



**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADO  
MIÚDO RECICLADO EM ARGAMASSAS ESTABILIZADAS**

**THIAGO DA SILVA SANTANA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO  
RECICLADO EM ARGAMASSAS ESTABILIZADAS**

**THIAGO DA SILVA SANTANA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA F. PEREIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM – 24A/18  
BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2018**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2018**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO  
RECICLADO EM ARGAMASSAS ESTABILIZADAS**

**THIAGO DA SILVA SANTANA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, Dr. (PECC/UnB)**  
**(Orientador)**

---

**Prof. Elton Bauer, Dr. (PECC/UnB)**  
**(Examinador Interno)**

---

**Prof. Francisco Gabriel Santos Silva, Dr. (UFBA)**  
**(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 05 DE DEZEMBRO DE 2018.**

**FICHA CATALOGRÁFICA**

SANTANA, THIAGO DA SILVA

Avaliação da Influência da Utilização de Agregado Miúdo Reciclado em Argamassas Estabilizadas [Distrito Federal] 2018.

xvi, 129p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2018).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Resíduos de construção civil

2. Agregado miúdo reciclado

3. Argamassa estabilizada

4. Argamassa de revestimento

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SANTANA, T. S. (2018). Avaliação da Influência da Utilização de Agregado Miúdo Reciclado em Argamassas Estabilizadas, Publicação E.DM – 24A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129p.

**CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Thiago da Silva Santana.

TÍTULO: Avaliação da Influência da Utilização de Agregado Miúdo Reciclado em Argamassas Estabilizadas.

GRAU: Mestre                      ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Thiago da Silva Santana  
CLN 405, Bloco B, Apartamento 207 – Asa Norte  
CEP: 70.846-520      Brasília – DF – Brasil  
E-mail: santana.tsilva@gmail.com

**Dedico este trabalho a Deus e a minha família.**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pelo dom da vida, a oportunidade de desenvolver este trabalho, por iluminar e abençoar a minha trajetória.

Aos meus pais, Sizelmo e Irene, meus exemplos, por todo amor, apoio e incentivo, não só durante o mestrado, mas durante toda a minha vida. A minha irmã Camila, pela amizade, ajuda e incentivo.

A minha namorada Emely, por todo seu amor, companheirismo, incentivo, apoio e ajuda. Obrigado pelos momentos de alegria, pela grande ajuda com o desenvolvimento deste trabalho e pela compreensão da ausência em vários momentos.

Ao meu orientador, professor Cláudio Henrique, pela orientação, paciência e compreensão durante este trabalho.

Ao professor Elton Bauer, por compartilhar o seu conhecimento e auxiliar na realização da etapa experimental.

Aos professores Elton Bauer e Francisco Gabriel Santos Silva que gentilmente aceitaram o convite de compor a banca e contribuíram para este trabalho.

Aos professores do programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos conquistados no período de mestrado, Geraldo Fábio, Antonildo Campos, Alexandre Negredo, Paulo Reis, Augusto Pippi, Yuri Sotero e Izabel Castro, pela ajuda na realização dos ensaios e desenvolvimento deste trabalho, pela amizade e momentos de descontração.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais - LEM/UnB, pela disponibilidade de equipamentos e instalações para realização dos ensaios.

Ao professor Francisco Gabriel da Universidade Federal da Bahia, pela realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade pelo método da excitação por impulso.

Ao professor Dermeval Aparecido e aos alunos Matheus Denezine e Amanda Moreira do Laboratório de Micropaleontologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pela disponibilidade e auxílio na utilização do microscópio estereoscópio e do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para a captura das imagens dos agregados.

À Usina de Reciclagem Areia Bela Vista, pela doação da areia reciclada.

À produtora de argamassa estabilizada do Distrito Federal, pela doação do cimento, areia natural, aditivo estabilizador de hidratação e aditivo incorporador de ar.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro durante o período do Mestrado.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram com a realização desta dissertação. Meu muito obrigado a todos!

## RESUMO

### AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO EM ARGAMASSAS ESTABILIZADAS

**Autor:** Thiago da Silva Santana

**Orientador:** Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, Dezembro de 2018**

Como forma de reduzir o impacto ambiental gerado pelo descarte de resíduos da construção civil (RCC), o emprego de agregados reciclados na produção de concretos e argamassas tem se mostrado uma opção sustentável, além de reduzir o consumo de agregados naturais e consequentemente, a diminuição do impacto ambiental ocasionado pela sua extração. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado nas propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento. Para tal, realizaram-se os ensaios de caracterização do agregado miúdo natural e do agregado miúdo reciclado, a avaliação das argamassas estabilizadas de revestimento com diferentes teores de substituição (25%, 50%, 75% e 100%) de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, tanto no estado fresco como no estado endurecido, além da avaliação da cinética da hidratação das argamassas estabilizadas. Na avaliação das argamassas no estado fresco verificou-se uma redução da massa específica e um aumento do teor de ar incorporado motivados pela utilização do agregado reciclado. Observou-se ainda um ganho de consistência com o aumento do tempo de estabilização. Já no estado endurecido ocorreu uma redução do módulo de elasticidade, uma redução das resistências à tração na flexão e à compressão e um aumento da absorção de água das argamassas com o aumento do teor de substituição das areias. Na avaliação da cinética da hidratação das argamassas com a utilização de um sistema semi-adiabático observou-se o prolongamento dos tempos até se atingir o pico de calor de hidratação das argamassas estabilizadas e a redução da temperatura nesse pico. Por fim, concluiu-se que a areia reciclada pode ser utilizada na produção de argamassas estabilizadas nos teores de substituição de até 50% do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado.

**Palavras-chave:** resíduos de construção civil; agregado miúdo reciclado; argamassa estabilizada; argamassa de revestimento.



## **ABSTRACT**

### **EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE USE OF RECYCLED FINE AGGREGATE IN STABILIZED MORTARS**

**Author: Thiago da Silva Santana**

**Advisor: Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, Dr.**

**Postgraduate Program in Structures and Civil Construction**

**Brasília, December 2018**

As a way to reduce the environmental impact generated by the disposal of construction waste, the use of recycled aggregates in the production of concrete and mortars has shown to be a sustainable option, in addition to reducing the consumption of natural aggregates and, consequently, of the environmental impact caused by its extraction. Thus, the present study aims to evaluate the influence of the substitution of the natural fine aggregate by the recycled fine aggregate on the properties of stabilized mortars. For this purpose, the characterization tests of the natural fine aggregate and the recycled fine aggregate, the evaluation of the stabilized mortars with different levels of substitution (25%, 50%, 75% and 100%) of natural fine aggregate per recycled fine aggregate were carried out, in the fresh and hardened state, besides the evaluation of the hydration kinetics of stabilized mortars. In the evaluation of the mortars in the fresh state there was a reduction of the specific mass and an increase of the incorporated air content motivated by the use of the recycled aggregate. There was also a gain in consistency with increasing stabilization time. In the hardened state, there was a reduction of the modulus of elasticity, a reduction the tensile strengths in the bending and compression, an increase of the water absorption of the mortars with the increase of the substitution content of the sands. In the evaluation of the hydration kinetics of the mortars with the use of a semi-adiabatic system, it was observed the prolongation of the times until reaching the peak of hydration heat of the stabilized mortars and the reduction of the temperature in that peak. Finally, it was concluded that recycled sand can be used in the production of stabilized mortars in the substitution contents of up to 50% of the natural fine aggregate by the recycled fine aggregate.

**Keywords:** construction waste; recycled fine aggregate; stabilized mortar; coating mortar.

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo Geral.....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.2.	Estrutura do trabalho .....	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1.	Resíduos da Construção Civil.....	4
2.2.	Agregado Miúdo Reciclado.....	5
2.2.1.	Forma, porosidade e área específica .....	6
2.2.2.	Massa Específica.....	7
2.2.3.	Absorção de Água .....	9
2.2.4.	Teor de Finos.....	10
2.3.	Utilização de agregado miúdo reciclado em Argamassas .....	11
2.4.	Argamassa Estabilizada.....	15
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
3.1.	Materiais .....	20
3.2.	Métodos .....	24
3.2.1.	Etapa 1 – Caracterização e Composição dos Agregados .....	25
3.2.1.1.	Caracterização dos Agregados .....	25
3.2.1.2.	Composição dos Agregados.....	26
3.2.2.	Etapa 2 – Produção e Avaliação das Argamassas Estabilizadas.....	27
3.2.3.	Etapa 3 - Avaliação da Cinética da Hidratação das Argamassas Estabilizadas ao Longo do Tempo .....	34
3.3.	Ensaio.....	36
3.3.1.	Método de ensaios de análise visual dos agregados.....	37
3.3.1.1.	Análise morfooscópica das areias .....	37

3.3.1.2.	Análise visual por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV)..	38
3.3.2.	Método de determinação de contaminantes dos agregados .....	39
3.3.2.1.	Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis .....	39
3.3.3.	Métodos de ensaios das argamassas no estado endurecido.....	39
3.3.3.1.	Módulo de elasticidade dinâmico .....	39
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	41
4.1.	Etapa 1 - Caracterização dos Agregados .....	41
4.1.1.	Caracterização das Areias .....	41
4.2.	Etapa 2 – Avaliação das Argamassas Estabilizadas .....	54
4.2.1.	Estado Fresco .....	57
4.2.1.1.	Massa Específica no Estado Fresco e Teor de Ar Incorporado .....	57
4.2.1.2.	Índice de Consistência .....	60
4.2.1.3.	Penetração de Cone.....	61
4.2.1.4.	Vane Test .....	64
4.2.1.5.	Índice de Retenção de Água .....	65
4.2.2.	Estado Endurecido .....	66
4.2.2.1.	Densidade no Estado Endurecido .....	66
4.2.2.2.	Resistência à Tração na Flexão.....	67
4.2.2.3.	Resistência à Compressão.....	68
4.2.2.4.	Ductilidade.....	70
4.2.2.5.	Módulo de Elasticidade Flexura .....	71
4.2.2.6.	Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade.....	74
4.2.2.7.	Absorção de água por imersão .....	76
4.2.2.8.	Variação Dimensional.....	77
4.2.2.9.	Suscetibilidade à fissuração .....	79
4.2.2.10.	Resistência Potencial de Aderência à Tração .....	80
4.2.3.	Comparação das argamassas .....	82

4.3. Etapa 3 - Avaliação da Cinética da Hidratação das Argamassas Estabilizadas ao Longo do Tempo .....	86
5. CONCLUSÃO .....	90
5.1. Recomendações para Trabalhos Futuros .....	92
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	93
APÊNDICE A – Composição das areias por faixa granulométrica.....	101
APÊNDICE B – Água de compensação .....	101
APÊNDICE C – Resultados no Estado Fresco .....	102
APÊNDICE D – Resultados Estado Endurecido .....	104
APÊNDICE E – Ensaios.....	113
Método de ensaio – Caracterização das Areias .....	113
Métodos de ensaios das argamassas estabilizadas no estado fresco .....	117
Moldagem dos corpos de prova das argamassas estabilizadas .....	122
Métodos de ensaios das argamassas estabilizadas no estado endurecido .....	123
APÊNDICE F – Critérios de suscetibilidade à fissuração .....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Massa específica dos agregados miúdos naturais e reciclados por diversos autores .....	7
Tabela 2.2 – Absorção de água dos agregados miúdos naturais e reciclados por diversos autores .....	9
Tabela 2.3 – Teor de materiais finos nos agregados miúdos naturais e reciclados por diversos autores .....	10
Tabela 2.4 - Propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido .....	18
Tabela 2.5 – Comparação das propriedades de argamassas mistas, industrializadas e estabilizadas .....	19
Tabela 3.1 – Propriedades físicas do aglomerante .....	20
Tabela 3.2 - Propriedades químicas do aglomerante.....	21
Tabela 3.3 – Propriedade das Areias .....	22
Tabela 3.4 – Aditivo Incorporador de Ar .....	23
Tabela 3.5 – Aditivo Estabilizador de Hidratação .....	23
Tabela 3.6 – Características da água .....	23
Tabela 3.7 – Argamassas - Etapa 2 .....	27
Tabela 3.8 Teores de Aditivo Estabilizador de Hidratação.....	28
Tabela 3.9 – Argamassas - Etapa 3 .....	34
Tabela 4.1 – Características morfoscópicas das areias .....	52
Tabela 4.2 – Teor de Contaminantes.....	53
Tabela 4.3 - Traços unitários em massa e em volume absoluto .....	54
Tabela 4.4 – Consumo de cada componente das argamassas frescas e variação dos consumos em relação aos componentes da AAN fresca, em. volume. ....	56
Tabela 4.5 - Variação do ar incorporado em relação aos componentes da AAN fresca, em. volume.....	56
Tabela 4.6 – Relação água/materiais seco (a/ms) e relação água/cimento (a/c) .....	56
Tabela 4.7 – Avaliação da redução do índice de consistência nos tempos de estabilização....	61
Tabela 4.8 – Modificação inicial da consistência das argamassas .....	61
Tabela 4.9 – Redução da penetração de cone.....	63
Tabela 4.10 – Índice de retenção de água .....	65
Tabela 4.11 – Densidade no estado endurecido .....	66
Tabela 4.12 - Valores de ductilidade das argamassas .....	70

Tabela 4.13 – Coeficiente de capilaridade das argamassas aos 28 dias .....	75
Tabela 4.14 – Variação dimensional das argamassas aos 28 dias.....	77
Tabela 4.15 – Características das argamassas – suscetibilidade à fissuração .....	79
Tabela 4.16 – Resistência potencial de aderência à tração da AAN aos 28 dias .....	80
Tabela 4.17 - Resistência potencial de aderência à tração da AAR100% aos 28 dias.....	81
Tabela 4.18 – Classificação das argamassas .....	82
Tabela 4.19 - Perfil de Desempenho das Argamassas Estabilizadas de Revestimento.....	83
Tabela 4.20 – Adequação ao perfil de desempenha das Argamassas Estabilizadas de Revestimento de Bauer <i>et al.</i> (2015).....	83
Tabela 4.21 - Adequação aos intervalos das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento de Bauer <i>et al.</i> (2015) .....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Textura superficial e forma de partículas de areias naturais .....	6
Figura 2.2 - Textura superficial e forma de partículas de areias reciclada.....	6
Figura 2.3 - Efeito da variação de teores de aditivo estabilizador de hidratação na curva de evolução de calor da hidratação do cimento .....	16
Figura 3.1 - Distribuição Granulométrica da areia natural e da areia reciclada.....	22
Figura 3.2 - Fluxograma da Etapa 2.....	33
Figura 3.3 – Ensaio para monitoramento da temperatura de hidratação das argamassas .....	35
Figura 3.4 – Fluxograma da Etapa 3 .....	36
Figura 3.5 – Microscópio estereoscópio utilizado na análise visual dos agregados .....	37
Figura 3.6 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado na análise visual dos agregados .	38
Figura 3.7 – Posicionamento de apoios e receptores para modo de vibração flexural. ....	40
Figura 3.8 – Equipamento Sonelastic utilizado na determinação do módulo de elasticidade..	40
Figura 4.1 - Composição das argamassas, sem e com a água de compensação, em volume...	55
Figura 4.2 – Variação da massa específica das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização .....	58
Figura 4.3 – Variação do teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização.....	59
Figura 4.4 – Variação do índice de consistência das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização.....	60
Figura 4.5 – Variação da penetração de cone das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização .....	62
Figura 4.6 – Variação do <i>Vane Test</i> das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização .....	64
Figura 4.7 – Variação da resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias em relação aos tempos de estabilização.....	67
Figura 4.8 – Variação da resistência à compressão das argamassas aos 28 dias em relação aos tempos de estabilização .....	69
Figura 4.9 - Módulo de elasticidade das argamassas aos 28 dias .....	71
Figura 4.10 - Módulo de elasticidade <i>versus</i> Relação <i>a/c</i> .....	73
Figura 4.11 - Resistência à compressão <i>versus</i> módulo de elasticidade .....	73
Figura 4.12 - Resistência à tração na flexão <i>versus</i> módulo de elasticidade .....	73
Figura 4.13 – Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias.....	74

Figura 4.14 – Absorção de água por imersão e índice de vazios das argamassas aos 28 dias .	76
Figura 4.15 – Variação dimensional no tempo .....	78
Figura 4.16 – Variação de massa no tempo .....	79
Figura 4.17 – Variação da temperatura ao longo do processo de hidratação.....	86
Figura 4.18 – Tempos e temperaturas do pico de calor de hidratação da AAN.....	87
Figura 4.19 - Tempos e temperaturas do pico de calor de hidratação da AAR100% .....	88



# 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é a maior consumidora de matérias-primas naturais e grande geradora de resíduos, sendo causadora de elevado impacto ambiental. Estima-se que o setor da construção civil brasileira consumiu cerca de 673 milhões de toneladas de agregados no ano de 2014 (IBRAM, 2015). De acordo com CETEM (2009) 90% da produção nacional de areia natural são obtidos por meio da extração em leito de rios. Esse tipo de exploração gera o desmatamento e a degradação do curso d'água das áreas exploradas, sendo assim responsável por grandes impactos ambientais.

Além disso, esse seguimento da indústria é responsável por gerar aproximadamente de 50% a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil (BRASIL, 2011).

A reciclagem dos resíduos de construção civil (RCC) como agregados se mostra uma opção sustentável de redução do volume descartado de RCC, assim como do consumo de recursos naturais. Visto que o retorno do resíduo da construção civil ao sistema produtivo na forma de agregado reciclado apresenta-se como uma opção de processo de logística reversa desse material.

A utilização do agregado reciclado na produção de concretos e argamassas se mostra possível, como demonstrado por estudos, como Leite (2001), Jiménez *et al.* (2013), Ledesma *et al.* (2015) e diversos outros autores (LEITE *et al.*, 2000; PEDROZO, 2008; CORINALDESI e MORICONI, 2009; ZEGA e DI MAIO, 2011; BRAGA, DE BRITO e VEIGA, 2012; MARTÍNEZ *et al.*, 2013; FAN *et al.*, 2015; JANTSCH, 2015; LEDESMA *et al.*, 2016; GIRARDI, 2016; CARASEK *et al.*, 2018; PIMENTEL *et al.*, 2018). Tal utilização se apresenta potencialmente viável especialmente nas argamassas estabilizadas, devido à sua crescente utilização em obras como relatado por Bauer *et al.* (2015). Essas argamassas são dosadas em centrais de concreto, fornecidas no estado fresco, pronta para uso e com maior período de utilização se comparadas às argamassas convencionais (BAUER, *et al.*, 2015; OLIVEIRA, 2017), o que representa um ganho na produtividade pela eliminação da etapa de estocagem de materiais e de preparação das argamassas. O maior tempo de utilização das argamassas estabilizadas é obtido com a utilização do aditivo estabilizador de hidratação, o qual retarda a hidratação do cimento impedindo a nucleação dos produtos de hidratação (PAOLINE e KHURANA, 1998).

Tendo em vista a problemática ambiental causada pela geração de RCC e a possibilidade de reciclagem de parte desse material como agregado para a produção de argamassas. O presente trabalho, visando contribuir nesse sentido, avaliou a alternativa de utilização do agregado miúdo reciclado na produção de argamassas estabilizadas para revestimento.

Esse trabalho está inserido na linha de pesquisa de Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção, na área de concentração de Construção Civil do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/UnB) abordando a temática das argamassas e sistemas de revestimento.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, produzido no Distrito Federal, nas propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Para cumprir o objetivo geral proposto, foi necessário desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a interferência da substituição de diferentes teores (25%, 50%, 75% e 100%) do agregado natural pelo agregado reciclado nas propriedades das argamassas estabilizadas, no estado fresco e no estado endurecido;
- Avaliar mudanças nas propriedades de consistência, incorporação de ar, resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas estabilizadas com diferentes teores (25%, 50%, 75% e 100%) de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado em diferentes tempos de estabilização (0,5 horas, 3 horas, 6 horas, e 8 horas); e
- Avaliar a cinética da hidratação da argamassa estabilizada produzida com areia reciclada em relação à argamassa estabilizada com areia natural, com e sem a utilização do aditivo estabilizador de hidratação, durante o processo de hidratação em um sistema semi-adiabático.

## **1.2. Estrutura do trabalho**

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. Este capítulo, de introdução, apresenta a relevância do tema, assim como o objetivo geral e os objetivos específicos desse trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica utilizada como referência nesse trabalho. São abordados os temas de resíduos de construção civil, agregados reciclados e argamassas estabilizadas.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais utilizados na elaboração das argamassas estabilizadas analisadas nesse trabalho e os métodos utilizados na realização das três etapas do programa experimental (caracterização dos agregados, produção e avaliação das argamassas estabilizadas e avaliação da cinética da hidratação das argamassas estabilizadas ao longo do tempo).

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados nas três etapas do programa experimental e suas respectivas análises.

Por fim, no quinto capítulo estão as conclusões do trabalho em relação à influência da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado nas propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Resíduos da Construção Civil

Os resíduos da construção civil (RCC) são aqueles procedentes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e também o material resultante da preparação e escavação de terrenos. Portanto, esses resíduos são compostos por: blocos cerâmicos, concreto em geral, argamassa, gesso, pavimento asfáltico, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeira e compensados, vidro, plástico, fiação elétrica e outros (BRASIL, 2002).

Dessa forma, esse material apresenta uma grande heterogeneidade devido à sua composição depender da forma de geração (construção ou demolição) (LLATAS, 2013; CONTRERAS *et al.*, 2016), da tipologia da edificação, dos materiais empregados (MARTÍNEZ *et al.*, 2013) e da fase da obra (SILVA, 2009) que originaram esses resíduos.

Para Karpinsk (2009), esse material é considerado resíduo de baixa periculosidade, sendo o maior impacto causado pelo grande volume gerado. Porém John e Agopyan (2000) ressaltam que esse material pode conter contaminações importantes, as quais podem afetar a qualidade do material dificultando a sua reciclagem ou ainda contaminar o meio ambiente.

Dessa forma, esses resíduos são classificados pela Resolução nº 307 de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em quatro classes:

- **I – Classe A:** materiais reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: resíduos de construção, demolição, reformas, entre outros;
- **II – Classe B:** resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso, entre outras;
- **III – Classe C:** resíduos sem aplicação economicamente viável ou tecnologia para o seu beneficiamento;
- **IV – Classe D:** resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros.

Além da possibilidade de contaminação, o grande volume de RCC pode gerar impactos ao meio ambiente. De acordo com Brasil (2011), o volume de RCC gerado no Brasil, pode representar de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos.

Segundo ABRELPE (2017), foram coletados 71,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2016. Desse montante cerca de 45,1 milhões de toneladas foram de RCC, totalizando aproximadamente 63% do total de resíduos produzidos. Vale ressaltar que o volume total de RCC gerados é ainda maior, uma vez que boa parte dos resíduos é descartada de forma irregular.

Esse grande volume é decorrente das perdas durante a construção e a ausência de processo de reutilização dos materiais nas atividades da construção civil (CASSA *et al.*, 2001).

Nesse contexto, diante da problemática ambiental devido à geração e disposição do RCC, surge a necessidade de buscar novas alternativas de reutilização ou/e reciclagem desses resíduos.

O uso do RCC de classe A como agregados reciclados para produção de concreto sem função estrutural e pavimentos mostra-se consolidada. Tal utilização é comprovada por estudos como Leite (2001) e Pedrozo (2008), os quais apresentam a possibilidade da utilização do agregado reciclado de RCC em concretos e pela ABNT NBR 15116:2004, a qual estabelece critérios para a utilização dos agregados reciclados em pavimentação e concretos não estruturais.

Existe ainda a possibilidade da utilização do agregado miúdo reciclado em argamassas como apresentados em estudos como de Jiménez *et al.* (2013) e Ledesma *et al.* (2016), os quais relatam a possibilidade de substituição de até 40% e 50%, respectivamente, do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado na elaboração de argamassas. Com relação especificamente a utilização do agregado miúdo reciclado em argamassas estabilizadas, até o presente momento, não há estudos investigando essa possibilidade de uso.

## **2.2. Agregado Miúdo Reciclado**

Os agregados reciclados são definidos pela ABNT NBR 15116:2004, como material granular procedente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição da construção civil, que apresentam características adequadas para a utilização em obras de edificação e infraestrutura. Sendo a parte desse material passante na peneira de 4,75 mm, chamado de agregado miúdo reciclado.

Os agregados reciclados apresentam-se como um material com grande heterogeneidade devido à grande variabilidade da composição RCC. Essa grande heterogeneidade leva ao agregado reciclado apresentar uma variação em suas características e propriedades de acordo com a composição do RCC, os equipamentos utilizados em seu beneficiamento, o teor de impurezas e contaminantes e a granulometria. Por exemplo, Ulsen *et al.* (2013) concluíram que os britadores de impacto geram agregados reciclados com melhores morfologias e menor porosidade.

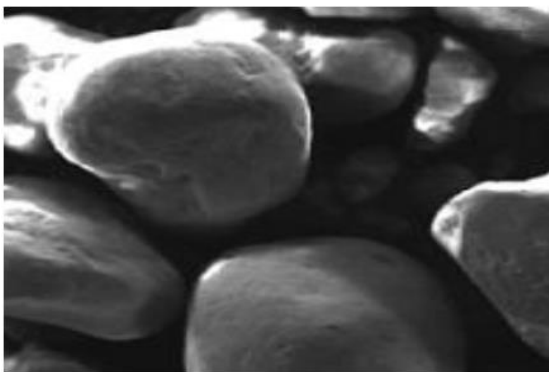
Dessa forma, os agregados miúdos reciclados apresentam propriedades diferentes das apresentadas pelos agregados miúdos naturais, destacando-se as diferenças de forma, porosidade, área específica, massa específica, absorção de água e teor de finos.

### 2.2.1. Forma, porosidade e área específica

De acordo com Solyman (2005), os agregados miúdos reciclados apresentam partículas mais angulares e irregulares se comparadas ao agregado miúdo natural. Nesse trabalho, o autor avaliou a esfericidade e a relação comprimento/largura (L/W) das partículas de 12 tipos de areia reciclada por meio de análise de imagens, obtendo uma variação baixa da relação L/W dos agregados miúdos naturais e agregados miúdos reciclados, sendo essa relação de 1,27 e 1,39 respectivamente. Já a esfericidade apresentou uma maior variação, reafirmando a característica angular dos agregados miúdos reciclados.

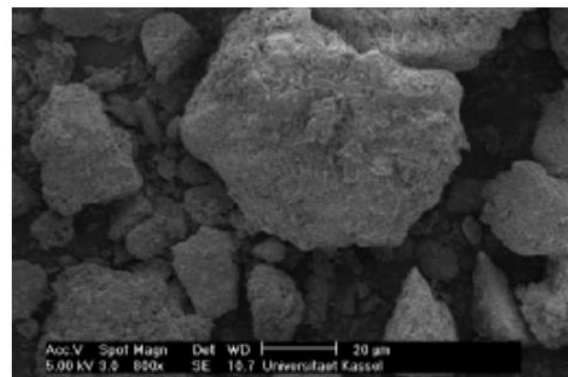
Tais características são comprovadas nas fotos, realizadas pelo autor em microscópio eletrônico de varredura (MEV), apresentadas na Figura 2.1 e na Figura 2.2.

Figura 2.1 - Textura superficial e forma de partículas de areias naturais



Largura da foto = 0,145 mm  
Fonte: Solyman (2005)

Figura 2.2 - Textura superficial e forma de partículas de areias reciclada



Largura da foto = 0,145mm  
Fonte: Solyman (2005)

Além dessas características, o agregado miúdo reciclado apresenta uma maior porosidade se comparado ao agregado miúdo natural. Isso ocorre devido à argamassa aderida ao material e a presença de impurezas leves (BUYLE-BODIN e HADJIEVA-ZAHARIEVA, 2002).

Essas particularidades levam ao agregado miúdo reciclado apresentar uma maior superfície específica se comparado ao agregado miúdo natural. Tal diferença é comprovada por Fumoto e Yamada (2002), os quais, por meio da técnica BET, avaliaram as superfícies específicas de seis areias, sendo três tipos de agregado miúdo natural (duas areias de rio e uma areia calcária) e três tipos diferentes de agregado miúdo reciclado. Os agregados miúdos reciclados (entre 4,08 e 4,91 m<sup>2</sup>/g) obtiveram valores de superfície específica até 4 vezes maiores que dos agregados miúdos naturais (entre 0,74 m<sup>2</sup>/g e 1,83 m<sup>2</sup>/g). Ficando assim evidente a grande diferença entre as superfícies específicas dos agregados.

### 2.2.2. Massa Específica

Em geral, os agregados miúdos reciclados apresentam uma menor massa específica se comparado aos agregados miúdos naturais (MIRANDA, 2005; EVANGELISTA *et al.*, 2015; MARTÍNEZ *et al.*, 2016). Isso ocorre devido o agregado miúdo reciclado conter argamassa aderida (BUYLE-BODIN e HADJIEVA-ZAHARIEVA, 2002; EVANGELISTA e DE BRITO, 2011) ou outros materiais como tijolo, gesso ou madeira (LEITE, 2001; EVANGELISTA e DE BRITO, 2011).

Essa diferença de massa específica entre os agregados fica evidente na Tabela 2.1, onde são apresentados os valores de massa específica de agregados miúdos naturais e reciclados de diversos autores.

Tabela 2.1 - Massa específica dos agregados miúdos naturais e reciclados por diversos autores

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Fonte</b>
Areia média de rio	2,59	Levy e Helene (1997)
Cerâmico	2,52	Levy e Helene (1997)
Argamassa	2,51	Levy e Helene (1997)
Areia de rio	2,58	Miranda (2000)
Argamassa	2,60	Miranda (2000)
Bloco de Concreto	2,67	Miranda (2000)
Bloco de Cerâmico	2,68	Miranda (2000)
Areia de quartzo	2,63	Leite (2001)
Misto (arg, cer, conc)	2,53	Leite (2001)

Argamassa	2,62	Miranda (2005)
Bloco de Concreto	2,64	Miranda (2005)
Cerâmico	2,71	Miranda (2005)
Areia natural	2,60	Assunção, Carvalho e Barata (2007)
Misto (arg, cer, conc)	2,48	Assunção, Carvalho e Barata (2007)
Areia de quartzo	2,61	Pedrozo (2008)
Misto (arg, cer)	2,51	Pedrozo (2008)
Areia de quartzo	2,59	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Cerâmico	2,06	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Misto (conc, alv, bet)	2,29	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Concreto	2,38	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Areia de rio	2,56	Evangelista e De Brito (2010)
Concreto	2,16	Evangelista e De Brito (2010)
Areia de quartzo	2,62	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Misto (alv, arg, conc)	2,46	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Areia natural de rio	2,60	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Cerâmico	2,13	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	2,09	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Concreto	2,11	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Areia de quartzo	2,63	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	2,14	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Areia média de rio	2,67	Calcado (2015)
Misto (arg, conc)	2,45	Calcado (2015)
Areia natural de rio	2,73	Carasek <i>et al.</i> (2018)
Mista (cer, conc)	2,69	Carasek <i>et al.</i> (2018)
Concreto	2,54	Carasek <i>et al.</i> (2018)

Fonte: adaptado de GIRARDI, 2016.

Analisando os dados obtém-se um intervalo de massa específica média de 2,06 g/cm<sup>3</sup> a 2,71 g/cm<sup>3</sup> para os agregados miúdos reciclados. Já para os agregados miúdos naturais se tem um intervalo entre 2,56 g/cm<sup>3</sup> a 2,73 g/cm<sup>3</sup>. Apesar de o agregado miúdo reciclado apresentar alguns valores de massa específica média superiores aos obtidos pelo agregado miúdo natural, em geral, o agregado miúdo reciclado apresenta uma massa específica média menor.

Além disso, observa-se uma grande variabilidade das massas específicas dos agregados miúdos reciclados, independentemente do material originário, como pode ser observado no grande intervalo de massa específica apresentada na Tabela 2.1. Essa grande variabilidade reafirma a heterogeneidade desse material.



### 2.2.3. Absorção de Água

A absorção de água dos agregados depende do grau de porosidade das partículas ou representam o valor médio para a mistura de vários materiais com alta e baixa absorção (HEWLETT, 2004).

Isso fica evidente na maior absorção de água do agregado miúdo reciclado se comparado ao agregado miúdo natural. A maior absorção ocorre devido à porosidade da argamassa aderida ao agregado (SOLYMAN, 2005). Já os agregados miúdos naturais apresentam pouca porosidade, conseqüentemente a absorção de água apresenta-se como uma propriedade pouco influente (LEITE, 2001; RODRIGUES; EVANGELISTA; DE BRITO, 2013).

Essa diferença é comprovada pelos dados de absorção de água de diversos autores apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Absorção de água dos agregados miúdos naturais e reciclados por diversos autores

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Fonte</b>
Argamassa	5,00	Miranda (2005)
Bloco de Concreto	5,50	Miranda (2005)
Cerâmico	11,50	Miranda (2005)
Areia de quartzo	3,70	Pedrozo (2008)
Misto (arg, cer)	10,60	Pedrozo (2008)
Areia de quartzo	3,10	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Cerâmico	16,20	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Misto (conc, alv, conc)	8,80	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Concreto	7,10	Corinaldesi e Moriconi (2009)
Areia de rio	0,8	Evangelista e De Brito (2010)
Concreto	13,1	Evangelista e De Brito (2010)
Areia de rio	0,9	Zega e Di Maio (2011)
Concreto	8,5	Zega e Di Maio (2011)
Areia natural de rio	1,30	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Cerâmico	4,71	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	7,45	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Concreto	6,27	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Areia de quartzo	0,79	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	9,00	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (alv, arg, conc)	16,35	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Areia natural de rio	2,97	Carasek <i>et al.</i> (2018)
Mista (cer, conc)	12,01	Carasek <i>et al.</i> (2018)
Concreto	16,58	Carasek <i>et al.</i> (2018)

Fonte: adaptado de GIRARDI, 2016.

Na Tabela 2.2 observa-se a grande diferença entre a absorção de água do agregado miúdo reciclado e do agregado miúdo natural em diversos estudos. Os agregados miúdos naturais apresentaram uma faixa de absorção de água de 0,79% a 3,7%. Já o agregado miúdo reciclado obteve uma absorção de água de 4,71% a 16,35%, chegando a apresentar uma absorção de água 4x superior ao agregado miúdo natural.

#### 2.2.4. Teor de Finos

Segundo Miranda *et al.* (2013), em avaliação de três areias recicladas geradas por meio da britagem de resíduos de construção em laboratórios, verificou-se um alto teor de material fino (material passante na peneira de 75 µm) nas areias recicladas em comparação aos valores obtidos pela areia de rio. Segundo Mesbahu e Buyle-bodin (1999), esse maior teor de finos é devido o processo de esmagamento de pasta de cimento durante o processo de beneficiamento do RCC. Tal característica fica evidente nos teores de finos apresentados por diversos autores na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Teor de materiais finos nos agregados miúdos naturais e reciclados por diversos autores

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>Teor de material fino (%)</b>	<b>Fonte</b>
Areia de rio	5,00 <sup>b</sup>	Miranda (2000)
Argamassa	34,00 <sup>b</sup>	Miranda (2000)
Bloco de Concreto	33,00 <sup>b</sup>	Miranda (2000)
Bloco de Cerâmico	46,00 <sup>b</sup>	Miranda (2000)
Argamassa	11,50 <sup>b</sup>	Miranda (2005)
Bloco de Concreto	5,80 <sup>b</sup>	Miranda (2005)
Cerâmico	22,8 <sup>b</sup>	Miranda (2005)
Areia de quartzo	2,00	Pedrozo (2008)
Misto (arg, cer)	10,00	Pedrozo (2008)
Areia de rio	0,2	Zega e Di Maio (2011)
Concreto	4,0	Zega e Di Maio (2011)
Areia natural de rio	1,00	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Cerâmico	13,00	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	12,00	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Concreto	8,00	Martinez <i>et al.</i> (2013)
Areia de quartzo	3,20 <sup>a</sup>	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Misto (arg, cer)	9,00 <sup>a</sup>	Jiménez <i>et al.</i> (2013)
Areia de quartzo	4,48	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Misto (aly, arg, conc)	6,09	Malta, Silva e Gonçalves (2013)
Areia natural de rio	4,10	Carasek <i>et al.</i> (2018)
Mista (cer, conc)	13,96	Carasek <i>et al.</i> (2018)
Concreto	17,60	Carasek <i>et al.</i> (2018)

<sup>a</sup> Material fino < 63µm; <sup>b</sup> Material < 75 µm determinado pela ABNT NBR 7219:1987.

Analisando os dados da Tabela 2.3, independentemente da composição dos agregados, observa-se, em geral, uma grande diferença entre os teores de finos apresentados pelos agregados miúdos naturais e agregados miúdos reciclados.

Os agregados miúdos naturais apresentam menores teores de finos, variando de 0,2% a 5,0%. Já os agregados miúdos reciclados apresentam um intervalo de 4% a 46%, valores esses consideravelmente superiores ao intervalo apresentado pelo agregado miúdo natural. Esse grande intervalo de teor de finos do agregado miúdo reciclado pode ser justificado pelos diferentes processos de beneficiamento e origens do RCC.

### **2.3. Utilização de agregado miúdo reciclado em Argamassas**

Além das aplicações estabelecidas pela ABNT NBR 15116:2004, o agregado miúdo reciclado pode ser utilizado na produção de argamassas como apresentados em estudos como de Jiménez *et al.* (2013), os quais avaliaram o desempenho de argamassas de revestimento (traço 1:7, em volume) com agregado reciclado misto e verificaram a viabilidade da substituição de até 40%, em volume, do agregado natural pelo agregado reciclado sem modificar significativamente as propriedades das argamassas. Já Ledesma *et al.* (2016) verificaram a possibilidade de substituição de até 50% da areia natural pela areia reciclada de resíduos de concreto em argamassas de revestimento (traço 1:5, em volume).

As características do agregado miúdo reciclado influenciam nas propriedades das argamassas no estado fresco (consistência e retenção de água) e endurecido (resistência mecânica e retração por secagem) (MIRANDA, 2005). Consequentemente, as argamassas com agregado miúdo reciclado apresentam características e propriedades diferentes em relação às argamassas com agregado miúdo natural.

Exemplo disso é a redução da densidade aparente das argamassas no estado fresco e no estado endurecido apresentada por Ledesma *et al.* (2016). Nesse trabalho, taxas de substituição superiores a 50% levaram a redução da densidade no estado fresco. O mesmo ocorre no estado endurecido para teores de substituição superiores a 25%. Já Jiménez *et al.* (2013) identificou a redução da densidade aparente da argamassa fresca com o aumento da taxa de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado misto. Tal redução foi justificada pela menor massa específica do agregado miúdo reciclado.

Carasek *et al.* (2018) na avaliação de argamassa de revestimento e assentamento com 100% de agregados reciclados também identificou uma redução da massa específica da argamassa com agregado reciclado em relação à argamassa com agregado natural. Essa redução foi atribuída à menor massa específica do agregado reciclado, devido a sua porosidade, e ao aumento da relação água/materiais secos.

Outro exemplo é a redução da trabalhabilidade das argamassas. Tal fenômeno ocorre devido à maior absorção de água dos agregados miúdos reciclados como verificado por Jimenez *et al.* (2013) com o teor de substituição de 40% de agregado reciclado cerâmico e Vegas *et al.* (2009) com o teor de substituição de 25% de agregado reciclado de concreto.

Segundo Rodrigues, Evangelista e Brito (2013), essa absorção pode ser tratada por meio da pré-saturação dos agregados miúdos reciclados ou por compensação da água de mistura absorvida.

De acordo com Cuenca-Moya no *et al.* (2014), a pré-saturação consiste em misturar o agregado miúdo reciclado com água antes de adicioná-lo aos outros insumos anidros da argamassa. O mesmo autor conclui que para substituições parciais a pré-saturação de 67% da água absorvida em 24 horas apresentam os melhores resultados, assim como a pré-saturação de 80% para a substituição total.

Outro exemplo de pré-saturação é apresentado pela ABNT NBR 15116:2004, a qual recomenda uma pré-molhagem até atingir aproximadamente 80% da absorção de água do agregado reciclado.

Já no processo de compensação, parte da água que será absorvida pelo agregado durante a mistura é adicionada a água de amassamento. Na literatura são utilizadas diferentes porcentagens de compensação. Leite, Lima e Santos (2009) em sua avaliação de diferentes taxas de compensação de água (50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%) em argamassas com agregado reciclado (teores de substituição de 50 e 100%), verificou que para o teor de substituição de 50% a compensações de 70% apresenta os melhores resultados. Já para o teor de 100% de substituição foi necessária à compensação de 90% da absorção de água, o que acarretou em uma grande perda de resistência mecânica. Dessa forma, os autores ressaltam a necessidade de equilíbrio entre a consistência e a resistência das argamassas quanto à adição de água de compensação.

Outro aspecto a ser considerado é a modificação nos valores médios de resistência à flexão e à compressão dessas argamassas. Braga, De Brito e Veiga (2012) avaliaram argamassas (traço 1:4, em volume) com diferentes teores de substituição (5%, 10% e 15%) do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado de concreto e verificaram, com a substituição de 15%, um incremento de 99% na resistência à flexão e 121% na resistência à compressão em relação às argamassas de referência. De acordo com Shui *et al.* (2008), tal aumento ocorre devido a grande quantidade de finos que esses agregados possuem. Esse material fino preenche os vazios e/ou possui potencial hidráulico remanescente devido ao cimento não hidratado presente.

Os valores obtidos por Leite *et al.* (2000) em sua avaliação de argamassas com 100% de agregado reciclado de concreto demonstram uma maior resistência mecânica das argamassas com agregado reciclado em comparação à referência. Os autores associam essa maior resistência mecânica à redução da relação a/c devido à absorção de parte da água pelos agregados miúdos reciclados.

Já Corinaldesi e Moriconi (2009) relatam uma redução das resistências à compressão e à tração de argamassas com 100% de agregado miúdo reciclado (de concreto, de bloco cerâmico e misto) em relação à argamassa com areia de quartzo. Essa redução da resistência à compressão também é relatada por Fan *et al.* (2015) na avaliação de argamassas com traço 1:2 (em massa) e teores de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado de concreto nos teores de 25%, 50% e 100%. Os autores atribuem essa menor resistência à compressão ao fato do agregado miúdo reciclado de concreto conter argmassa aderida, material mais poroso de menor resistência à compressão. Já Carasek *et al.* (2018) atribuíram a redução da resistência à compressão das argamassas com agregado reciclado de concreto à maior porosidade do agregado e à maior demanda de água para a produção das argamassas recicladas.

Samiei *et al.* (2015) identificou redução da resistência das argamassas hidráulica (traço 1:3) e argamassas mistas (traço 1:1:6) com o aumento dos teores de substituição (25%, 50%, 75% e 100%) do agregado natural pelo agregado reciclado.

O módulo de elasticidade também é modificado com a utilização do agregado miúdo reciclado. Braga, De Brito e Veiga (2012) relata um aumento de 49% com a substituição de 15% do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto. Já Leite *et al.* (2000) na avaliação de diferentes argamassas elaboradas com 100% de agregado

reciclado, observaram uma redução do módulo de elasticidade das argamassas. Os autores justificam tal redução devido a maior porosidade agregado miúdo reciclado, levando a argamassa apresentar-se mais deformável que a argamassa com agregado miúdo natural.

Outra propriedade que sofre alteração nas argamassas com agregado miúdo reciclado é a absorção de água. Jiménez *et al.* (2013) relatam uma redução da absorção de água da argamassa com agregado miúdo reciclado misto para teores de substituição abaixo de 10% e aumento para teores superiores a 20%. Já Martínez *et al.* (2013) identificaram um aumento na absorção e porosidade das argamassas devido o uso de diferentes tipos de agregado miúdo reciclado. Segundo os autores, esse aumento é devido à maior absorção de água do agregado miúdo reciclado e à alta relação água/cimento (a/c).

Em relação à retração das argamassas com agregado miúdo reciclado, Martínez; González-Cortina e Fernández-Marínez (2015) verificaram uma maior retração das argamassas de revestimento (traço 1:3, em volume) com diferentes tipos e teores de agregado miúdo reciclado se comparadas à argamassa de referência. Tal diferença também é identificada por MARTÍNEZ *et al.* (2016), os quais constataram uma retração de 0,121 mm/m para argamassa (traço 1:4, em massa) com a substituição de 50% do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado cerâmico. Valor significativamente superior ao obtido pela argamassa com agregado miúdo natural. Carasek *et al.* (2018) na avaliação de argamassas de revestimento e assentamento produzidas com 100% de agregado reciclado também observou uma maior retração em argamssas com agregados reciclados (misto e de concreto) se comparadas à argamassa com areia natural.

Mesbah e Buyle-Bodin (1999) justificam essa maior retração devido a grande porosidade e absorção de água do agregado miúdo reciclado, características as quais influenciam nos mecanismos de migração de água das argamassas.

Miranda (2000) apresenta ainda a influência do alto teor de finos do agregado miúdo reciclado na fissuração das argamassas de revestimento. Desse modo, o autor recomenda que o teor total de finos (material passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$ ) na argamassa seja menor que 25%.

## 2.4. Argamassa Estabilizada

As argamassas estabilizadas são definidas como argamassas dosadas em centrais de concreto, fornecidas no estado fresco, prontas para uso, e com período de utilização superior as argamassas convencionais ou industrializadas (BAUER, *et al.*, 2015; OLIVEIRA, 2017).

De acordo com CASALI *et al.*, 2011, uma especificidade da argamassa estabilizada é a indicação da proteção do material com uma lâmina de água de 2 cm para manter a umidade durante o tempo de estabilização. Os mesmos autores, em análise sobre a influência da utilização da lâmina de água em cinco lotes de argamassas estabilizadas, concluíram que o emprego da lâmina reduz a perda do índice de consistência. Contudo, as argamassas sem lâmina de proteção apresentaram maiores resistências mecânicas, indicando um possível aumento da relação a/c devido à utilização da lâmina de água.

Da mesma forma, Oliveira (2017), na avaliação de argamassas estabilizadas com diferentes teores de aditivo estabilizador de hidratação e de aditivo incorporador de ar, verificou que a proteção da argamassa com a lâmina de água não é adequada para todas as argamassas estabilizadas analisadas. Tal proteção elevou a fluidez e reduziu as propriedades mecânicas das argamassas com menores teores de aditivos.

Segundo BAUER, *et al.* (2015), o emprego da argamassa estabilizada traz vantagens no processo de execução de revestimentos, como o aumento da produtividade, devido à retirada da etapa de dosagem e mistura da obra.

Em geral, essas argamassas são compostas de cimento e areia de granulometria muito fina, além de aditivos estabilizadores de hidratação e incorporadores de ar (OLIVEIRA, 2017).

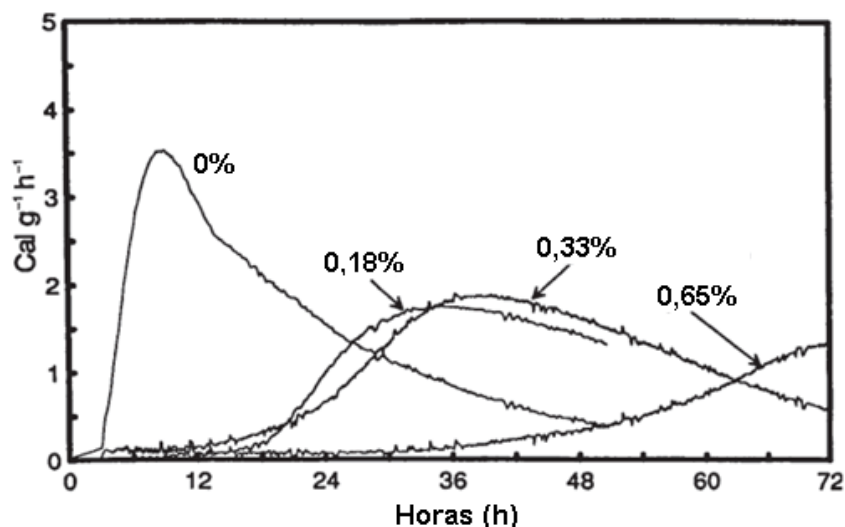
Em Brasília, as concreteiras utilizam cimentos CP V-ARI e o CP II- F para a elaboração de argamassas estabilizadas (OLIVEIRA, 2017). Porém, autores como Carvalho Jr. (2005) e Carasek (2010) não recomendam a utilização do CP V- ARI para a produção de argamassas devido a sua maior finura, característica a qual pode levar a uma maior retração e fissuração da argamassa. Em outras regiões são utilizados outros tipos de cimento, por exemplo, na região sul, segundo Trevisol Jr. (2015) e Jantsch (2015), são utilizados cimentos CP II F-32 e CP II Z-32.

Já as areias utilizadas para elaboração de argamassa são classificadas como finas, com módulo de finura próximo a 1,55, e contínuas (OLIVEIRA, 2017).

Dentre os insumos das argamassas estabilizadas temos ainda o aditivo estabilizador de hidratação, o qual é utilizado com a finalidade de aumentar o tempo de aplicação das argamassas. Esse aditivo é capaz de retardar a hidratação dos silicatos tricálcicos ( $C_3S$ ) e dos silicatos dicálcicos ( $C_2S$ ), assim como também dos aluminatos tricálcicos ( $C_3A$ ). O aditivo age impedindo a nucleação de C-S-H e CH ou retardando o crescimento desses produtos de hidratação e desacelerando a hidratação do  $C_3A$ . O processo de hidratação do cimento é retomado com a adição de um ativador ou após o término do efeito do estabilizador, permitindo a continuação da hidratação com o endurecimento e ganho de resistência do material (PAOLINE e KHURANA, 1998).

Assim, o estabilizador de hidratação irá prolongar o período de indução da hidratação do cimento (CHEUNG *et al.*, 2011). Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.3, onde é apresentada a curva de evolução do calor de uma mistura de cimento com o incremento de teores de aditivo estabilizador de hidratação.

Figura 2.3 - Efeito da variação de teores de aditivo estabilizador de hidratação na curva de evolução de calor da hidratação do cimento



Fonte: adaptado de Rixom e Mailvaganam (1999)

Como pode ser observado na Figura 2.3, o tempo de estabilização depende do teor percentual de aditivo estabilizador de hidratação sobre a massa do cimento empregado na dosagem das argamassas estabilizadas. Segundo Rixom e Mailvaganam (1999), dependendo da dosagem de aditivo o período de estabilização pode durar até 72 horas.

Ao contrário dos retardadores convencionais, o aditivo estabilizador de hidratação pode ser empregado em altas doses na elaboração de argamassas estabilizadas sem a perda de



resistência mecânica (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999). Porém, BAUER, *et al.* (2015) ressaltam que seu uso deve ser controlado, devido à possibilidade de atrasos imprevisíveis na pega devido à utilização de altos teores.

Tem-se ainda a utilização de aditivos incorporadores de ar na elaboração de argamassas estabilizadas. Esses aditivos são empregados com o intuito de melhorar a trabalhabilidade, uma vez que essas argamassas apresentam um menor teor de finos que as argamassas mistas em razão de não utilizarem cal em sua elaboração.

Os aditivos incorporadores de ar são tensoativos que ao serem adicionados às argamassas tendem a adsorver sua parte polar nas partículas de cimento e sua parte apolar volta-se para fase aquosa configurando um caráter hidrofóbico a essas partículas. Já os tensoativos não adsorvidos formam bolhas microscópicas de ar. A ligação das bolhas de ar com os tensoativos ligados às partículas de cimento melhora a plasticidade e aumentam a estruturação do sistema (coesão), características essas imprescindíveis para a utilização das argamassas (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

Segundo Resende (2010), a incorporação de ar além de beneficiar a plasticidade da argamassa, melhora a trabalhabilidade, reduz o consumo de água e conseqüentemente diminui a relação a/c e aumenta a resistência à compressão e à tração.

Quanto aos parâmetros de exigências das argamassas estabilizadas, Bauer *et al.* (2015) e Oliveira (2017) relatam uma indefinição devido à manutenção das propriedades ao longo do tempo. Porém de forma geral, as argamassas estabilizadas devem apresentar coesão, consistência, trabalhabilidade, retenção de água e teores de ar incorporados adequados ao longo do tempo de estabilização (Oliveira, 2017).

Trabalhos como Bauer *et al.* (2015) e Oliveira (2017) apresentam avaliações das principais propriedades das argamassas estabilizadas, sendo avaliados os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 13281:2005, o teor de ar incorporado e a variação dimensional das argamassas. Dessa forma, a Tabela 2.4 resume os requisitos exigidos para as argamassas:

Tabela 2.4 - Propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido

	<b>Propriedade</b>	<b>Descrição</b>
<b>Estado Fresco</b>	Consistência	É a propriedade pela qual a argamassa tende a resistir às deformações que lhe são impostas.
	Massa específica	Relação entre a massa e o volume de certa quantidade de material.
	Retenção de água	Capacidade de reter a água de amassamento contra a sucção da base ou contra a evaporação. Perda de água mais lenta promove maior resistência.
	Teor de ar incorporado	É a quantidade de ar existente em certo volume de argamassa.
	Trabalhabilidade	Trabalhabilidade pode ser definida como o comportamento de uma argamassa com relação a todas as propriedades requeridas durante a aplicação e acabamento (JIMÉNEZ <i>et al.</i> , 2013)
<b>Estado Endurecido</b>	Absorção capilar	Capacidade que um material possui de absorver água, de forma natural sem exercer pressão, traduzida pela massa de água absorvida por área de material.
	Porosidade	A porosidade pode ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total de sólidos.
	Resistência mecânica	Capacidade de suportar esforços mecânicos e tensões que lhe estão impostos.
	Módulo de elasticidade	Parâmetro mecânico de medida da rigidez de um material sólido. Razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo material
	Ductilidade	Capacidade de deformação dos materiais antes da ruptura, mensurada pela razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão.

Fonte: Adaptado de Jantsch (2015)

De acordo com Trevisol Jr. (2015), as argamassas estabilizadas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, apresentam desempenho técnico adequado aos requisitos normativos avaliados, independentemente do tempo de estabilização. O mesmo autor relata ainda uma melhor classificação das argamassas estabilizadas se comparada às argamassas industrializadas e produzidas em obras analisadas, devido ao maior controle na produção das argamassa estabilizadas.

Tal diferença entre as argamassas pode ser observada na Tabela 2.5, onde é apresentada a comparação das propriedades de argamassas mistas, industrializadas e estabilizadas obtidas por diversos autores.

Tabela 2.5 – Comparação das propriedades de argamassas mistas, industrializadas e estabilizadas

<b>Propriedades</b>	<b>Argamassas Mistas (ARAÚJO JR, 2004)</b>	<b>Argamassas industrializadas (RODRIGUES FILHO, 2013)</b>	<b>Argamassas estabilizadas (BAUER, 2014<sup>1</sup>)</b>	<b>Argamassas estabilizadas (BAUER <i>et al.</i> 2015)</b>
Retenção de água (%)	69,0-71,0	76,0-93,0	89,1-92,5	73,75-82,05
Teor de ar incorporado - pressométrico (%)	5,0-8,0	7,8-17,0	10,0-13,0	8,00-9,80
Resistência à compressão (MPa)	1,77-4,09	4,0-14,6	5,13-8,60	4,9-10,90
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,61-1,17	2,0-4,4	1,5-2,49	1,23-3,63
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	0,28-0,48	0,23-0,71	0,25-0,70	0,51-0,62
Coefficiente de capilaridade g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup>	1,55-1,69	0,10-17,7	2,80-5,50	2,00-4,40

<sup>1</sup>Relatório técnico no. 14061002 - avaliação das argamassas de revestimento – LEM-UNB

Fonte: adaptado de Oliveira (2017)

Observa-se nos dados da Tabela 2.5 a menor variação dos valores das propriedades apresentados pelas argamassas estabilizadas se comparados às argamassas industrializadas e mistas. Essa maior homogeneidade das propriedades se deve ao processo controlado de dosagem das argamassas estabilizadas nas centrais de concreto.

Trevisol Jr. (2015), na comparação das propriedades de argamassas estabilizadas, industrializadas e produzidas em obras, verificou uma semelhança entre as propriedades dos três tipos de argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Porém a argamassa estabilizada apresentou uma manutenção da trabalhabilidade por um período maior, menor absorção de água e menor retração e expansão em comparação às demais argamassas.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são expostos o programa experimental, o qual tem como objetivo apresentar os materiais utilizados, e os procedimentos realizados nessa pesquisa.

#### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados na produção das argamassas foram: cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), areia natural, areia reciclada, água, aditivo estabilizante de hidratação (AEH) e aditivo incorporador de ar (IAR).

O aglomerante foi escolhido devido ao seu uso na produção de argamassas estabilizadas no Distrito Federal, como apresentado por Oliveira (2017). As propriedades físicas e químicas do CPV-ARI utilizado nesse estudo são apresentadas, respectivamente, nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2. Os ensaios de caracterização física do aglomerante foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB). Já a análise química por espectrometria de raios-X foi realizada na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília (CAIQ).

Tabela 3.1 – Propriedades físicas do aglomerante

Propriedades		Método de ensaio	Resultados	Limite
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		ABNT NBR NM 23:2001	3,1	N.E.
Índice de consistência	Quantidade de água (g)	ABNT NBR NM 65:2003	152,5	N.E.
	Consistência (mm)	ABNT NBR NM 65:2003	5	6±1
Tempos de pega	Início de pega (min)	ABNT NBR NM 65:2003	130	≥ 60
	Fim de pega (min)	ABNT NBR NM 65:2003	210	≤ 600
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	ABNT NBR 7215:1997	26,4	≥ 14
	3 dias (MPa)	ABNT NBR 7215:1997	34,5	≥ 24
	7 dias (MPa)	ABNT NBR 7215:1997	45,1	≥ 34

Obs.: Limites estabelecidos com base na ABNT NBR 16697:2018; N.E. = Não estabelecido.

Tabela 3.2 - Propriedades químicas do aglomerante

	<b>Propriedades</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Resultados</b>	<b>Limite</b>
Composição química	$SiO_2$ (%)	ABNT NBR 14656:2001	19,45	N.E.
	$CaO$ (%)	ABNT NBR 14656:2001	65,83	N.E.
	$MgO$ (%)	ABNT NBR 14656:2001	1,96	$\leq 6,5$
	$Al_2O_3$ (%)	ABNT NBR 14656:2001	3,76	N.E.
	$Fe_2O_3$ (%)	ABNT NBR 14656:2001	3,76	N.E.
	$K_2O$ (%)	ABNT NBR 14656:2001	1,15	N.E.
	$SO_3$ (%)	ABNT NBR 14656:2001	4,10	$\leq 4,5$
	$C_3A$ teórico	ABNT NBR 14656:2001	4,31	N.E.

Obs.: Limites estabelecidos com base na ABNT NBR 16697:2018; N.E. = Não estabelecido.

O agregado de referência utilizado é uma areia natural lavada de rio, empregada na produção de argamassas estabilizadas comercializadas no Distrito Federal e entorno, escolhida em razão da sua distribuição granulometria contínua, da sua disponibilidade e utilização na região para produção de argamassas.

Já a areia reciclada foi escolhida em virtude de sua disponibilidade na região do Distrito Federal e fornecimento para o estudo, com aspecto dimensional compatível para utilização em argamassas. A amostra dessa areia foi produzida e coletada na Usina de Reciclagem Areia Bela Vista, localizada em Sobradinho/DF. Esse agregado foi obtido por meio da britagem dos resíduos de construção civil, com a utilização de um britador de mandíbulas, com posterior lavagem do material para a retirada do material pulverulento. Para a sua produção, foram realizados três ciclos de britagem e peneiramento para se obter as dimensões de agregado miúdo (< 4,8 mm) antes da lavagem dos agregados.

Ressalta-se que devido à coleta da areia reciclada ter sido realizada após o beneficiamento dos resíduos, não foi possível realizar a classificação do agregado reciclado em agregado de resíduo de concreto ou agregado reciclado de resíduo de misto, como estabelece a ABNT NBR 15116:2004, sendo tratado apenas como agregado de resíduo da construção civil.

As curvas de distribuição granulométrica das duas areias e suas características físicas são apresentadas, respectivamente, na Figura 3.1 e na Tabela 3.3. Os ensaios de caracterização

física dos agregados foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB).

Figura 3.1 - Distribuição Granulométrica da areia natural e da areia reciclada

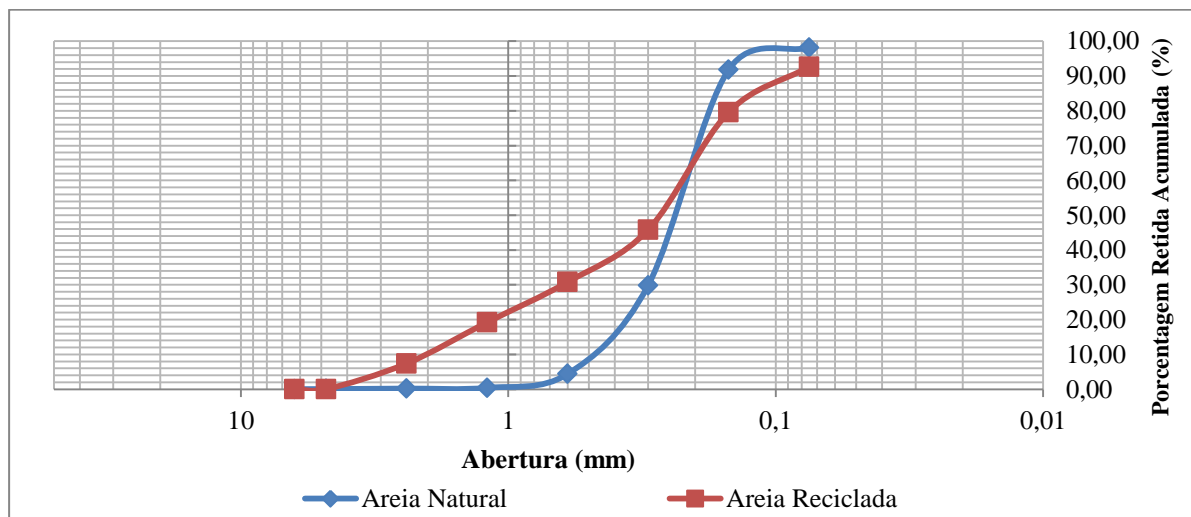


Tabela 3.3 – Propriedade das Areias

Propriedades	Areia natural	Areia reciclada
D <sub>máx</sub> (mm)	0,6 mm	4,8 mm
Módulo de Finura	1,27	1,83
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,54
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	1,84	1,77
Teor de Finos (%)	1,58%	9,04%
Absorção de água (%)	0,44%	5,48%

Observa-se que ambas as areias possuem distribuição granulométrica contínua, porém a areia natural apresenta-se mais fina se comparada à areia reciclada. Essa diferença é comprovada pelo menor módulo de finura da areia natural (1,27), se comparado ao valor obtido pela areia reciclada (1,83).

Outra diferença entre as areias é o diâmetro máximo. A areia natural apresentou um diâmetro máximo de 0,6 mm, enquanto a areia reciclada possui um diâmetro máximo de 4,8 mm, como demonstrado na Tabela 3.3. Além disso, verifica-se que a areia reciclada apresentou uma menor massa específica, menor massa unitária, maior teor de fino e maior absorção de água em relação à areia natural.

Os aditivos estabilizador de hidratação (AEH) e incorporador de ar (IAR) empregados para a produção das argamassas estabilizadas dessa pesquisa foram os mesmos utilizados por Oliveira (2017), no seu estudo das argamassas estabilizadas com diversos teores desses aditivos, os quais apresentaram compatibilidade com os demais componentes das misturas. Além disso, esses aditivos são utilizados na produção comercial de argamassas estabilizadas no Distrito Federal.

Os ensaios de caracterização dos aditivos utilizados nessa pesquisa foram realizados no LEM/UnB. A massa específica, teor de sólidos e pH dos aditivos foram determinados segundo os procedimentos ABNT NBR 10908:2008. Os resultados dessas determinações da são apresentados nas Tabela 3.4 e Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Aditivo Incorporador de Ar

<b>Propriedades</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Resultados</b>	<b>Dados fabricante (25°c)</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 10908:2009	1,01	0,99 a 1,03
Teor de Sólidos (%)	ABNT NBR 10908:2010	5,3	-
pH	ABNT NBR 10908:2011	10,4	10,0 a 12,0

Tabela 3.5 – Aditivo Estabilizador de Hidratação

<b>Propriedades</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Resultados</b>	<b>Dados fabricante (25°c)</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 10908:2009	1,17	1,15 a 1,21
Teor de Sólidos (%)	ABNT NBR 10908:2010	38,2	-
pH	ABNT NBR 10908:2011	5,6	6,0 a 8,0

O valor de pH do aditivo estabilizador de hidratação fora da faixa informada pelo fabricante possivelmente deve-se à variação na temperatura durante a execução do ensaio, visto que o laboratório utilizado possui temperatura controlada em (23±2)°C.

Para a produção das argamassas também foi utilizada a água fornecida pela rede de abastecimento do Distrito Federal. As características da água fornecidas pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAES) são expostas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Características da água

<b>Parâmetro</b>	<b>Cor (uH)</b>	<b>Tur (uT)</b>	<b>CrI (mg/L)</b>	<b>Coli Totais (AUS)</b>	<b>E. Coli. (AUS)</b>	<b>C.B.H. (UFC/mL)</b>
Limites estabelecidos*	≤15	≤5	0,2 a 5,0	>95%	100% (ideal)	<500

Fonte: CAESB

Onde:

- Cor: Medida de partículas dissolvidas em água;
- Turbidez: Medida de partículas em suspensão na água;
- Cloro Residual Livre: Residual do agente bactericida adicionado à água para desinfecção e proteção da água;
- Coliformes Totais: Indicador utilizado para medir a ocorrência de bactérias ambientais; e
- Coliformes Termotolerantes (E.coli): Indicador utilizado para medir a possível ocorrência de bactérias de origem animal.

O cimento Portland de alta resistência inicial, a areia natural, o aditivo estabilizante de hidratação e o aditivo incorporador de ar utilizados nessa pesquisa foram disponibilizados por uma concreteira (empresa prestadora de serviços de concretagem) do Distrito Federal, a qual produz, também, argamassas estabilizadas.

### **3.2. Métodos**

O programa experimental desta pesquisa divide-se em três etapas: Na Etapa 1, foi realizada a caracterização das areias natural e reciclada e a composição das areias com diferentes teores de substituição utilizadas na elaboração das argamassas estabilizadas dessa pesquisa; Já na Etapa 2, foram avaliadas as características e propriedades de cinco argamassas estabilizadas, sendo uma argamassa produzida com areia natural, três argamassas com substituição parcial e uma com substituição total da areia natural pela areia reciclada. As avaliações das argamassas ocorreram, tanto no estado fresco como no estado endurecido, em diferentes tempos de estabilização; e Na Etapa 3, foi avaliada, com o uso de termopares, a influência da substituição dos areais e a utilização do aditivo estabilizador de hidratação na cinética da hidratação das argamassas estabilizadas.

A seguir são apresentadas, de forma detalhada, as três etapas do programa experimental com suas respectivas descrições.



### **3.2.1. Etapa 1 – Caracterização e Composição dos Agregados**

#### **3.2.1.1. Caracterização dos Agregados**

Nesta etapa realizou-se um aprofundamento na caracterização dos agregados utilizados para a elaboração das argamassas estabilizadas analisadas nesta pesquisa por meio da realização de uma análise visual das frações dos agregados e da determinação dos contaminantes presentes nos agregados.

Essa caracterização detalhada dos agregados foi realizada em razão da importância para a avaliação de modificações nas características e nas propriedades das argamassas estabilizadas devido à utilização da areia reciclada.

Dessa forma, foram realizados os seguintes ensaios:

##### Análise visual

- Análise morfoscópica em microscópio estereoscópio, adaptada da ABNT NBR 7389 - 1:2009;
- Análise visual por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

##### Determinação de contaminantes

- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis por cromatografia iônica;
- Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis – ABNT NBR 7218:2010.

Ressalta-se que a determinação de cloretos e de sulfatos foi realizada por meio do ensaio de cromatografia iônica em substituição do procedimento apresentado pela ABNT NBR 9917:2009. Esse ensaio foi escolhido devido a sua capacidade de detecção. Segundo Fritz e Gjerde (2008), o ensaio de cromatografia iônica é capaz de detectar concentrações de até partes por bilhão ( $\mu\text{m/l}$ ).

Os ensaios de determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis e de determinação do teor de argila foram realizados por serem requisitos da ABNT NBR 15116:2004.

Por falta de outros critérios normativos, os parâmetros referentes à utilização de agregado reciclado para produção de concreto sem função estrutural da ABNT NBR 15116:2004 foram

utilizados como referência para a utilização do agregado miúdo reciclado em argamassas estabilizadas.

### ***3.2.1.2. Composição dos Agregados***

As areias foram divididas em seis faixas granulométricas. Essa divisão teve como base a ABNT NBR 7214:2015 – Areia normal para ensaio de cimento, a qual classifica a areia normal em quatro faixas de acordo com a sua granulometria. Além dessas quatro faixas, foram ainda acrescentadas duas faixas, material fino e material pulverulento. Essas faixas foram adicionadas devido à grande influência desses materiais nas argamassas como apresentado em estudos como Miranda (2000) e Souza (2005).

A fim de avaliar a influência da areia reciclada no comportamento da argamassa estabilizada, foram montadas areias com diferentes teores de substituições da areia natural pela areia reciclada. As substituições foram realizadas nos teores de 25%, 50%, 75% e 100%, visando possibilitar uma melhor avaliação, visto que não há referências da utilização desse material na produção de argamassas estabilizadas. A substituição foi realizada em massa devido à semelhança entre as massas específicas dos agregados utilizados nessa pesquisa.

As substituições foram por faixa granulométrica com intuito de evitar modificações que pudessem gerar alterações nos resultados dos ensaios realizados nas argamassas devido às diferenças entre as curvas de distribuição granulométrica das areias.

Dessa forma, as areias foram divididas nas seguintes faixas nomeadas como:

- Areia grossa – material retido na peneira 1,2 mm;
- Areia média grossa – material passante na peneira 1,2 mm e retido na peneira 0,6 mm;
- Areia média fina – material passante na peneira 0,6 mm e retido na peneira 0,3 mm;
- Areia fina – material passante na peneira 0,3 mm e retido na peneira 0,15 mm;
- Material fino – material passante na peneira 0,15 mm e retido na peneira 0,075mm;
- Material pulverulento – material passante na peneira 0,075 mm e retido no fundo.

A substituição foi realizada proporcionalmente à massa total retida na peneira inferior de cada faixa da areia natural.

Portanto, as massas retidas em cada uma das faixas para cada um dos quatro teores de substituição foram determinadas pela Equação 3.1.

$$m_i = [(1 - x) * m_{NAT}] + m_{S_{REC}} \quad (3.1)$$

Onde,

- $m_i$  = massa retida na faixa “i”, podendo “i” ser: areia grossa, areia média grossa, areia média fina, areia fina, material fino e material pulverulento;
- $x$  = teor de substituição da areia natural por areia reciclada, podendo  $x$  assumir os valores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%.
- $m_{NAT}$  = massa total retida na faixa “i” para a areia natural;
- $m_{S_{REC}}$  = massa de substituição de areia reciclada.

Sendo  $m_{S_{REC}}$  definida pela a Equação 3.2 como:

$$m_{S_{REC}} = x * m_{NAT} \quad (3.2)$$

Os valores de  $m_{NAT}$  foram definidos na Etapa 1 no ensaio da determinação da composição granulométrica da areia natural.

A composição das areias por faixa granulométrica é apresentada no Apêndice A.

### 3.2.2. Etapa 2 – Produção e Avaliação das Argamassas Estabilizadas

Nessa etapa foram avaliadas as argamassas estabilizadas elaboradas em laboratório. No total foram avaliadas cinco argamassas estabilizadas, sendo uma argamassa composta por areia natural (AAN), três com substituições parciais e outra, com substituição total da areia natural pela areia reciclada (AAR acompanhado da % de substituição), conforme apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Argamassas - Etapa 2

Argamassas	Teor de Areia Natural (%)	Teor de Areia Reciclada (%)
AAN	100	0
AAR25%	75	25
AAR50%	50	50
AAR75%	25	75
AAR100%	0	100

A dosagem das argamassas baseou-se no estudo de Selmo (1989). Esse método experimental consiste em fixar uma quantidade de agregado miúdo e cimento para se determinar a

quantidade mínima de cal e água necessária para se atingir uma trabalhabilidade adequada para um determinado valor de parâmetro “E”, definido pela Equação 3.3.

$$E = \frac{(areia + cal)}{cimento} \quad (3.3)$$

Em razão da utilização de aditivo incorporador de ar, não foram empregados finos plastificantes nas argamassas elaboradas, dessa forma, na equação a cal é igual à zero. Utilizou-se o parâmetro “E” igual a “6” devido aos resultados obtidos por Oliveira (2017) na avaliação de argamassas estabilizadas com diferentes valores de parâmetro “E”.

O tempo final de estabilização das argamassas foi definido como o período de 8 horas, em virtude desse intervalo de tempo abranger uma jornada de um dia de trabalho. Além disso, esse tempo de estabilização é adotado pelo fornecedor de argamassas como parâmetro de fornecimento para os canteiros de obras do Distrito Federal.

O teor de aditivo estabilizador de hidratação necessário para se atingir às 8 horas de estabilização, para cada uma das argamassas, foi definido experimentalmente em laboratório, partindo do teor de 0,4% utilizado por Oliveira (2017). A partir desse teor, de referência, foram realizados incrementos até o momento no qual as argamassas com 8 horas de estabilização atingiram uma penetração de cone de  $(55 \pm 5)$  mm. Essa faixa de penetração foi escolhida por estar próxima ao intervalo de valores considerados para argamassas plásticas por Angelim (2000), penetração de cone entre 45 mm e 56 mm, e Souza (2005), penetração de cone entre 45 mm e 55 mm, em argamassas de revestimento.

Dessa forma, foram utilizados os teores de aditivo estabilizador de hidratação apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Teores de Aditivo Estabilizador de Hidratação

<b>Argamassa</b>	<b>Teor de Aditivo Estabilizador de Hidratação (%)</b>
AAN	0,4
AAR25%	0,4
AAR50%	0,7
AAR75%	0,8
AAR100%	1,0

Já o teor de incorporador de ar foi fixado em 0,2%. Sendo esse teor o mesmo utilizado por Oliveira (2017). Ressalta-se que os teores do aditivo estabilizador de hidratação e do aditivo incorporador de ar estão dentro das faixas de teores apresentadas pelo fabricante, sendo essas faixas, respectivamente, de 0,4% a 1,5% e 0,2% a 1,0% sobre a massa de cimento.

A água foi dosada inicialmente com a finalidade de realizar a compensação da diferença de absorção de água entre os agregados natural e reciclado. A compensação realizada foi de 80% da diferença entre as absorções de água dos agregados, assim como recomendado pela ABNT NBR 15116:2004. A compensação de parte da água absorvida pelo agregado reciclado foi realizada com o objetivo de evitar perda excessiva de trabalhabilidade. Os valores da água de compensação devido à absorção do agregado reciclado são apresentados no Apêndice B.

Em seguida foi realizado o acréscimo de água até o ponto, no qual, a argamassa obteve um valor de penetração de cone dentro do intervalo de  $(75 \pm 5)$  mm. Esse intervalo foi adotado devido à modificação na consistência da argamassa estabilizada nos momentos iniciais de estabilização relatada por Oliveira (2017).

Para a preparação das argamassas utilizou-se o Método Rápido de Ajuste (MRA). Este método foi desenvolvido pelo professor Elton Bauer do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília e utilizado por Oliveira (2017). Esse método consiste nos seguintes procedimentos:

- Executar mistura manual dos insumos anidros (2,5 kg) separadamente;
- Colocar todos os insumos anidros na cuba do misturador;
- Executar mistura mecânica, em velocidade baixa, adicionando 50% da água de mistura ao longo de 30 segundos;
- Executar mistura mecânica por 30 segundos em velocidade baixa;
- Desligar o misturador e realizar a raspagem da superfície interna da cuba e da pá. Deixar a argamassa em repouso por 90 segundos;
- Adicionar o restante da água (50%) juntamente com o aditivo estabilizador de hidratação e o aditivo incorporador de ar, os quais devem ser previamente misturados;
- Executar mistura mecânica, na velocidade baixa, por 60 segundos.

Realizou-se o ensaio de penetração de cone para verificação de sua consistência após a elaboração da argamassa. As argamassas deveriam atingir uma penetração de cone dentro do intervalo de  $(75 \pm 5)$  mm. Caso os valores iniciais obtidos no ensaio de penetração de cone

estejam abaixo do intervalo, adiciona-se mais água e mistura-se a argamassa por 30 segundos. Já no caso de se obter valores iniciais superiores ao intervalo, a argamassa deve ser descartada.

Após a preparação, as argamassas foram armazenadas em recipientes plásticos revestidos com filme plástico e acondicionadas em sala climatizada com temperatura do ar de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $(60 \pm 5)\%$  para posterior realização dos ensaios. Ressalta-se que não foi utilizada uma lâmina d'água para proteção das argamassas estabilizadas, devido Oliveira (2017) relatar que a utilização dessa proteção ocasionou um aumento na fluidez na argamassa com agregado natural e a combinação de 0,4% de AEH e 0,2% IAR. Argamassa essa com os mesmo insumos utilizados na produção da AAN.

Apesar do tempo final de estabilização ter sido definido como 8 horas, foram realizadas avaliações nos tempos intermediários de estabilização de 0,5h, 3h, 6h, e 8h com a finalidade de identificar modificações ocasionadas pela utilização da areia reciclada e comparação dos resultados obtidos. Esses tempos intermediários de estabilização avaliados foram os mesmo utilizados por Oliveira (2017).

Devido à capacidade do equipamento de mistura disponível no LEM/UnB, foi necessária a preparação de amostras de argamassas para cada um dos tempos de estabilização. Não sendo possível a utilização de uma só amostra para avaliação contínua de suas propriedades.

As avaliações das argamassas tiveram como referência os requisitos apresentados pela ABNT NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Dessa forma, foram realizados os seguintes ensaios para a avaliação das argamassas estabilizadas:

#### Estado Fresco

- Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado – ABNT NBR 13278:2005;
- Determinação do índice de consistência – ABNT NBR 13276:2016;
- Determinação da consistência pelo método de penetração de cone – ASTM C780:2014;
- Determinação da tensão limite de escoamento pelo ensaio de *Vane Test* – ASTM D4648:2013;

- Determinação da retenção de água – ABNT NBR 13277:2005.

Apesar dos ensaios de penetração de cone e *Vane Test* não estarem presentes na ABNT NBR 13281:2005, esses ensaios foram realizados por serem habitualmente utilizados no LEM/UnB para a avaliação da consistência e da tensão limite de escoamento das argamassas.

#### Estado Endurecido

- Determinação da densidade de massa no estado endurecido – ABNT NBR 13280:2005;
- Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – ABNT NBR 13279:2005.
- Determinação do módulo de elasticidade dinâmico – ASTM E1876:2009;
- Determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade – ABNT NBR 15259:2005;
- Determinação da absorção de água por imersão e índice de vazios – ABNT NBR 9778:2009;
- Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear) – ABNT NBR 15261:2005;
- Determinação da resistência potencial de aderência à tração – ABNT NBR 15258:2005;

No estado fresco, os ensaios de massa específica, de incorporação de ar, índice de consistência, de penetração de cone e de tensão limite de escoamento (*Vane Test*) foram realizados nos tempos de estabilização de 0,5h, 3 h, 6 h e 8 h, assim como realizado por Oliveira (2017). Já o ensaio de retenção de água foi realizado, com intuito de realizar a comparação entre as argamassas desse estudo, apenas no tempo de 0,5 horas de estabilização.

Já no estado endurecido, os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram realizados com prismas moldados nos tempos de estabilização de 0,5 h, 3 h, 6 h e 8 h. Os demais ensaios no estado endurecido foram realizados apenas com prismas moldados no tempo de estabilização de 0,5 horas.

Esta etapa pode ser resumida, conforme suas variáveis independentes, condições fixas e variáveis dependentes descritas a seguir:

**Variáveis independentes:**

- Teores de substituição: os teores de substituição partiram de 0% (AAN) e foram realizados incrementos de 25% de substituição até atingir o teor de 100% de substituição (AAR100).
- Teores de AHE: diferentes teores de AEH a fim de se obter valores de penetração de cone ( $55 \pm 5$ ) mm no tempo estabilização de 8 horas das cinco argamassas.
- Tempos de análise: os ensaios para análise das argamassas foram realizados nos tempos de estabilização de 0,5 h, 3 h, 6 h e 8 h.

**Condições fixas:** para todas as argamassas foram definidas as seguintes condições fixas:

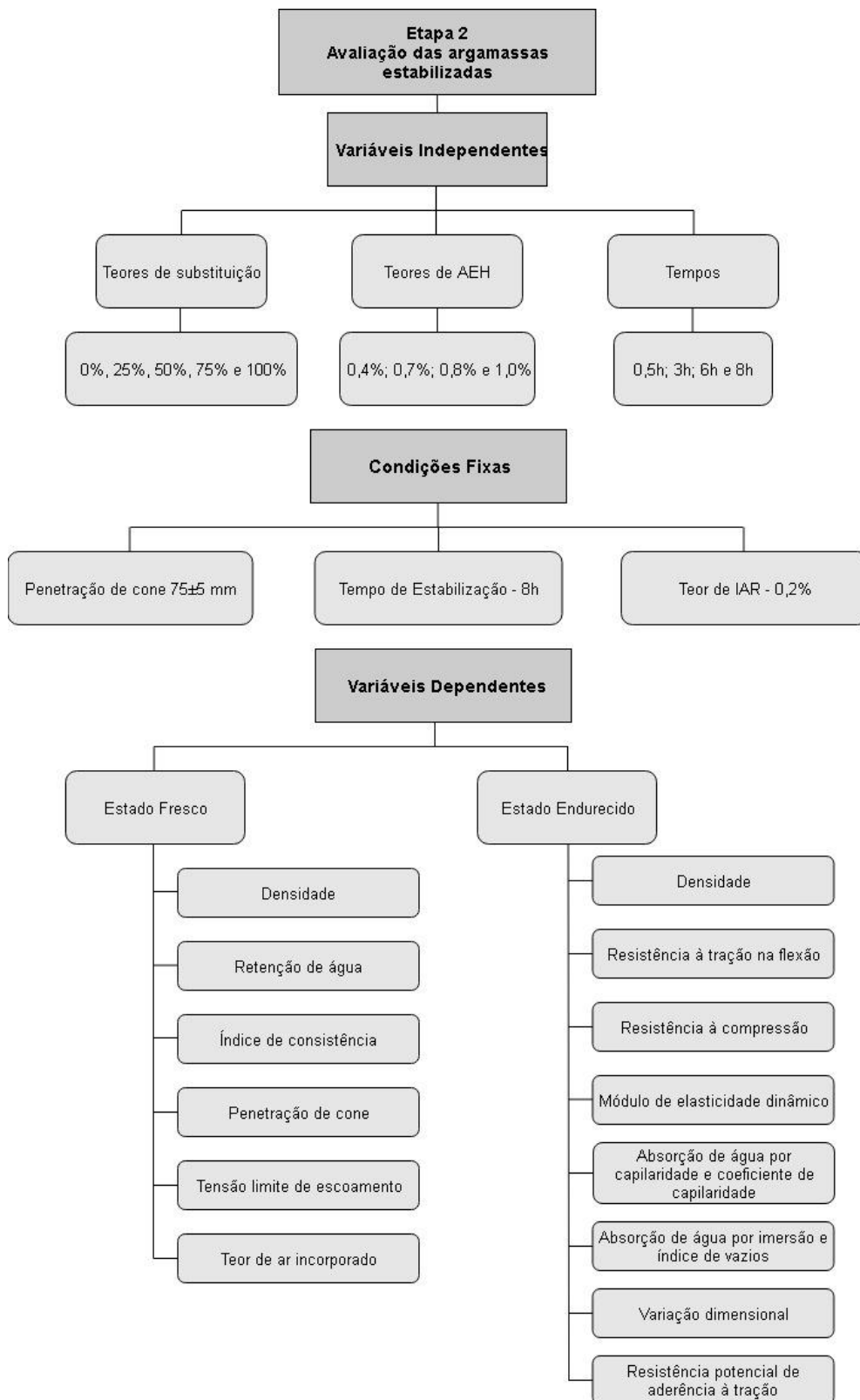
- Consistência inicial avaliada pela penetração de cone na faixa de ( $75 \pm 5$ ) mm;
- Tempo final de estabilização de 8 horas;
- Teor de IAR de 0,2%.

**Variáveis dependentes:** as propriedades avaliadas no estado fresco foram: densidade de massa e teor de ar incorporado, índice de consistência, consistência pelo método de penetração de cone, tensão limite de escoamento pelo ensaio de *Vane Test* e retenção de água. Já no estado endurecido foram avaliadas: densidade de massa no estado endurecido, resistência à tração na flexão e à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade, absorção de água por imersão, variação dimensional (retração ou expansão linear), resistência potencial de aderência à tração.

A Figura 3.2 apresenta, em um fluxograma, as variáveis independentes, condições fixas e variáveis dependentes da Etapa 2.



Figura 3.2 - Fluxograma da Etapa 2



### 3.2.3. Etapa 3 - Avaliação da Cinética da Hidratação das Argamassas Estabilizadas ao Longo do Tempo

Nessa etapa foi avaliada a alteração da temperatura durante a hidratação das argamassas. Essa análise visou identificar variações na cinética da hidratação das argamassas devido à substituição da areia natural pela areia reciclada e pela utilização do aditivo estabilizador de hidratação (AEH). Nesta etapa, foram avaliadas apenas as argamassas com areia natural (AAN) e com 100% de substituição pela areia reciclada (AAR100%), devido às mesmas apresentarem os extremos quanto à substituição dos agregados. Além disso, essas argamassas foram elaboradas sem AEH (0,0%) e com teores de 0,4% e 1,0% de AEH, sendo esses dois últimos o teor mínimo e o teor máximo, respectivamente, utilizados nas argamassas elaboradas na Etapa 2. Dessa forma, foram analisadas seis argamassas como apresentado pela Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Argamassas - Etapa 3

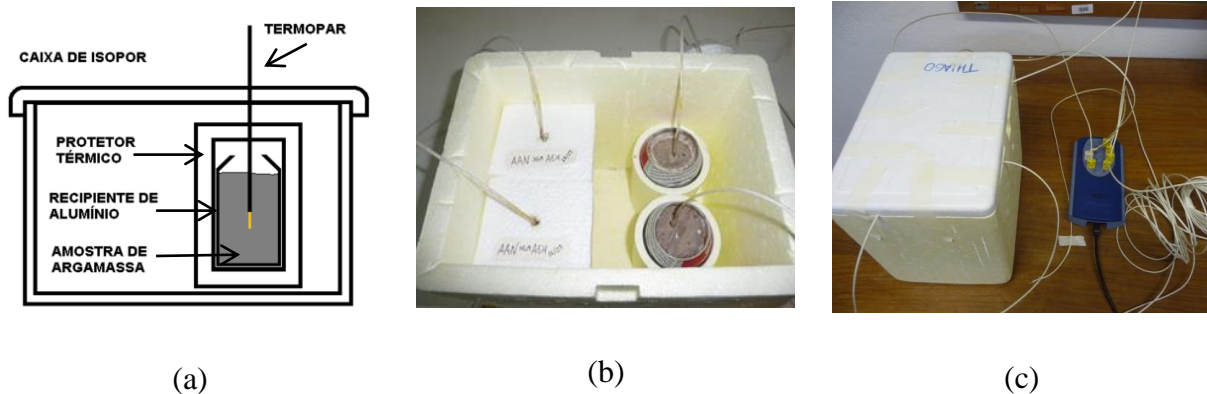
<b>Argamassas</b>	<b>Teor de AEH (%)</b>
AAN-0,0%	0
AAN-0,4%	0,4
AAN-1,0%	1,0
AAR100-0,0%	0
AAR100-0,4%	0,4
AAR100-1,0%	1,0

Para a análise, realizou-se um monitoramento experimental da alteração de temperatura ao longo do período de hidratação para cada argamassa em um sistema semi-adiabático. Esse monitoramento foi realizado utilizando-se termopares tipo K conectados a um *datalog* da marca PICO modelo TC-08, além do *software* PicoLog Recorder. A aquisição dos valores de temperaturas das amostras de argamassas ocorreu em intervalos de (2 a 4) minutos e se iniciaram logo após a preparação das argamassas e perduraram até a estabilização das temperaturas após o pico de hidratação das argamassas.

Para a realização do monitoramento, foram elaboradas duas amostras no estado fresco para cada uma das argamassas. Após o preparo das argamassas, as amostras foram armazenadas em recipientes de alumínio como os termopares já fixados e posicionados no centro. Em seguida, o conjunto foi acondicionado em protetores térmicos de isopor e acondicionado em caixas de isopor fechada para evitar interferências do ambiente externo. As amostras foram

mantidas nesse acondicionamento até o término do monitoramento. A Figura 3.3 apresenta a execução do ensaio.

Figura 3.3 – Ensaio para monitoramento da temperatura de hidratação das argamassas



Legenda: (a) Esquema de acondicionamento das amostras de argamassas. (b) Montagem das amostras de argamassas para o ensaio de monitoramento da temperatura. Amostras de argamassa em recipientes de alumínio, acondicionados em protetores térmicos e no interior de um caixa de isopor. Termopares posicionados no interior das amostras de argamassas. (c) Caixa de isopor fechada, contendo as amostras de argamassa, e termopares ligados ao *datalog*.

Esta etapa pode ser resumida, conforme suas variáveis independentes, condições fixas e variáveis dependentes descritas a seguir:

#### **Variáveis independentes:**

Teores de substituição: os teores de substituição estudados nessa etapa são de 0% (AAN) e de 100% de substituição (AAR100).

Teores de AHE: foram analisadas argamassas sem AEH (0%) e com 0,4% e 1,0% de AHE.

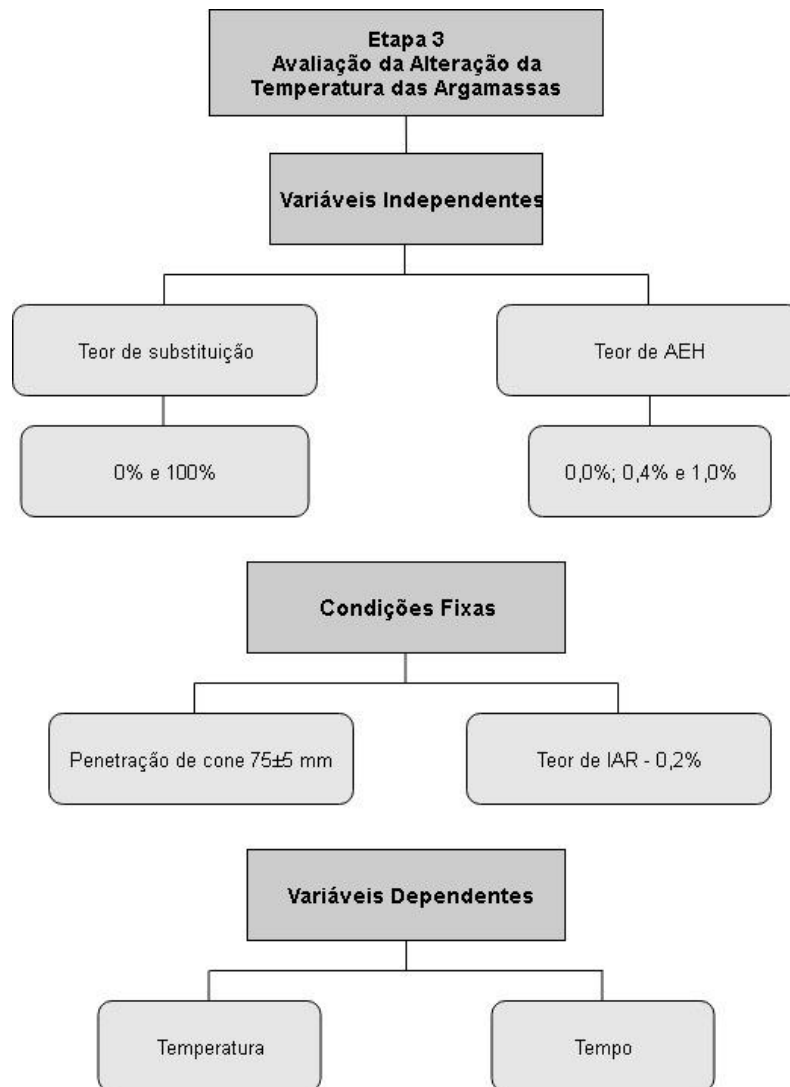
**Condições fixas:** para todas as argamassas foram definidas as seguintes condições fixas:

- Consistência inicial avaliada pela penetração de cone na faixa de  $(75 \pm 5)$  mm;
- Teor de IAR de 0,2%.

**Variáveis dependentes:** foram analisadas as variações na cinética da hidratação das argamassas por meio da temperatura no pico de calor de hidratação e do tempo até se atingir o pico de calor de hidratação.

A Figura 3.4 apresenta, em um fluxograma, as variáveis independentes, condições fixas e variáveis dependentes da Etapa 2.

Figura 3.4 – Fluxograma da Etapa 3



### 3.3. Ensaios

Essa seção apresenta os procedimentos de ensaios realizados ao longo dessa pesquisa que não apresentam norma de procedimentos ou foram realizados com adequações. Os demais ensaios realizados conforme suas respectivas normas estão no Apêndice E.

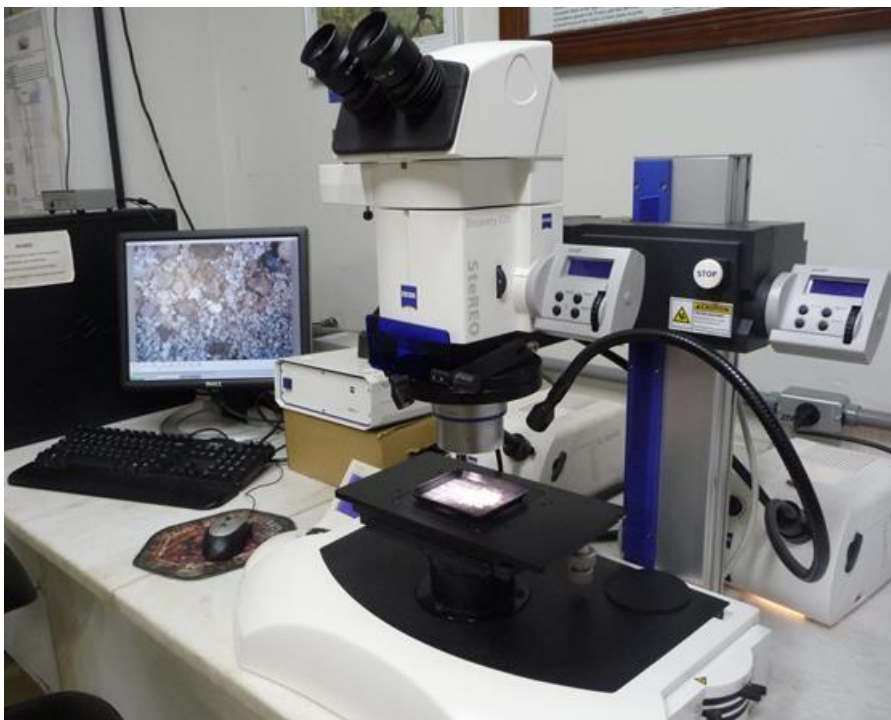
### 3.3.1. Método de ensaios de análise visual dos agregados

#### 3.3.1.1. *Análise morfoscóptica das areias*

Para uma melhor caracterização dos agregados miúdos foi realizada a análise morfoscóptica das areias. Esse ensaio tem a finalidade de avaliar algumas características visuais das areias estudadas, como: cor, forma e textura da superfície.

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Micropaleontologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília com a utilização de um microscópio estereoscópio modelo Discovery V20 da marca Zeiss (Figura 3.5). Os materiais foram fotografados e as imagens comparadas às formas padrões de grãos, apresentadas pela ABNT NBR 7389-1/2009. A cor foi considerada como a predominante na amostra. A forma dos grãos foi analisada, classificando o grau de esfericidade (alto ou baixo) e o grau de arredondamento (arredondado, sub arredondado, sub anguloso, anguloso).

Figura 3.5 – Microscópio estereoscópio utilizado na análise visual dos agregados



### 3.3.1.2. *Análise visual por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV).*

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste num equipamento que gera imagens ampliadas revelando informações, em escala microscópica, de um espécime. Suas imagens revelam informações como tamanho, forma, composição, entre outras propriedades físicas e químicas (GOLDSTEIN *et al.*, 2018). Dessa forma, o MEV foi utilizado para analisar as características superficiais da areia natural e da areia reciclada. Essa análise foi realizada no Laboratório de Micropaleontologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília com a utilização do microscópio eletrônico de varredura modelo Neo Scope JCM-5000 da marca Jeol na captura das imagens dos agregados. Esse equipamento é apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado na análise visual dos agregados



### **3.3.2. Método de determinação de contaminantes dos agregados**

#### **3.3.2.1. Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis**

Para a determinação dos teores de cloretos e sulfatos foi realizado o ensaio de cromatografia iônica. O ensaio consiste em um método de separação de compostos químicos baseado em processos de troca iônica entre a amostra e o material de suporte (WEISS, 2005).

Optou-se pela realização do ensaio de cromatografia iônica devido à capacidade de detecção comparando-se ao procedimento apresentado pela ABNT NBR 9917:2009. O ensaio foi realizado pela empresa Soliquímia, localizada no Distrito Federal.

### **3.3.3. Métodos de ensaios das argamassas no estado endurecido**

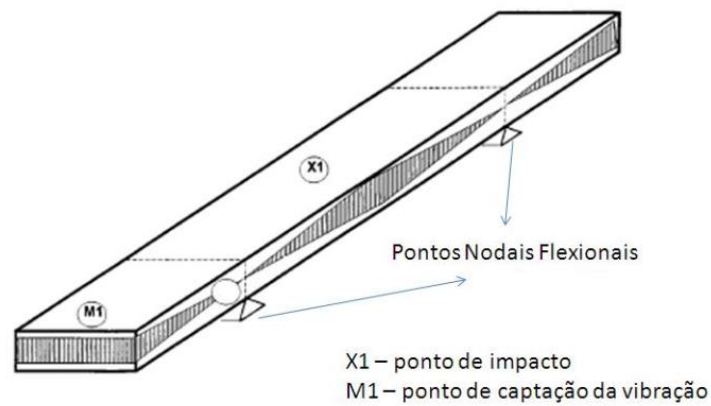
#### **3.3.3.1. Módulo de elasticidade dinâmico**

O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foi executado pelo método da excitação por impulso, método esse normatizado pela ASTM E1876:2009 – *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. Esse ensaio visa identificar modificações no módulo de elasticidade das argamassas estabilizadas devido à utilização de areia reciclada.

O ensaio consiste em excitar o corpo de prova com um leve impulso mecânico e em calcular os módulos de elasticidade a partir das frequências emitidas pelo corpo e recebidos por um captador acústico (SONELASTIC, s.d.). Os cálculos são realizados pelo *Software Sonelastic*.

Para a determinação do módulo de elasticidade foi utilizado o modo de vibração flexural (transversal). Os posicionamentos específicos para o ponto de impacto e do ponto de captação da vibração para o modo de vibração flexural são apresentados na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Posicionamento de apoios e receptores para modo de vibração flexural.

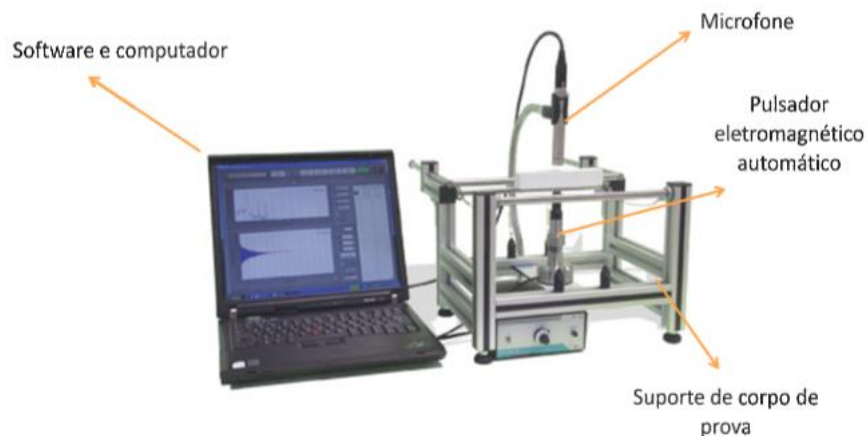


Fonte: Sonelastic (s.d.)

Foram utilizados dois corpos de prova prismáticos, com secção de 40 mm x 40 mm e comprimento de 160 mm, de cada uma das cinco argamassas. Para cada corpo de prova o ensaio foi repetido três vezes.

Este ensaio de determinação de módulo de elasticidade foi realizado no Laboratório de Construção e Estruturas da Universidade Federal da Bahia (UFBA) com a utilização equipamento Sonelastic (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Equipamento Sonelastic utilizado na determinação do módulo de elasticidade



Fonte: Sonelastic (s.d.)



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados realizados na Etapa 1, a análise das argamassas no estado fresco e no estado endurecido da Etapa 2 e a avaliação da cinética da hidratação das argamassas ao longo de sua hidratação da Etapa 3. Também foram realizadas as discussões dos resultados obtidos ao longo de cada uma das etapas dessa pesquisa.

### 4.1. Etapa 1 - Caracterização dos Agregados

#### 4.1.1. Caracterização das Areias

Para a constatação das diferenças entre as areias natural e reciclada foram realizadas avaliações das propriedades físicas e análise visual das frações dos agregados, assim como a determinação dos contaminantes presentes nas amostras.

A areia natural apresentou uma massa específica de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , a areia reciclada apresentou  $2,54 \text{ g/cm}^3$ , havendo assim uma diferença de 4,15%. Este comportamento está em concordância com Pedrozo (2008), Malta, Silva e Gonçalves (2013) e Carasek *et al.* (2018), os quais obtiveram, respectivamente, diferenças de massa específica de 3,83%, 6,10% e 1,46% entre a areia natural e a areia reciclada mista.

Essa menor massa específica da areia reciclada, em relação à areia natural, foi atribuída a resquícios de argamassa e pasta aderida a superfície dos grãos da areia reciclada (BUYLE-BODIN e HADJIEVA-ZAHARIEVA, 2002; EVANGELISTA e DE BRITO, 2011). Esses resquícios de argamassa e pasta podem ser observados nas imagens das frações da areia reciclada obtidas pelo microscópio estereoscópio (Quadro 4.2).

Em relação ao teor de finos, a areia reciclada apresentou um valor superior à areia natural. O teor de 9% de finos existentes na areia reciclada é aproximadamente seis vezes maior que o valor presente na areia natural (1,58%). Essa diferença no teor de finos é verificada nas imagens das diferentes frações da areia reciclada obtidas pelo MEV (Quadro 4.1).

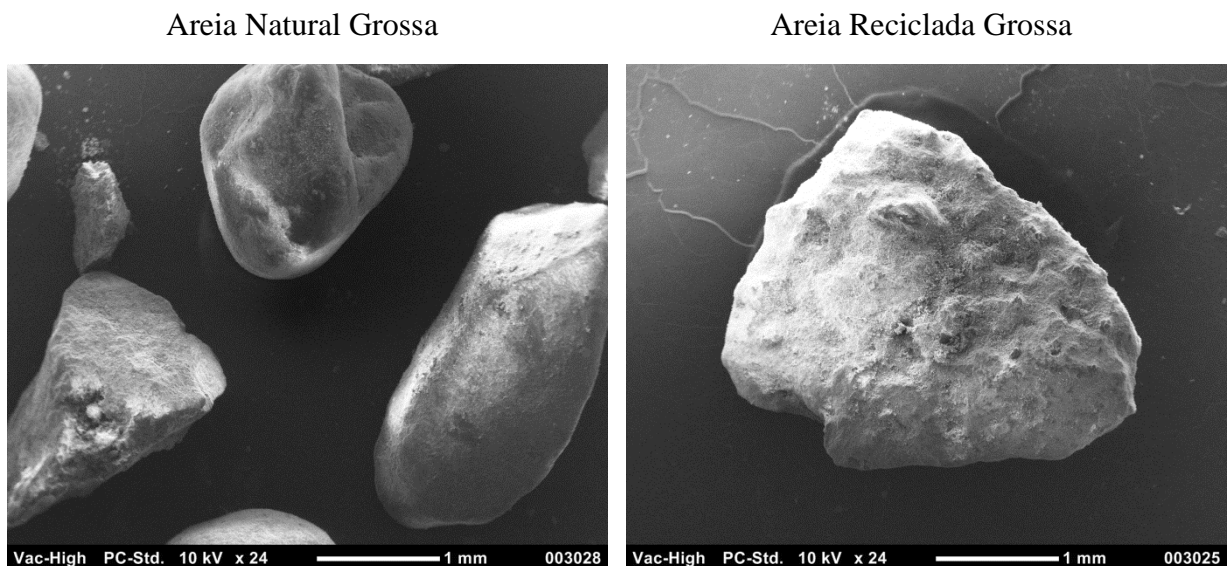
O maior teor de finos da areia reciclada ocorre devido ao processo de esmagamento da pasta de cimento durante o processo de britagem na sua produção (MESBAHU E BUYLE-BODIN, 1999).

Nota-se ainda na Tabela 3.3 que a areia reciclada apresentou uma absorção de água cerca de 12 vezes superior à areia natural. Enquanto a areia natural apresentou uma absorção de apenas 0,44%, a areia reciclada atingiu o valor de 5,48%. Essa maior absorção da areia reciclada é atribuída à porosidade do agregado reciclado (SOLYMAN, 2005), como pode ser observado nas imagens obtidas pelo microscópio estereoscópio apresentadas no Quadro 4.2.

Dessa foram, verifica-se que a areia reciclada está em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 15166:2004 em relação ao teor de finos e à absorção de água. O teor de finos (%) apresentado pela areia reciclada é inferior aos limites de 15% e 20% estabelecidos pela norma, respectivamente, para agregados de resíduos de concreto e agregados de resíduos mistos. Da mesma forma, a absorção de água (%) obtida pela areia reciclada foi inferior aos limites de 15% e de 17% estabelecidos pela norma, respectivamente, para agregados de resíduos de concreto e de resíduos mistos.

Em relação à análise visual qualitativa das areias, as imagens das diferentes frações da areia natural e da areia reciclada obtidas por meio do MEV são apresentadas no Quadro 4.1.

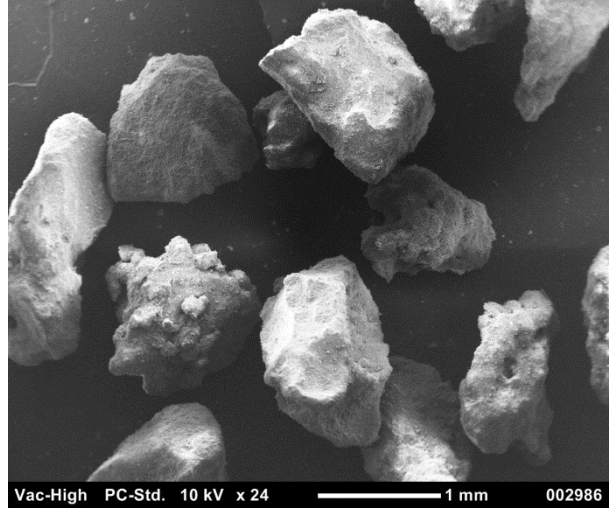
Quadro 4.1 - Imagens obtidas por MEV das areias Natural e Reciclada, separadas em frações granulométricas por peneiramento mecânico.



Areia Natural Média Grossa



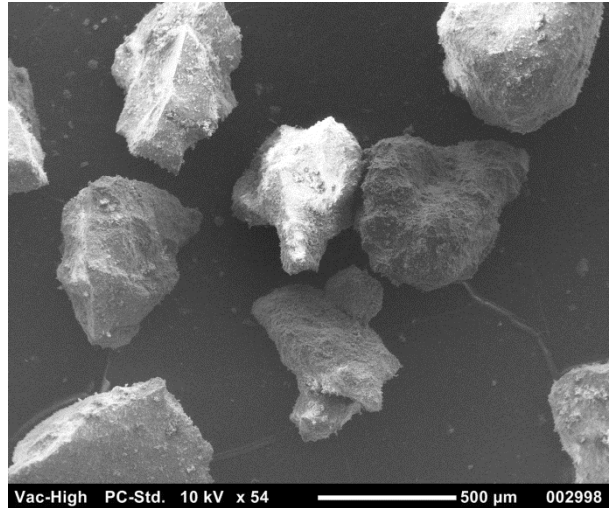
Areia Reciclada Média Grossa



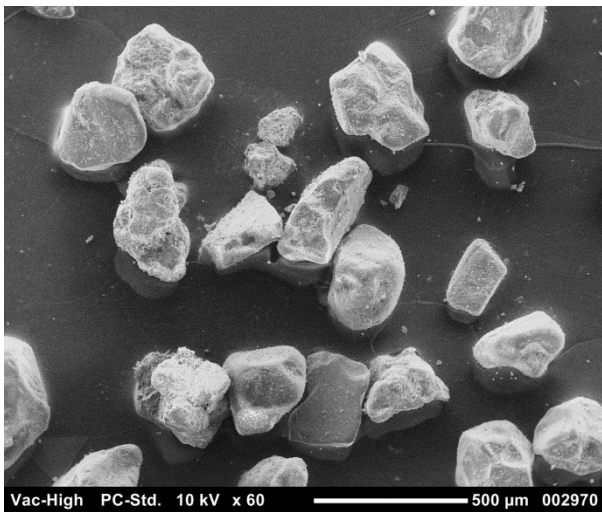
Areia Natural Média Fina



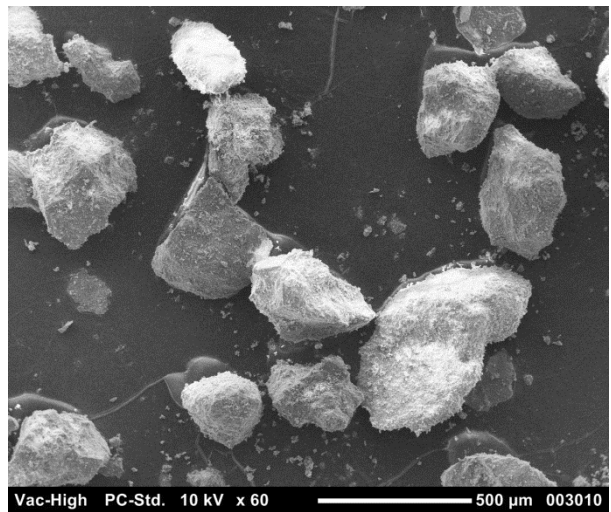
Areia Reciclada Média Fina



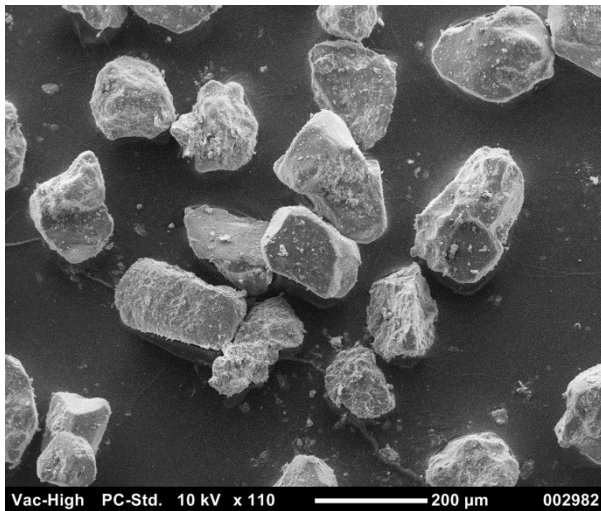
Areia Natural Fina



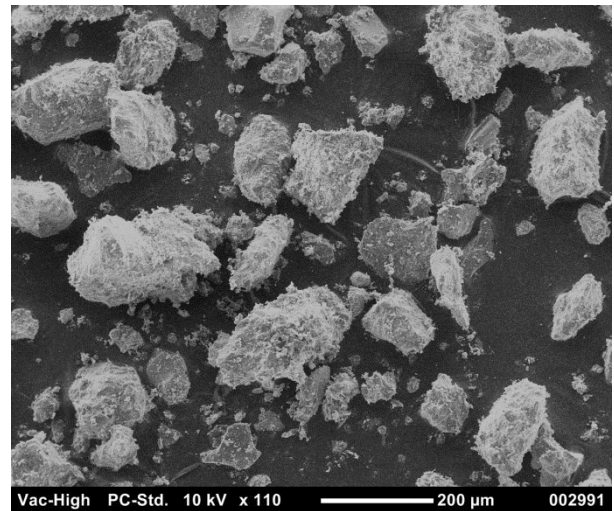
Areia Reciclada Fina



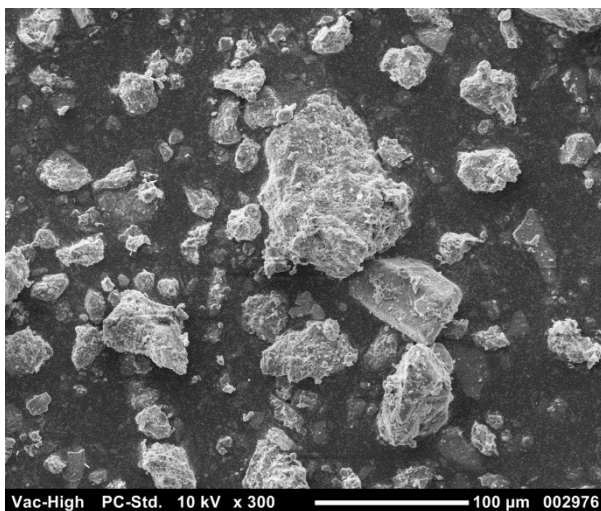
Material Fino Natural



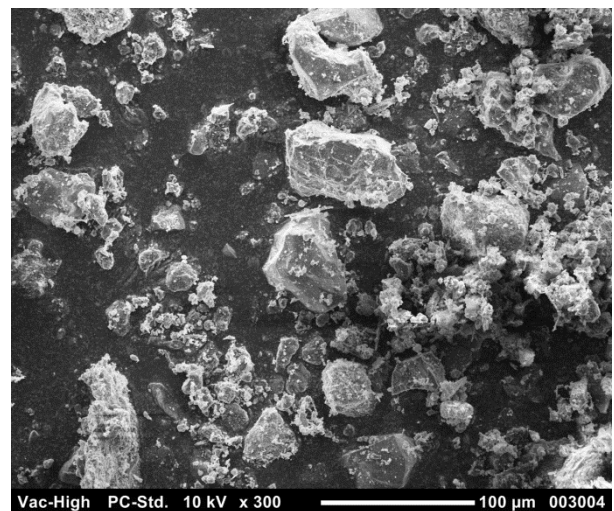
Material Fino Reciclado



Material Pulverulento Natural



Material Pulverulento Reciclado



As imagens obtidas pelo MEV apresentadas no Quadro 4.1 evidenciam a diferença de forma e textura das areias utilizadas na elaboração das argamassas. Os grãos da areia reciclada apresentam forma angular e superfície rugosa, assim como verificado por Solyman (2005) na avaliação de 12 tipos diferentes de areias recicladas. Enquanto os grãos de areia natural são arredondados e com superfície lisa. Essa diferença fica evidente nas imagens das frações grossa, média grossa e média fina. Nas frações fina, material fino e material pulverulento essa diferença é atenuada.

Nas imagens obtidas pelo MEV observa-se ainda a maior presença de material pulverulento nas frações da areia reciclada se comparadas às frações da areia natural.

Já a análise morfoscópica dos agregados baseada na ABNT NBR 7389-1:2009 foi realizada com a utilização de um microscópio estereoscópio para se registrar as imagens dos agregados, imagens as quais são apresentadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Imagens obtidas por microscópio estereoscópico das areias Natural e Reciclada, separadas em frações granulométricas

Areia Natural Completa



Areia Natural Grossa



Areia Natural Grossa – Zoom de 19,6x



Areia Natural Média Grossa



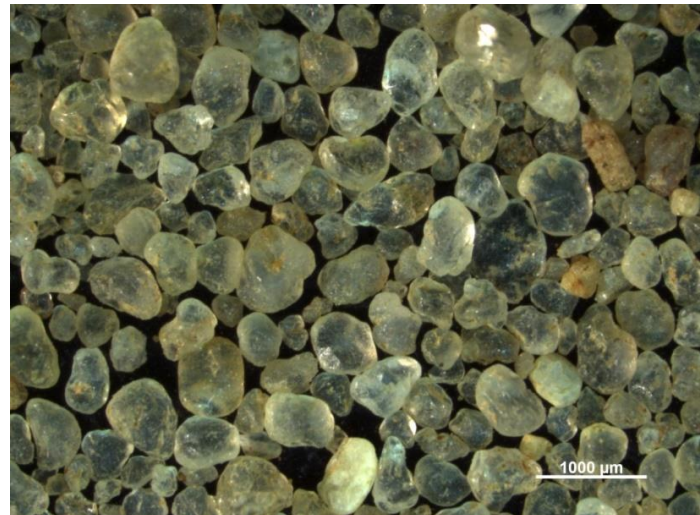
Areia Natural Média Grossa – Zoom de 22x



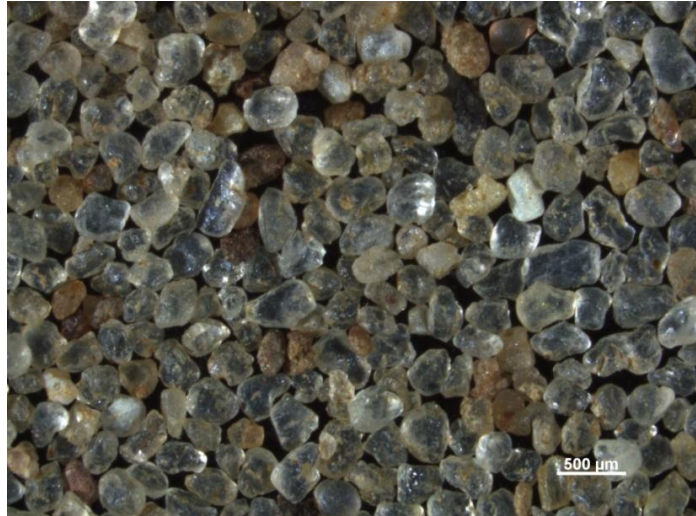
Areia Natural Média Fina



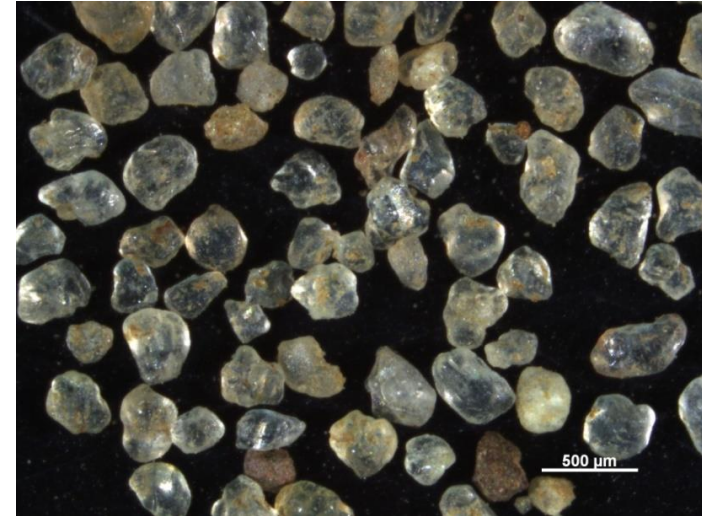
Areia Natural Média Fina – Zoom de 29x



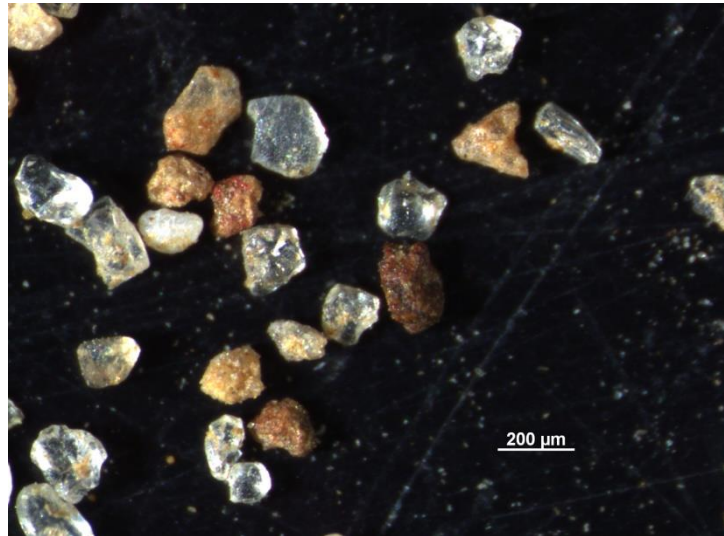
Areia Natural Fina



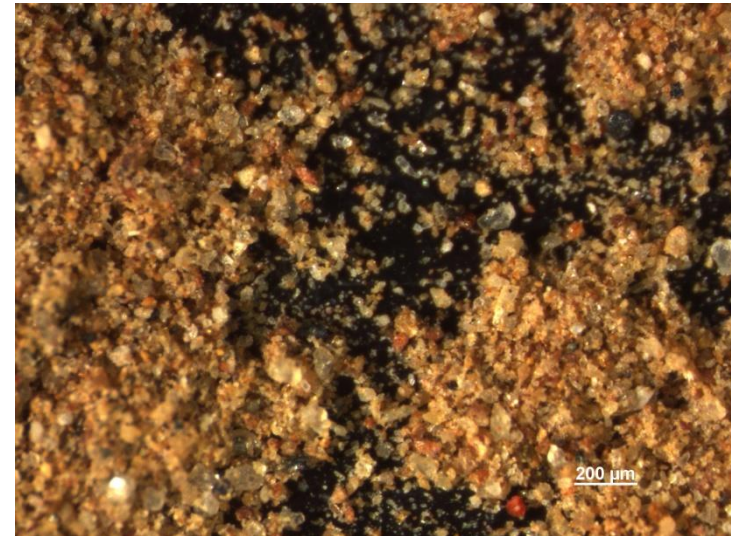
Areia Natural Fina – Zoom de 70x



Material Fino Natural



Material Pulverulento Natural





Areia Reciclada Completa



Areia Reciclada Grossa



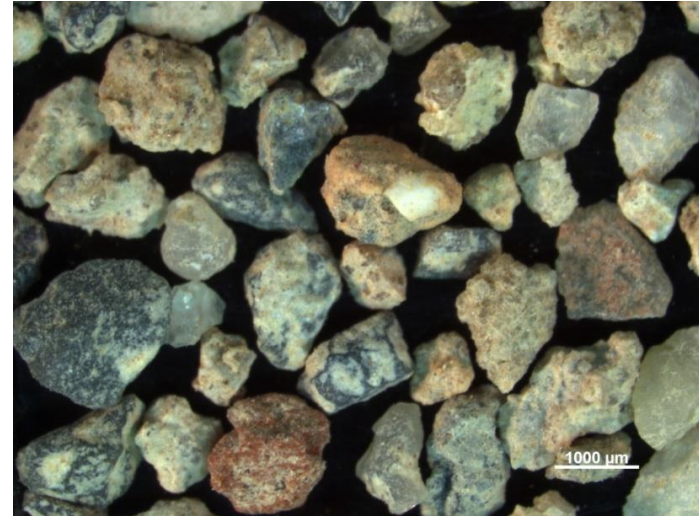
Areia Reciclada Grossa – Zoom de 19,6 x



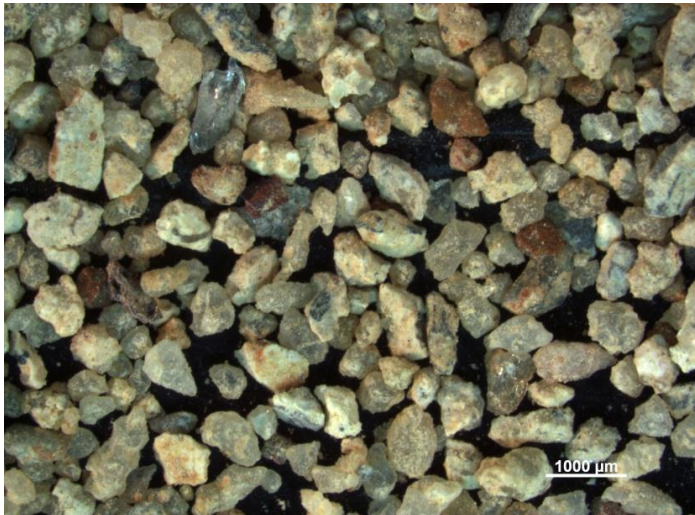
Areia Reciclada Média Grossa



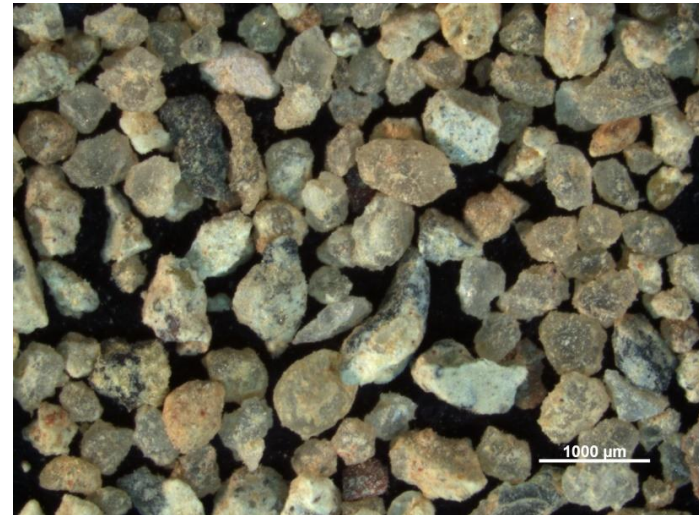
Areia Reciclada Média Grossa – Zoom de 22x



Areia Reciclada Média Fina



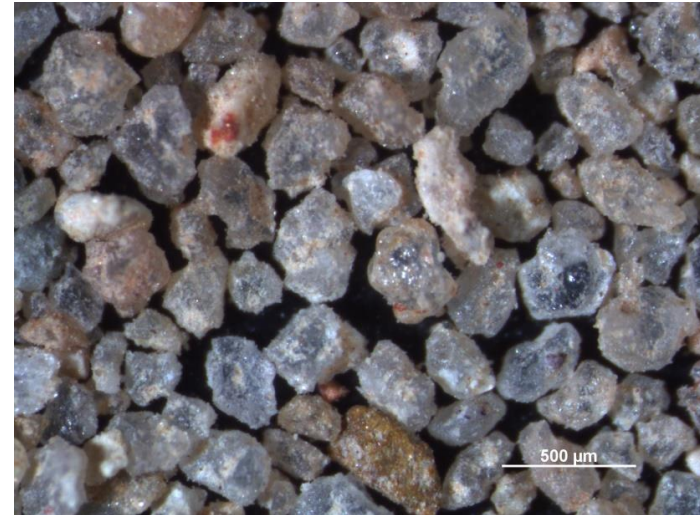
Areia Reciclada Média Fina – Zoom de 29x



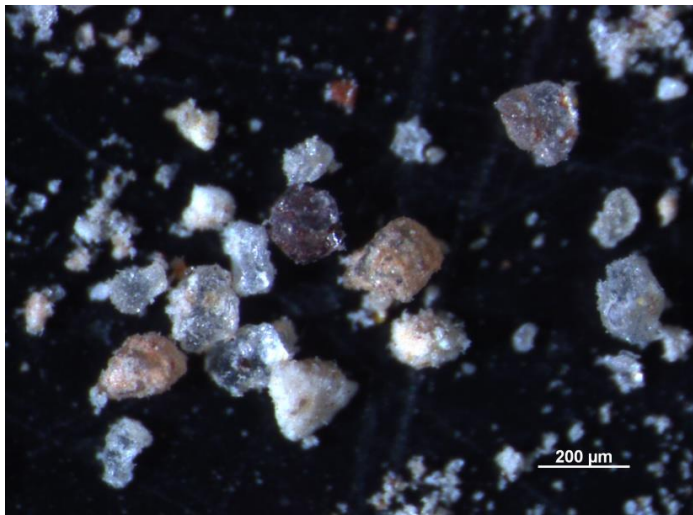
Areia Reciclada Fina



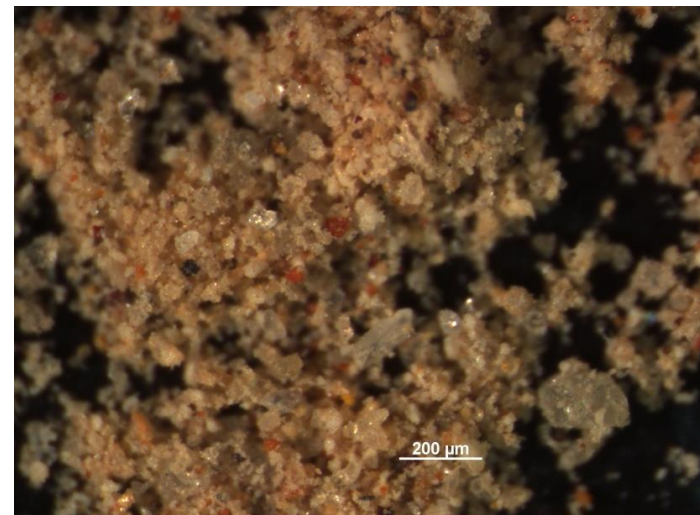
Areia Reciclada Fina – Zoom de 70x



Material Fino Reciclado



Material Pulverulento Reciclado



Observa-se nas imagens do Quadro 4.2 uma diferença no formato e textura dos agregados, assim como verificado nas imagens obtidas pelo MEV. Visualmente a areia natural apresenta-se homogênea, enquanto na areia reciclada fica evidente a heterogeneidade de sua composição.

Verifica-se também a presença de argamassa e pasta aderida na superfície dos grãos da areia reciclada, principalmente nas frações maiores, e também a maior presença de material pulverulento na areia reciclada se comparadas à areia natural, principalmente nas frações fina e material fino.

Utilizando as imagens dos agregados apresentados no Quadro 4.2, realizou-se a análise comparativa conforme a ABNT NBR 7389-1:2009. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características morfoscópias das areias

<b>Areia - Fração</b>	<b>Grau de Arredondamento</b>	<b>Grau de esfericidade</b>	<b>Superfície</b>	<b>Cor</b>
Areia Natural 1,2 mm	Arredondado (30%) e subarredondado (70%)	Alto (30%) e baixo (70%)	Polida (30%), fosca (40%) e rugosa (30%)	Amarronzada e amarelada
Areia Natural 0,6 mm	Arredondado (60%) e subarredondado (40%)	Alto (100%)	Polida (100%)	Translúcida e amarelada
Areia Natural 0,3 mm	Arredondado (60%) e subarredondado (40%)	Alto (60%) e baixo (40%)	Polida (100%)	Translúcida
Areia Natural 0,15 mm	Arredondado (40%) e subarredondado (60%)	Alto (40%) e baixo (60%)	Polida (100%)	Translúcida e amarronzada
Areia Natral 0,075 µm	Subanguloso (100%)	Alto (40%) e baixo (60%)	Polida (60%) e fosco (40%)	Amarronzada
Areia Recic. 1,2 mm	Anguloso (100%)	Baixo (100%)	Rugosa (100%), como argamassa aderida.	Acinzentada e amarronzada
Areia Recic. 0,6 mm	Anguloso (100%)	Alto (20%) e baixo (80%)	Rugosa (100%), como argamassa aderida.	Acinzentada e amarronzada
Areia Recic. 0,3 mm	Anguloso (100%)	Alto (40%) e baixo (60%)	Rugosa (100%), como argamassa aderida.	Acinzentada e amarronzada
Areia Recic. 0,15 mm	Anguloso (100%)	Alto (60%) e baixo (40%)	Rugosa (100%)	Acinzentada e amarronzada
Areia Recic. 0,075µm	Anguloso (100%)	Alto (60%) e baixo (40%)	Rugosa (100%)	Amarronzada

Com análise comparativa, observa-se que a areia natural apresentou forma arredondada e subarredondada e superfície polida, com exceção da fração de 0,075  $\mu\text{m}$ , a qual apresentou forma subangular e superfície polida. Já a areia reciclada apresentou forma angulosa e superfície rugosa. Essa maior angulosidade e irregularidade do agregado reciclado deve-se ao processo de britagem do resíduos de construção civil (SOLYMAN, 2005).

Comparando-se as diferentes frações da mesma areia, nota-se que na areia natural ocorreu uma redução, tanto no grau de arredondamento como no grau de esfericidade com a redução da dimensão das frações a partir dos 0,6 mm. Já a fração de 1,2 mm apresentou um menor grau de arredondamento e esfericidade que as frações com 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm.

Na areia reciclada observa-se que a forma angular se manteve em todas as frações e o grau de esfericidade elevou-se com a redução da dimensão dos grãos. O menor grau de arredondamento e de esfericidade da areia reciclada pode gerar a necessidade de uma maior quantidade de pasta se comparada à areia natural, a qual se apresentou arredondada e lisa. Pois, segundo Metha e Monteiro (2014), as partículas lisas e arredondadas necessitam de menos pasta se comparadas às partículas angulares e asperas.

No que se refere à avaliação da presença de contaminantes nas areias, foram avaliados os teores de cloretos, de sulfatos e de argila nos agregados. Os resultados dessa avaliação são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Teor de Contaminantes

<b>Propriedades</b>	<b>Areia natural</b>	<b>Propriedades</b>	<b>Areia reciclada</b>	<b>Limites*</b>
Cloretos (%)	0,00015%	Cloretos (%)	0,00010%	1,0%
Sulfatos (%)	0,00019%	Sulfatos (%)	0,01030%	1,0%
Teor de argila (%)	6,93%	Teor de argila (%)	5,13%	2,0%

\*- Limites estabelecidos com base na ABNT NBR 15116:2004

Os resultados demonstram a presença de baixos teores de cloretos e sulfatos, tanto na areia natural como na areia reciclada. O teor presente na areia reciclada é inferior aos teores máximos de 1% para cloretos e para sulfatos estabelecidos para uso em concretos sem função estrutural conforme a ABNT NBR 15116:2004.

O teor de argila da areia reciclada foi superior ao limite de 2%, determinado pela ABNT NBR 15116:2004. Para essa pesquisa, apesar de não existir limites normativos para as

argamassas estabilizadas, o teor de argila presente no agregado reciclado não foi considerado fator impeditivo para produção de argamassas.

## 4.2. Etapa 2 – Avaliação das Argamassas Estabilizadas

Nesta etapa, inicialmente foram definidos os traços da argamassa referência (ANN - 100% de areia natural) e das argamassas com diferentes teores de substituições parciais (teores de 25%, 50%, e 75%) e total (100%) da areia natural pela areia reciclada.

Os ajustes na água, devido à substituição da areia natural pela areia reciclada, foram realizados levando em consideração a água de compensação e a mesma faixa de trabalhabilidade, estabelecida por meio do ensaio de penetração de cone. Como apresentado na metodologia, essa faixa de trabalhabilidade foi definida em  $(75 \pm 5)$  mm de penetração.

A quantidade de água de compensação utilizada em cada uma das argamassas com agregado reciclado é apresentada no Apêndice B.

Com a substituição da areia natural pela areia reciclada ocorreu um aumento da quantidade de água necessária para se atingir a faixa de trabalhabilidade predeterminada. Esse aumento pode ser observado nos traços unitários apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Traços unitários em massa e em volume absoluto

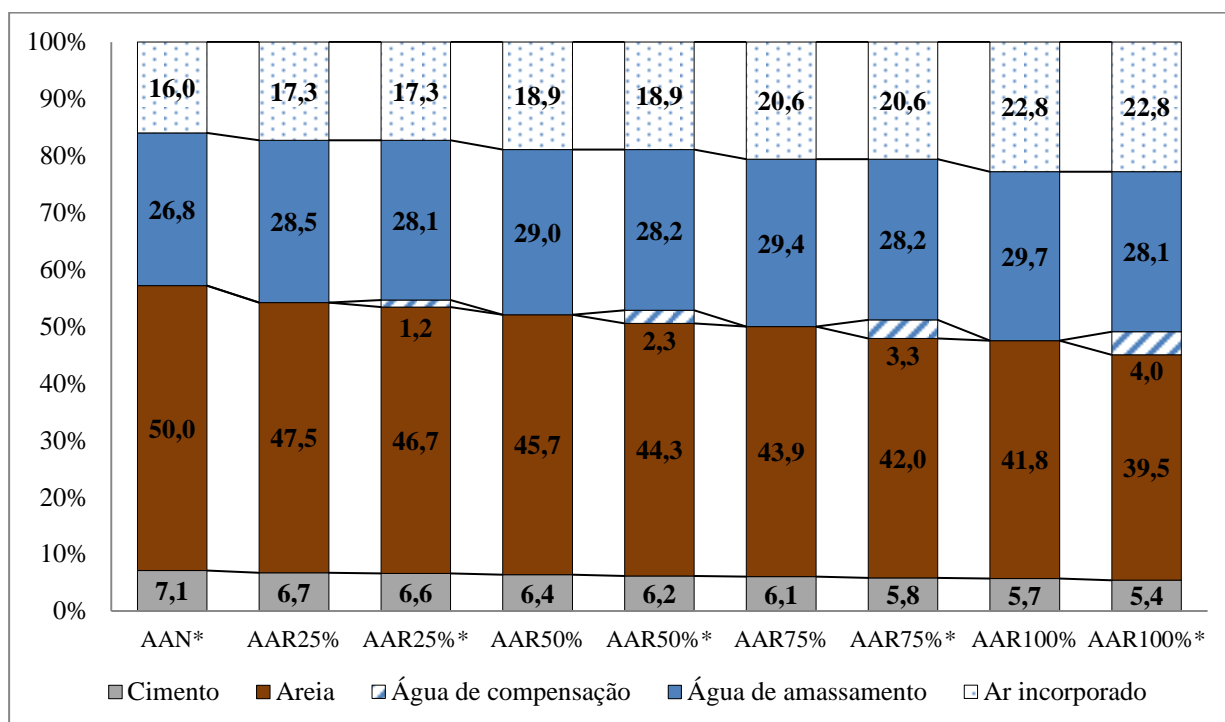
<b>Argamassa</b>	<b>Traço unitário em massa (c : an : ar : a/c)*</b>	<b>Traço unitário em volume absoluto (c : an : ar : a/c)*</b>
AAN	1 : 6,0 : 0,0 : 1,2	1 : 7,0 : 0,0 : 1,2
AAR25%	1 : 4,5 : 1,5 : 1,4	1 : 5,3 : 1,8 : 1,4
AAR50%	1 : 3,0 : 3,0 : 1,6	1 : 3,5 : 3,7 : 1,6
AAR75%	1 : 1,5 : 4,5 : 1,7	1 : 1,8 : 5,5 : 1,7
AAR100%	1 : 0,0 : 6,0 : 1,9	1 : 0,0 : 7,3 : 1,9

\*- (cimento : areia natural : areia reciclada : a/c)\*

Essa maior demanda de água para a mesma trabalhabilidade deve-se às características da areia reciclada, como maior angulosidade, maior teor de finos e maior absorção de água se comparada à areia natural.

A representação das composições das argamassas em volume, com e sem a água de compensação, apresentadas Figura 4.1 evidenciam esse aumento da quantidade de água.

Figura 4.1 - Composição das argamassas, sem e com a água de compensação, em volume



(\*) – Composições com o volume de água de compensação.

Observa-se na Figura 4.1 uma diferença nos volumes de água entre as representações devido à água de compensação. A representação com a água de compensação foi utilizada para a elaboração das argamassas com o intuito de evitar a perda de trabalhabilidade devido à absorção de água pelos agregados. Já para a análise dos dados foi considerada a representação sem a água de compensação, visto que essa parte da água potencialmente seria absorvida pelos agregados durante a preparação das argamassas com agregado reciclado.

Analisando as representações da composição das argamassas sem água de compensação na Figura 4.1, observa-se, em relação à argamassa de referência (AAN), uma redução do teor de areia e do teor de cimento com o aumento dos teores de substituição das areias. Concomitantemente verifica-se o aumento dos teores de água e de ar incorporado. Os consumos dos materiais e as variações desses consumos nas argamassas frescas são apresentados na Tabela 4.4 e a variação do ar incorporado na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Consumo de cada componente das argamassas frescas e variação dos consumos em relação aos componentes da AAN fresca, em. volume.

Argamassas	Cimento (dm <sup>3</sup> )	Var. do Cim.	Areia (dm <sup>3</sup> )	Var. da Areia	Água de amassam. (dm <sup>3</sup> )	Var. água de amassam.	AEH (%)	Var. do AEH	IAR (%)	Var. do IAR
AAN	71,4	-	500,3	-	268,4	-	0,4	-	0,2	-
AAR25%	67	-6,2%	475,1	-5,0%	285,3	+6,3%	0,4	0,0%	0,2	0,0%
AAR50%	63,6	-10,9%	456,5	-8,8%	290,7	+8,3%	0,7	+75,0%	0,2	0,0%
AAR75%	60,5	-15,3%	439,3	-12,2%	294,3	+9,6%	0,8	+100,0%	0,2	0,0%
AAR100%	57	-20,2%	418,2	-16,4%	297,1	+10,7%	1,0	+150,0%	0,2	0,0%

Var. – Variação, Cim. – cimento, Amassam. – Amassamento

Tabela 4.5 - Variação do ar incorporado em relação aos componentes da AAN fresca, em. volume.

Argamassa	Volume de ar incorporado (dm <sup>3</sup> )	Variação do ar incorporado
AAN	159,9	-
AAR25%	172,6	+7,9%
AAR50%	189,2	+18,3%
AAR75%	205,9	+28,8%
AAR100%	227,7	+42,4%

As reduções do consumo de areia e do consumo de cimento devem-se tanto ao aumento do volume de água necessário para a produção das argamassas com agregado reciclado, assim como ao aumento do teor de ar incorporado.

Em consequência ao aumento do teor de água nos traços e as reduções do teor de areia e do consumo de cimento, ocorreram os aumentos das relações água/materiais secos (a/ms) e água/cimento (a/c) em relação a AAN, como pode ser observado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Relação água/materiais seco (a/ms) e relação água/cimento (a/c)

Argamassa	Relação a/ms	Variação da relação a/ms*	Relação a/c	Variação da relação a/c*
AAN	0,47	-	1,21	-
AAR25%	0,53	+12,8%	1,39	+14,9%
AAR50%	0,57	+21,3%	1,50	+24,0%
AAR75%	0,61	+29,8%	1,62	+33,9%
AAR100%	0,65	+38,3%	1,75	+44,6%

\*- Variações em relação à AAN.



Observa-se que concomitante ao aumento dos teores de substituição das areias, ocorreram os aumentos da relação a/ms e da relação a/c. Os aumentos da relação a/ms, em relação ao obtido pela AAN, variaram entre 12,8% para a AAR25% a 38,3% para a AAR100%. Essa diferença demonstra que a substituição da areia natural pela areia reciclada gera uma maior demanda de água nos traços das argamassas, como também foi apresentado na Figura 4.1 e na Tabela 4.4.

Da mesma forma, a relação a/c apresentou aumento com o incremento do teor de substituição. Esse aumento da relação a/c foi ocasionado pelo aumento do teor de água e a redução do consumo de cimento apresentados na Figura 4.1 e na Tabela 4.4.

Apesar do teor de aditivo incorporador de ar ter sido fixado em 0,2% para todas as argamassas, observa-se um aumento do teor de ar incorporado (Tabela 4.5) com a elevação do teor de substituição das areias.

Igual intensificação da incorporação de ar nas argamassas foi verificada por Oliveira (2017) e atribuído à associação dos aditivos IAR e AEH. Utilizando a mesma metodologia de mistura e metodologia para determinação do teor de ar empregada nesse trabalho, Oliveira (2017) obteve um teor de ar incorporado de 18% numa argamassa com areia natural (traço 1:6, em massa) para a combinação de 0,2% de IAR e 0,4% de AEH. Já com o aumento do teor de AEH para 0,95% e a manutenção do teor de AIR, o teor de ar incorporado subiu para 22%. Dessa forma, o aumento do teor de AEH, como exposto na Tabela 3.8, deve ter provocado o aumento da incorporação de ar identificado.

Além disso, Rixon e Mailvagana (1999) afirmam que pode ocorrer um aumento na incorporação de ar devido ao aumento da relação a/c das pastas de cimento. Nesse sentido, o aumento do teor de ar incorporado pode ser atribuído ao aumento da relação a/c das argamassas.

A mudança nos teores de água e a variação de ar incorporado, motivados pelo aumento do teor de substituição das areias, ocasionaram modificações na massa específica e na consistência das argamassas.

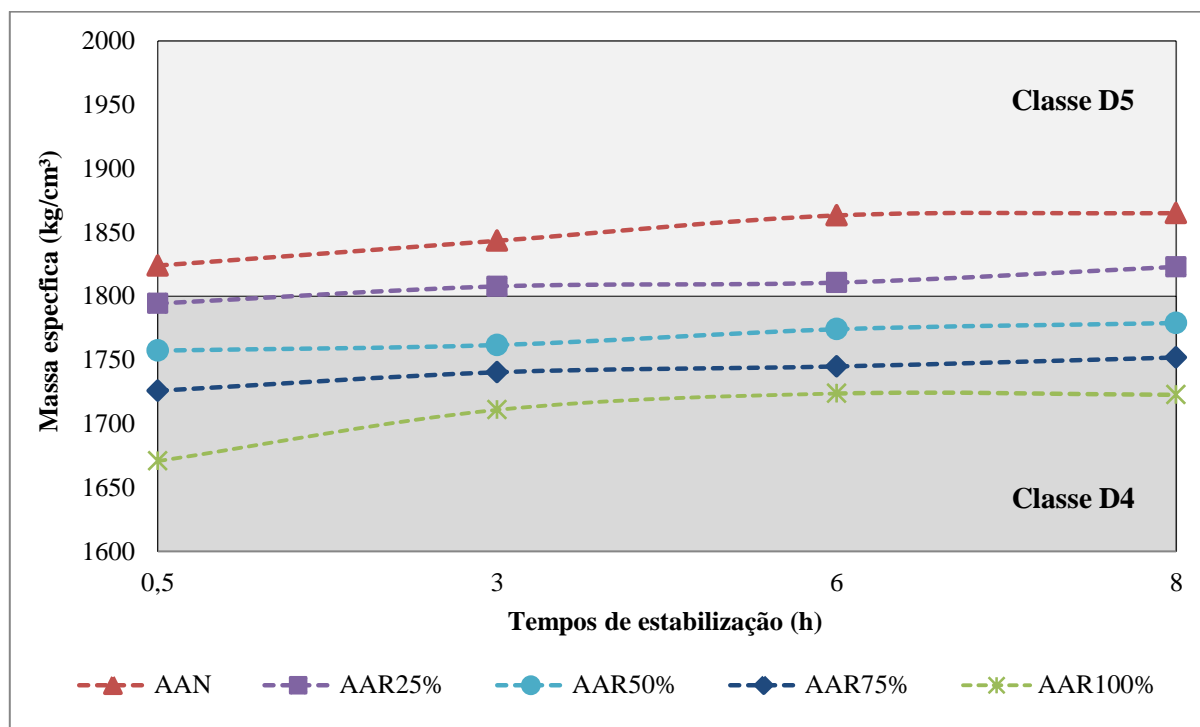
#### **4.2.1. Estado Fresco**

##### ***4.2.1.1. Massa Específica no Estado Fresco e Teor de Ar Incorporado***

Nas Figura 4.2 e Figura 4.3 são apresentados os resultados dos ensaios de determinação da massa específica no estado fresco e determinação do teor de ar incorporado nos tempos de

estabilização. No gráfico da Figura 4.2 são identificadas as classes D5 (faixa superior) e D4 (faixa inferior) da ABNT NBR 13281:2005 em relação à massa específica no estado fresco. Essas duas classes abrangeram as classificações em que as cinco argamassas se enquadraram.

Figura 4.2 – Variação da massa específica das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização



Observa-se que as massas específicas das argamassas reduziram gradativamente com o aumento do teor de substituição das areias. Esse comportamento ocorreu devido às mudanças no traço, as quais ocasionaram a redução do consumo de cimento e o aumento dos teores de água e de ar incorporado, como apresentado na Tabela 4.5, e à menor massa específica do agregado reciclado em relação ao agregado natural. Ressalta-se que a redução da massa específica das argamassas com agregado reciclado também foi identificado por Carasek *et al.* (2018) com a utilização de teores de 100% agregados reciclados, Ledesma *et al.* (2016) com a utilização de teores de substituição superiores à 50% e Jiménez *et al.* (2013) para teores de substituição superiores à 25%.

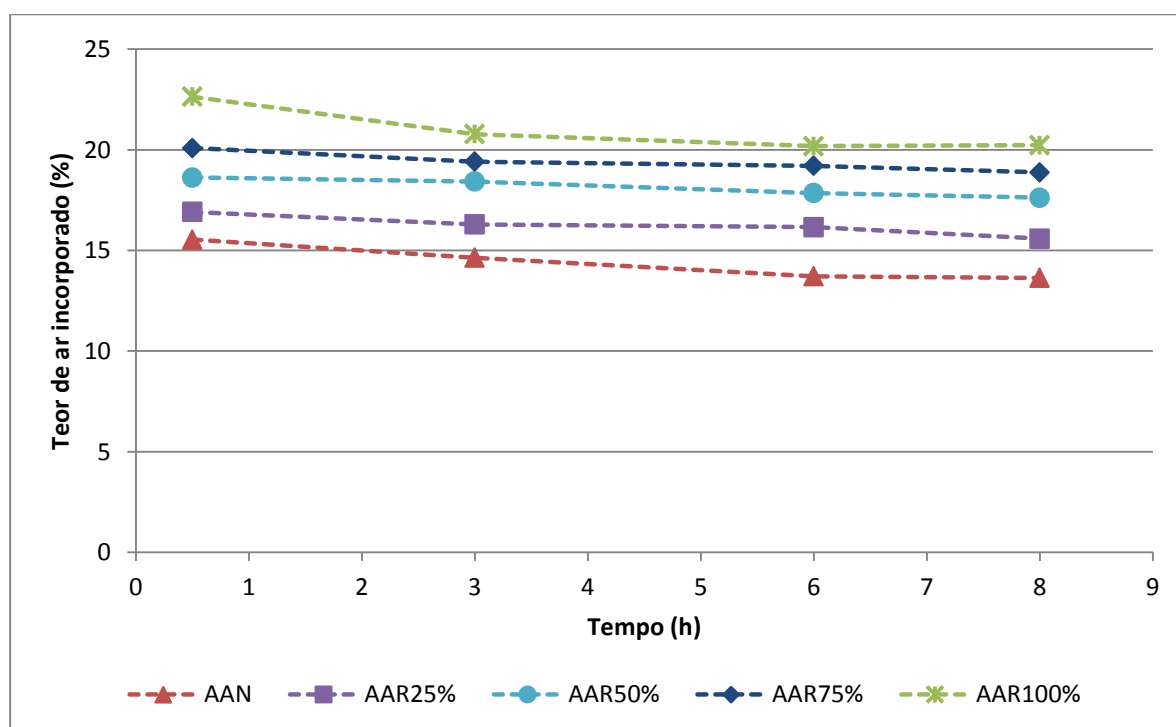
Dessa forma, a AAN e a AAR25% se enquadraram na classe D5, por apresentarem as maiores massas específicas entre as cinco argamassas. Já as AAR50%, AAR75% e AAR100% se enquadraram na classe D4, apresentando assim massas específicas menores se comparadas à AAN e à AAR25%.

A mesma classificação da AAN e da AAR25% demonstra uma semelhança entre essas argamassas apesar da substituição de 25% da areia natural pela areia reciclada ter ocasionado o aumento do teor de ar incorporado.

As argamassas hidráulicas e mistas com a utilização de teores de substituição de 30% e 60% analisadas por Pimentel *et al.* (2018) se classificaram na classe D5 assim como a ANN e a AAR25%.

Observa-se ainda que ocorreu um aumento da massa específica com o aumento dos tempos de estabilização. Esse aumento foi inversamente proporcional à redução do teor de ar incorporado como apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Variação do teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização

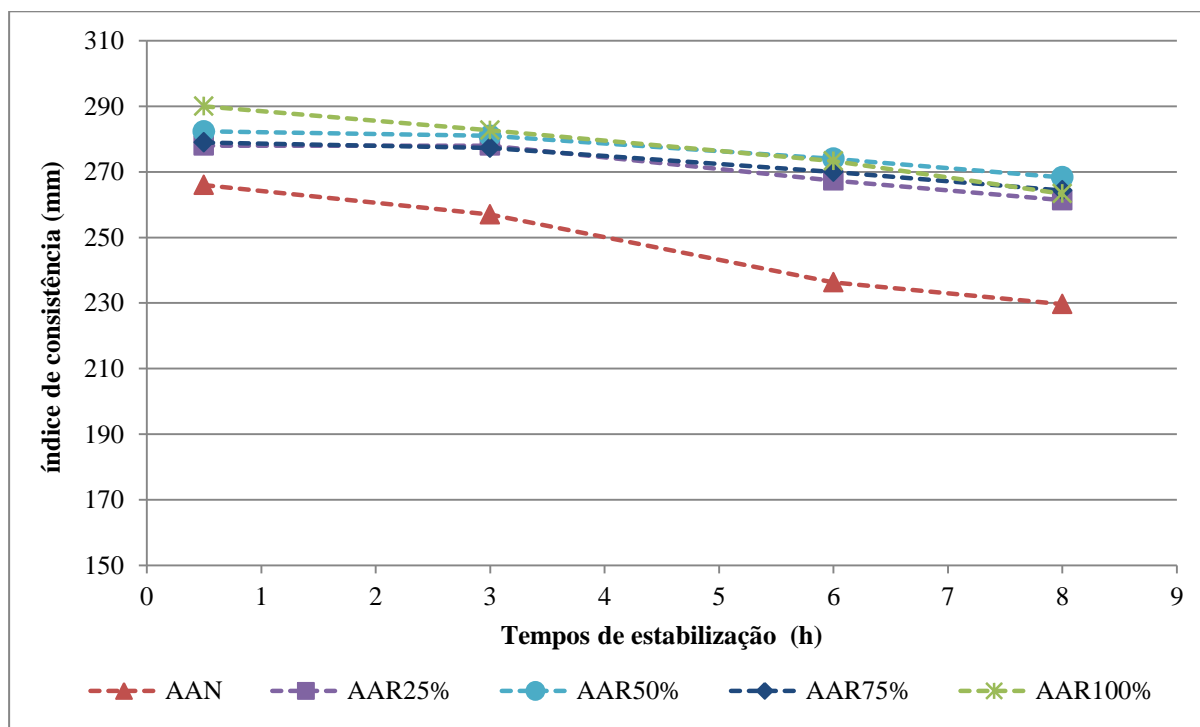


Nota-se o aumento do teor de ar incorporado com o aumento do teor de substituição das areias. Esse aumento está associado ao efeito causado pela combinação dos aditivos AIR e AEH (OLIVEIRA, 2017) e ao aumento da relação a/c (RIXON e MAILVAGANA, 1999). Além disso, as diferenças dos teores de ar incorporado entre as argamassas se mantiveram apesar da pequena redução do teor de ar incorporado com o aumento dos tempos de estabilização.

#### 4.2.1.2. Índice de Consistência

Na Figura 4.4 são apresentados os valores de índice de consistências das diferentes argamassas nos tempos de estabilização.

Figura 4.4 – Variação do índice de consistência das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização



Observa-se na Figura 4.4 que as argamassas com agregado reciclado apresentaram comportamentos semelhantes entre si, com valores de espalhamento maiores que os obtidos pela AAN. Dessa forma, pode-se afirmar que a ANN apresentou uma maior consistência em relação às argamassas com agregado reciclado, apesar dos valores iniciais e finais (8 horas) de penetração de cone terem sido fixados, respectivamente, em  $(75 \pm 5)$  mm e  $(55 \pm 5)$  mm

A maior quantidade de água nos traços com areia reciclada, assim como o maior teor de ar incorporado contribuíram para os maiores valores de espalhamento obtidos pelas argamassas com areia reciclada.

Porém, diferente do esperado devido ao aumento do teor de água e de ar incorporado nas argamassas com o incremento dos teores de substituição, não houve uma diferença de espalhamento entre as argamassas com diferentes teores de areia reciclada.

Além disso, as cinco argamassas apresentaram redução no índice de consistência com o aumento dos tempos de estabilização, demonstrando assim um ganho de consistência. Essas reduções de espalhamento das argamassas são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Avaliação da redução do índice de consistência nos tempos de estabilização

Argamassa	Índice de consistência (mm)		Redução da Penetração de cone (mm)	Variação
	0,5h	8h		
AAN	266	230	36	-14,0%
AAR25%	278	261	17	-6,0%
AAR50%	282	268	14	-5,0%
AAR75%	279	264	15	-5,0%
AAR100%	290	263	27	-9,0%

Observa-se que a ANN apresentou a maior redução de espalhamento, 14%, representando um maior ganho de consistência. As argamassas AAR25%, AAR50% e AAR75% apresentaram as menores reduções, variando entre 5% e 6%. Já a AAR100% atingiu uma redução de 9%.

Isso demonstra que a estabilização das argamassas acarretou modificações quanto à consistência das argamassas em intensidades diferentes, porém as variações não seguiram uma correlação como o teor de aditivo AEH ou com os teores de substituição.

#### 4.2.1.3. Penetração de Cone

A Tabela 4.8 apresenta o ganho inicial de consistência das argamassas estabilizadas. Esse ganho foi analisado com a realização do ensaio de penetração de cone logo após a produção das argamassas e meia hora após a produção.

Tabela 4.8 – Modificação inicial da consistência das argamassas

Argamassa	Penetração de cone (mm)		Redução da Penetração de cone (mm)	Variação
	0h	0,5h		
AAN	71	61	10	-14,0%
AAR25%	74	67	7	-9,0%
AAR50%	78	68	10	-13,0%
AAR75%	77	66	11	-14,0%
AAR100%	78	66	12	-15,0%

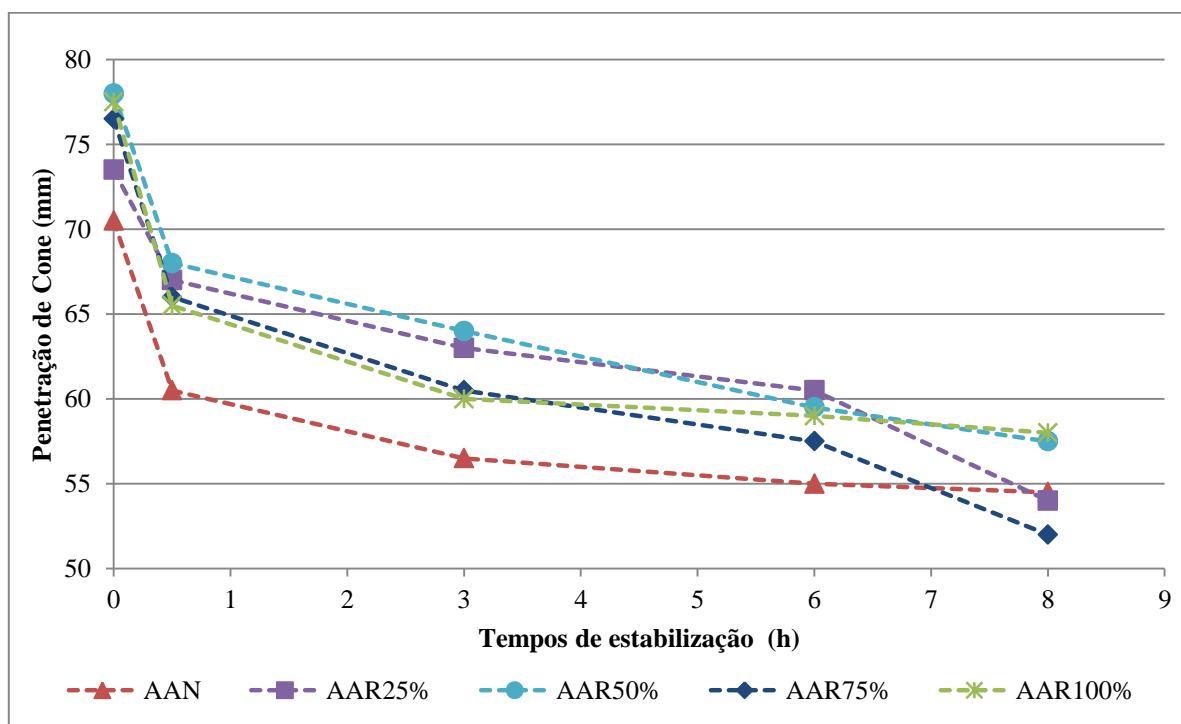
Partindo de valores iniciais de penetração de cone na faixa de  $75 \pm 5$  mm. Observa-se que todas as cinco argamassas apresentaram uma redução na penetração de cone, o que representa um ganho inicial de consistência na primeira meia hora após a produção das argamassas. As reduções de profundidade de penetração de cone variaram de 9% para AAR25% a 15% para AAR100%. Apesar da variação detectada, considera-se que todas as argamassas avaliadas apresentaram valores de penetração de cone próximos, visto que partiram de uma faixa inicial predeterminada e atingiram um intervalo final com amplitude inferior.

O ganho de consistência nessa primeira meia hora é consideravelmente maior se comparada aos ganhos que ocorreram nos demais tempos de estabilização, como pode ser observado pela maior inclinação dos trechos entre os tempos de estabilização de 0h e 0,5h na Figura 4.5.

O ganho inicial de consistência também foi constatado por Oliveira (2017) que verificou uma redução na profundidade de penetração de cone de 9 mm na primeira meia hora após a preparação da argamassa com agregado natural (traço 1:6, em massa), 0,4% de AEH e 0,2% de AIR.

Devido a esse expressivo ganho inicial de consistência, foi necessário preestabelecer na metodologia valores iniciais de penetração de cone na faixa de  $75 \pm 5$  mm.

Figura 4.5 – Variação da penetração de cone das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização



Assim como ocorreu no índice de consistência, verifica-se na Figura 4.5 que a AAN apresentou uma maior consistência, como é indicado pelos menores valores de penetração de cone, se comparada às argamassas com areia reciclada.

Também nota-se que as argamassas com agregado reciclado apresentaram um comportamento semelhante até a 0,5h. No tempo de 3h, as AAR25% e AAR50% apresentaram valores de penetração de cone maiores que as AAR75% e AAR100%. No tempo de 6h, a AAR100% se aproxima das AAR25% e AAR50%, enquanto a AAR75% mantém uma menor penetração de cone se comparada às demais argamassas com agregado reciclado. No tempo final de 8h as AAR50% e AAR100% apresentaram os maiores valores de penetração de cone, a AAR25% reduz os seus valores de penetração e se aproxima da AAN e AAR75% apresentou a menor penetração de cone entre as cinco argamassas.

Além disso, observa-se que as cinco argamassas reduziram suas penetrações de cone com o aumento dos tempos de estabilização, o que representa um ganho de consistência das argamassas. Os valores de redução de penetração de cone ao final do tempo de estabilização são apresentados Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Redução da penetração de cone

Argamassa	Penetração de cone (mm)		Redução da Penetração de cone (mm)	Variação
	0h	8h		
AAN	71	55	16	-23,0%
AAR25%	74	54	20	-27,0%
AAR50%	78	58	20	-26,0%
AAR75%	77	52	25	-32,0%
AAR100%	78	58	20	-26,0%

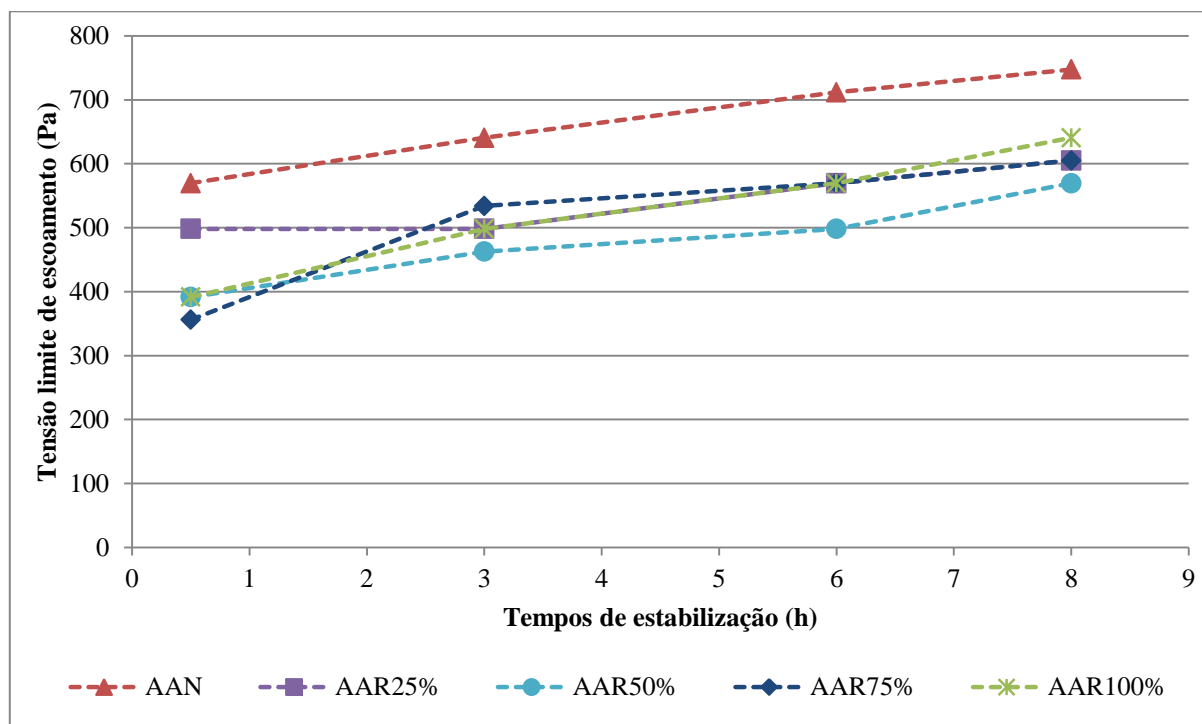
Essa maior redução da penetração de cone nas argamassas com areia reciclada, apresentada na Tabela 4.9, demonstra um menor efeito do AEH nessas argamassas. Visto que, as argamassas com agregado reciclado possuem menores consumos de cimento e maiores teores desse aditivo se comparados à ANN.

Em comparação à Oliveira (2017), as argamassas deste trabalho apresentaram menor ganho de consistência (redução de penetração de cone) no tempo de 8 horas. A autora obteve uma redução de 26 mm no ensaio de penetração de cone para uma argamassa com agregado reciclado (traço 1:6, em massa) e a combinação de 0,4% de AEH e 0,2%.

#### 4.2.1.4. Vane Test

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados do ensaio de *Vane test* das cinco argamassas nos diferentes tempos de estabilização.

Figura 4.6 – Variação do *Vane Test* das argamassas no estado fresco em relação aos tempos de estabilização



Na Figura 4.6, observa-se que a AAN apresentou valores maiores de tensão limite de escoamento se comparada às argamassas com areia reciclada, demonstrando assim apresentar uma maior consistência que as argamassas com agregado reciclado.

As argamassas com agregado reciclado apresentaram entre si comportamentos similares no estado fresco, exposta tanto nos resultados do ensaio *Vane test*, assim como no índice de espalhamento, independentemente do teor de substituição das areias, nesta pesquisa está associada à fixação dos valores de penetração de come, tanto no início como no final da estabilização das argamassas.

Além disso, as cinco argamassas apresentaram um acréscimo na tensão limite de escoamento com o aumento dos tempos de estabilização, o que representa um aumento na consistência das argamassas. Fato o qual reforça os comportamentos indicados pelas reduções de penetração de cone e de espalhamento das argamassas com o aumento dos tempos de estabilização.



#### 4.2.1.5. Índice de Retenção de Água

Apesar dos diferentes teores de substituição, as cinco argamassas apresentaram valores próximos de retenção de água e se enquadraram na mesma classe da ABNT NBR 13281:2005, como exposto na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Índice de retenção de água

<b>Argamassa</b>	<b>Retenção de água (%)</b>	<b>Classe – ABNT NBR 13281:2005</b>
AAN	66	U1 ( $\leq 78\%$ )
AAR25	60	U1 ( $\leq 78\%$ )
AAR50	61	U1 ( $\leq 78\%$ )
AAR75	61	U1 ( $\leq 78\%$ )
AAR100	64	U1 ( $\leq 78\%$ )

As cinco argamassas enquadram-se na classe U1, de acordo com a ABNT NBR 13281:2005, devido apresentarem valores de retenção de água inferiores à 78%. A mesma classificação para as cinco argamassas demonstra uma semelhança em seus comportamentos quanto à retenção de água apesar das diferenças em suas composições.

Essa semelhança, provavelmente, deve-se a um equilíbrio entre a redução do consumo de cimento e o aumento do teor de água, de ar incorporado e do teor de finos, que acontece nas argamassas dessa pesquisa em decorrência da elevação dos teores de substituição dos agregados.

De acordo com a ASTM C270:12, a qual apresenta especificações para argamassas de revestimento, os valores de retenção de água obtidos pelas argamassas são considerados baixos para argamassas de revestimento. Segundo a mesma norma, os valores mínimos de retenção de água para argamassas de revestimento devem ser superiores à 75%.

No entanto, os valores obtidos estão em conformidade com Oliveira (2017), onde a autora obteve uma retenção de água de 71% para uma argamassa com areia natural (traço 1:6, em massa) e a combinação de 0,4% de AEH e 0,2% de IAR. Já Bauer *et al.* (2015) obteve valores entre 74% e 82%.

Já Pimentel *et al.* (2018) obteve valores de retenção de água entre 91% e 97% para as argamassas hidráulicas e mistas com a utilização de teores de substituição de 30% e 60% do agregado natural pelo agregado reciclado, se enquadrando assim nas classes U4 e U5. Os

autores associam a maior retenção de água das argamassas com agregado reciclado em relação às argamassas com agregado natural à maior área específica obtida pelo aumento do teor de finos devido ao aumento do teor de substituição.

## 4.2.2. Estado Endurecido

### 4.2.2.1. Densidade no Estado Endurecido

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores de densidade das argamassas no estado endurecido e suas classificações de acordo com a ABNT NBR 13281:2005.

Tabela 4.11 – Densidade no estado endurecido

<b>Argamassa</b>	<b>Densidade média (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Classe – ABNT NBR 13281:2005</b>
AAN	1620	M5
AAR25	1581*	M4
AAR50	1522	M4
AAR75	1483	M4
AAR100	1391**	M3

\* - Valor próximo ao limite inferior da classe M5 (1600 a 2000 kg/m<sup>3</sup>).

\*\* - Valor próximo ao limite inferior da classe M4 (1400 a 1800 kg/m<sup>3</sup>).

Assim como ocorreu no estado fresco, as densidades médias das argamassas no estado endurecido reduziram com o aumento dos teores de substituição das areias. Como apresentado anteriormente, essa redução ocorreu devido aos aumentos dos teores de água (Tabela 4.4) e de teor de ar incorporado (Tabela 4.5), além da redução do teor de areia e do consumo de cimento (Tabela 4.4), assim como a menor massa específica da areia reciclada em relação à areia natural.

Os resultados obtidos por Samiei *et al.* (2015) e Pimentel *et al.* (2018) demonstram a mesma tendência de redução da densidade das argamassas no estado endurecido com o aumento do teor de substituição das areias.

Na Tabela 4.11 verifica-se que a AAN apresentou o maior valor de densidade e enquadrou-se na classe M5. A AAR25% se enquadrou na classe M4, porém, ressalta-se que o valor de 1581 kg/m<sup>3</sup> da AAR25% é próximo ao limite inferior da classe M5 (1600 a 2000 kg/m<sup>3</sup>).

As AAR50% e AA75% apresentaram valores intermediários de densidade e enquadraram-se na classe M4. Já a AAR100% apresentou o menor valor de densidade e enquadrou-se na

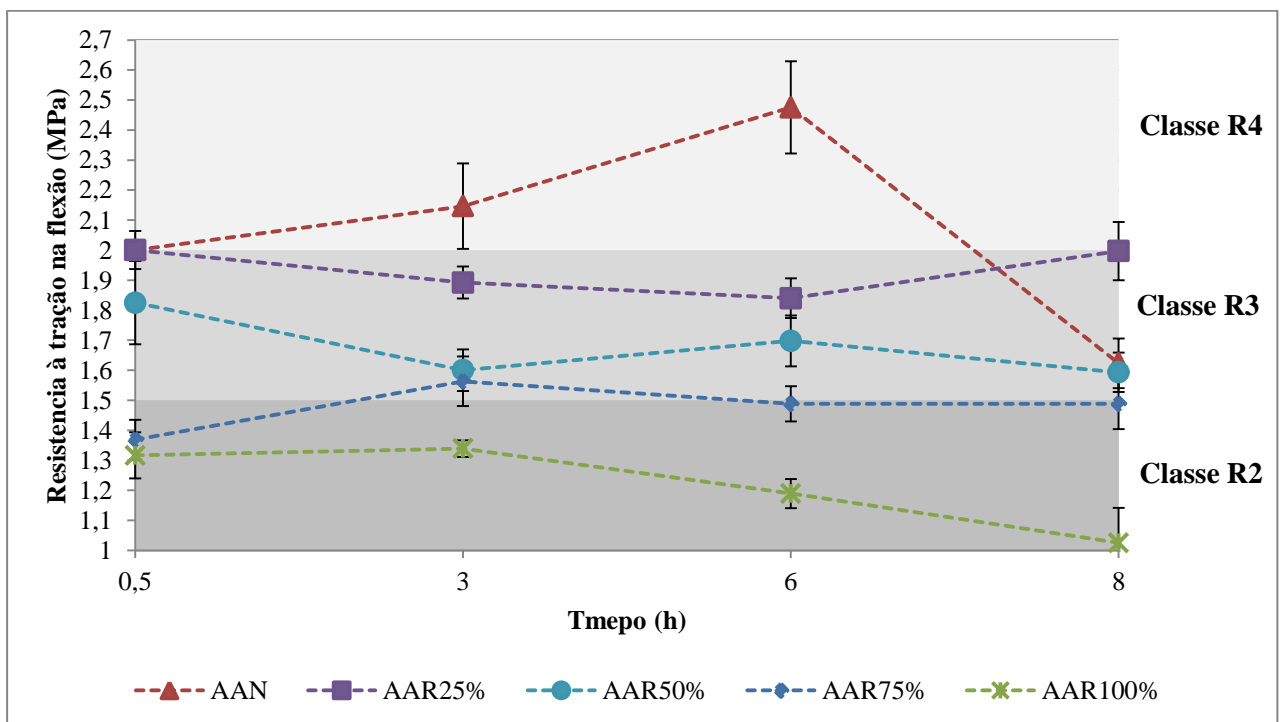
classe M3. Ressalta-se que o valor de 1391 kg/m<sup>3</sup> da AAR100% é próximo ao limite inferior da classe M4 (1400 a 1800 kg/m<sup>3</sup>).

Portanto, nota-se que o teor de 25% de substituição acarretou um comportamento semelhante ao da AAN, o que fica evidente com a proximidade da AAN25% com a classe M5. O aumento dos teores de substituição para 50%, 75% e 100% levaram as argamassas com agregado reciclado a apresentarem comportamentos diferentes ao da ANN e enquadrarem-se nas classes M4 e M3.

#### 4.2.2.2. Resistência à Tração na Flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão e suas classificações, de acordo com a ABNT NBR 13281:2005, são apresentados na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Variação da resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias em relação aos tempos de estabilização



Ocorreu uma redução gradativa da resistência à tração na flexão com o aumento dos teores de substituição das areias. Essa redução da resistência à tração na flexão deve-se ao aumento da relação a/c (Tabela 4.6), devido ao aumento do teor de água e a redução do consumo de cimento (Tabela 4.4), assim como ao aumento do teor de ar incorporado nas argamassas (Tabela 4.5).

Observa-se na Figura 4.7 que a AAN apresenta os maiores valores de resistência à tração na flexão, com exceção do valor no tempo de 8 horas de estabilização. O menor valor obtido para o tempo de 8 horas dessa argamassa, se comparado aos demais valores nos diferentes tempos de estabilização, indica uma incongruência no resultado obtido.

Com exceção do valor no tempo de 8 horas, o qual foi desconsiderado, a AAN enquadrou-se na classe R4 segundo a ABNT NBR 13281:2005.

Já a AAR25% apresentou a segunda maior resistência à tração entre as cinco argamassas e a maior resistência entre as argamassas com agregado reciclado. Seus valores de resistência à tração na flexão se enquadraram entre as classes R3 e R4. Os valores nos tempos de 3 horas e de 6 horas se enquadraram na classe R3, já os valores nos tempos de 0,5 horas e de 8 horas enquadraram-se na classe R4.

A AAR50% e a AAR75% apresentam valores intermediário de resistência à tração na flexão e se enquadraram, me geral, na classe R3. Os valores de resistência à tração na flexão de argamassas mistas e hidráulicas com teores de substituição de 30% e 60% obtidos por Pimentel *et al.* (2018) também se enquadram na classe R3.

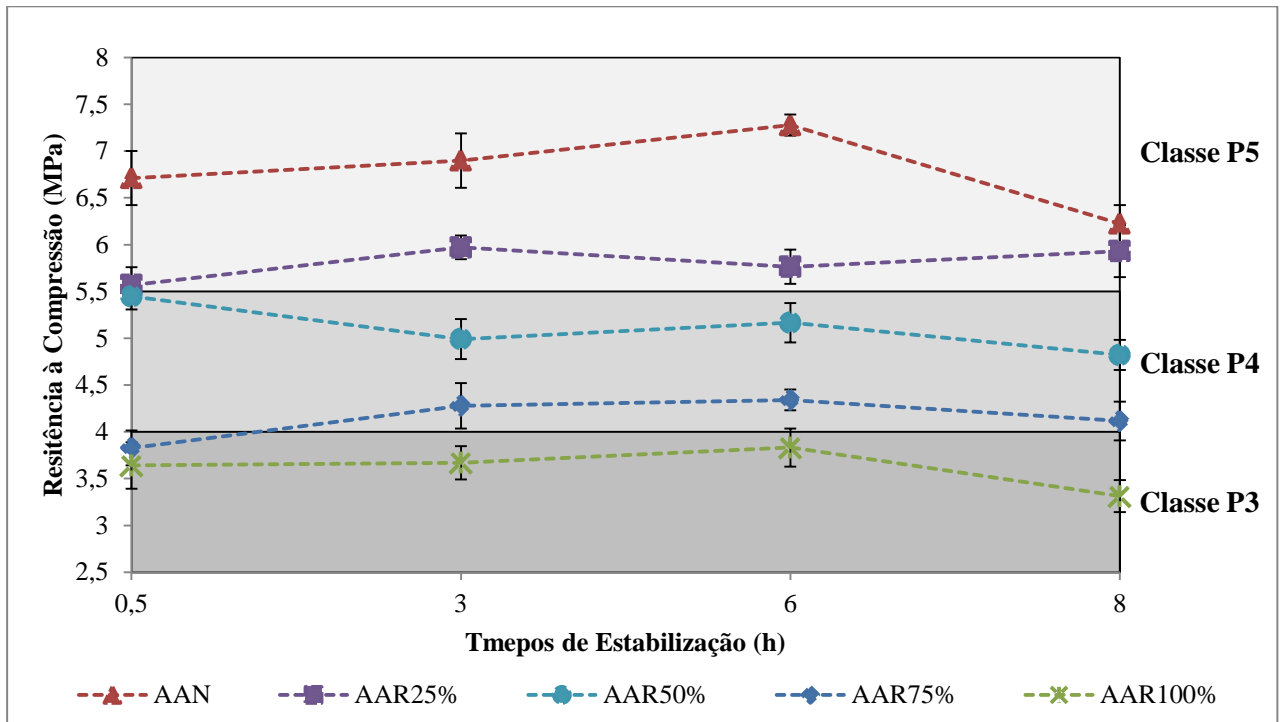
Já a AAR100% obteve o menor valor de resistência à tração na flexão, visto que possui a maior relação a/c e o maior teor de ar incorporado e enquadrou-se na classe R2.

A classificação de parte dos valores de resistência da AAR25% na classe R4, classe a qual os resultados obtidos pela AAN se enquadraram, indica que a substituição de 25% da areia natural pela a areia reciclada não acarretou modificações significativas na resistência à tração das argamassas.

#### **4.2.2.3. Resistência à Compressão**

A Figura 4.8 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão e suas classificações de acordo com a ABNT NBR 13281:2005.

Figura 4.8 – Variação da resistência à compressão das argamassas aos 28 dias em relação aos tempos de estabilização



Ocorreu uma redução gradativa da resistência à compressão com o aumento dos teores de substituição das areias, assim como ocorreu com a resistência à tração na flexão. Essa redução da resistência à compressão deve-se ao aumento da relação  $a/c$  (Tabela 4.6) e do teor de ar incorporado das argamassas (Tabela 4.5) com o incremento dos teores de substituição das areias. Essa redução da resistência à compressão das argamassas com agregado miúdo reciclado também foi identificada por Carasek *et al.* (2018) e atribuída à maior porosidade do agregado reciclado e à maior demanda de água para a produção das argamassas recicladas.

Observa-se na Figura 4.8 que a AAN, a qual apresentou a menor relação  $a/c$  e o menor teor de ar incorporado entre as argamassas, exibiu os maiores valores de resistência à compressão nos diferentes tempos de estabilização, se enquadrando na classe P5 quanto à resistência à compressão de acordo com a ABNT NBR 13281:2005.

Já a AAR25% possui os maiores valores de resistência à compressão entre as argamassas com agregado reciclado, visto que possui a menor relação  $a/c$  e o menor teor de ar incorporado entre essas argamassas. Apesar da substituição de 25% do agregado natural pelo agregado reciclado ter ocasionado o aumento do teor de água (Tabela 4.4) e de ar incorporado (Tabela 4.5), os valores da AAR25% se enquadraram na classe P5, assim como a AAN.

A AAR50% e a AAR75% apresentam valores intermediário de resistência à compressão e se enquadram na classe P4. Por fim, a AAR100% apresentou os menores valores de resistência à compressão entre as cinco argamassas, visto que possui a maior relação a/c e o maior teor de ar incorporado, e se enquadrou na classe P3.

A AAN e a AAR25% se enquadrarem na mesma classe P5 demonstra que a substituição de 25% da areia natural pela areia reciclada não acarretou modificações significativas na resistência à compressão das argamassas apesar do aumento da relação a/c e do teor de ar incorporado. Com o aumento dos teores de substituição para 50%, 75% e 100% as modificações na resistência foram maiores e refletiram com a mudança de classe quanto a essa propriedade.

A redução da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição das areias também foi identificado por Pimentel *et al.* (2018). Os autores identificaram uma redução máxima de 42% com a utilização do teor de substituição de 60% em argamassas mistas.

Ressalta-se que as argamassas apresentaram variações, tanto de aumento como de redução, dos valores de resistência à compressão com o aumento do tempo de estabilização. Porém, essas variações não acarretaram em mudanças na classificação das argamassas, o que indica que a estabilização não afetou a resistência à compressão das argamassas.

#### 4.2.2.4. Ductilidade

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores de ductilidade das cinco argamassas nos diferentes tempos de estabilização e a média desses valores.

Tabela 4.12 - Valores de ductilidade das argamassas

Tempos de Estabilização (h)	Argamassas				
	AAN	AAR25%	AAR50%	AAR75%	AAR100%
0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4
3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Média</b>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Observa-se que as cinco argamassas apresentaram valores de ductilidade praticamente iguais a 0,3 nos diferentes tempos de estabilização, demonstrando que a substituição do agregado

natural pelo agregado reciclado, assim como o aumento do tempo de estabilização, não gerou modificações perceptíveis nas argamassas.

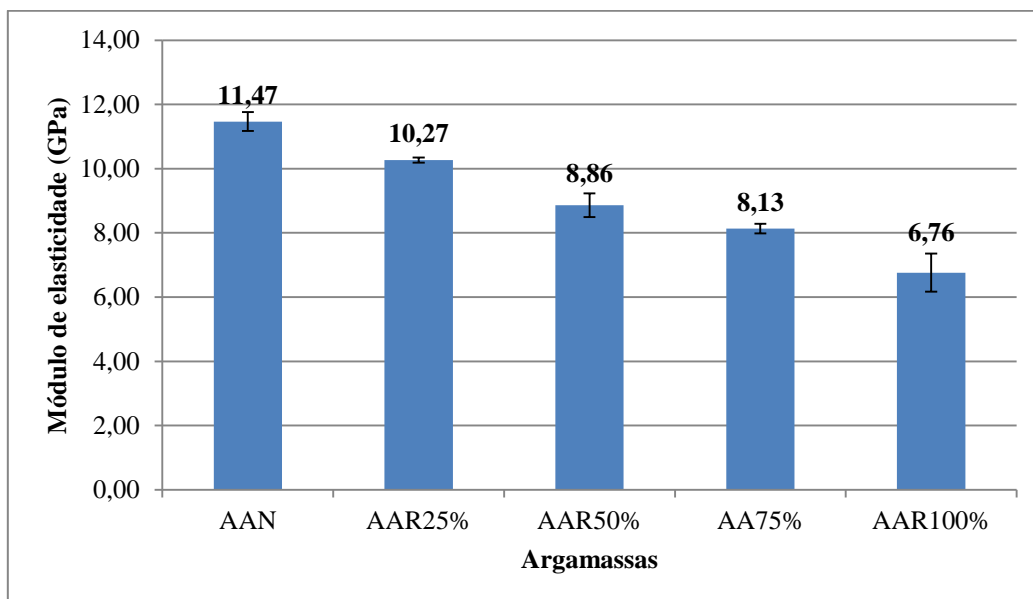
Além disso, comparando os valores médios de ductilidade entre as cinco argamassas, verifica-se que os valores obtidos pelas argamassas são semelhantes. Demonstrando assim que as cinco argamassas estabilizadas estão na mesma faixa de ductilidade.

De acordo com Veiga (1998), a ductilidade permite avaliar a suscetibilidade à fissuração por retração das argamassas. Quanto mais próximo a um o valor de ductilidade, melhor a resistência à fissuração das argamassas. Tendo esse valor como referência, verifica-se que as cinco argamassas não apresentam boa resistência à fissuração devido aos baixos valores de ductilidade obtidos.

#### 4.2.2.5. *Módulo de Elasticidade Flexura*

A Figura 4.9 apresenta os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade por meio do método de excitação por impulso com modo de vibração flexural.

Figura 4.9 - Módulo de elasticidade das argamassas aos 28 dias



Nota-se que os valores de módulo de elasticidade pelo modo de vibração flexural apresentaram uma redução com o aumento do teor de substituição das areias.

A ABNT NBR 13281:2005 não classifica as argamassas quanto ao módulo de elasticidade, dessa forma foi utilizada a classificação de acordo com o CSTB (1993) para a análise das argamassas. As AAN, AA25%, AAR50% e AAR75% apresentaram valores de módulo de

elasticidade entre 7,5 GPa e 14,0 GPa, dessa forma se enquadraram na classe E4 de acordo com CSTB (1993). Já a AAR100% se enquadrou na classe E3 (5,0 GPa a 10,0 GPa).

Quanto à comparação de resultados com outros estudos sobre as argamassas estabilizadas destaca-se Oliveira (2017) que realizou determinação de módulo de elasticidade dinâmico pelo método de excitação por impulso e obteve um módulo de elasticidade de 9,39 GPa para uma argamassa com areia natural (traço 1:6, em massa) e a combinação de 0,4% de AEH e 0,2% de IAR. Já Macioski, Costa e Casali (2015) obtiveram, para argamassas estabilizadas, valores entre 8,8 GPa e 15,38 GPa nos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico por propagação de ondas.

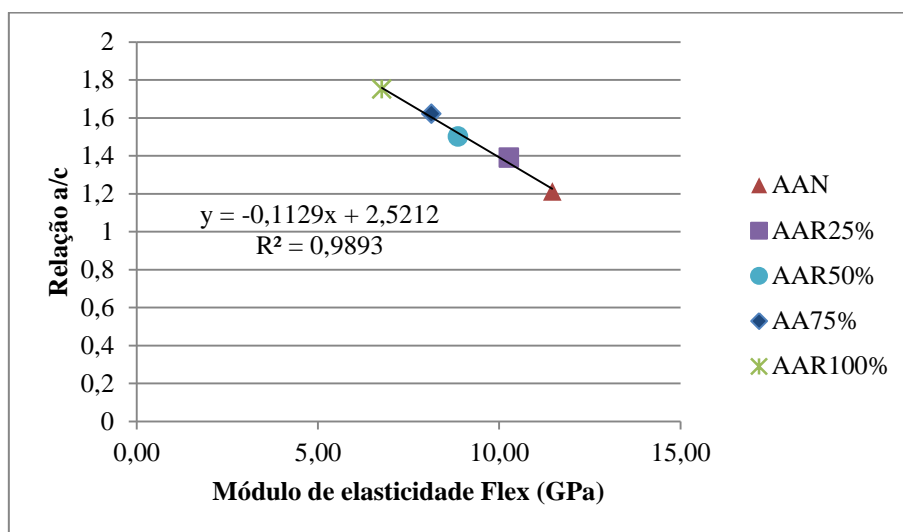
Dessa forma, nota-se que apesar da redução do módulo de elasticidade, substituições de até 75% da areia natural pela areia reciclada não acarretaram uma mudança de classificação das argamassas em relação à AAN.

A redução dos valores de módulo de elasticidade com o aumento dos teores de substituição das areias ocorreu devido ao aumento da relação a/c ocasionado pelo aumento do teor de água e pela redução do consumo de cimento (Tabela 4.4). Essa correlação é demonstrada na Figura 4.10. Outra justificativa é apresentada por Leite *et al.* (2000), a qual identifica a causa da redução do módulo de elasticidade das argamassas com agregado reciclado como a maior porosidade desse material, que por sua vez torna a argamassas mais deformável se comparada à argamassa com agregado natural.

O aumento do teor de ar motivado pelo incremento dos teores de substituição das areias também contribuiu para a redução do módulo de elasticidade. Silva (2011), em sua avaliação da retração e da fissuração de revestimento de argamassa, verificou que o incremento do teor de ar incorporado gerou uma redução do módulo de elasticidade devido ao aumento da capacidade de deformação das argamassas.



Figura 4.10 - Módulo de elasticidade *versus* Relação a/c



Os valores de módulo de elasticidade são diretamente proporcionais aos resultados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, como apresentado nas Figura 4.11 e Figura 4.12.

Figura 4.11 - Resistência à compressão *versus* módulo de elasticidade

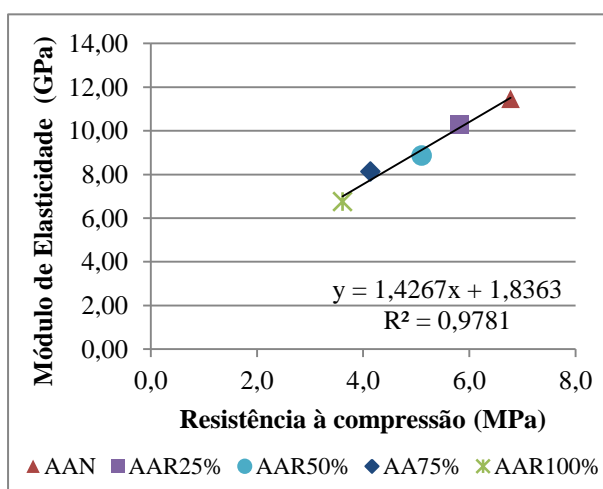
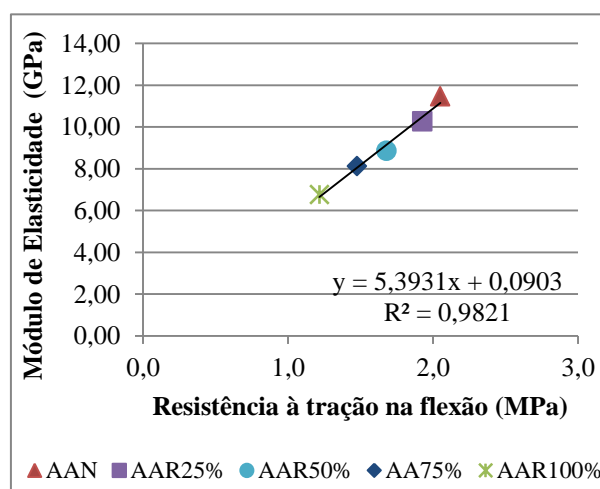


Figura 4.12 - Resistência à tração na flexão *versus* módulo de elasticidade



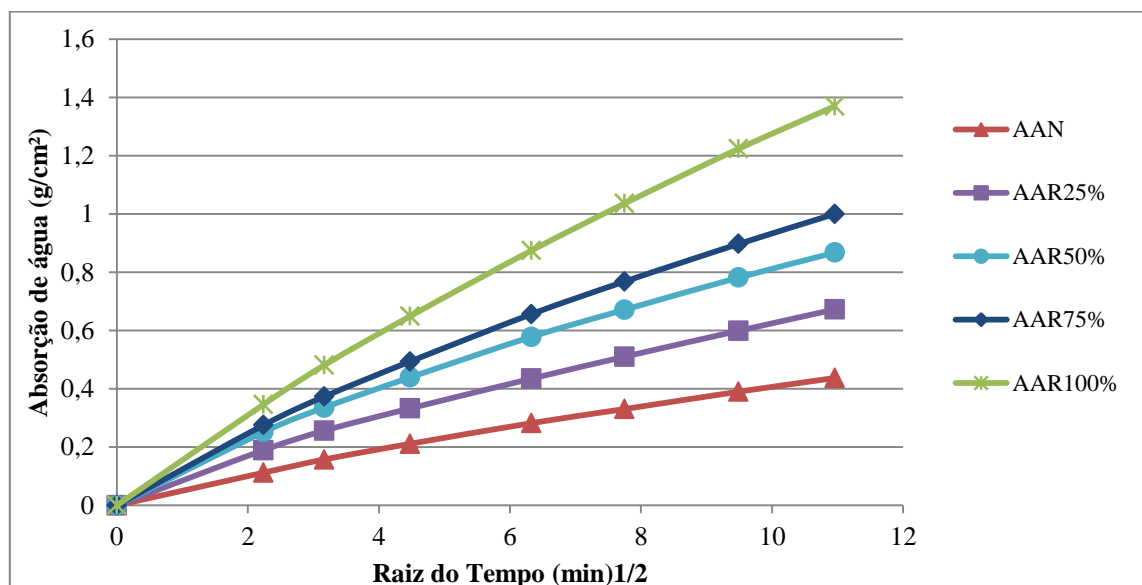
A relação diretamente proporcional entre o módulo de elasticidade e as resistências à compressão e à tração na flexão também foram identificados por Silva (2006) e Oliveira (2017).

Essa redução do módulo de elasticidade, com o aumento dos teores de substituição, representa uma redução da rigidez das argamassas e conseqüentemente um menor potencial de fissuração.

#### 4.2.2.6. Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

Os valores de absorção de água das argamassas ao longo do tempo são apresentados na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias



As determinações das massas dos corpos de prova durante o ensaio foram realizadas nos tempos de 5 min., 10 min., 20 min., 40 min., 60 min., 90 min. e 120 min. com a finalidade de se identificar mais detalhadamente a absorção de água por capilaridade das argamassas.

Nota-se na Figura 4.13 que os valores de absorção de água ao longo do tempo aumentaram gradualmente com o incremento dos teores de substituição das areias. Esse aumento dos valores de absorção ocorreu devido ao aumento dos teores de água (Tabela 4.4) e de ar incorporado (Tabela 4.5) e à redução do consumo de cimento (Tabela 4.4) motivados pelo incremento dos teores de substituição das areias, assim como também verificado por Martínez *et al.* (2013).

Por meio do gráfico raiz do tempo *versus* absorção de água da Figura 4.13, foram determinados os valores de coeficiente de capilaridade das argamassas. A Tabela 4.13 apresenta os valores de coeficiente de capilaridade obtidos pelas argamassas e os valores de absorção de água aos 10 minutos e 90 minutos utilizados na obtenção dos coeficientes.

Tabela 4.13 – Coeficiente de capilaridade das argamassas aos 28 dias

Argamassa	Absorção de água por capilaridade – 10 min (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção de água por capilaridade – 90 min (g/cm <sup>2</sup> )	Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> . min <sup>1/2</sup> )	Classe – ABNT NBR 13281:2005
AAN	0,16	0,39	3,7	C4
AAR25%	0,26	0,60	5,5	C5
AAR50%	0,34	0,78	7,4	C5
AAR75%	0,37	0,90	8,4	C5
AAR100%	0,48	1,22	11,7	C6

Os valores do coeficiente de capilaridade aumentaram com o aumento do teor de substituição das areias. Esse aumento também foi identificado por Ledesma *et al.* (2015), o qual obteve valores de 6,0 g/dm<sup>2</sup>. min<sup>1/2</sup> a 11,2 g/dm<sup>2</sup>. min<sup>1/2</sup>, respectivamente, para argamassas com agregado natural e com 100% de substituição por agregado reciclado.

Já Oliveira (2017) obteve um coeficiente de capilaridade de 5,4 g/dm<sup>2</sup>. min<sup>1/2</sup> para uma argamassa estabilizada produzida com areia natural, 0,4% de AEH e 0,2% de incorporador de ar. Bauer *et al.* (2015), na avaliação de 17 lotes de argamassas estabilizadas, verificou valores de coeficiente de capilaridade entre 2,0 g/dm<sup>2</sup>. min<sup>1/2</sup> a 4,4 g/dm<sup>2</sup>. min<sup>1/2</sup>. E em avaliação de argamassas usinadas em obra, Bauer *et al.* (2013) obteve um valor médio de coeficiente de capilaridade de 3,2 g/dm<sup>2</sup>. min<sup>1/2</sup>.

Dessa forma, verifica-se que o valor de coeficiente de capilaridade da AAN encontra-se próximo aos valores obtidos por Oliveira (2017), Bauer *et al.* (2015) e Bauer *et al.* (2013) para argamassas estabilizadas. A AAR100% obteve um coeficiente de capilaridade (11,7 g/dm<sup>2</sup>. min<sup>1/2</sup>) próximo ao valor obtido por Ledesma *et al.* (2015) para uma argamassa com 100% de agregado reciclado. Já as AAR25%, AAR50% e AAR75% apresentaram valores intermediários.

A AAN apresentou o menor coeficiente de capilaridade entre as cinco argamassas e se enquadrou na classe C4 segundo a ABNT NBR 13281:2005.

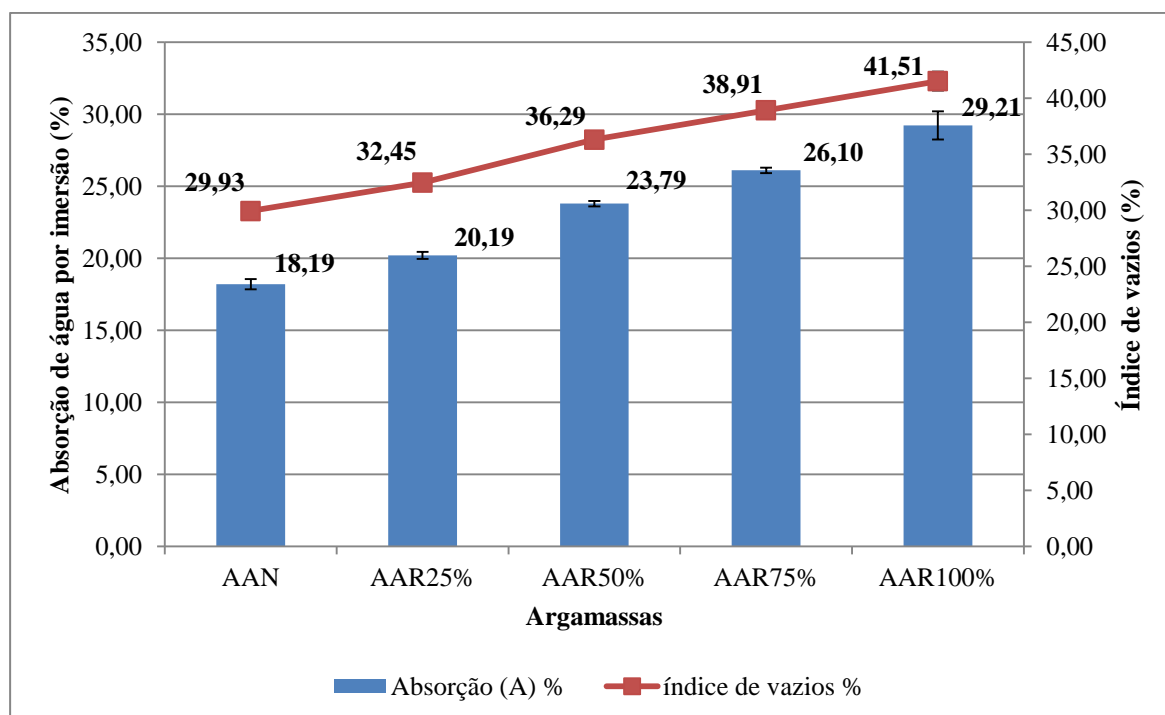
A substituição de 25% da areia natural acarretou um aumento de aproximadamente 49% do coeficiente de capilaridade da AAR25%. Já as AAR50% e AAR75% apresentaram, respectivamente, aumentos de 100% e 127%. Com o aumento dos coeficientes de capilaridade, as três argamassas se enquadraram na classe C5.

A AAR100% apresentou o maior coeficiente de capilaridade entre as cinco argamassas, o qual atingiu um aumento de 216% em relação à AAN. Com esse aumento a AAR100% se enquadrava na classe C6.

#### 4.2.2.7. Absorção de água por imersão

Os valores de absorção de água por imersão e os valores de índice de vazios das argamassas são apresentados na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Absorção de água por imersão e índice de vazios das argamassas aos 28 dias



Verifica-se que ocorreu o aumento da absorção de água por imersão e do índice de vazios das argamassas com o aumento do teor de substituição das areias. Essa elevação ocorreu devido ao aumento dos teores de água (Tabela 4.4) e de ar incorporado (Tabela 4.5) e a redução do consumo de cimento (Tabela 4.4) motivados pelo incremento dos teores de substituição das areias.

Os aumentos da absorção de água por capilaridade e índice de vazios demonstram um incremento na porosidade das argamassas com o aumento do teor de substituição das areias, visto que o índice de vazios representa a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total do corpo de prova, e a absorção de água representa indiretamente os poros permeáveis da amostra.

A elevação da porosidade das argamassas como aumento do teor de substituição das areias influenciou a densidade (Tabela 4.11), ocasionando a sua redução, assim como o aumento do coeficiente de capilaridade (Tabela 4.13).

Ressalta-se que o incremento detectado na porosidade das argamassas com agregado reciclado, proporcional à elevação do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado, também influenciou na redução gradativa das resistências à tração na flexão (Figura 4.7), da resistência à compressão (Figura 4.8) e do módulo de elasticidade (Figura 4.9).

#### 4.2.2.8. *Variação Dimensional*

Os resultados do ensaio de determinação da variação dimensional são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Variação dimensional das argamassas aos 28 dias

Argamassa	Variação dimensional (mm/m) - Retração	Diferença de variação dimensional*	Variação de massa (%)	Diferença de variação de massa*
AAN	-0,88	-	-8,0	-
AAR25%	-0,64	-27,3%	-8,0	0,0%
AAR50%	-0,88	0,0%	-9,4	+17,5%
AAR75%	-1,36	+54,5%	-11,5	+43,7%
AAR100%	-1,08	+22,7%	-12,4	+55,0%

\*- Diferença em relação à AAN.

Detectou-se que todas as argamassas apresentaram, aos 28 dias, uma variação dimensional negativa (retração) e uma redução de massa. Comportamento similar relacionado à retração foi identificado por Oliveira (2017) e Bauer *et al.* (2015) em seus estudos com argamassas estabilizadas.

A AAR25% apresentou o menor valor de variação dimensional, sendo esse valor aproximadamente 27% menor que o valor obtido pela AAN. Observa-se que AAN e a AA50% apresentaram o mesmo valor de variação dimensional. Já a AAR100% apresentou uma variação maior que as argamassas anteriores, sendo essa aproximadamente 23% maior que a ANN. A AAR75% apresentou a maior variação dimensional, a qual foi aproximadamente 55% superior a AAN. Dessa forma, nota-se que as variações dimensionais das argamassas não apresentaram uma correlação com os teores de substituição.

Em relação à variação de massa, nota-se que a AAN e a AAR25% apresentaram a mesma redução de 8% de massa. Já o aumento dos teores de substituição para 50%, 75% e 100% acarretou uma intensificação na redução das massas. Dessa forma, o aumento do teor de substituição das areias acarretou a redução das massas das argamassas devido à perda de água dos poros para o ambiente.

Os valores de variação dimensional das cinco argamassas analisadas são próximos aos valores de Bauer *et al.* (2015), no qual as argamassas estabilizadas apresentaram uma faixa de variação dimensional de 1,12 mm/m a 0,72 mm/m e de Oliveira (2017), a qual obteve uma variação de 1,06 mm/m para uma argamassa estabilizada com agregado natural (traço 1:6, em massa) e a combinação de 0,4% de AEH e 0,02% de IAR.

Apesar da variação de valores, todas as cinco argamassas apresentaram os mesmos comportamentos quanto variação dimensional e a variação de massa ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 4.15 e na Figura 4.16.

Figura 4.15 – Variação dimensional no tempo

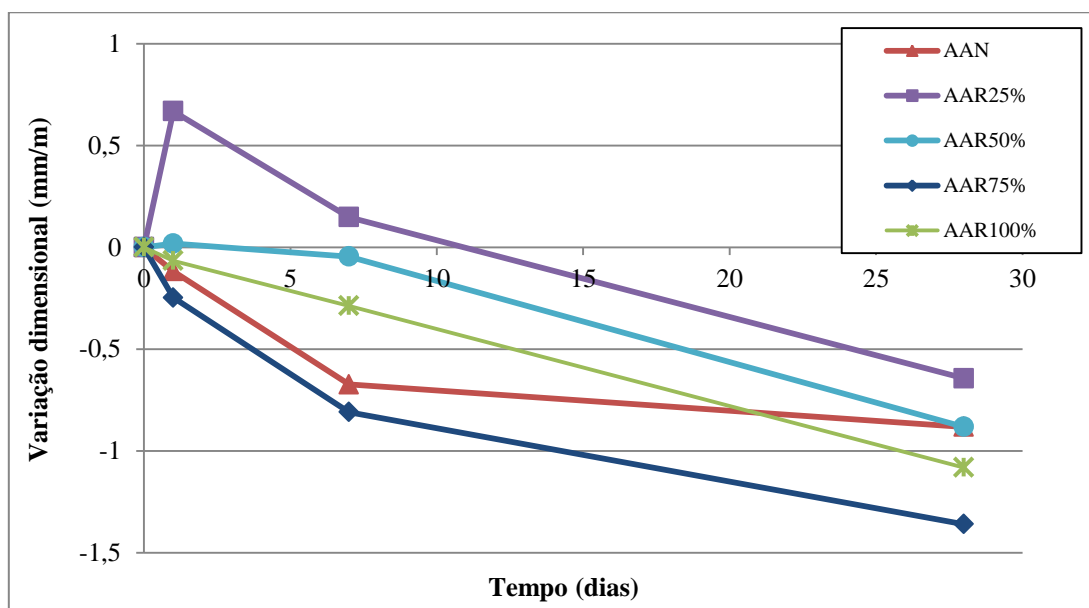
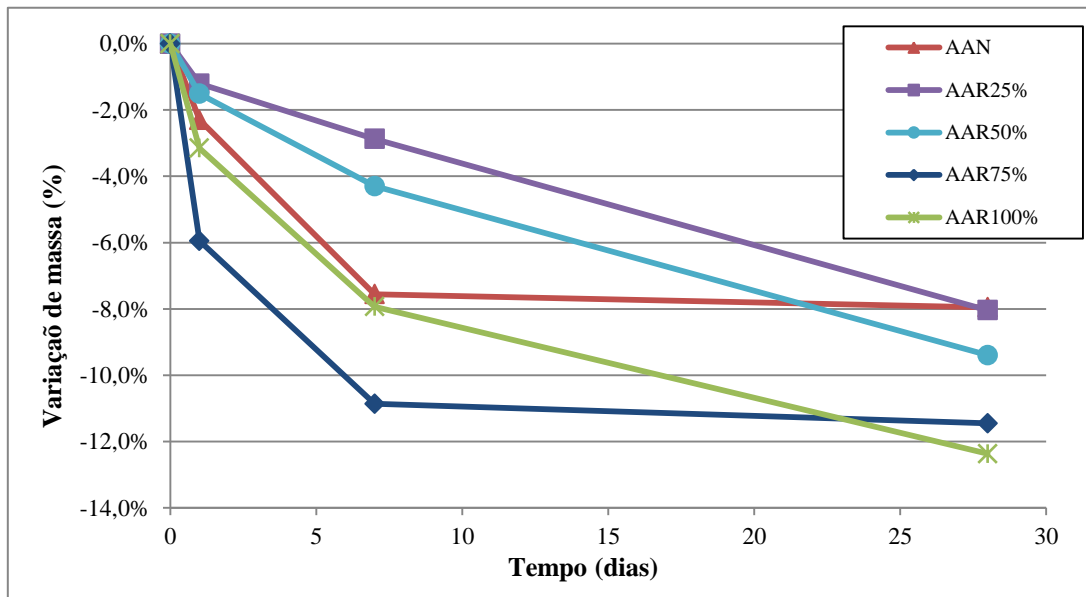


Figura 4.16 – Variação de massa no tempo



Nota-se na Figura 4.15 que as argamassas, com exceção da AAR25%, apresentaram uma retração desde a primeira medição. A AAR25% apresentou uma expansão na primeira medida e nos dias subsequentes uma retração. Já na Figura 4.16, observa-se uma redução da massa dos corpos de prova das cinco argamassas devido à secagem desde um dia após a desforma até atingir 28 dias.

#### 4.2.2.9. Suscetibilidade à fissuração

Utilizando os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão, as argamassas podem ser classificadas quanto a sua suscetibilidade à fissuração segundo o CSTB (1993). Os critérios de classificação são apresentados no Apêndice F.

A Tabela 4.15 apresenta os valores analisados e as classificações das argamassas quanto à suscetibilidade à fissuração.

Tabela 4.15 – Características das argamassas – suscetibilidade à fissuração

Propriedades (aos 28 dias)	Argamassas				
	AAN	AAR25%	AAR50%	AAR75%	AAR100%
Módulo de elasticidade (E) (MPa)	11110	10270	8870	8130	6720
Módulo de elasticidade/ resistência à tração na flexão – E/Rt	5555	5135	4928	5807	5169

**Verde** – baixa susceptibilidade à fissuração; **Azul** – média susceptibilidade à fissuração; e **Vermelho** – alta susceptibilidade à fissuração.

Verificou-se que as argamassas, quanto ao módulo de elasticidade, apresentaram média suscetibilidade à fissuração, com exceção da AAR100% a qual apresentou uma baixa suscetibilidade. Essa baixa suscetibilidade à fissuração da AAR100% deve-se à redução do módulo de elasticidade devido ao aumento do teor de água e de ar incorporado e à redução do consumo de cimento.

As correlações entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão indicaram uma alta suscetibilidade à fissuração para todas as cinco argamassas apesar da redução dos valores dessas correlações com o aumento do teor de substituição dos agregados.

Dessa forma, as cinco argamassas produzidas para essa pesquisa, no geral, foram classificadas como argamassas que apresentam uma média-alta susceptibilidade à fissuração. Demonstrando assim, que a substituição da areia natural pela areia reciclada, independentemente do teor, não acarretou modificações de categorias quanto à classificação de suscetibilidade à fissuração das argamassas.

#### **4.2.2.10. Resistência Potencial de Aderência à Tração**

Na Tabela 4.16 e na Tabela 4.17 são apresentados os resultados do ensaio de resistência potencial de aderência à tração, respectivamente, das AAN e AAR100%. Nota-se que ambas as argamassas apresentaram valores que se enquadram na classe A3 segundo a ABNT NBR 13281:2005.

Tabela 4.16 – Resistência potencial de aderência à tração da AAN aos 28 dias

Corpo de prova nº	Tensão (MPa)	Forma de ruptura (%)				Tensão Média (MPa)	Classe – ABNT NBR 13281:2005
		S	S/A	A	F		
1	0,98		85	15			
2	0,83			95	5		
3	1,36*		85	15			
4	0,78		95	5			
5	1,22			95	5		
6	1,06		85	15	0,97	A3	
7	0,95			95	5		
8	1,07			95	5		
9	0,84			100			
10	0,87**				100		

\* - corpo de prova desconsiderado, desvio maior que o permitido por norma.

\*\* - corpo de prova desconsiderado, falha de na colagem da peça metálica.

S – ruptura no substrato, S/A – ruptura na interface substrato/argamassa, A – ruptura na argamassa, F – falha na colagem da peça metálica.



Observa-se na Tabela 4.16, que dentre os 10 corpos de prova da ANN, três apresentaram ruptura com maior parcela na interface substrato/argamassa e cinco no interior da argamassa. Os outros dois corpos de prova foram desconsiderados em razão de apresentarem ou falha na colagem da peça metálica ou valor com desvio a cima do permitido por norma. A maior quantidade de corpos de prova válidos com ruptura no interior da argamassa indica possibilidade de uma maior aderência (argamassa de revestimento com o substrato) em relação à resistência média determinada pelo ensaio.

O valor de resistência potencial de aderência à tração da AAN é semelhante ao obtido por Oliveira (2017). Em seu trabalho, a autora obteve o valor de 0,74 MPa de resistência potencial de aderência à tração para uma argamassa estabilizada com agregado natural (traço 1:6, em massa), 0,4% de AEH e 0,2% de AIR.

Tabela 4.17 - Resistência potencial de aderência à tração da AAR100% aos 28 dias

Corpo de prova nº	Tensão (MPa)	Forma de ruptura (%)				Tensão Média (MPa)	Classe – ABNT NBR 13281:2005
		S	S/A	A	F		
1	0,78		85	15			
2	0,87		85	15			
3	0,93			70	30		
4	0,74		85	15			
5	0,86		85	15			
6	0,83		85	15			
7	0,84			70	30		
8	1,04			60	40		
9	0,94		85	15			
10	0,80			60	40		
						0,86	A3

S – ruptura no substrato, S/A – ruptura na interface substrato/argamassa, A – ruptura na argamassa, F – falha na colagem da peça metálica.

Já na Tabela 4.17 verifica-se que a AAR100% apresentou seis corpos de prova com rupturas com maior percentual na interface substrato/argamassa e quatro com rupturas no interior da argamassa. Dessa forma, admitindo que a AAR100% apresenta uma maior suscetibilidade à ruptura na interface de ligação substrato/argamassa, considera-se que o valor determinado no ensaio representa o potencial de aderência.

Ressalta-se que apesar dos valores de retenção de água obtidos pelas argamassas serem abaixo dos 75% recomendados pela ASTM C270:2012, não houve prejuízo da aderência das argamassas. Os valores de resistência potencial de aderência à tração obtidos pelas ANN e AAR100% se enquadraram na classe de maior resistência potencial de aderência à tração

segundo a ABNT NBR 13281:2005 e são superiores aos 0,30 MPa exigidos pela ABNT NBR 13749:2013 para argamassas de revestimento.

### 4.2.3. Comparação das argamassas

Com a finalidade de se comparar as argamassas, suas classificações quanto aos requisitos exigidos pela ABNT NBR 13281:2005, assim como o teor de ar, módulo de elasticidade, variação dimensional e suscetibilidade à fissuração, são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Classificação das argamassas

Propriedade	AAN	AAR25%	AAR50%	AAR75%	AAR100%
Massa específica no estado fresco	D5	D5	D4	D4	D4
Teor de ar (%)	14-17	15-17	17-19	19-21	20-23
Retenção de água	U1	U1	U1	U1	U1
Densidade no estado endurecido	M5	M4*	M4	M4	M3*
Resistência à compressão	P5	P5	P4	P4	P3
Resistência à tração	R4	R4-R3	R3	R3	R2
Módulo de elasticidade**	E4	E4	E4	E4	E3
Coefficiente de Capilaridade	C4	C5	C5	C5	C6
Variação dimensional	0,88	0,64	0,88	1,36	1,08
Suscetibilidade à fissuração	Média-alta	Média-alta	Média-alta	Média-alta	Média-alta
Aderência potencial (MPa)	A3	-	-	-	A3

\*- Valor próximo ao limite inferior da classe a cima.

\*\* - Classificação segundo o CSTB (1993)

**Verde** – semelhante ou igual à ANN; e

**Vermelho** – semelhante ou igual à ANN.

Por meio da Tabela 4.18 verifica-se que a AAR25% se enquadrou nas mesmas classes que a ANN em todos os requisitos da ABNT NBR 13281:2005, com exceção apenas do coeficiente de capilaridade. Além disso, AAR25% apresentou valores de teor de ar incorporado e de variação dimensional próximos aos valores obtidos pela AAN. Desse modo, verifica-se uma semelhança entre a ANN e a AAR25%.

Com o aumento dos teores de substituição, a AAR50%, a AAR75% e a AAR100% passaram a se enquadrar em classes diferentes das obtidas pela AAN. Isso demonstra que o aumento do teor de substituição para teores superiores à 25% acarretou em modificações em relação à AAN.

Em virtude da ausência de referências normativas de requisitos e de utilização das argamassas estabilizadas, os resultados obtidos com a caracterização das cinco argamassas analisadas

nesse estudo foram comparadas ao perfil de desempenho das argamassas estabilizadas de revestimento elaborado por Bauer *et al.* (2015). Esses autores avaliaram 17 lotes de argamassas estabilizadas produzidas por uma empresa que faz a comercialização no Distrito Federal. Por meio da média dos resultados obtidos foi proposto um Perfil de Desempenho e Qualidade das Argamassas Estabilizadas de Revestimento, o qual é apresentado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Perfil de Desempenho das Argamassas Estabilizadas de Revestimento

Exigência	Níveis de Desempenho					
Resistência à compressão (MPa)	≤ 2,0 (P1)	1,5 a 3,0 (P2)	2,5 a 4,5 (P3)	4,0 a 6,5 (P4)	5,5 a 9,0 (P5)	> 8,0 (P6)
Resistência à tração na flexão (MPa)	≤ 1,5 (R1)	1,0 a 2,0 (R2)	1,5 a 2,7 (R3)	2,0 a 3,5 (R4)	2,7 a 4,5 (R5)	> 3,5 (R6)
Resistência de aderência potencial (MPa)	≤ 0,20 (A1)		0,21 a 0,30 (A2)		> 0,30 (A3)	
Coef. de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	>10,0 (C6)	5,0 a 12,0 (C5)	3,0 a 7,0 (C4)	2,0 a 4,0 (C3)	1,0 a 2,5 (C2)	≤ 1,5 (C1)
Retenção de água (%)	≤ 72,0 (U1)	72 a 85 (U2)	80 a 90 (U3)	86 a 94 (U5)	91 a 97 (U5)	≥ 95 (U6)
Teor de ar incorporado (%) - Pressiométrico	> 15,0		10,0 a 15,0		5,0 a 10,0	
Variação dimensional - retração (mm/m)	> 1,20		0,95 a 1,20		0,70 a 0,94	

Verde – Valores adequados; e

Vermelho – Valores insuficientes

Fonte: Bauer *et al.* (2015)

A comparação das médias dos resultados obtidos nessa pesquisa com o perfil de desempenho de Bauer *et al.* (2015) é apresentada na Tabela 4.20. Ressalta-se que os resultados obtidos no ensaio para determinação do teor de ar incorporado (método gravimétrico) obtidos neste trabalho não puderam ser comparados com os valores de Bauer *et al.* (2015) devido a diferença da metodologia utilizada para a determinação dessa propriedade.

Tabela 4.20 – Adequação ao perfil de desempenho das Argamassas Estabilizadas de Revestimento de Bauer *et al.* (2015)

Exigência	AAN	AAR25%	AAR50%	AAR75%	AAR100%
Resistência à compressão (MPa)	P5	P5	P4	P4	P3
Resistência à tração na flexão (MPa)	R4	R3	R3	R3	R2
Resistência de aderência potencial (MPa)	A3	-	-	-	A3
Coef. de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	C4	C5	C5	C5	C6
Retenção de água (%)	U1	U1	U1	U1	U1
Variação dimensional - retração (mm/m)	0,88	0,64	0,88	1,36	1,08

Verde – Valores adequados; e

Vermelho – Valores insuficientes.

Verificou-se, na Tabela 4.20, que nenhuma das argamassas apresentou uma adequação a todas as exigências do perfil em questão, uma vez que nenhuma das cinco argamassas atingiu as exigências quanto ao coeficiente de capilaridade e a retenção de água.

A ANN apresentou-se adequada às exigências quanto à resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência potencial à tração e variação dimensional. A AAR25% adequou-se às exigências de resistência à compressão e à variação dimensional. Já a AAR100% adequou-se apenas às exigências de resistência de aderência potencial. A AAR50% e a AAR75% não se adequaram a nenhuma das exigências.

Já a comparação entre os intervalos dos resultados obtidos nessa pesquisa com o perfil de desempenho de Bauer *et al.* (2015) são apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Adequação aos intervalos das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento de Bauer *et al.* (2015)

Propriedade	Intervalo(s) de maior ocorrência (Bauer <i>et al.</i> , 2015)	AAN	AAR25%	AAR50%	AAR75%	AAR100%
Resistência à compressão (MPa)	4,90-10,90	6,7-73	5,6-6	4,8-5,4	3,8-4,1	3,3-3,8
Resistência à tração (MPa)	1,23-3,63	2,0-2,5	1,8-2,0	1,6-1,8	1,4-1,6	1,0-1,3
Aderência potencial (MPa)	0,51-0,62	0,97	-	-	-	0,86
Capilaridade (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	2,00-3,20/ 3,20-4,40	3,6-3,9	5,3-5,7	7,2-7,5	8,3-8,5	11,7-11,8
Retenção de água (%)	73,75-82,05	66-67	55-66	55-67	50-68	61-66
Variação dimensional – retração (mm/m)	1,12-0,72	0,88	0,64	0,88	1,36	1,08

\*- Adequação parcial devido parte dos valores não estar dentro do intervalo de Bauer *et al.* (2015)

**Verde** – Valores adequados; e

**Vermelho** – Valores insuficientes.

Analisando os intervalos na Tabela 4.21, verifica-se que número de requisitos em que as argamassas se enquadraram dentro dos intervalos foi ampliado. Com exceção da AAR100%, todas as argamassas se adequaram quanto à resistência à tração. A AAN passou a adequar-se às exigências quanto ao coeficiente de capilaridade, a AAR25% passou a adequar-se quanto à resistência à tração na flexão e a AAR50% passou a adequar-se quanto à resistência à tração na flexão e à compressão. Com exceção da AAR75%, todas as argamassas podem ser consideradas adequadas quanto à variação dimensional.

Essas análises demonstram que as AAN, AAR25% e AAR50% apresentaram-se adequadas às exigências quanto às propriedades mecânicas. Apesar do ensaio de aderência potencial não ter

sido realizado para as AAR25% e AAR50% possivelmente essas argamassas apresentariam resultados intermediários e adequados, visto que os valores obtidos para a AAR100% colocaram-na como adequada.

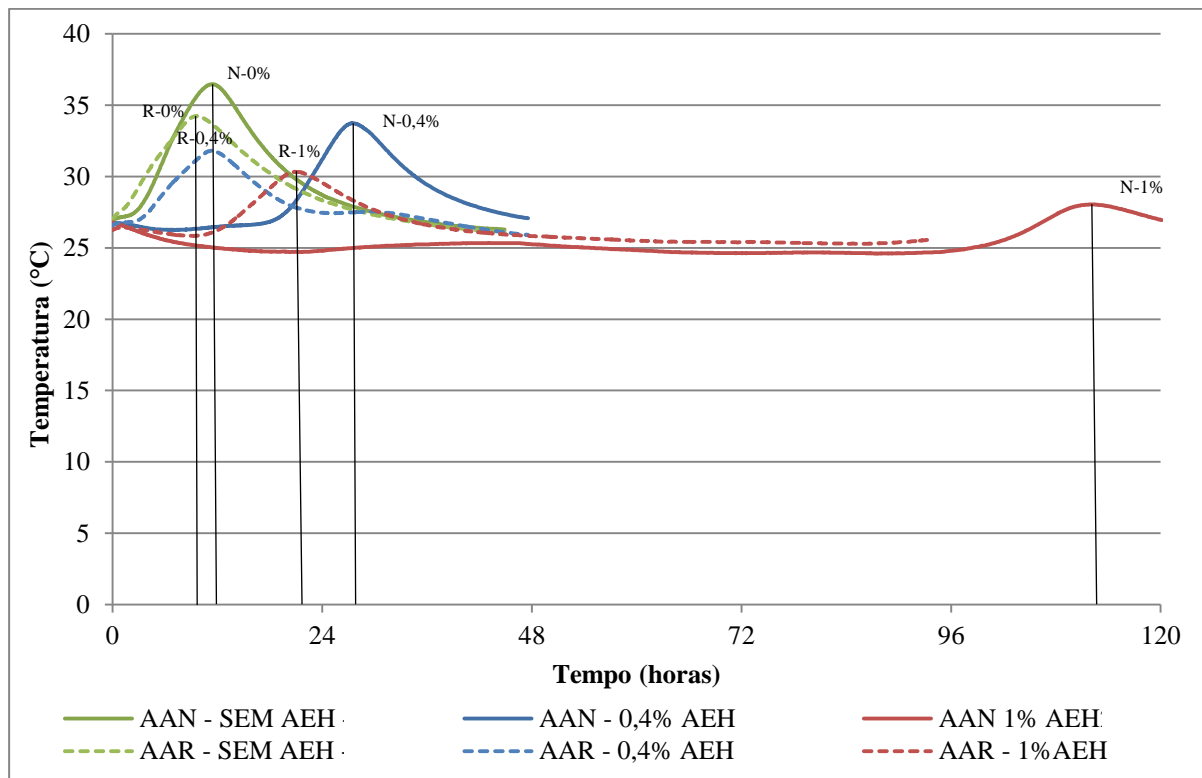
Porém, para os requisitos referentes ao coeficiente de capilaridade e retenção de água, as argamassas não se enquadraram dentro dos intervalos apresentados por Bauer *et al.* (2015).

Dessa forma, verifica-se, por meio da comparação das propriedades das argamassas deste estudo com as de Bauer *et al.* (2015), que as AAR25% e AAR50% apresentam características semelhantes a AAN. Com exceção ao coeficiente de capilaridade, as AAR25% e AAR50% se enquadraram nos mesmo requisitos que a AAN. Indicando, dentro dos requisitos avaliados, uma possibilidade do uso da areia reciclada como substituição de até 50% do agregado natural.

### 4.3. Etapa 3 - Avaliação da Cinética da Hidratação das Argamassas Estabilizadas ao Longo do Tempo

Os resultados da avaliação da cinética da hidratação das argamassas durante o processo de hidratação em um sistema semi-adiabático são apresentados na Figura 4.17. Os picos de calor de hidratação da ANN são identificados com N-porcentagem de AEH e para a AAR100% R-porcentagem de AEH.

Figura 4.17 – Variação da temperatura ao longo do processo de hidratação



Observa-se que o aumento do teor de AEH prolongou o período até se atingir o pico de calor de hidratação tanto da AAN como da AAR100%. Esse prolongamento fica evidente com o distanciamento dos picos de calor de hidratação N-0,4% e N-1% em relação ao pico N-0%, assim como o distanciamento dos picos R-0,45 e R-1% em relação ao pico R-0%.

Nota-se ainda que as temperaturas dos picos de calor de hidratação de ambas as argamassas foram reduzidas com o aumento dos teores do AEH. A redução da intensidade dos picos N-0,4% e N-1% em relação ao pico N-0% e dos picos R-0,4% e R-1% em relação ao pico R-0% demonstram essa redução da temperatura.

Shaikh e Mali (2016), na avaliação de concretos com diferentes tipos de cimento e diferentes teores de AEH, também verificaram os mesmos efeitos de prolongamento do tempo até o pico de calor de hidratação e a redução da temperatura desse pico com o aumento dos teores de AEH. Já Calçada, Gaio e Ramos (2013) analisaram a influência da utilização do AEH no tempo de início de pega de 18 argamassas estabilizadas e concluíram que o aumento do teor do AEH acarretou a redução da temperatura do pico de calor de hidratação e o aumento do tempo de início de pega.

Os aumentos ocorridos nos tempos mensurados até se atingir os picos de calor de hidratação e as reduções das temperaturas observadas pela diminuição dos picos demonstram a ação do AEH nas argamassas e a sua compatibilidade com os materiais componentes utilizados na produção das argamassas.

Esses efeitos, devido à utilização do AEH, na AAN e na AAR100% são ressaltados na Figura 4.18 e na Figura 4.19 por meio dos tempos até se atingir o pico de calor de hidratação e das temperaturas nesse pico das seis argamassas analisadas nesta Etapa 3.

Figura 4.18 – Tempos e temperaturas do pico de calor de hidratação da AAN

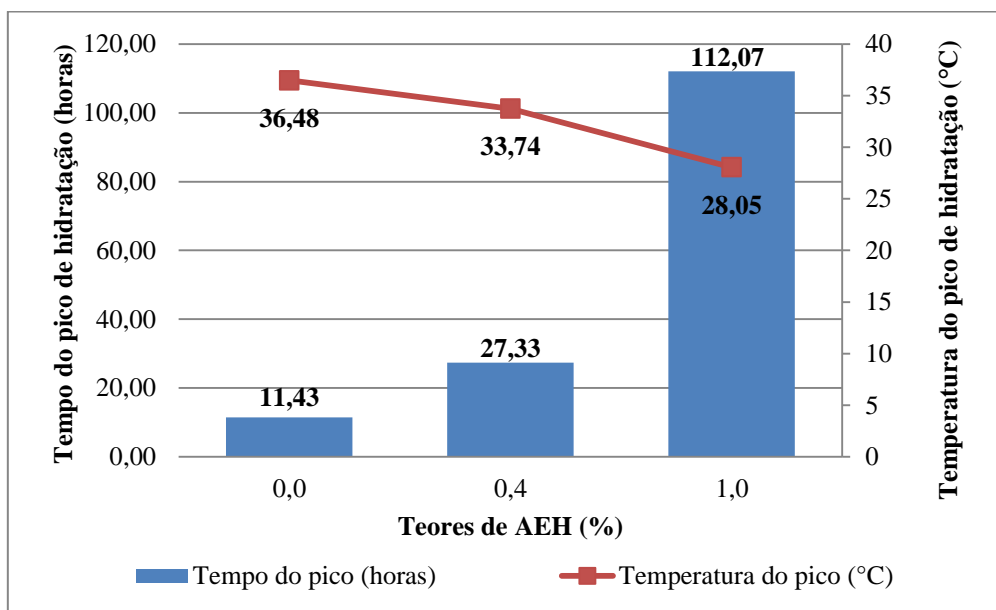
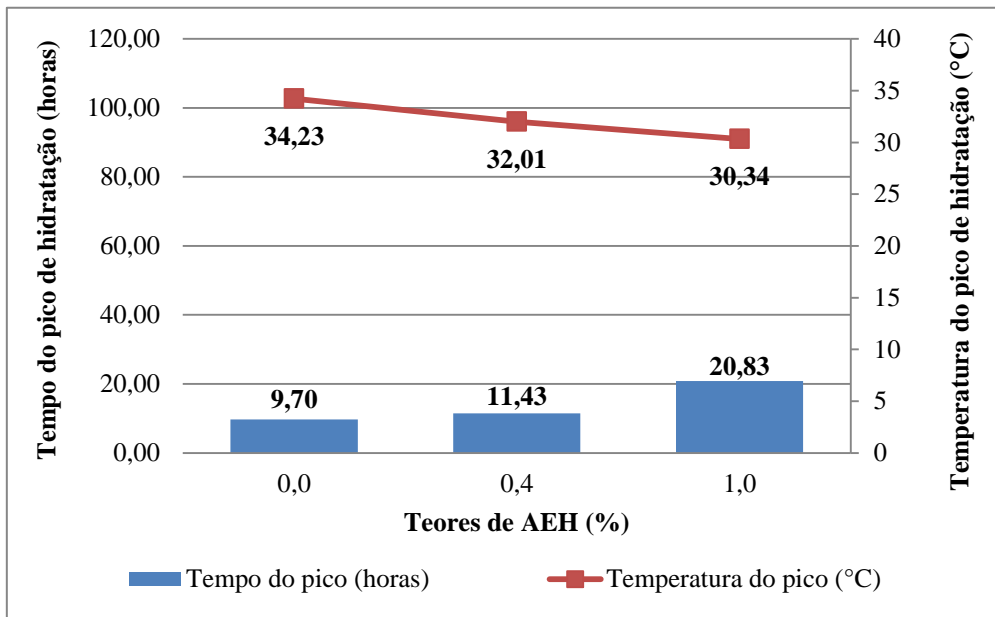


Figura 4.19 - Tempos e temperaturas do pico de calor de hidratação da AAR100%



Na Figura 4.18 e na Figura 4.19 fica evidente que o aumento do teor de AEH acarretou o prolongamento do tempo até se atingir o pico de calor de hidratação e a maior intensidade desse prolongamento na AAN.

Inicialmente a ANN apresentou um tempo de 11,43 horas até atingir o pico N-0%, e a AAR100% um tempo de 9,7 horas até o pico R-0%. Com a utilização de 0,4% de AEH, ocorreu o prolongamento do tempo da AAN em 15,9 horas e na AAR100% esse prolongamento foi de apenas 1,7 horas. Já com a utilização de 1,0% de AEH, o tempo da AAN se prolongou em mais de 100 horas em relação ao tempo sem a utilização do AEH. Já a AAR100% apresentou um aumento de 11,1 horas.

Nota-se ainda que para um mesmo teor de aditivo AEH, o tempo necessário até se atingir o pico de calor de hidratação da AAN é maior que o obtido pela ARR100%. Essa diferença fica evidente principalmente com a utilização de 1,0% do AEH, pois a ANN apresentou um tempo 5,4 vezes superior ao obtidos pela AAR100%.

Ressalta-se ainda que essa diferença pode também ter sido influenciada pela menor relação a/c das ANN. Segundo Nocun'-Wczelik e Czapik (2013), o efeito mais intenso do AEH em relações a/c mais baixas é provavelmente devido à rápida formação da camada impermeável por causa da maior concentração da mistura.



Além desse prolongamento do tempo até o pico de calor de hidratação, observa-se também que o aumento do teor de AEH ocasionou a redução da temperatura obtida no pico de calor de hidratação das argamassas.

Sem a utilização do AEH, a AAN atingiu uma temperatura de 36,8°C no pico N-0%. Já a AAR100% apresentou uma temperatura de 34,2°C no pico R-0%. Com a utilização do teor de 0,4% de AEH, a redução de temperatura da AAN e da AAR100% foi semelhante, ambas apresentaram uma redução de 2,5°C. Já com o aumento do teor de AEH para 1,0%, a ANN passou a apresentar uma maior redução da temperatura de pico se comparada à AAR100%. A AAN atingiu uma redução de 8,4°C e a AAR100% atingiu uma redução de apenas 3,9°C.

Dessa forma, verifica-se que a AAN apresentou um maior prolongamento do tempo até atingir o pico de calor de hidratação, e uma maior redução da temperatura nesse pico em relação ao obtido pela AAR100% para um mesmo teor de AEH. A menor intensidade dos efeitos do AEH observado na AAR100%, provavelmente, deve-se à maior relação a/c da AAR100%, como, também, identificado por Nocun´-Wczelik e Czapik (2013).

## 5. CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relacionadas à pesquisa desenvolvida, a qual teve como enfoque a avaliação da influência da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado nas propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento.

O programa experimental foi dividido em três etapas: a caracterização das areias, a avaliação das argamassas estabilizadas com diferentes teores de substituição da areia natural pela areia reciclada, além da avaliação da cinética da hidratação das argamassas estabilizadas.

Na Etapa 1, verificou-se que a areia natural e a areia reciclada apresentaram diferenças morfoscópias, as quais foram evidenciadas pelas imagens obtidas por meio do MEV e com a utilização do microscópio estereoscópio. A areia reciclada apresentou-se com forma angulosa e superfície rugosa, enquanto a areia natural apresentou-se com forma arredondada e subarredondada e superfície polida, com exceção da fração de 0,075  $\mu\text{m}$ , a qual apresentou forma subangular e superfície polida. Além dessas diferenças, as imagens do MEV possibilitaram a constatação do maior teor de finos do agregado reciclado quando comparado ao agregado natural desse estudo. Com as imagens do microscópio estereoscópio foi possível visualizar a argamassa e confirmar a existência da pasta aderida ao agregado reciclado. Dessa forma, o microscópio estereoscópio e o MEV demonstraram serem técnicas viáveis para a caracterização dos agregados reciclados.

Além das diferenças morfoscópias, a areia reciclada apresentou uma menor massa específica, assim como um maior teor de finos e uma maior absorção de água em relação a areia natural. Também, apresentou baixos teores de cloretos e sulfatos. Dessa forma, conclui-se que a areia reciclada utilizada na elaboração das argamassas estabilizadas se enquadra nos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 15116:2004, com exceção ao teor de argila. Esses requisitos foram utilizados como parâmetros de referência para o agregado miúdo reciclado destinado a produção de argamassas estabilizadas por falta de outros critérios técnicos ou normativos existentes, e se mostraram adequados para esse fim.

Na Etapa 2, constatou-se que a substituição da areia natural pela areia reciclada ocasionou as seguintes modificações nos traços das argamassas: redução do volume de agregado e do consumo de cimento, sendo necessário, para manter a mesma trabalhabilidade, aumentar o teor de água e de AEH nas misturas. Isso resultou em um maior volume de ar incorporado e

na redução na massa específica no estado fresco. Com o aumento do teor de substituição da areia natural pela areia reciclada essas mudanças foram intensificadas.

Apesar dessas modificações, devido à fixação do intervalo dos resultados do ensaio de penetração de cone com intuito de manter a mesma trabalhabilidade, verificou-se que as argamassas com agregado reciclado, independentemente do teor de substituição, apresentaram comportamentos semelhantes no estado fresco, como evidenciado pela proximidade dos resultados nos ensaios de índice de consistência e *Vane test*. Já em comparação à AAN, as argamassas com agregado reciclado apresentaram uma menor consistência. No estado endurecido, verificou-se uma redução gradativa da densidade, do módulo de elasticidade e das resistências à tração na flexão e à compressão com o aumento do teor de substituição, assim como, o aumento do coeficiente de capilaridade. Dessa forma, constatou-se que a utilização do agregado miúdo reciclado não acarretou em mudanças no estado fresco, porém ocasionou a redução das propriedades mecânicas avaliadas e um aumento no coeficiente de capilaridade das argamassas estabilizadas.

Na avaliação das mudanças nas propriedades das argamassas estabilizadas, nos diferentes tempos de estabilização, constatou-se que no estado fresco as argamassas apresentaram ganho de consistência com o aumento do tempo de estabilização. Além disso, no estado endurecido, foi visto que o aumento dos tempos de estabilização não acarretaram mudanças nas resistências à tração na flexão e à compressão, visto que, em geral, as argamassas se mantiveram nas mesmas classes da ABNT NBR 13281:2005.

Já na Etapa 3, por meio da avaliação da cinética da hidratação das argamassas, verificou-se que o prolongamento do tempo até se atingir o pico de calor de hidratação e a redução da temperatura nesse pico, devido à utilização do AEH, são mais intensos na AAN se comparada à AAR100%. Podendo assim, concluir que foi detectada a necessidade de teores mais elevados de AEH nas argamassas com agregado reciclado para se atingir as mesmas intensidades de prolongamento do tempo até o pico de calor de hidratação e de reduções de temperatura nesse pico obtidas pela ANN.

Por fim, baseado nos resultados e discussões desenvolvidas ao longo das três Etapas do programa experimental, verificou-se que apesar dessas modificações motivadas pela substituição da areia natural pela areia reciclada, verificou-se que a AAN e a AAR25% apresentam características semelhantes, visto que se enquadraram nas mesmas classes nos requisitos da ABNT NBR 13281:2005. Além disso, a AAR25% e AAR50% demonstraram-se

adequadas quanto as propriedades mecânicas, assim como a AAN, em relação aos valores obtidos por Bauer *et al.* (2015). Dessa forma, pode-se concluir que a areia reciclada pode ser utilizada na produção de argamassas estabilizadas em teores de substituição de até 50%, dentro das condições de avaliação desse estudo. Coloca-se que a utilização do teor de substituição de até 25% não acarretará em modificações nas propriedades das argamassas estabilizadas. Já a utilização de teores entre 25% e 50%, poderão ocasionar algumas modificações nas propriedades das argamassas, porém se mantendo dentro dos parâmetros de desempenho das argamassas estabilizadas de revestimento de Bauer *et al.* (2015).

### **5.1. Recomendações para Trabalhos Futuros**

- Aprofundamento do estudo da influência da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado em teores inferiores a 25%, para diferentes parâmetros “E” e diferentes tempos de estabilização;
- Estudo do efeito do aditivo estabilizador de hidratação em argamassas estabilizadas com diferentes teores de substituição de agregado natural pelo agregado reciclado;
- Estudo da reologia das argamassas estabilizadas, com e sem agregado reciclado, ao longo dos tempos de estabilização;
- Estudo da retenção de água em argamassas estabilizadas com incremento de finos do agregado reciclado, ao longo dos tempos de estabilização;
- Estudos quanto à microestrutura das argamassas estabilizadas com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado; e
- Estudos quanto à suscetibilidade à fissuração e da resistência potencial de aderência à tração das argamassas estabilizadas com diferentes teores de substituição da areia natural pela areia reciclada.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS - **ASTM C270**. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. EUA 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM. C780**: Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry. USA, 2014.

AMERICAN SOCYETY FOR TESTING END MATERIALS. **ASTM D4648**. Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil. USA, 2013.

AMERICAN SOCYETY FOR TESTING END MATERIALS. **ASTM E1876:2009**;. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. USA, 2009.

ANGELIM, R. R. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento das argamassas de revestimento**. 146p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE) – **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil** - 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: Agregados miúdos - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2009.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7214**: Cimento Portland - Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218**: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 7389-1**: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009.

- \_\_\_\_\_. **NBR 9776:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9917:** Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10908:** Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13529:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Especificação. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 14656:** Cimento Portland e matérias-primas - análise química por espectrometria de raios x - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15258:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos: Rio de Janeiro, 2018.

- BAUER, E.; SOUSA, J. G. G; GUIMARÃES, E. A; SILVA, F. G. S. Study of the laboratory Vane test on mortars. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 86–92, 2007.
- BAUER, E; REGUFFE, M.; NASCIMENTO, M.L. M; CALDAS, L.R. **Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Porto Alegre, RS, 2015.
- BAUER, E.; MOTA, N. M. B.; KRAUS, E.; PEREIRA, C. H. A. F. Rendering mortars consistency and its relationship with water demand and fine particles content. e-mat - **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, v. 3, n. 2, p. 91–102, 2006.
- BRAGA, M.; DE BRITO, J; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction and Building Materials**. v. 36, p. 960–968. 2012.
- BRASIL, **Resolução CONAMA nº 307**, de 5 de julho de 2002 Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, p. 95-96, 2002.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Planos estaduais de resíduos sólidos - orientações gerais** Versão Junho / 2011 Brasília – DF, 2011.
- BUYLE-BODIN, F.; HADJIEVA-ZAHARIEVA, R. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v. 35, p 504-509, 2002.
- CALÇADA, L. M. L.; GAIO, A. E. E RAMOS, M. G. **Estudo da influência da dosagem no tempo de início de pega da argamassa estabilizada**. Seminário de pesquisa extensão e Inovação do IFSC, 2013.
- CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2010.
- CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O; ANGELIM, R. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, vol.64, n.370, p.288-300, 2018.
- CARVALHO JR, A.N. **avaliação da aderência dos revestimentos Argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.
- CASALI, J. M.; MANN NETO, A.; ANDRADE, D. A.; ARRIAGADA, N. T. **Avaliação das propriedades do estado fresco e endurecido da argamassa estabilizada para assentamento e revestimento**. In: IX Simpósio Brasileiro de Argamassas, Minas Gerais, 2011.
- CASSA, J. C. S.; BRUM, I. A. S.; CARNEIRO, A. P.; COSTA, D. B. **Diagnóstico dos setores produtores de resíduos na região metropolitana de Salvador/Bahia**. Capítulo 2. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 312 p., 2001.
- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT. **Certification CSTB desenduits monocouches d'imperméabilisation** – Cahier MERUC. Livraison 341, cahier 2669-3, 1993.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM) **Manual de Agregados para Construção Civil**, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

CHEUNG, J.; JEKNAVORIAN, A.; ROBERTS, L.; SILVA, D. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. **Cement and Concrete Research**. v. 41, Issue 12, p. 1289-1309, 2011.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; SILVA, G. A. C.; GREGÓRIO, G. C.; SOUZA, A. E.; SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 2016.

CORINALDESI, V; MORICONI, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23 p. 289–294, 2009.

CUENCA-MOYANO, G.M.; MARTÍN-MORALES, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; VALVERDE-ESPINOSA, I.; ZAMORANO, M. Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar. **Construction and Building Materials** v. 70, p. 71–79, 2014.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. State-of-the-art on the use of fine recycled aggregates in concrete production. **2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment**, p. 175 – 183, 2011.

EVANGELISTA, L., GUEDES, M., DE BRITO, J., FERRO, A.C., PEREIRA, M. F. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 178–188, 2015.

FAN, C. C.; HUANG, R.; HWANG, H.; CHAO, S.-J. The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of mortar, **Materials**, v. 8 (5), p. 2658– 2672, 2015.

FRITZ, J. S.; GJERDE, D. T. **Ion Chromatography**. 3th ed., Completely revised and enlarged edition. Wiley-vch; 2008.

FUMOTO, T., & YAMADA, M. Influence of the quality of recycled fine aggregate on properties of concrete. **Memoirs of the Faculty of Engineering**, Osaka: Osaka City University. Vol. 43, p. 97–103, 2002.

GIRARDI, A. C. C. **Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de argamassa** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2016.

GOLDSTEIN, J. I., *et al.* **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. Springer; 4th ed, 2018.

HEWLETT P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. Elsevier Science & Technology Books. January, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM) **Informações sobre a economia mineral brasileira – 2015**.



JANTSCH, A.C.A. **Análise da Permeabilidade de Argamassas Estabilizadas Submetidas a Tratamento Superficial com Aditivos Cristalizantes**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

JIMÉNEZ, J. R., AYUSO, J., LÓPEZ, M., FERNÁNDEZ, J. M., DE BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 679–690, 2013.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário de reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. SEMA/CETESB/GESP, 2000.

KARPINSK, A. L. *et al.* **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. EDIPUCRS, Porto Alegre: 2009.

LEDESMA, E.F.; JIMÉNEZ, J.R.; AYUSO, J.; CORINALDESI, V.; IGLESIAS-GODINO, F.J. A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. **Materiales de Construcción**. 66 [321], e075, 2016.

LEDESMA, E. F. *et al.* Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production – Part-I: ceramic masonry waste **Journal of Cleaner Production**, Volume 87, 15, pages 692-706. January 2015.

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

LEITE, M. B.; LIMA, P. R. L.; SANTOS, A. C. Study of the consistence and mechanical behavior of recycled mortars. **2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment**, 2-4, São Paulo, Brazil, December 2009.

LEITE, M. B.; PEDROZO, P. H.; OLIARI, G. F. ALVES, M. F.; DAL MOLIN, D. C. C. Utilização de agregado reciclado de concreto para produção de argamassas. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Anais, p. 1170-1172, Porto Alegre, 2000.

LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B. Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2, p. 53-57, 2012.

LLATAS, C. Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y. BRITO, J. (Ed). **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing Limited. p. 25-52, Cambridge, U.K 2013.

MACIOSKI, G; COSTA, M.M.C; CASALI, J.M. **Caracterização de argamassas estabilizadas submetidas à sucção de substrato poroso**. XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Porto Alegre, 2015.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais** p. 176-188, 2013.

MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVÓN, E.; DÍAZ N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 384-392, 2013.

MARTÍNEZ, P. S., CORTINA, M. G., MARTÍNEZ, F. F., SANCHEZ, A. R. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 162-169, 2016.

MARTÍNEZ, P. S.; GONZÁLEZ-CORTINA, M.; FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, F. Characterization and influence of fine recycled aggregates on masonry mortars properties. **Materiales de ConstruCCión**. 65 [319], e058, 2015.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais** – 2ª edição (português) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade da Califórnia em Berkeley, Estados Unidos, 2014

MESBAHU, H. A.; BUYLE-BODIN, F. Efficiency of polypropylene and metallic fibers on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 439-447, 1999.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 172p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao Desenvolvimento da Produção e Controle de Argamassas de Revestimento com Areia Reciclada Lavada de Resíduos Classe A da Construção Civil**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MIRANDA, L. F. R.; CONSTANTINO, C. S.; MONICH, C. R.; NETO, A. A. M. Use of Recycled Sand Produced at Construction Sites in Bedding Mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**. V. 25 Issue 2 - February 2013.

NOCUN´ -WCZELIK, W. e CZAPIK, P. Use of calorimetry and other methods in the studies of water reducers and set retarders interaction with hydrating cement paste. **Construction and Building Materials** v. 38. P. 980–986, 2013.

OLIVEIRA, V. C. **Estudo Comportamental da Formulação, dos Requisitos e das Propriedades das Argamassas Estabilizadas de Revestimento**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-010A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 245 p., Brasília, DF, 2017.

PAES, I.N.L.; ANDRADE, M.A.S.; ANGELIM, R.R.; HASPARIK, N.P.; OLIVEIRA, R.A.; PASSOS, J.S.; THON, D.G; CARASEK, H. **O efeito de finos calcários nas propriedades da argamassa de revestimento**. III Simpósio Brasileiro de Tecnologias de Argamassas, p. 335- 347. Vitória, ES, 1999.

PAOLINI, M.; KHURANA R. Admixtures for Recycling of Waste Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 221-229, 1998.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado,

Universidade Federal De Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PGECC, Área de Concentração: Construção Civil .Florianópolis, Abril 2008.

PIMENTEL, L.L.; Pissolato Junior, O.; Jacintho, A.E.P.G.A.; Martins, H.L.S. Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas. **Revista Matéria**, v.23, n.1, 2018.

RESENDE, P.S.O. **Efeito do Ar Incorporado em Argamassas de Revestimentos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

RIXON, R.; MAILVAGANAM, N. **Chemical admixtures for concrete**, 3th Ed. E & FN Spon, Londres, 1999.

RODRIGUES, F.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. A New Method to Determine the Density and Water Absorption of Fine Recycled Aggregates. **Materials Research**. v. 16(5), p. 1045-1051, 2013.

SAMIE. R. R. Properties of cement–lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 84, 1, p. 84-94, 2015.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo dos edifícios**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SHAIKH, F. U. A., e MALI, S. Properties of stabilized recycled plastic concretes made with three types of cement. **Structural Concrete**, 17(2), 287–297, 2016.

SHUI, Z.; XUAN, D.; WAN, H; CAO, B. Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. **Construction and Building Materials** v. 22, p. 1723–1729, 2008.

SILVA, E. *et al.* Propriedades de agregados reciclados produzidos a partir de RCD gerado em canteiros de obras de Recife/PE para uso em argamassas. IN: Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, 8., 2009, Curitiba. **ANAIS...**, p. 1-12, Curitiba: UFPR, 2009.

SILVA, N. G **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – PPGCC, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, 2006.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 400–415, 2016.

SOLYMAN, M. **Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures** (Unpublished PhD thesis). Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel. 196 p., Kassel, Germany, 2005.

SONELASTIC.- **Guia de Instruções de Medição com o Sonelastic® para: Amostras de Concreto Cilíndricas**. ATCP Engenharia Física. São Carlos – Brasil.

SONELASTIC. - **Informativo Técnico-Científico ITC04. Amortecimento: classificação e métodos de determinação.** ATCP Engenharia. Física. São Carlos – Brasil.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao Estudo das Propriedades das Argamassas de Revestimento no Estado Fresco.** Tese de Doutorado, Publicação E.TD 010A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 233p. Brasília, DF, 2005.

TREVISOL JR., L.A. **Estudo Comparativo entre as Argamassas: Estabilizada Dosada em Central, Industrializada e Produzida em Obra por meio de Ensaio Físicos nos Estados Fresco e Endurecido.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento (Institutos Lactec), Curitiba, 2015.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1168–1173, 2013.

VEGAS, I. *et al.* Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates. **Mater. Constr.** 95 (295), 5 e 18, 2009.

VEIGA, M. R. **Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação.** Tese de doutoramento pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Lisboa, 1998.

WEISS; J. **Ion Chromatography**, 3a. Ed., John Wiley and Sons, Inc., 2005.

ZEGA, C. J.; DI MAIO, A. A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. **Waste Management**, v. 31, p. 2336–2340, 2011.

## APÊNDICE A – Composição das areias por faixa granulométrica

Massa das areias em cada faixa granulométrica, em gramas

Peneiras (mm)	% Retida média (NATURAL)	Teores de Substituição							
		0%	25%		50%		75%		100%
		Natural	Natural	Reciclada	Natural	Reciclada	Natural	Reciclada	Reciclada
1,2	0,22%	3,69	2,77	0,92	1,85	1,85	0,92	2,77	3,69
0,6	4,00%	68,54	51,40	17,13	34,27	34,27	17,13	51,40	68,54
0,3	25,50%	437,11	327,83	109,28	218,55	218,55	109,28	327,83	437,11
0,15	62,08%	1.063,99	797,99	266,00	532,00	532,00	266,00	797,99	1.063,99
0,075	6,37%	109,11	81,84	27,28	54,56	54,56	27,28	81,84	109,11
FUNDO	1,84%	31,56	23,67	7,89	15,78	15,78	7,89	23,67	31,56
Total por areia	1,00	1.714,00	1.285,50	428,50	857,00	857,00	428,50	1.285,50	1.714,00
TOTAL		1.714,00	1.714,00		1.714,00		1.714,00		1.714,00

## APÊNDICE B – Água de compensação

Água de compensação

	Teores de substituição				
	0%	25%	50%	75%	100%
Massa total de areia reciclada (g)	0,00	428,50	857,00	1285,50	1714,00
Água de compensação (g)	0,00	17,28	34,55	51,83	69,11

## APÊNDICE C – Resultados no Estado Fresco

Argamassas	Tempo (h)	Massa Especifica (Kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)	Índice de consistência (mm)	Cone (mm)	Tensão limite de escoamento (Pa)	Retenção de água (%)
AAN	0,5	1814	16	271	60	569,50	66
	0,5	1834	15	263	61		67
	0,5	-	-	264	-		-
	3	1839	15	254	56	640,69	-
	3	1847	14	255	57		-
	3	-	-	262	-		-
	6	1864	14	242	56	711,88	-
	6	1863	14	235	54		-
	6	-	-	232	-		-
	8	1865	14	230	54	747,47	-
	8	1865	14	232	55		-
	8	-	-	231	-		-
Aar25%	0,5	1787	17	267	68	498,31	66
	0,5	1802	17	266	66		55
	0,5	-	-	281	-		-
	3	1799	17	277	63	498,31	-
	3	1816	16	278	63		-
	3	-	-	279	-		-
	6	1809	16	270	60	569,50	-
	6	1812	16	263	61		-
	6	-	-	269	-		-
	8	1814	16	259	55	605,10	-
	8	1832	15	263	53		-
	8	-	-	262	-		-
AA50%	0,5	1751	19	282	67	391,53	67
	0,5	1764	18	281	69		55
	0,5	-	-	284	-		-
	3	1756	19	275	65	462,72	-
	3	1768	18	283	63		-
	3	-0	-	285	-		-
	6	1776	18	268	59	498,31	-
	6	1772	18	272	60		-
	6	-	-	282	-		-
	8	1786	17	272	58	569,50	-
	8	1772	18	268	57		-
	8	-	-	265	-		-

AAR75%	0,5	1715	21	274	65	355,94	68
	0,5	1737	20	277	67		50
	0,5	-	-	286	-		-
	3	1739	19	272	60	533,91	-
	3	1742	19	281	61		-
	3	-	-	279	-		-
	6	1739	19	271	59	569,50	-
	6	1751	19	273	56		-
	6	-	-	266	-		-
	8	1746	19	261	53	605,10	-
	8	1758	19	262	51		-
	8	-	-	270	-		-
AAR100%	0,5	1668	23	291	66	391,53	66
	0,5	1674	22	292	65		61
	0,5	-	-	287	-		-
	3	1709	21	287	60	498,31	-
	3	1713	21	282	60		-
	3	-	-	279	-		-
	6	1726	20	279	58	569,50	-
	6	1721	20	271	60		-
	6	-	-	270	-		-
	8	1727	20	269	59	640,69	-
	8	1718	20	264	57		-
	8	-	-	257	-		-

## APÊNDICE D – Resultados Estado Endurecido

### Densidade no estado endurecido

Argamassas	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade Média (kg/m <sup>3</sup> )
ANN	1641	1620
	1615	
	1605	
AAR25%	1590	1581
	1576	
	1575	
AAR50%	1523	1522
	1523	
	1520	
AAR75%	1485	1483
	1493	
	1473	
AAR100%	1393	1391
	1410	
	1370	

### Resistência à Compressão

Argamassas	Tempo (h)	Resistência à Compressão Individual (MPa)	Resistência à Compressão Média (MPa)	Desvio máximo (MPa)
AAN	0,5	6,23	6,7	0,48
	0,5	7,08		-0,37
	0,5	7,04		-0,32
	0,5	6,74		-0,03
	0,5	6,61		0,10
	0,5	6,56		0,15
	3	7,35	6,9	-0,46
	3	6,67		0,23
	3	6,74		0,16
	3	6,66		0,24
	3	7,07		-0,17
	3	7,69*		-
	6	7,35	7,3	-0,07
	6	7,16		0,11
	6	7,18		0,10
	6	7,35		-0,07
	6	7,45		-0,18
	6	7,16		0,11



AAN	8	6,61	6,2	-0,38
	8	6,12		0,11
	8	6,24		-0,01
	8	6,23		-0,01
	8	6,21		0,02
	8	5,95		0,28
AAR25%	0,5	5,40	5,6	0,17
	0,5	5,40		0,17
	0,5	5,97		-0,40
	0,5	5,52		0,05
	0,5	5,58		-0,01
	0,5	5,55		0,02
	3	6,01	6,0	-0,04
	3	5,74		0,23
	3	6,04		-0,07
	3	6,03		-0,06
	3	6,04		-0,07
	3	6,72*		-
	6	5,66	5,8	0,11
	6	5,54		0,22
	6	5,66		0,10
	6	5,73		0,03
	6	5,89		-0,13
	6	6,10		-0,34
	8	5,66	5,9	0,27
	8	5,98		-0,05
8	6,23	-0,30		
8	6,29	-0,36		
8	5,52	0,41		
8	5,90	0,03		
AAR50%	0,5	5,31	5,4	0,13
	0,5	5,34		0,11
	0,5	5,64		-0,19
	0,5	5,45		-0,01
	0,5	5,31		0,13
	0,5	5,62		-0,17
	3	5,06	5,0	-0,07
	3	4,69		0,30
	3	5,16		-0,17
	3	5,16		-0,17
	3	4,69		0,30
	3	5,18		-0,19

AAR50%	6	4,77	5,2	0,39
	6	5,19		-0,02
	6	5,22		-0,05
	6	5,22		-0,06
	6	5,49		-0,32
	6	5,11		0,05
	8	4,78	4,8	0,04
	8	5,03		-0,21
	8	4,92		-0,10
	8	4,52		0,30
	8	4,90		-0,08
	8	4,78		0,04
AAR75%	0,5	3,48	3,8	0,35
	0,5	3,88		-0,05
	0,5	4,03		-0,20
	0,5	3,87		-0,05
	0,5	3,71		0,12
	0,5	4,00		-0,17
	3	4,53	4,3	-0,25
	3	4,28		0,00
	3	4,36		-0,08
	3	4,47		-0,19
	3	3,78		0,50
	3	4,25		0,02
	6	4,25	4,3	0,09
	6	4,46		-0,12
	6	4,38		-0,04
	6	4,44		-0,10
	6	4,14		0,20
	6	4,37		-0,03
	8	4,49	4,1	-0,38
	8	4,06		0,05
	8	4,28		-0,16
	8	3,97		0,14
	8	4,00		0,12
	8	3,89		0,22
AAR100%	0,5	3,35	3,6	0,29
	0,5	3,79		-0,15
	0,5	3,32		0,32
	0,5	3,56		0,08
	0,5	3,97		-0,33
	0,5	3,85		-0,21

AAR100%	3	3,63	3,7	0,04
	3	3,86		-0,19
	3	3,51		0,16
	3	3,45		0,22
	3	3,94		-0,27
	3	3,63		0,04
	6	3,93	3,8	-0,10
	6	3,74		0,09
		3,70		0,14
	6	4,12		-0,29
	6	3,51		0,32
	6	3,98		-0,15
	8	3,46	3,3	-0,14
	8	3,14		0,17
	8	3,36		-0,05
	8	3,59		-0,28
	8	3,18		0,13
	8	3,14		0,17

\* - Valores não considerados na resistência à compressão média. Desvio maior que 0,5 MPa.

#### Resistência à Tração na Flexão e à Compressão

Argamassas	Tempo (h)	Resistência à Tração na Flexão Individual (MPa)	Resistência à Tração na Flexão Média (MPa)	Desvio máximo (MPa)
AAN	0,5	2,00	2,0	-0,04
	0,5	1,93		0,03
	0,5	1,95		0,01
	3	1,95	2,1	0,19
	3	2,20		-0,05
	3	2,29		-0,14
	6	2,36	2,5	0,12
	6	2,38		0,10
	6	2,69		-0,22
	8	1,62	1,6	0,01
	8	1,53		0,10
	8	1,73		-0,10
AAR25%	0,5	2,02	2,0	-0,04
	0,5	1,88		0,09
	0,5	2,02		-0,04
	3	1,82	1,9	0,07
	3	1,93		-0,04
	3	1,93		-0,04

AAR25%	6	1,82	1,8	0,02
	6	1,93		-0,09
	6	1,77		0,07
	8	2,13	2,0	-0,13
	8	1,95		0,04
	8	1,91		0,09
AAR50%	0,5	1,75	1,8	0,07
	0,5	1,71		0,12
	0,5	2,02		-0,19
	3	1,66	1,6	-0,06
	3	1,50		0,10
	3	1,64		-0,04
	6	1,64	1,7	0,06
	6	1,82		-0,12
	6	1,64		0,06
	8	1,68	1,6	-0,09
	8	1,57		0,02
	8	1,53		0,07
AAR75%	0,5	1,35	1,4	0,02
	0,5	1,46		-0,09
	0,5	1,30		0,07
	3	1,57	1,6	-0,01
	3	1,66		-0,10
	3	1,46		0,10
	6	1,57	1,5	-0,08
	6	1,46		0,03
	6	1,44		0,05
	8	1,55	1,5	-0,06
	8	1,37		0,12
	8	1,55		-0,06
AAR100%	0,5	1,21	1,3	0,10
	0,5	1,39		-0,07
	0,5	1,35		-0,03
	3	1,30	1,3	0,04
	3	1,37		-0,03
	3	1,35		-0,01
	6	1,17	1,2	0,02
	6	1,14		0,04
	6	1,26		-0,07
	8	0,94	1,0	0,08
	8	1,19		-0,16
	8	0,94		0,08

Módulo de elasticidade dinâmico – Modo de Vibração Flexural e Longitudinal

Argamassas	E flex (GPa)	E flex Média (GPa)	E Long (GPa)	E Long Média (GPa)
AAN	11,42	11,47	1,97	1,93
	10,91*		2,01	
	10,89*		1,97	
	11,51		1,86	
	11,45		1,87	
	11,48		1,89	
AAR25%	10,23	10,27	1,7	1,75
	10,11*		1,74	
	10,22		1,75	
	10,33		1,74	
	10,29		1,75	
	10,30		1,82	
AAR50%	8,24*	8,86	1,52	1,51
	8,62		1,54	
	8,64		1,49	
	9,09		1,52	
	9,18*		1,45	
	9,09		1,52	
AAR75%	8,10	8,13	1,36	1,35
	8,14		1,36	
	8,13		1,34	
	8,49*		1,37	
	8,18		1,33	
	8,11		1,36	
AAR100%	5,90*	6,76	5,92	5,93
	6,19		5,93	
	6,17		5,93	
	7,16		6,01	
	7,15		5,88	
	7,14		6,15	

\* - Valores não considerados na média final devido apresentarem desvio maior que o desvio padrão.

### Absorção de Água por Capilaridade

Argamassas	Absorção de água (g/cm <sup>2</sup> )						
	5 mim	10min	20min	40min	60min	90min	120min
AAN	0,11	0,16	0,21	0,29	0,34	0,40	0,45
	0,11	0,15	0,20	0,27	0,32	0,38	0,43
	0,12	0,16	0,22	0,29	0,34	0,40	0,44
AAR25%	0,18	0,24	0,32	0,41	0,48	0,57	0,65
	0,19	0,26	0,34	0,45	0,53	0,62	0,69
	0,20	0,27	0,34	0,44	0,52	0,61	0,68
AAR50%	0,25	0,34	0,44	0,58	0,68	0,79	0,88
	0,27	0,36	0,47	0,62	0,72	0,83	0,92
	0,23	0,31	0,40	0,53	0,62	0,73	0,81
ARR75%	0,26	0,36	0,47	0,64	0,75	0,88	0,98
	0,28	0,38	0,50	0,66	0,77	0,90	1,00
	0,29	0,39	0,51	0,68	0,79	0,92	1,02
AAR100%	0,34	0,48	0,65	0,88	1,05	1,24	1,40
	0,34	0,48	0,64	0,86	1,02	1,21	1,35
	0,35	0,49	0,65	0,88	1,04	1,22	1,37

### Coeficientes de médios de capilaridade

Argamassas	Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>3</sup> . min <sup>1/2</sup> )	Desvio relativo máximo (%)	Coeficiente médio de capilaridade (g/dm <sup>3</sup> . min <sup>1/2</sup> )	Desvio relativo máximo (%)	Novo Coeficiente médio de capilaridade (g/dm <sup>3</sup> . min <sup>1/2</sup> )
AAN	3,9	-0,1	3,7	-	-
	3,6	0,1		-	
	3,7	0,0		-	
AAR25%	5,3	0,1	5,5	-	-
	5,7	-0,2		-	
	5,4	0,0		-	
AAR50%	7,2	-0,1	7,1	0,1	7,4
	7,5	-0,3		-0,1	
	6,7*	0,4		-	
AAR75%	8,3	0,1	8,4	-	-
	8,3	0,1		-	
	8,5	-0,2		-	
AAR100%	12,2*	-0,3	11,9	-	11,7
	11,7	0,2		0,1	
	11,8	0,1		-0,1	

\*- Valores com desvio relativo superior à 20%. Segunda a ABNT NBR 15259:2005, esses valores devem ser desconsiderados e realizado o cálculo de uma nova média.

Varição dimensional e Variação de massa

Argamassas	Idades (dias)	Varição - $\xi$ (mm/m)	Varição Média - $\xi$ (mm/m)	Desvio Máximo (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição Média de massa (%)
AAN	1	0,080	0,12	0,0	-2,2	-2,3
		0,156		0,0	-2,4	
	7	0,724	0,67	-0,1	-7,6	-8
		0,624		0,1	-7,5	
	28	0,828	0,88	0,1	-7,8	-8,0
		0,936		-0,1	-8,1	
AAR25%	1	-0,668	-0,67	0,0	-1,2	-1,2
	7	-0,148	-0,15	0,0	-2,9	-2,9
	28	0,644	0,64	0,0	-8,0	-8,0
AAR50%	1	-0,028	-0,02	0,0	-1,7	-1,5
		-0,008		0,0	-1,3	
	7	0,028	0,05	0,0	-4,1	-4,3
		0,064		0,0	-4,5	
	28	0,744	0,88	0,1	-9,3	-9,4
		1,020		-0,1	-9,5	
AAR75%	1	0,004	0,25	0,2	-2,8	-5,9
		0,492		-0,2	-9,1	
	7	0,760	0,81	0,0	-9,9	-10,9
		0,860		0,0	-11,8	
	28	1,592	1,36	-0,2	-10,6	-11,5
		1,128		0,2	-12,3	
AAR100%	1	0,076	0,07	0,0	-3,7	-3,15
		0,056		0,0	-2,7	
	7	0,192	0,29	0,1	-9,4	-7,93
		0,384		-0,1	-6,4	
	28	0,912	1,08	0,2	-11,3	-12,37
		1,252		-0,2	-13,4	

Resistência Potencial de Aderência à Tração – AAR75%

Corpo de prova nº	Carga (N)	Seção (mm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Forma de ruptura (%)			
					S	S/A	A	F
1	2160	2205	0,98	0,97		85	15	
2	1840	2205	0,83				95	5
3	2885	2123	1,36*			85	15	
4	1845	2375	0,78			95	5	
5	2680	2205	1,22				95	5
6	2335	2205	1,06			85	15	
7	2100	2205	0,95				95	5
8	2355	2205	1,07				95	5
9	1930	2289	0,84				100	
10	1995	2289	0,87**					100

\* - desvio maior que o permitido por norma.

\*\* - falha de na colagem da peça metálica.

Resistência Potencial de Aderência à Tração – AAR100%

Corpo de prova nº	Carga (N)	Seção (mm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Forma de ruptura (%)			
					S	S/A	A	F
1	1730	2205	0,78	0,86			60	40
2	2075	2375	0,87			85	15	
3	2050	2205	0,93				70	30
4	1755	2375	0,74			85	15	
5	2045	2375	0,86			85	15	
6	1910	2289	0,83			85	15	
7	1775	2123	0,84				70	30
8	2200	2123	1,04				60	40
9	2240	2375	0,94			85	15	
10	1700	2123	0,80				60	40



## **APÊNDICE E – Ensaios**

### **Método de ensaio – Caracterização das Areias**

#### ***Determinação da composição granulométrica***

Os ensaios de determinação da composição granulométrica foram realizados de acordo com as recomendações da ABNT NBR NM 248/2003. Utilizou-se a série normal de peneiras (4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 0,600mm; 0,300mm; 0,150mm) adicionando a peneira de 0,075mm à série.

O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

- Secar uma amostra em estufa a temperatura de  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ , após a secagem esfriar a amostra em temperatura ambiente;
- Dividir a amostra em duas amostras menores e determinar suas massas ( $m_1$  e  $m_2$ ). Cada amostra deve possuir massa superior a 300g;
- Colocar a amostra sobre a peneira superior do conjunto;
- Promover a agitação mecânica do conjunto;
- Determinar a massa de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto.

Plotando os valores das porcentagens retidas em cada peneira pela abertura das peneiras, obtém-se a curva de distribuição granulométrica do material.

#### ***Determinação do material fino que passa através da peneira 75 $\mu\text{m}$ , por lavagem***

O ensaio seguiu as recomendações da ABNT NBR MN 46/2003- Procedimento A. A determinação do material fino passante na peneira 75  $\mu\text{m}$  foi realizada da seguinte forma:

- Secar uma amostra de 500g de material em estufa a  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ ;
- Determinar a massa seca da amostra ( $m_i$ );
- Colocar a amostra e um béquer e cobri-la com água;
- Agitar a amostra vigorosamente para a separação das partículas mais finas que 75  $\mu\text{m}$ ;
- Verter a amostra sobre a peneira de 75  $\mu\text{m}$ . Repetir a operação até que a água do béquer se apresentasse isenta de turbidez.

- Na sequência, transferir o material retido na peneira para um recipiente e levar à estufa a temperatura de  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$  por 24h;
- Após esse período, determinar a massa seca ( $m_f$ ) do material retido na de  $75\mu\text{m}$ .

O percentual do material ( $m$ ) retido na peneira de  $75\mu\text{m}$  foi determinado pela Equação 1.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (1)$$

### ***Determinação da massa específica do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman***

Para a determinação da massa específica dos agregados foi realizado o ensaio descrito na ABNT NBR 9776:1987. O ensaio foi realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

- Secar uma amostra do agregado miúdo em estufa a temperatura de  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ , após a secagem esfriar a amostra em temperatura ambiente;
- Preencher o frasco de Chapman com água até a marca de 200ml;
- Adicionar 500g da amostra de agregado miúdo seco em estufa;
- Agitar o frasco de forma que as bolhas de ar aprisionado sejam eliminadas;

Após deixar o frasco em repouso realizou-se a leitura do frasco e a massa específica foi calculada pela seguinte Equação 2:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (2)$$

Sendo:

- $\gamma$ : massa específica do agregado em gramas por centímetro quadrado;
- L: a leitura do frasco em milímetros.

A massa específica adotada é a média das duas obtidas na fórmula.

- Encher o frasco até a marca de 500 ml, movendo-o, a fim de eliminar as bolhas de ar.
- Em seguida, colocar o frasco em um banho de água por 1 h, no momento do banho a temperatura do banho e do ar serão registradas.
- Após este período, completar a água até a marca de 500  $\text{cm}^3$  e determinar a massa total do conjunto ( $m_2$ );

- Retirar o material do frasco e secá-lo a temperatura de  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$  até manter a massa constante.
- Esfriar a amostra a temperatura ambiente em um dessecador;
- Pesar a massa da amostra seca em estufa (m).

Por meio de cálculos simples foram obtidos os valores da massa específica aparente, da massa específica SSS e da massa específica do material a ser ensaiado.

#### ***Determinação da massa unitária e do volume de vazios***

Para determinação destas propriedades, foi utilizado o Método C proposto na ABNT NBR NM 45/2006. A realização do ensaio seguiu os seguintes procedimentos:

- Determinar a massa ( $m_r$ ) do recipiente padrão prescrito pela norma de volume V;
- Encher o recipiente até que o mesmo transborde, despejando o material, previamente seco a temperatura de  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ , de uma altura máxima de 50 mm acima da borda superior do recipiente;
- Rasar a camada superficial com o auxílio de uma régua metálica;
- Determinar a massa ( $m_{ar}$ ) do conjunto recipiente + material.

A massa unitária ( $\rho_{ap}$ ) foi determinada pela Equação 3.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (3)$$

O resultado adotado foi a média de duas determinações da massa unitária pelo método C.

A NM 45/2006 apresenta ainda a Equação 4 para a determinação da massa unitária na condição saturado e superfície seca (SSS) utilizando a massa unitária ( $\rho_{ap}$ ) e a absorção (A) do material.

$$\rho_{as} = \rho_{ap} \left[ 1 + \frac{A}{100} \right] \quad (4)$$

E a Equação 5 para determinação do índice de volume de vazios nos agregados.

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

Onde:

- $E_v$  – índice de volume de vazios nos agregados (%);
- $d_1$  – massa específica relativa do agregado seco, determinada conforme as NM 52 e N53;
- $\rho_w$  – massa específica de água ( $\text{kg/m}^3$ );
- $\rho_{ap}$  – massa unitária média do agregado ( $\text{kg/m}^3$ ).

### ***Absorção de água***

O ensaio de absorção foi realizado de acordo com as recomendações da ABNT NBR NM 30/2001 - Determinação da absorção de água dos agregados miúdos. A sua execução foi realizada de acordo com os seguintes procedimentos:

- Secar uma amostra de 1 kg de material em estufa por 24h à temperatura de  $(105\pm 5)^\circ\text{C}$ ;
- Após a secagem, cobrir a amostra com água, deixando-a descansar por 24 h. Após este período, retirar a amostra da água e estende-la em uma bandeja plana;
- Em seguida, aplicar uma suave corrente de ar quente com o auxílio de um secador de cabelo. Para assegurar uma secagem uniforme, a amostra será revirada com frequência;
- Na sequência, colocar uma quantidade de material num tronco de cone, sem comprimi-lo, em seguida, aplicar 25 golpes com a haste de compactação e remover verticalmente o molde;
- Se houver umidade superficial, o material se conservará na forma do molde. Neste caso, continuar a secagem com o auxílio de um secador de cabelos até que o material desmoronasse ao ser retirado o molde. Neste momento, o agregado estará na condição de saturado superfície seca (sss);
- Em seguida, determinar a massa do material na condição saturado superfície seca (sss).

O valor da absorção de água do agregado será determinado pela Equação 6.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

- $A$  – absorção de água (%);
- $m_s$  – massa da amostra na condição saturado superfície seca (g);

- m – massa da amostra seca em estufa (g);

### ***Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis***

Os ensaios foram realizados seguindo as recomendações da ABNT NBR 7218/2010. O teor de argila em torrões e materiais friáveis foi determinado de acordo com as seguintes etapas:

- Espalhar uma amostra de 200g ( $m_i$ ) de material, previamente seco em estufa a temperatura de  $(105\pm 5)^\circ\text{C}$  por 24 horas, passante na peneira de 4,75mm e retido na peneira de 1,18mm, em uma bandeja formando uma camada delgada de material;
- Cobrir a amostra com água, permanecendo em repouso por 24h;
- Após este período, identificar e dismantelar, com os dedos, os torrões de argila ou materiais friáveis;
- Transferir essa amostra para a peneira com abertura de 600 $\mu\text{m}$  e realizar o peneiramento via úmida, a fim de remover a argila e os materiais friáveis.
- Transferir o material retido na peneira e seca-lo em estufa a temperatura de  $(105\pm 5)^\circ\text{C}$  por 24 horas;
- Após a secagem e resfriamento do material, determinar a massa do material retido ( $m_f$ ).

O percentual de torrões de argila e material friável ( $m_t$ ) presente na areia foram determinado pela seguinte Equação 7:

$$m_t = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (7)$$

### **Métodos de ensaios das argamassas estabilizadas no estado fresco**

Nesta seção serão apresentados os procedimentos dos ensaios realizados com as argamassas no estado fresco.

#### ***Determinação da densidade de massa***

A ABNT NBR 13278:2005 apresenta as seguintes etapas para a determinação da densidade de massa da argamassa no estado fresco:

- Determinar a massa de três recipientes cilíndricos de volume conhecido ( $M_{\text{recip}}$ );

- Preencher os três recipientes cilíndricos em três camadas de argamassa de mesmas alturas, aplicando 20 golpes, uniformemente distribuídos, por camada com espátula metálica;
- Rasar a superfície da argamassa, rente à superfície dos recipientes, com o auxílio de uma espátula metálica;
- Determinar a massa dos conjuntos recipiente + argamassa ( $M_{conj}$ ).

O cálculo da densidade de massa ( $D$ ) foi realizado por meio da relação entre a diferença de massa entre o conjunto ( $M_{conj}$ ) e o recipiente ( $M_{recip}$ ); e o volume do recipiente ( $V_{recip}$ ), conforme demonstra a Equação 8:

$$D = \frac{M_{conj} - M_{recip}}{V_{recip}} \times 100 \quad (9)$$

A densidade foi considerada a média de duas determinações consecutivas, realizadas em amostras diferentes de uma mesma argamassa, após os 30 minutos do preparo. A densidade da argamassa no estado fresco é expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) e arredondada ao número inteiro mais próximo.

#### ***Determinação do teor de ar***

O ensaio de determinação do teor de ar incorporado também é descrito pela ABNT NBR 13278:2005. O teor de ar expresso é determinado pela relação entre a densidade de massa no estado fresco ( $D$ ) e o valor da densidade teórica da argamassa ( $d_t$ ), representada na Equação 10. A densidade teórica, por sua vez, foi obtida a partir da razão entre a soma das massas e a soma dos volumes absolutos dos insumos das argamassas.

$$A = 100 \times \left( 1 - \frac{D}{d_t} \right) \quad (10)$$

Para a avaliação do teor de ar incorporado, foi adotado como resultado a média de duas determinações, após os 30 minutos do preparo.

#### ***Índice de consistência***

O ensaio de índice de consistência foi realizado segundo a ABNT NBR 13276:2005, com o objetivo de determinar a consistência da argamassa por meio do espalhamento da argamassa sobre uma mesa padronizada. Os procedimentos para a realização do ensaio são:

- Limpar o tampo da mesa do ensaio de consistência e a parede do molde tronco-cônico com um pano úmido;
- Centralizar o molde tronco-cônico sobre a mesa;
- Preencher o molde em três camadas de argamassa, de mesmas alturas, aplicando-se 15, 10 e 5 golpes com soquete padronizado, distribuídos uniformemente, na primeira, segunda e terceira camada, respectivamente;
- Rasar a superfície da argamassa, rente à superfície do molde, com o auxílio de uma régua metálica e limpeza da mesa ao redor do molde;
- Retirar o molde e acionar a manivela do aparelho, de forma que a mesa suba e caia 30 vezes em aproximadamente 30 segundos;
- Realizar três medições dos diâmetros do espalhamento da argamassa com o auxílio de um paquímetro.

O índice de consistência das argamassas corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo.

#### ***Método da penetração de cone***

O método da penetração do cone, prescrito pela norma ASTM C780:2014, visa mensurar a consistência das argamassas por meio da resistência à penetração de um cone metálico, de dimensões e massa padronizadas, sob ação da gravidade.

Esse ensaio foi utilizado para controle da consistência das argamassas, devido já ser consagrado em diversas pesquisas (SOUSA, 2005; BAUER *et al.*, 2006; BAUER *et al.*, 2007). Os procedimentos para execução desse ensaio são:

- Preencher três recipientes cilíndricos em três camadas de argamassa de mesmas alturas, aplicando 20 golpes, uniformemente distribuídos, por camada com espátula metálica;
- Rasar a superfície da argamassa, rente à superfície do recipiente, com o auxílio de uma espátula metálica;
- Posicionar o cone rente à superfície da argamassa e zerar a leitura inicial;
- Liberar o cone em queda livre, levando a penetração na argamassa devido à ação da gravidade;
- Realizar a leitura da profundidade da penetração após 30 segundos.

O ensaio fornece como resultado uma avaliação indireta da consistência das argamassas por meio da profundidade de penetração do cone, expressa em milímetros.

Foi adotado como resultado a média de duas determinações realizadas em amostras diferentes de uma mesma argamassa, após os 30 minutos do preparo.

#### ***Determinação da tensão limite de escoamento pelo ensaio de Vane Test***

A avaliação da tensão limite de escoamento das argamassas foi realizada conforme os procedimentos da ASTM D4648:2013. Utilizou-se no ensaio o *Vane Test* o equipamento de bancada de fabricação da Wykeham Farrance Engineering, equipado com uma mola de torção com constante de mola 0,023 kg.cm/grau. Utilizou-se uma palheta em cruz com altura de 51 mm e largura 26 mm.

A realização deste ensaio seguirá os procedimentos descritos a seguir:

- Preencher um recipiente cilíndrico em três camadas de argamassa de mesmas alturas, aplicando 20 golpes, uniformemente distribuídos, por camada com espátula metálica;
- Em seguida, cravar uma paleta, com duas lâminas em cruz, na amostra, de forma que a mesma transpasse um valor igual ao de seu diâmetro;
- Aplicar manualmente o torque por meio de uma manivela. As rotações da manivela não devem ultrapassar a velocidade de 0,1 RPM (aproximadamente 60 a 90 °/min);
- Na sequência, registrar o momento do escoamento. Esse registro ocorrerá quando o ponteiro de marcação do torquímetro, em graus, pare de girar.

O resultado obtido no ensaio, em graus, será multiplicado pela constante da mola para se determinar o torque máximo, como apresentado na Equação 11.

$$T_m = k.LT. 0,098 \quad (11)$$

Onde:

- $T_m$  =Torque máximo (N.m);
- $k$ = constante da mola (kg.cm/grau);
- $LT$  = leitura do torquímetro (graus).

O torque máximo será utilizado para determinar a tensão limite de escoamento por meio da Equação 12.



$$\tau_0 = \frac{T_m}{\frac{\pi \cdot D^3}{2} \left( \frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)} \quad (12)$$

Onde:

- $\tau_0$  = tensão limite de escoamento ou resistência ao cisalhamento (kPa);
- D = diâmetro da palheta (m) = 26mm;
- H = altura da palheta (m) = 51mm.

A tensão limite de escoamento será adotada pelo valor de uma medição, após os 30 minutos do preparo.

### ***Índice de retenção de água***

O ensaio de índice de retenção de água foi realizado pelo método do Funil de Büchner conforme procedimento da ABNT NBR 13277:2005. Os equipamentos e acessórios utilizados para realização do ensaio de retenção de água foram funil de Büchner modificado marca SOLOTEST, bomba de vácuo e balança digital com precisão 0,01g. Realizou-se o ensaio de acordo com os seguintes procedimentos:

- Posicionar o prato sobre o funil;
- Umedecer o papel-filtro, colocando-o sobre o fundo do prato;
- Acionar a bomba de vácuo aplicando-se ao conjunto prato e papel filtro úmido uma pressão de sucção de 51mmHg durante 90 segundos, pesando em seguida o conjunto determinando a massa  $M_v$ ;
- Preencher o prato com argamassa até um pouco acima da borda, adensando-a com 37 golpes de soquete, 16 golpes junto à borda e 21 golpes no centro, de forma a se garantir o preenchimento uniforme do prato;
- Rasar a superfície da argamassa, como auxílio de uma régua metálica num movimento do centro para a borda, e limpeza da borda do conjunto, aferindo-se logo depois a sua massa ( $M_a$ );
- Acionar a bomba de vácuo, aplicando-se ao conjunto uma pressão de sucção de 51 mmHg durante 15 minutos;
- Registrar a massa do conjunto ( $M_s$ ).

O valor da retenção de água  $R_a$  será determinado pela Equação 13.

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(M_a - M_s)}{AF \times (M_a M_v)} \right] \times 100 \quad (13)$$

O termo AF (fator água/argamassa fresca) é representado na Equação 14.

$$AF = \frac{M_w}{M + M_w} \quad (14)$$

Os termos AF,  $M_w$  e M da Equação 13 são respectivamente o fator água/argamassa fresca, a massa total de água utilizada na mistura da argamassa e a massa dos insumos anidros da argamassa.

A retenção de água será adotada como a média de duas determinações, após os 30 minutos do preparo.

### **Moldagem dos corpos de prova das argamassas estabilizadas**

#### ***Moldagens dos corpos de prova para os ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e coeficientes de capilaridade***

Para a realização dos ensaios no estado endurecido se faz necessário a moldagem de corpos de prova. As geometrias dos corpos de prova que foram utilizados nos ensaios no estado endurecido foram:

- Resistência à tração na flexão - Foram empregados três corpos de prova prismáticos com seção de 4 cm de largura x 4 cm de altura x 16 cm de comprimento;
- Resistência à compressão - Os corpos de prova ensaiados à compressão foram os corpos de prova do ensaio à tração na flexão (seis metades dos prismas de 4x4x16cm).
- Módulo de elasticidade dinâmico – Na realização desse ensaio foram utilizados três corpos de prova prismáticos com seção de 4 cm de largura x 4 cm de altura x 16 cm de comprimento.
- Absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade – Nesse ensaio foram empregados três corpos de prova prismáticos com seção de 4 cm de largura x 4 cm de altura x 16 cm de comprimento.

As moldagens dos corpos de prova seguiram os procedimentos prescritos na norma ABNT NBR 13279:2005:

Foram moldados três corpos de prova prismáticos, utilizando-se forma prismática 4x4x16 cm tripla. A argamassa foi introduzida diretamente no molde com o auxílio da niveladora. Em seguida, foram aplicadas 30 quedas, realizadas através de uma mesa de adensamento mecânico. Logo depois, introduziu-se argamassa para a formação da segunda camada e foram aplicadas as 30 quedas na mesa de adensamento; Após a segunda camada, o molde foi rasado com o auxílio de uma régua metálica;

Após a moldagem, os prismas foram acondicionados em saco plástico hermético mantendo-o nesta condição até a desforma, a qual ocorreu após 48 horas.

Posteriormente a desforma, os prismas foram acondicionados em ambiente com  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  e UR  $(60\pm 5)\%$  até o momento da realização dos ensaios.

### ***Moldagens dos corpos de prova para a realização dos ensaios de variação dimensional***

Para a realização do ensaio de variação dimensional foram moldados corpos de prova prismáticos com 25x25x250 mm. As moldagens seguiram os seguintes procedimentos:

- Efetuar a moldagem de três prismas, em forma tripla de 25x25x250mm, em duas camadas, aplicando-se 25 golpes utilizando um soquete de plástico com 150 mm de comprimento e faces de 13 mm e 25 mm;
- Após a execução das duas camadas, rasar o molde para retirar o excesso de argamassa;
- Em seguida, acondicionar o conjunto em saco plástico hermético por 48 horas. Após esse período desformar os corpos de prova.

## **Métodos de ensaios das argamassas estabilizadas no estado endurecido**

### ***Densidade de massa no estado endurecido***

O ensaio de determinação da densidade de massa no estado endurecido foi realizado conforme as prescrições da ABNT NBR 13280:2005 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido). O ensaio foi realizado seguindo os seguintes procedimentos:

- Após 28 dias da moldagem dos prismas, realizar medição das dimensões (altura, largura e comprimento) das amostras, em duas posições distintas, com auxílio de um paquímetro. As medições devem ser realizadas em centímetros;
- Em seguida, pesar os prismas, em gramas;

Para a determinação da densidade, realizou-se a divisão da massa pelo volume de cada prisma. Obteve-se o resultado por meio da média de três amostras.

### ***Resistência à tração na flexão***

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 13279:2005 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão).

Para a realização do ensaio foram utilizados: prensa hidráulica com capacidade para 5000 KN, marca Dynatest, balança digital (precisão de 0,01g) e paquímetro digital.

O ensaio de tração na flexão das argamassas foi realizado conforme as etapas a seguir:

- Retirar o corpo de prova do acondicionamento, predeterminado pela norma, aos 28 dias, e aferir suas medidas de massa e geométricas (comprimento, largura e altura);
- Em seguida, posicionar o corpo de prova no dispositivo de ensaio conforme norma ABNT NBR 13279:2005 de forma que a face rasada não fique em contato com os dispositivos de apoio.

O dispositivo de carga possui dois suportes de aço em forma de roletes distantes entre si 97,62mm e um terceiro rolete, na parte superior, centralizado entre os roletes do suporte. O corpo de prova foi posicionado sobre os roletes de suporte, de forma que os três planos verticais que passam através dos eixos dos três roletes fiquem paralelos, equidistantes e perpendiculares à direção do prisma de argamassa;

- Aplicar a carga de  $(50 \pm 10)$ N/s até a ruptura do corpo de prova.

A resistência à tração na flexão foi calculada segundo a Equação 15:

$$R_t = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot L}{40^3} \quad (15)$$

Onde:

- $R_t$  – Resistência à tração na flexão (MPa);
- $F_t$  – Carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);
- $L$  – Distância entre os suportes (mm).

O resultado foi considerado a média dos valores obtidos no ensaio de três corpos de prova arredondada ao décimo mais próximo.

Porém, se faz necessário a verificação do valor do desvio absoluto máximo da série, sendo esse definido como a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste desta média para mais ou menos. Em caso de desvio superior a 0,30 MPa, calcula-se uma nova média descartando o valor discrepante.

### ***Resistência à compressão***

O método de ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 13279:2005. Para a realização do ensaio foi utilizado o mesmo equipamento empregado no ensaio de resistência à tração na flexão, porém com adaptação aos ensaios de compressão axial, alterando a rótula da prensa hidráulica.

Os corpos de prova ensaiados correspondem à metade dos prismas utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão das argamassas foram executados os seguintes procedimentos:

- Posicionar o corpo de prova de forma que a face rasada não fique em contato com os pratos de aplicação da carga e os pratos superior e inferior fiquem paralelos. Os pratos de aço, de  $(40 \pm 0,1)$  mm de comprimento e largura e no mínimo 10 mm de espessura;
- Aplicar a carga de  $(500 \pm 50)$  N/s até a ruptura do corpo de prova.

A resistência à compressão ( $R_c$ ) foi calculada segundo a Equação 16:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (16)$$

Onde:

- $F_c$  – Carga máxima aplicada (N);
- 1600 – Área da seção do dispositivo de carga de 40x40mm (mm<sup>2</sup>).

O resultado foi considerado a média dos valores obtidos no ensaio de seis corpos de prova arredondada ao décimo mais próximo.

Semelhante ao ensaio de resistência à tração na flexão se faz necessário a verificação do valor do desvio absoluto máximo da série. Em caso de desvio superior a 0,50 MPa, calcula-se uma nova média descartando o valor discrepante.

### ***Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade***

Os ensaios de absorção por capilaridade e coeficiente de capilaridade foram realizados conforme as prescrições da norma ABNT NBR 15259:2005 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação de absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade).

Os procedimentos de realização dos ensaios foram:

- Após 28 dias da moldagem, lixar as superfícies dos corpos de prova e limpá-las com pincel;
- Na sequência, pesar os corpos de prova, determinando a massa inicial ( $M_0$ );
- Posicionar os corpos de prova com a face quadrada (4x4 cm) sobre os suportes em um recipiente de vidro, evitando a molhagem de outras superfícies. O nível da água permanecerá constante a (5±1)mm acima da face em contato com a água;
- Em cada um dos tempos de 5, 10, 20, 40, 60 e 90 minutos, retirar os corpos de prova do recipiente, seca-los superficialmente com um pano úmido e determinar suas massas ( $M_t$ );
- Imediatamente após as determinações das massas, retornar os corpos de prova ao recipiente com a lâmina de água.

Diferentemente das recomendações da norma, serão realizadas leituras aos: 5, 10, 20, 40, 60 e 90 minutos, de modo a se obter uma curva de evolução mais precisa.

A fim de padronizar as condições dos corpos de prova antes da realização do ensaio., dois dias antes de serem ensaiados, os corpos de prova foram colocados em estufa a 50°C.

Determinou-se a absorção de água por capilaridade pela razão entre a diferença de massa entre a massa no tempo t e a massa inicial pela área dos prismas em contato com a lâmina d'água, como apresentado na Equação 17.

$$A_t = \frac{M_t - M_0}{16} \quad (17)$$

Já o coeficiente de capilaridade, por definição da ABNT NBR 15259:2005, é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas 10 minutos e aos 90 minutos.

***Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear) – ABNT NBR 15261:2005;***

As medidas da variação dimensional das argamassas no estado endurecido, foram realizadas de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 15261:2005 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)). Os equipamentos e acessórios utilizados no ensaio de variação dimensional foram:

- Aparelho comparador de comprimento marca Solotest com relógio comparador da marca DIGIMESS com precisão de 1  $\mu$ m;
- Balança digital com precisão de 0,01 g;
- Paquímetro digital (curso 400 mm);
- Recipiente plástico para armazenamento dos prismas nas condições padronizadas de temperatura ( $23\pm 2$ )°C e umidade relativa ( $50\pm 5$ )%.

O ensaio de variação dimensional das argamassas seguiu os seguintes procedimentos:

- Realizar a 1ª leitura com 48 horas utilizando o aparelho comparador de comprimento, em seguida será determinada a massa e o comprimento inicial do prisma;
- Após as medições, colocar os prismas em um recipiente de plástico para manutenção da umidade relativa e temperaturas definidas;
- Realizar as medições aos 2, 7 e 28 dias.

Apesar de a norma estabelecer a realização da primeira leitura às 24 horas, nesse estudo a primeira leitura será realizada às 48 horas após a moldagem dos corpos de prova a fim de garantir que a argamassa estabilizada possua resistência suficiente para ser desmoldada.

***Resistência Potencial de Aderência à Tração***

O ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 15258:2005 (Argamassa para assentamento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração).

Os procedimentos realizados para a execução do ensaio foram:

- As amostras foram elaboradas com a aplicação da argamassa sobre substrato padrão conforme procedimentos da norma.
- Após 28 dias, realizar 10 furos com a utilização de uma furadeira de bancada com serra copo diamantada de diâmetro nominal de 60mm. Os furos devem atingir profundidade de cerca de 1mm para dentro do substrato;
- Colar pastilhas de aço de 50 mm de diâmetro com massa plástica adesiva nos 10 corpos de prova;
- Romper por tração os 10 corpos de prova utilizando dinamômetro;
- Medir o diâmetro de cada corpo de prova com paquímetro (mm), calcular a tensão de aderência e identificou-se o tipo de ruptura.

Para o calculo da tensão de aderência utilizou-se a Equação 18:

$$A_t = \frac{R_i}{A_i} \quad (18)$$

Onde:

R<sub>i</sub>- resistência potencial de aderência à tração (MPa);

P<sub>i</sub> – carga de ruptura, em Newtons;

A<sub>i</sub> – área do corpo-de-prova, mm<sup>2</sup>

A resistência potencial de aderência à tração média será a média de no mínimo cinco valores válidos de tensão, sendo descartados os valores que se afastaram  $\pm 30\%$  da média.



## APÊNDICE F – Critérios de suscetibilidade à fissuração

### Critérios de suscetibilidade à fissuração

Propriedades (aos 28 dias)	Critérios de classificação quanto à fissuração		
	Baixa susceptibilidade	Média susceptibilidade	Alta susceptibilidade
Módulo de elasticidade (E) (MPa)	$E \leq 7000$	$7000 < E < 12000$	$E \geq 12000$
E/Rt*	$E/Rt \leq 2500$	$2500 < E/Rt < 3500$	$E/Rt \geq 3500$
Retração por secagem (mm/m)	$DI/l \leq 0,7$	$0,7 < DI/l < 1,2$	$DI/l \geq 1,2$

\*Rt – resistência à tração na flexão

Fonte: CSTB (1993)