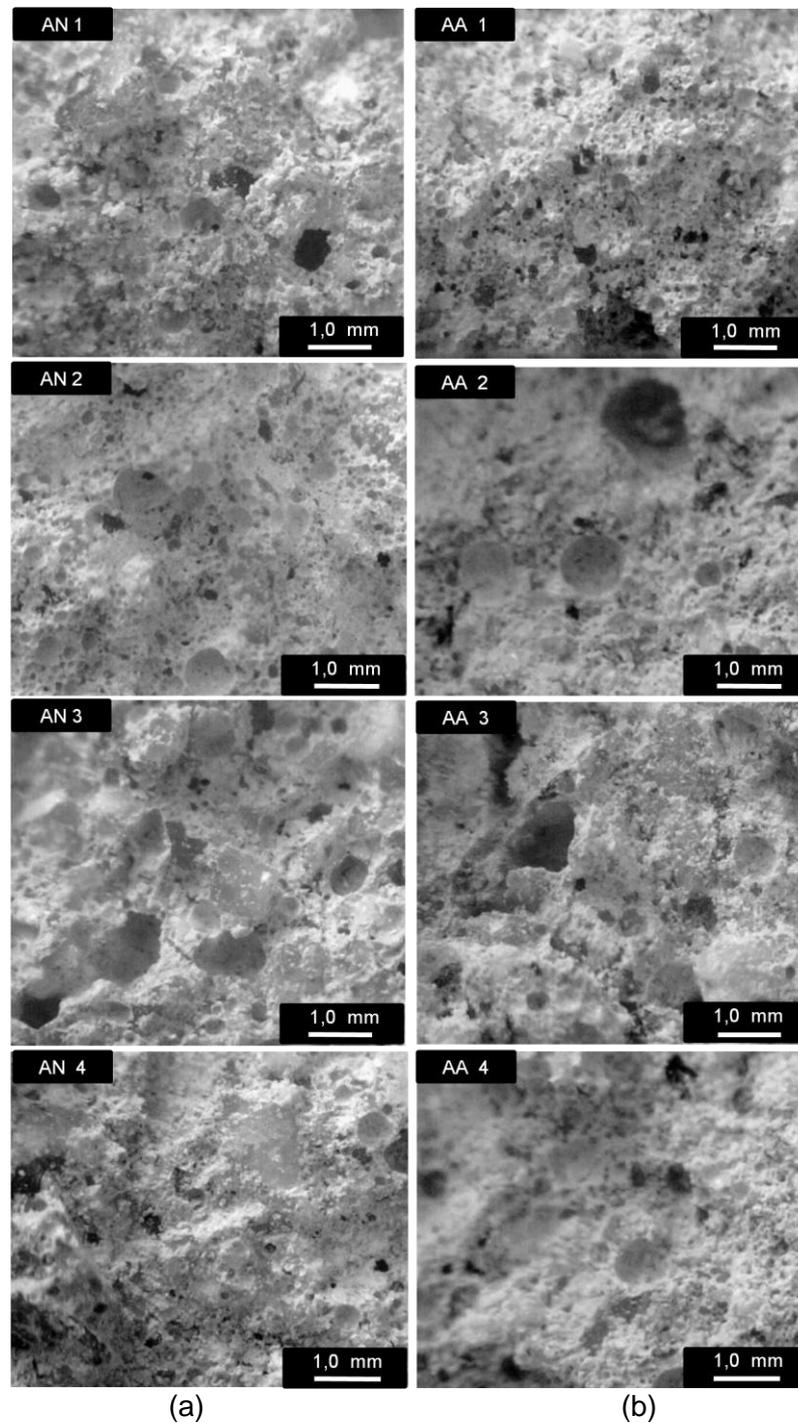


Figura 20 – Imagem das argamassas com lupa estereoscópica (a) AN e (b) AA

Através das imagens com lupa estereoscópica é possível visualizar que as curvas com areia natural produziram, no geral, argamassas mais porosas do que as

curvas com areia artificial, indo ao encontro dos resultados dos ensaios de absorção por imersão e porosidade.

Comparando a curva AN1 com AA1, observa-se que a quantidade de poros de menor diâmetro da curva AN1 é maior do que na curva AA1. E, além disso, em AN1 há interligação dos poros, contribuindo para aumentar a permeabilidade. A permeabilidade aumenta a absorção de água e os diâmetros menores dos poros justificam a maior capilaridade da curva AN1, uma vez que a capilaridade possui relação inversa com o diâmetro do poro. Observa-se também que a maior quantidade (e maior dimensão) de bolhas de ar de AN1 em relação a AA1 criou um efeito maior de amortecimento, reduziu a rigidez e, conseqüentemente, contribuiu para reduzir o módulo de elasticidade de AN1 quando comparado com AA1.

Os diâmetros dos poros de AA2 são maiores do que os poros de AN2, causando grande influência na capilaridade. A absorção por imersão das curvas AN2 e AA2 estão semelhantes, mas na curva AA2 há maior quantidade de poros de maior diâmetro que contribuíram para reduzir a rigidez e a capilaridade de AA2.

A curva AN3 possui grande porosidade e a maior quantidade de poros de menor diâmetro nessa curva aumentou sua capilaridade quando comparada a AN3. Os poros de AA3 estão intercomunicados causando aumento da permeabilidade da argamassa. A absorção de AA3 é 12,35% e a de AN3 é 11,83%. A granulometria descontínua da curva 3, no geral, gerou poros com maiores dimensões do que nas outras distribuições. A falta de alguns diâmetros originou poros grandes (macro poros) nas argamassas, tanto para areia natural quanto para areia artificial.

Os diâmetros dos poros de AN4 são menores do que os de AA4, justificando sua maior capilaridade. Além disso, o maior teor de ar incorporado de AA4 (24,75%) contribuiu para reduzir sua capilaridade, à medida que ele interrompeu/reduziu o fluxo hidráulico no capilar. A curva AA4 apresentou bolhas de ar incorporado com diâmetros maiores, potencializando o efeito de contenção da capilaridade, contribuindo para reduzir a rigidez da argamassa e aumentando sua capacidade de deformação (redução de E_d) em comparação com AN4.

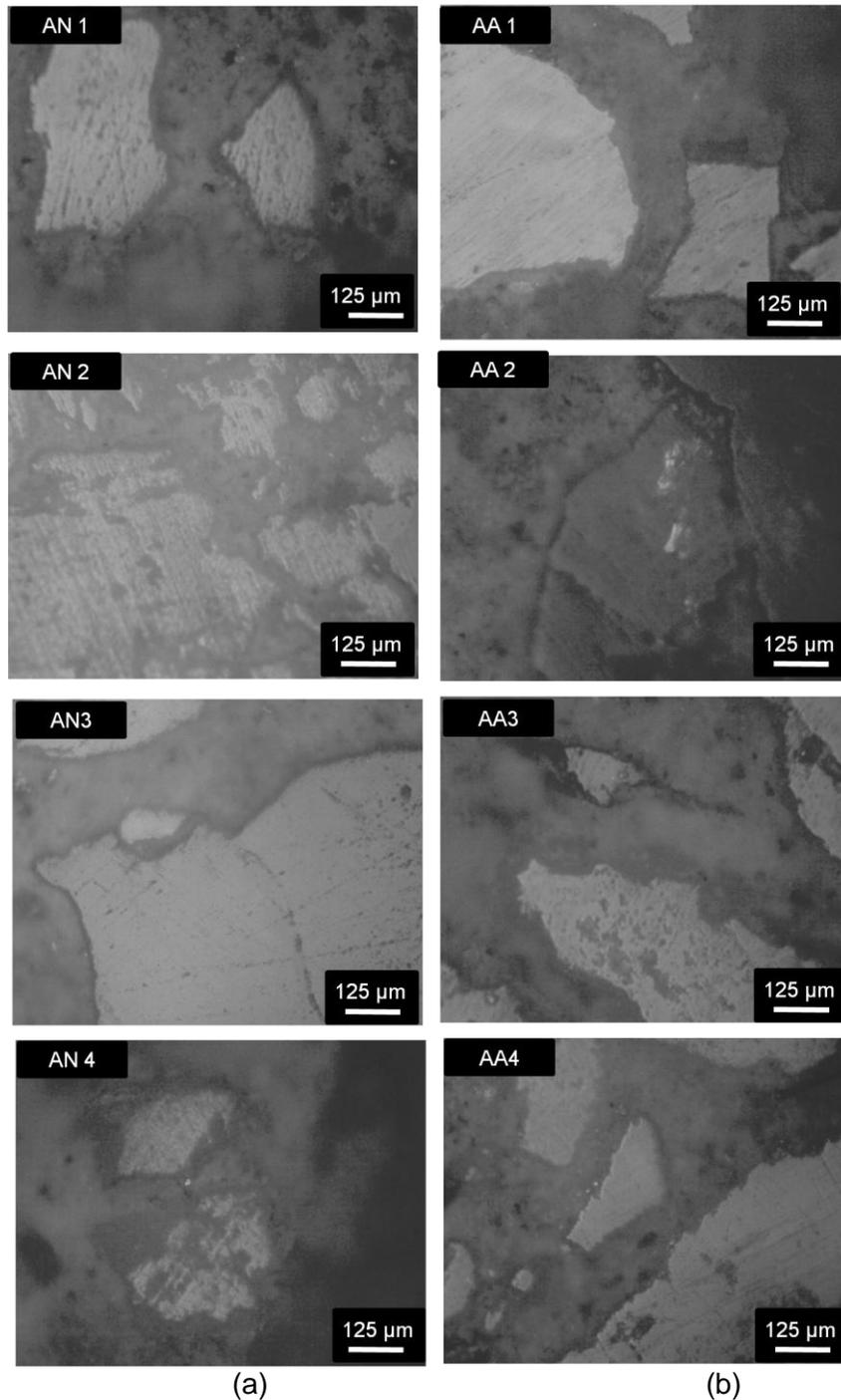


Figura 21 – Imagem das argamassas com microscópio óptico (a) AN e (b) AA - Esc. 1x100

As Figuras 21 (a) e (b) apresentam as imagens obtidas através do microscópio óptico e demonstram que a curva AA1 apresentou melhor solidarização da matriz cimentícia com o agregado e menos poros do que a curva AN1. O menor módulo de finura da curva 1 demandou mais água do que a curva 2 (a curva 2 com areia natural foi a curva considerada para definição do fator a/c) e como a quantidade

de água foi constante, a hidratação dos grãos de cimento ficou prejudicada na curva AN1, a pasta não envolveu bem os agregados ocasionando o surgimento de muitos poros. Além disso, a granulometria mais grosseira (4,8mm) contribuiu para fragilizar a zona de transição, principalmente na argamassa com areia natural. As arestas da areia artificial possibilitaram melhora na ancoragem do grão à pasta.

Na curva 2, a dosagem com AN apresentou melhor solidarização da pasta com o agregado do que na dosagem com AA, devido à presença de granulometria fundo que contribuiu para criar o efeito *filler* e melhorar a zona de transição, onde é possível perceber homogeneidade e bom envolvimento do material granular com a pasta. Um dos motivos para essa melhor solidarização foi a determinação do fator *a/c* para a curva AN2. Entretanto, na dosagem com AA, a granulometria fundo somada a grande quantidade de material fino da granulometria 0,15 do agregado artificial fragilizaram a aderência pasta/agregado.

A curva 3 com maior MF (4,01) de todas as curvas, apresentou excesso de água com maiores valores de consistência e piora da solidarização do agregado à pasta. A maior demanda de água dos grãos artificiais reduziria a quantidade de água livre mas as arestas pioraram o arranjo granular, aumentando a permeabilidade e absorção quando comparado com AN3.

A curva 4 possui distribuição com tendência à uniformidade, o que causou enrijecimento do sistema granular e prejudicou o rolamento grão a grão. Entretanto, na curva com areia artificial, as arestas dos grãos e sua maior variedade de diâmetros possibilitaram redução do enrijecimento do sistema granular e melhora da ancoragem do agregado à pasta.

6.2.6 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade estão apresentados na Tabela 35 e nos Gráficos 16 e 17.

Tabela 35 - Resultados dos ensaios de absorção por capilaridade e coeficiente de capilaridade (CC) - Areias natural e artificial

Tipo de Areia	Curva	Absorção por Capilaridade (%)								CC (g/dm ² *min ^{1/2})	Erro
		(min)	0	10	90	180	360	720	1440		
Areia Natural	1	0,00	0,36	0,84	1,21	1,62	1,78	1,92	1,96	9,33	1,20
	2	0,00	0,40	0,79	1,09	1,39	1,63	1,89	1,99	7,67	0,49
	3	0,00	0,18	0,28	0,36	0,46	0,58	0,76	0,93	1,85	0,65
	4	0,00	0,67	1,08	1,43	1,76	1,85	1,88	1,91	8,17	0,21
Areia Artificial	1	0,00	0,22	0,42	0,57	0,73	0,91	1,09	1,40	3,93	1,69
	2	0,00	0,22	0,42	0,57	0,71	0,81	1,13	1,56	3,90	1,21
	3	0,00	0,69	1,13	1,42	1,65	1,77	1,82	2,11	8,73	0,65
	4	0,00	0,16	0,24	0,32	0,41	0,54	0,78	1,00	1,60	0,14

Fonte: Autora (2014)

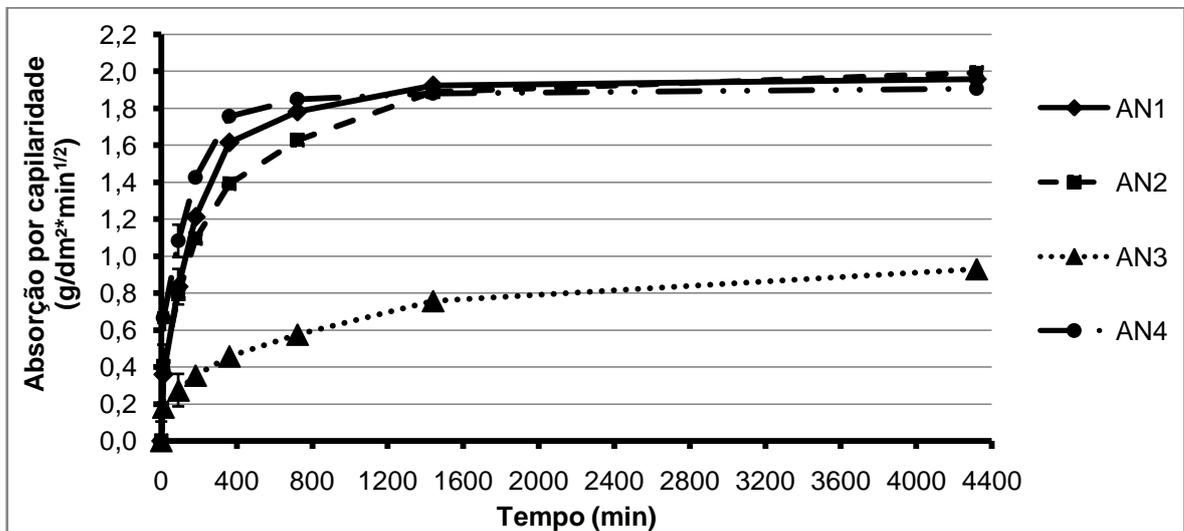


Gráfico 16 – Absorção de água por capilaridade das argamassas com areia natural.

Fonte: Autora (2014)

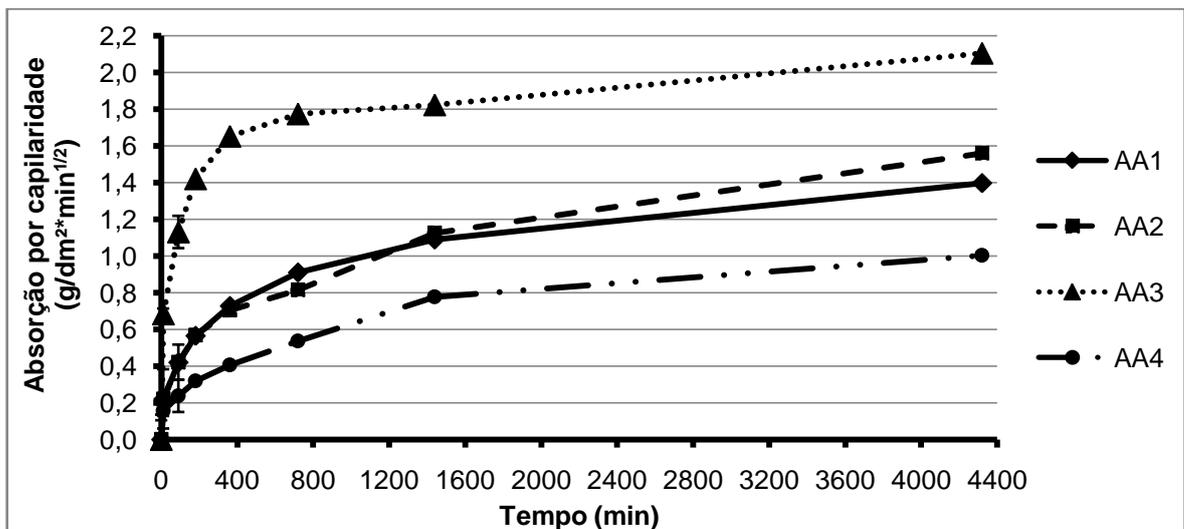


Gráfico 17 – Absorção de água por capilaridade das argamassas com areia artificial.

Fonte: Autora (2014)

Analisando a Figura 20, é possível perceber que a quantidade de poros de menor diâmetro da curva AN1 é maior do que na curva AA1, o que justifica a maior capilaridade da curva AN1, uma vez que quanto menor for o diâmetro do poro, maior será o poder de sucção da água dentro do capilar e maior será a altura de penetração da água nos capilares. Além disso, em AN1 há interligação dos poros, contribuindo para aumentar a permeabilidade e, conseqüentemente, a absorção de água.

Os diâmetros dos poros de AA2 são maiores do que os de AN2 e foram responsáveis pela menor capilaridade de AA2. A quantidade de poros oriundos do teor de ar incorporado das curvas AN2 e AA2 estão semelhantes, mas na curva AA2 há maior quantidade de poros oriundos do teor de ar incorporado (bolhas) de maior diâmetro, as quais contribuíram para potencializar o efeito de redução da capilaridade que o teor de ar incorporado causa, pois ele impede ou reduz o fluxo de água no capilar.

As curvas AN3 e AA3 possuem grande quantidade de poros grandes, mas a maior quantidade de poros de menor diâmetro em AA3 aumentou sua capilaridade quando comparado a AN3. E, além disso, os poros grandes de AA3 estão intercomunicados, aumentando a permeabilidade e a absorção da argamassa.

Os diâmetros dos poros de AN4 são menores do que os de AA4, justificando sua maior capilaridade. Além disso, o maior teor de ar incorporado de AA4 (24,75%) além de bolhas de maiores diâmetros contribuíram para reduzir sua capilaridade, uma vez que elas interromperam os poros capilares e impediram o fluxo hidráulico.

Para analisar e classificar as argamassas, foram calculados os coeficientes de capilaridade, que já foram apresentados na Tabela 35, cujos resultados estão expressos no Gráfico 18.

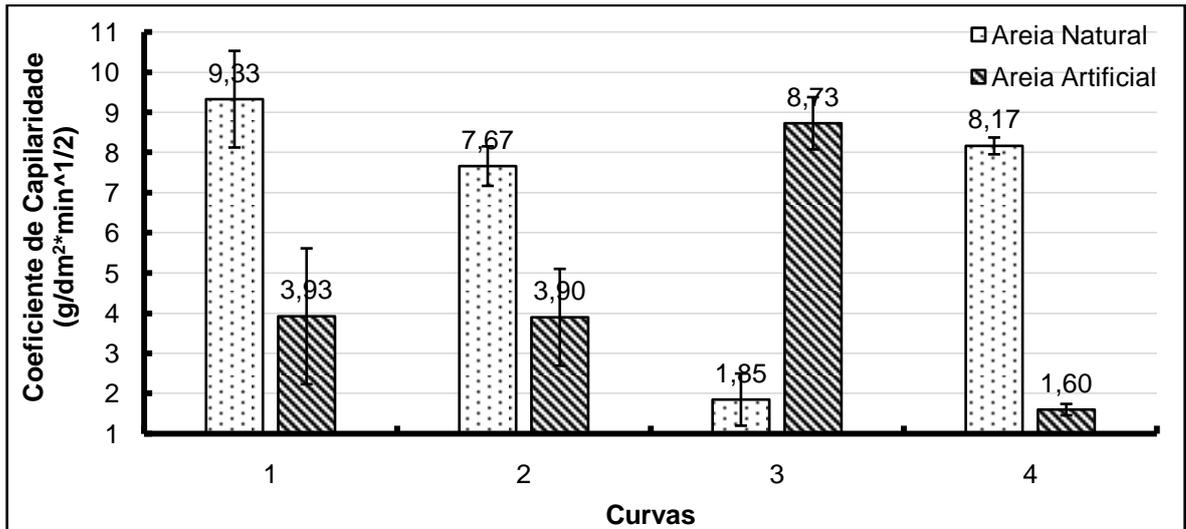


Gráfico 18 - Coeficiente de capilaridade das areias natural e artificial.

A análise estatística realizada através do Teste t , cujos resultados estão na Tabela 36, permite inferir que nesta propriedade tanto o efeito forma como o efeito da distribuição granulométrica foram bem evidenciados estatisticamente. Deve-se salientar que a grande variabilidade dos resultados provém do método utilizado, em que a base do CP sujeita à absorção pode apresentar grande discrepância dos poros.

Tabela 36 – Teste t para os resultado de CC

Areia Natural	Teste t	Areia Artificial	Teste t	AA x AN	Teste t
AN1-AN2	**	AA1-AA2	**	AN1-AA1	*
AN1-AN3	*	AA1-AA3	*	AN2-AA2	*
AN1-AN4	**	AA1-AA4	*	AN3-AA3	*
AN2-AN3	*	AA2-AA3	*	AN4-AA4	*
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

De acordo com critérios da ABNT NBR 13281:2005, todas as argamassas estão dentro de seus limites, sendo que as curvas AN3 e AA4 estão classificados como C2, as curvas AA1 e AA2 como C3 e as demais como C5.

6.2.7 Resistência potencial de aderência à tração

Os resultados obtidos através do ensaio de resistência potencial de aderência à tração aos 90 dias estão representados através do Gráfico 19 e Tabela 37.

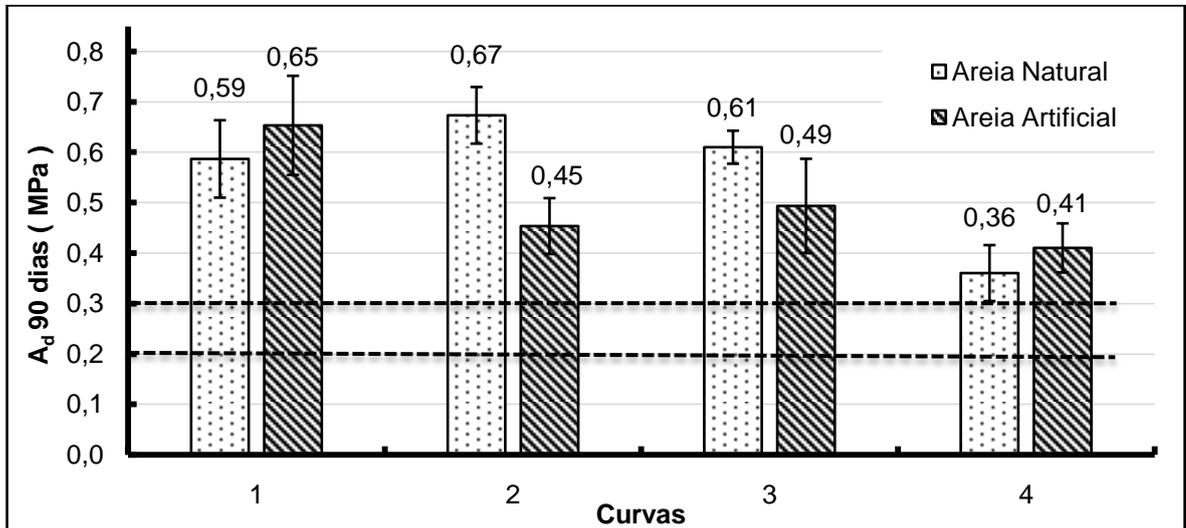


Gráfico 19 - Resultados dos ensaios de resistência potencial de aderência à tração.
Fonte: Autora (2014)

Tabela 37 - Resultados ensaios resistência potencial de aderência à tração aos 90 dias.

Areia	Curvas	A_d (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	ABNT NBR 13.281: 2005	Teste t
Areia Natural	1	0,59	0,05	A3	*
	2	0,67	0,04	A3	*
	3	0,61	0,02	A3	*
	4	0,36	0,02	A3	*
Areia Artificial	1	0,65	0,06	A3	*
	2	0,45	0,03	A3	*
	3	0,49	0,05	A3	*
	4	0,41	0,02	A3	*

* O teste t constatou que os valores encontrados são superiores ao valor de 0,3 MPa.

Fonte: Autora (2014)

Nas curvas 1 e 4, as arestas dos grãos de areia artificial garantiram maior ancoragem dos agregados à pasta, contribuindo para aumentar a resistência em relação à curva com areia natural, atestando o efeito benéfico do fator forma na propriedade resistência de aderência.

O substrato de aplicação da argamassa, bloco de concreto com superfície seca, e a energia de aplicação foram padronizados a fim de evitar influência sobre a propriedade aderência. Os poros do substrato não são totalmente diminutos, de

forma que seu poder de sucção de pasta não foi potencializado. Foi utilizada cura úmida para todos os revestimentos aplicados sem chapisco sobre os blocos.

Em algumas curvas, o coeficiente de variação dos resultados oscilou entre 13 a 22%, o que pode ser justificado por problemas do equipamento de corte que causou muita vibração nos corpo de prova acelerando o processo de ruptura (CARASEK, 1996).

Para verificar se a diferença entre as curvas foi significativa, realizou-se o Teste t, cujos resultados estão na Tabela 38.

Tabela 38 – Teste t para os resultado de A_d

Areia Natural	Teste t	Areia Artificial	Teste t	AA x AN	Teste t
AN1-AN2	**	AA1-AA2	*	AN1-AA1	*
AN1-AN3	**	AA1-AA3	*	AN2-AA2	*
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	**
AN2-AN3	**	AA2-AA3	**	AN4-AA4	**
AN2-AN4	*	AA2-AA4	**		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	**		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

Estatisticamente, no geral, houve influência tanto da granulometria quanto da forma na aderência das argamassas. As curvas 1 e 2 apresentam características de maior continuidade na distribuição dos grãos do que as demais curvas. No geral, essas curvas apresentaram os melhores valores de aderência tanto para a areia natural quanto para a artificial, atestando o efeito benéfico da granulometria contínua na A_d , garantido pelo melhor arranjo entre os variados diâmetros. O fator forma também influenciou: as arestas do agregado artificial, principalmente dos grãos de \varnothing 4,8mm, propiciaram maior ancoragem dos grãos à pasta, conferindo aumento de 10% da A_d em relação à argamassa com areia natural, devido à melhor solidarização do grão à pasta.

O fator a/c foi definido em função da curva 2 com areia natural e esse fato conferiu à curva AN2 o maior valor de A_d , melhor envolvimento dos grãos com pasta e maior densidade de empacotamento aos 28 dias para as curvas com areia natural (1,821 g/cm³), favorecendo a consistência e melhorando a área de contato da argamassa com o substrato. Entretanto, na curva 2 com areia artificial,

tal benefício não foi totalmente alcançado, uma vez que os grãos artificiais passantes na peneira 0,15 mm possuem quantidades consideráveis de grãos com reduzidas dimensões quando comparados como os grãos naturais de mesma granulometria, conforme Figura 10, demandando maior quantidade de água. Assim, esse material fino somado à granulometria fundo fragilizou a aderência pasta/agregado e prejudicou a A_d . Além disso, os mesmos finos que melhoraram a consistência da curva AA2 causaram um efeito de tamponamento dos poros do substrato e prejudicaram a aderência.

Na curva AN3, a consistência favorecida pela descontinuidade da distribuição (pouco atrito granular) e pela reduzida demanda de água ($MF= 4,01$) aumentou a área de espalhamento e facilitou o preenchimento dos poros da base com pasta/material aglomerante, favoreceu a área de contato da pasta com o substrato, promoveu a ancoragem e melhorou a aderência. Além disso, a considerável quantidade de grãos mais grosseiros, responsáveis pela sustentação física, proporcionaram bons valores de A_d . Entretanto, na curva AA3, tais benefícios não foram alcançados, em função da existência de arestas que criaram atrito granular e reduziram a consistência e, conseqüentemente, reduziu a área de espalhamento e em função da maior quantidade de material fino que diminuiu a sustentação física da argamassa.

A distribuição da curva 4, com tendência à uniformidade, em função da grande quantidade de diâmetros do mesmo tamanho, originou os valores mais altos de teor de vazios (22,88% para AN e 24,75% para AA) que reduziram o contato da argamassa com o substrato. Os valores de A_d para as duas curvas foram próximos (14% a mais para AA) e os mais baixos de todas as dosagens. A tendência à uniformidade enrijeceu o sistema, prejudicou a área de espalhamento (consistências mais baixas), gerou grande quantidade de vazios e prejudicou A_d . Entretanto, na curva AA4, as arestas dos grãos artificiais favoreceram a ancoragem do grão à pasta e contribuíram para diminuir o enrijecimento do sistema granular, aumentar a consistência, melhorar a área de espalhamento e propiciar ganho de A_d .

Apesar das variações, todas curvas apresentaram resistência à aderência superior 0,3 MPa, viabilizando seu uso tanto para argamassa de revestimento

interno ou externo e sendo caracterizadas como de alta aderência. Além disso, a maioria das rupturas ocorreu na interface argamassa/bloco. A ABNT NBR 13281:2005 classifica as argamassas segundo a resistência potencial de aderência e através da Tabela 15 é possível verificar que todas as argamassas ensaiadas atingiram a classe A3.

6.2.8 Resistência à Tração na Flexão - f_t

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão estão mostrados nos Gráficos 20 e 21 e na Tabela 39.

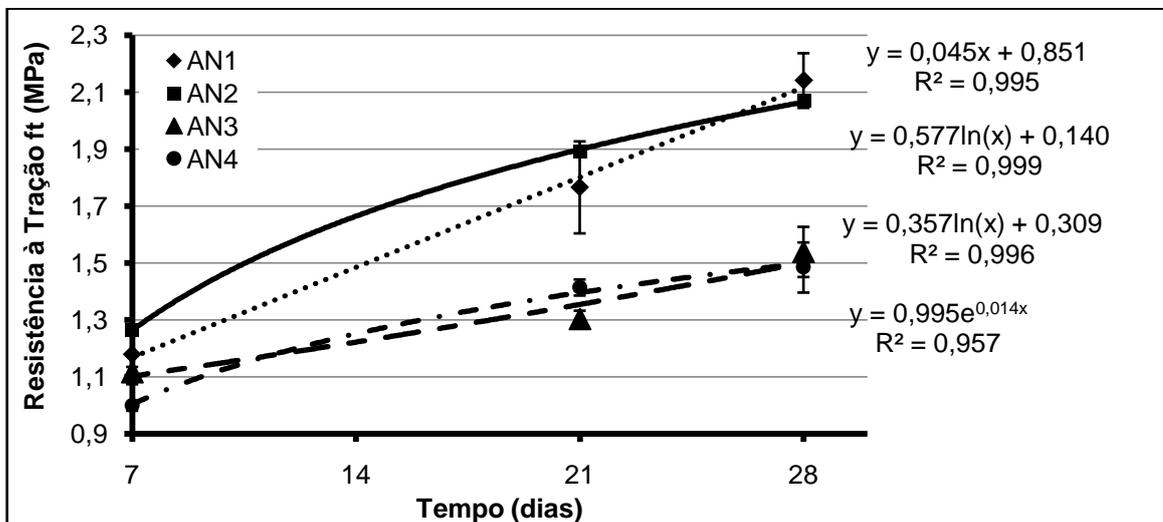


Gráfico 20 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função das idades - AN.

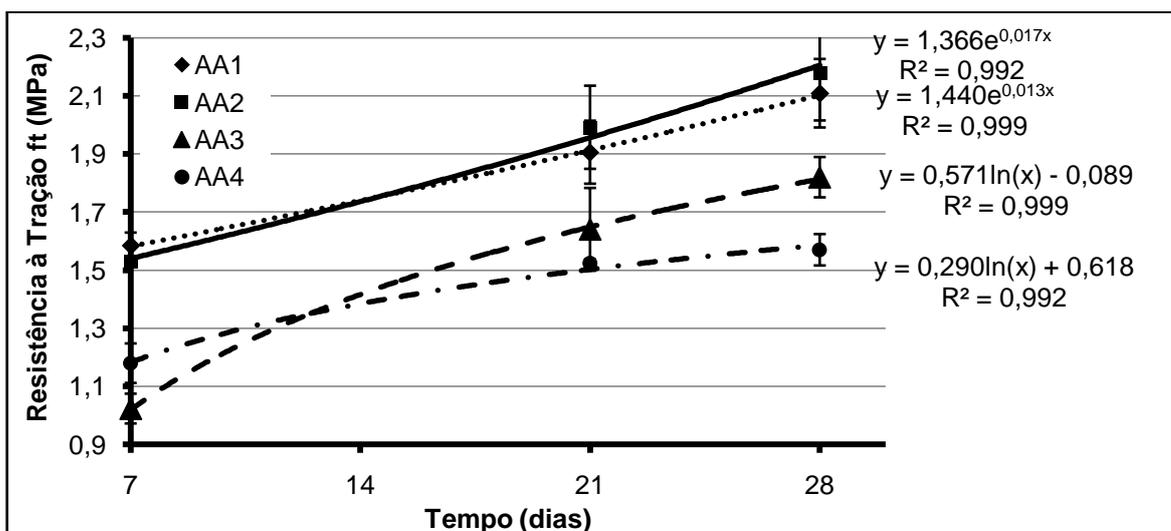


Gráfico 21 - Resultados dos ensaios de resistência à tração em função das idades - AA.

Conforme gráficos 20 e 21, os melhores resultados foram obtidos com as curvas 1 e 2. Tais curvas apresentam continuidade em sua distribuição, o que influenciou positivamente a resistência à tração na flexão, tanto com areia natural quanto com areia artificial, à medida que os espaços entre os grãos maiores foram ocupados por grãos menores e propiciaram menor índice de vazios e maior compacidade da densidade de empacotamento. A curva 1 possui o menor MF (2,55) de todas as curvas e as argamassas ficaram ásperas. Como os grãos artificiais (para mesma granulometria) são mais fissurados artificialmente e demandam mais água do que os grãos naturais, o poder de envolvimento da pasta sobre o agregado ficou reduzido na curva AA1. O fator a/c, que foi definido para AN2, beneficiou essa curva e as arestas da AA propiciaram melhor ancoragem do grão à pasta. Todas as curvas apresentaram maior ganho de resistência à tração na flexão nas primeiras idades.

Tabela 39 - Resultados dos ensaios de resistência à tração ao longo da idade: (a) areia natural - AN e (b) areia artificial - AA

Resistência à Tração na Flexão							
Curva	Idade (dias)	Areia Natural			Areia Artificial		
		ft Médio (MPa)	Erro (MPa)	Acrésc. Ft (%)	ft Médio (MPa)	Erro (MPa)	Acrésc. Ft (%)
1	7	1,18	0,11		1,59	0,04	
	21	1,77	0,16	50,00*	1,91	0,14	20,13*
	28	2,14	0,10	20,90**	2,11	0,12	10,47**
2	7	1,27	0,01		1,53	0,01	
	21	1,89	0,00	48,81*	1,99	0,14	30,06*
	28	2,07	0,00	9,52**	2,18	0,16	9,54**
3	7	1,12	0,14		1,02	0,05	
	21	1,30	0,03	16,07*	1,64	0,14	60,78*
	28	1,54	0,09	18,46**	1,82	0,07	10,97**
4	7	1,00	0,03		1,18	0,07	
	21	1,41	0,03	41,00*	1,52	0,01	28,81*
	28	1,48	0,03	4,96**	1,57	0,05	3,29**

* Acréscimo percentual entre 7 e 21 dias

**Acréscimo percentual entre 21 e 28 dias

Fonte: Autora (2014)

O Teste t (Tabela 40) atesta se os valores são significativamente diferentes.

Tabela 40 – Teste t para os resultado de f_t

Areia Natural	Teste t	Areia Artificial	Teste t	AA x AN	Teste t
AN1-AN2	**	AA1-AA2	**	AN1-AA1	**
AN1-AN3	*	AA1-AA3	*	AN2-AA2	**
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	**
AN2-AN3	*	AA2-AA3	*	AN4-AA4	**
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	**	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

A curva 3 cuja distribuição apresenta características de descontinuidade piorou o arranjo dos grãos causando redução da f_t em 28% para AN3 quando comparada a AN1.

Na distribuição com tendência à uniformidade da curva 4, a ausência de alguns diâmetros gerou muitos vazios, piorou o empacotamento e, conseqüentemente, propiciou os piores resultados de f_t . Os resultados do Teste t (tabela 40) mostraram que, no geral, a variação da distribuição granulométrica também gerou variação significativa estatisticamente.

O efeito da forma dos agregados também exerceu influência na resistência à tração na flexão, de forma que as arestas garantiram melhor travamento do grão à pasta e aumentaram f_t com AA, com exceção da curva 1, onde a quantidade de água não foi totalmente adequada ao seu MF e impediu o bom envolvimento do grão com pasta, principalmente com AA (maior demanda de água). Entretanto, apesar de haver variação matemática, estatisticamente, os resultados do Teste t mostraram que tal variação não foi significativa.

De acordo com os critérios de classificação da ABNT NBR 13281:2005, as curvas AN1, AN2 e AA2 são R4, as curvas AA1, AA3 e AA4 são classificadas como R3 e as curvas AN3 e AN4 são R2, ou seja, a maioria das curvas apresenta média resistência a tração.

6.2.9 Resistência à Compressão Axial - f_c

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7, 21 e 28 dias e os resultados e suas variações estão apresentados na Tabela 41 e Gráficos 22 e 23.

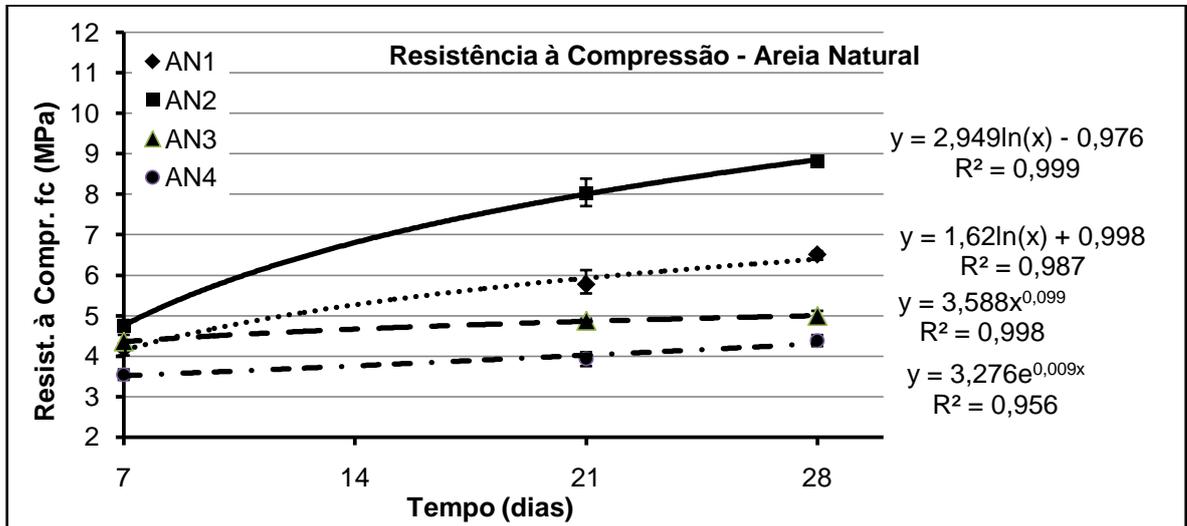


Gráfico 22 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em função das idades - areia natural

Tabela 41 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão ao longo da idade - areia natural (AN) e areia artificial (AA)

Resistência à Compressão Axial							
Curva	Idade (dias)	Areia Natural			Areia Artificial		
		fc Médio (MPa)	Erro (MPa)	Acrésc. Fc (%)	fc Médio (MPa)	Erro (MPa)	Acrésc. Fc (%)
1	7	4,18	0,13		5,10	0,08	
	21	5,78	0,34	38,29*	6,55	0,14	28,27*
	28	6,51	0,08	12,65**	7,24	0,22	10,53**
2	7	4,76	0,17		4,63	0,08	
	21	8,04	0,24	69,16*	6,82	0,08	47,25*
	28	8,82	0,14	9,66**	7,56	0,15	10,84**
3	7	4,36	0,17		3,28	0,12	
	21	4,88	0,04	12,00*	4,71	0,06	43,43*
	28	4,99	0,12	2,37**	5,05	0,14	7,23**
4	7	3,54	0,13		2,95	0,05	
	21	3,92	0,17	10,87*	3,88	0,09	31,26*
	28	4,38	0,14	11,66**	4,05	0,17	4,54**

* Acréscimo percentual entre 7 e 21 dias

**Acréscimo percentual entre 21 e 28 dias

Fonte: Autora (2014)

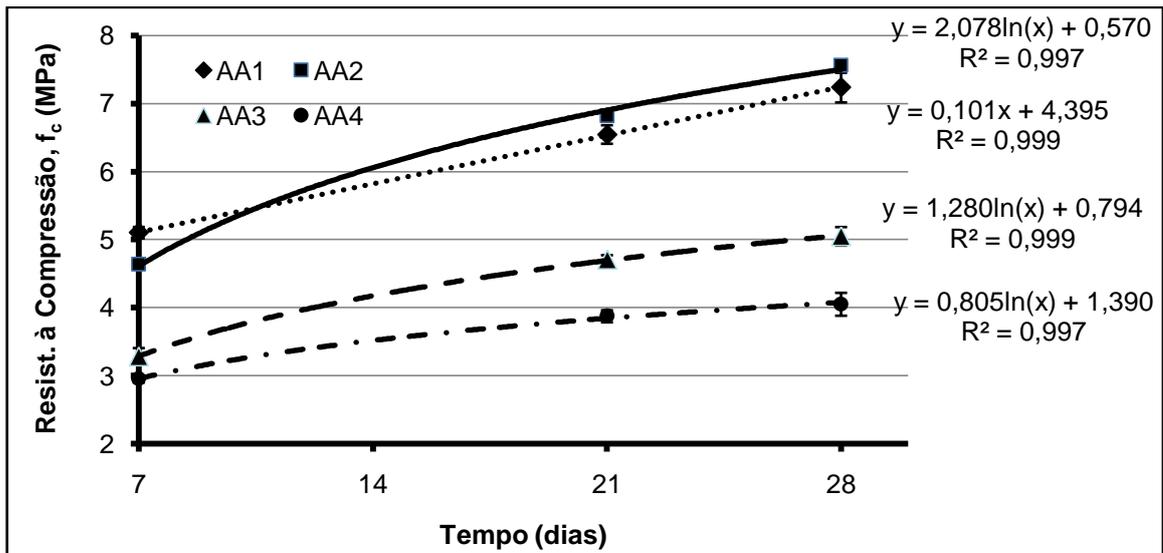


Gráfico 23 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias - areia artificial.

Para verificar se a diferença de f_c entre as curvas foi significativa, foi realizado o Teste t , cujos resultados estão na Tabela 42. Estatisticamente, a influência da forma do agregado não foi significativa nessa propriedade, mas a distribuição granulométrica exerceu influência expressiva.

Tabela 42 – Teste t para os resultado de f_c

Areia Natural	Teste t	Areia Artificial	Teste t	AA x AN	Teste t
AN1-AN2	*	AA1-AA2	**	AN1-AA1	**
AN1-AN3	*	AA1-AA3	*	AN2-AA2	**
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	**
AN2-AN3	*	AA2-AA3	*	AN4-AA4	**
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

As maiores resistências à compressão também foram obtidas com as curvas 1 e 2, cujas distribuições granulométricas apresentam continuidade, favorecendo a compacidade e reduzindo os vazios. A maior quantidade de grãos grosseiros na curva 2 contribuiu para aumentar a densidade de massa no estado endurecido e, conseqüentemente, a resistência à compressão. Além disso, a granulometria fundo da curva 2 preencheu os espaços entre os grãos maiores, melhorou o empacotamento dos grãos (principalmente na curva AN2) e conferiu maior densidade e menor teor de vazios quando comparado à curva AN1. As resistências das curvas 1 e 2 são as maiores de todos as curvas ensaiados. Além

disso, a curva 2, cuja granulometria está mais próxima da zona ótima superior apresentou melhores resultados do que a curva 1, mostrando que diâmetros maiores conferem maiores resistências.

Os piores resultados foram obtidos com as curvas 3 e 4 (tanto com AN quanto com AA). A curva 4 possui distribuição granulométrica mais uniforme e os grãos com tamanhos bem parecidos enrijeceram o sistema, prejudicando a trabalhabilidade e o rolamento grão a grão e o empacotamento, originando maiores quantidades de vazios, menor compacidade e aumentando o teor de ar incorporado (maiores teores de ar incorporado de todas as curvas). Assim, a distribuição granulométrica tipo uniforme da curva 4 prejudicou a f_c e a forma angulosa da areia artificial dificultou o arranjo entre as partículas, aumentou o teor de vazios e também prejudicou essa propriedade.

No geral, foi observado que a maior densidade no estado endurecido e a maior massa específica real (areia artificial) geraram maiores valores de f_c . Além disso, as argamassas que apresentaram menores diâmetros de poro garantiram maiores valores de f_c .

Os resultados de f_t , ao longo das idades, estão diretamente relacionados com f_c , de forma que um incremento no valor de f_c , gerou também acréscimo de f_t . A correlação entre as duas propriedades mostrou-se mais representativa na areia artificial, conforme Gráfico 24, onde pode ser observado que a resistência à tração na flexão encontra-se entre 19% e 21%, corroborando as afirmações de Mehta e Monteiro (2008).

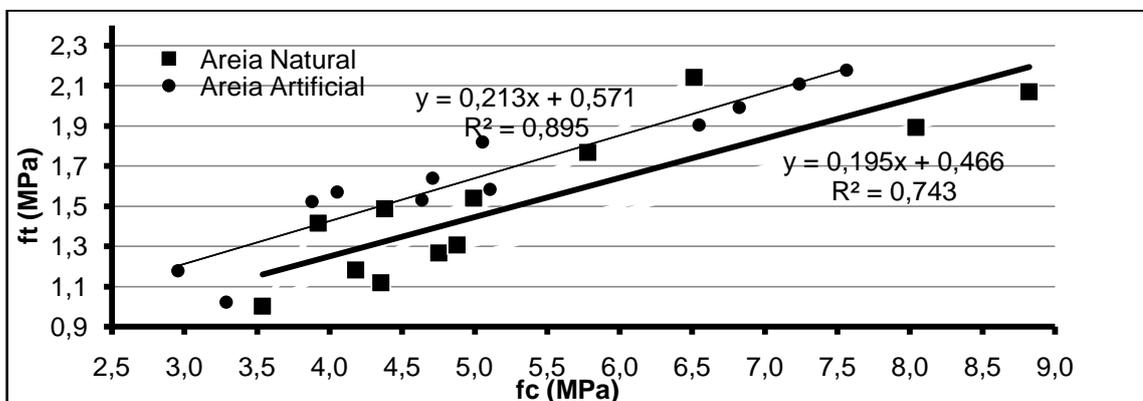


Gráfico 24 - Correlação linear entre compressão e tração na flexão aos 7, 21 e 28 dias de todas as curvas juntas

Isoladamente, a forma angular da areia artificial confere maior resistência à compressão, uma vez que as arestas das areias artificiais garantem maior aderência do agregado à pasta e tal efeito foi atestado nas curvas 1 e 2, onde a distribuição granulométrica (contínua) também favorece a propriedade. Analisando a curva 1, observa-se que, na idade de 28 dias, a areia artificial conferiu um aumento de 11 % na f_c e na idade inicial (7 dias), o ganho foi maior (28%). A forma angulosa da areia artificial agregou, mais consideravelmente, resistência nas idades iniciais. Entretanto, na curva em que não há predominância de granulometria contínua (curvas 4), o efeito forma não foi suficiente para compensar o efeito negativo da distribuição uniforme. Por esse motivo, a curva AN4 apresentou maior resistência do que e AA4. Cabe ressaltar que, matematicamente, os resultados de resistência à compressão em função da forma são diferentes, mas, estatisticamente, o Teste t mostrou que tais variações não são expressivas/significativas.

Foi observado que o efeito positivo da forma da areia artificial na resistência à compressão foi maximizado pela existência de uma curva granulométrica com distribuição contínua e bem graduada.

Conforme ABNT NBR 13281:2005, a curva AN2 está classificada como P6, AN1, AA1 e AA2 são P5, AN3, AN4 e AA3 como P4 e AA4, como P3, ou seja, a maioria das argamassas possui alta/média resistência à compressão.

6.2.10 Módulo de Elasticidade Dinâmico - E_d

Os dados obtidos durante o ensaio de ultrassom foram aplicados na Equação 11 a fim de obter E_d para cada curva estudada - Tabela 43 e Gráfico 25.

Tabela 43 - Resultados dos ensaios aos dias 28 do módulo de elasticidade dinâmico.

<i>Areia</i>	<i>Curva</i>	<i>E_d (GPa)</i>	<i>Erro (GPa)</i>
Areia Natural	1 (NBR 248:2003)	9,60	0,1
	2 (Carneiro e Cincotto)	12,00	0,3
	3 (Reed)	10,60	0,0
	4 (Reed)	8,30	0,0
Areia Artificial	1 (NBR 248:2003)	11,40	0,3
	2 (Carneiro e Cincotto)	10,70	0,4
	3 (Reed)	9,00	0,6
	4 (Reed)	7,30	0,2

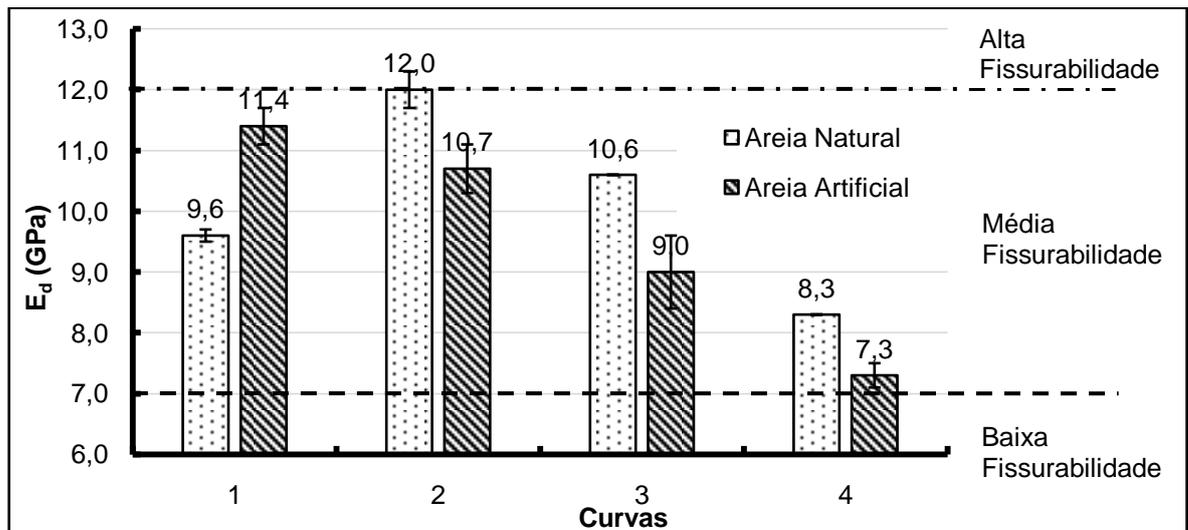


Gráfico 25 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das curvas com areias natural e artificial com limites de baixa e média fissurabilidade
Fonte: Autora (2014)

O módulo de elasticidade dinâmico representa a rigidez da argamassa no estado endurecido. Portanto, quanto maior ele for, mais rígida e com menor capacidade de deformação antes de ocorrer a ruptura será a argamassa.

Para verificar se a diferença de valores de E_d entre as curvas foi significativa, foi feito o Teste t e os resultados estão na Tabela 44.

Tabela 44 – Teste t para os resultado de E_d

Areia Natural	Teste t	Areia Artificial	Teste t	AA x AN	Teste t
AN1-AN2	*	AA1-AA2	*	AN1-AA1	*
AN1-AN3	*	AA1-AA3	*	AN2-AA2	*
AN1-AN4	*	AA1-AA4	*	AN3-AA3	*
AN2-AN3	*	AA2-AA3	*	AN4-AA4	*
AN2-AN4	*	AA2-AA4	*		
AN3-AN4	*	AA3-AA4	*		

* Pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os valores são diferentes;

** Hipótese nula não pode ser rejeitada, logo o valores são iguais;

Fonte: Autora (2014)

Os experimentos permitiram atestar que, no geral, há uma relação direta do E_d com a compressão axial e a massa específica no estado endurecido (curvas com AN e AA). O E_d , em função da densidade de massa no estado endurecido, garante rigidez à argamassa para resistir aos esforços de compressão. Os

maiores resultados foram garantidos pela distribuição contínua das curvas 1 e 2, em função do melhor arranjo granular proporcionado por esse tipo de distribuição.

A influência do fator forma também foi observada, uma vez que a maior compacidade oriunda do melhor arranjo granular proporcionado pelos grãos arredondados da AN conferiram, no geral, maiores E_d para argamassas com areia AN do que com AA. Além disso, os grãos artificiais possuem maior quantidade de material fino que torna as argamassas mais viscosas e com maior tendência a reter ar durante o amassamento. O teor de ar incorporado torna a argamassa menos rígida, portanto, com menor E_d . O módulo de elasticidade apresentou, no geral, relação de proporcionalidade inversa com o teor de ar incorporado. As bolhas de ar aumentaram a capacidade de deformação da argamassa e reduziram sua rigidez.

A maior porosidade de AN1 quando comparada com AA1 causou redução da rigidez da argamassa, reduzindo o módulo de elasticidade de AN1.

O teor de ar incorporado de AN2 é praticamente igual ao de AA2. Entretanto, os maiores diâmetros das bolhas de ar incorporado de AA2 potencializaram o efeito de redução da rigidez, reduzindo a resistência à compressão e o E_d dessa curva.

Os resultados mais baixos foram obtidos com as curvas 3 e 4 (tanto com AN quanto com AA). As distribuições com tendência à descontinuidade e principalmente à uniformidade prejudicaram o arranjo granular, geraram maiores quantidades de vazios e menor compacidade do que as demais curvas. O MF mais alto da curva 3 forneceu maior sustentação física e melhorou E_d em relação à curva 4. O alto teor de ar incorporado de AA3 e de AA4 reduziram E_d . Além disso, a curva AA4, que possui teor de ar incorporado mais alto de todas as curvas (além de maiores diâmetros de bolhas) apresentou o menor E_d de todas as argamassas.

As curvas com AA possuem mais material fino do que as curvas com AN, o que torna a fase matriz (cimento+pulverulento+água) mais viscosa e com maior tendência a reter ar durante o emassamento. Tal fato causa redução de E_d para as curvas com AA quando comparadas às curvas com AN.

A argamassa ao absorver os esforços atuantes tende a se deformar. O E_d deve possuir valor suficiente para resistir aos esforços sem se romper. Entretanto, rigidez em excesso impede a absorção da deformação e pode causar fissuras. Portanto, a tendência à fissurabilidade de uma argamassa depende de valores do módulo de elasticidade dinâmico e da relação dessa propriedade com a resistência à tração na flexão. (Gráfico 26).

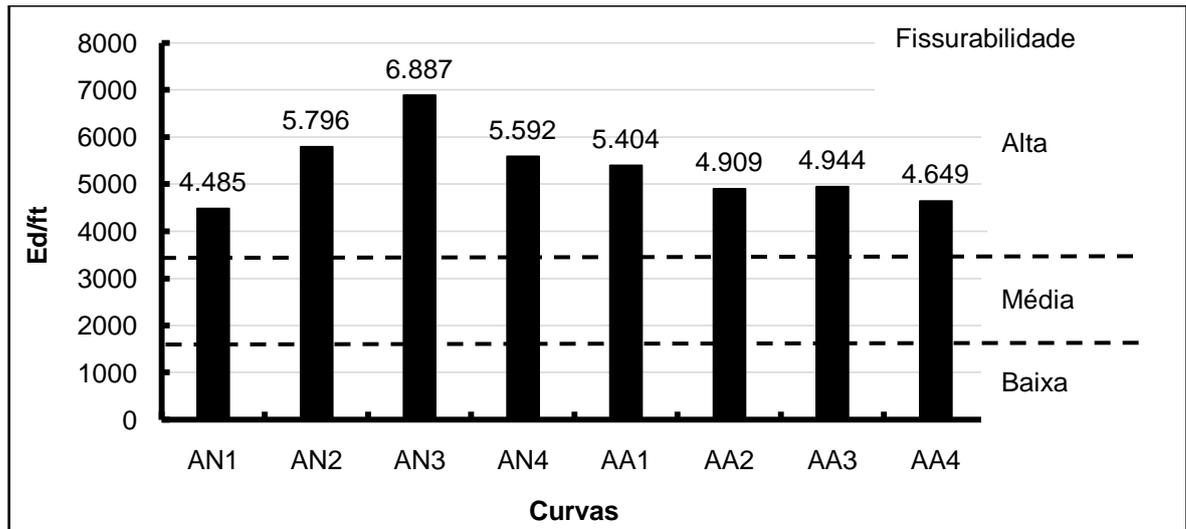


Gráfico 26 – Relação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão para as curvas com areias natural e artificial com limites de baixa e média fissurabilidade

Fonte: Autora (2014)

Em relação ao módulo de elasticidade, as argamassas são classificadas como média fissurabilidade ($7\text{GPa} < E_d < 12\text{ GPa}$). Entretanto, quando o parâmetro de avaliação é a relação E_d/f_t , elas são classificadas como alta fissurabilidade ($E_d/f_t > 3.500$).

7. CONCLUSÃO

7.1 Introdução à conclusão

O progresso da construção civil desperta a necessidade de pesquisa e desenvolvimento técnico de produtos aplicáveis à Engenharia Civil que garantam melhores propriedades e desempenho técnico, maior durabilidade, menor custo, com utilização de insumos que degradem menos a natureza e contribuam para manter a sustentabilidade ambiental.

A realização de todas as etapas propostas no programa experimental permitiu constatar que a utilização de agregado britado em substituição ao agregado natural é uma boa alternativa técnica, uma vez que garante boas propriedades das argamassas, além de evitar a degradação do meio ambiente. E essas vantagens podem ser potencializadas quando é utilizada uma distribuição granulométrica favorável.

7.2 Conclusões sobre as propriedades

7.2.1 *Massa específica unitária solta*

Foi atestado que a forma irregular e angulosa da areia artificial desfavorece o empacotamento dos grãos e origina vazios, conseqüentemente, cria demanda de maior consumo de aglomerante para preenchimento. Entretanto, com a determinação de curvas granulométricas adequadas, com diâmetros que possibilitem maiores massas unitárias, será possível produzir argamassas com menos vazios, mais resistentes, menos porosas e mais duráveis.

7.2.2 *Consistência*

A distribuição granulométrica do tipo contínua favorece a consistência, entretanto, se a quantidade de água não for suficiente para envolver todos os grãos, tal benefício será reduzido. A distribuição descontínua favorece a consistência em função da maior mobilidade e menor atrito interno das partículas. A distribuição

uniforme desfavorece a consistência, uma vez que os grãos de mesmo tamanho enrijecem o sistema e pioram o rolamento grão a grão. Entretanto, a forma irregular da areia artificial contribui para diminuir o enrijecimento do sistema granular, reduzir o contato grão a grão e aumentar a consistência.

A variedade granular favorece o rolamento dos grãos maiores sobre os menores e favorece a consistência.

Agregado mais grosseiro possui superfície específica menor e, conseqüentemente, possui menor demanda de água de amassamento, carecendo de uma adequada definição da quantidade de água para evitar excesso de água livre na argamassa.

7.2.3 Densidade de massa nos estados fresco e endurecido e teor de ar incorporado

Foi possível concluir que quanto mais ar incorporado, menos densa será a argamassa fresca. A densidade de massa fresca correlaciona-se inversamente com o teor de ar incorporado. A distribuição granulométrica também influi, de forma que a distribuição contínua permite menor teor de ar incorporado e a distribuição com tendência à uniformidade, maior teor de ar. Além disso, curvas com areia artificial (presença de material fino) apresentam maior quantidade total de finos (cimento + material pulverulento) e tornam a fase matriz (cimento + pulverulento + água) mais viscosa e com maior tendência a reter ar durante o amassamento.

No geral, a forma angulosa dos grãos britados, além de sua maior massa específica real, favoreceram a densidade de massa no estado endurecido. A distribuição tendente à uniformidade prejudica essa propriedade, enquanto a distribuição granulométrica contínua favorece, mas esse efeito benéfico pode ser diminuído se não houver a correta definição de quantidade de água, o que gera redução do poder de envolvimento do grão com pasta. Além disso, módulo de finura mais alto favorece a densidade de massa no estado endurecido em função da maior robustez do esqueleto sólido.

7.2.4 Análise microestrutural através de lupa estereoscópica e de microscópio óptico

As imagens por lupa estereoscópica e por microscópio óptico auxiliaram na análise dos resultados dos experimentos, permitindo melhor interpretação e confirmação das propriedades resultantes da interação dos materiais de construção e seus processos executivos utilizados nas argamassas de revestimento e assentamento.

7.2.5 Absorção de água por imersão e porosidade

As curvas com areia natural produziram, no geral, argamassas mais porosas do que as curvas com areia artificial, porque nas argamassas com agregado natural há menor quantidade de material fino, resultando em um acréscimo da relação agregado/cimento, ou seja, menor quantidade relativa de cimento e menor quantidade de produtos hidratados, causando maior formação de vazios capilares, os quais respondem pela maior absorção das argamassas com AN. Além disso, para uma mesma granulometria, os grãos artificiais são mais fissurados superficialmente (processo de britagem gera fissuras nos agregados que permitem a percolação de água) e absorvem parte da água livre quando comparados com os agregados naturais, que apresentam menor demanda de água (menor absorção), ocasionando maior porosidade nas argamassas com AN.

7.2.6 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Foi observado que quanto menor for o diâmetro do poro, maior será a altura de penetração de água no capilar.

Foi possível concluir que a presença de ar incorporado na argamassa pode reduzir a absorção de água por capilaridade, uma vez que as bolhas de ar interrompem/dificultam a passagem do fluxo nos capilares. Além disso, foi constatado que bolhas de ar de maior diâmetro, quando comparadas com bolhas menores, contribuíram para potencializar esse efeito de redução da capilaridade.

As curvas 2 possuem praticamente o mesmo valor de teor de ar incorporado, mas em AA2 as bolhas são bem maiores do que em AN2 e elas contribuíram para reduzir bastante o coeficiente de capilaridade de AA2.

7.2.7 Resistência potencial de aderência à tração - A_d

A forma angular do agregado interfere positivamente na A_d , devido a melhor ancoragem dos grãos à pasta mas, isoladamente, não é garantia de acréscimo dessa propriedade. Ele depende do correto proporcionamento dos grãos, do adequado fator água/cimento (agregado artificial demanda mais água para uma mesma trabalhabilidade do que o agregado natural), da presença de material fino que poderá contribuir para melhorar o empacotamento dos grãos e tornar a matriz pasta mais viscosa (aumentando a área de contato e favorecendo a A_d).

Distribuição granulométrica descontínua, cuja mobilidade granular está facilitada, aumenta a consistência e facilita a área de contato da pasta com o substrato, favorecendo A_d . Entretanto, as arestas da areia artificial geram atrito granular nesse tipo de distribuição e desfavorecem a consistência e a área de espalhamento, causando redução de A_d .

A distribuição granulométrica do tipo uniforme, em função da rigidez granular, prejudica a consistência e a área de espalhamento e contribui para reduzir A_d . Entretanto, as arestas da areia artificial nesse tipo de distribuição contribuem para diminuir o enrijecimento do arranjo granular, aumentar a consistência e a área de espalhamento e gerar aumento de A_d .

7.2.8 Resistência à tração na flexão - f_t

No geral, os resultados de f_t e de f_c estão diretamente relacionados, de forma que um incremento no valor de f_c acarretou acréscimo de f_t . A distribuição contínua propicia menor quantidade de vazios, maior compacidade da densidade de empacotamento e melhora da resistência à tração na flexão, tanto com areia natural quanto com areia artificial. A distribuição descontínua piorou o arranjo dos grãos e causou redução de 28% na f_t de AN3 em relação a AN1. A distribuição tendente à uniformidade, devido à ausência de alguns diâmetros, gerou muitos

vazios e conferiu os resultados mais baixos de f_t . O maior acréscimo dessa propriedade foi observado nas primeiras idades e as areias artificiais produziram, no geral, maiores f_t .

O efeito da forma dos agregados foi atestado: as arestas da AA garantiram melhor travamento do grão à pasta e aumentaram f_t , com exceção da curva 1, onde a quantidade de água não foi totalmente adequada ao seu MF e reduziu o poder de envolvimento do grão com pasta, principalmente com AA (maior demanda de água). Cabe ressaltar que o Teste t mostrou que, estatisticamente, tais variações não foram expressivas.

7.2.9 Resistência à compressão axial - f_c

No geral, foi observado que a forma angular das areias artificiais favorece a f_c (principalmente nas primeiras idades), desde que a distribuição granulométrica não seja desfavorável (uniforme), situação em que as angulosidades aumentam o atrito grão a grão e prejudicam o empacotamento das partículas. O massa específica real mais alta (AA), a maior densidade de massa no estado endurecido, a sustentação física garantida pelos diâmetros grosseiros, os poros de menores diâmetros e a granulometria contínua também favorecem a resistência à compressão axial. A distribuição granulométrica contínua é a que mais favoreceu a f_c seguida pela distribuição descontínua e a distribuição que menos favoreceu essa propriedade foi aquela com tendência à uniformidade. Cabe ressaltar que o Teste t mostrou que, estatisticamente, tais variações não foram expressivas.

7.2.10 Módulo de elasticidade dinâmico - E_d

A relação direta do E_d com a resistência mecânica e a massa específica no estado endurecido (curvas com AN e AA), no geral, foi atestada nos experimentos, de forma que E_d , em função da densidade de massa no estado endurecido, garante rigidez à argamassa para resistir aos esforços de compressão. Além disso, areia artificial contém grande quantidade de finos que tornam a argamassa mais viscosa e com maior tendência a reter ar incorporado. O ar incorporado deixa a argamassa menos rígida e com menor E_d . O módulo de

finura mais alto confere maior robustez e também maior E_d . O módulo de elasticidade está relacionado diretamente com a resistência à compressão e indiretamente com o teor de ar incorporado.

Os grãos arredondados da AN promoveram maior compacidade oriunda do melhor arranjo granular que, no geral, propiciaram maiores E_d para argamassas com areia AN do que com AA. Tal fato repercutiu em argamassas com tendência à média e alta fissurabilidade.

Cabe ressaltar que o Teste t mostrou que, estatisticamente, as variações de E_d em função da variação da forma e da distribuição também foram expressivas.

7.3 Quadro comparativo dos resultados dos ensaios

As variações das propriedades, em função das diferentes formas e distribuições granulométricas, estão apresentadas na tabela 45.

Tabela 45 – Quadro comparativo de propriedades em função do tipo de distribuição granulométrica e da forma do agregado

Propriedade	Distribuição Contínua		Distribuição Descontínua		Distribuição Uniforme	
	AN	AA	AN	AA	AN	AA
Consistência	VARIÁVEL		+ ALTOS		+ BAIXOS	
	↑	↓	↑	↓	↓	↑
Teor de Ar Incorporado	+ BAIXOS		VARIÁVEL		+ ALTOS	
	≅	≅	↓	↑	↓	↑
Massa Específica no Estado Fresco	+ ALTOS		VARIÁVEL		+ BAIXOS	
	↓	↑	↑	↓	≅	≅
Massa Específica Fresca	+ ALTOS		+ ALTOS		+ BAIXOS	
	↓	↑	↓	↑	≅	≅
Resistência à Tração - f_t	+ ALTOS		VARIÁVEL		+ BAIXOS	
	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Resistência à Compressão - f_c	+ ALTOS		+ BAIXOS		+ BAIXOS	
	↑	↓	≅	≅	↑	↓
Módulo de Elasticidade - E_d	VARIÁVEL		VARIÁVEL		+ BAIXOS	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Resistência Aderência - A_d	+ ALTOS		+ ALTOS		+ BAIXOS	
	↓	↑	↑	↓	↓	↑
Porosidade Superficial	+ ALTOS		VARIÁVEL		VARIÁVEL	
	↑	↓	↓	↑	↑	↓
Capilaridade	VARIÁVEL		VARIÁVEL		VARIÁVEL	
	↑	↓	↓	↑	↑	↓

7.4 Considerações finais

Diante do programa experimental, foi possível avaliar que a forma dos agregados e sua distribuição granulométrica podem influenciar as propriedades das argamassas tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Ficou evidenciado que a escolha do tipo de areia a ser utilizado, além de sua distribuição granulométrica, deve ser adequado às características desejadas da argamassa e à vida útil da edificação. Essa escolha é primordial para o bom desempenho e para a garantia de qualidade dos produtos gerados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEPAC. **Anuário Anepac 2012**. Disponível em: <http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/09/Anuario_-Anepac_2012.pdf> Acesso em 10/12/213.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13116: **Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação**, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA MERCOSUL. **NBR NM 76: Cimento Portland: Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA MERCOSUL. **NM 2: Cimento, concreto e agregados – Terminologia - Lista de termos**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA MERCOSUL. **NM 23: Cimento Portland - Determinação e massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA MERCOSUL. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA MERCOSUL. NM 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: **Cal virgem e cal hidratada - Análise química**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6473: **Cal hidratada para argamassas - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear).** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregado para Concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3310: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961: Alvenaria estrutural — Blocos de concreto – parte 1 e 2.** Rio de Janeiro, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados— Terminologia.** Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529: Revestimento de Paredes e Tetos de Argamassas Inorgânicas - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimentos de Argamassa.** 4. ed. São Paulo: Editora O Nome da Rosa, 2008.

BARBOSA, M. T. G., SANTOS, W. J., PEREIRA, P. S. Correlação entre métodos destrutivos e não destrutivos empregados na análise da qualidade de argamassa. **Anais do IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas - CINPAR.** Paraíba, jun/2013.

BAUER, E. **Revestimentos de Argamassa. Características e Peculiaridades.** 2.ed. Brasília: LEM-Unb; Sinduscon, 2005. 92p.

BAUER, L. A. FALCÃO. **Materiais de Construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000. 1v. 471p.

CALLISTER, JR., W. D., DAVID, G. R. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução.** 8.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2012. 1v. 817 p.

CARASEK, H.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ibracon – Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. 1 v. 795p.

CARASEK, H., CASCUDO, O., SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, IV, 2001, Brasília. Anais. Brasília: PECC/ANTAC, 2001. p43-67. Apud CARVALHO JR., A. N., Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte:2005.331p.

CARDOSO, F. A. **Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo: 2009. 158p.

CARNEIRO, A. M. P., CINCOTTO, M. A. Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas. **IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.** São Paulo, ISSN 0103-9830, BT/PPCC/237,p.1-18,1999.

CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da Aderência dos Revestimentos Argamassados: Uma Contribuição à Identificação do Sistema de Aderência Mecânico.** Tese (Doutorado) - Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte:2005. 331p.

CASALI, J. M., PRUDÊNCIO, L., R., J. Influência da quantidade de cal e da granulometria nas propriedades das argamassas mistas de assentamento de blocos de concreto de alvenaria estrutural. **VI SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas.** Santa Catarina, Brasil.2005.

CINCOTTO, M. A., ANGULO, S. C., CARNEIRO A. M. P. Composições Granulométricas de argamassas e seus efeitos no estado fresco e endurecido. **APFAC – Associação Portuguesa de Fabricantes de Argamassa de Construção**. Portugal, 2012. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS. Documento 101.

CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C. CARASEK, H. C. Argamassas de Revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio. **IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas**. São Paulo, Boletim Técnico nº 68, 1995.

CINCOTTO, M. A. Avanços em Tecnologia de Argamassas. **X SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**. Fortaleza, 2013.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning**. Virtual Book, 1999. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=tXHjwTa0_tkC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false> Acesso em 11/12/2013.

DE LARRARD, F. Concrete Optimisation With Regard to Packing Density and Rheology. **3rd International RILEM Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete**. France, v.1, n.215, p.1-8, 2009.

DIDONÉ, E. J. **Técnica a Laser para Descrição do Tamanho das Partículas**. 2011. Disponível em <http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Disciplinas/FisicaSolo/SEM_granulometria_laser.pdf>. Acesso em 28/01/2014.

FIORITTO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos - Estudos e Procedimentos de Execução**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2009. 1v. 231 p.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concreto de Altíssimo Desempenho**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia - COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro: 2005. 285p.

FREITAS, C.. **Argamassas de Revestimento com Agregados Miúdos de Britagem da Região metropolitana de Curitiba: Propriedades no Estado Fresco e Endurecido**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná: 2010. 158p.

GAZOLA, A. P. **Argamassas de Assentamento e Revestimento Fabricadas com Compósito de Cimento-Madeira: Serragem da Madeira de Pinus Taeda.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, Santa Catarina, 2007.

GOBLE, C. F., COHEN, M. D. Influence of aggregate surface area on mechanical properties of mortar. **ACI Materials Journal.** 1v, p. 657-662, Nov.-Dez./1999.

GOMES, A. M. **Caracterização de Argamassas Tradicionais Utilizadas nos Revestimentos Exteriores dos Edifícios.** Tese (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa:1995, 149p.

GOMES, P. C. C., BARROS, A. R. **Métodos de Dosagem em Concreto Autoadensável.** 1.ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2009. 1v. 164p.

GONÇALVES, J. P., TAVARES, L. M., FILHO, R.D., FAIRBAIN, E. M. R., CUNHA, E. R. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research.**v.37,n.6, p.924-932, jun./2007.

ISAIA, G.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 1v. 862p.

KADRI, El Hadj, DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal.** p. 138-142, Mar.-Abr./2002.

KALAGRI, A., KARATASIOS, I., KILIKOGLU, V. The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars. **Construction and Building Materials.** v.53, p.467-474, nov./2013.

LACERDA, B. R. M., VALVERDE, M. V. **HP200 – Transformando o Seixo Rolado em Areia de Alta Qualidade.** Revista Areia e Brita. São Paulo, v.1, n.59, p.1-42, Abr/Mai/Jun/2013.

LANGE F., MORTEL, H., RUDERT, V. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. **Cement and Concrete Research.**v.27, n.10, p.1481-1488, 1997.

LI, L. G., KWAN, A. K. H. Packing density of concrete mix under dry wet conditions. **Powder Technology.** n.253, p.514-521, dez./2013.

MALVERN, L. **Difração Laser**. Disponível em http://www.malvern.com/br/products/technology/laserdiffraction/default.aspx?gclid=CP_zzJblobwCFcY7OgodvBEAPg. Acesso em 28/01/2014.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2008. 1v. 674 p.

MENG L., LU P., LI S., ZHAO, J., LI, T. Shape and size effects on the packing density of binary spherocylinders. **Powder Technology**. v.228, p.284-294, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. 2.ed. São Paulo: Editora Bookman, 2013. 1v. 472p.

PEÑA, M. R. G. **Estudo da Fissuração Associada à Retração em Argamassas pra reparos em estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo:2004,107p.

PENG Y., HU S., DING Q. Dense Packing Properties of Mineral Admixtures in Cementitious Material. **Particology Science and Technology of Particles**. n.7, p.399-402, 2009.

REED, James S. **Principles of Ceramics Processing**. 2. ed: Nova York, EUA. John Wiley and Sons, Inc, 1995.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de Assentamento para Paredes de Alvenaria Resistente**; Estudo Técnico ET-91. 2.ed.São Paulo: ABCP, 1998. 44p. apud CARVALHO JR., A. N., Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico. Belo Horizonte:UFMG, 2005. 331p. (Doutorado em Engenharia Metalúrgica de Minas).

SAHMARAN, M., LACHEMI, M., HOSSAIN, K. M. A., RANADE,R., LI, V. C. Influence of Aggregates Type and Size on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. **ACI Materials Journal**, p.308-316,Mai.-Jun., 2009.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de Resíduos Minerais na Formulação de Argamassas para a Construção Civil**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2008, 257 p.

SANTOS, W. J. **Argamassa de Alto Desempenho**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Minas Gerais: 2011, 209 p.

SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de Metodologia de Dosagem de Argamassas de Revestimento e Assentamento**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Engenharia Civil, Minas Gerais: 2014. 257 p.

SILVA, A. P., SEGADÃES, A. M., DEVEZAS, T. C. Optimization of the packing density of alumina powder distributions using statistical techniques. **Cerâmica**. v.50, n.316, p. 345-354, 2004.

SILVA, N. G., BUEST, G., CAMPITELLI, V. C. Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. **VI SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**. Santa Catarina, Brasil. Mai/2005.

SILVA, N. G., CAMPITELLI, V. C., GLEIZE, P. J. P. A influência dos finos de areia de britagem de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. **VI SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas Santa Catarina**, Brasil. 2005.

SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba:2006. 164p.

SOUSA, J. G. G.; LARA, P. L. O. Reologia e trabalhabilidade das argamassas. In: BAUER, Elton (Coord.). **Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades**. Brasília, p.23-29,2007.

SOUZA, R., MEKBEKIAN, G., FRANCO, L. S., BARROS, M. M. S. B., ASSAHI, P. N., UEMOTO, K. L. **Qualidade na Aquisição de Materiais e Execução de Obras**. 1ed. São Paulo: Ed. Pini, 1996. 275p. apud CARVALHO JR., A. N., Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2005.331p. (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

WEITZ, D. A. Packing in the Spheres. **Science Direct - Elsevier**. n.303, p.968,fev./2004.

YAMAN, I. O.; INCI, G.; YESILLER, N.; AKTAN, H. M. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. **ACI Materials Journal**, p.450-457, Nov.-Dez./2001.

ZOPPAS, F. **Granulometria por Difração a Laser**. Engenhamentos, 2012. Disponível em:
<<http://engenhamentos.blogspot.com.br/2012/06/granulometria-por-difracao-de-laser.html>> Acesso em 28/01/2014.

9. ANEXOS

9.1 Anexo 1 - Análise físico-química do cimento CP-II-E32

Análise Físico-química do cimento CP-II-E-32.

Compostos/Ensaio	Norma / Análise	%	Limites NBR 1578
PF 1000°C	NBR NM 18	5,23	≤ 6,5
SiO ₂	NBR 14656	24,13	-
R. I.	NBR NM 15	2,3	≤ 2,5
Al ₂ O ₃	NBR 14656	6,9	-
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,43	-
CaO	NBR 14656	55,65	-
MgO	NBR 14656	2,07	-
SO ₃	NBR 14656	1,54	≤ 4,0
CO ₂	NBR NM 20	4,77	≤ 5,0
K ₂ O	NBR 14656	0,62	-
PF 500 °C	IT Holcim	0,43	-
C ₃ A (Teórico)	Equação de Bogue	4,84	-
# 325 (%) NBR 9202	Média	8,8	
	Desvio Padrão	2,53	
	Nº de Amostras	8	
Blaine (cm ² /g)	Média	3700	≥ 2600
	Desvio Padrão	212,1	
	Nº de Amostras	8	
Início de Pega (min) NBR NM 65	Média	192	≥ 60
	Desvio Padrão	16	
	Nº de Amostras	8	
Fim de Pega (min) NBR NM 65	Média	253	≤ 600
	Desvio Padrão	19	
	Nº de Amostras	8	
Resistência a 1 dia (MPa) NBR 7215	Média	5,9	
	Desvio Padrão	0,56	
	Nº de Amostras	8	
Resistência a 3 dias (MPa) NBR 7215	Média	17,9	
	Desvio Padrão	0,49	
	Nº de Amostras	8	
Resistência a 7 dias (MPa) NBR 7215	Média	24,9	
	Desvio Padrão	0,46	
	Nº de Amostras	8	
Resistência a 28 dias (MPa) NBR 7215	Média	36,0	
	Desvio Padrão	0,56	
	Nº de Amostras	8	

Fonte: Relatório de Ensaio de Cimento Holcim, Fábrica de Pedro Leopoldo/MG, 1pg, 2014

9.2 Anexo 2 - Composição química da cal hidratada

Composição química da Cal Hidratada

<i>Parâmetros</i>	<i>Unidade</i>	<i>Resultados</i>	<i>Especificação</i>
CaO combinado com CaSO ₄	%	0,09	-
CaO combinado com CaCO ₃	%	4,08	-
Água Combinada	%	21,83	-
CaO Hidratado	%	67,89	-
CaO Não Hidratado	%	Não detectado	-
MgO Hidratado	%	0,01	-
Óxido de Cálcio e Magnésio Não Hidratado Calculado	%	0,63	Máx 10,00
Umidade	%	0,21	-
Trióxido de Enxofre	%	0,13	-
Óxidos Totais na Base de Não Voláteis	%	97,23	Mín 90,00
Perda ao Fogo	%	25,25	-
Óxido de Cálcio	%	72,04	-
Óxido de Magnésio	%	0,64	-
Dióxido de Carbono	%	3,21	Máx 7,00

Fonte: Relatório de Ensaio N° QUI/L-247882/1/14, Centro Tecnológico de Controle de Qualidade, Falcão Bauer, 2 pg, 2014