

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**"ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE DOSAGEM DE
ARGAMASSA ESTRUTURAL AUTO ADENSÁVEL"**

Autor: Thiago Ferreira Barbosa
Orientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Belo Horizonte
Dezembro/2016

Thiago Ferreira Barbosa

**"ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE DOSAGEM DE
ARGAMASSA ESTRUTURAL AUTO ADENSÁVEL"**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais Cimentícios.

Orientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016

THIAGO FERREIRA BARBOSA

**"ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE DOSAGEM
DE ARGAMASSA ESTRUTURAL AUTOADENSÁVEL"**

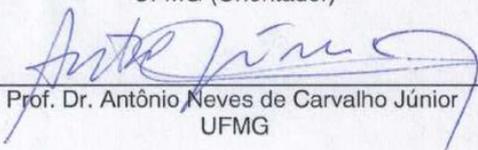
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2016

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. White José dos Santos
UFMG (Orientador)



Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
UFMG



Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali
UFMG

Dedico este trabalho aos meus pais, Barbosa e Jussara, aos meus irmãos Gustavo e Fernanda, e à minha esposa Rosinha. De maneira especial ao meu orientador Prof. Dr. White José dos Santos por dividir comigo o peso das minhas dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força e saúde para encarar esse desafio, sem os quais fatalmente tudo não seria possível;

De forma especial agradeço ao meu orientador Prof. White Jose dos Santos, que com poder de compreensão ímpar foi meu guia durante o período desse trabalho, cuja paciência e sabedoria tornaram possível a conclusão dessa pesquisa em meio às minhas dificuldades;

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior e Prof. Dr. Roberto Braga Figueiredo pelas contribuições e sugestões apresentadas durante o desenvolvimento da pesquisa;

Aos membros da Banca Examinadora desse trabalho, Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior e Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali, por terem aceitado o convite e pelas sugestões e contribuições;

Agradeço aos colaboradores e coordenadores dos Laboratório de Geotecnia, Laboratório de Concreto, Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais;

Agradeço ao meu pai Barbosa, por compreender minhas dificuldades nesses últimos anos, à minha mãe Jussara por alimentar em mim a coragem de encarar esse desafio e principalmente permanecer nele durante esse período. Agradeço ao meu irmão Gustavo pela sabedoria e pelos conselhos, à minha irmã Fernanda pelo carinho e compreensão. A todos eles eu agradeço por entenderem minha ausência nos últimos anos;

À minha esposa Rosinha eu agradeço o companheirismo, paciência, cuidado, carinho e amor, que me mantiveram no caminho;

Agradeço aos alunos e companheiros de trabalho Lucas Riccio e Alessandra Souza pela ajuda fundamental durante toda a pesquisa, e à Eng^a. Sabrina Rocha pelo auxílio nos ensaios de laboratório;

Agradeço ao Eng. Leonardo Botelho Arouca por me incentivar a iniciar esse trabalho, ao Grupo Orguel por possibilitar meu envolvimento no desenvolvimento da pesquisa. À Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade de aprendizado;

Agradeço a todos os meus familiares e amigos, dos quais fiquei mais distante nos últimos anos para me dedicar a esse desafio. Sou grato pela paciência e compreensão de todos;

De maneira geral agradeço a todos que de alguma maneira participaram dessa jornada comigo, cuja qual certamente não finalizaria sozinho, meu muito obrigado.

RESUMO

O mercado da construção civil tem demandado procedimentos cada vez mais eficientes e padronizados, que possibilitem a industrialização do segmento. Atualmente são poucos os métodos de dosagem e execução de argamassas auto adensáveis e de alta resistência, o que dificulta a padronização de sua produção. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia de dosagem de Argamassa Estrutural Auto Adensável com foco em estruturas pré-moldadas, que possibilite sua produção de maneira padronizada atendendo a todos os parâmetros desejados, validar essa metodologia e avaliar as propriedades da argamassa produzida. Para a validação foi utilizada areia natural, cimento Portland CP-V, pó de calcário e o superplastificante ViscoCrete 20 HE para produção de argamassas utilizando a metodologia desenvolvida. Foram realizados os seguintes ensaios para se obter as propriedades para avaliação das argamassas: *mini-cone slump test*, *mini v-funnel test*, densidade de massa no estado fresco e endurecido, índice de absorção de água, porosidade, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão axial, carbonatação, resistividade elétrica e imagem de microscópio digital. O trabalho propõe a determinação da dosagem de maneira experimental, de acordo com os materiais utilizados. Também é proposto a substituição de parte do cimento por adição, diminuindo o custo da produção da mistura e dos impactos ambientais. Conclui-se que o método é eficiente, eficaz e de execução de baixa complexidade, o que permite que seja replicado em laboratórios, fábricas e canteiro de obra. Os dados são obtidos com uma confiabilidade de 95% (Teste t).

Palavras Chave: Argamassa, Alta Resistência, Metodologia, Dosagem.

ABSTRACT

The civil construction market has demanded increasingly efficient and standardized procedures that allow the industrialization of the segment. Currently there are few methods of dosing and execution of self-compacting and high strength mortars, which makes it difficult to standardize their production. The objective of this work is to develop a methodology for the dosing of self-compacting structural mortar with a focus on precast structures, allowing its production in a standardized way, taking into account all the desired parameters, validating this methodology and evaluating the properties of the mortar produced. For the validation, natural sand, Portland cement CP-V, limestone powder and ViscoCrete 20 HE superplasticizer were used for the production of mortars using the methodology developed. The following tests were performed to obtain the properties for evaluation of mortars: mini-cone slump test, mini v-funnel test, fresh and hardened mass density, water absorption index, porosity, dynamic modulus of elasticity, axial compression strength, carbonation, electrical resistivity and digital microscope image. The work proposes the determination of the dosage in an experimental way, according to the materials used. It is also proposed to replace part of the cement by addition, reducing the production cost of the mixture and the environmental impacts. It is concluded that the method is efficient, effective and of low complexity execution, which allows it to be replicated in laboratories, factories and construction sites. The data are obtained with a reliability of 95% (t test).

Keywords: Mortar, High Strength, Methodology, Dosage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ação dispersiva dos plastificantes - 1) partículas dispersadas pelo efeito do plastificante; 2) partículas floculadas.....	16
Figura 2 - (a) Cone utilizado no <i>Mini-cone slump flow test</i> (b) Funil em V utilizado no <i>Mini V-funnel test</i>	18
Figura 3 - Fluxograma do Método de Dosagem ACI. As tabelas estão no ANEXO I enumeradas conforme fluxograma.	27
Figura 4 - Fluxograma do Método de Tutikian e Dal Molin (2007).	29
Figura 5 - Diagrama de (a) Dosagem e (b) Desempenho.....	31
Figura 6 - Comparação entre as proporções de materiais utilizados no concreto auto adensável e em concretos convencionais.	32
Figura 7- Organograma da metodologia proposta.	43
Figura 8 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural utilizado.	53
Figura 9 - Granulometria da Adição.....	54
Figura 10 – Resultado da massa específica no estado fresco e no endurecido.....	59
Figura 11 - Consumo de material em função da resistência à compressão axial a 28 dias.	60
Figura 12 - Consumo de material em função do índice de absorção a 28 dias.....	61
Figura 13 - Resultados da massa específica seca do traço ideal em 28 dias.	63
Figura 14 - Resultados da resistência à compressão axial do traço Ideal em 28 dias.	64
Figura 15 - Resultados do índice de absorção do traço Ideal após 28 dias.	64
Figura 16 - Resultados do ensaio de porosidade.	66
Figura 17 – Imagem do Microscópio digital do Traço 1. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.....	67
Figura 18 - Imagem do Microscópio digital do Traço 2. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.....	67

Figura 19 - Imagem do Microscópio digital do Traço 3. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.	68
Figura 20 - Imagem do Microscópio digital do Traço 4. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.	68
Figura 21 - Imagem do Microscópio digital do Traço 5. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.	68
Figura 22 - Imagem do Microscópio digital do Traço Ideal. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.	69
Figura 23 - Módulo de elasticidade dinâmico das amostras.	70
Figura 24 - Resistividade elétrica das amostras.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio realizados no programa experimental.	36
Tabela 2- Caracterização do agregado miúdo.	53
Tabela 3 - Tabela de Caracterização da adição.	54
Tabela 4 - Traços em massa.	57
Tabela 5 - Resultados da massa específica no estado fresco (γ_f) e no estado endurecido (γ_e) e os desvio padrão (DP) e erro dos experimentos.	58
Tabela 6 – Desvio padrão dos resultados da resistência à compressão axial	59
Tabela 7- Resultados do índice de absorção de água e desvio padrão (DP) e erros.	61
Tabela 8 - Resultados dos ensaios das propriedades balizadoras.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Association

AEAA – Argamassa Estrutural Auto Adensável

ARI – Alta Resistência Inicial

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP – Cimento Portland

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

RENURB – Companhia de Renovação Urbana de Salvador

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_{rea} – área da seção transversal do corpo de prova (mm^2)
- A_i – absorção de água por imersão (%)
- $A_{resistividade}$ – área transversal da amostra atravessada pela corrente (m^2)
- d – densidade de massa da argamassa no estado fresco (g/cm^3)
- D_m – diâmetro médio após o fluxo da argamassa no *mini-cone slump flow test*
- DP – Desvio Padrão
- D_0 – diâmetro inicial da base do cone no *mini-cone slump flow test*
- E_d – módulo de elasticidade dinâmico (MPa)
- f_c – resistência à compressão axial (MPa)
- F_c – carga máxima aplicada (N)
- F_d – limite de dosagem de uma determinada propriedade da argamassa
- F_k – limite característico de uma determinada propriedade da argamassa
- $FV_{ag/ci}$ – fator água/cimento em volume aparente
- $FM_{ag/ci}$ – fator água/cimento em massa
- G_m – Parâmetro de medida do *mini-cone slump flow test*
- I – corrente (Amperes)
- L – comprimento do corpo de prova ((mm) no ensaio de módulo de elasticidade, (m) no ensaio de resistividade elétrica)
- m_c – massa do recipiente contendo argamassa de ensaio (g)
- m_i – massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g)
- m_s – massa da amostra seca (g)
- m_{sat} – massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g)
- m_{sub} – massa do corpo de prova submerso em água (g)
- m_v – massa do recipiente vazio (g)
- n – frequência do modo fundamental da vibração longitudinal (Hz)
- n – número de amostras
- P – Porosidade (%)
- $P_{água}$ – consumo de água no traço (%)
- P_{areia} – teor de agregados miúdos no traço (%)
- $P_{cimento}$ – consumo de cimento no traço (%)
- P_s = relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis (g/cm^3)

P_{vazios} – coeficiente de vazios (%)

R – resistência elétrica (Ω -Ohm)

R_m – Parâmetro de medida do *mini v-funnel test* (segundos⁻¹)

S – maior desvio padrão das amostras analisadas na referida propriedade

t – tempo de escoamento no *mini v-funnel test* (segundos)

$t [(a/z) (n-1)]$ – valor tabelado (Distribuição t) para um nível de significância e grau de liberdade $(n-1)$

V – diferença de potencial (Volt)

V_r – volume do recipiente cilíndrico (cm³)

V_s – volume de sólidos (litros)

V_t – volume total (litros)

V_v – volume de vazios (litros)

γ_u – massa específica unitária compacta do agregado miúdo (g/cm³)

$\gamma_{u(c)}$ – massa específica unitária do cimento

$\gamma_{u(ag)}$ – massa específica unitária da água

γ_r – massa específica real do agregado miúdo, (g/cm³)

$\gamma_f - d$

$\gamma_e - P_s$

ρ – densidade (Kg/m³)

$\rho_{\text{elétrica}}$ – resistividade elétrica (Ωm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo	3
1.4 Limitação da Pesquisa.....	4
1.5 Estrutura da Pesquisa.....	4
2 ARGAMASSA ARMADA	5
2.1 Definição do Sistema Argamassa Armada.....	5
2.2 Histórico do Sistema Argamassa Armada	5
2.3 Agregados para Argamassa	7
2.3.1 Porosidade e Absorção	7
2.3.2 Aderência e resistência mecânica	8
2.3.3 Forma, textura e distribuição granulométrica.....	8
2.3.4 Substâncias deletérias dos agregados	10
2.4 Cimento Portland	10
2.4.1 Conceitos, tipos e composição química.....	11
2.4.2 Propriedades do cimento que interferem na argamassa.....	12
2.5 Adições.....	13
2.6 Aditivos	14
2.7 Propriedades da Argamassa.....	17
2.7.1 Consistência e trabalhabilidade.....	17
2.7.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	18
2.7.3 Permeabilidade e absorção de água	19
2.7.4 Módulo de elasticidade.....	20
2.7.5 Resistência mecânica.....	21
2.7.6 Carbonatação.....	21

2.7.7 Resistividade elétrica	22
3 METODOLOGIAS DE DOSAGEM	24
3.1 Metodologia de dosagem de Selmo (1989).....	24
3.2 Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas: método de Carneiro e Cincotto (1999)	25
3.3 Método de dosagem do <i>American Concrete Association</i> (ACI)	27
3.4 Método de dosagem de concreto auto adensável de Tutikian e Dal Molin (2007) ..	28
3.5 Método de dosagem de Okamura e Ouchi (2003)	31
3.6 Método de dosagem de Santos (2014)	32
4 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	35
4.1 Considerações Iniciais	35
4.2 Materiais	35
4.3 Programa Experimental	36
4.3.1 Consistência e viscosidade pelo método mini-cone slump flow test e o mini v-funnel test	37
4.3.2 Densidade de massa no estado fresco.....	37
4.3.3 Massa específica da amostra seca no estado endurecido.....	38
4.3.4 Índice de absorção de água no estado endurecido e porosidade.	38
4.3.5 Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	39
4.3.6 Resistência característica à compressão.....	40
4.3.7 Resistividade Elétrica	40
5 PROPOSTA DE MÉTODO DE DOSAGEM DE ARGAMASSA ESTRUTURAL AUTO ADENSÁVEL.....	42
5.1 Considerações Iniciais e organograma de dosagem.....	42
5.2 Parâmetros condicionantes ao início da dosagem	43
5.3 Método de dosagem proposto	44
5.3.1 Quantidade de agregado no traço	44
5.3.2 Quantidade de água e aditivo superplastificante no traço.....	45

5.3.3 Quantidade de cimento e adição	46
5.3.4 Ajuste experimental dos traços.....	49
5.3.5 Definição das propriedades e moldagem dos corpos de prova.....	50
5.3.6 Definição do traço ideal	50
6 RESULTADOS E ANÁLISES	52
6.1 Definição dos parâmetros físicos e de aplicação dos materiais	52
6.1.1 Materiais	52
6.1.2 Condicionantes de utilização	54
6.2 Consumo de agregado	55
6.3 Consumo de água e superplastificante	55
6.4 Consumo de cimento	56
6.5 Consumo de adição	56
6.6 Definição do Traço Ideal	58
6.6.1 Massa específica no estado fresco e endurecido	58
6.6.2 Resistência característica à compressão axial	59
6.6.3 Índice de absorção de água	60
6.6.4 Escolha do traço ideal	62
6.7 Validação da metodologia.....	62
6.8 Propriedades complementares	65
6.8.1 Porosidade	65
6.8.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	69
6.8.3 Resistividade elétrica	71
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
7.1 Metodologia de dosagem.....	73
7.2 Validação do método e análise das propriedades da argamassa	74
7.3 Processo de mistura	76
7.4 Sugestões para trabalhos futuros	77
8 CONCLUSÃO	78

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXO I	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os registros da origem da utilização de argamassa armada vêm de 1848, com Joseph Louis Lambot (TRIGO, 2009). A difusão da utilização da argamassa armada é uma opção na industrialização da construção, pois viabiliza a fabricação de peças pré-fabricadas mais esbeltas, com menor consumo de material, maior facilidade de transporte e montagem, durabilidade e impermeabilidade, e ainda com alto índice de produtividade (TRIGO, 2009). Esse produto desenvolve-se no Brasil somente a partir da década de 1980 com obras como as de saneamento da prefeitura de Salvador lideradas pela Companhia de Renovação Urbana de Salvador (RENURB), e construção de escolas no Rio de Janeiro (TRIGO, 2009).

Várias pesquisas estão sendo desenvolvidas com foco nos métodos executivos de projetos de pré-moldados (TRIGO, 2009), voltadas no estudo dos materiais que o compõem (CAMPOS, 2005), análise de comportamento de concreto protendido (FURLAN Jr., 1991), simulações em pequena escala de estruturas de concreto armado para estudos do seu comportamento mecânico (SCHWETZ, 2005), reforço em estruturas de concreto armado (REIS, 1998), entre outras aplicações.

A argamassa armada é caracterizada como de alta resistência característica à compressão, sendo conhecida também como microconcreto (KHALEEL e RAZAK, 2012; SCHWETZ, 2005), microconcreto de alto desempenho (CAMPOS, 2005) ou argamassa de alto desempenho (REIS, 1998). Argamassa armada, segundo ABNT NBR 11.173:1990, é a denominação que se dá ao conjunto argamassa, com no mínimo 25 MPa de resistência característica a à compressão, e malhas de aço. Constitui-se de peças de pequena espessura, composta de argamassa e armadura de telas de aço de malhas de abertura limitada, distribuída em toda a seção transversal.

As argamassas armadas exigem um controle rigoroso na sua execução devido à aplicação das telas, pequenas espessuras de placa e cobrimentos (TEIXEIRA, 1994), mão de obra desqualificada (TRIGO, 2009) e controle de dosagem e proporcionamento dos materiais (SANTOS, 2014).

1.2 Justificativa

A industrialização da construção civil exige avanços no que tange os materiais de construção e técnicas/práticas mais eficientes, destacando, entre outros, as alvenarias estruturais, pisos de alta resistência, revestimentos convencionais e de alta performance, além das argamassas armadas moldadas *in loco* ou pré-moldadas (SANTOS, 2014).

Devido à sua morfologia, Trigo (2009), destaca que os obstáculos tecnológicos também são significativos, principalmente ligados à durabilidade relacionadas às pequenas espessuras em que exige controle rigoroso no processo de fabricação, abrangendo desde a escolha dos materiais até os processos de execução.

Para sanar estes problemas, são desenvolvidas pesquisas visando melhorar os resultados obtidos para esse produto, seja no intuito de diminuir custos, atenuar impactos ambientais ou mesmo acentuar características interessantes para sua aplicação (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008). Para isto, evidencia-se o uso de adições minerais como: o pó de calcário, microsílica, cinzas volantes e nano materiais como nanosílica e nanotitânium (NEPOMUCENO *et al.*, 2012; RAO *et al.*, 2015).

Dentre as propriedades mais evidentes para as argamassas armadas, pode-se destacar a fluidez e trabalhabilidade no estado fresco e no estado endurecido a resistência à compressão e módulo de elasticidade (TRIGO, 2009). Tem-se, com isto, a difusão do microconcreto auto adensável focado em vencer os pequenos espaços entre as malhas de aço das estruturas de argamassa armada (NEPOMUCENO, 2012; RAO *et al.*, 2015 e OKAMURA, 2003).

Nepomuceno *et al.* (2012), Okamura (2003) e Tutikian e Dal Molin (2008) apresentam que existem poucos estudos a respeito da execução e metodologias de dosagem de argamassas auto adensáveis. O estudo desse produto é feito, na maioria das vezes, como uma etapa para a execução do concreto auto adensável, ao qual é direcionada toda a análise das características em função de sua utilização. Desta maneira, seria interessante uma metodologia voltada para argamassa, e que avalie as propriedades relevantes para sua utilização.

Diante deste cenário, torna-se evidente a necessidade de se desenvolver um método de dosagem que possibilite a garantia das especificações de projeto, tanto de resistência quanto durabilidade, e de forma eficiente para as Argamassas Estruturais Auto Adensáveis (AEAA). O método de dosagem é uma maneira de diminuir as dificuldades de execução das peças de argamassa armada e facilitar a parte de aplicação agregando valor a essa tecnologia.

1.3 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um método de dosagem experimental para AEAA baseado nas características dos materiais e do local de aplicação.

De forma a atingir o objetivo geral do trabalho, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Propor uma metodologia de dosagem experimental para argamassa a ser utilizada no sistema de argamassa armada, com fundamento nas pesquisas realizadas;
- b) Avaliar a eficiência e eficácia do método proposto com ensaios para validação de propriedades no estado fresco e endurecido, e testes estatísticos como análise da variância e determinação dos intervalos de confiança;
- c) Avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas produzidas com adição de pó de calcário.

1.4 Limitação da Pesquisa

Todos os experimentos serão realizados apenas com um tipo de agregado miúdo, areia natural, comprada na região da Grande Belo Horizonte. Somando-se a esse fator, serão avaliados somente um tipo de cimento e de adição, devido ao tempo e condições exigidas para um mestrado.

1.5 Estrutura da Pesquisa

A estrutura deste trabalho foi construída em sete capítulos dispostos da seguinte maneira:

- o Capítulo 1 contextualiza a pesquisa, descrevendo a introdução ao trabalho, seus objetivos, limitações e a estruturação;
- na sequência, tem-se o Capítulo 2, que apresenta uma breve revisão bibliográfica acerca da argamassa armada. Neste são destacados composição, utilização, breve histórico e principais características e condições que influenciam as AEAA;
- Já o Capítulo 3 faz uma descrição de alguns métodos de dosagem de argamassa e concreto que se identificou como relevantes para o desenvolvimento do método proposto;
- o programa experimental e os materiais a serem utilizados, são apresentados no Capítulo 4;
- no Capítulo 5 é apresentado ao leitor o método de dosagem proposto para AEAA;
- buscou-se validar o método no Capítulo 6 com aplicações de ensaios práticos e testes estatísticos;
- o Capítulo 7 fecha o trabalho com as conclusões.

2 ARGAMASSA ARMADA

2.1 Definição do Sistema Argamassa Armada

A norma ABNT NBR 11173: 1990 define como peça de argamassa armada aquelas de pequena espessura compostas por argamassa e armaduras de aço em formato de telas com aberturas limitadas. Destaca que as argamassas são misturas de cimento Portland, agregado miúdo e água, que podem conter ou não aditivos e adições, e telas de aço são armaduras em forma de malhas regulares constituídas de fios ou lâminas contínuas, podendo ser pré-fabricadas ou não. Segundo a norma ABNT NBR 11173:1990, as peças de argamassa armada são essencialmente de pequena espessura (usualmente até 40mm), e o diâmetro máximo das partículas de agregado deve ser de no máximo $\frac{1}{4}$ da menor espessura da peça e $\frac{1}{2}$ da menor abertura entre as telas de aço. As argamassas ainda têm pequenos valores de cobrimento da armadura (4 a 6mm), fator máximo de água/cimento de 0,45 e dimensão máxima do agregado de 4,8mm, emprego de telas de aço soldadas com abertura máxima limitada, e controle de execução mais rigoroso (HANAI, 1992).

Outra definição encontrada na literatura (HANAI, 1981), porém muito semelhante, define a argamassa armada como um tipo de concreto com agregado miúdo e armadura difusa composta por telas metálicas com pequenos espaçamentos. Tem-se ainda, Teixeira (1994), que apresenta o conceito de microconcreto, que segundo ele se diferencia do primeiro pelas dimensões de cobrimento que seriam um pouco aumentadas, como também a dimensão máxima do agregado poderia ser maior do que 4,8mm e a dimensão da peça final estaria compreendida entre 20 e 60mm.

2.2 Histórico do Sistema Argamassa Armada

O sistema de argamassa armada teve sua origem em 1948, quando o francês Joseph-Louis Lambot desenvolveu um composto ao qual denominou

“ferrociment”, que era composto por uma rede de arames ou barras de aço ligadas por cimento hidráulico. Este material teve influência direta na moderna argamassa armada e ainda em toda família dos concretos armados (TEIXEIRA, 1994). Essa tecnologia voltou a contar com novas contribuições no caminho da argamassa armada com o italiano Pier Luigi Nervi anos mais tarde. Hanai (1992) concluiu que o *ferrocemento* não apresentava características de um concreto armado convencional, uma vez que desenvolveu propriedades mecânicas de um material homogêneo. Entre suas principais características estavam a capacidade de resistir a grandes deformações sem a formação de fissuras na argamassa como consequência da subdivisão da armadura (TEIXEIRA, 1994).

No Brasil, o *ferrocemento* foi utilizado pela primeira vez na Escola de Engenharia de São Carlos, na Universidade de São Paulo, pelos professores Frederico Shiel e Dante Martinelli. Os pesquisadores procuraram adaptar o produto inicial com objetivo de desenvolver um método executivo diminuindo o consumo de cimento e a taxa de armadura, de forma que barateasse o custo final sem que o material perdesse a elevada resistência à fissuração, denominando-a como argamassa armada (TEIXEIRA, 1994; TRIGO, 2009). Fazendo uma comparação entre o novo material e o desenvolvido por Nervi, os primeiros ensaios de argamassa armada em perfis pré-moldados apontaram fissuras da ordem de 1/1000 com taxas de armadura variando entre 250 e 300 Kg/m³ e consumo de cimento de aproximadamente 700 Kg/m³, enquanto o *ferrocemento* era composto por 500 Kg/m³ (taxa de armadura) e 1000 Kg/m³ (consumo de cimento) (HANAI, 1992).

As argamassas estruturais atualmente são estudadas com objetivo de serem auto adensáveis, focado na maior facilidade de romper os obstáculos proporcionados pela densa malha de aço. Pesquisas mais recentes, como Nepomuceno *et al.* (2012), testaram a inserção de adições à mistura com objetivo de diminuir o consumo de cimento e Rao *et al.* (2015), que adicionaram nano materiais para verificar melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade.

2.3 Agregados para Argamassa

A ABNT NBR 7211:2009 descreve os agregados como substâncias minerais, areia, cascalho e rocha britada que entram em misturas para produzir concretos, argamassas, asfalto e base de pavimentos. Os agregados com granulometria entre 4,75 mm e 150µm são denominados agregados miúdos (NEVILLE e BROOKS, 2013; BAUER, 2000; ABNT NBR 7211:2009) com caracterização realizada de acordo com a norma ABNT NBR NM 248:2003.

As características do agregado são importantes para os compósitos cimentícios, pois interferem na resistência, desempenho e durabilidade do produto final (KADRI e DUVAL, 2002; PENG *et al.*, 2009; SAHMARAN *et al.*, 2009; PAN e WENG, 2012). Muitas características do agregado dependem inteiramente da rocha-mãe, como composição química e mineralógica, características petrográficas, densidade de massa, dureza, resistência, estabilidade química e física, estrutura de poros e cor (MENG *et al.*, 2012; SAHMARAN *et al.*, 2009; PENG *et al.*, 2009). Já outras propriedades, como forma e tamanho das partículas, textura superficial e absorção, dependem de outros fatores, como processo de britagem, estocagem, entre outros (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Leite (2001) destaca ainda que a durabilidade dos concretos e argamassas tem incentivado pesquisas em torno das propriedades dos agregados e de como estes influenciam-na, além de suas propriedades físicas e mecânicas.

A seguir apresenta-se algumas propriedades dos agregados e como estes influenciam os compósitos cimentícios.

2.3.1 Porosidade e Absorção

A permeabilidade, porosidade e absorção dos agregados influenciam na aderência com a pasta de cimento hidratada, resistência da mistura ao congelamento e degelo, além da resistência à abrasão e estabilidade química (HWANG e SOO KO, 2008; MAROLF *et al.*, 2004).

Os poros podem ser totalmente internos, ou seja, não se comunicam com a superfície da partícula, e podem comunicar com a superfície (BAUER, 2000). A água consegue penetrar nos poros aumentando a absorção, desde que estejam interligados (NEVILLE e BROOKS, 2013). Ressalta-se que o tamanho, volume e continuidade dos poros são significativos para determinar o deslocamento de agentes, que influenciam negativamente na durabilidade (CARRIJO, 2005; LEITE, 2001).

2.3.2 Aderência e resistência mecânica

A aderência entre a pasta de cimento e o agregado influenciam diretamente na resistência à tração na flexão, sendo ocasionada pelo intertravamento desses dois componentes (HADAD, 2015). Os agregados com partículas com superfícies mais ásperas oferecem maior aderência à pasta de cimento devido ao maior intertravamento mecânico (HADAD *et al.*, 2016). É possível avaliá-la através de corpos de prova rompidos na tração por compressão diametral e identificar partículas do agregado fraturadas, além de outras arrancadas de seus alojamentos na pasta (SANTOS, 2011).

Geralmente são a porosidade da matriz e a zona de transição entre a matriz e o agregado gráudo que determinam a característica de resistência mecânicas dos compósitos cimentícios (CARRIJO, 2005). Portanto, um agregado com baixa resistência mecânica promove fraca ligação entre os grãos do agregado e cimento, além de reduzir a resistência mecânica da argamassa (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013; CORINALDESI *et al.*, 2010; SALEM e BURDETTE, 1998 e SEGADÃES *et al.*, 2005).

2.3.3 Forma, textura e distribuição granulométrica

Segundo Neville e Brooks (2013) e Hadad (2015), as formas das partículas de agregado miúdo influenciam significativamente as propriedades (compacidade,

fissurabilidade, módulo de elasticidade e resistência mecânica à compressão) das argamassas e concretos. Percebe-se que partículas mais angulosas e alongadas exigem uma proporção maior de pasta de cimento para uma mesma trabalhabilidade quando comparadas com partículas arredondadas (METHA e MONTEIRO 2014). Tem-se ainda, que proporcionam uma maior aderência produzindo compósitos cimentícios mais resistentes (ISAIA, 2010). As partículas arredondadas, por sua vez, proporcionam melhorias na compacidade da mistura, além de influenciar positivamente na trabalhabilidade (BAUER, 2000). De maneira geral, a resistência e o módulo de elasticidade da argamassa são influenciadas pela textura e estrutura do agregado (SILVA, 2006).

A caracterização dos agregados no estudo de argamassas é feita tradicionalmente com base em especificações de faixas granulométricas e módulo de finura (ABNT NBR NM 248:2003). Contudo, deve-se observar também como o diâmetro máximo e a forma dos grãos influenciam no empacotamento das partículas, controlando assim o volume de vazios que precisa ser preenchido pela pasta de aglomerante (CARNEIRO *et al.*, 1997 e HADDAD, 2015).

O empacotamento pode ser maximizado através da correta seleção dos diâmetros das partículas e de suas respectivas quantidades, fazendo com que os espaços vazios sejam preenchidos por partículas de tamanho adequado (menores) e assim sucessivamente (CARDOSO, 2009; PAULO, 2006, SAHMARAN *et al.*, 2009). Nos agregados com granulometria distribuída uniformemente e que possuem forma adequada (mais esférica), tende-se a um produto compacto e resistente para um mesmo teor mínimo de cimento, reduzindo o risco de segregação e produzindo misturas mais trabalháveis e econômicas (MENG *et al.*, 2012).

Peng *et al.* (2009), Kadri e Duval (2002) e Souza *et al.* (2009) destacam que a adição de partículas ultrafinas inertes e/ou hidráulicas e/ou pozolânicas alteram positivamente as propriedades mecânicas e de durabilidade dos compósitos cimentícios.

2.3.4 Substâncias deletérias dos agregados

Segundo a ABNT NBR 7211:2009, substâncias deletérias são aquelas presentes no agregado com capacidade de prejudicar a trabalhabilidade, a pega, a resistência, a estética e as características de durabilidade da argamassa. Existem três categorias dessas substâncias presentes no agregado: impurezas que interferem no processo de hidratação do aglomerante, películas que impedem a aderência efetiva entre o agregado e a pasta de cimento hidratada, e partículas fracas ou não sãs. Ainda existem efeitos deletérios envolvendo reações químicas entre o agregado e a pasta de cimento, sendo a principal delas a reação álcali-agregado (MONTEIRO *et al.*, 2001).

Dentre as substâncias deletérias, pode-se citar como principais as impurezas orgânicas (<1% - ABNT NBR 7218: 2010 e ABNT NBR 7211: 2009), argila e outros materiais finos (<5% - ABNT NBR 7218: 2010 e ABNT NBR 7211: 2009), e sal (NEVILLE e BROOKS, 2013). A presença de argila e outros materiais finos pode formar películas superficiais que interferem na aderência entre o agregado e a pasta (PAULO, 2006). Já a presença de sal no agregado aumenta a probabilidade de corrosão de armadura induzida pelos cloretos (MAGALHÃES, 2011).

A reação álcali-agregado ocorre internamente na estrutura, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes dos componentes do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado. Como resultado da reação são formados produtos que, na presença de umidade, se expandem, gerando fissurações, deslocamentos e podendo chegar a romper a estrutura já em estado endurecido (HASPARYK, 2005).

2.4 Cimento Portland

2.4.1 Conceitos, tipos e composição química

Cimento Portland é definido como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que sob a ação da água endurece. Uma vez endurecido, mesmo na presença de água não, sofre decomposição (ABCP, 2002). As argamassas e concretos são fruto da mistura de Cimento Portland com água e outros materiais de construção, tais como areia, pedra britada, pó de pedra, cal e outros (ISAIA, 2010).

No Brasil existem vários tipos de cimento com composições diferentes que proporcionam aplicações diversificadas para várias condições de utilização. Dentre os cimentos Portland mais comuns oferecidos no mercado, seja pelo volume de utilização ou aplicação específica em alguns casos, estão (ABCP, 2002): comum; composto; de alto-forno; pozolânico; de alta resistência inicial; resistente aos sulfatos; branco; de baixo calor de hidratação; para poços petrolíferos.

O Cimento Portland consiste no produto da pulverização de clinker, constituído principalmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam sua utilização (BAUER, 2000).

Os principais compostos do cimento são o silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico (NEVILLE e BROOKS, 2013). Segundo Mehta e Monteiro (2014), a pasta água/cimento reage (silicatos e os aluminatos formam produtos de hidratação), fazendo com que o cimento se torne um agente ligante, que com o transcorrer do tempo dão origem a uma massa firme e resistente. O silicato de cálcio hidratado é a principal fase proveniente da hidratação do cimento Portland e tem grande influência na maioria das propriedades físicas e mecânicas dos materiais cimentícios, como resistência mecânica à compressão e tração, módulo de elasticidade e dureza (SUN *et al.*, 2002).

2.4.2 Propriedades do cimento que interferem na argamassa

Algumas propriedades da argamassa são relacionadas ao comportamento do cimento Portland quando utilizado para elaboração das pastas. Dentre as principais propriedades destacam-se (BAUER, 2000):

- a) densidade: a densidade absoluta do cimento Portland é usualmente considerada como $3,15\text{Kg/m}^3$ e a aparente $1,5\text{Kg/m}^3$. A importância e utilidade de se ter o conhecimento dessa propriedade é para calcular o consumo desse produto nas misturas;
- b) finura: que está relacionada com a superfície específica do produto, quanto mais fino maior a superfície específica e também maior é a velocidade da reação de hidratação. Também tem influência comprovada em outras características de argamassas e concretos, como resistência inicial e durabilidade final. Pode ser determinada através da peneira de malha nº 200 (0,075mm) (ABNT NBR 11579:2013);
- c) tempo de pega: que corresponde ao período de tempo necessário para que se tenha início e término do processo de endurecimento da pasta e início de suas propriedades mecânicas (ABNT NBR NM 65:2003);
- d) resistência mecânica à compressão: é avaliada em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura de argamassa com traço normalizado e areia padrão (ABNT NBR 7215: 1997);
- e) exsudação: é o fenômeno provocado pela sedimentação dos grãos de cimento (mais pesados do que a água que os envolve) por gravidade, provocando um afloramento do excesso de água;
- f) calor de hidratação: o processo de hidratação do cimento é exotérmico, uma quantidade considerável de energia térmica é liberada durante essa reação, o que pode provocar o aparecimento de trincas de contração ao fim do resfriamento da massa. O desenvolvimento de calor varia com a composição do cimento, principalmente com as proporções de silicato e aluminato tricálcicos (ABNT NBR 13116:1994);
- g) estabilidade: expansões volumétricas que podem ocorrer posteriores ao endurecimento da pasta, provocadas pela hidratação de cal e magnésia livres.

Pode ser avaliada pelos ensaios de expansão em autoclave ou pelo ensaio da agulha de *Le Chatelier* descrito pela ABNT NBR 11582:2016.

2.5 Adições

A norma ABNT NBR 12654:1992 classifica as adições em três tipos: adições minerais de natureza hidráulica latente (escória básica granulada de alto-forno), pozolânica (materiais pozolânicos naturais ou artificiais) e inertes.

Tutikian e Dal Molin (2008) classificam, de forma análoga à norma supracitada, as adições em quimicamente ativas e inertes (sem atividade química). Dentro do grupo das quimicamente ativas, são separados os materiais cimentantes dos pozolânicos. O que os diferencia é que o primeiro grupo possui hidróxido de cálcio em sua composição, não dependendo do Ca(OH)_2 formado durante a hidratação do cimento. Já o grupo dos pozolânicos, por definição, necessitam do Ca(OH)_2 para reagir quimicamente e formar compostos resistentes. Como exemplo destaca-se a escória granular de alto-forno como cimentante e a cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim como pozolânica.

No que se refere às adições inertes, Tutikian e Dal Molin (2008) e PENG *et al.* (2009) destacam três ações positivas consequentes dos efeitos físicos provocados por essas adições: o efeito *filler*, que promove o aumento da densidade da mistura através do preenchimento dos seus vazios pelas pequenas partículas da adição; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; a alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados.

Nepomuceno *et al.* (2012) revela que a substituição de parte do cimento por pó de calcário aumenta a viscosidade do concreto auto adensável, e em alguns casos essa adição já foi utilizada (em dosagem adequada na substituição do cimento) para diminuir o consumo de superplastificante. Isso é possível porque a adição

melhora propriedades reológicas de coesão, evitando segregação das partículas. Varhen *et al.* (2016) também indica o impacto positivo na coesão dos concretos auto adensáveis. No entanto, chama atenção para o aumento da viscosidade que pode ter efeitos negativos no bombeamento do concreto. Essa adição tem se mostrado eficaz na inibição do aumento da temperatura e na prevenção de fissuras causadas por gradientes térmicos (NEPOMUCENO *et al.*, 2012), além de proporcionar menores índices de retração por secagem quando comparados com misturas sem adição (VARHEN *et al.*, 2016). É importante destacar também a redução de custo na aquisição dos materiais e benefícios ambientais ligados ao menor consumo de cimento Portland (VARHEN *et al.*, 2016).

2.6 Aditivos

Para alcançar algumas características nos concretos e argamassas pode-se utilizar os aditivos que visam modificar suas propriedades, ajustando-as a determinadas utilizações e desempenho pré-estabelecidos, como (PAULO, 2006): melhorar trabalhabilidade, acelerar ou retardar pega, acelerar o endurecimento nas primeiras idades, aumentar a resistência aos ciclos de gelo-degelo, diminuir a permeabilidade dos líquidos, impedir a segregação e sedimentação dos constituintes, criar uma ligeira expansão nas argamassas, produzir argamassas leves e produzir argamassas coloridas.

Para fabricação de AEAA são utilizados, de maneira geral, dois principais tipos de aditivos: os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. Os aditivos superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, enquanto os aditivos modificadores de viscosidade oferecem um aumento da coesão, prevenindo a exsudação e segregação do concreto (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Neville e Brooks (2013) resume os aditivos em três grupos principais: plastificantes, que reduzem a necessidade de água na mistura; retardadores, que promovem um atraso na pega da pasta de cimento; aceleradores, que têm função de acelerar a evolução da resistência inicial do concreto/argamassa durante o

endurecimento. Essas funções podem ser somadas em um mesmo produto, como por exemplo os plastificantes retardadores.

Paulo (2006) descreve os principais tipos de aditivos disponíveis no mercado para argamassas estruturais:

- a) plastificantes / redutores de água: proporcionam à argamassa/concreto uma mesma trabalhabilidade mantendo-se o fator água/cimento;
- b) introdutores de ar: proporcionam à mistura um aumento na trabalhabilidade e homogeneidade através da geração de pequenas bolhas de ar e ainda contribuem na minimização da exsudação, diminuindo o teor de água da mistura e melhorando também a resistência às fissuras. Quando utilizados em excesso, podem afetar negativamente a aderência e resistência mecânica;
- c) ativadores de endurecimento: aceleram o desenvolvimento da resistência da pasta, interferindo relativamente pouco na trabalhabilidade;
- d) aceleradores de pega: aceleram a pega e, conseqüentemente, o desenvolvimento da resistência da pasta;
- e) retardadores de pega: estendem as reações de hidratação durante um período mais longo do que o habitual, o que permite um tempo maior com a pasta em um estado de maior trabalhabilidade;
- f) redutores de impermeabilidade ou hidrofugantes: dificultam ou impedem parcialmente a penetração de água ou sua circulação, através da redução da tensão capilar no sistema poroso;
- g) expansivos: produzem uma ligeira expansão sem afetar a estabilidade da argamassa endurecida. Na argamassa fresca aumentam a fluidez, aderência e homogeneidade da pasta, além de diminuir a segregação da pasta.

Rodolpho (2007) apresenta que os aditivos plastificantes ou superplastificantes, proporcionam o aumento na trabalhabilidade mantendo-se as proporções dos traços, ou mantendo o fator água/cimento se torna possível aumentar a trabalhabilidade e consistência. A diferença entre os aditivos plastificantes e superplastificantes está na efetividade do seu desempenho, sendo que o segundo intensifica mais a sua influência. Os aditivos à base de policarboxilato têm sido

mais eficazes na obtenção de alta fluidez e concretos de alta resistência, devido à sua força superior na dispersão das partículas de cimento (KISMI *et al.*, 2012).

Os aditivos plastificantes mais utilizados são à base de lignossulfonato, hidrocarboxílicos e policarboxilato, que podem reduzir a quantidade de água de amassamento de 15% a 40%. O princípio de funcionamento é a separação das partículas finas do Cimento Portland pela introdução de cadeias poliméricas longas (JACINTO, 2008). Sua adsorção causa uma repulsão elétrica por cargas opostas entre as partículas, resultando na dispersão das mesmas (Figura 1), o que impede a hidratação imediata, prolongando o comportamento reológico da pasta e exigindo menor quantidade de água para fluidificar a pasta (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

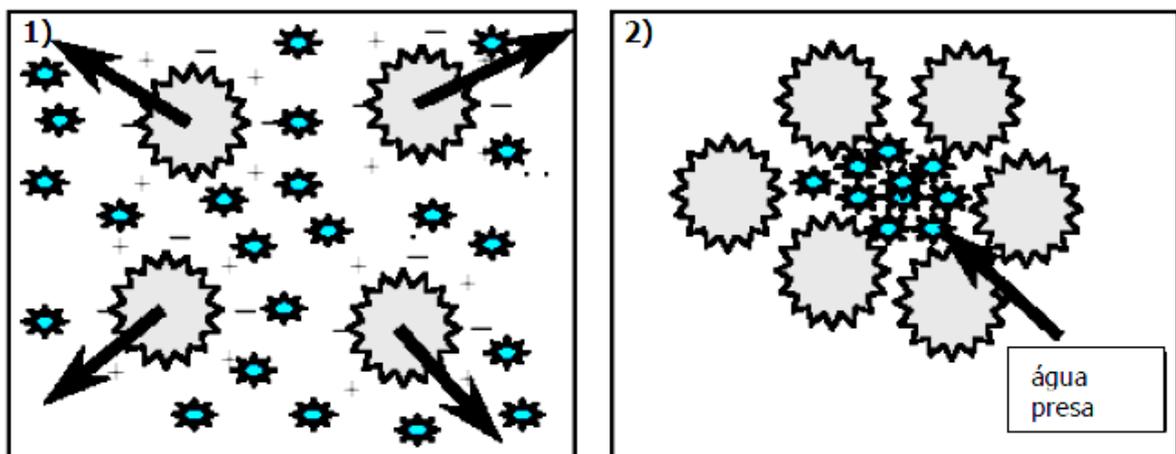


Figura 1 - Ação dispersiva dos plastificantes - 1) partículas dispersadas pelo efeito do plastificante; 2) partículas floculadas.

Fonte: Paulo, 2006.

Alguns cuidados, no entanto, devem ser tomados para alcançar os resultados esperados com a utilização desse aditivo. Uma dosagem excessiva pode acarretar na segregação da pasta como também exsudação da água, portanto a dispersão das partículas de cimento causadas pelo aditivo tem que ser dosada para não acentuar esse fenômeno. Esse excesso pode ainda aumentar o tempo de pega retardando as reações, o que reduz consequentemente a resistência inicial (KISMI *et al.*, 2012). É importante observar que alguns plastificantes

apresentam incompatibilidade química com certos tipos de cimento (KISMI *et al.*, 2012), com reações que permitem o dispersante reduzir a viscosidade da pasta (JACINTO, 2008).

2.7 Propriedades da Argamassa

Existem vários tipos específicos de argamassas que variam de acordo com sua funcionalidade e as várias propriedades assumem maior ou menor importância em função dos materiais e condições de uso e aplicação (SANTOS, 2014). A seguir serão descritas algumas das principais propriedades que influenciam as AEAA.

2.7.1 Consistência e trabalhabilidade

A consistência corresponde à resistência interna da pasta às deformações das interações das partículas. Os fatores que mais influenciam nessa propriedade são: quantidade de água, relação entre aglomerante e agregado, granulometria do agregado e qualidade e natureza do aglomerante (SANTOS, 2014 e SILVA, 2006).

A trabalhabilidade pode ser definida como a facilidade em manusear a argamassa durante toda a etapa de aplicação, e por definição, está relacionada à consistência (SANTOS, 2014 e SILVA, 2006). Isaia (2010) descreve trabalhabilidade como a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea.

Ao se tratar da consistência e trabalhabilidade das argamassas/concretos auto adensáveis, é importante avaliar ainda o conceito de viscosidade e fluidez. A viscosidade pode ser definida como a resistência da pasta em fluir ou escoar, portanto o inverso de fluidez (REIS, 2008). Misturas mais coesas tendem a uma

maior viscosidade e menor fluidez. A viscosidade também está relacionada à resistência interna da relação entre as partículas (VARHEN *et al.*, 2016).

Para obter a consistência das AEAA, os métodos utilizados são o *mini-cone slump flow test* e o *mini v-funnel test*, proposto por Okamura e Ouchi (2003). O cone e funil em V utilizados nos métodos estão ilustrados na Figura 2.

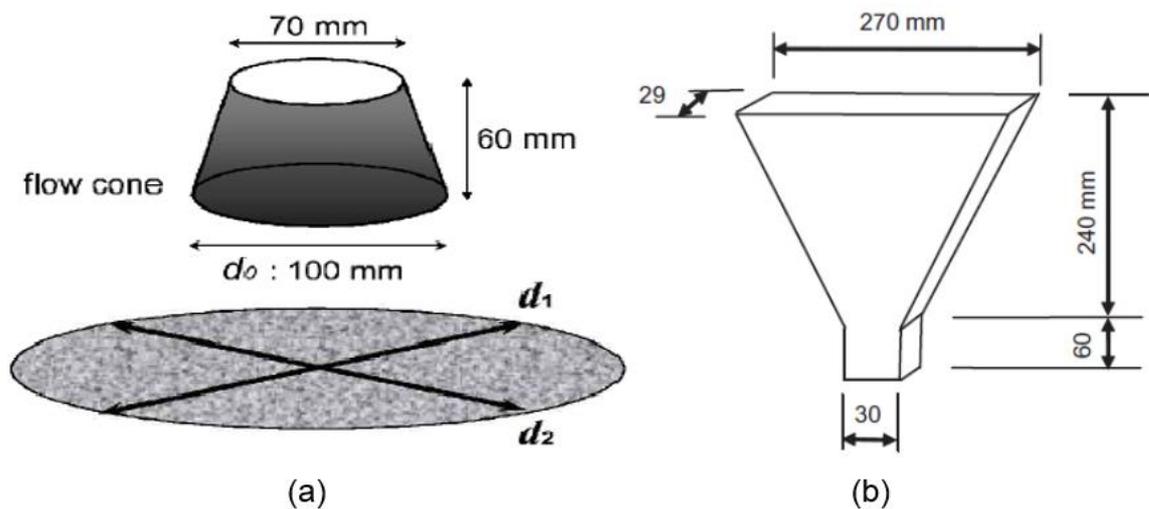


Figura 2 - (a) Cone utilizado no *Mini-cone slump flow test* (b) Funil em V utilizado no *Mini V-funnel test*.

Fonte: Nepomuceno *et al.*, 2012 e Okamura e Ouchi, 2003.

Apesar de não haver referências normativas para o ensaio *mini-cone slump flow test*, o mesmo também foi utilizado em várias pesquisas, como a de Rao *et al.* (2015) e Nepomuceno *et al.* (2012), os quais definiram como intervalos para Gm que atendessem às características desejadas para AEAA os valores de 5,3 a 5,9, com Dm variando entre 251 mm e 263 mm. O ensaio *mini v-funnel test* também foi utilizado nas pesquisas de Rao *et al.* (2015) e Nepomuceno *et al.* (2012), que determinou o intervalo em que melhor se obtém as características de fluxo e viscosidade para AEAA está entre 1,14 e 1,30 s⁻¹.

2.7.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A norma ABNT NBR 13278:2005 e norma ABNT NBR 9778:2009 determinam a densidade de massa da argamassa no estado fresco e endurecido,

respectivamente, como sendo a relação entre sua massa e volume aparente. A massa específica da argamassa endurecida é um pouco menor do que no estado fresco, devido à saída de parte da água (POLITO, 2008). Para o sistema de argamassa armada, a massa específica mínima deve ser de 1.800 Kg/m³ (ABNT NBR 11173:1990).

Além de influenciar diretamente no valor da massa específica aparente, o teor de ar pode interferir na trabalhabilidade da mistura fresca e ainda impactar na resistência mecânica no estado endurecido (FREITAS, 2010). As bolhas de ar incorporado podem também contribuir positivamente para reduzir o fenômeno de capilaridade, pois interrompem a passagem da água em parte dos poros capilares da argamassa. No estado endurecido, o valor da densidade de massa é um indicativo da compacidade resultante da proporção de agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto (FREITAS, 2010).

2.7.3 Permeabilidade e absorção de água

A permeabilidade é controlada pelo tamanho e continuidade dos poros, sendo que uma das grandes responsáveis por essa permeabilidade é a água adicionada, pois o seu teor determina o espaço total e, após, o espaço vazio, depois que a água for consumida pelas reações de hidratação ou evaporada para o ambiente (METHA e MONTEIRO, 2014). No entanto, existem outras diversas origens para os vazios presentes nas argamassas/concretos. Além das causas citadas anteriormente, os vazios podem ocorrer como consequência de ar incorporado – propositalmente ou não – no momento da mistura, fissuras causadas por origens diversas, além de uma dosagem inadequada ou falha na elaboração do material (SANTOS, 2014). Para que o produto final adquira algum grau de permeabilidade, basta apenas que os vazios estejam interligados (BAUER, 2000).

No que se refere às argamassas armadas ou estruturais, seu objetivo é o emprego na fabricação de peças pouco permeáveis, de pequenas espessuras e cobrimentos (ABNT, NBR 11173:1990). O baixo grau de permeabilidade é importante tanto na proteção contra percolação de água, como também contra a

entrada de agentes agressivos que podem comprometer a durabilidade do sistema (BAUER, 2000).

2.7.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material e está associado às propriedades mecânicas como tensão de escoamento, tensão de ruptura, propagação de trinca, entre outras (TRISTÃO, 1995 e BARBOSA *et al.*, 2015). Silva (2006) define o módulo de elasticidade como capacidade de absorver deformações, e quanto menor o valor do módulo, maior será a capacidade da argamassa de absorver essas deformações.

Silva (2006) constatou que à medida que as relações agregado/aglomerante aumentam, o módulo de elasticidade diminui. O módulo de elasticidade é uma função da rigidez da argamassa no estado endurecido, proporcionado pelo cimento hidratado, dependente da relação água/cimento e da disposição/espço entre as partículas dos agregados devido à geometria, rugosidade dos grãos e material pulverulento (BARBOSA *et al.*, 2015). Barbosa *et al.* (2015) destaca que água excedente causa aumento na quantidade de vazios, que por sua vez diminui o módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade é uma das propriedades elásticas mais importantes das argamassas estruturais para a análise dos impactos de manutenção e desempenho das estruturas que são muito esbeltas. Este está intimamente relacionado com as propriedades da pasta de cimento, a rigidez dos agregados selecionados e o método de determinação do módulo (TORGALKAR, 2004 e ZHANG *et al.*, 2006).

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido por meio de ultrassom (MALHOTRA e SIVASUNDARAM, 2004), frequência ressonante (ABNT NBR 15630:2009), decremento da vibração livre (TORGALKAR, 2004), rotação de vigas (MALHOTRA e SIVASUNDARAM, 2004), pulsos (ALVES *et al.*, 2013) e métodos térmicos (TORGALKAR, 2004).

2.7.5 Resistência mecânica

A resistência mecânica das argamassas está relacionada à sua capacidade de resistir aos esforços de tração, compressão ou cisalhamento, decorrentes de cargas estáticas ou dinâmicas. Os revestimentos de argamassa estão mais ligados à resistência à tração na flexão do que à resistência à compressão (FREITAS, 2010), e a importância da primeira resistência se dá no controle de fissuras.

Nos sistemas de argamassa armada, que exigem compósitos de alta resistência característica à compressão (mínimo de 25MPa - ABNT NBR 11173:1990), essa propriedade se torna essencial, e nesse aspecto deve-se tratar a argamassa como um tipo de concreto (HANAI, 1992), e o sistema argamassa armada como um tipo particular de concreto armado, conforme a norma supracitada. A resistência à compressão do concreto é influenciada pelo volume de todos os vazios: ar aprisionado, poros capilares, poros do gel e ar incorporado (SENGUL *et al.*, 2002). Quanto maior o volume de poros, mais baixa a resistência da mistura (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.7.6 Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno físico-químico em que a reação entre gases ácidos, presentes no ambiente, e produtos alcalinos do concreto/argamassa, provenientes das reações de hidratação, formam produtos com pH de precipitação inferior a 9. Os principais gases no ar atmosférico, principalmente nos ambientes urbanos, que provocam essa reação são o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2), e gás carbônico (CO_2), sendo que o último é o mais comum encontrado no meio ambiente (KULAKOWSKI, 2002).

O hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) são os compostos alcalinos da pasta de cimento hidratada que são

consumidos na reação de carbonatação. A principal reação de carbonatação no concreto/argamassa ocorre entre o hidróxido de cálcio e o gás carbônico, e está representada na equação 2.1 (KULAKOWSKI, 2002).



O elevado pH do concreto ($\text{pH} \approx 13$), resultante da hidratação do cimento, permite a passivação da armadura contra a corrosão. Nestas condições extremamente alcalinas, há uma formação de uma fina camada oxidante que envolve o aço e o protege da oxidação. Entretanto, quando o hidróxido de cálcio é consumido pelas reações de carbonatação, ocorre a redução do pH do concreto, acarretando na desp passivação da armadura (WERLE, 2010).

2.7.7 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é um importante parâmetro para avaliação da corrosão de estrutura de concreto armado, pois a corrosão de armadura do concreto é geralmente decorrente da alcalinidade (carbonatação), da lixiviação dos álcalis ou presença dos íons cloretos em quantidade significativa (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Whiting e Nagi (2003) descrevem que a faixa de corrosão muito alta corresponde à resistividades menores que 5 k Ω .cm, a faixa de corrosão alta é de 5 a 10 K Ω .cm, a faixa de corrosão moderada a baixa é de 10 a 20 K Ω .cm e a baixa faixa de corrosão é acima de 20 k Ω .cm.

Rosa (2005) afirma que a substituição parcial do cimento por adições minerais (pozolânicas) aumenta o consumo parcial do CH (hidróxido de cálcio) para formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e diminui a concentração do OH (íon hidroxila). Tem-se assim a redução da condutividade elétrica específica em concreto contendo adição mineral, quando comparado ao concreto sem adição.

Para Santos (2006), a resistividade se relaciona à permeabilidade de fluidos, à difusividade de íons através dos poros do material e à hidratação da pasta de cimento. Destaca que o princípio de medida da resistividade baseia-se na

aplicação de uma diferença de potencial entre os eletrodos posicionados em duas faces opostas e planas do material e a posterior medida da corrente resultante. Logo o efeito de preenchimento de poros, provocado pelos produtos de hidratação do cimento ou pelas adições, diminui a conectividade dos capilares e pode alterar a resistividade.

3 METODOLOGIAS DE DOSAGEM

Os métodos de dosagem dos concretos/argamassas de cimento Portland são conjuntos de procedimentos que permitem a definição das melhores proporções entre os materiais que compõem essa mistura, de forma a atingir as características desejadas (SANTOS, 2014). O traço do concreto/argamassa, como também pode ser denominada a proporção dos constituintes, pode ser descrito em massa ou volume, sendo preferível, e sempre mais rigorosa, as expressas em massas secas dos materiais (TUTIKIAN e HELENE, 2011).

Em nosso país ainda não existe uma norma nacional com consenso sobre como deve ser realizado o estudo de dosagem, com procedimentos e parâmetros. Nesse sentido, este capítulo faz um levantamento de alguns métodos de dosagem já desenvolvidos, com objetivo de embasar a proposta do método de dosagem deste trabalho.

3.1 Metodologia de dosagem de Selmo (1989)

O método de Selmo (1989) é experimental, ou seja, para encontrar a dosagem ideal são necessários experimentos com diferentes traços, e a partir da análise dos resultados plotam-se gráficos e define-se a proporção ideal (ISAIA, 2010). A contribuição dessa metodologia para o trabalho em questão é exatamente o processo de análise gráfica de resultados experimentais indicada pelo autor, que, juntamente com outros conceitos serviu de base para o desenvolvimento da proposta que será apresentada no trabalho.

O autor propõe relacionar o teor de material plastificante (finos provenientes da cal ou de uma adição mineral como o saibro, o filito ou o pó de calcário) e água versus cimento com a relação (areia+plastificante)/cimento, que é denominado de “E”. O parâmetro “E” é preestabelecido e experimentalmente são definidas as proporções do material plastificante de modo a definir a mínima quantidade capaz

de plastificar a argamassa e encontrar a mínima quantidade de água necessária para dar fluidez, garantindo a trabalhabilidade (SANTOS, 2014).

São necessários pelo menos três traços para elaborar as curvas dos gráficos de trabalhabilidade “E” versus material plastificante/cimento e “E” versus água/cimento. Dos gráficos são retiradas as quantidades de materiais finos e água relacionadas a cada relação com (areia+plastificante)/cimento (SANTOS, 2014).

A partir da curva de trabalhabilidade com os diferentes valores de “E” o autor sugere que as argamassas sejam aplicadas em painéis de no mínimo 2 m², com as condições mais semelhantes possíveis das existentes em obra, tais como tipo e preparo do substrato, condições climáticas, equipamentos de mistura e aplicação, entre outras. Durante o processo deve ser avaliado intuitivamente a trabalhabilidade da mistura (exsudação, adesão inicial, facilidade de aplicação e coesão). Após o endurecimento da argamassa, preferencialmente aos 28 dias, avaliar a fissuração, aderência (tanto a resistência quanto o tipo de ruptura), a resistência e a textura superficial, a permeabilidade/absorção de água, além do aspecto custo benefício, que deve incluir o consumo de materiais, o rendimento da argamassa e o índice de perdas (ISAIA, 2010).

3.2 Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas: método de Carneiro e Cincotto (1999)

Segundo os autores (CARNEIRO e CINCOTTO, 1999), o princípio para a composição e dosagem de uma argamassa com base na curva granulométrica está em obter uma argamassa trabalhável no estado fresco, e que também possua no estado endurecido uma alta compactidade, reduzido volume de vazios e com baixa capacidade de deformação. O método prescreve a variação da granulometria do agregado, aumentando o teor de finos inertes em substituição do cimento sem o aumento do teor de água.

A metodologia propõe a construção de curvas granulométricas através de uma progressão geométrica (equação 3.1), que representa a ideia de que o agregado de maior diâmetro tem seus vazios preenchidos pelo agregado de menor diâmetro que, por sua vez, tem seus vazios preenchidos pelo cimento.

$$S_n = A (1 - P_r^n) / (1 - P_r) \quad (3.1)$$

Sendo: “A” o primeiro termo do somatório, correspondente à quantidade de material retido na peneira de abertura máxima, logo abaixo da peneira de abertura máxima característica;

“P_r”, é a razão entre os retidos em cada peneira. O valor de P_r, nunca poderá ser igual a 1;

“n” é o número de peneiras da série adotada, que podem ser as séries de peneiras normal com razão de abertura de malha 1,19 e a principal, com razão de abertura de malha 1,41 da ABNT NBR 5734:1988, ou ainda a série normal da ABNT NBR 7211:2009 de razão de abertura de malha 2,0.

As relações aglomerante/agregado são encontradas através da formulação teórica das curvas granulométricas, sendo considerado como aglomerante todo o material passante na peneira #200 (0,075mm), e como agregado todo o material retido nas peneiras superiores, inclusive na peneira #200.

Segundo Haddad (2015), o método de dosagem de argamassas proposto por Carneiro e Cincotto (1999) visa ao aprimoramento da compacidade e eficiência das argamassas e é baseado na melhor utilização de curva granulométrica. Ele 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 favorecido.

Esse conceito de maior compacidade da mistura como consequência do preenchimento dos vazios entre partículas maiores com partículas menores contribuiu para o desenvolvimento da metodologia de dosagem que será proposta nesse trabalho.

3.3 Método de dosagem do *American Concrete Association (ACI)*

O método de dosagem do ACI é indicado para dosagem de concretos com cimento Portland com ou sem adições e também com aditivos (NEVILLE e BROOKS, 2013).

O método do ACI se baseia em uma série de observações referentes ao projeto, ao tipo de execução e às características dos materiais disponíveis. No desenvolvimento da dosagem são utilizadas tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais, fruto de estudos realizados pelas comissões do ACI, encarregados do desenvolvimento e revisão do método (BAUER, 2000; TUTIKIAN e HELENE, 2011).

Neville e Brooks (2013) descreve esse método em uma sequência de passos lógicos e diretos que levam em conta as características dos materiais que serão usados: fixação do abatimento, fixação do tamanho máximo do agregado, estimativa dos teores de água e de ar, fixação da relação água/cimento, cálculo do teor de cimento, cálculo do teor de agregado graúdo, cálculo do teor de agregado miúdo e ajustes das proporções da mistura. Bauer (2000) ilustra os passos/etapas do processo de acordo com o fluxograma da Figura 3 e destaca as tabelas a serem consultadas para definição de cada parâmetro.

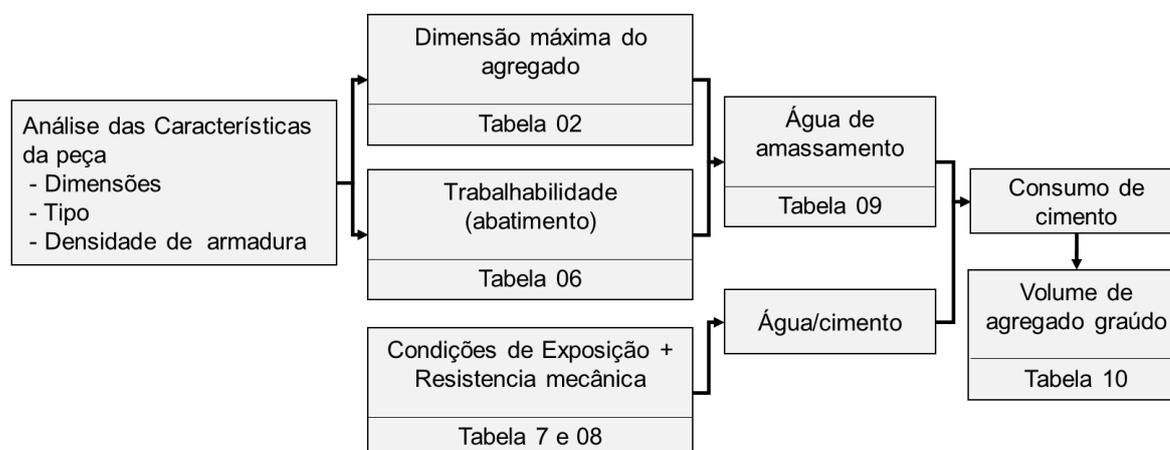


Figura 3 - Fluxograma do Método de Dosagem ACI. As tabelas estão no ANEXO I enumeradas conforme fluxograma.

Fonte: adaptado de Bauer (2000).

A desvantagem do método, apontada por Tutikian e Helene (2011), é que os valores dos quais são realizadas as proporções dos materiais são tabelados, e essas tabelas não englobam todos os tipos de materiais.

3.4 Método de dosagem de concreto auto adensável de Tutikian e Dal Molin (2007)

O método de dosagem de Tutikian (2004) é um procedimento prático e experimental que foi desenvolvido para a fabricação de concretos auto adensáveis, com grande fluidez, baseado no método do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Este utiliza três “leis de comportamento” que são relacionadas por um diagrama de dosagem graficado sobre três quadrantes. O objetivo do método de Tutikian (2004) é a construção de três traços, no mínimo, e desenho de diagrama de dosagem. Esse procedimento foi testado e aprovado (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Percebe-se que alguns pontos poderiam ser melhorados, como teor de argamassa ideal, dependência de experiência do responsável pela dosagem e falta de contemplação de um estudo prévio dos agregados. Deste modo, foi desenvolvido o Método de Tutikian e Dal Molin (2007) (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008). O procedimento é também um método prático e experimental, que permite a utilização de qualquer material local. Seu esquema está ilustrado na Figura 4.



Figura 4 - Fluxograma do Método de Tutikian e Dal Molin (2007).

Fonte: adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008).

Os componentes utilizados são basicamente os componentes de um concreto convencional: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, acrescidos de um material fino, de granulometria inferior à do agregado miúdo e aditivo superplastificante (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

No segundo passo, a determinação do esqueleto granular, o autor sugere a determinação das proporções entre os materiais de forma que seja garantido maior empacotamento possível das partículas e, conseqüentemente, menor quantidade de vazios. Para tal, os componentes devem ser empacotados dois a dois em ordem decrescente das partículas, sendo que o único elemento que não deve ser empacotado é o cimento. Para avaliar a melhor mistura, são calculadas as massas específicas e índice de vazios. Dessa maneira, garante-se que os espaços vazios entre as partículas maiores serão ocupados pelas de menor diâmetro e assim sucessivamente (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A determinação do fator água/cimento da mistura intermediária é realizada de acordo com histórico de concretos realizados anteriormente, ou então tendo como

base os parâmetros da ABNT NBR 6118:2014. O aditivo superplastificante também é determinado de acordo com experiências anteriores. Definidas as relações água/cimento e teor de aditivo, realiza-se experimentalmente a confirmação e ajuste das quantidades através de ensaio no qual se realiza a mistura e verifica as propriedades com as dosagens definidas, inclusive de superplastificante (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Confirmado o traço intermediário, a quantidade de todos os componentes é mantida constante, variando-se apenas o fator água/cimento para determinação dos traços rico e pobre. De acordo com a aplicação do concreto auto adensável, a água será dosada a fim de tornar a mistura mais ou menos fluida (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Definidos os traços de acordo com a utilização da mistura, são moldados os corpos de prova com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade conforme demanda de projeto. Com os resultados são desenhados os diagramas de dosagem (Figura 5 (a) e (b)), que consistem em relacionar: a resistência à compressão nas várias idades ensaiadas com a relação água/cimento no primeiro quadrante; o fator água/cimento com a proporção em massa de cimento em relação ao agregado seco no segundo quadrante; a proporção em massa de cimento em relação ao agregado seco com o custo e com o consumo de cimento no terceiro quadrante; teor de argamassa seca com consumo de cimento no quarto quadrante (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

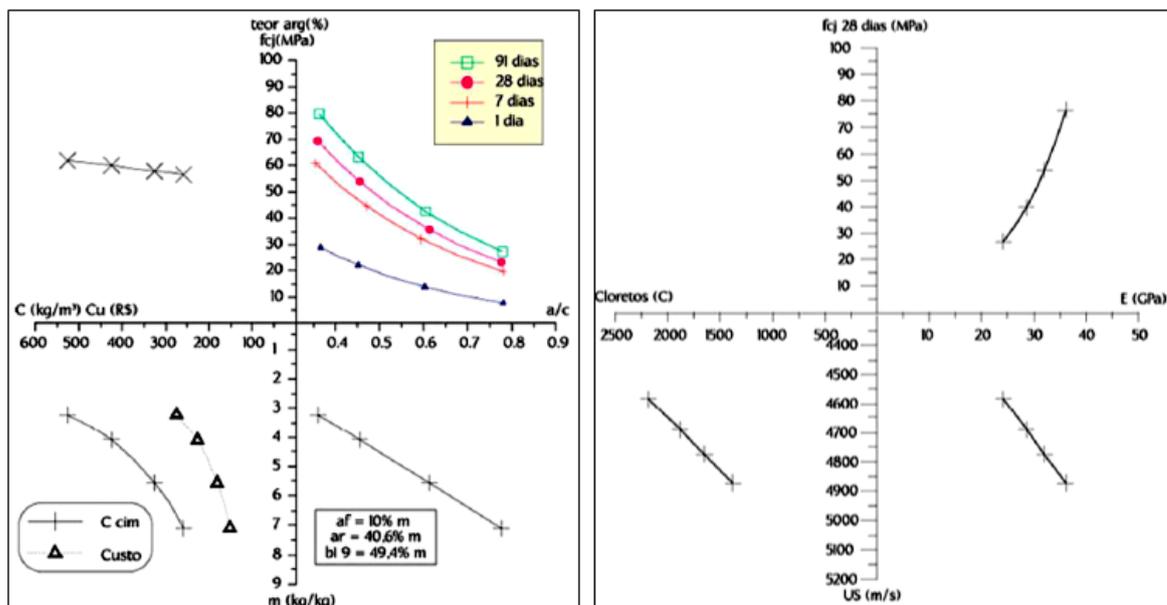


Figura 5 - Diagrama de (a) Dosagem e (b) Desempenho.

Fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008.

Observa-se no diagrama (Figura 5 (a)) que foram utilizados quatro traços diferentes, quanto maior o número de traços analisados maior o intervalo de informações e, conseqüentemente, mais rica é a análise para a escolha do traço mais adequado à situação de projeto a partir do diagrama. Com os resultados dos ensaios de durabilidade é possível desenhar o diagrama de desempenho, que por sua vez possibilita relacionar propriedades mecânicas e de durabilidade com a resistência mecânica do concreto. A Figura 5 (b) representa um diagrama de desempenho relacionando resistência à compressão com módulo de elasticidade, com velocidade de onda ultrassônica e penetração de íons cloretos (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

3.5 Método de dosagem de Okamura e Ouchi (2003)

Okamura e Ouchi (2003) apresenta algumas premissas para dosagem de concreto auto adensável, no qual os autores sugerem o ensaio em argamassas para corrigir possíveis falhas no proporcionamento dos materiais. O método se baseia em três princípios: conteúdo limitado de agregado graúdo no concreto, baixa relação água/finos e uso de plastificante. Esses princípios têm o objetivo de

proporcionar alta fluidez à pasta, além de evitar sua segregação quando a mistura flui entre as armaduras (OKAMURA e OUCHI, 2003).

A restrição quanto à limitação do agregado graúdo justifica-se pelo alto consumo de energia quando suas partículas estão próximas umas das outras, provocando colisões e obstruções em regiões com obstáculos. Quando o conteúdo de agregado é maior, a tensão no interior do concreto aumenta, fazendo com que a energia necessária ao concreto para fluir seja consumida para estabilização dos agregados no interior da mistura (OKAMURA e OUCHI, 2003). Apresenta-se na Figura 6 a comparação entre as proporções de materiais utilizadas em um concreto auto adensável. Os autores sugerem os ensaios de caixa em U, *slump flow* e funil em V para verificar e ajustar a auto adensabilidade do concreto e sua tendência à segregação.

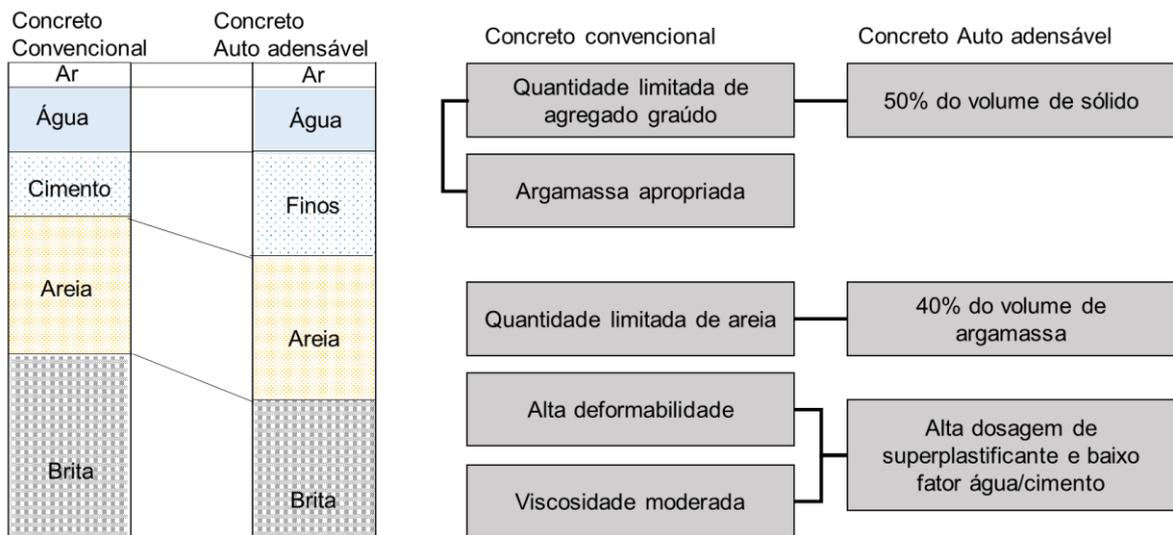


Figura 6 - Comparação entre as proporções de materiais utilizados no concreto auto adensável e em concretos convencionais.

Fonte: Klein, 2008.

3.6 Método de dosagem de Santos (2014)

O método de dosagem desenvolvido por Santos (2014) é um processo de dosagem experimental para argamassas de revestimento e assentamento. Inicialmente, define-se a quantidade de agregado (determinado pela equação 3.2)

a ser utilizado, levando em consideração o volume de vazios que aquele material em específico proporciona

$$P_{areia} = 100 - \{ [1 - (\gamma_u / \gamma_r)] * 100 \} \quad (3.2)$$

Onde: P_{areia} = teor de agregados miúdos no traço, em %;

γ_u = massa específica unitária compacta do agregado miúdo, em g/cm³;

γ_r = massa específica real do agregado miúdo, em g/cm³;

A quantidade de água é definida a princípio por valores proporcionais já consagrados na literatura, sendo que o autor sugere 15% para início do processo de dosagem, e considerando uma consistência de 260±15 mm de *Flow Table*. Para definição final do consumo de água deve-se fazer ajuste experimental através do ensaio de consistência (SANTOS, 2014).

Com as quantidades de agregado e água, parte-se do princípio de que os vazios deixados pela areia serão ocupados pelos aglomerantes, água, aditivos, adições e ar. Dessa maneira, se calculam os aglomerantes, partindo da premissa de que o percentual mínimo de cada aglomerante é de 5% (SANTOS, 2014). Deste modo, tem-se o percentual em volume aparente (Z) mínimo (5%) e o máximo (equação 3.3) de aglomerante em função somente do agregado.

$$Z = 100 - P_{areia} - 5 - 15 \quad (3.3)$$

O consumo percentual de cimento ($P_{cimento}$) pode ser definido em função de se atribuir consumos de cal (P_{cal}) pela equação 3.4, conforme experiência dos profissionais, ou encontrar a cal em função do cimento (equação 3.5). Santos (2014) destaca que foi considerado uma aproximação em que percentuais de adições, aditivos e ar incorporado são considerados nulos. Pode-se inserir os mesmos posteriormente durante o processo de ajuste do traço, se necessário.

$$P_{cimento} = 100 - (P_{cal} + P_{areia} + P_{água}) \quad (3.4)$$

$$P_{cal} = 100 - (P_{cimento} + P_{areia} + P_{água}) \quad (3.5)$$

Com as quantidades calculadas, obtém-se pelo menos três traços, que são ajustados experimentalmente, podendo durante esse processo serem modificadas as quantidades dos materiais, avaliando características relevantes da mistura como a consistência, coesão, exsudação, retenção de água (SANTOS, 2014).

Para encontrar o traço ideal, pode-se construir gráficos com os resultados de pelo menos três propriedades dos traços ajustados e correlacionando-os: as propriedades (eixos das abscissas) e percentuais dos materiais utilizados (eixo das ordenadas). A partir dos gráficos (linha de tendência da planilha eletrônica) ou usando algum processo de aproximação de resultados, pode-se encontrar as correlações, relacionando o consumo de cada material a cada propriedade de modo a atribuir o valor de dosagem (F_d) e encontrar o percentual de material para condição especificada, conforme equação 3.6.

$$F_d = F_k \pm \frac{t_{\alpha}}{z} n-1 \cdot s \quad (3.6)$$

Onde: F_d corresponde ao limite de dosagem de uma determinada propriedade da argamassa;

F_k corresponde ao limite característico de uma determinada propriedade da argamassa;

$\frac{t_{\alpha}}{z} n-1$ corresponde a um valor tabelado (Distribuição t) para um nível de

significância de 5% (confiabilidade de 95%) e grau de liberdade ($n-1$);

“s” é o desvio padrão da amostra avaliado através de regressão linear entre a propriedade (eixo das ordenadas – y) e os constituintes dos materiais em porcentagem de volume (eixo das abscissas – x);

“n” número de amostras.

4 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Considerações Iniciais

Com o intuito de desenvolver um método de dosagem para AEAA, com foco em argamassas armadas, que possibilitem atender às demandas normativas, ambientais e características dos materiais, estruturou-se um programa experimental que permita caracterizar os materiais, definir condições de um local e parâmetros normativos e testar o método proposto.

4.2 Materiais

Foi utilizado CPV-ARI (fabricado pela Cimentos Liz), por ser um cimento de alta resistência inicial, amplamente utilizado na indústria de pré-fabricados de argamassas armadas e também por ser um cimento com pequena quantidade de adição de modo a permitir avaliar melhor a influência da adição no compósito. A água utilizada foi da rede de distribuição de Belo Horizonte, conforme permite a ABNT NBR: 11173: 1990.

Foi utilizado agregado miúdo proveniente de leito de rio (areia natural) quartzoso, atendendo às especificações da ABNT NBR NM 248: 2003. Destaca-se que se apresentará a caracterização dos agregados durante o processo de dosagem, nos resultados, de modo a facilitar a análises dos mesmos.

Inseriu-se a adição de pó de pedra calcário, passante na peneira Mesh 100, ou seja, com abertura de 0,150 mm, que também será caracterizado na apresentação dos resultados.

Foi empregado o aditivo ViscoCrete 20HE da fabricante Sika, que o descreve como aditivo líquido superplastificante de pega normal para indústria de pré-

moldados, concretos de alta resistência inicial, concretos de alto desempenho e concretos auto adensáveis.

4.3 Programa Experimental

Este projeto foi estruturado segundo o procedimento experimental:

- primeiramente estruturou-se o método de dosagem, a partir da bibliografia e experiências dos pesquisadores, para argamassa estrutural auto adensável, baseada nas características dos materiais e condições de uso e aplicação.
- numa segunda etapa, executou-se os procedimentos propostos no método de dosagem, sendo avaliado a sua exequibilidade e limitações;
- encerrou-se a pesquisa com a validação do método por meio da verificação do atendimento dos pré-requisitos definidos no início do processo através de avaliações experimentais e testes estatísticos (Test t para garantir a confiabilidade dos resultados considerando um nível de significância de 0,05).

Foram realizados os ensaios da Tabela 1 para comprovar as características especificadas. Destaca-se que alguns foram retirados de normas técnicas e outros identificados em trabalhos técnico-científicos. Foram avaliados aspectos mecânicos e de durabilidade das argamassas produzidas com o método. As propriedades avaliadas neste trabalho são descritas a seguir.

Tabela 1 - Ensaios realizados no programa experimental.

ENSAIO	IDADE (dias)	N° CPs
<i>Consistência - Mini-cone slump test</i> (OKAMURA E OUCHI, 2003)	0	-
<i>Consistência - Mini-cone slump test</i> (OKAMURA E OUCHI, 2003)	0	-
Densidade de massa no estado fresco – ABNT NBR 13278:2005	0	3
Massa específica no estado endurecido – ABNT NBR 9778:2009	28	4
Índice de absorção de água – ABNT NBR 9778:2009	28	4
Porosidade – ABNT NBR 9778:2009	28	4
Módulo de Elasticidade Dinâmico – ASTM C 215: 2008	28	4
Resistência à Compressão axial – ABNT NBR 13279:2005	28	4
Resistividade Elétrica – Santos (2006) e Whiting e Nagi (2003)	28	4
Imagens de Microscópio digital – 1000X	28	4

4.3.1 Consistência e viscosidade pelo método *mini-cone slump flow test* e o *mini v-funnel test*

O *mini-cone slump flow test* foi realizado com a determinação dos diâmetros médios após a liberação da amostra de argamassa de um molde cônico, determinando o parâmetro Gm , conforme equação 4.1. Destaca-se que se usou as características indicadas por Rao *et al.* (2015) e Nepomuceno *et al.* (2012), nos quais Gm estão adequados para argamassas auto adensável com os valores de 5,3 a 5,9, com Dm entre 251 mm e 263 mm.

$$Gm = (Dm / D_0)^2 - 1 \quad (4.1)$$

Onde: Gm = Parâmetro de medida do *mini-cone slump flow test*;

Dm = diâmetro médio após o fluxo da argamassa;

D_0 = diâmetro inicial da base do cone.

Já o *mini v-funnel test* é a determinação do tempo (t em segundos) de escoamento da amostra de argamassa por uma estrutura em funil com formato "V". Com tempo de escoamento, calcula-se o parâmetro Rm conforme equação 4.2. Novamente os autores identificaram que o intervalo em que melhor se obtém as características de fluxo e viscosidade desejáveis está entre 1,14 e 1,30 s⁻¹ (OKAMURA e OUCHI, 2003).

$$Rm = 10 / t \quad (4.2)$$

Onde: Rm = Parâmetro de medida do *mini v-funnel test* (segundos⁻¹);

t = tempo de escoamento;

4.3.2 Densidade de massa no estado fresco

Não existe uma norma específica que determine um ensaio para definir a densidade de massa da argamassa armada ou argamassa de alta resistência. Por este motivo nesse trabalho foi considerada a metodologia prescrita na ABNT NBR

13278: 2005, especificada para argamassas para assentamento de parede e revestimento de paredes e tetos, cuja equação é semelhante à indicada na ABNT NBR 9833: 2009, direcionada a concreto no estado fresco. O valor da densidade de massa pode ser calculado de acordo com a equação 4.3.

$$d = (m_c - m_v) / v_r \quad (4.3)$$

Onde: d = densidade de massa da argamassa no estado fresco (g/cm^3);

m_c = massa do recipiente contendo argamassa de ensaio (g);

m_v = massa do recipiente vazio (g);

v_r = volume do recipiente cilíndrico (cm^3).

4.3.3 Massa específica da amostra seca no estado endurecido

A ABNT NBR 11173: 1990 especifica que a massa específica mínima de uma argamassa armada é de $1800 \text{ g}/\text{cm}^3$, contudo não determina um método para calcular este parâmetro, sendo utilizada neste trabalho o procedimento da ABNT NBR 9778: 2009, para argamassa e concreto endurecidos, conforme equação 4.4.

$$P_s = m_s / (m_{sat} - m_i) \quad (4.4)$$

Onde: P_s = relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis (g/cm^3);

m_s = massa da amostra seca (g);

m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

m_i = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

4.3.4 Índice de absorção de água no estado endurecido e porosidade.

A ABNT NBR 11173: 1990 prescreve que o índice de absorção de água da argamassa no estado endurecido, quando determinado de acordo com a ABNT

NBR 9778: 2009, não deve exceder a 8,0%. Sendo assim, foi utilizada a metodologia dessa segunda norma para realização do ensaio, conforme equação 4.5.

$$A_i = [(m_{sat} - m_s) / m_s] \times 100 \quad (4.5)$$

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

m_s = massa da amostra seca (g);

m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g).

Utilizou-se 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 conforme equação 4.6.

$$P = [(m_{sat} - m_s) / (m_s - m_{sub})] \times 100 \quad (4.6)$$

Onde: P – Porosidade (%);

m_s – 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);

4.3.5 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado pelo método de frequência ressonante forçada, sendo utilizado o equipamento Erudite MKII Ressonante Frequency Test System no modo longitudinal, conforme descrito pela ASTM C215: 2008. A geometria do corpo de prova foi de 10 cm x 20 cm e calculou-se a frequência de ressonância pela equação 4.7:

$$E_d = 4n^2 L^2 \rho \cdot 10^{-12} \quad (4.7)$$

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

L = comprimento do corpo de prova (mm);

n = frequência do modo fundamental da vibração longitudinal (Hz);

ρ = densidade (Kg/m³).

4.3.6 Resistência característica à compressão

A resistência característica à compressão de uma argamassa para ser utilizada no sistema de argamassa armada deve ser de no mínimo 25 MPa, conforme ABNT NBR 11173: 1990. Como não é determinado um método específico para a determinação da resistência à compressão, foi utilizada a metodologia descrita pelas ABNT NBR 13279: 2005 (argamassas) que é semelhante à ABNT NBR 5739: 2007 (concretos), conforme equação 4.8.

$$f_c = F_c / A_{rea} \quad (4.8)$$

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

F_c = carga máxima aplicada (N);

A_{rea} = área da seção transversal do corpo de prova (mm²).

4.3.7 Resistividade Elétrica

No ensaio de resistividade elétrica foram realizadas leituras da corrente elétrica contínua, gerada para cada corpo de prova, por uma diferença de potencial aplicada, entre dois eletrodos colocados sobre a superfície dos corpos de prova. Foi utilizado o equipamento Gerador de Função Digital FG -8102 da Politerm do Laboratório de Ensaio Especiais da UFMG.

Para a realização do ensaio foram utilizados corpos de prova de (10x20) cm, com tempo de cura de 28 dias. A fim de se obter o mesmo grau de umidade em todas as amostras, os corpos de prova foram imergidos em uma caixa com água por um período de mais de 24 horas. Este procedimento foi adotado com a finalidade de manter a umidade dos corpos de prova que é necessária para realizar o ensaio. O teor da umidade do corpo de prova (seco ou úmido) influi na leitura de diferença

de potencial. Com base na lei de Ohm os resultados da resistividade das amostras serão calculados, conforme equação 4.9.

$$\rho_{elétrica} = R * (A_{resistividade} / L) = (V * A) / (L * I) \quad (4.9)$$

Onde: $\rho_{elétrica}$ = resistividade elétrica (Ωm);

R = resistência elétrica (Ω -Ohm);

I = corrente (Amperes);

V = diferença de potencial (Volt);

L = Comprimento da amostra (m);

$A_{resistividade}$ = área transversal da amostra atravessada pela corrente (m^2).

5 PROPOSTA DE MÉTODO DE DOSAGEM DE ARGAMASSA ESTRUTURAL AUTO ADENSÁVEL

5.1 Considerações Iniciais e organograma de dosagem

A metodologia que será proposta em seguida utiliza alguns dos conceitos de outras metodologias já utilizadas e publicadas como: Selmo (1989); Caneiro e Cincotto (1999); Tutikian e Dal Molin (2008); Okamura e Ouchi (2003), cuja descrição se encontra no Capítulo 3 deste trabalho. No entanto, ressalta-se que o método proposto por Santos (2014) foi a principal referência para o atual estudo, sendo este autor o orientador do trabalho. Diferencia-se que Santos (2014) focou seu método em argamassas mistas para revestimento e assentamento, enquanto o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método que se aplique especificamente ao desenvolvimento de AEAA (sem cal) e com uso de adição de pós inertes.

O método de dosagem foi estruturado de forma a permitir a determinação das quantidades dos materiais envolvidos de maneira que a argamassa final tenha as propriedades conforme especificação de projeto. Para isso, foi desenvolvido uma sequência de atividades práticas que permitem ao profissional especialista responsável pela execução da argamassa desenvolver argamassas baseadas nas características dos materiais e condições de uso e aplicação.

O presente capítulo apresentará um conjunto de atividades, equações e verificações que possibilitarão o dimensionamento dos materiais. Além disso serão propostos métodos de avaliação/conferência das características desejadas para argamassa. O método de dosagem proposto é composto por sete etapas, conforme organograma de dosagem da Figura 7.

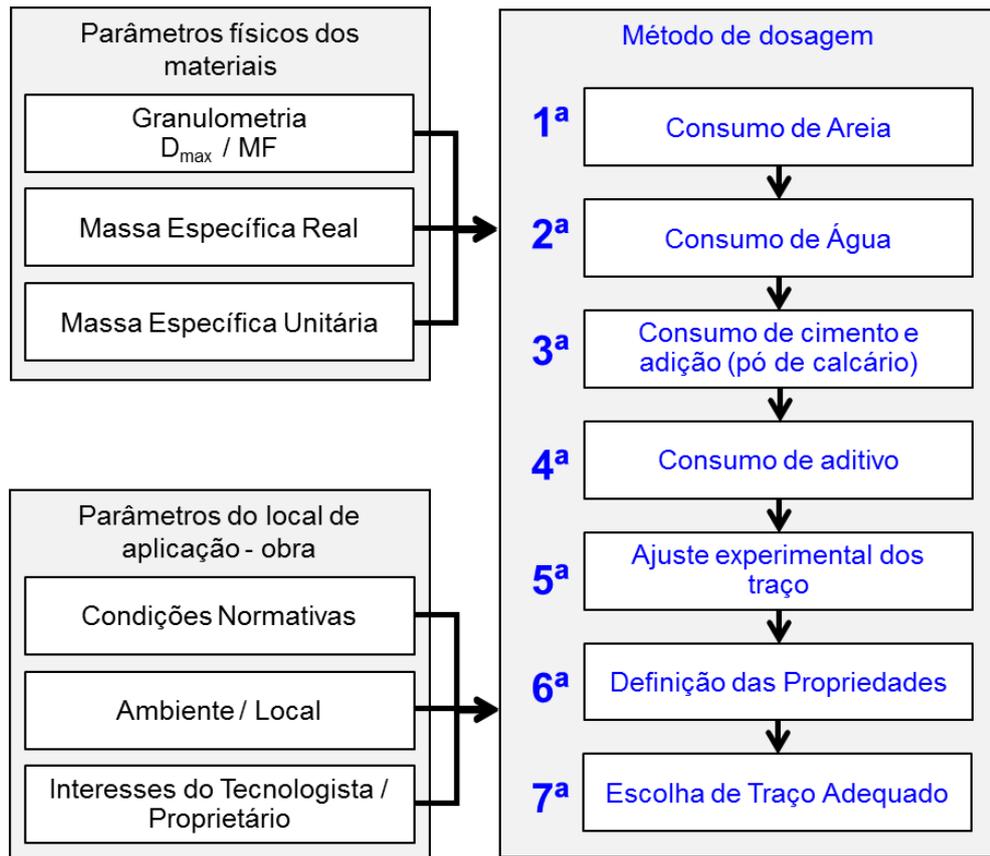


Figura 7- Organograma da metodologia proposta.

5.2 Parâmetros condicionantes ao início da dosagem

A obtenção de uma argamassa de qualidade, que atenda às demandas de resistência e durabilidade, exige o conhecimento de algumas características de seus componentes e cumprimento de premissas previstas em norma. Como o foco desse trabalho são as argamassas armadas, os principais condicionantes estão descritos na ABNT NBR 11173:1990. A seguir estão listadas as principais informações que deve-se dispor para iniciar o processo de dosagem:

- a) massa específica real e unitária dos componentes da argamassa que serão necessárias nas conversões e no dimensionamento dos traços;
- b) granulometria completa do (s) agregado (s) miúdo (s) e da adição mineral, com os dados de curva granulométrica, diâmetro máximo, módulo de finura e teor de material pulverulento que é elemento imprescindível para o início deste método de dosagem;

- c) condições ambientais e de projeto exigidas para a argamassa de interesse, uma vez que definem a resistência e durabilidade exigidas pelas condições de vida útil da obra, fluidez e coesão para as condições de aplicação;
- d) deve-se observar as condições normativas ou outra que se fizerem necessárias em função das condições de aplicação e demais legislações. Cita-se a seguir, algumas que devem ser atendidas de acordo com a ABNT NBR 11173:1990:
- massa específica da mistura deve ser maior ou igual a 1.800 kg/m³;
 - o índice de absorção de água da argamassa não deve ultrapassar os 8% quando determinado de acordo com a ABNT NBR 9778:2009;
 - a resistência característica à compressão da argamassa deve ser superior a 25 MPa;
 - o fator água/cimento máximo permitido na mistura é de 0,45.
- e) possuir laboratório apropriado para simular as condições em que a argamassa será reproduzida e executar os ensaios de verificação das propriedades;
- f) caso o método de dosagem seja aplicado no canteiro de obras, esse ambiente deve conter os equipamentos e mão de obra especializada com capacidade de reproduzir todas as atividades exigidas pelo método.

5.3 Método de dosagem proposto

5.3.1 Quantidade de agregado no traço

A definição da quantidade de agregado se dá pelas características da curva granulométrica e das massas específicas unitárias e reais. Com essas informações é possível dimensionar o coeficiente de vazios deixados pelo agregado, e com isso pode-se preencher esses vazios com água+cimento+adição (nesse caso especificamente com pó de calcário).

O princípio de substituição dos vazios deixados pelos agregados foi utilizado no método de dosagem de Santos (2014) e também Tutikian e Dal Molin (2008). Essa prática aumenta o empacotamento das partículas, melhorando a mistura nos aspectos de resistência, durabilidade, compacidade e coesão (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A equação 5.1 proposta foi desenvolvida por Santos (2014) e permite definir a quantidade de agregado (P_{areia}) consumida na mistura, embasada no coeficiente de vazios obtido pela relação entre massas específicas unitária (γ_u) e real (γ_r).

$$P_{areia} = 100 - \{ [1 - (\gamma_u / \gamma_r)] * 100 \} \quad (5.1)$$

O estudo da granulometria do agregado é fundamental, visto que as argamassas armadas têm um diâmetro máximo de utilização do agregado de acordo com o projeto de execução, pois esse composto é utilizado para fabricação de peças esbeltas. De acordo com a ABNT NBR 11173: 1990, a dimensão do agregado não deve ser maior do que $\frac{1}{4}$ da menor espessura da peça e $\frac{1}{2}$ da menor abertura das telas de aço.

5.3.2 Quantidade de água e aditivo superplastificante no traço

A definição da quantidade de água a ser utilizada na dosagem é função da fluidez e coesão da mistura, pois as argamassas armadas precisam vencer as obstruções provocadas pelas armaduras para preencher todo o espaço da fôrma. Para verificar essa fluidez são realizados os ensaios *mini-cone slump flow test* e *mini v-funnel test* descritos no item 4.3.1 deste trabalho.

O cálculo da quantidade de água deve ser realizado através do fator a/c, que segundo a ABNT NBR 11173:1990 deve ser de no máximo 0,45. O fator utilizado para o cálculo pode ser determinado de acordo com experiências do tecnologista, utilizando como parâmetro traços já executados anteriormente, ou mesmo levando em consideração alguma demanda específica de projeto. No entanto, se propõe adotar o valor de 0,45 (limite proposto em norma), pois vários estudos

como Tutikian e Dal Molin (2008), Rao *et al.* (2015) e Nepomuceno *et al.* (2012) registram argamassas e concretos auto adensáveis com fatores maiores e resistências muito superiores a 25 MPa. O fator água/cimento maior contribui para fluidez da mistura, portanto além de diminuir a quantidade de cimento a ser utilizada, também diminui o consumo de superplastificante, contribuindo para o menor custo final da mistura. Por esse motivo é feita a opção de se utilizar o maior teor água/cimento permitido pela ABNT NBR 11173:1990, ou seja 0,45.

São sugeridos ensaios prévios com as concentrações propostas inicialmente para que a consistência e fluidez da mistura sejam testadas, e assim o profissional tenha condições de definir com mais propriedade a quantidade de água. Como o valor máximo do fator água/cimento normatizado é de 0,45, nos casos em que essa concentração não se faz suficiente para obtenção das características, é necessária a utilização dos superplastificantes. A mistura do superplastificante deve ser realizada conforme recomendações (RAO *et al.*, 2015):

- a) inserção dos agregados, aglomerantes e adições. A mistura é realizada por aproximadamente 1 minuto;
- b) 80% da água é adicionada e misturada por aproximadamente mais 1 minuto, com objetivo de homogeneizar a mistura;
- c) a segunda fração de água, contendo os 20% restantes, deve ser adicionada lentamente com o superplastificante. A mistura deve ser realizada por mais 5 minutos;
- d) após a última mistura, a argamassa deve “descansar” por 2 minutos. E então, antes de realizar os ensaios no estado fresco, o composto deve ser misturado por mais 1 minuto.

5.3.3 Quantidade de cimento e adição

Definido o consumo de areia, é conhecido também o volume de vazios ($100 - P_{areia}$) entre as partículas do agregado. Estes podem ser preenchidos pelo cimento, adição, aditivo e água. Determina-se então o percentual de cimento e água que preencha os vazios do agregado, fixando-se a proporção água/cimento,

que conforme descrito na ABNT NBR 11173:1990, é sugerido o valor de 0,45. Essa relação pode ser alterada conforme objetivo de projeto e características desejadas pelo tecnologista.

O método proposto prevê a determinação de no mínimo cinco traços diferentes, os quais são analisados os resultados das propriedades das argamassas, e então um traço ideal é construído avaliando-se as necessidades de projeto e o menor custo de produção. Para tal, o primeiro traço e mais forte é composto apenas por cimento, areia e água (com adição de superplastificante quando necessário). Os outros quatro traços são determinados com a substituição de parte da quantidade de cimento por adição com efeito filler. O objetivo é obter uma mistura que mantenha as características desejadas com um custo inferior.

Várias adições podem ser incorporadas ao traço de argamassa (conforme descrito no item 2.5 deste trabalho). No entanto, para o desenvolvimento da metodologia está sendo proposta a utilização de pó de calcário, que pode ser classificado como inerte e utilizado com sucesso em substituição parcial do cimento, e produzindo redução no uso de superplastificante em misturas com fluxo semelhante (NEPOMUCENO *et al.*, 2012). Destaca-se que este trabalho utilizou adições nas proporções de 20% a 50% de pó de calcário para substituir o cimento (em massa), de maneira que seus parâmetros mínimos para manter as características desejáveis da argamassa não fossem comprometidos. Ressalta-se que a substituição do cimento pelo pó de calcário tem outras vantagens, como redução de custo e atendimento à demanda ambiental, já que a produção de cimento vem causando vários impactos e agravos diretos e indiretos à saúde e bem-estar do planeta (MAURY e BLUMENSCHHEIN, 2012).

A determinação dos percentuais de água e cimento é feita utilizando a sequência de cálculo proposta pelas equações de 5.2 a 5.5.

$$P_{\text{cimento}} + P_{\text{água}} = 100 - P_{\text{areia}} \quad (5.2)$$

Onde: P_{cimento} = consumo de cimento no traço, em % (volume);

P_{areia} = consumo de areia no traço, em % (volume);

$P_{\text{água}}$ = consumo de água no traço, em % (volume);

Destaca-se que foi adotado uma aproximação em que percentuais de aditivos são considerados nulos. Pode-se inserir o mesmo posteriormente durante o processo de ajuste do traço, se necessário. A metodologia propõe a determinação do cimento e água (em volume) utilizando o valor do fator água/cimento (em massa). Primeiramente determina-se o cálculo do consumo da água em função do cimento (em volume), equação 5.3:

$$FV_{\text{ag/ci}} = \left(\gamma_{u(c)} / \gamma_{u(\text{ag})} \right) * FM_{\text{ag/ci}} \quad (5.3)$$

Em seguida, calcula-se a quantidade de consumo de cimento (em % de volume aparente), conforme equação 5.4:

$$P_{\text{cimento}} + (FV_{\text{ag/ci}} * P_{\text{cimento}}) = 100 - P_{\text{areia}} \quad (5.4)$$

Com a quantidade de cimento calculada é possível encontrar o consumo de água (em % de volume), que estava determinada em função do volume de cimento, equação 5.5:

$$P_{\text{água}} = FV_{\text{ag/ci}} * P_{\text{cimento}} \quad (5.5)$$

Onde: $FV_{\text{ag/ci}}$ = fator água/cimento em volume aparente;

$\gamma_{u(c)}$ = massa específica unitária do cimento;

$\gamma_{u(\text{ag})}$ = massa específica unitária da água;

$FM_{\text{ag/ci}}$ = fator água/cimento em massa.

Dessa maneira, se encontra o traço em porcentagem de volume aparente (P_{cimento} , P_{areia} , $P_{\text{água}}$). Na sequência é calculado o traço em massa do primeiro dos cinco traços, que é o mais forte. Para se determinar os outros quatro traços, o cimento é substituído pela adição, em percentuais de massa. Por exemplo, se substitui 10% da massa do cimento por adição no traço dois, 20%, 30% e 40% nos subsequentes. Essa condição permite que seja possível conhecer o comportamento dos traços, e propor um traço que otimize o custo mantendo as

características desejadas da argamassa. Os percentuais a serem substituídos devem ser previamente testados experimentalmente de acordo com os materiais utilizados de maneira que se mantenha as características desejáveis no estado fresco. Pode-se ainda aumentar o teor de adições com outras variações.

5.3.4 Ajuste experimental dos traços

Os passos anteriores permitem o dimensionamento de pelo menos cinco traços distintos, em função do volume de seus componentes. Esses traços devem ser ajustados experimentalmente de acordo com a coesão, consistência e fluidez, executando os ensaios do *mini-cone slump flow test* e *mini v-funnel test* descritos no item 4.3.1 deste trabalho. Se necessário, deve ser feita a inserção de superplastificante, ou também um ajuste na quantidade de água, desde que não seja ultrapassado o valor de 0,45 do fator água/cimento.

Para o desenvolvimento dos traços que contêm adição, a quantidade de água é calculada tendo como parâmetro não somente o cimento, mas os finos totais, ou seja, cimento e adição. Dessa maneira, no caso de um fator água/cimento fixado em 0,45 para o dimensionamento do traço mais forte, os outros traços manterão a proporção de água/(cimento + pó de calcário) fixada em 0,45.

No momento em que se realiza o *mini-cone slump flow test* é possível observar visualmente se há segregação na argamassa. Quando há segregação, forma-se uma pilha central enquanto uma nata flui para as extremidades. Essa característica pode comprometer a estrutura futura a ser executada, pois ocorreria a exsudação da água, provocando falhas na “concretagem” e diminuindo a durabilidade e resistência da peça.

Tem-se ainda os espalhamentos muito baixos que indicam que o concreto está pouco fluido, o que demanda mais superplastificante ou água para fluidificar a mistura de modo a garantir que seja auto adensável e evite brocas na estrutura.

5.3.5 Definição das propriedades e moldagem dos corpos de prova

O método de dosagem deve garantir as propriedades da argamassa demandadas em projeto, conforme item 2.7 deste trabalho. De acordo com as condições de execução de “concretagem” e utilização fim da estrutura a ser concebida, definem-se as principais características e propriedades que serão demandadas da argamassa a ser dosada. No entanto algumas propriedades devem ser analisadas em todas as argamassas armadas, pois são exigências de norma (conforme já descrito no item 5.2): massa específica, índice de absorção de água e resistência característica à compressão. Destaca-se que a fluidez e coesão já são verificadas no próprio processo de dosagem. Definidas as idades e propriedades a serem verificadas, os corpos de prova são moldados segundo especificações normativas e ensaiados nas datas definidas.

5.3.6 Definição do traço ideal

Para encontrar o traço ideal, pode-se utilizar o processo de Santos (2014) e construir gráficos correlacionando os valores das propriedades (eixos das abscissas) e percentuais dos materiais utilizados (eixo das ordenadas). Os traços a serem utilizados nessa etapa devem ser os ajustados, o que pode resultar em percentuais dos materiais um pouco diferentes da dosagem inicial. Além disso, é indicado que se tenha pelo menos três propriedades e seja identificado o traço que atenda aos limites exigidos para todas.

A partir dos gráficos (linha de tendência da planilha eletrônica) ou usando algum processo de aproximação de resultados, pode-se encontrar as correlações relacionado o consumo de cada material a cada propriedade de modo a atribuir o valor de F_d e encontrar o percentual de material para condição especificada, conforme equação 5.6 (SANTOS, 2014):

$$F_d = F_k \pm (t_{[(\alpha/z) (n-1)]} * S) \quad (5.6)$$

Onde: F_d = limite de dosagem de uma determinada propriedade da argamassa;

F_k = limite característico de uma determinada propriedade da argamassa;
 $t_{[a/z] (n-1)}$ = valor tabelado (Distribuição t) para um nível de significância de 5% (confiabilidade de 95%) e grau de liberdade ($n-1$);
 S = maior desvio padrão das amostras analisadas na referida propriedade;
 n = número de amostras.

O processo se encerra com a (s) apresentação (ões) do (s) traço (s), nas versões que foram pedidas (massa, volume, porcentagem, por m³, por saco de cimento). Indica-se a confecção de uma pequena amostra para verificar a quantidade de água através do ensaio de consistência e a moldagem de corpos de prova com o traço final para verificação das propriedades antes do uso maximizado na obra. Se todos os parâmetros no estado fresco e endurecido estiverem fechados o processo terminou. Caso contrário, verificar algum possível erro durante o processo de dosagem e refazê-lo parcialmente ou totalmente.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo foi aplicada a metodologia proposta para produção de uma Argamassa Estrutural Auto Adensável (AEAA) de alta resistência e respeitando as características de uma argamassa para o sistema construtivo de argamassa armada. Para tal, foram realizados os cálculos e testes práticos para confecção de um traço real que proporcione a produção de uma mistura que atenda aos parâmetros desejados.

O objetivo do estudo é validar a metodologia proposta, atestando sua exequibilidade e confiabilidade dos resultados. Esses foram analisados através de testes de normalidade para verificar sua aproximação da curva normal. Ainda foram realizadas análises estatísticas utilizando média, desvio padrão e erro padrão. Para garantir a confiabilidade dos resultados, foi realizado o teste de significância Teste t (com significância de 5%, ou seja, confiabilidade de 95%).

6.1 Definição dos parâmetros físicos e de aplicação dos materiais

6.1.1 Materiais

Foi utilizado agregado miúdo natural quartzoso, encontrado no mercado de Belo Horizonte. O material tem como característica o diâmetro máximo de 4,8mm considerando os pequenos espaços que serão preenchidos pela argamassa. A caracterização do material está representada na Tabela 2 e Figura 8.

Tabela 2- Caracterização do agregado miúdo.

Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248: 2003)	
PENEIRA – Abertura (mm)	% Retida Acumulada
4,8	0
2,4	2
1,2	9
0,6	37
0,3	76
0,15	99
<0,15	100
Diâmetro máximo	4,8 mm
Módulo de finura	2,222
Massa específica real (ABNT NBR NM 52: 2009)	2,591 kg/dm ³
Massa específica unitária solta (ABNT NBR NM 45: 2006)	1,496 kg/dm ³

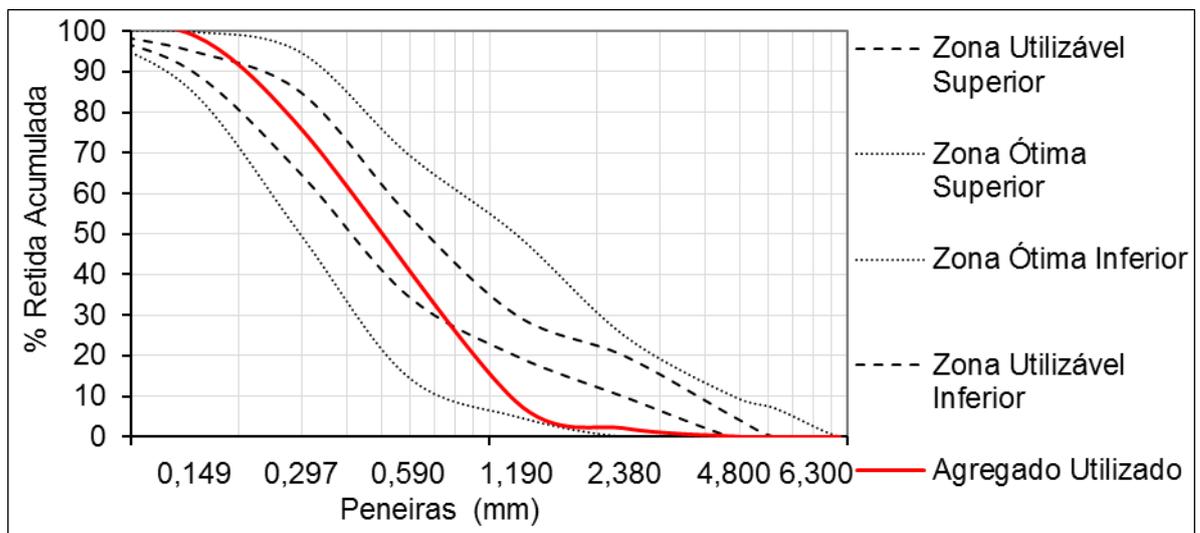


Figura 8 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural utilizado.

O cimento utilizado foi o CPV-ARI (fabricado pela Cimentos Liz), como adição utilizou-se pó de calcário passante na peneira com abertura de 0,150 mm (Tabela 3 e Figura 9), e o aditivo superplastificante foi o ViscoCrete 20HE da fabricante Sika.

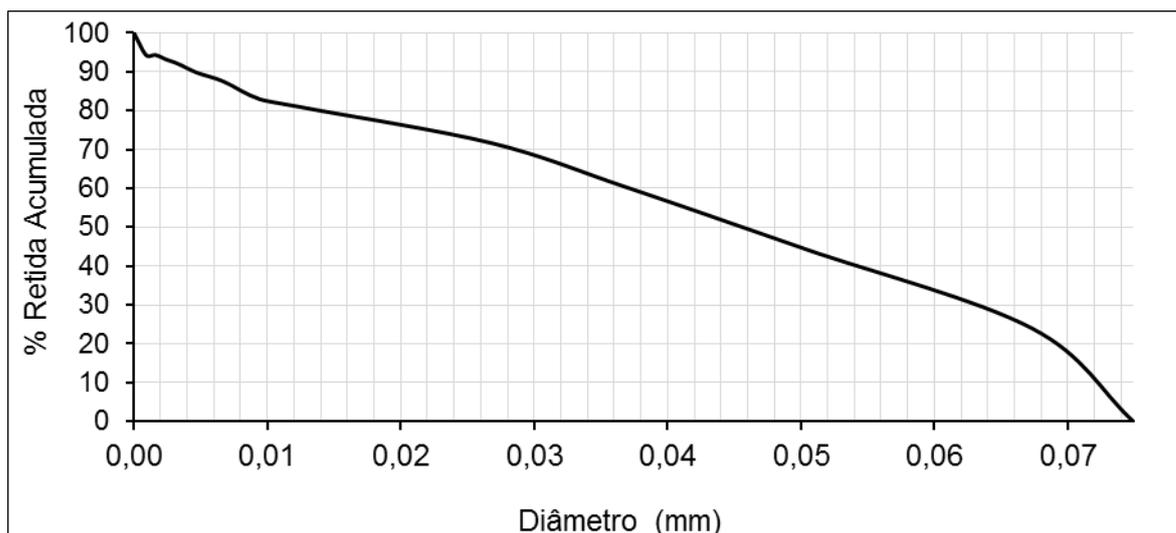


Figura 9 - Granulometria da Adição.

Tabela 3 - Tabela de Caracterização da adição.

Composição granulométrica (ABNT NBR 7181:2016)	
D10	0,072 mm
D50	0,044 mm
D90	0,003 mm
Massa específica real	2,674 kg/dm ³
Massa específica unitária solta (ABNT NBR NM 45: 2006)	1,387 kg/dm ³

6.1.2 Condicionantes de utilização

A AEAA seria utilizada na fabricação de peças pré-moldadas utilizando o sistema construtivo das argamassas armadas, conforme norma ABNT NBR 11173:1990. Para isto, a argamassa deve possuir características em seu estado endurecido:

- massa específica da mistura deve ser maior ou igual a 1.800kg/m³;
- o índice de absorção de água da argamassa não deve ultrapassar os 8%, quando determinado de acordo com a ABNT NBR 9778:2009;
- a resistência característica à compressão da argamassa superior a 25MPa;
- o fator água/cimento máximo permitido na mistura é de 0,45.

Em relação ao fator água/cimento, será utilizada a relação máxima de 0,45 em massa para o primeiro traço, e à medida em que o cimento for substituído pelo pó de calcário, a relação que será fixada é de água/finos, ou água/(cimento+pó de calcário), em 0,45 em massa. Nepomuceno *et al.* (2012) registra ensaios com argamassas de fator água/cimento na casa de 0,60 com resistências à compressão superiores a 40 MPa. Dessa maneira, espera-se alcançar e comprovar as determinações da ABNT NBR 11173:1990, com fatores água/cimento superiores a 0,45, e assim diminuir o custo de produção.

Será considerada uma argamassa de alta resistência. Dessa maneira, a resistência característica à compressão mínima exigida será de 40 MPa, e não apenas os 25 MPa recomendados por norma. Essa definição tem como objetivo avaliar a viabilidade do método de substituição do cimento por adição, para se obter argamassas auto adensáveis nos padrões que estão sendo estudados por outros pesquisadores como Nepomuceno *et al.* (2012) e Rao *et al.* (2015), ou seja, de resistência à compressão maior do que 40 MPa.

6.2 Consumo de agregado

Utilizando os dados da Tabela 2, as massas específicas real e unitária da areia são 2,591g/cm³ e 1,496g/cm³ respectivamente. Adotando a equação 5.1 o percentual de consumo de agregado é 57,74% em volume aparente:

$$P_{\text{areia}} = 100 - \{ [1 - (\gamma_u / \gamma_r)] * 100 \}$$

$$P_{\text{areia}} = 100 - \{ [1 - (1,496 / 2,591)] * 100 \}$$

$$P_{\text{areia}} = 57,74$$

6.3 Consumo de água e superplastificante

A quantidade de água utilizada no traço é fixada em função da quantidade de cimento, e foi utilizada a relação de 0,45 em massa do fator água/cimento. Conforme elucidado no item 5.3.2, essa proporção visa utilizar a maior quantidade

de água permitida por norma, diminuindo ao máximo a necessidade do superplastificante, cujo consumo eleva o custo de produção da mistura.

O consumo de superplastificante foi definido conforme indicação do fabricante, que sugere concentração entre 0,8% e 2,0% do consumo de cimento. A concentração fixada para os ensaios após testes preliminares de consistência foi de 1,5% do consumo de cimento em massa.

6.4 Consumo de cimento

Utilizando a equação 5.4, considerando a relação em massa de água/cimento de 0,45, o percentual em volume de cimento na mistura é de 23,94%. Em sequência, o volume de água também pode ser calculado utilizando a equação 5.5, e o percentual de água é 18,32%. Dessa maneira, o traço unitário em volume da mistura é 1: 2,41: 0,77: 0,024 (cimento:areia:água:aditivo).

$$FV_{ag/ci} = (\gamma_{u(c)} / \gamma_{u(ag)}) * FM_{ag/ci}$$

$$FV_{ag/ci} = (1,7 / 1,0) * 0,45$$

$$FV_{ag/ci} = 0,765$$

$$P_{cimento} + (FV_{ag/ci} * P_{cimento}) = 100 - P_{areia}$$

$$P_{cimento} + (0,765 * P_{cimento}) = 100 - 57,74$$

$$P_{cimento} = 23,94$$

$$P_{água} = FV_{ag/ci} * P_{cimento}$$

$$P_{água} = 0,765 * 23,94$$

$$P_{água} = 18,32$$

6.5 Consumo de adição

Calculado o traço em volume da mistura, o traço em massa também é encontrado utilizando-se as massas específicas unitárias dos materiais, sendo utilizado o

valor de 1,7 g/cm³ para o cimento. Dessa maneira, o traço em massa é 1:2,12:0,45:0,015 (cimento:areia:água:aditivo). Esse traço corresponde ao mais forte dos cinco traços que serão desenvolvidos para construção dos gráficos em função das características.

O consumo de adição proposta foi a substituição de até 30% da massa do cimento, variando as concentrações de 0% a 30% nos cinco traços conforme a Tabela 4. A definição pelo percentual máximo a ser substituído de cimento foi consequência dos ensaios de ajuste de traço. Foram feitas misturas com os materiais e em seguida realizados os ensaios de consistência e viscosidade pelo método mini-cone *slump flow test* e o mini *v-funnel test*. Dessa maneira, foi possível avaliar a consistência desejada para uma argamassa auto adensável, e fixar o percentual máximo de adição, além de também se determinar a necessidade de superplastificante.

Tabela 4 - Traços em massa.

Traço	Cimento	Adição	Aditivo	Areia	Água
1	1,00	0,00	0,015	2,12	0,45
2	0,91	0,09	0,014	2,12	0,45
3	0,84	0,16	0,013	2,12	0,45
4	0,77	0,23	0,012	2,12	0,45
5	0,70	0,30	0,011	2,12	0,45

A quantidade de adição a ser utilizada está diretamente ligada ao tipo de superplastificante utilizado, uma vez que ao se aumentar a quantidade de adição diminui-se o superplastificante, que é determinado em função da massa de cimento. Existem estudos com substituições de até 60% do cimento por adição (NEPOMUCENO *et al.*, 2012; RAO *et al.*, 2015). O superplastificante utilizado na pesquisa atual é de terceira geração com princípio ativo de policarboxilatos, a utilização de outros superplastificantes, ou até mesmo desse mesmo produto com concentrações diferentes, proporcionará resultados distintos nos ensaios de consistência e, conseqüentemente, concentrações também diferentes.

6.6 Definição do Traço Ideal

As propriedades balizadoras para se definir o traço ideal são massa específica, resistência característica à compressão axial e índice de absorção, conforme item 6.1.2 deste trabalho. Para cada uma das três características, o valor de F_d (parâmetro de dosagem) deve ser calculado conforme equação 5.6 do item 5.6.3.

6.6.1 Massa específica no estado fresco e endurecido

Para a massa específica, tem-se que a norma ABNT NBR 11173:1990 não especifica se deve ser no estado fresco ou endurecido, logo as duas situações foram analisadas. Utilizando a equação 5.6 para os erros máximos (Tabela 5) da massa específica no estado fresco e endurecido, tem-se o valor do parâmetro de dosagem para esta propriedade de 1,89g/cm³ (Figura 10). Percebe-se que todos os traços atendem às condições especificadas para a massa específica, logo não é necessário a montagem de curva de dosagem para esta propriedade.

Tabela 5 - Resultados da massa específica no estado fresco (γ_f) e no estado endurecido (γ_e) e os desvio padrão (DP) e erro dos experimentos.

Traço	γ_f (g/cm ³)	Erro	DP (g/cm ³)	γ_e (g/cm ³)	Erro	DP (g/cm ³)
1	2,38	0,00	0,01	2,11	0,01	0,03
2	2,35	0,01	0,01	2,09	0,00	0,01
3	2,31	0,01	0,01	2,07	0,01	0,02
4	2,24	0,00	0,01	2,05	0,01	0,02
5	2,17	0,01	0,02	2,05	0,01	0,02

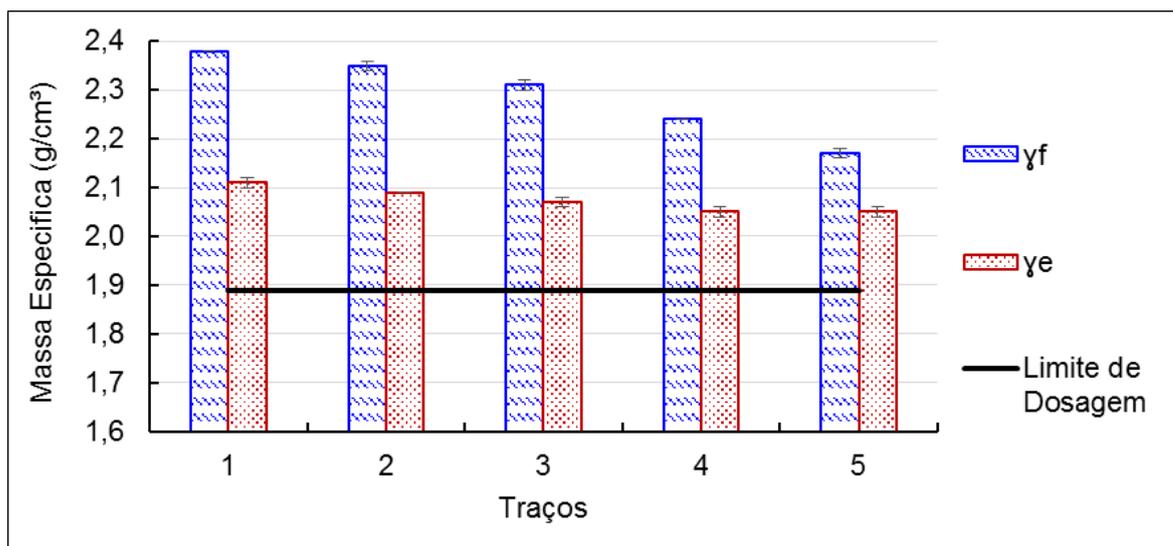


Figura 10 – Resultado da massa específica no estado fresco e no endurecido.

6.6.2 Resistência característica à compressão axial

Conforme descrito nas condições de utilização, o objetivo é que a argamassa tenha uma resistência característica à compressão axial mínima de 40 MPa. Utilizando a equação 5.6 como limite inferior (unilateral), tem-se o parâmetro de dosagem com o valor de 49,23 MPa. Logo, para obtenção de uma argamassa com no mínimo 40 MPa, deve-se buscar o valor mínimo de 49,23 MPa nos 5 traços. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial a 28 dias estão na Tabela 6 e as curvas de dosagem na Figura 11, que relaciona os valores das resistências com o consumo de cada material.

Tabela 6 – Desvio padrão dos resultados da resistência à compressão axial .

Traço	f_c médio (MPa)	Erro	DP (MPa)
1	66,16	1,78	3,08
2	59,96	2,05	3,56
3	57,48	2,20	3,81
4	47,60	2,27	3,93
5	43,86	1,36	2,35

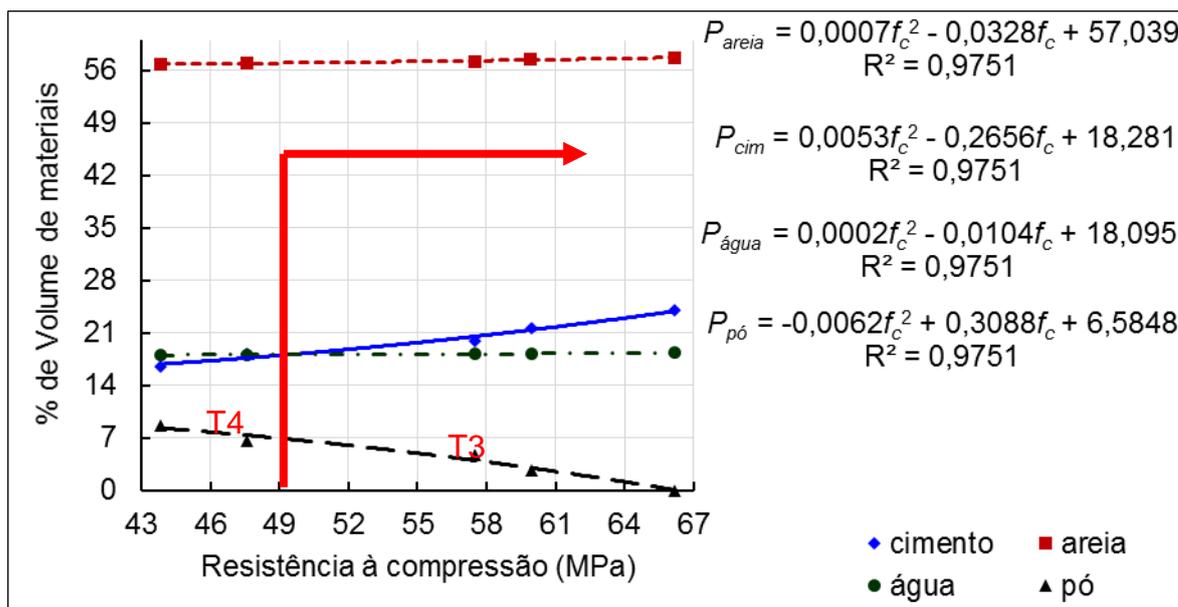


Figura 11 - Consumo de material em função da resistência à compressão axial a 28 dias.

Para a situação desejada de 49,23MPa, substitui-se o valor de f_c nas equações da Figura 5, obtém-se o traço de maior substituição possível de adição de pó calcário pelo cimento. É perceptível que à medida em que o cimento é substituído pela adição, o valor da resistência à compressão axial é reduzido. O traço ideal em volume aparente dessa característica é pelo menos (18,12%: 57,32%: 18,13%: 6,43%) em percentual e 1,00:3,16:1,00:0,36 (cimento:areia:água:adição) unitário. Observa-se que o traço ideal está posicionado entre o traço 3 e 4.

6.6.3 Índice de absorção de água

As mesmas análises realizadas para os resultados da resistência à compressão axial devem ser feitas com os valores dos ensaios de absorção de água, que segundo as condições de utilização permite um valor máximo de 8,0%. Utilizando a equação 5.6 no maior desvio padrão da Tabela 7 e definindo o valor como máximo (unilateral superior), pode-se encontrar o parâmetro de dosagem no valor de 7,53%. Estruturou-se as curvas de dosagem na Figura 12.

Tabela 7- Resultados do índice de absorção de água e desvio padrão (DP) e erros.

Traço	Ai médio (MPa)	Erro	DP (Mpa)
1	6,97	0,03	0,05
2	7,06	0,11	0,19
3	8,21	0,11	0,19
4	8,63	0,06	0,11
5	8,86	0,12	0,20

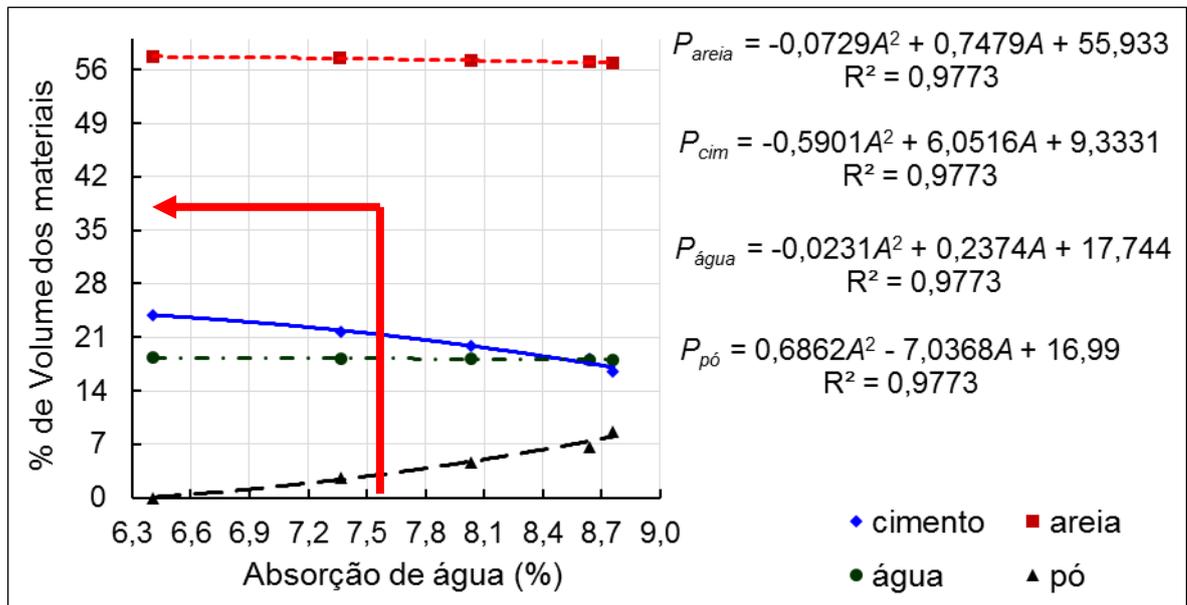


Figura 12 - Consumo de material em função do índice de absorção a 28 dias.

Para a situação desejada de 7,53%, substitui-se o valor de A_i nas equações da Figura 12 e obtém-se o traço de maior substituição possível de cimento pela adição, visto que, ao contrário da resistência à compressão, quanto maior é o volume de cimento substituído pela adição, maior também é o índice de absorção de água. Sendo assim, o traço em volume aparente ideal que permite maior teor de adição, respeitando o limite de 7,53% de índice de absorção, é no mínimo o traço (21,98%: 57,49%: 18,24%: 2,29%) em percentual e 1,00: 2,62: 0,83: 0,10 (cimento:areia:adição:água) unitário. Observa-se que o traço ideal está posicionado entre o traço 2 e 3.

6.6.4 Escolha do traço ideal

Comparando os resultados dos ensaios das três propriedades balizadoras, observa-se que, sobre as massas específicas, todos os traços atendem às condições de utilização. Dessa maneira, a escolha do traço ideal será condicionada pela resistência à compressão axial ou pelo índice de absorção.

Como o objetivo é substituir o máximo de cimento por adição de pó de calcário, o traço que proporcionar maior substituição, obedecendo às condições previamente estabelecidas, será o mais adequado. O traço com maior substituição de pó de calcário pelo cimento, segundo resistência à compressão, gera uma proporção cimento/adição 1,0/0,36 em volume. Para o índice de absorção, essa proporção máxima é de 1,0/0,10 em volume. Sendo assim, o traço limite em relação à compressão não garante o índice de absorção desejado, e essa última característica passa a ser a determinante para o traço ideal, que é (1,00; 2,62; 0,83; 0,10) em volume, ou (1,00; 2,30; 0,49; 0,09) em massa. Importante constatar que a relação em massa água/(cimento+adição) permanece 0,45, conforme proposto.

6.7 Validação da metodologia

A validação da metodologia foi realizada com a moldagem de corpos de prova utilizando o traço ideal encontrado no item anterior. Esses corpos de prova foram submetidos a ensaios para verificação das propriedades balizadoras, com objetivo de comprovar que os valores previstos se confirmariam e atendem às especificações de utilização determinadas no item 6.1.2. Os resultados dos ensaios aos 28 dias podem ser verificados na Tabela 8, e nas Figuras 13, 14 e 15. Para a validação dos resultados foram ampliadas as quantidades de corpos de prova. Na definição do traço ideal foram utilizados 4 corpos de prova, já na validação foram utilizados 12, 12 e 13 corpos para massa específica seca, resistência à compressão axial e índice de absorção respectivamente.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios das propriedades balizadoras.

Massa Específica no estado endurecido (g/cm ³)			Resistência característica à compressão(MPa)			Índice de absorção de água (%)		
Média	Erro	Limite	Média	Erro	Limite	Média	Erro	Limite
2,040	0,003	1,800	46,24	1,18	40,00	5,65	0,16	8,00

O gráfico da Figura 13 confirma os valores da massa específica no estado endurecido superiores a 1,80 g/cm³. Todos os 5 traços iniciais tiveram resultados satisfatórios (teste *t*), o que se repete no traço ideal. Polito (2008) afirma que a massa específica no estado endurecido é menor do que a no estado fresco devido à saída de parte da água, e nos ensaios iniciais essa informação foi confirmada. Por esse motivo, para a confirmação dessa propriedade no traço ideal só foi realizado o ensaio no estado endurecido.

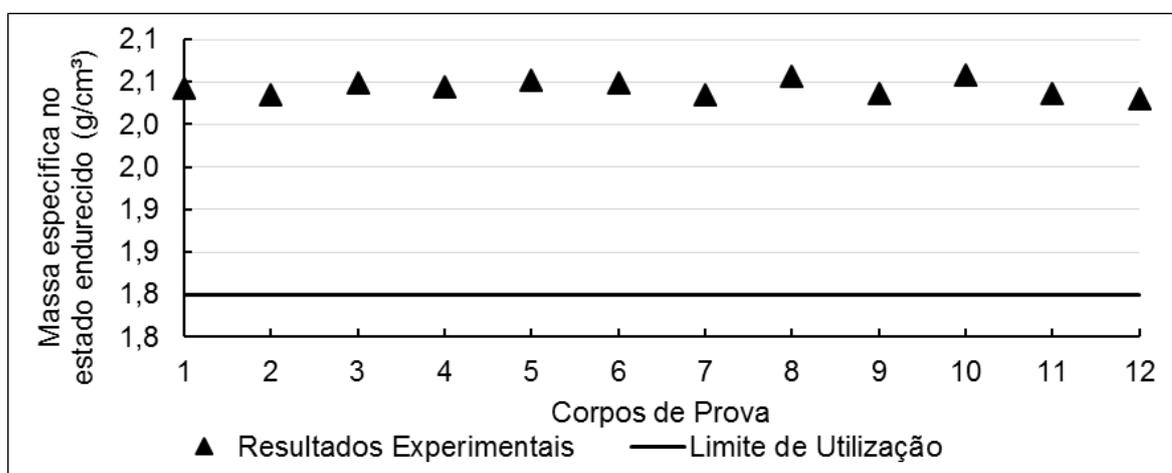


Figura 13 - Resultados da massa específica seca do traço ideal em 28 dias.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial também foram satisfatórios, visto que apesar de alguns valores terem flutuado abaixo do previsto, todos foram superiores (teste *t*) ao limite de 40 MPa como era o objetivo inicial (Figura 14). Nepomuceno *et al.* (2012) em seus resultados de compressão axial de argamassa auto adensável obteve valores semelhantes variando em torno de 50 MPa com fatores água/cimento entre 0,45 e 0,55. Como parâmetro ainda se pode citar os resultados de Poggiali (2010), que registra em seus estudos microconcretos com fator água/cimento de 0,50, utilizando substituição de 10% do cimento por cinza de bagaço de cana, e resistência à compressão

axial de aproximadamente 45 MPa. Assim, pode-se afirmar que a condição de utilização proposta foi atendida e, nesse aspecto, o método é válido.

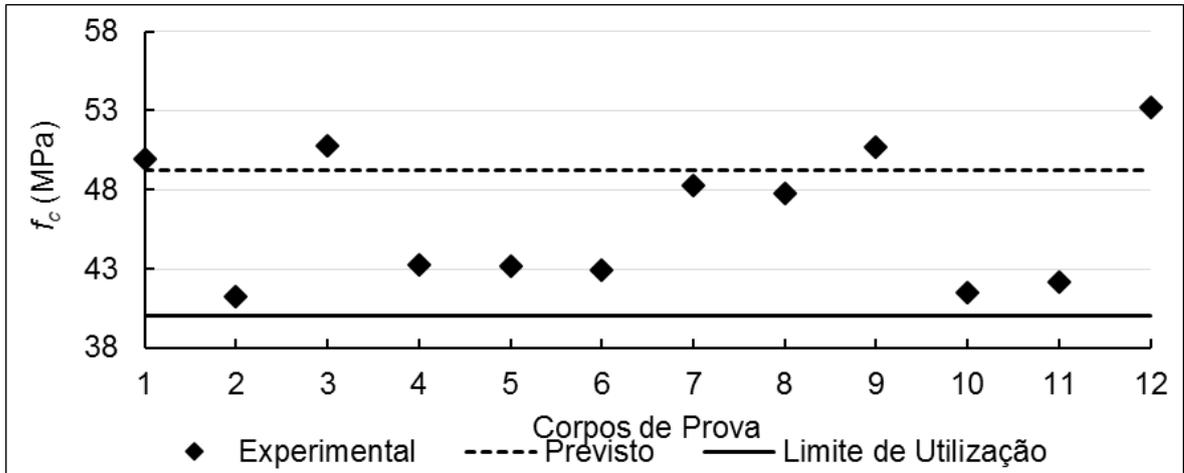


Figura 14 - Resultados da resistência à compressão axial do traço Ideal em 28 dias.

Os valores dos índices de absorção obtidos nos ensaios, conforme gráfico da Figura 15, são todos inferiores à 8,0% que foi solicitado nas condições de utilização. Segundo a norma ABNT NBR 11173:1990, essa condição garante a proteção às malhas de aço em estruturas esbeltas de argamassas armada.

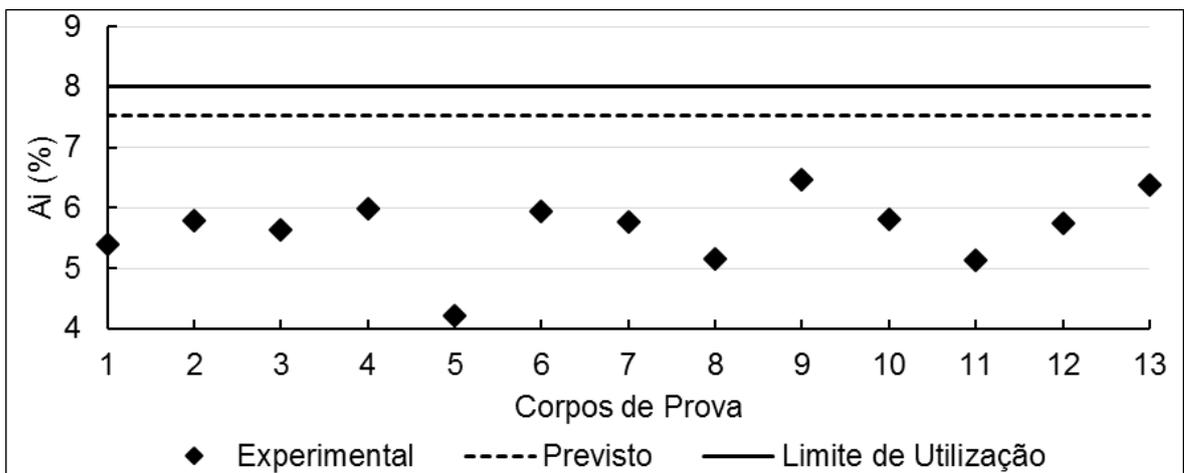


Figura 15 - Resultados do índice de absorção do traço Ideal após 28 dias.

Os resultados obtidos nos ensaios das propriedades balizadoras validam o método desenvolvido, pois foram alcançados os limites de utilização propostos para todas as propriedades balizadoras. Assim, pode-se afirmar que o traço

encontrado com a metodologia desenvolvida atende aos parâmetros de argamassa armada.

Esses resultados são muito importantes visto que na concepção da metodologia, o fator água/cimento máximo de 0,45 determinado pela norma ABNT NBR 11173:1990 não foi respeitado. O parâmetro utilizado foi o fator água/(cimento+adição) máximo de 0,45, que resulta em uma proporção de água/cimento maior do que 0,45. Portanto, como as propriedades exigidas em norma foram atendidas, pode-se concluir que essa modificação não comprometeu a aplicabilidade da argamassa.

6.8 Propriedades complementares

Com objetivo de reforçar a validação da aplicabilidade do método e, por consequência, da argamassa, ao fim a que foram propostos, foram realizados alguns ensaios para verificar outras propriedades que, apesar de não serem citadas na norma ABNT NBR 11173:1990, influenciam nas propriedades mecânica e de durabilidade das argamassas armadas (BARBOSA *et al.*, 2015; KULAKOWSKI, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 2014; TORGALKAR, 2004; TRISTÃO, 1995; WERLE, 2010 e ZHANG *et al.*, 2006).

6.8.1 Porosidade

A resistência à compressão do concreto/argamassa é influenciada pela sua porosidade, que pode ser expressa pelo volume total dos poros em relação ao volume total da pasta hidratada. Pode-se considerar como um parâmetro que, concretos de alta resistência, ou seja, com resistência à compressão superior a 40 MPa, têm em média porosidade de até 12,0% (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Para reforçar os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial feitos com o traço ideal, também foi realizado o ensaio de porosidade conforme item 4.3.4. A porosidade média encontrada nos ensaios foi de 11,58% conforme

gráfico da Figura 16, o que confirma a característica de elevada resistência à compressão da argamassa.

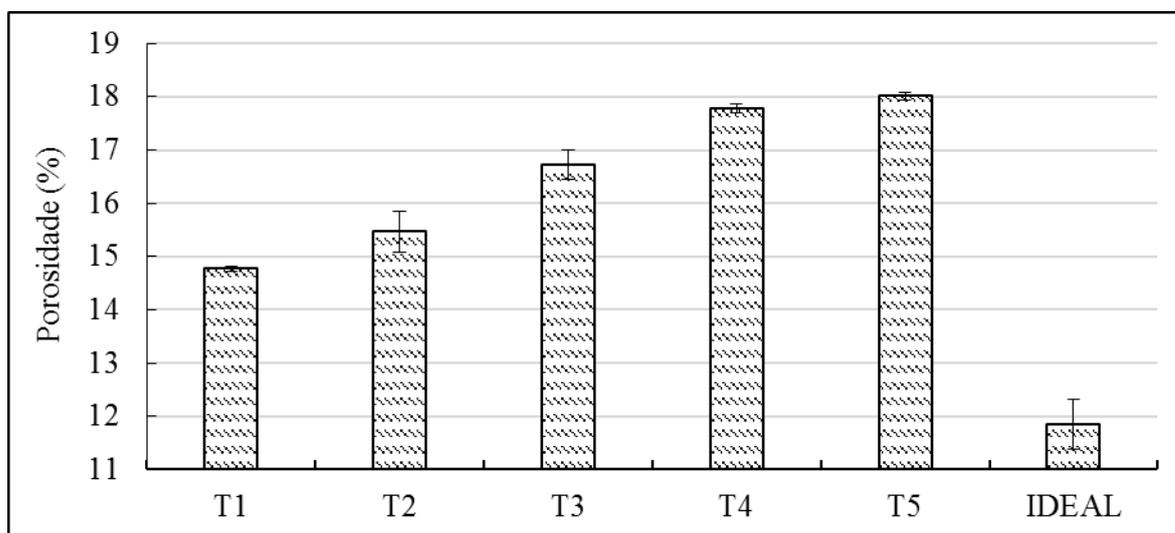


Figura 16 - Resultados do ensaio de porosidade.

A diminuição de aproximadamente 20% da porosidade no traço ideal em relação à média do traço 2 e 3, pode ser relacionada ao maior domínio da técnica pelo operador ao executar os últimos ensaios. Ainda pode-se ressaltar que os traços 1 a 5 foram realizados em betoneira de 63 litros enquanto o traço ideal foi misturado em betoneira de 140 litros. Isso se deu porque a quantidade de corpos a serem moldados para o traço ideal foi maior do que para os traços anteriores e, conseqüentemente, o volume produzido também o foi. Conclui-se que a betoneira de 400 litros misturou melhor os componentes da argamassa, melhorando o empacotamento e diminuindo os vazios. Observa-se, no entanto, que esse fator não influenciou significativamente na resistência à compressão axial.

Esse resultado corrobora ainda com o índice de absorção de água já avaliado no item 6.7, pois a tendência é de que quanto maior a porosidade da argamassa, maior a probabilidade de interação entre os poros e, por conseqüência, aumento da permeabilidade (BAUER, 2000). Portanto, a baixa porosidade dos corpos de prova do traço ideal reforçam a validação do método, que possibilitou a produção de uma argamassa com boa durabilidade. Ainda é importante avaliar que apesar, do fator água/cimento maior do que 0,45 (previsto na norma ABNT NBR

11173:1990), a argamassa apresenta resistência à compressão axial, índice de absorção e porosidade dentro dos parâmetros aceitáveis.

Foram feitas imagens com microscópio digital com aproximação de até 1000 vezes, dos corpos de prova dos cinco traços iniciais e também do traço ideal, o objetivo foi verificar os resultados de índice de absorção e porosidade descritos anteriormente. Nas Figuras 17 a 22 estão apresentadas as imagens dos traços, sendo que à esquerda o corpo de prova está sem nenhum tratamento, e à direita o corpo de prova foi pintado com pincel preto para evidenciar os poros, que não são atingidos pela tinta e, por esse motivo, estão na cor branca. Verifica-se com as imagens obtidas, poucas diferenças entre os traços no que tange aos tamanhos e disposição dos poros.

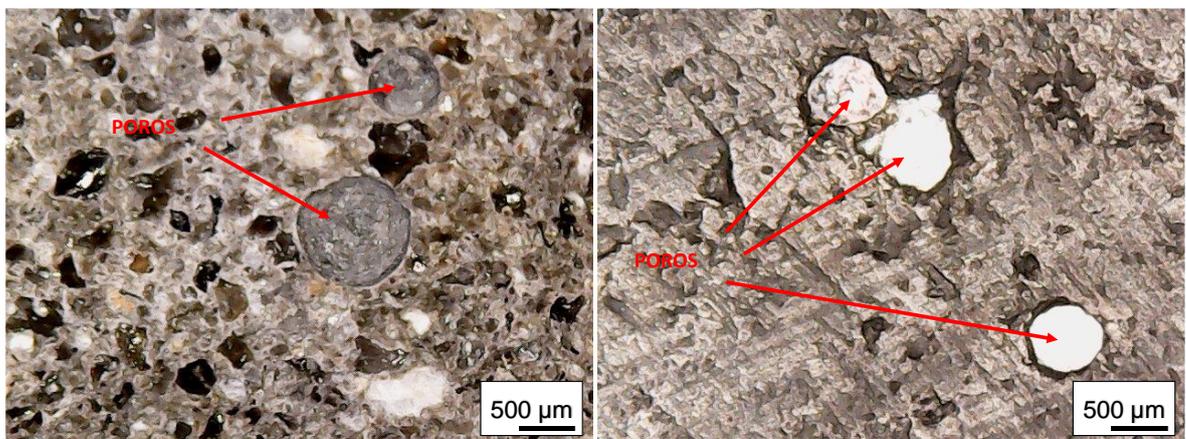


Figura 17 – Imagem do Microscópio digital do Traço 1. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.

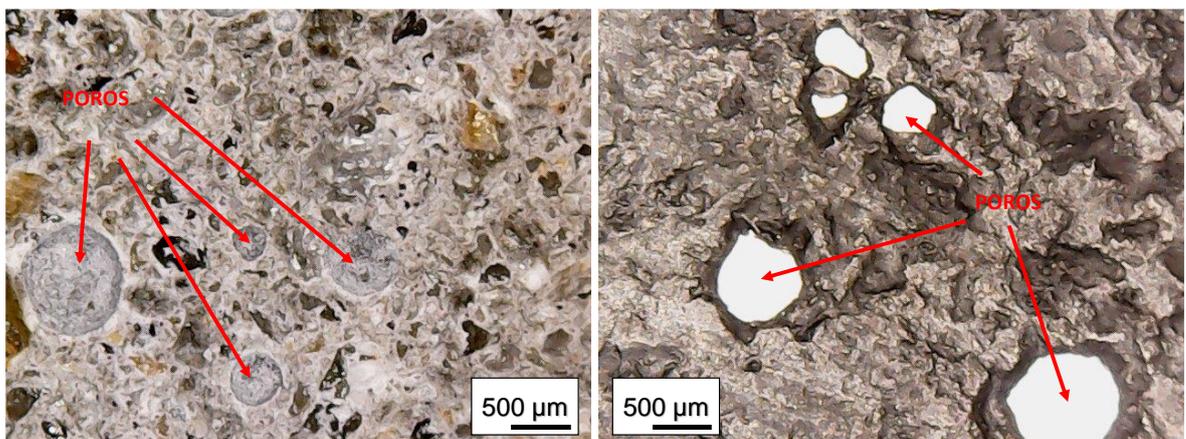


Figura 18 - Imagem do Microscópio digital do Traço 2. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.

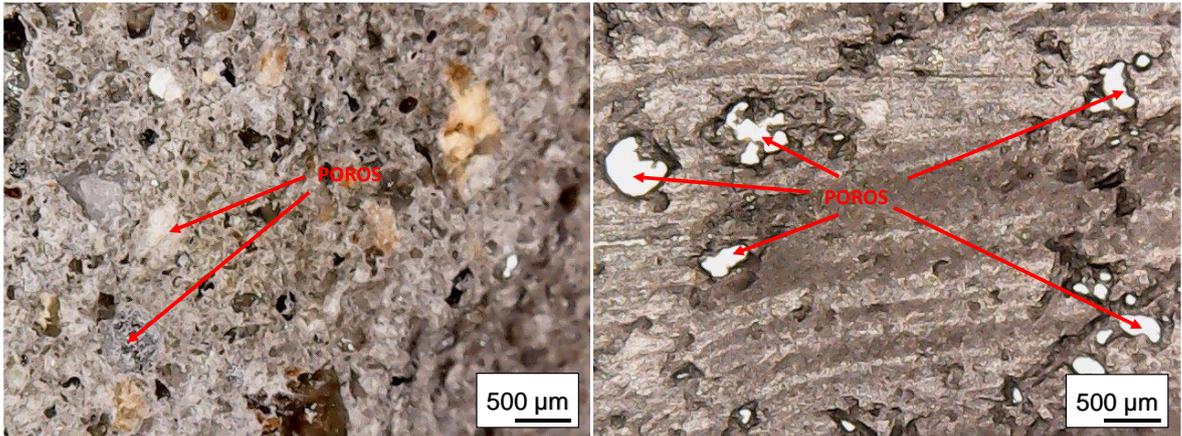


Figura 19 - Imagem do Microscópio digital do Traço 3. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.

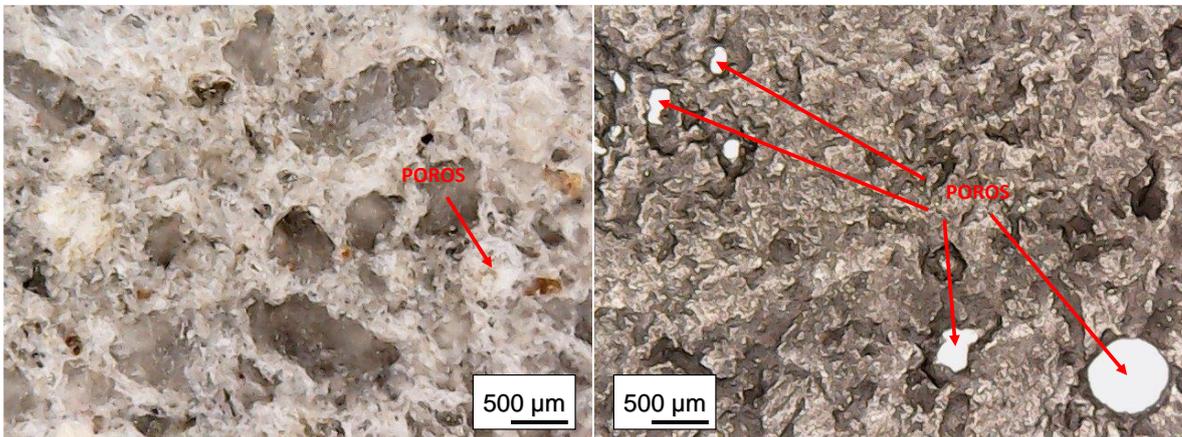


Figura 20 - Imagem do Microscópio digital do Traço 4. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.

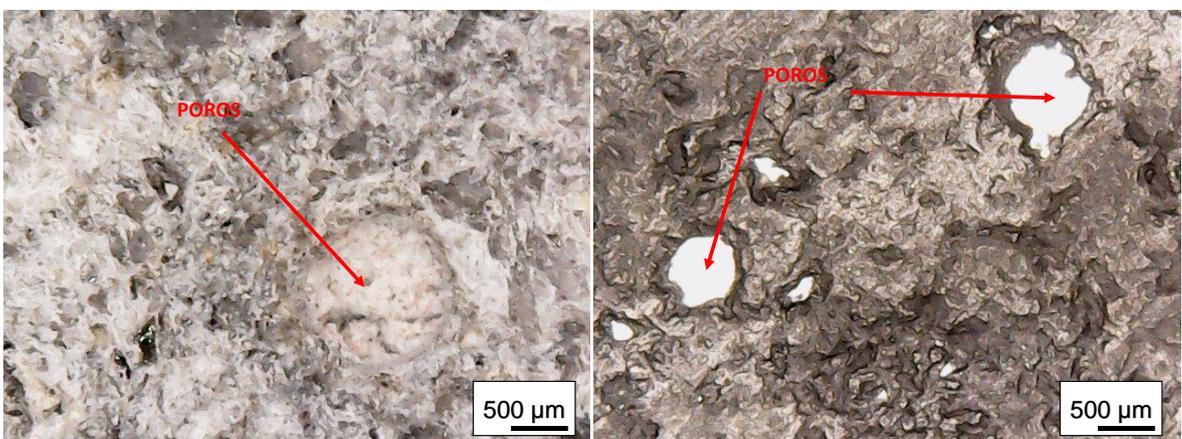


Figura 21 - Imagem do Microscópio digital do Traço 5. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.

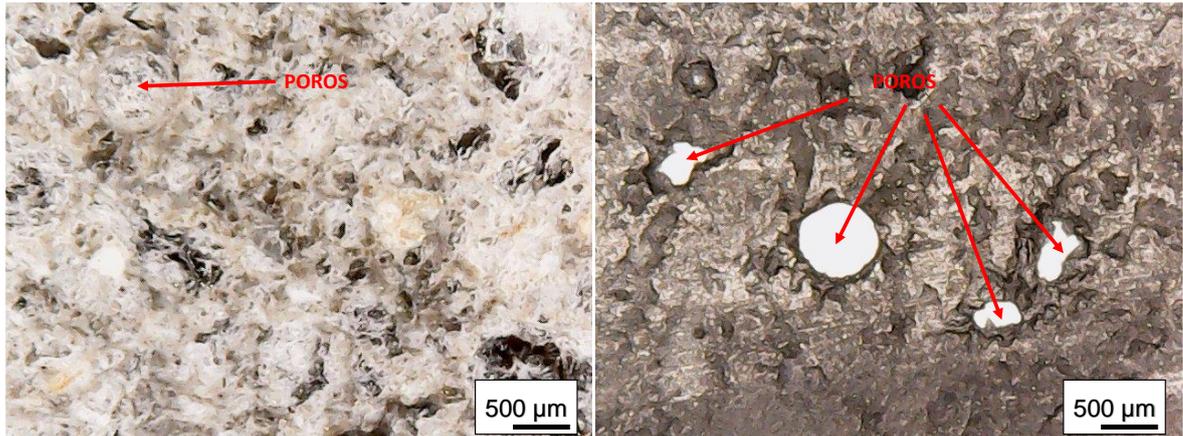


Figura 22 - Imagem do Microscópio digital do Traço Ideal. À esquerda imagem sem tratamento, à direita imagem com tratamento de tinta.

Apesar de ser pouco perceptível a diferença dos poros entre os traços, constata-se que os traços com maior inserção de adição têm uma quantidade maior de poros e com áreas menores, apesar de em ambos os casos não haver interligação entre eles: nos traços 3, 4 e 5 percebe-se alguns poros menores no entorno dos poros maiores, enquanto nos traços 1 e 2 os poros têm um diâmetro maior. No traço ideal, os poros têm tamanho intermediário aos traços 2 e 3, o que é coerente com as proporções dos materiais desse traço, que também está entre os traços 2 e 3. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) e PENG *et al.* (2009), esse refinamento da estrutura de poros é consequência do efeito *filler* da adição.

De maneira geral, as imagens reforçam a informação dos ensaios de absorção e porosidade, pois constatou-se poucos poros e baixa comunicação entre eles, o que diminui a porosidade e absorção de água, aumentando assim a durabilidade das argamassas (NEVILLE e BROOKS, 2013; NOKKEN e HOOTON, 2008).

6.8.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico também foi avaliado, conforme ensaio descrito no item 4.3.5, visto que essa é uma propriedade importante para estruturas esbeltas conforme elucidado no item 2.7.4: quanto maior o módulo de elasticidade dinâmico mais dificuldade a estrutura tem em absorver deformações. Argamassas

com menores proporções de água/cimento têm maior módulo de elasticidade, o que dificulta a absorção de deformações (SILVA, 2006; TORGALKAR, 2004; ZHANG *et al.*, 2006). Como a argamassa estudada é de alta resistência e possui o fator água/cimento mínimo permitido em norma, a verificação dessa propriedade se faz interessante.

Os resultados dos ensaios dos cinco traços iniciais e também do traço ideal (Figura 23), mostram que o módulo de elasticidade variou entre 26,5 e 32,0 GPa. Estudos realizados em amostras de concreto/argamassa comparando a resistência à compressão axial, fator água/cimento e módulo de elasticidade dinâmico registram resultados de módulo de elasticidade dinâmico entre 37,0 e 40,0 GPa, para fator água/cimento de 0,45 e resistência à compressão axial de 45,0 MPa (ALMEIDA, 2012). Portanto, a metodologia utilizada resultou em argamassas com módulos de elasticidade que estão dentro da normalidade e não comprometerão sua utilização. Novamente reforça-se a validação do método.

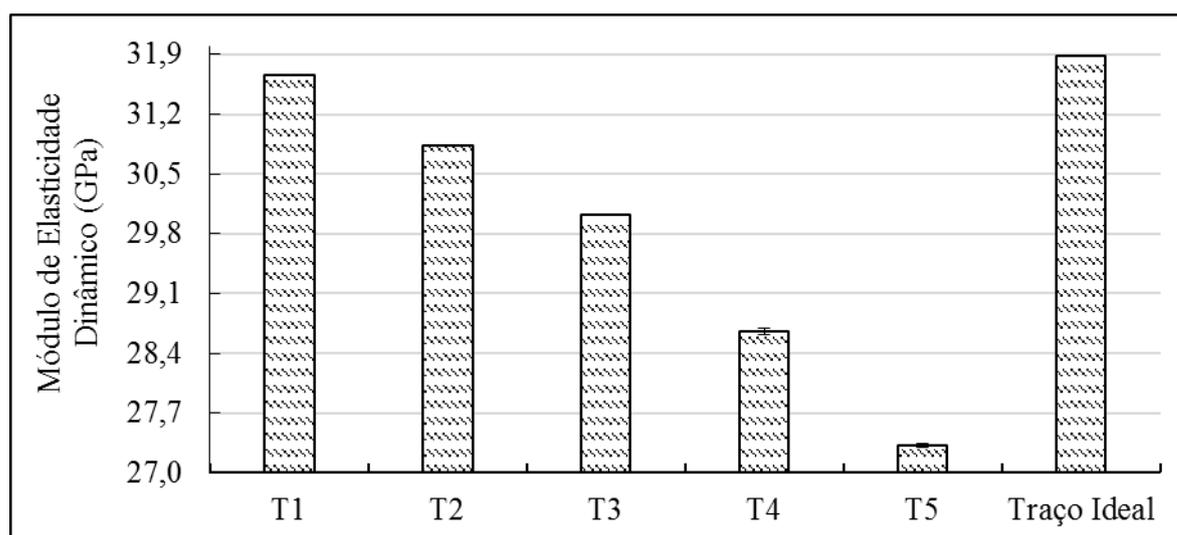


Figura 23 - Módulo de elasticidade dinâmico das amostras.

Observa-se que o módulo de elasticidade dinâmico do traço ideal foi cerca de 10% maior do que a média dos traços 2 e 3, faixa em que estão as proporções dos materiais do traço ideal. Esse resultado está relacionado à diminuição da porosidade citada no item anterior, pois a quantidade de vazios na argamassa é

inversamente proporcional ao módulo de elasticidade dinâmico (BARBOSA *et al.*, 2015).

6.8.3 Resistividade elétrica

Outra característica das peças fabricadas com o sistema de argamassas armadas é o pequeno cobrimento de suas peças entre a fôrma e a ferragem, devido à sua esbeltes. Por esse motivo, existe uma grande preocupação com a proteção que a argamassa/concreto proporciona à malha de aço. Nesse sentido, a durabilidade que a mistura oferece ao produto final foi avaliada pelo índice de absorção, que conforme o item 6.7, está de acordo com os parâmetros da norma, ou seja, o traço ideal registrou índice de absorção médio de 5,65% enquanto a norma ABNT NBR 11173: 1990 exige um máximo de 8,00%.

Para reforçar a confirmação da durabilidade da amostra produzida com o método desenvolvido, também foi realizado o ensaio de porosidade conforme já descrito nessa seção do trabalho, que avalia a probabilidade de interação entre os poros e, conseqüentemente, a permeabilidade da argamassa. Visando validar ainda mais o resultado obtido nos ensaios de absorção e porosidade, também foi realizado o ensaio de resistividade elétrica (Figura 24), que conforme Whiting e Nagi (2003) fornece faixas em que a elevada resistividade representa baixa faixa de corrosão, ver item 2.7.7.

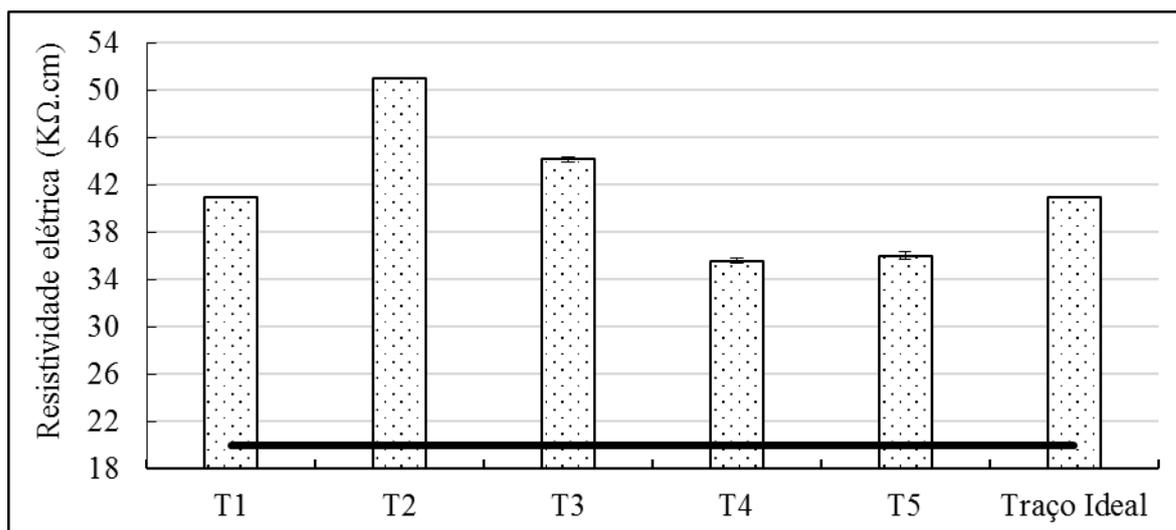


Figura 24 - Resistividade elétrica das amostras.

Segundo Whiting e Nagi (2003), resistividades elétricas superiores a 20 KΩ.cm representam baixa faixa de corrosão. Conforme a Figura 24, todos os cinco traços e também o traço ideal atingiram valores de resistividade elétrica muito superiores a 20 KΩ.cm, confirmando a proteção da argamassa à corrosão da malha de aço. Estes resultados só corroboram com o que já havia sido comprovado nos ensaios anteriores, apesar dos traços apresentarem um fator água/cimento maior do que 0,45, a argamassa produzida utilizando o método desenvolvido atendem aos parâmetros de durabilidade estudados, o que valida o método.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Metodologia de dosagem

Foi possível executar toda a metodologia de dosagem proposta, que se mostrou perfeitamente exequível e proporciona ao tecnologista conhecer as características dos materiais utilizados individualmente assim como os resultados da interação entre eles. A execução das etapas foi de baixa complexidade, o que fez concluir que o método pode ser executado não somente em laboratório como também em canteiro de obra.

A definição das quantidades dos materiais areia, cimento e água para o traço mais forte, feita através das fórmulas propostas, se mostrou eficiente visto a boa coesão e baixa segregação da argamassa produzida. A utilização do método *mini-cone slump flow test* e o *mini v-funnel test* possibilitou a determinação experimental da concentração de superplastificante e também do intervalo de adição a substituir o cimento. Foi possível determinar o traço experimentalmente acompanhando a fluidez e coesão da mistura.

A substituição gradativa do cimento pela adição em cinco traços proporcionou a avaliação da mudança das características com mais detalhe e precisão, o que também facilitou a montagem dos gráficos de análise do traço ideal. A escolha das propriedades avaliadas foi feita com objetivo de validar a mistura para ser utilizada em sistema de argamassa armada, e constatou-se que foi possível não só a validação como também reforçar algumas características importantes para utilização, tais como trabalhabilidade, exposição à agentes externos e reação a absorção de esforços, que impactam diretamente na durabilidade da argamassa. Essa validação foi realizada através dos resultados dos ensaios *mini-cone slump flow test* e o *mini v-funnel test*, massa específica, resistência à compressão axial, índice de absorção, porosidade, módulo de elasticidade e resistividade elétrica.

A aplicação de ferramentas estatísticas melhorou a análise das propriedades, diminuindo a margem de erro da execução das etapas anteriores e garantindo a confiabilidade (95%) dos resultados. Por fim, pelo traço ideal, pôde ser determinado levando-se em consideração as características determinadas como relevantes, e a influência da variação das proporções dos materiais no comportamento da mistura que ficou bastante evidenciada.

7.2 Validação do método e análise das propriedades da argamassa

O trabalho estatístico permitiu uma avaliação da confiabilidade dos resultados, ajustando os valores alvo de cada propriedade, o que proporcionou o acerto na escolha das proporções dos materiais no traço final e obtenção dos parâmetros de utilização desejados. Os resultados dos ensaios das propriedades balizadoras do traço ideal atenderam aos valores desejados, o que valida o método.

Sobre a massa específica, os valores diminuíram à medida em que diminuía a concentração de cimento e aumentava a adição. Esse resultado corrobora com os resultados do índice de absorção e porosidade, que aumentaram à medida em que a massa específica diminuía. A substituição do cimento por adição aumentou o fator água/cimento, o que aumenta a porosidade e absorção, que por consequência diminui a massa específica.

Apesar de ter sido utilizado um fator água/cimento maior do que 0,45, permitido na norma ABNT NBR 11173: 1990, os ensaios de índice de absorção de água, porosidade, resistividade elétrica e módulo de elasticidade forneceram resultados dentro de limites, que comprovaram a durabilidade da argamassa produzida com o método desenvolvido (NEVILLE e BROOKS, 2013; BAUER, 2000; ALMEIDA, 2012; WHITING E NAGI, 2003).

A resistência à compressão axial foi comprometida com a substituição do cimento, não só pelo aumento da porosidade, mas também pela diminuição dos produtos de hidratação. No entanto, a resistência à compressão ainda permaneceu em

patamares elevados, possibilitando um traço que substituiria uma grande porção de cimento.

A propriedade limitadora do traço no que diz respeito à substituição de cimento foi o índice de absorção. Essa conclusão ficou muito clara com a utilização dos gráficos de propriedade e concentração de materiais. Com as equações foi possível determinar o traço ideal que atendesse a todas as propriedades.

Determinado o traço ideal, foram realizados os ensaios das propriedades balizadoras: massa específica, índice de absorção e resistência à compressão axial. Todos os resultados atenderam aos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 11173:1990. Portanto, conclui-se que o método é eficiente e eficaz, pois permite a determinação de um traço de argamassa armada e a execução do mesmo de maneira padronizada, atendendo aos parâmetros exigidos.

Para reforçar a validação da metodologia desenvolvida, foram executados ensaios que permitissem a análise de propriedades complementares às exigidas por norma. As propriedades avaliadas de maneira complementar foram a porosidade, resistividade elétrica e módulo de elasticidade. Os resultados de todos os ensaios corroboraram com a conclusão de que a argamassa produzida com o método desenvolvido é durável, o que reforça a validação da metodologia.

O método ainda possibilitou, além de uma argamassa durável e que atendesse aos parâmetros normativos de uma argamassa armada, economia no processo produtivo. A substituição parcial do cimento pelo pó de calcário diminuiu o consumo de cimento de 406,98Kg/m³ para 373,65Kg/m³ de mistura, uma redução de 8,12% em massa. Essa substituição significa economia financeira na produção, além de torná-la menos agressiva ao meio ambiente com menor consumo de cimento (VARHEN *et al.*, 2016).

7.3 Processo de mistura

No desenvolvimento da execução da mistura da argamassa, mais especificamente na inserção do aditivo, foi registrada a dificuldade em definir a quantidade correta de aditivo para obtenção das características de consistência e trabalhabilidade exigidas em uma argamassa auto adensável. Essa dificuldade está relacionada a dois fatores principais aos quais se deve dar atenção especial ao utilizar o método de dosagem desenvolvido nesse projeto de pesquisa: o tempo de mistura e o equipamento utilizado para executar a mistura.

Sobre o tempo de mistura, deve ser testado o tempo necessário para que o aditivo trabalhe completamente nas partículas da argamassa, para que possa proporcionar o efeito desejado. Para o aditivo utilizado nas misturas executadas nesse projeto de pesquisa (ViscoCrete 20HE da fabricante Sika), identificou-se experimentalmente que o procedimento de mistura desenvolvido por Rao *et al.* (2015) e descrito no item 5.3.2, atendia aos tempos de reação com o restante da mistura.

No que tange ao equipamento utilizado, foi observado que esse deve proporcionar a mistura adequada dos componentes da argamassa. O dimensionamento do recipiente se mostrou fundamental, uma vez que ao utilizar a capacidade máxima da betoneira a mistura não foi adequadamente executada, e um mesmo traço resultou em consistências diferentes da argamassa. Conforme já descrito no item 6.8.1, para a execução das misturas dos 5 primeiros traços foi utilizada a betoneira de 63 litros, cuja o bojo permitiu uma mistura adequada. Ao executar a mistura do traço ideal, como o volume executado era maior, o bojo dessa betoneira não foi capaz de realizar a mistura de forma eficiente, o que fez com que os resultados esperados na consistência em consequência da inserção do aditivo não fossem obtidos. Dessa maneira o mesmo traço foi executado com uma betoneira de 140 litros, e os resultados da mistura do aditivo foram satisfatórios e correspondentes aos ensaios anteriores.

7.4 Sugestões para trabalhos futuros

O estudo de dosagem de argamassas é amplo, e outros desenvolvimentos podem ser feitos com objetivo de aumentar o conhecimento nesse campo. Nesse sentido, indica-se algumas linhas de pesquisa:

- a) Utilização do método desenvolvido nesse trabalho para avaliação de mais de um tipo de superplastificante, para identificar a influência do mesmo. Avaliar também a influência do método de mistura dos superplastificantes;
- b) Utilização do método desenvolvido nesse trabalho para avaliação de outras adições, inclusive reativas, e verificar sua influência nos resultados das propriedades;
- c) Utilizar dos conceitos abordados pela metodologia de dosagem desenvolvida nesse trabalho, como também de outras metodologias, para desenvolver uma metodologia de dosagem de geopolímeros e concreto de cimento Portland.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia que proporcionasse padronização no desenvolvimento de traços de argamassa armada, juntamente com uma proposta de substituição de parte de um material de maior custo, o cimento, por um de menor custo, adição de pó de calcário. Conclui-se que o trabalho teve resultados positivos sobre os objetivos propostos, possibilitando validar o método desenvolvido e contribuir com proposições acerca de alguns padrões normativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. M. **Análise do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico do Concreto de Cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. 213 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ALVES, R. J; MAGALHAES, M. D. C.; CARRASCO, E. V. M. Determination of the transverse Young's modulus(TYM) of wood by means of an input power technique **Construction and Building Materials**. v. 42, p. 11 a 21, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standart Test. Method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens**. C 215, 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. **Boletim Técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland BT-106**. 7 ed, 28p, São Paulo 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11173**: Projeto e Execução de Argamassas Armadas. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12654**: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - 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 de parede 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 5739**: Concreto – Ensaio de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro, 2009.

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 ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 0,075mm (nº200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

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 NM 52**: Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

BARBOSA, R. A.; ALVARENGA, R. C. S. S.; CARVALHO JÚNIOR, A. N.; FERREIRA, R. T. L.; RODRIGUES, L. M.; CASTRO, L. O.; GARCIA, R. B.; SANTOS, W. J. Análise comparativa de métodos de obtenção do módulo de elasticidade para concreto preparado com areias natural e artificial. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**. v. 24 (1), p. 151 a 161, 2015.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CAMPOS, P. E. F. Microconcreto de Alto Desempenho: Uma Contribuição para o Desenvolvimento da Pré-fabricação Leve. In: **Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado**, 1, 2005, São Carlos.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 02, p. 37-44, jul. 1997.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. Dosagem de argamassa através de curvas granulométricas. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Construção Civil, BT/PCC/237**. São Paulo, 1999.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**. v24, p113 a 117, jan., 2010.

FREITAS, C. **Argamassas de Revestimento com Agregados Miúdos de Britagem da Região Metropolitana de Curitiba: Propriedades no estado Fresco e Endurecido**. 2010. 135f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FURLAN JUNIOR, S. **O Uso da Protensão em Peças de Concreto de Seção Delgadas**. 1991. 203f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

HADDAD, L. S. O – **Estudo da Influência da Fôrma e da Granulometria dos Agregados nas Propriedades das Argamassas de Revestimento**. 2015. 113f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

HADDAD, L. D.; COSTA, C. M.; LOPES, P. H. P.; CARVALHO JUNIOR, A. N.; SANTOS, W. J. Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**. v25 (1): p07a16, 2016.

HANAI, J. B. **Construções de argamassa armada: situação perspectivas e pesquisas**. 1981. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

HANAI, João Bento de. **Construções de argamassa armada: fundamentos tecnológicos para projeto e execução**. São Paulo: Pini, 1992.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concreto afetado pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HWANG, E.H.; SOO KO, Y. Comparison of mechanical and physical properties of SBR-polymer modified mortars using recycled waste materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. v14, p644-650, set., 2008.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2.ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2010.

JACINTO, T. W. P. **Adição de Superplastificante e Anti-Segregante à base de CMC em Pastas de Cimento para Poços de Petróleo**. 2008, 85f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

KADRI, EI H.; DUVAL, R.; Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**. p. 138 a 142, mar-abril, 2002.

KHALEEL, O. R.; ABDUL RAZAK, H. The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar. **Construction and Building Materials**, v.36, p.20 a 26, nov. 2012.

KISMI, M; SAINT-ARROMAN, J-C; MOUNANGA, P. Minimizing water dosage of superplasticized mortars and concretes for a given consistency. **Construction and Building Materials**, v.28, p747 a 758, 2012.

KLIEN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. 2008. 154f. Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Sílica Ativa**. 2002, 180f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

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

MAGALHÃES, A. G. **Durabilidade, Patologia e Recuperação das Construções de Concreto Armado**. Notas de Aula. Universidade Federal de Minas Gerais. Nov. 2011.

MALHOTRA, V. M.; SIVASUNDARAM, V. Ultrasonic methods. In: Malhotra, V.M.; Carino, N.J. (eds). **CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. ed. 1, cap 5, Boston, EUA, 2004.

MAROLF, A.; NEITHALATH, N.; SELL, E.; WEGNER, K., WEISS, J.; OLEK, J. Influence of Aggregates Size and Gradation on Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrete. **ACI Materials Journal**, p82-91, jan.-fev., 2004.

MAURY, M. B; BLUMENSCHNEIN, R. N - Produção de Cimento Impactos à Saúde e ao Meio Ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v.3, p.75 a 96, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2.ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2014.

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 a 294, 2012.

MONTEIRO, P. J. M.; SHOMGLIN, K.; WENK, H. R. E; HASPARYK, N. P. Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. **ACI Materials Journal**, p179 a 183, mar.-abr., 2001.

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, R.S.M. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, v.26, p.317 a 326, 2012.

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

NOOKKEN, M. R; HOOTON, R. D. Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete. **Materials and Structures**, v. 41, p. 01 a 10, 2008.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v.01, p.05 a 15, abril 2003.

PAN, H; WENG, G. Investigation of the Age-Dependent Constitutive Relations of Mortar. **Journal of Engineering Mechanics**. n138(3), p297–306, 2012.

PAULO, R. S. V. M. N. **Caracterização de Argamassas Industriais**. 2006. 142f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

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

POLITO, G. **Avaliação da Introdução de Cal Hidratada nas Argamassas Aplicadas Sobre Blocos Cerâmicos e Sua Influência no Desempenho e Morfologia**. 2008. 181f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

POGGIALI, F. S.J. **Desempenho de Microconcretos fabricados com Cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2010. 150f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RAO, S.; SILVA, P.; BRITO, J. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO₂ and TiO₂). **Construction and Building Materials**, v.96, p.508 a 517, 2015.

REIS, A. **Reforço de Vigas de Concreto Armado por Meio de Barras de Aço Adicionais ou Chapas de Aço e Argamassa de Alto Desempenho**. 1998. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso**. 2008. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

RODOLPHO, P. M. - **Estudo do Comportamento do Concreto no Estado Fresco Contendo Areia Britada**. 2007. 155f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

ROSA, D.W. **Resistividade elétrica de concreto com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; RANADE, R.; LI, V. C. Influence of Aggregates Type and Sinze on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. **ACI Materials Journal**. p308 a 316, mai-jun, 2009.

SALEM, R. M.; BURDETTE, E. G. Role of chemical and Mineral Admixture on Physical Properties and Frost-Resistance of Recycled Aggregate Concrete. **ACI Materials Journal**, p558 a 563, set.-out., 1998.

SANTOS, L. **Avaliação da Resistividade Elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão Induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade de Brasília; Brasília, 2006.

SANTOS, W. **Argamassa de Alto Desempenho**. 2011. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

SANTOS, W. **Desenvolvimento de Metodologia de Dosagem de Argamassas de Revestimento e Assentamento**. 2014. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

SCHWETZ, P. **Análise Teórico-Experimental de uma laje nervurada em modelo reduzido sujeita a um carregamento linear**. 2005. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SENGUL, Ö.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M. A. Influence of aggregate type on mechanical Behavior of normal- and high-strength concrete. **ACI Materials Journal**. p. 528-533, nov.-dez., 2002.

SEGADÃES, A. M.; CARVALHO, M. A., ACCHAR, W.. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. **Applied Clay Science**. v30 (1), p42 a 52, ago., 2005.

SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária**. 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. **Journal of Environmental Management**. v. 91, ed. 3, p. 685 a 689, jan-fev, 2009.

SUN, J.K.; CHO,S.W.; YANG,C.C.; HUANG,R.. Effect of Sand Ratio on the Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete. **Journal of Marine Science and Technology**. v. 10, n. 1, p. 8 a 13, 2002.

TEIXEIRA, P. **Estruturas Espaciais de Elementos Pré-Moldados Delgados de Concreto**. 1994. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

TORGALKAR, A. M. A resonance frequency technique to determine elastic modulus of hydroxyapatite. **Journal of Biomedical Materials Research**. v. 13, p. 907 a 920, 2004.

TRIGO, C. **Pré Fabricados em argamassa armada: material, técnica e desenho de componentes desenvolvidos por Lelé**. 2009. 162f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo 2009.

TRISTÃO, F. A. **Influência da Composição Granulométrica da Areia nas Propriedades das Argamassas de Revestimento**. 1995. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

TUTIKIAN, B. F; HELENE, P. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011.

TUTIKIAN, B. F; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto Adensável**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2008.

VARHEN, C.; DILONARDO, I.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; FIGUEIREDO, A. D. Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behavior and shrinkage of microconcretes. **Construction and Building Materials**. v.125, p.375 a 386, 2016.

WERLE, A. P - **Determinação de Propriedades de Concretos com Agregados Reciclados de Concreto, Com Ênfase na Carbonatação**. 2010, 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

WHITING, D.A.; NAGI, M.A. Electrical resistivity of concrete: A literature review. **R&D Serial n. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois**. USA, 2003.

ZHANG, S.; XUE, X.; LIU, X.; DUAN, P.; YANG, H.; JIANG, T.; WANG, D.; LIU, R. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources. **Journal of Mining Science**. v. 42, n. 4, p. 403 a 408, 2006.

ANEXO I

Tabela 02 – Dimensão Máxima do Agregado. Fonte: adaptado de Bauer (2000).

DIMENSÃO MÍNIMA DA SEÇÃO (cm)	DIMENSÃO MÁXIMA DO AGREGADO (mm)			
	CORTINAS VIGAS E COLUNAS	CORTINAS NÃO ARMADAS	LAJES COM ALTA DENSIDADE DE ARMADURA	LAJES COM POUCA ARMADURA OU SEM ARMADURA
6 - 12,5	12,5 - 19	19	19 - 25	19 - 38
12,5 - 27,5	19 - 38	38	38 - 275	38 - 75
30 - 72,5	38 - 76	75	38 - 75	75
75 ou mais	38 - 76	150	38 - 75	75 - 150

Fonte: adaptado de Bauer (2000).

Tabela 06 – Trabalhabilidade (Abatimento).

TIPOS DE CONSTRUÇÃO	ABATIMENTO (cm)	
	MÁXIMO	MÍNIMO
Sapatas e Fundações em Concreto Armado	12,50	5,00
Sapatas em concreto simples caixões infra-estrutura	10,00	2,50
Lajes vigas e cortinas armadas	15,00	7,50
Pilares de Prédios	7,50	5,00
Concreto massa	7,50	2,50

Fonte: adaptado de Bauer (2000).

Tabela 07 – Condição de exposição

FATOR ÁGUA/CIMENTO										
Tipo de Exposição	Clima severo ou moderado variação de temperatura, chuvas					Clima brando chuvoso ou semi-árido				
	Seç. Esbelta		Seç. Média		Seç. Robusta	Seç. Esbelta		Seç. Média		Seç. Robusta
	armado	simples	armado	simples		armado	simples	armado	simples	
A - Estruturas da linha d'água em obras hidráulicas ou estruturas onde ocorre saturação completa e intermitente mas que não se encontram submerças.										
-na água do mar										
-na água doce	0,44	0,49	0,49	0,53	0,53	0,44	0,49	0,49	0,53	0,53
.....	0,49	0,53	0,53	0,53	0,53	0,49	0,53	0,53	0,58	0,58
B - Estruturas distantes da água mas sujeitas à molhagem frequente.										
- na água do mar										
- na água doce	0,49	0,53	0,53	0,53	0,53	0,49	0,58	0,58	0,62	0,62
...	0,53	0,58	0,58	0,58	0,58	0,53	0,62	0,62	0,67	0,67
C - Condições correntes de exposição e partes de obras de arte não enquadradas nos grupos anteriores.	0,53	0,58	0,58	0,62	0,62	0,53	0,62	0,62	0,67	0,67

Fonte: adaptado de Bauer (2000).

Tabela 08 – Resistência mecânica

FATOR A/C	RESISTÊNCIA PROVÁVEL AOS 28 DIAS (MPa)	
	CONCRETO COMUM	CONCRETO PREPARADO COM INCORPORADOR DE AR
0,35	42,0	33,5
0,44	35,0	28,0
0,53	28,0	22,4
0,62	22,4	18,0
0,71	17,5	14,0
0,80	14,0	11,2

Fonte: adaptado de Bauer (2000).

Tabela 09 – Água de amassamento

ABATIMENTO (cm)	ÁGUA EM LITROS POR m ³ PARA AGREGADO COM DIMENSÕES							
	9,5	12,5	19	25	38	55	75	150
2,5 - 5	208	198	183	178	163	153	143	124
7,5 - 10	227	218	203	193	178	168	158	138
15 - 17,5	242	227	213	203	188	178	168	148
QUANTIDADE DE AR CONTIO NA MASSA	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2

Fonte: adaptado de Bauer (2000).

Tabela 10 – Volume de agregado graúdo

BITOLA MÁXIMA DE AGREGADO (mm)	VOLUME DO AGREGADO GRAÚDO (LITROS) POR m ³ DE CONCRETO PARA DIFERENTES MÓDULOS DE FINURA DA AREIA (AGREGADO ADENSADO POR MEIO DE SOQUETE)			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	460	440	420	400
12,5	550	530	510	490
19	650	630	610	590
25	700	680	660	640
38	760	740	720	700
55	790	770	750	730
75	840	820	800	780
150	900	880	860	840

Fonte: adaptado de Bauer (2000).