

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

IEDA MARIA FAGUNDES ZANOLLA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE AGREGADOS COM DIFERENTES
COEFICIENTES DE DILATAÇÃO TÉRMICA NO COMPORTAMENTO DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO SUBMETIDAS A ENVELHECIMENTO
ACELERADO**

SÃO LEOPOLDO

2022

IEDA MARIA FAGUNDES ZANOLLA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE AGREGADOS COM DIFERENTES
COEFICIENTES DE DILATAÇÃO TÉRMICA NO COMPORTAMENTO DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO SUBMETIDAS A ENVELHECIMENTO
ACELERADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof.Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo

2022

Z33 Zanolla, Ieda Maria Fagundes
Avaliação da influência do uso de agregados com diferentes coeficientes de dilatação térmica no comportamento de argamassas de revestimento submetidas a envelhecimento acelerado. / Ieda Maria Fagundes Zanolla-- 2022.
125 f. : il. ; color. ; 30cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

Orientador: Profa. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak.

1. Argamassa de revestimento - Propriedade térmica. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Parâmetros textural. 4. Ensaio - Envelhecimento acelerado. I. Título. II. Kazmierczak, Claudio de Souza.

CDU 691.53:66-97

IEDA MARIA FAGUNDES ZANOLLA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE AGREGADOS COM DIFERENTES
COEFICIENTES DE DILATAÇÃO TÉRMICA NO COMPORTAMENTO DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO SUBMETIDAS A ENVELHECIMENTO
ACCELERADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

Daniel Pagnussat – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Marlova Piva Kulakowski – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Claudio de Souza Kazmierczak – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

AGRADECIMENTOS

“Ninguém faz nada sozinho”. Esta frase me acompanha desde o dia em que iniciei minha caminhada em busca de crescimento profissional nesta Universidade. E se tornou, à medida em que os dias se passavam, cada vez mais verdadeira.

Lembro ainda o dia da minha inscrição na Secretaria do Mestrado, na companhia de meu marido, das minhas palavras: “não sei como, vou me matar trabalhando, mas vou conseguir meu objetivo”. E enfim penso ter atingido a meta traçada. Trabalhei muito, mas não fiz nada sozinha. Sempre estive bem acompanhada, a começar pelo meu querido Deus, que jamais me deu um peso que eu não pudesse carregar e sempre que as dificuldades se tornavam problemas quase intransponíveis Ele colocava alguém no meu caminho para me ajudar. Foram tantas pessoas incríveis, em todos os níveis, desde os porteiros, guardas e funcionários do Campus, passando por colegas, bolsistas, meus professores e orientadores. Porém cumpre nominar e agradecer a algumas destas pessoas que talvez nem saibam o quão importante foram na minha vida neste período de aprendizado. E também àquelas que não estando mais comigo tiveram e ainda têm muita importância em tudo o que faço.

Agradeço aos meus queridos pais, Ieda e Paulo, por todas as horas que gastaram comigo, plantando em mim a semente de querer saber sempre mais, ensinando-me os valores éticos e morais dos quais jamais me afastei. A eles eu digo: descansem em paz, a missão de vocês foi cumprida com louvor. Agradeço à minha família pela paciência, pela compreensão, pela tolerância, e peço desculpas pelas ausências, pelos cancelamentos de encontros, por não ter estado junto de vocês como gosto de estar, em especial ao meu filho Pedro, luz da minha estrada, e à minha irmã Cleide pelo amor que sempre me dedicou.

Agradeço ao meu marido, meu companheiro, meu colega Francisco Barbosa, pela paciência, pelo amor, pela parceria, pelo incentivo e principalmente pela dedicação inexorável para que os meus sonhos se realizem. Estamos juntos, sempre. Meu maior sonho além de estudar é ser a cada dia motivo de te orgulhares da companheira que escolheste.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Claudio de Souza Kazmierczak pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e pelo exemplo de profissional dedicado que me inspira a ser, como ele, professora, engenheira e pesquisadora.

Agradeço à Professora Doutora Marlova Piva Kulakowski pelos incentivos, pelos ensinamentos, pelas críticas sempre construtivas e pela amizade que levarei para sempre.

Agradeço à Professora Doutora Regina Célia Espinosa Modolo, pelos ensinamentos, pela amizade e carinho com que sempre me acolheu.

Agradeço ao Professor Maurício Mâncio pelos ensinamentos, pela confiança e pelo apoio incondicional ao meu trabalho.

Agradeço à Professora Andrea Sander pelos ensinamentos e pelo exemplo de ser humano e de profissional competente em sua área de atuação.

Agradeço às minhas amigas e colegas que deram leveza às minhas dificuldades, Valéria Oliveira, Franciele Rodrigues e Bianca Cadore.

Agradeço à minha sobrinha e afilhada Laura pela dedicação e comprometimento.

Agradeço aos laboratoristas do LMC André, Igor e Leonardo pelo auxílio, disponibilidade e dedicação profissional.

Agradeço à laboratorista do Laboratório de Eng. Mecânica Amanda pela dedicação e amizade.

Como disse, ninguém faz nada sozinho. Foram tantos novos colegas e amigos lutando junto comigo, ombro a ombro, generosos com seus conhecimentos e habilidades, pessoas que se importaram comigo e presenciaram todos os momentos desta caminhada. A todos vocês agradeço imensamente. Obrigado e contem comigo!

“Só um sentido de invenção e uma necessidade intensa de criar levam o homem a revoltar-se, a descobrir e a descobrir-se com lucidez” (Pablo Picasso)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o uso de agregados com diferentes coeficientes de dilatação térmica em argamassas de revestimento, analisando seu comportamento quando submetidas a esforços térmicos gerados por envelhecimento acelerado. Dentro deste contexto foram desenvolvidos quatro traços de revestimentos de argamassas cimentícias, utilizando-se agregados de areia natural (AN), de areia de britagem de rocha basáltica (ABB), de areia de britagem de rocha granítica (ABG) e de areia de britagem de quartzito (ABQ). Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados miúdos com diferentes coeficientes de dilatação térmica, bem como ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco. As argamassas de revestimento no estado endurecido foram ensaiadas e analisadas antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado. Os resultados obtidos demonstraram que as argamassas com areia de rio (AAN) apresentaram uma degradação significativa quando comparada às argamassas de revestimento com areia de britagem basáltica (AABB), com areia de britagem granítica (AABG) e com areia de britagem de quartzito (AABQ). A importância dos parâmetros texturais e das propriedades térmicas dos agregados na mistura foi comprovada em todas as argamassas de revestimento com areia de britagem, assim como a influência do uso de aditivo superplastificante no aumento das resistências mecânicas ao longo do ensaio de envelhecimento acelerado. Através da análise de microscopia eletrônica de varredura foi possível verificar a evolução do grau de fissuração na microestrutura das argamassas de revestimento, quando submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado.

Palavras-chave: gradiente térmico de agregado miúdo; parâmetros texturais; argamassas de revestimento; envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the behavior of rendering mortars with aggregates with different thermal expansion coefficients when subjected to thermal stresses generated by accelerated aging. Four cementitious rendering mortars have been developed, using natural fine aggregates (AN) and fine aggregates from crushed basaltic rock (ABB), crushed granitic rock (ABG) or crushed quartzite rock (ABQ). The thermal expansion coefficients of the aggregates and the characterization of mortars in the fresh state were determined. In the hardened state, the rendering mortars were subjected to accelerated aging and analyzed before and after the thermal stress. The evolution of the cracking in the microstructure of the rendering mortars was analyzed by scanning electron microscopy. The results have demonstrated that mortars composed by natural fine aggregate (AAN) have shown a significant degradation when compared to the rendering mortars composed by crushed basaltic rock (AABB), crushed granitic rock (AABG), and quartzite crushed rock (AABQ). The importance of textural parameters and of the thermal properties of the aggregates in the mortar composition has been proven in all rendering mortars made out from crushed rock aggregates, as well as the influence of the superplasticizer used in the increase of the mechanical strength during the accelerated aging.

Keywords: fine aggregate thermal gradient; texture parameters; rendering mortar. accelerated aging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solicitações no Revestimento	28
Figura 2 - Fases da fadiga	30
Figura 3 - Mecanismos de transferência de calor em diferentes fases de uma substância.....	31
Figura 4 - Esquema do processo de transferência de calor.....	33
Figura 5 - Distribuição de temperatura e velocidade de transferência de calor por convecção.....	35
Figura 6 - Distribuição de temperatura e velocidade de transferência de calor por convecção.....	35
Figura 7 - Radiação emitida, absorvida e refletida	37
Figura 8 - Representação gráfica de valores de absorvância e emissividade para alguns materiais da construção civil	39
Figura 9 - Croqui dos mecanismos de transferência de calor combinados no sistema de vedação vertical composto de bloco cerâmico estrutural vazado	42
Figura 10 - Processos de transferência de calor nos revestimentos externos diurno e noturno.....	44
Figura 11 - Fluxograma - Etapa I.....	53
Figura 12 - Fluxograma - Etapa II.....	54
Figura 13 - Agregados utilizados para a composição das argamassas	58
Figura 14 - Lâminas delgadas das amostras de agregado	62
Figura 15 - Placas cerâmicas cortadas	64
Figura 16 - Aplicação de argamassa de revestimento com uso de tubo de queda ...	67
Figura 17 - Placa revestida	67
Figura 18 - Ensaio de índice de consistência - AAN.....	69
Figura 19 - Ensaio de índice de consistência - AABB sem aditivo.....	69
Figura 20 - Ensaio de índice de consistência - AABQ e AABB com aditivo	70
Figura 21 - Ensaio de absorção por capilaridade	72
Figura 22 - Amostras para ensaio de variação dimensional e variação de massa....	73
Figura 23 - Ensaio de Variação dimensional e variação de massa.....	73
Figura 24 - Placa quente - Unisinos	74
Figura 25 - Thermtest HFM 100	74
Figura 26 - Termopares haste rígida	75

Figura 27 - Termopares de haste flexível	75
Figura 28 - Placa quente modificada	76
Figura 29 - Caixa térmica Sentena (2015) modificada.....	77
Figura 30 - Caixa térmica modificada - parte interna	77
Figura 31 - Sistema de restrição em madeira de Grápia	78
Figura 32 - Pastilhas aplicadas no sistemas de revestimento	80
Figura 33 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	80
Figura 34 - Serra de precisão com disco diamantado	81
Figura 35 - Caneta e disco diamantado odontológicos.....	82
Figura 36 - Amostras para os ensaios de MEV	82
Figura 37 - Areia natural (AN) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b)com ampliação de 40X.	84
Figura 38 - Areia de britagem de rocha basáltica (ABB) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b).	84
Figura 39 - Areia de britagem de rocha granítica (ABG) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b).	85
Figura 40 - Areia de britagem de rocha de quartzito (ABQ) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b).	85
Figura 41 - Aspecto da amostra macroscópica	86
Figura 42 - Aspecto da amostra macroscópica	87
Figura 43 - Aspecto da amostra macroscópica	89
Figura 44 - Resistência à compressão em amostras não cicladas e cicladas	97
Figura 45 - Imagens (ANN) geradas no microscópio ótico com aumento de 100X. ...	98
Figura 46 - Imagens (ANN) geradas no microscópio eletrônico de varredura com ampliação de 3000x.....	99
Figura 47 - Imagens (AABB) geradas no microscópio eletrônico de varredura	100
Figura 48 - Imagens (AABB) geradas no microscópio eletrônico de varredura ampliação 2000x.....	101
Figura 49 - Imagens (AABG) geradas no microscópio eletrônico de varredura ampliação 2000X	101
Figura 50 - Imagens (AABG) geradas no microscópio eletrônico de varredura ampliação 3000x.....	102
Figura 51 - Imagens (AABQ) geradas no microscópio eletrônico de varredura ampliação 500.....	103

Figura 52 - Imagens (AABQ) geradas no microscópio eletrônico de varredura ampliação1000x.....	103
Figura 53 - Velocidade de onda ultrassônica nas amostras prismáticas.	104
Figura 54 - Resultados dos ensaios obtidos nos ensaios de resistência de aderência à tração.....	108
Figura 55 - Formas de ruptura	124
Figura 56 - Amostras de AAN	124
Figura 57 - Amostras de AABB	125
Figura 58 - Amostras de AABG.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de agregados nos estados brasileiros	22
Gráfico 2 - Uma curva de evolução do consumo de areia e brita no Brasil.....	23
Gráfico 3 - Distribuição granulométrica do cimento	57
Gráfico 4 - Distribuição granulométrica da areia natural de rio	59
Gráfico 5 - Distribuição granulométrica do material fino da areia natural de rio	59
Gráfico 6 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha basáltica	60
Gráfico 7 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha basáltica	60
Gráfico 8 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha granítica	61
Gráfico 9 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha granítica	61
Gráfico 10 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha de quartzito	61
Gráfico 11 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha de quartzito	62
Gráfico 12 - Ciclagem térmica dos sistemas de revestimento	79
Gráfico 13 - Densidade de massa das argamassas de revestimento em estado fresco	94
Gráfico 14 - Teor de ar incorporado nas argamassas em estado fresco	94
Gráfico 15 - Variação de dimensional das argamassas.....	95
Gráfico 16 - Variação de massa das argamassas	96
Gráfico 17 - Ensaios realizados nas amostras de argamassas de revestimento em placas.	106
Gráfico 18 - Índice de vazios	107
Gráfico 19 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regiões Brasileiras com maior consumo de areia.....	22
Tabela 2 - Absortância para radiação solar e emissividade para radiações a temperaturas comuns	40
Tabela 3 - Coeficientes de dilatação térmica de vários componentes das argamassas	46
Tabela 4 - Valores médios de parâmetros de rochas utilizadas para produção de agregados.....	52
Tabela 5 - Valores de CET de rochas utilizadas para produção de agregados	52
Tabela 6 - Características físicas do cimento CP V - ARI.....	56
Tabela 7 - Composição química do CP V – ARI.....	56
Tabela 8 - Nomenclatura das areias	58
Tabela 9 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha basáltica	58
Tabela 10 - Caracterização das areias.....	63
Tabela 11 - Nomenclatura das amostras.....	66
Tabela 12 - Propriedades do substrato bloco cerâmica vermelha estrutural e vedação	83
Tabela 13 - Resultado da análise de parâmetros texturais dos grãos.	86
Tabela 14 - Composição mineralógica da areia natural de rio.....	87
Tabela 15 - Composição mineralógica d basalto.....	88
Tabela 16 - Composição mineralógica do granito	88
Tabela 17 - Composição mineralógica do quartzito.....	89
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de caracterização térmica das argamassas de revestimento (em placas).....	90
Tabela 19 - Resultados dos ensaios realizados nas argamassas de revestimento no estado fresco	92
Tabela 20 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras prismáticas.	97
Tabela 21 - Ensaios realizados nas amostras de argamassas de revestimento em placas	105
Tabela 22 - Ensaios realizados nas amostras de argamassas de revestimento em placas.	108
Tabela 23 - Resistência à compressão de amostras não cicladas	120
Tabela 24 - Resistência à compressão de amostras cicladas	121

Tabela 25 - Resistência á tração na flexão de amostras não cicladas	121
Tabela 26 - Resistência á tração na flexão de amostras cicladas	122
Tabela 27 - Densidade de massa.....	122
Tabela 28 - Resultados de parâmetros térmicos	123
Tabela 29 - Resultado do índice de vazios.....	123

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Cicladas
CET	Coeficiente de Expansão Térmica
CH	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LASERCA	Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital
LC	Laboratório de Construção
LCVM	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais
LMC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NC	Não cicladas
NM	Norma Mercosul
PPGEC	Programa de Pós-graduação em engenharia Civil
RILEM	Réunion Internationale de Laboratoires et Experts des Matériaux, Systemes de Construction et Ouvrages
SBTA	Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.1.1 Objetivo geral	21
1.1.2 Objetivos específicos	21
1.2 JUSTIFICATIVA.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE FACHADA.....	27
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	31
2.2.1 Fluxo de calor	33
2.2.2 Mecanismos de transferência de calor	34
2.2.2.1 Convecção	34
2.2.2.2 Radiação	37
2.2.2.3 Condução.....	41
2.2.2.4 Mecanismos simultâneos de transferência de calor	42
2.3 GRADIENTES TÉRMICOS	43
2.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS	44
2.4.1 Coeficiente de expansão térmica	45
2.4.2 Condutividade térmica	46
2.4.3 Capacidade térmica	48
2.4.4 Difusividade térmica	48
2.4.5 Resistência térmica	49
2.4.6 Transmitância térmica	50
2.5 TENSÕES NOS REVESTIMENTOS DE FACHADA	50
2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS AGREGADOS	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 FATORES FIXOS E VARIÁVEIS	54
3.1.1 Fatores fixos	54
3.1.2 Fatores variáveis	55
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	55
3.3 MATERIAIS.....	55
3.3.1 Aglomerante	55
3.3.2 Agregados	57

3.3.2.1 Areia.....	58
3.3.2.2 Areia de britagem.....	59
3.3.3 Substrato	63
3.3.4 Água.....	64
3.3.5 Aditivo.....	64
3.3.6 Chapisco.....	64
3.3.7 Revestimentos de argamassa	65
3.3.8 Sistemas de revestimentos argamassados.....	66
3.3.9 Ensaios de argamassas de revestimento no estado fresco	68
3.3.9.1 Índice de consistência	68
3.3.9.2 Teor de ar incorporado.....	70
3.3.9.3 Densidade de massa.....	70
3.3.10 Ensaios nas argamassas de revestimento estado endurecido	70
3.3.10.1 Resistência à compressão e resistência à tração na flexão.....	71
3.3.10.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	71
3.3.10.3 Absorção de água total, índice de vazios e massa específica	71
3.3.10.4 Absorção de água por capilaridade	72
3.3.10.5 Variação dimensional e variação de massa	72
3.3.10.6 Ensaio de condutividade térmica.....	73
3.3.10.7 Ensaio de envelhecimento acelerado	76
3.3.10.8 Ensaio de aderência à tração	79
3.3.10.9 Microscopia eletrônica de varredura.....	80
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	83
4.1 SUBSTRATO	83
4.2. AGREGADOS.....	83
4.2.1 Forma dos grãos	84
4.2.2 Análise petrográfica.....	86
4.2.2.1 Areia.....	86
4.2.2.2 Basalto	87
4.2.2.3 Granito	88
4.2.2.4 Quartzito	89
4.2.3 Parâmetros térmicos.....	89
4.3 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	91
4.3.1 Ensaios realizados nas argamassas de revestimento no estado fresco. .	92

4.3.2 Caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido (moldadas em prismas)	95
4.3.3 Resistência à compressão e à tração na flexão.....	97
4.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico	104
4.3.5 Ensaio realizado nas amostras de argamassas de revestimento (em placas)	104
4.3.6 Ensaio realizado nas amostras de argamassas de revestimento aplicadas sobre o substrato cerâmico (em placas).....	107
4.3.7 Metodologia utilizada.....	109
5 CONCLUSÕES.....	111
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
REFERÊNCIAS	114
APÊNDICE A - DADOS PROGRAMA EXPERIMENTAL	120
APÊNDICE B - FORMAS DE RUPTURA - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	124

1 INTRODUÇÃO

A argamassa de revestimento é um dos materiais mais utilizados na construção civil como revestimento de fachadas. As oscilações diárias de temperatura a que as argamassas de revestimento estão expostas geram gradientes internos de temperatura, e estes, conseqüentemente, propiciam o surgimento de tensões térmicas e deformações, que podem ou não ocasionar a sua deterioração precoce, através do surgimento de microfissuras, aumentando sua porosidade e ocasionando a perda das suas resistências mecânicas (CARASEK; FREITAS; CASCUDO 2014). Sendo assim, o comportamento térmico das argamassas de revestimento ainda é uma incógnita para o meio técnico, pois pouco se conhece sobre a propagação do fluxo de calor ao longo da espessura dos revestimentos, sobre sua velocidade, bem como de que maneira a composição do traço com diferentes coeficientes de expansão térmica (CETs) pode acelerar o surgimento de fissuras em multiescala, quando sujeitas às variações de temperatura

O uso massivo de revestimentos em argamassa como complemento dos sistemas de vedação vertical implica demasiado consumo de materiais, especialmente areia, com reflexos preocupantes em termos ambientais e no custo das construções. A busca por materiais alternativos que possam substituir, parcial ou totalmente, a areia natural vem tornando-se objeto de investimentos em pesquisas, incluindo estudos de reaproveitamento de resíduos das mais diversas fontes, e no desenvolvimento de revestimentos com melhor desempenho e conseqüentemente mais duráveis.

As preocupações das construtoras com a durabilidade e o desempenho de revestimentos de argamassa tornaram-se incessantes (KAZMIERCZAK; BREZEZINSKI; COLLATTO 2007). Nas últimas décadas vários estudos vêm sendo desenvolvidos nos mais renomados centros de pesquisas de materiais de construção civil, no intuito de aprofundar os conhecimentos sobre seu comportamento diante das solicitações impostas durante sua vida útil. Os revestimentos de argamassa usados como acabamento, associados à pintura ou como base para revestimentos cerâmicos e pedras ornamentais, são responsáveis pela proteção das alvenarias e das estruturas de concreto armado, garantindo sua integridade e prolongando sua durabilidade. Inúmeros são os casos de surgimento de manifestações patológicas nos revestimentos de argamassa em fachadas, tanto em edificações mais antigas como

nas de menores idades, o que compromete a vida útil do sistema na edificação (COSTA, 2001).

Segundo NBR 15575-4 (ABNT, 2013) a vida útil do sistema está fortemente vinculada ao desempenho e à qualidade dos materiais, bem como às especificações de projeto, à qualidade da mão de obra e metodologia de execução, além da realização de manutenções preventivas periódicas. A compatibilização de todos os elementos que compõem os sistemas de vedação vertical é fundamental para garantir a integridade da fachada e assegurar que esta cumpra a sua função.

Os requisitos mínimos que os revestimentos de fachada devem apresentar ao longo de sua vida útil são os de cumprir as funções para os quais foram projetados e atender às exigências dos usuários. Segundo a Agence Qualité Construction (1995) o desempenho de sistemas de revestimentos argamassados é condicionado a três exigências básicas: a aderência ao substrato, estanqueidade às águas pluviais e a sua durabilidade.

Ao longo da vida útil de um sistema de vedação vertical vários são os mecanismos de degradação que podem atuar sobre os revestimentos de argamassa, exigindo que estes apresentem resistências suficientes para absorver os esforços gerados (BAUER; CASTRO; SILVA, 2015).

O clima da região onde está situada a edificação condiciona os mecanismos de degradação que mais influenciam o envelhecimento precoce do revestimento. Desta forma é fundamental que se faça uma avaliação adequada do seu nível de agressividade e das variações térmicas diárias, mensais e anuais a que a edificação estará sujeita (MOSCOCO, 2013). Além disso, os revestimentos de fachada estão sujeitos a variações bruscas de temperatura, o que pode ocasionar um aumento rápido e significativo de esforços solicitantes neste material, levando a um nível de tensões aplicadas maiores que as tensões resistentes. Dependendo da magnitude destas tensões pode ocorrer o surgimento imediato de microfissuras ou de fissuras visíveis.

Fioritto (1994) afirma que as camadas do revestimento têm deformações próprias devido à sua secagem diferencial. Além disso, os elementos do substrato sofrem contínuos ciclos de expansão e contração, em função das diferenças higrótérmicas a que são expostos. Desta forma é de suma importância que haja uma interação entre todos os sistemas e subsistemas que integram a fachada, necessitando maior conhecimento sobre o desempenho térmico dos componentes e

dos materiais que compõem o sistema de vedação vertical, bem como a forma de vinculação entre eles.

A composição do traço das argamassas de revestimento, a intensidade de variação das temperaturas aplicadas e as propriedades térmicas dos materiais constituintes das argamassas influenciam diretamente na sua variação dimensional.

Estudos realizados por Schulson, Swaison e Holden (2001) relatam a importância do coeficiente de expansão térmica (CET) para determinarmos as tensões internas das argamassas geradas nas diferentes fases do material, possibilitando estimar os danos ocasionados pelas diferentes dilatações térmicas. No caso de argamassas os produtos resultantes da hidratação do cimento apresentam diferentes CETs, os quais serão influenciados pelo tipo de cimento utilizado, o que poderá ocasionar diferentes dilatações térmicas e conseqüentemente o surgimento de tensões internas. Além disso, ocorre um acréscimo de tensões gerado pelo diferente CET do agregado utilizado na composição do revestimento, o que pode propiciar um surgimento de microfissuras na zona de transição entre agregado/pasta ou na própria pasta. Tais microfissuras podem acelerar o processo de envelhecimento precoce quando os revestimentos de argamassa forem sujeitos a ciclos de temperatura variados ao longo de sua vida útil, podendo comprometer significativamente seu desempenho e durabilidade.

Dentro deste contexto esta pesquisa tem por objetivo contribuir para a análise das manifestações patológicas decorrentes dos esforços térmicos retro referidos, sua evolução quando expostos a ciclos térmicos, especialmente fissuras em multiescala, através de ensaios de envelhecimento acelerado, com a utilização de agregados miúdos com diferentes coeficientes de dilatação térmica (CET).

Nesse estudo foram caracterizados agregados miúdos convencionais (areia quartzosa extraída de leito de rio) e areias provenientes da britagem de rochas de três diferentes jazidas, com foco na determinação do comportamento térmico quando utilizados em substituição à areia natural. Para tanto faz-se necessário avaliar as suas características térmicas quando incorporados às argamassas de revestimento e a resposta destas quando sujeitas à esforços térmicos cíclicos. Desta resposta depende o surgimento de manifestações patológicas nas fachadas das edificações, e suas conseqüências no desempenho e durabilidade do subsistema vedação vertical.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar o comportamento dos revestimentos de argamassa com agregados de diferentes coeficientes de expansão térmica, quando submetidos à envelhecimento acelerado.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) avaliar comparativamente as resistências mecânicas das argamassas com areia natural de rio e areias de britagem provenientes de rochas de basalto, granito e quartzito antes e após a ciclagem térmica;
- b) avaliar a influência da exposição a ciclos térmicos na porosidade permeabilidade das argamassas;
- c) analisar e avaliar o grau de fissuração visível do revestimento de argamassa;
- d) analisar comparativamente a microestrutura das argamassas de revestimento antes e após o envelhecimento acelerado; e
- e) analisar o surgimento e evolução de fissuras na interface das argamassas de revestimento/substrato.

1.2 JUSTIFICATIVA

O crescimento populacional tem provocado o aquecimento da indústria da construção civil no Brasil e no mundo, aumentando a demanda de materiais. A areia é um dos insumos naturais e fundamentais para economia global, em sua maior parte utilizada na construção civil para produção de concreto, construção de estradas, argamassas de revestimento, aterros, entre outros. Conquanto pareça abundante e infinito, este recurso natural, granular, de composição silicática com predominância de quartzo, é formado pelo desgaste das rochas, demorando milhares de anos para se renovar, ou seja, seu uso excede demasiadamente a sua taxa de renovação.

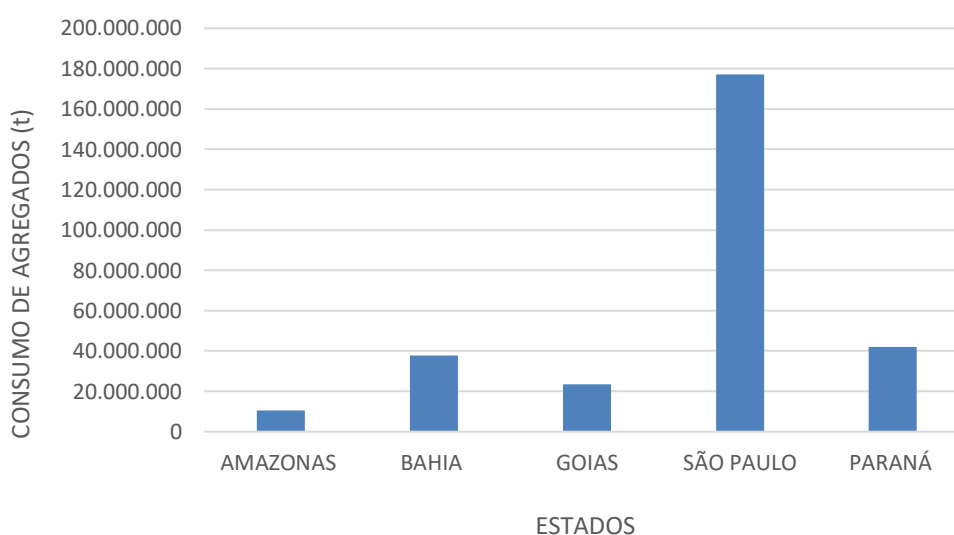
No Brasil, assim como no restante do mundo, a extração de areia tem se intensificado com o crescimento urbano e encontra-se espalhada em todo o território nacional. A região onde há uma demanda maior deste agregado é a região sudeste (tabela 1), ficando em primeiro lugar o estado de SP (gráfico1). No ano de 2014 foram consumidas 741 milhões de toneladas do agregado no Brasil. No gráfico (gráfico 2) temos uma curva de evolução do consumo de areia e brita no Brasil até o ano 2022 (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC), 2012).

Tabela 1 - Regiões Brasileiras com maior consumo de areia

REGIÃO	CONSUMO DE AGREGADOS (t)	CONSUMO DE AGREGADO (%)
NORTE	45.999.319	6,83
NORDESTE	135.519.961	20,11
CENTRO OESTE	58.509.721	8,68
SUDESTE	324.042.493	48,1
SUL	109.670.379	16,28

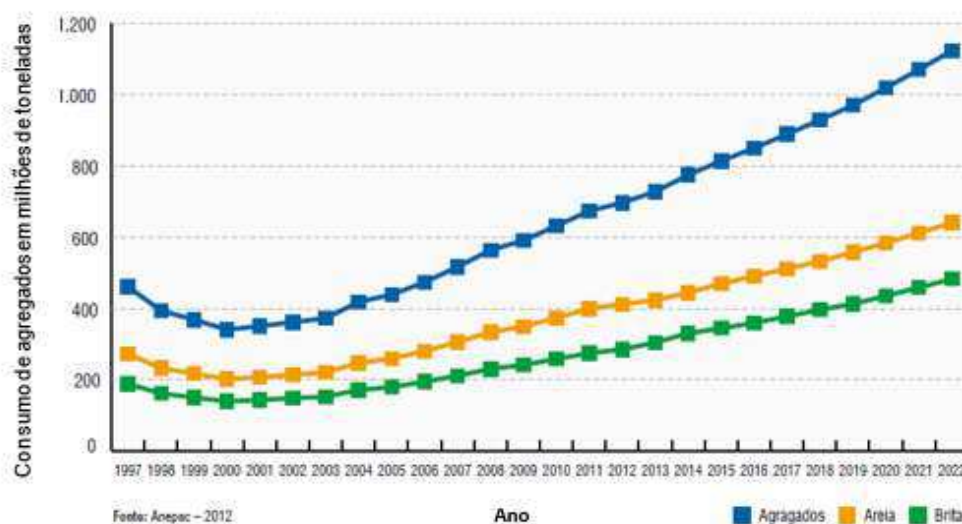
Fonte: Elaborada pelo autor adaptado planilha (ANEPAC , 2012 consultado em 2022).

Gráfico 1 - Consumo de agregados nos estados brasileiros



Fonte: ANEPAC (2012) consultado em 2022.

Gráfico 2 - Uma curva de evolução do consumo de areia e brita no Brasil



Fonte: ANEPAC (2012) consultado em 2022.

Dentro deste contexto as argamassas cimentícias, constituídas por agregado natural de rio, areia, são um dos materiais mais utilizados como proteção do sistema de vedação vertical das edificações no Brasil. A busca contínua pela melhoria do desempenho e, conseqüentemente, pela maior durabilidade dos revestimentos tem sido objeto de constantes pesquisas acadêmicas. Para que estes revestimentos atinjam os objetivos e critérios mínimos de desempenho, bem como o prolongamento de sua vida útil, é necessário conhecer seu comportamento quando sujeito aos mecanismos de degradação e aos esforços gerados por estes.

O desempenho e a vida útil das argamassas de revestimento de fachadas devem ser considerados ao propormos os materiais a serem utilizados em uma edificação, bem como ao especificarmos a metodologia de execução, garantindo que ocorra uma interação entre eles e que estes desempenhem suas funções durante o tempo estimado em projeto, considerando as devidas manutenções preventivas. Para tanto é necessário aprofundar os conhecimentos sobre seus mecanismos de degradação, bem como seu comportamento quando exposto a estes agentes.

Um dos mecanismos de degradação que mais preocupam os pesquisadores são os gradientes de temperatura. A variação de temperatura dos ambientes ocasiona a expansão ou retração dos materiais componentes do sistema de vedação vertical. Cada material que compõe o sistema apresenta um coeficiente de expansão térmica (CET). Sendo assim, em decorrência das oscilações térmicas incidentes nos

ambientes externo e interno, os revestimentos podem apresentar manifestações patológicas, na forma de fissuras visíveis e microfissuras, decorrentes da incompatibilidade de deformações de origem térmica de seus materiais constituintes (ESQUIVEL, 2009).

O crescimento acelerado das cidades e o avanço tecnológico têm exigido maior conhecimento, por parte dos profissionais que compõem o quadro técnico das empresas de construção civil, sobre novos materiais e novas técnicas construtivas. Porém não tem sido o suficiente, pois muitas vezes estes estudos têm analisado os elementos separadamente e não como um conjunto de sistemas. Há uma insuficiência de conhecimento e até mesmo uma certa negligência técnica no que diz respeito ao comportamento da estrutura como um todo. Isso acarreta o aparecimento de anomalias prematuras nas edificações, comprometendo seu desempenho e sua durabilidade.

A falta de compatibilidade dos projetos arquitetônicos de fachadas com os materiais utilizados também é um outro agravante, pois a fachada muitas vezes é tratada como um mero elemento decorativo, estético. A ausência de projeto de fachada, assim como a falta de uma especificação detalhada de materiais que se adéquem às características do projeto é um erro recorrente na maioria das edificações. O nível de conhecimento do comportamento do subsistema de vedação é deficiente por parte da maioria dos profissionais. Aliado a este fator está a mão de obra pouco qualificada para execução destes subsistemas.

Ainda segundo Alves (2008) ao analisar inúmeras edificações pode-se constatar que a maior incidência de manifestações patológicas ocorre em revestimentos de fachadas em comparação com os outros subsistemas da edificação.

Bauer *et al.* (2011), Esquivel (2009), Sentena, Kazmierczak e Krein (2018), Moscoso *et al.* (2013b), Shui *et al.* (2010) e Zeng, Fen-Chong e Dangla (2012), realizaram estudos com o objetivo de aprofundar o conhecimento do comportamento térmico das argamassas de revestimentos e dos elementos que complementam o sistema de vedação vertical. Procuraram analisar a interação entre eles e sua influência na durabilidade, quando expostos às variações climáticas.

Ao estudar fachadas revestidas com placas cerâmicas na cidade de Brasília, Bauer *et al.* (2011) observou a ocorrência de gradientes térmicos entre as paredes externa e interna da edificação no intuito de avaliar os efeitos da temperatura no sistema de revestimento, tendo verificado um aumento de 60% das tensões na

interface entre as argamassas colantes e as placas cerâmicas escuras, ocasionadas pelas tensões diferenciais resultantes da deformação volumétrica das placas em relação às camadas inferiores do revestimento.

Ao analisarem a influência da porosidade e teor de ar incorporado nos CETs das pastas de cimento e argamassas Zeng, Fen-Chong e Dangla (2012) concluíram que estes parâmetros, bem como o teor de umidade da argamassa, exercem efeitos significativos na deformação volumétrica.

Lazera (2016) analisaram a influência dos componentes da mistura nas argamassas de revestimento. Para tanto incorporaram à mistura agregados leves com excelentes propriedades térmicas como cortiça, aerogel de sílica e argila expandida, obtendo resultados que demonstraram a importância do tipo de agregado nos valores obtidos de condutividade térmica das argamassas.

Segundo Esquivel (2009), ao realizar ensaios de choque térmico em argamassas cimentícias, estas sofrem a interferência das suas resistências mecânicas, do coeficiente de Poisson, do módulo de elasticidade, do CET e da sua condutividade térmica. Após submeter as amostras à ciclagem térmica pode constatar uma redução da resistência de aderência devido aos efeitos combinados dos macros defeitos. Entretanto durante os ensaios não foram constatadas fissuras visíveis na face externa que sugerissem tensões de tração, na superfície, superiores à resistência de tração do revestimento durante a realização dos ensaios de ciclagem térmica. Houve uma variação na forma de ruptura nos ensaios de resistência à aderência.

Na busca de melhorias significativas no conforto térmico das edificações, bem como na redução do consumo energético, Cunha, Aguiar e Pacheco-Torgal (2015) analisaram argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase, concluindo que as argamassas alteradas apresentaram comportamento similar às argamassas de referência.

Fu *et al.* (2004) realizaram estudos experimentais sobre o desenvolvimento de macro e microfissuras, tensão e deformação em pasta de cimento e argamassas no estado endurecido, mas submetidas a temperaturas muito superiores às condições reais dos ambientes naturais, verificando que os danos nos materiais ocorriam em função da decomposição dos produtos de hidratação do cimento e devido à formação de microfissuras por perda de água durante o processo de aquecimento dos exemplares.

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013a) estabelece parâmetros para que um sistema

de vedação vertical seja avaliado e aprovado no quesito durabilidade, tomando como base o nível de degradação do sistema quando submetido a ensaio de envelhecimento acelerado, contemplando 10 ciclos térmicos. Porém estes critérios não são suficientes para que se possa constatar e avaliar os danos ocasionados na sua microestrutura após os ensaios de envelhecimento acelerado.

Com base na análise dos estudos realizados constata-se que a maioria das pesquisas busca avaliar o comportamento térmico do sistema, porém não busca avaliar a evolução da fissuração, visível na superfície e na microestrutura, surgida ao longo dos ciclos térmicos aplicados aos revestimentos argamassados. A maioria das pesquisas também não avalia o comportamento térmico de argamassas de revestimento com agregados provenientes do processo de britagem de outras rochas e com diferentes coeficientes de expansão térmica.

A inquietação provocada pelos dados supracitados, juntamente com a constatação recorrente da degradação precoce dos revestimentos de fachadas por perda de aderência ou perda da estanqueidade motivaram o tema desta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são elencados os principais mecanismos de degradação de argamassas de revestimentos, sendo realizada uma revisão de conceitos básicos relacionados à transferência de energia na forma de calor em materiais.

2.1 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE FACHADA

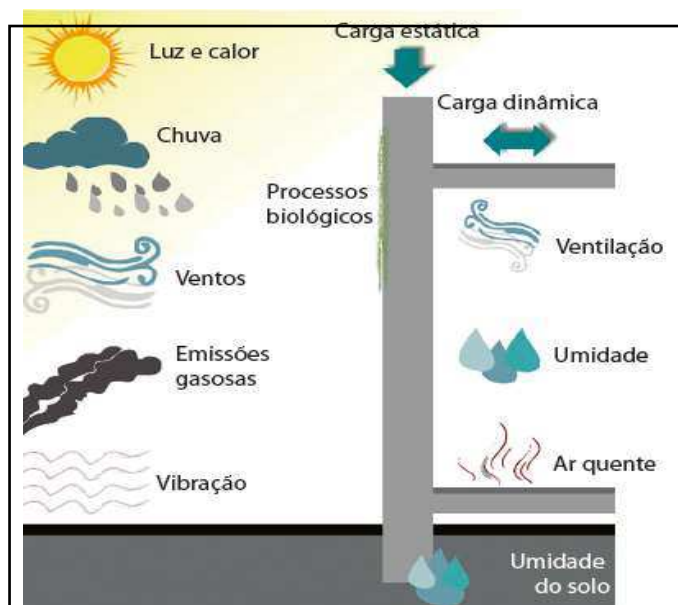
Os inúmeros acidentes ocorridos em edificações por falta de manutenção preventiva, as falhas por parte dos responsáveis técnicos e por intervenções humanas inadequadas nos últimos anos no Brasil, bem como a elaboração e a vigência da norma de desempenho (NBR 15575-4 - ABNT, 2013) levaram a um aumento progressivo do nível de exigência do usuário para que sistemas e subsistemas que compõem as edificações apresentem qualidade, durabilidade e, principalmente, segurança.

A norma de desempenho, ao estabelecer critérios mínimos referentes às condições de funcionamento, uso e desempenho, para os quais os elementos das edificações foram projetados e executados, garantindo o desempenho satisfatório, segurança e conforto visual ao usuário, passou a servir como base para nortear as construtoras, responsáveis técnicos e administradoras de condomínios.

Um dos subsistemas que sofre de forma constante com a ação dos mecanismos de degradação são as fachadas das edificações. Estas estão diretamente expostas a variações climáticas, poluição atmosférica e névoa marinha conforme a localização da edificação e mudanças no entorno da mesma ao longo do tempo.

Existem diversos fatores extrínsecos ao sistema de vedação vertical capazes de propiciar o surgimento de grandes deformações e tensões, como cargas estáticas e dinâmicas, ventos, chuvas, umidade ascensional, vibrações, ataque de gases, ataques biológicos e variações de temperatura durante dia, meses e anos como demonstrado na figura 1 (BONIN, 1999).

Figura 1 - Solicitações no Revestimento



Fonte: Bonin (1999).

Os danos em fachadas ocasionados pelos mecanismos de degradação podem ocorrer de forma pontual ou global. Estudos apontam ainda a importância da interação entre os elementos e materiais que compõem as fachadas ao longo do tempo, pois estes estão sujeitos a deformações e a movimentações diferenciais, devidas ao comportamento de seus elementos e às propriedades muito diferenciadas dos seus materiais, como módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica, condutividade térmica, entre outros (BAUER; CASTRO; SILVA, 2015).

A parte 4 da NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) aborda os requisitos dos sistemas de vedações verticais internas e externas, onde pressupomos os subsistemas de camada de revestimento de argamassa das alvenarias, alvenarias propriamente ditas e estruturas de concreto, devendo estes atenderem tais especificações.

Os revestimentos de argamassa estão sujeitos aos mais variados mecanismos de degradação, responsáveis por gerar solicitações no sistema, as quais podem corroborar para o comprometimento do desempenho requerido. Este processo de degradação ocorre em função da redução da capacidade do material em responder de forma eficiente às solicitações dos agentes de deterioração ao longo do tempo, culminando com o surgimento dos danos em vários níveis de comprometimento ou mesmo danos irreparáveis (GASPAR; BRITO, 2005).

O surgimento de manifestações patológicas do tipo fissura ocorre nos revestimentos de argamassa sempre que as deformações à tração ou compressão às

quais estão submetidas ultrapassam suas resistências mecânicas, podendo ainda ocasionar falhas no seu sistema de aderência entre diversas camadas do revestimento. A capacidade de deformação da argamassa varia com a composição da mistura, a idade, com a intensidade e velocidade dos esforços a que forem submetidas durante a sua vida útil (BAUER; CASTRO; SILVA, 2015).

Revestimentos de argamassa sujeitos à gradientes térmicos em regiões onde há ocorrência de temperaturas baixas no inverno e altas temperaturas no verão, com presença de chuvas intensas e inusitadas, tendem a sofrer processo de degradação acelerado e prematuro. O desempenho e a durabilidade destes revestimentos estão diretamente ligados à sua interação com as variações climáticas do meio onde estão localizados, bem como aos materiais empregados na sua concepção.

Saraiva, Bauer e Bezerra (2002) constataram em estudos sobre fachadas que, em dias de temperatura elevada, ocorre um aumento das tensões em até 60% nas fachadas revestidas com revestimentos cerâmicos. Estudos sobre absorção e transferência de calor relatam a influência do acabamento aplicado nos revestimentos de fachada, como a tonalidade de pintura, o tipo de material aplicado e a presença ou não de juntas de dilatação. Além disso, existe a influência dos esforços gerados pelas dilatações dos sistemas de esquadrias que compõem a fachada.

O surgimento ou não de fissuras em argamassas de revestimento provocadas por deformações térmicas dependem do módulo de elasticidade das argamassas de revestimento, isto é, da capacidade dos revestimentos absorverem as tensões a que estão submetidos.

Quando um sistema de revestimento é exposto a uma variação cíclica de temperatura, esse sistema pode falhar após certo número de ciclos, mesmo que a máxima tensão atuante no revestimento em um ciclo seja inferior a tensão de escoamento do material; resultando, com isto, tensões cíclicas no sistema de revestimento, provocando o que denominamos de fissuras ativas (BROEK, 1988).

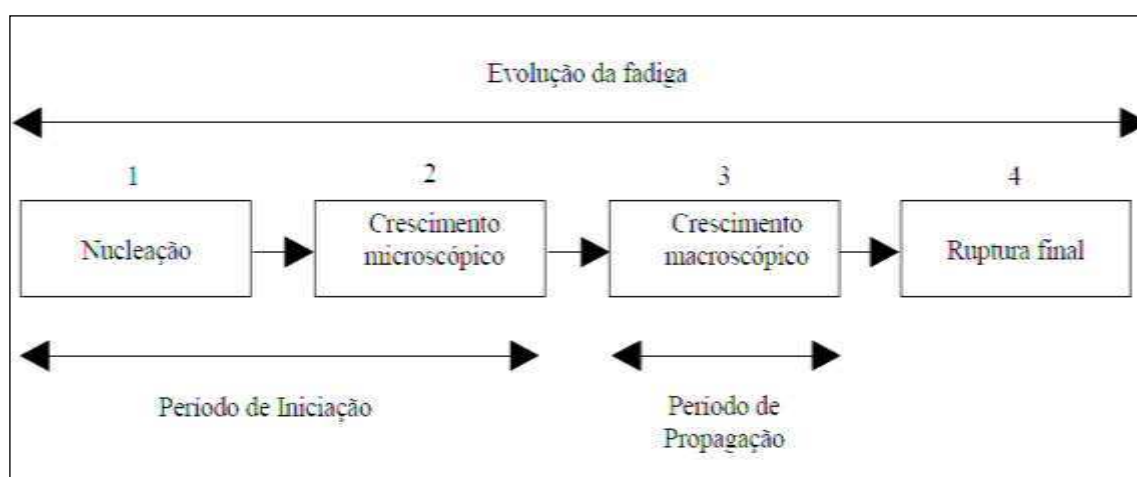
Dentro deste contexto o sistema de revestimento pode ter sua integridade comprometida por fadiga. A fadiga pode ocorrer sob tensões inferiores em relação ao limite de escoamento estático do material sob um número elevado de ciclos de carga. É de grande importância o conhecimento da vida útil de um revestimento de argamassa em relação à fadiga por propagação das fissuras.

A fadiga pode ser atingida lenta ou rapidamente. Isto está diretamente relacionado ao nível de tensões e ao número de ciclos térmicos a que os

revestimentos são submetidos, inclusive podendo ocorrer para níveis de carregamentos baixos. A fadiga é considerada um fenômeno físico de deterioração progressiva e irreversível do sistema de revestimento, sendo constatada após a aplicação de alguns ciclos de carregamentos térmicos. A aplicação de carregamentos repetidos por um período de tempo poderá causar o aparecimento de fissuras. A fadiga pode ocorrer tanto durante a aplicação dos primeiros ciclos de carregamento, quanto após aplicação de vários ciclos de carregamento térmico ou nem ocorrer durante a vida útil do revestimento.

A fadiga ocorre pela propagação da fissura a cada aplicação de carregamento térmico e pode ser dividida em 4 fases como está apresentado na figura 2 (UCHÔA, 2007).

Figura 2 - Fases da fadiga



Fonte: Uchôa (2007).

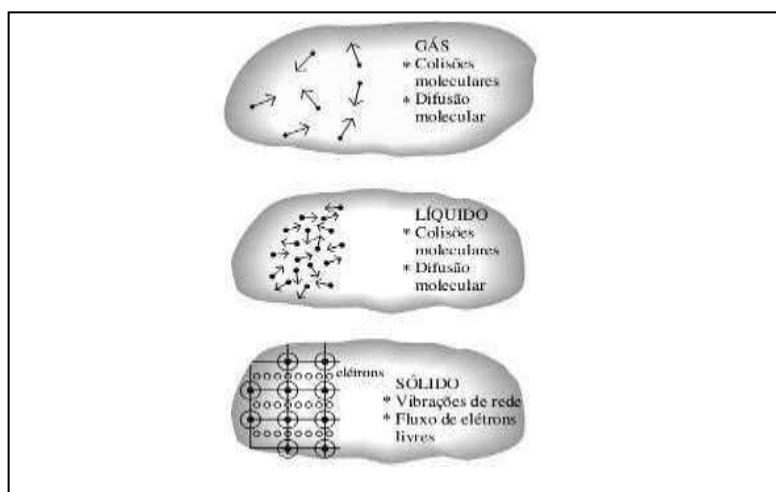
Segundo Uchôa (2007) o surgimento da fissura ocorre na fase de nucleação (figura 2). Na segunda fase, fase de crescimento microscópico, começa a ocorrer o acúmulo de dano ocasionado pelo aumento de tensões durante a aplicação dos ciclos de carga propiciando o crescimento das microfissuras. As fissuras nesta fase ainda são pouco profundas, quando comparadas com o tamanho da seção. Na fase de crescimento macroscópico, terceira fase, parte das fissuras tendem a aumentar e abrir transformando-se em aberturas macroscópicas, propagando-se em direção das regiões de maior concentração de tensões, gerando uma quarta fase, ruptura total, onde a fissura é instável e irreversível no material podendo causar danos expressivos.

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é o fenômeno que estuda as leis e princípios que regem a propagação da energia sob a forma de calor. Ao falarmos em transferência de energia na forma de calor, tendemos a aplicar as leis da termodinâmica. Mas há uma diferença fundamental entre a transferência de calor e a termodinâmica. Embora a termodinâmica trate das interações do calor e o papel que ele desempenha, segundo a primeira e a segunda leis da termodinâmica, ela não leva em conta nem o mecanismo de transferência nem os métodos de cálculo da taxa de transferência de calor. A termodinâmica considera que a matéria esteja em equilíbrio, onde inexistem gradientes de temperatura. Ainda que possamos utilizar a termodinâmica para determinar a quantidade de energia requerida na forma de calor para um sistema passar de um estado de equilíbrio para outro, ela não pode quantificar a velocidade na qual a transferência do calor ocorre (HALLIDAY, 2016).

O processo de transferência de energia na forma de calor dentro de um sistema ocorre devido à existência de zonas com diferentes temperaturas, ou seja, áreas de alta temperatura e de baixa temperatura, desde que estas zonas estejam em contato. Com a elevação da temperatura as moléculas tendem a elevar seu grau de agitação e o processo de transferência de energia dentro de sólidos, líquidos e gases pode ocorrer por meio de colisões moleculares, difusões moleculares e fluxo de elétrons livres (figura 3) (MANGLIK; BOHN *apud* KREITH; BOHN; MANGLIK, 2003).

Figura 3 - Mecanismos de transferência de calor em diferentes fases de uma substância



Fonte: Manglik e Bohn (*apud* KREITH; BOHN; MANGLIK, 2003).

Colisões podem ser definidas como a transferência de energia das partículas de maior para as de menor energia. As colisões moleculares podem ocorrer em meio gasoso ou líquido, quando houver uma transferência de energia de ativação em um meio. Esta energia de ativação pode tratar-se de aumento de calor ou aumento de pressão ao meio. No caso de um corpo submetido a elevação de temperatura, o calor é transferido rapidamente para as moléculas, mas devido a esse aquecimento ocorre um aumento de pressão automaticamente, caso haja gases ou líquidos no interior do meio material. As moléculas por estarem mais energizadas passam a se deslocar com uma velocidade maior, ocasionando colisões entre elas e transferindo parte dessa energia para as moléculas menos energizadas (KREITH; BOHN, 1993).

A difusão molecular ocorre em meio líquido, sólido ou gasoso. O processo de transferência de calor ocorre através do deslocamento de massa molecular de zonas com maior energia térmica para as de menor energia, ou seja, há o deslocamento de moléculas dentro do corpo.

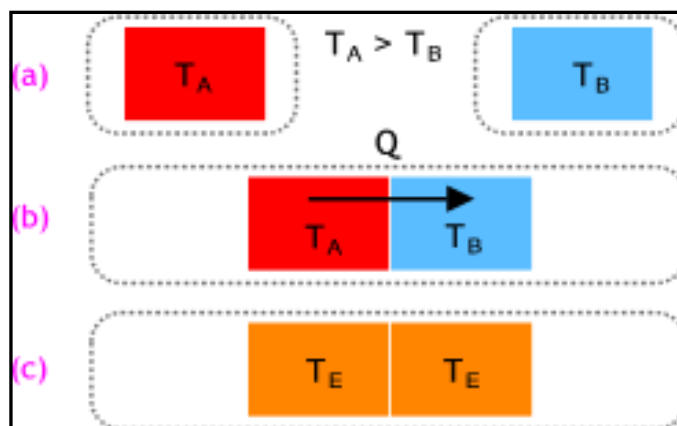
O fluxo de elétrons é definido como a movimentação de elétrons de órbitas com maior energia para órbitas de menor energia. Por meio desse mecanismo, o calor é gradualmente transferido das regiões de maior temperatura em direção às regiões de menor temperatura, até que todo o sistema esteja em equilíbrio de temperatura. Nos meios sólidos a transferência de energia térmica acontece por meio de vibrações ao longo da rede cristalina do material.

Sempre que existir uma diferença de temperatura em zonas de um meio ou entre meios diferentes, desde que estes estejam em contato, ocorre, necessariamente, transferência de calor, pois estes tendem a buscar o equilíbrio de temperaturas (INCROPERA, 2003).

Segundo Sears e Zemansky (1973) quando um corpo é aquecido ou resfriado ocorrem mudanças em suas propriedades físicas. Na maior parte dos sólidos, líquidos e gases ocorre um aumento do seu volume quando aquecidos.

A figura 4 mostra dois meios, dois sistemas ou materiais com diferentes temperaturas (Figura a), onde, ao serem colocados em contato (Figura b), a energia sob forma de calor se propaga do corpo de maior temperatura, T_A , para o de menor temperatura, T_B . O fluxo de calor ocorre até o momento em que os sistemas alcancem o equilíbrio de temperaturas (Figura c).

Figura 4 - Esquema do processo de transferência de calor



Fonte: Sears e Zemansky (1973).

Durante um processo de transferência de energia térmica na forma de calor a quantidade calor transferida é representada por Q , e é obtida pelo produto da taxa de calor transferida, \vec{Q} , pelo intervalo de tempo Δt , onde \vec{Q} é considerado constante na equação 1 a seguir.

$$Q = \vec{Q} \cdot \Delta t \quad (\text{J}) \quad (1)$$

Onde:

Q = quantidade de calor total transferido ao sistema (W ou J)

\vec{Q} = fluxo de calor (W/m^2)

Δt = variação do tempo (s)

2.2.1 Fluxo de calor

O fluxo de calor dentro de um material é um processo resultante da falta de equilíbrio de temperatura em diferentes zonas do sistema. O equilíbrio é o estado em que não ocorre nenhuma variação (SEARS; ZEMANSKY, 1973).

Para fazer a análise do fluxo de calor em um sistema de revestimento é necessário entender o mecanismo de fluxo de calor, conhecer o comportamento e características térmicas dos materiais que compõem o sistema, a velocidade e o tempo que o processo leva para ocorrer. Segundo Luiz (*apud* SISSOM; PITTS, 1988) a massa do material através do qual o processo ocorre afeta diretamente a sua velocidade, conseqüentemente o tempo, bem como a geometria afeta a direção do fluxo no sistema.

O fluxo de calor pode ocorrer em meios sólidos, líquidos e gasosos, porém não ocorre no vácuo. No caso de paredes de alvenarias revestidas por um sistema de multicamadas de argamassas cimentícias tem-se fases sólidas compostas pela espessura das faces interna e externa dos blocos cerâmicos e fase gasosa devido ao ar no interior dos vazios do bloco, formando uma câmara de ar (YAMASHA *et al.*, 1995). Nas camadas de argamassa de revestimento pasta e agregado as fases líquida ou gasosa podem ser encontradas no interior dos poros. Estes podem encontrar-se totalmente preenchidos por água quando o revestimento tiver atingido o seu maior grau de saturação. Os poros estarão parcialmente saturados quando estiverem preenchidos por água ou ar e na condição seca quando estiverem preenchidos por ar (ZENG; FEN-CHONG; DANGLA, 2012). A presença de umidade irá interferir na velocidade do fluxo de calor.

Segundo Çengel e Ghajar (2009) a taxa de calor transferida por unidade de área, normal à direção da energia transferida na forma de calor, é chamada de fluxo de calor e determinada pela equação 2 abaixo.

$$q^{\rightarrow} = \frac{Q^{\rightarrow}}{A} \quad (W/m^2) \quad (2)$$

Onde:

A = área da superfície através da qual a transferência de calor ocorre (m²)

Q= quantidade de calor total transferido ao sistema (W)

q= fluxo de calor médio (W/m²)

2.2.2 Mecanismos de transferência de calor

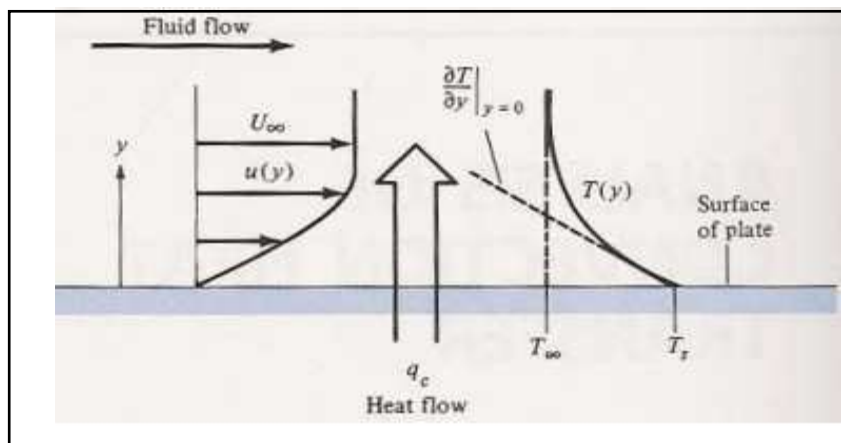
Existem três mecanismos de transmissão de energia através de calor na natureza, os quais serão abordados neste capítulo para que possamos compreender a forma como ocorre o fluxo de calor dentro dos sistemas de revestimento de uma edificação. São eles convecção, radiação e condução.

2.2.2.1 Convecção

O mecanismo conhecido como convecção ocorre somente em líquidos e gases (flúidos). O processo de transporte de calor ocorre devido a movimentação do fluido, ou seja, ocorrendo transporte da matéria. A transferência de energia ocorre devido à

movimentação de um grande número de moléculas, que se movem pela ação de uma força externa (MANGLIK; BOHN, 2003).

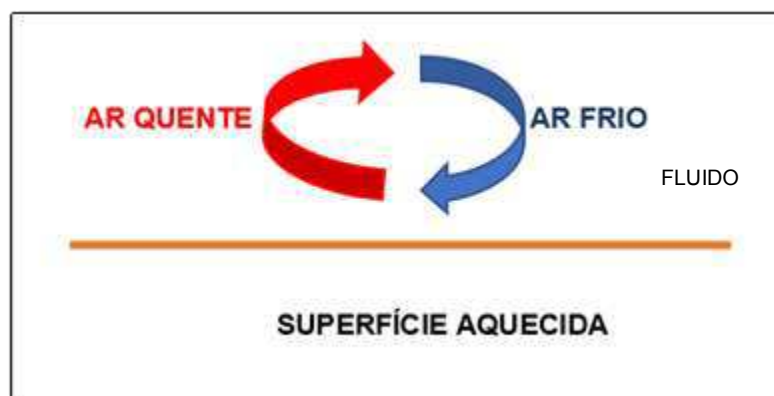
Figura 5 - Distribuição de temperatura e velocidade de transferência de calor por convecção



Fonte: Manglik e Bohn (2003).

Quando uma quantidade de fluido é aquecida as moléculas se agitam, movendo-se em maior velocidade, ocorrendo um aumento da distância entre elas. Esse afastamento entre as moléculas gera um aumento de volume do fluido e conseqüentemente uma redução da densidade. A massa mais quente e mais leve do fluido tende a subir (figura 5), ocasionando o deslocamento da massa mais fria e mais densa para baixo. Este processo ocorre inúmeras vezes, ou seja, é cíclico, sendo denominado como correntes de convecção, e ocorre segundo o exposto na figura 6.

Figura 6 - Distribuição de temperatura e velocidade de transferência de calor por convecção



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Segundo Incropera (2003) a equação utilizada para transferência de energia na forma de calor pelo mecanismo de convecção é a lei do resfriamento de Newton.

$$Q_{conv} = h_c \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (W) \quad (3)$$

Onde:

Q_{conv} = transferência de calor por convecção (W)

h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/ (m².K))

A_s = área da superfície através da qual a transferência de calor ocorre (m²)

T_s = temperatura da superfície (K)

T_{∞} = temperatura do fluido suficientemente longe da superfície (K)

Na atmosfera terrestre a convecção ocorre como uma consequência da radiação ou da condução. Isso se deve à diferença das densidades do ar quente e ar frio. O calor ganho na camada mais baixa da atmosfera através de radiação ou condução é mais frequentemente transferido por convecção. O ar quente é menos denso que o ar frio, desta maneira o ar frio e denso desce e força o ar mais quente e menos denso a subir. O ar mais frio é então aquecido.

Nos subsistemas de alvenarias a convecção ocorre como consequência da radiação solar que incide sobre a superfície da face externa da película de pintura ou das argamassas de revestimento, as quais são aquecidas. Esta elevação da temperatura na superfície gera um gradiente de temperatura entre esta camada superficial e a camada logo abaixo. Essa energia de ativação na forma de calor provoca o movimento de matéria dentro dos poros das argamassas de revestimento, pois estes na maioria dos casos encontram-se preenchidos por ar ou água ou ambos. O deslocamento desta energia térmica ocorre no sentido da camada de maior temperatura para a de menor temperatura até que estas tenham atingido o equilíbrio. Este processo também ocorre nos poros que constituem a parede do substrato, bem como no interior do substrato vazado. Dentro da câmara de ar dos substratos vazados irá ocorrer convecção, com deslocamento de ar até que a parede interna do bloco esteja na mesma temperatura. Da mesma forma irá ocorrer deslocamento de matéria nos poros do revestimento interno até que tenha atingido a temperatura das camadas anteriores.

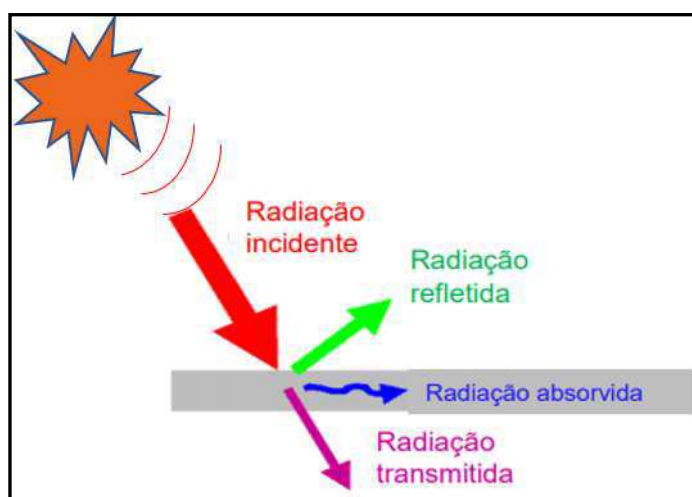
Segundo Emmel, Abadie e Mendes (2007), Hagishima; Tanimoto (2003), Jayamaha, Wijesundera e Chou (1996), Liu; Harris (2007), Luo *et al.* (2010) e Shao *et al.* (2009) em paredes a transferência de calor, que ocorre através do mecanismo de convecção do ar para a superfície externa da parede sofrerá influência das condições de contorno como por exemplo da geometria da parede, umidade, velocidade e direção do vento.

2.2.2.2 Radiação

O mecanismo de transmissão de calor chamado radiação é um fenômeno que está associado a ondas eletromagnéticas. Estas ondas eletromagnéticas viajam com a velocidade da luz. A radiação térmica pode ocorrer em meio sólido, líquido ou gasoso, sendo este mecanismo o único que pode ocorrer através do vácuo.

O mecanismo da radiação varia de acordo com as características da fonte emissora, ou seja, a velocidade e a qualidade de propagação do calor vai depender diretamente da fonte radiante. Quanto ao corpo receptor de radiação podemos dizer que há corpos capazes de absorver a radiação. Parte da energia absorvida na forma de calor (figura 7) pode ser transmitida através do corpo por meio de outros mecanismos de transferência de calor e parte poderá ser refletida (KREITH, 1993). Em um sólido a energia radiante absorvida passa a ser transmitida por condução. Porém se falarmos em um sólido poroso ocorre transmissão de energia através de mecanismos de transferência de calor combinados.

Figura 7 - Radiação emitida, absorvida e refletida



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

A taxa máxima de radiação é dada pela lei de Stefan-Boltzmann (ÇENGEL; GHAJAR, 2009), como mostra a equação 4.

$$Q_{emiss,máx} = \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (W) \quad (4)$$

Onde:

$Q_{emiss,máx}$ = taxa máxima de emissão de radiação (radiação de corpo negro) (W)

σ = constante de Stefan-Boltzmann (W/(m².K))

A_s = área da superfície através da qual a transferência de calor ocorre (m²)

T_s = temperatura termodinâmica na qual se encontra o corpo (K)

Onde σ (constante de Stefan-Boltzmann) possui o valor de $5,670 \times 10^{-8}$ (W/(m².K)). A superfície idealizada que emite radiação a essa taxa é chamada de corpo negro, para as outras superfícies existe uma propriedade chamada emissividade (ϵ), que varia entre zero e um. Para um corpo negro $\epsilon = 1$ e quanto mais uma superfície tem emissividade perto de 1, mais seu comportamento se aproxima à de um corpo negro (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$Q_{emiss} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (W) \quad (5)$$

Onde:

Q_{emiss} = taxa de emissão de radiação (W)

ϵ = emissividade da superfície (0 à 1)

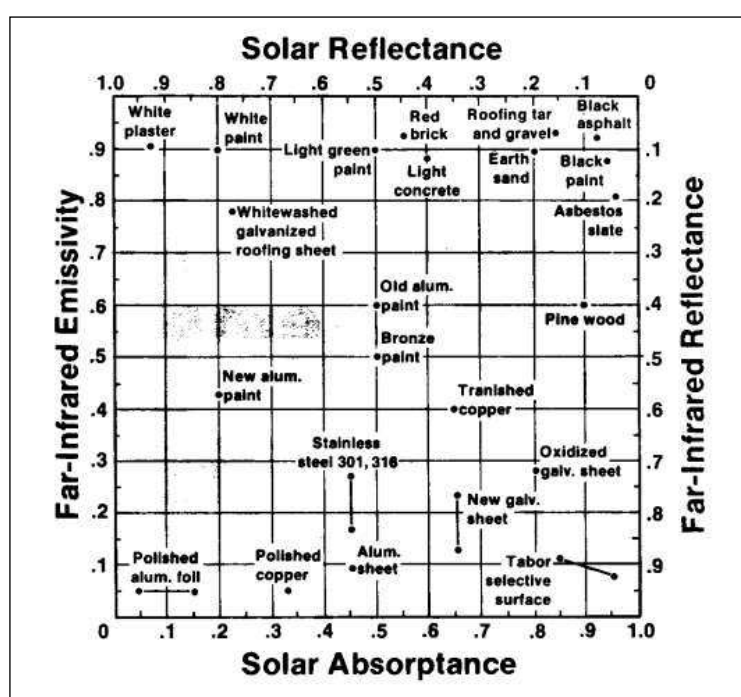
σ = constante de Stefan-Boltzmann (W/(m².K))

A_s = área da superfície através da qual a transferência de calor ocorre (m²)

T_s = temperatura termodinâmica na qual se encontra o corpo (K)

Na Figura 8 são apresentadas, em forma de diagrama, as propriedades radiantes de alguns materiais de construção. Estes materiais na sua maioria são não metálicos, como por exemplo pinturas, concreto, argamassas e tijolos, os quais absorvem grande parte da energia térmica incidente (FAIREY, 1994).

Figura 8 - Representação gráfica de valores de absorptância e emissividade para alguns materiais da construção civil



Fonte: Fairey (1994).

Fairey (1994) na figura 8 apresenta valores de 0 a 1 para as propriedades radiantes dos materiais de construção. As tintas apresentam alta emissividade, próxima 0.9 para infravermelho não importando a sua cor, mas a tinta branca apresenta alta refletância solar na faixa de 0,8 e baixa absorptância solar com valor próximo de 0,2. Enquanto a tinta preta apresenta valores de 0,9, ou seja, alta absorptância solar e valores menores que 0,1 de refletância solar. Esses valores demonstram a influência significativa da escolha da cor dos revestimentos de fachada na transferência de calor através do mecanismo de radiação, ficando explícito que fachadas com revestimentos em tonalidades mais claras tendem a absorver menor quantidade de calor.

Já para materiais como tijolo de cerâmica vermelha Fairey (1994) apresenta na figura 8 valores de refletância solar próximos de 0.4 e de absorvância de 0.6, ou seja, uma baixa capacidade de refletir a energia solar, e uma capacidade de absorver calor mediana. Enquanto que para gesso branco apresenta grande capacidade de refletância solar com valores entre 0,9 e 1,0 e uma baixíssima capacidade de absorvância solar com valores entre 0 e 0,1.

Ainda dentro deste contexto NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta valores para propriedades térmicas de materiais comumente utilizados nas edificações e que interferem de forma expressiva na quantidade de calor transferida e conseqüentemente no desempenho térmico dos sistemas e subsistemas que compõem as edificações tabela 2.

Tabela 2 - Absortância para radiação solar e emissividade para radiações a temperaturas comuns

Tipo de superfície		Absortância (α)	Emissividade (ϵ)
Chapa de alumínio nova brilhante		0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)		0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)		0,25	0,25
Caiação nova		0,12/0,15	0,9
Concreto aparente		0,65/0,80	0,85/0,95
Telha de barro		0,75/0,80	0,85/0,95
Tijolo aparente		0,65/0,80	0,85/0,95
Reboco claro		0,30/0,50	0,85/0,95
Revestimento asfáltico		0,85/0,98	0,90/0,98
Vidro incolor		0,06/0,25	0,84
Vidro colorido		0,40/0,80	0,84
Vidro metalizado		0,35/0,80	0,15/0,84
Pintura	Branca	0,2	0,9
	Amarela	0,3	0,9
	Verde Clara	0,4	0,9
	Aluminio	0,4	0,5
	Verde escuro	0,7	0,9
	Vermelha	0,74	0,9
	Preta	0,97	0,9

Fonte: NBR 15220 - parte 2 (ABNT, 2005).

A lei da radiação de Kirchhoff indica uma outra propriedade importante que é a absortância (α), utilizada em muitas aplicações práticas. As equações 6 demonstram a quantidade de energia absorvida e a refletida (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$Q_{abs} = \alpha \cdot Q_{inc} \quad (W) \quad (6)$$

$$Q_{ref} = (1 - \alpha) \cdot Q_{inc} \quad (W)$$

Onde:

Q_{abs} = taxa de radiação absorvida (W)

Q_{ref} = taxa de radiação refletida (W)

α = absorptância da superfície (0 à 1)

Q_{inc} = taxa de radiação incidente

A diferença entre as taxas de radiação emitida e de radiação absorvida é a transferência de calor líquida por radiação (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

2.2.2.3 Condução

A condução térmica é um dos mecanismos de transferência de calor que ocorre no interior de materiais sólidos devido à diferença de temperatura. A propagação do calor ocorre por meio de sucessivas colisões de duas ou mais moléculas com diferentes temperaturas. O calor faz com que os átomos da extremidade aquecida se movam cada vez mais rápido. Desta forma os átomos e elétrons livres colidem com seus vizinhos e assim por diante. O processo de múltiplas colisões continua progressivamente até que todos átomos tenham absorvido essa energia e o corpo todo esteja aquecido. Essa transferência de energia ao longo de todo o corpo, ocorre sem que ocorra transferência de matéria, até que todo corpo se encontre em equilíbrio de temperaturas (HEWITT, 2015).

Este fenômeno ocorre no sólido porque os átomos estão em posição fixa, arranjados em uma rede em forma cristalina, propiciando a transferência da energia entre eles em razão das sucessivas colisões.

A Lei de Fourier rege os fenômenos de transferência de calor por condução, através dela podemos calcular o fluxo de calor transportado por condução entre duas superfícies (equação 7).

$$Q_{cond} = -K \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (7)$$

Onde:

Q_{cond} = transferência de calor por condução (W)

k = condutividade térmica (W/(m. K))

A = área da superfície através da qual a transferência de calor ocorre (m²)

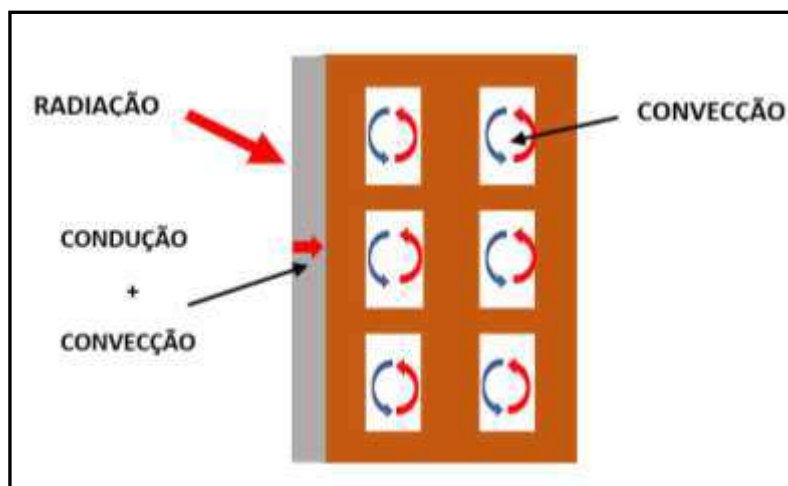
dT/dx = gradiente de temperatura (K/m)

2.2.2.4 Mecanismos simultâneos de transferência de calor

Segundo Çengel e Ghajar (2009) em situações práticas os três mecanismos de transferência de energia térmica na forma de calor podem ocorrer isoladamente ou combinados, mas nem todos podem ocorrer em todos os meios.

Dentro deste contexto podemos verificar que, analisando os sistemas de vedação vertical há ocorrência dos três mecanismos (figura 9). As fachadas estão sujeitas a transferência de calor por radiação solar em sua superfície. Por tratar-se de um meio sólido, mas com considerável porosidade a transferência de calor ocorre por condução na fase sólida dos revestimentos, e por convecção em seus poros, independentemente de estarem totalmente ou parcialmente preenchidos com água ou ar. A energia transferida ao chegar no substrato cerâmico pode se deparar com superfícies sólidas com ou sem vazios. No caso do substrato ser composto de blocos estruturais vazados há que se considerar no seu interior a existência de câmara de ar. Neste caso teremos transferência de calor em suas paredes por condução e em seus vazios por convecção.

Figura 9 - Croqui dos mecanismos de transferência de calor combinados no sistema de vedação vertical composto de bloco cerâmico estrutural vazado



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Segundo Luo *et al.* (2010) e Zeng, Fen-Chong e Dangla (2011) a ocorrência dos mecanismos combinados no sistema de vedação vertical serão diretamente influenciados pelas condições de umidade no interior do sistema.

A porosidade e o teor de umidade presente nas argamassas de revestimento influência de forma considerável no tipo de mecanismos de transferência de calor que ocorrem no sistema de revestimento, bem como na velocidade de calor transferida.

2.3 GRADIENTES TÉRMICOS

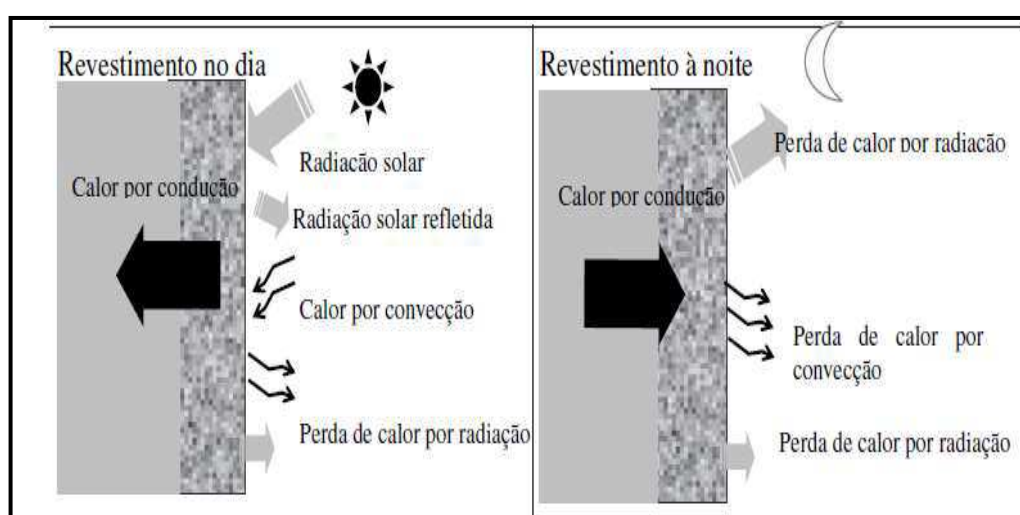
Fourrier define gradiente térmico como o vetor normal à superfície isotérmica em direção ao decréscimo de temperatura, decorrente da variação de temperatura em diferentes zonas do sistema (HAHN; ÖZİŞİK, 2012). No sistema de vedação vertical o gradiente de temperatura é usado para descrever a variação de temperatura em áreas pré-determinadas. Nestas áreas são determinadas as temperaturas em cada ponto, variando em função das direções x, y, z.

Os revestimentos aderidos durante sua aplicação, e principalmente após o seu endurecimento, cura e vida útil, estão sujeitos às solicitações geradas pelas variações climáticas que ocorrem ao longo do dia, meses e ano. Essas variações de temperatura ao longo de uma área ou volume descrevem o gradiente de temperatura. Essas diferenças de temperatura juntamente com os diferentes materiais que compõem as argamassas e o material do substrato propiciam variações dimensionais, contração ou expansão que, se restringidas, ensejam o aparecimento de tensões internas nos revestimentos. Tais tensões podem resultar em fissuras, as quais tendem a aumentar sua dimensão, profundidade e quantidade a cada ciclo térmico. Por este motivo as variações climáticas combinadas com fatores intrínsecos do sistema de revestimentos é considerada um dos principais mecanismos de degradação dos revestimentos, pois comprometem significativamente sua vida útil (MOSCOSO, 2013a).

Os gradientes de temperatura gerados nas faces externas do sistema de revestimento serão função da variação de temperatura diária ou anual (figura 10), porém na face interna do sistema serão diretamente influenciados pelas condições de temperatura geradas pelo usuário através de sistemas de refrigeração ou aquecimento artificial do ambiente, assim como pela quantidade e a velocidade do fluxo de calor transmitida pela superfície da face externa. As diferenças de temperatura entre as faces externas e internas do sistema propiciam a ocorrência de

gradientes de temperatura. Esse processo cíclico de resfriamento e aquecimento das faces ao longo do tempo é responsável pelo aparecimento de tensões e solicitações internas e externas que podem ou não gerar o aparecimento imediato de fissuras em escala micro ou macroscópica. Essas variações periódicas de temperatura tendem a acirrar o processo de fissuração do revestimento, ao longo do tempo, podendo, em função da fadiga do sistema, comprometer o seu desempenho e durabilidade (ESQUIVEL, 2009).

Figura 10 - Processos de transferência de calor nos revestimentos externos diurno e noturno



Fonte: Esquivel (2009).

A figura 10 apresenta a direção do fluxo de calor diária, demonstrando de forma macroscópica os mecanismos de transferência de calor tanto na superfície como no interior do sistema de revestimento vertical.

2.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Para que possamos compreender o comportamento térmico do sistema de revestimento vertical é de suma importância estudar as principais propriedades de seus materiais isoladamente e como um sistema único. Dentro deste contexto as principais propriedades que interferem no comportamento térmico dos materiais são o coeficiente de expansão térmica (CET), a condutividade térmica, a capacidade térmica, a difusividade térmica, a resistência térmica e a transmitância térmica.

2.4.1 Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica (CET) é considerado uma das propriedades termomecânicas mais importantes dos materiais que compõem o sistema de revestimento. Está relacionado à variação dimensional de um corpo, podendo esta ser volumétrica ou linear, quando sujeito a gradientes de temperatura.

Os revestimentos argamassados são considerados sistemas heterogêneos sendo estudados em escala macroscópica, mesoscópica ou microscópica. Em escala macroscópica, segundo Metha e Monteiro (1994) são elementos visíveis ao olho humano, sendo aproximadamente um quinto de milímetro ($1/5$ mm ou $200\mu\text{m}$), ou seja, o sistema de revestimento é constituído pela pasta aglomerante, poros (água ou ar) e agregado. Na escala mesoscópica nos referimos a fissuras, a alguns poros e a zona de transição. Na escala microscópica as argamassas são constituídas pelos vários produtos de hidratação do cimento como hidróxido de cálcio (C-H), silicato de cálcio hidratado (C-S-H), microporos, microfissuras, entre outros componentes (ESQUIVEL, 2009; MURUYAMA; TERAMOTO; IGARASHI, 2014). O conhecimento do CET dos componentes das argamassas é de grande importância para que possamos compreender o surgimento das tensões e solicitações internas da argamassa, quando submetida a gradientes térmicos. Ao serem expostos a gradientes de temperatura estes elementos sofrem uma variação volumétrica, contração ou dilatação distintas, propiciando o aumento de tensões internas.

O CET dos revestimentos de argamassa depende da composição das argamassas, como: tipo de agregado, tipo de aglomerante, teor de umidade e de sua porosidade (ZENG; FEN-CHONG; DANGLA, 2012). Os diferentes produtos resultantes da hidratação do cimento apresentam CET distintos, ou seja, com variações volumétricas diferenciadas que propiciam o aparecimento de tensões internas na pasta. Juntamente com as propriedades térmicas dos compostos da pasta, temos o CET do agregado. Quanto mais distantes os valores entre os CETs da pasta e do agregado, maior será a tendência do surgimento de tensões e, conseqüentemente, maior será a possibilidade do aparecimento de microfissuras (SHUI *et al.*, 2010).

O coeficiente de expansão térmica dos agregados influencia diretamente no CET das argamassas de revestimento (GOMES *et al.*, 2017; KIM *et al.*, 2003). Como o CET está relacionado à variação dimensional do agregado, quanto maior for o seu

aumento de volume quando submetido à gradientes de temperatura, maior será a variação dimensional da argamassa.

A tabela 3 apresenta valores de CET para vários tipos de agregados e pasta de cimento obtidos em pesquisas de diversos autores.

Tabela 3 - Coeficientes de dilatação térmica de vários componentes das argamassas

Componentes das argamassas	Coeficiente de dilatação linear ($\times 10^{-6} \text{C}^{-1}$)			
	Neville (2013)	Metha e Monteiro (2014)	Ghabezloo(2011)	Meyers(1940)
Granito	1,8- 11,9	8		-
Quartzo	-	11,0- 12,0		-
Calcário	0,9-12,1	5	5,0-12,0	-
Basalto	3,6-9,7	7		-
Escória	9,2	9	-	-
Pasta de cimento	11,0-16,0		-	15,0-20,0

Fonte: Elaborada pela autora, adaptado de Esquivel (2009).

2.4.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é a propriedade que está relacionada à habilidade de transportar energia na forma de calor dentro do sistema de revestimento. A condutividade térmica influencia diretamente a velocidade do fluxo de calor. Materiais com alta condutividade térmica conduzem mais rapidamente o calor que os de baixa condutividade térmica. A condutividade térmica depende fortemente da temperatura a que o material está exposto, bem como da homogeneidade do material (KREITH, 1993), mas em problemas de engenharia é comumente utilizada a condutividade térmica média do material.

No caso das argamassas de revestimentos podemos dizer que a condutividade térmica também estará relacionada à quantidade de calor transmitida e a espessura da camada. Segundo Gomes *et al.* (2017) o teor de umidade interfere fortemente na maior ou menor condutividade térmica. Isto ocorre devido à água possuir uma condutividade térmica, aproximadamente, vinte e cinco (25) vezes maior que a do ar. A condutividade térmica do ar a 20°C (0,026 W/m.°C) é menor que a condutividade térmica da água (0,61 W/ m.°C). Segundo Marshall (1972) a relação entre o teor de umidade e a condutividade térmica é praticamente linear. Então com a redução da umidade em um sistema que é saturado o valor da condutividade térmica tende a sofrer uma redução.

Ainda dentro deste contexto, Kim *et al.* (2003) constatou, com base em seus estudos em concreto, na pasta de cimento e argamassas, que a condutividade térmica

está relacionada diretamente com a idade de hidratação, o volume de agregados, a quantidade de cimento, o tipo de aditivo, o teor de finos na mistura, a temperatura e a umidade dos compósitos.

Bazant e Kaplan (1996), em seus estudos, identificou em concreto, que a condutividade térmica está situada entre 1,1 e 1,6 W/m.C°, sendo menor que a condutividade térmica da maioria dos agregados comumente utilizados no concreto.

Em estudos realizados por Xu e Chung (2000) em argamassas no estado seco, utilizando na sua constituição agregado miúdo quartzoso, areia, verificaram valores de condutividade térmica em torno de (0,58 ± 0,03) W/m.C°.

Segundo Rousan e Roy (1983) em argamassas secas com porosidade de 31% a condutividade térmica apresentou valores de 0,70 W/m.C°, porém quando as amostras eram saturadas o valor da condutividade térmica alcançava 2,95 W/m.C°. Os mesmos autores realizaram estudos com argamassas com uma porosidade de 18% e com teor de umidade reduzido constatando que para argamassas secas o valor de condutividade térmica era de 1,92 W/m.C°, enquanto que para a amostra saturada o valor aumentava para 2,57 W/m.C°. O aumento da condutividade térmica em amostras com teor de umidade mais elevado nos poros, não se deve somente ao fato da condutividade térmica da água ser maior que a do ar, mas que em amostras expostas à temperatura mais elevada, ocorre evaporação da água nos poros e este vapor é difundido pela rede de poros da argamassa transportando calor.

Mendes *et al.* (2001) em estudos realizados em tijolos cerâmicos apresentou valores de condutividade térmica de 0,98 W/m.C° no estado seco e 2,08 W/m.C° no estado saturado, ou seja, a condutividade térmica aumentava conforme ocorria um aumento do teor de umidade nos poros do material.

A condutividade térmica é calculada através da equação 8.

$$K = q \cdot \frac{\Delta X}{\Delta T} \quad \left(\frac{W}{m.K} \right) \quad (8)$$

Onde:

q = fluxo unitário de calor unidimensional (W)

ΔX = espessura do material (m)

A = diferença de temperatura entre as superfícies (K0)

2.4.3 Capacidade térmica

A quantidade de energia necessária para elevar em uma unidade a temperatura de um material é denominada capacidade térmica. Esta propriedade depende da massa e da composição do material. Segundo Esquivel (2009), frequentemente é usado calor específico (c). O calor específico é uma grandeza que caracteriza a facilidade ou dificuldade de um determinado material variar sua temperatura quando ocorre transferência de energia na forma de calor. É importante ressaltar que esta propriedade depende da composição do material. A capacidade térmica pode ser determinada através da equação 9.

$$C = \frac{q}{\Delta T} \quad (J/K) \quad (9)$$

Onde:

q = quantidade de calor adicionada (ou removida) ao sistema para provocar variação de temperatura (J)

ΔT = variação de temperatura

O calor específico do material é determinado pela equação 10.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad \left(\frac{J}{Kg \cdot K}\right) \quad (10)$$

Onde:

q = quantidade de calor adicionada (ou removida) ao sistema para provocar variação de temperatura (J)

m = massa do material (Kg)

ΔT = variação de temperatura (K)

2.4.4 Difusividade térmica

A propriedade de difusividade térmica é a taxa na qual as mudanças na temperatura podem ocorrer dentro do material ou demonstra a forma como o calor se propaga dentro do sistema. É a relação entre a condutividade térmica e o produto da sua densidade pela capacidade térmica (equação 11).

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c} \quad (11)$$

Onde:

K = Condutividade térmica do material (W./m.K)

ρ = densidade do material (Kg/m³)

c = calor específico da matéria (J / Kg. K)

Segundo Esquivel (2009) a baixa difusividade térmica retarda a resposta do material às variações de temperatura do seu ambiente, conseqüentemente demorando mais para atingir o equilíbrio térmico.

A difusividade térmica para pasta de cimento endurecida é menor do que a difusividade térmica dos agregados. A 21°C constatou que os valores para difusividade térmica da pasta de cimento variavam entre $0,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $0,50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (BLUNDELL; DIAMOND; BROWNE, 1976).

A difusividade térmica registrada em estudos por Xu e Chung (2000) para argamassas, utilizando areia como agregado miúdo, apresentou valor de $4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Segundo Chirdon, Aquino e Hover (2007) valores para difusividade térmica para concretos e argamassas endurecidos são facilmente adquiridos, mas inúmeras pesquisas vêm sendo desenvolvidas no intuito de aprimorar as metodologias de ensaios para determinar a difusividade térmica em argamassas, principalmente em função das interferências significativas do calor de hidratação do cimento nas primeiras idades.

2.4.5 Resistência térmica

A resistência térmica é comparada por muitos autores com a resistência elétrica, ou seja, é a capacidade do material resistir ao fluxo de calor. Esta é influenciada diretamente pela espessura da camada do material e pela sua condutividade térmica conforme equação 12.

$$R = \frac{\Delta X}{K} \quad \left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right) \quad (12)$$

Onde:

ΔX = espessura da camada (m);

K= condutividade térmica do material (W/ m.K)

A resistência térmica total é definida pela ABNT (NBR 15220) como sendo o somatório das resistências térmicas de cada camada de um sistema ou material, incluindo as resistências superficiais interna e externa.

Analisando sistema de vedação vertical que é composto por diferentes camadas em série e considerando que o fluxo de calor ocorra por condução, as resistências térmicas poderiam ser somadas para obtenção da resistência total.

2.4.6 Transmitância térmica

A transmitância térmica é definida pela NBR 15220 (ABNT, 2022) como sendo o inverso da resistência térmica, ou seja, é a facilidade com que o material ou sistema permite que ocorra o fluxo de calor ao longo de sua espessura. Sendo obtida pela equação 13.

$$U = \frac{1}{R} \quad (W/(m^2 \cdot K)) \quad (13)$$

Onde:

R= resistência térmica do material ($m^2 \cdot K/W$)

2.5 TENSÕES NOS REVESTIMENTOS DE FACHADA

Segundo Zeng, Fen-Chong e Dangla (2011) o surgimento das primeiras tensões nos revestimentos argamassados iniciam-se já nas primeiras idades. Em estudos sobre retração em argamassas de revestimento foi observado que durante a hidratação do cimento ocorrem os efeitos de expansão por origem química, com variações volumétricas, provocadas pela formação dos produtos de hidratação. Este efeito ocorre simultaneamente com a retração por secagem.

Estudos constatam que antes do início da pega da pasta, os níveis de tensões provocados pela retração são significativos, no que diz respeito ao risco de surgimento de microfissuras, devido à sucção de água da argamassa pelo substrato. Quando a

argamassa de revestimento, no estado plástico, é aplicada sobre o substrato, poroso e rígido, esta fica submetida às tensões de escoamento e cisalhamento. Tais tensões são geradas pelo peso próprio da argamassa aplicada na base e pelas forças de sucção da base. O grau de deformabilidade nesta fase não é livre, sendo restringido pela base gerando uma tendência maior a microfissuração (CINCOTTO *et al.*, 2001).

Outros fatores que contribuem fortemente para o surgimento de tensões internas do revestimento, durante o seu processo de endurecimento e cura, são a temperatura e umidade do ambiente (ESQUIVEL, 2009).

Fioritto (1994), com base em seus estudos, verificou que as argamassas de revestimento no estado endurecido estão submetidas às mais variadas tensões solicitantes e que estas podem se compensar ou se adicionar, propiciando esforços significativos nas camadas de revestimento.

Os diferentes CETs dos elementos que compõem os sistemas de vedações verticais ao serem submetidos às variações de temperatura propiciam o aparecimento de esforços solicitantes nas argamassas de revestimento. A intensidade destes esforços será influenciada pelas temperaturas a que estão expostos, pela umidade, pelas características térmicas dos componentes do sistema, pela diferença de temperatura entre as faces externa e interna do sistema de vedação e pela velocidade de transferência de calor dentro do sistema.

Vecchio e Sato (1990 *apud* FERNANDES, 2017) afirmam que as tensões térmicas geradas nas argamassas de revestimento estão diretamente ligadas a parâmetros como o nível de restrição, módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica.

2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS AGREGADOS

Para que se possa fazer o correto uso das rochas como agregados na construção civil é de suma importância o conhecimento prévio das suas propriedades, de forma que se possa ter um melhor entendimento do seu comportamento ao incorporá-las nas argamassas de revestimento. Ao caracterizar uma rocha identificamos sua composição mineralógica, sua textura, sua estrutura e seu comportamento térmico.

As rochas apresentam uma grande heterogeneidade em sua composição mineral, o que depende diretamente de sua natureza. Entre as propriedades das

rochas as que mais têm relevância no uso em argamassas são a sua densidade, sua massa específica, sua capacidade de absorção de água, sua porosidade, dureza, calor específico, a condutividade térmica e a sua dilatação térmica (tabela 4 e 5).

Tabela 4 - Valores médios de parâmetros de rochas utilizadas para produção de agregados

Classificação	Rocha	Absorção (%)	Massa Unitária	Massa Específica	Abrasão Los Angeles	
Classe	Tipo					
Ígenas	Intrusiva (granulação grossa)	Diorito	0,30	-	2,92	18
		Gabro	0,16 - 0,30	-	2,95 - 3,08	19
		Granito	0,30 - 1,00	1,35 - 1,60	2,63 - 2,80	19 - 35
		Peridotito	0,30	-	3,01	-
	Extrusiva (granulação fina)	Andesito	0,30 - 4,00	-	2,50 - 2,81	-
		Basalto	0,10 - 2,00	1,38 - 1,62	2,63 - 2,98	10 - 20
		Diabásio	0,30	-	2,96	18
		Riolito	0,40 - 1,60	-	2,59 - 2,65	-
Sedimentar	Calcárias	Calcário	0,90	-	2,50 - 2,80	71 - 26
		Dolomita	0,30	1,45	2,84	18 - 30
	Silicosas	Chert	1,10 - 1,60	-	2,50 - 2,70	26
		Arenito	1,80	-	2,54 - 2,65	35
		Anfibolito	0,30 - 0,40	-	2,64 - 3,02	35
Metamórfica	Foliadas	Gnaise	0,40	-	2,71 - 2,74	25 - 40
		Xisto	0,40 - 1,30	-	2,67 - 2,76	19 - 38
	Não Foliadas	Mármore	0,20	-	2,60 - 2,70	44
		Quartzito	0,10 - 0,30	-	2,62 - 2,69	19 - 28
	Serpentina	0,90	-	2,62	19	

Fonte: Elaborada pela autora, adaptado de Andriolo (2015).

Tabela 5 - Valores de CET de rochas utilizadas para produção de agregados

Rochas	Coeficiente de dilatação linear ($\times 10^{-6} \text{C}^{-1}$)			
	Neville (1962)	Metha e Monteiro (1994)	Ghabezloo(2011)	Meyers(1940)
Granito	1,8- 11,9	8		-
Quartzo	-	11,0- 12,0		-
Calcário	0,9-12,1	5	5,0-12,0	-
Basalto	3,6-9,7	7		-

Fonte: Elaborada pela autora com dados de Meyers (1940) e Neville e Brooks (2014).

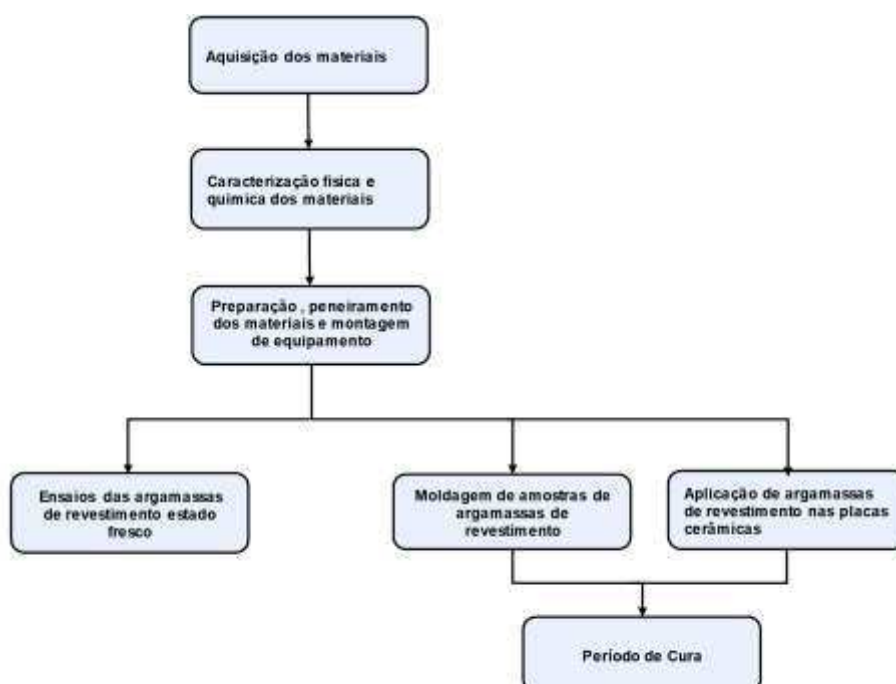
Em locais onde ocorrem variações climáticas intensas pode haver um comprometimento das resistências mecânicas das rochas. No caso de temperaturas mínimas, caso seja atingida a temperatura de ponto de congelamento da água, poderá ocorrer a perda de resistência físico-mecânica, decorrente da tensão de vazios, provocada pelo gelo nos interstícios das rochas. O contrário ocorre em temperaturas elevadas onde ocorre a dilatação das rochas, sobretudo naquelas diretamente expostas às intempéries.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizada no estudo do comportamento das argamassas de revestimentos, quando submetidas à ensaios de envelhecimento acelerado. O programa experimental desenvolvido neste estudo estabelece variáveis de controle, materiais e métodos com o intuito de atingir os resultados para os objetivos propostos neste estudo. Para um melhor entendimento o programa foi dividido em 2 etapas, conforme apresentado abaixo:

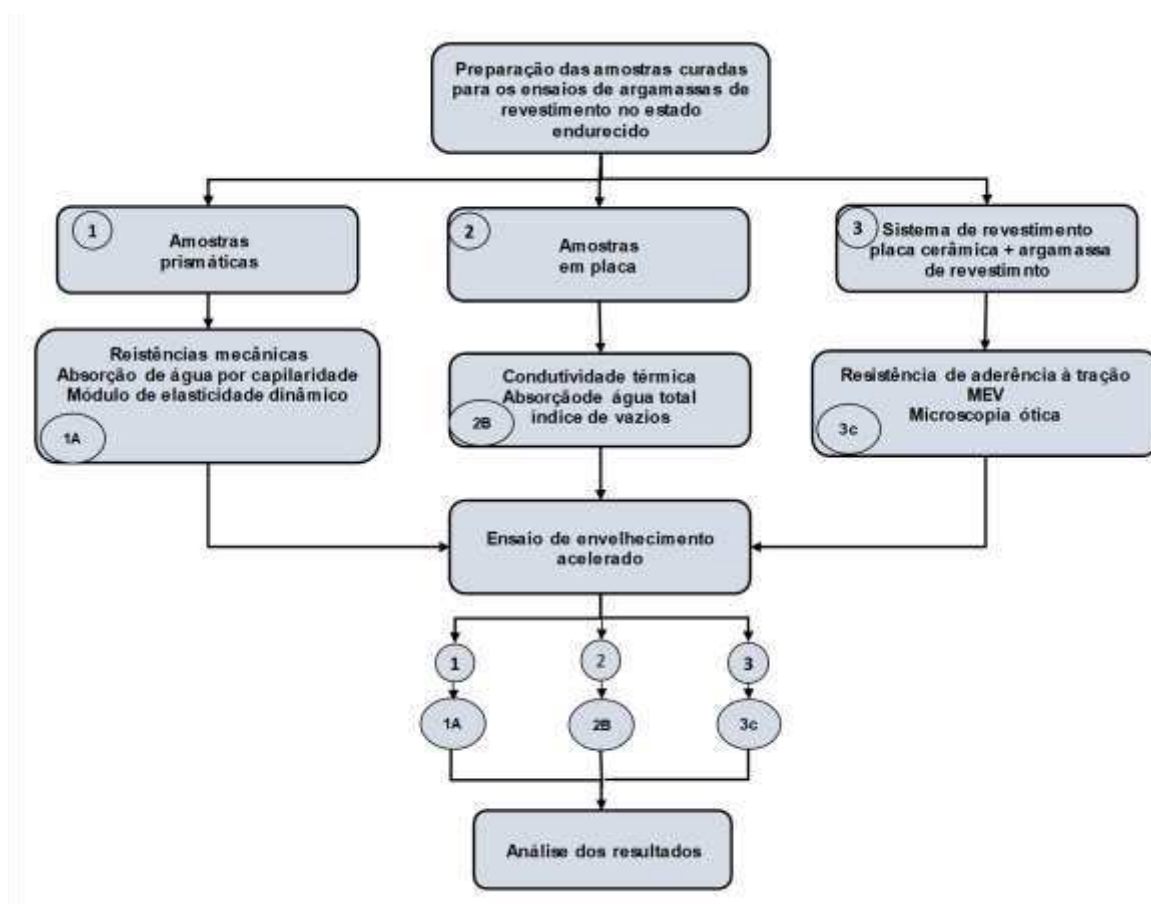
- a) Etapa I – Esta etapa contempla a caracterização de todos os materiais adquiridos, a dosagem dos traços das argamassas de revestimento utilizadas neste estudo, os ensaios nas argamassas de revestimento no estado fresco, montagem de equipamentos, bem como a moldagem das amostras de argamassas de revestimento e o período de cura de amostras;
- b) Etapa II- Esta etapa contempla os ensaios nas amostras de argamassas de revestimento no estado endurecido, com a finalidade de conhecer o seu comportamento e características antes e após aplicação de ciclagem térmica. Ainda nesta etapa foram realizados os ensaios no sistema de vedação vertical com o objetivo de conhecer o comportamento do conjunto antes e depois da aplicação do método de envelhecimento acelerado;

Figura 11 - Fluxograma - Etapa I



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Figura 12 - Fluxograma - Etapa II



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 FATORES FIXOS E VARIÁVEIS

Para a montagem do programa experimental e melhor entendimento dos fatores que influenciam o comportamento das argamassas definimos fatores fixos e variáveis, bem como as variáveis de resposta desta pesquisa.

3.1.1 Fatores fixos

- a) aglomerantes;
- b) granulometria dos aglomerantes;
- c) substrato;
- d) traço argamassa de revestimento 1:5;
- e) quantidade de água;
- f) preparação da mistura;
- g) metodologia de aplicação;

- h) chapisco traço 1:3;
- i) espessura da camada de chapisco ($5 \pm 2\text{mm}$);
- j) espessura da camada de revestimento ($30 \pm 1\text{mm}$); e
- k) processo de cura.

3.1.2 Fatores variáveis

- a) agregado; e
- b) percentual aditivo.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta etapa estão apresentados os materiais utilizados para a realização desta pesquisa, bem como os ensaios realizados para a sua caracterização.

3.3 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste estudo os materiais foram escolhidos de forma a reduzir o número de variáveis. As argamassas de revestimento são constituídas de cimento CPV ARI, areia natural de rio (AN) ou por areias de britagem de rocha basáltica (AAB), areias de britagem de rocha granítica (ABG) e areia de britagem de rocha de quartzito (ABQ), enquanto o sistema de revestimento é composto de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais, chapisco e camada de revestimento em argamassa cimentícia.

3.3.1 Aglomerante

A caracterização do cimento utilizado tanto para o chapisco como para a produção das argamassas de revestimento deste estudo foi o cimento Portland CP V ARI (tabelas 6 e 7). Este aglomerante foi escolhido por ser um cimento constituído pela menor quantidade de adições. Além disso, ao incorporá-lo à mistura tem-se um ganho de resistência acelerado nas primeiras idades. Sua massa específica, fornecida pelo fabricante, foi de $3,09 \text{ g/cm}^3$. A composição granulométrica do aglomerante foi determinada através do método de difração à laser por via úmida (gráfico 3), sendo que para o cimento deve ser utilizado dispersantado tipo álcool isopropílico.

Tabela 6 - Características físicas do cimento CP V - ARI

Ensaio	Norma utilizada	unidade	limite
Área Específica (Blaine)	NBR NM 76:1998	cm ² /g	≥ 2800
Massa Específica	NBR NM 23:2001	g/cm ³	3,09
Finura - Resíduos na Peneira de 0,075 mm	NBR 11579:2012	%	≤ 10,0
Finura - Resíduos na Peneira de 0,044 mm	NBR 12826:1993	%	não aplic.
Água da Pasta de Consistência Normal	NBR NM 43:2002	%	não aplic.
Início de Pega	NBR NM 65:2003	min	≥ 60 min
Fim de Pega	NBR NM 65:2003	min	≤ 600 min
Expansibilidade de Le Chatelier	NBR 1158:1991	mm	≤ 5,0

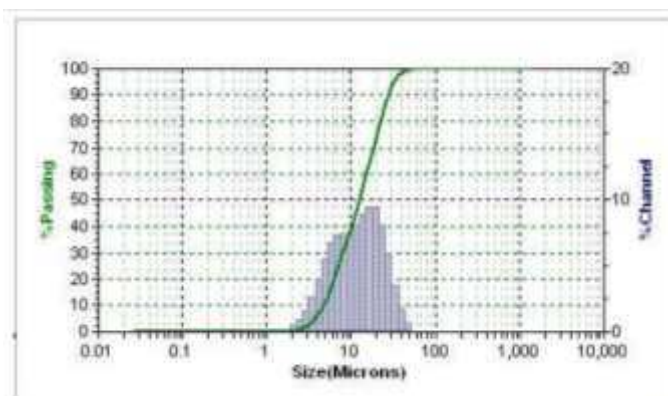
Fonte: Fabricante (2021).

Tabela 7 - Composição química do CP V – ARI

Elementos (%)	Cimento CP V - ARI
CaO I	62,71
MgO	3,2
Al ₂ O ₃	4,28
SiO ₂	18,86
SO ₃	2,72
Fe ₂ O ₃	2,78
CaO livre	1,18
Perda ao fogo	3,76
Resid. Insolúveis	0,87
Equiv. Alcal	0,63

Fonte: Fabricante (2021).

Gráfico 3 - Distribuição granulométrica do cimento



Fonte: Elaborado pela autora

3.3.2 Agregados

Para confecção das argamassas foram utilizados quatro agregados com diferentes coeficientes de expansão térmica: areia natural, areia de britagem de rocha basáltica, areia de britagem de rocha granítica e areia de britagem de rocha de quartzito (figura 13). Estes agregados foram escolhidos conforme as recomendações NBR 7211(ABNT, 2009) e por apresentarem CETs distintos, bem como por apresentarem parâmetros texturais distintos e em função da facilidade de aquisição na região de realização desta pesquisa.

Foi realizado ensaio de massa específica em conformidade com a NM 52 (ABNT, 2009) e de massa unitária segundo NM 45 (ABNT, 2003). Para determinação da composição granulométrica do agregado natural de rio foi utilizado o processo de peneiramento, de acordo com as peneiras definidas pela NM 248 (ABNT, 2003), e peneiras intermediárias à série normal. Quanto à composição granulométrica dos microfinos das areias foi utilizado o método de granulometria por difração a laser por via úmida, com dispersante do tipo água, com equipamento MICROTRAC S3500.

Os quatro traços de argamassas de revestimento confeccionados para esta pesquisa são constituídos de areais provenientes do processo de britagem de rochas, cuja a nomenclatura utilizada a nesta pesquisa encontra-se apresentada na tabela 8.

Figura 13 - Agregados utilizados para a composição das argamassas



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Tabela 8 - Nomenclatura das areias

Nomeclatura	
AN	areia natural de rio
ABB	areia de britagem de rocha basáltica
ABG	areia de britagem de rocha granítica
ABQ	areia de britagem de rocha de quartzito

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.2.1 Areia

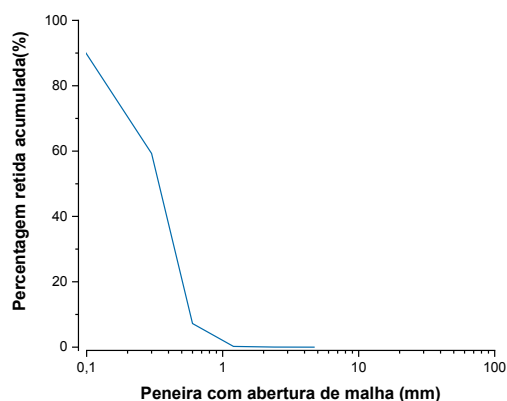
Para a produção da argamassa de referência foi utilizada areia natural de rio de origem quartzosa, proveniente do rio Jacuí, fornecido por jazida da região de Esteio/RS. A composição granulométrica da areia natural AN utilizada está apresentada na tabela 9. A maior concentração de grãos de areia de rio ficou retida na #0,150 e na peneira 0,300 e, sua curva granulométrica encontra-se apresentada nos gráficos 4 e 5.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha basáltica

Peneira		Percentagem acumulada (%)
Série Normal(mm)	Série interm.(mm)	
4,8		0
2,4		0
1,2		0
0,600		7
0,300		60
0,150		98
	0,075	100

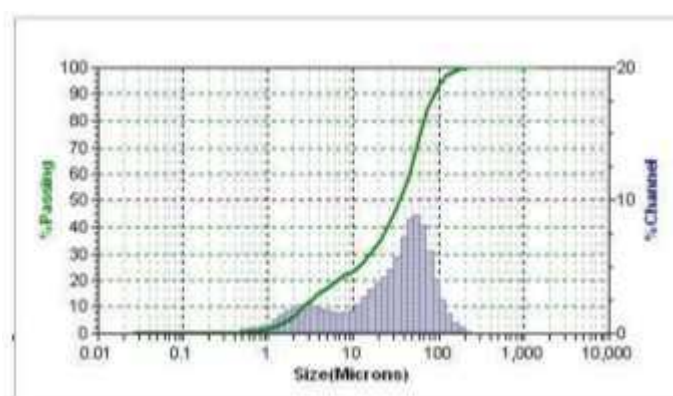
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4 - Distribuição granulométrica da areia natural de rio



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 5 - Distribuição granulométrica do material fino da areia natural de rio

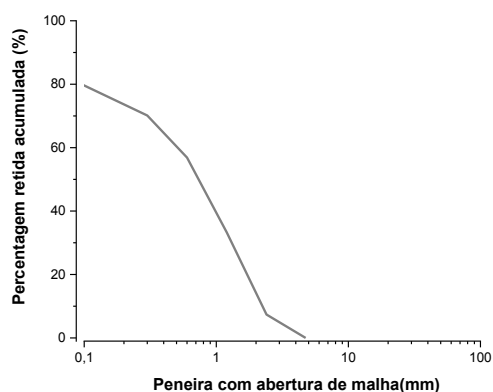


Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.2.2 Areia de britagem

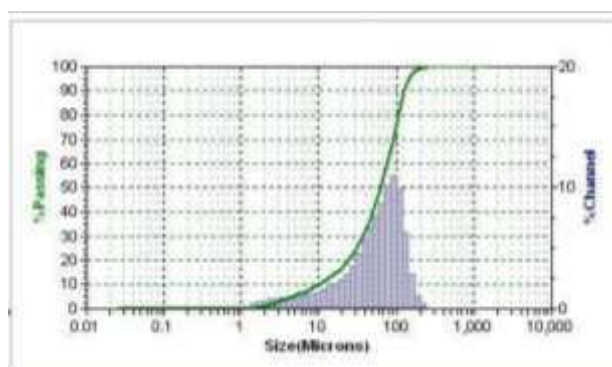
Para a produção de argamassas com areia de britagem foram utilizados agregados de rochas basáltica proveniente de jazida da cidade de Novo Hamburgo. O processo de cominuição da rocha foi realizado na própria jazida com britador do tipo VSI. As curvas granulométricas obtidas através do processo de peneiramento e granulometria à laser estão apresentadas nos gráficos 6 e 7.

Gráfico 6 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha basáltica



Fonte: Elaborado pela autora.

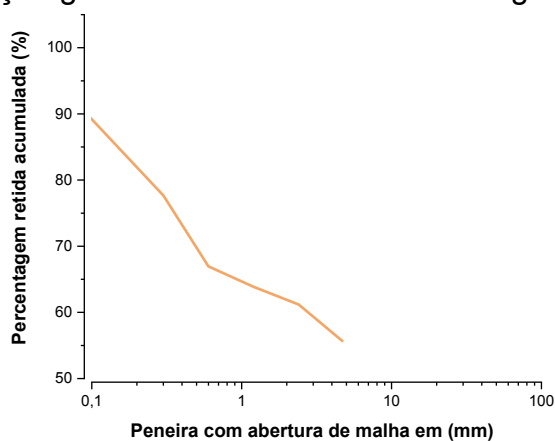
Gráfico 7 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha basáltica



Fonte: Elaborado pela autora.

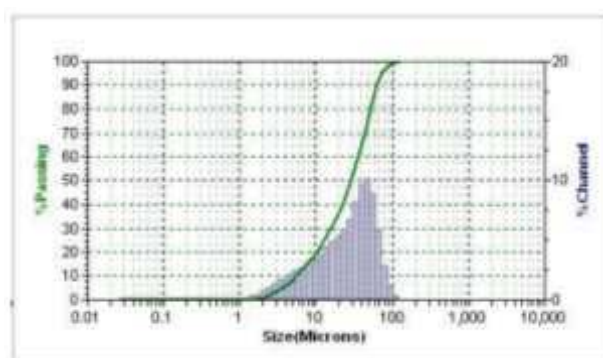
Quanto às areias de britagem oriundas de rocha granítica foram adquiridas de jazida da cidade de Eldorado do Sul, seu processo de cominuição foi realizado com britador do tipo mandíbulas. As curvas granulométricas obtidas através do processo de peneiramento e processo de granulometria à laser estão apresentadas nos gráficos 8 e 9.

Gráfico 8 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha granítica



Fonte: Elaborado pela autora.

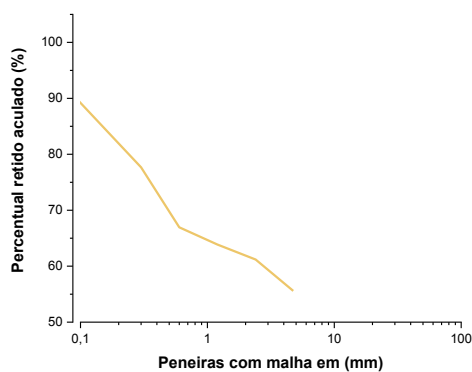
Gráfico 9 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha granítica



Fonte: Elaborado pela autora.

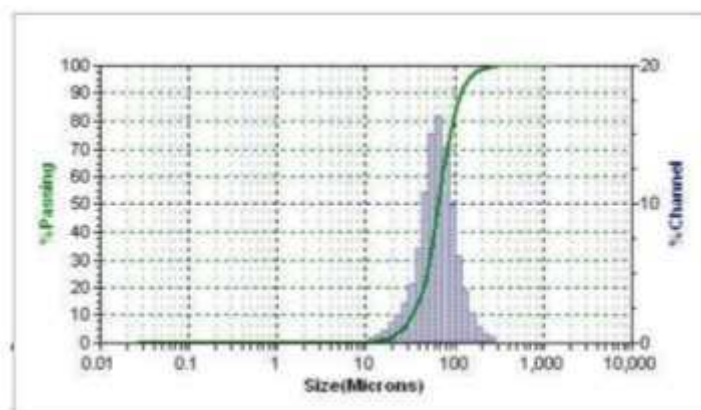
Ao contrário das areias de britagem NA e ABB as areias de britagem de quartzito passaram por dois processos de britagem. A primeira cominuição foi realizada em britador do tipo mandíbulas, enquanto a segunda foi realizada no moinho de rolo.

Gráfico 10 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha de quartzito



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 11 - Distribuição granulométrica da areia de britagem de rocha de quartzito



Fonte: Elaborado pela autora.

A composição mineralógica e os aspectos texturais das rochas foram obtidos através de análise petrográfica em microscopia óptica de luz transmitida, em microscópio binocular. A análise petrográfica foi realizada no laboratório de laminação no departamento de Geologia da Unisinos segundo a NP EN 12407 (2007), onde foram montadas lâminas delgadas (figura 14), protegidas por uma cobertura em vidro (lamela). Para a sua produção, as amostras são cortadas numa serra diamantada. As taliscas são impregnadas sob vácuo com resina epoxídica e posteriormente coladas em lâminas de vidro, cortadas e lixadas com serra de precisão de forma a reduzir a sua espessura.

Figura 14 - Lâminas delgadas das amostras de agregado



Fonte: Elaborado pela autora.

As areias para confecção das argamassas passaram pelo processo de peneiramento em agitador mecânico, tempo de vibração 30 min e posteriormente passaram pelo processo de lavagem. O processo de peneiramento foi realizado para

compor as granulometrias similares à areia natural de rio (AN). Para tanto foram obtidas frações das peneiras # 0,6 (7,01%), # 0,3 (52,06 %), # 0,15 (38,43%) e 0,075 (2,5%) mm. Após o processo de lavagem foram secas em estufa à temperatura de $(100 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Logo após o seu resfriamento foram armazenadas em sacos plásticos transparentes de 20 μm e em tonéis, a fim de não absorverem umidade do ambiente até o momento de uso.

Para a confecção das argamassas fez-se a pesagem do percentual de cada fração da areia utilizada, suficiente para compor uma batelada de argamassa de revestimento (3,0 kg). Posteriormente foram os mesmos misturados e acondicionados em um saco plástico, mantendo-os até o momento de sua utilização. No período de aproximadamente 12 horas antes do uso das areias procurou-se homogeneizá-las. Estes procedimentos foram adotados para todas as areias utilizadas na produção das argamassas de revestimento.

Os ensaios de massa específica das areias naturais e de britagem foram realizados conforme a NM 52 (ABNT, 2009), bem como os ensaios de massa unitária segundo NM 45 (ABNT, 2003) e estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Caracterização das areias

Ensaio	Unidade	NA	ABB	ABG	ABQ
Massa específica	g/cm ³	2,65	2,63	2,69	2,64
Massa Unitária	g/cm ³	1,56	1,36	1,45	1,4

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.3 Substrato

Os substratos utilizados foram os blocos cerâmicos paredes vazadas de função estrutural e vedação, com dimensões de 140 X 190 X 290 mm (figura 15) fornecidos e fabricados por olaria da região do município de Gravataí. Os ensaios de caracterização realizados seguiram as recomendações prescritas na NM 15270 (ABNT, 2017). Após a sua caracterização os blocos foram cortados com serra diamantada no sentido longitudinal de sua maior dimensão (290 mm), com o objetivo de confeccionar placas cerâmicas a serem revestidas pelas argamassas estudadas, ou seja, de forma a usar apenas uma das faces para revestir com as argamassas de revestimento.

Figura 15 - Placas cerâmicas cortadas



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.4 Água

A água incorporada à mistura para a confecção das argamassas de revestimento é oriunda da concessionária responsável pelo abastecimento da cidade São Leopoldo.

3.3.5 Aditivo

Para a produção das argamassas de revestimento com areia de britagem foi utilizado aditivo superplastificante Power flow 4001, à base de policarboxilato, conforme NBR 11768 (ABNT, 2011).

O teor de aditivo incorporado na mistura foi definido com base no espalhamento desejado. Realizou-se o processo de dosagem, com o intuito de obter trabalhabilidade aproximada para os traços de argamassas com areia de britagem e da argamassa de referência.

3.3.6 Chapisco

Para a argamassa de chapisco foi utilizado o traço 1:3 em massa. A aplicação do chapisco foi feita de forma manual, onde o profissional responsável pela execução definiu a melhor trabalhabilidade da mistura e esta manteve-se fixa para aplicação em todas as placas cerâmicas. O período de cura do sistema foi de 72 horas em ambiente com umidade e temperatura controladas.

3.3.7 Revestimentos de argamassa

Para a confecção das argamassas de revestimento foi realizado o ajuste da distribuição granulométrica com o intuito de obter-se granulometrias similares entre a areia de rio e as areias de britagem basáltica/granítica. As areias de britagem foram submetidas ao peneiramento nas peneiras #,0.6, 0.3, 0.15 e 0,075 mm. Posteriormente passaram pelo processo de lavagem em água, proveniente da rede pública, com a finalidade de eliminar frações de materiais finos indesejáveis.

O traço escolhido para confecção das argamassas foi de 1:5 em volume de cimento e areia, sem uso de aditivo para argamassa de referência e com o uso de 6% aditivo para as argamassas produzidas com areia de britagem com intuito de ajustar e manter uma trabalhabilidade aproximada das misturas. Foram confeccionados 4 traços de argamassas cimentícias. Um traço de argamassa referência com areia natural (AAN), um traço de argamassa com areia de britagem de rocha basáltica (AABB), um traço de argamassa de revestimento com areia de britagem de rocha granítica (AABG) e um traço com areia de britagem de quartzito (AABQ). Após a definição dos traços, as argamassas foram preparadas seguindo as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2005), para a realização dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido. Para a confecção das argamassas de revestimento manteve-se fixa a quantidade de pasta. Primeiramente determinou-se a quantidade de água a acrescentar à mistura com areia de britagem de basalto, sendo a quantidade necessária para obter o espalhamento próximo de (260 ± 5) mm na argamassa. Nos traços onde a areia natural foi substituída por agregados artificiais, fez-se necessário o uso do aditivo superplastificante para corrigir a trabalhabilidade e melhorar a coesão entre os materiais.

As misturas foram realizadas em argamassadeira de bancada, com eixo vertical conforme NBR 13276 (ABNT, 2005). Não houve necessidade de usar a argamassadeira de eixo horizontal, pois optou-se por fazer o processo de mistura em pequenas quantidades para um maior controle da mistura e para um controle adequado da temperatura e umidade do ambiente, assim como evitar perdas de material. Ao realizar as misturas tomou-se o cuidado para respeitar os tempos corretos da mistura com a finalidade de evitar incorporar quantidades de ar que pudessem interferir no objetivo desejado. Não obstante, foi tomado cuidado na produção de argamassas com uso de aditivo para incorporá-lo à mistura no tempo e na forma

adequada, buscando o melhor desempenho do componente na mistura.

A nomenclatura adotada para as amostras refere-se ao tipo de agregado utilizado para a confecção das argamassas de revestimento, conforme tabela a seguir.

Tabela 11 - Nomenclatura das amostras

	Nomeclatura	Composição materiais secos
Argamassas de revestimento	AAN	Cimento, +areia natural quartzosa
	AABB	Cimento +areia de britagem rocha basáltica
	AABG	Cimento + areia de britagem rocha granítica
	AABQ	Cimento + areia de britagem rocha de quartzito

Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.8 Sistemas de revestimentos argamassados

Para a confecção dos sistemas de revestimentos os blocos cerâmicos foram cortados na direção paralela a face de 190x 290 mm. Sua face externa recebeu camada de chapisco com (50±2) mm. Após o corte, as placas foram lavadas para ficarem isentas de sujidades resultantes do processo de corte. As placas foram armazenadas em condições controladas com temperatura de 23 ± 2°C e umidade relativa (UR) de 100 ± 10 % por um período de 30 dias, a fim de que todas se encontrassem nas mesmas condições de umidade e temperatura no momento da aplicação dos revestimentos.

Após este período foi aplicada, de forma manual, a camada de chapisco nas placas cerâmicas, cujo período de cura foi de 72 horas. A camada de revestimento, com espessura de (30± 2) mm, foi aplicada sobre o chapisco. Para aplicação da argamassa de revestimento utilizou-se um tubo de queda em chapa metálica galvanizada, com altura de aproximadamente 100 cm, com a finalidade de manter-se a mesma energia de aplicação para todas as amostras e evitar a perda de material. No entorno da placa cerâmica foi colocado um gabarito com a finalidade de manter a espessura da argamassa de revestimento.

Figura 16 - Aplicação de argamassa de revestimento com uso de tubo de queda



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 - Placa revestida



Fonte: Elaborado pela autora.

Armazenou-se as placas já revestidas na câmara úmida, no intuito de evitar perdas de água por evaporação, após o que foram acondicionadas em caixas plásticas envolvidas em sacos plásticos, de 20 μ m, hermeticamente fechados para realização da cura pelo período de 28 dias. O objetivo desta metodologia de cura é evitar o surgimento de fissuras por retração plástica e de secagem, perdas de umidade pelo elevado calor de hidratação do cimento, perda de material, assim como reduzir os danos que podem ser ocasionados por exsudação nos instantes iniciais.

3.3.9 Ensaios de argamassas de revestimento no estado fresco

Para a etapa de ensaios de argamassas de revestimento foram necessárias inúmeras repetições de maneira que se conseguisse ajustar os traços das argamassas de revestimento.

3.3.9.1 Índice de consistência

O ensaio de índice de consistência foi realizado conforme as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016). O valor de espalhamento foi fixado, em (260 ± 5) mm, no intuito de determinarmos a quantidade de água a ser adicionada à mistura. Primeiramente obteve-se a quantidade de água necessária para a mistura dos componentes das argamassas de revestimento AAN (figura 18). Após confeccionou-se a argamassa de revestimento AABB utilizando a mesma quantidade de água e acrescentando à mistura um percentual de aditivo em relação à massa seca de cimento (figura 19). Ocorre que as quantidades não foram suficientes para que o espalhamento de (260 ± 5) mm fosse alcançado. Com isso, foi necessário determinarmos a quantidade de água e o percentual de aditivo para as argamassas de revestimento com areia de britagem AABB (figura 20) e com base nestes valores fixamos a quantidade de pasta para todas as argamassas. Ainda assim foi necessário ajustar a quantidade de água, pois o valor obtido para as argamassas de revestimento AABB resultava em uma argamassa AAN excessivamente fluída, chegando a um espalhamento de 300 ± 5 mm. A realização do ensaio de índice de consistência foi repetida inúmeras vezes até que se chegasse em consistências passíveis de trabalhar e moldar as amostras.

Observou-se ao longo do ensaio que as argamassas de revestimento com areia de britagem, após um período de ação do aditivo, apresentavam uma expressiva exsudação. O ajuste dos traços levou em conta este efeito. Procurou-se estabelecer a dosagem de aditivo, quantidade de água, bem como o momento de incorporar o aditivo no intuito de minimizar a exsudação e seu efeitos sobre a mistura no estado fresco e por consequência no estado endurecido. Com isso, ao longo das dosagens de teste observou-se que o melhor momento de incorporar o aditivo à mistura foi no início da batelada incorporando-o a água da mistura.

Figura 18 - Ensaio de índice de consistência - AAN



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 19 - Ensaio de índice de consistência - AABB sem aditivo



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 20 - Ensaio de índice de consistência - AABQ e AABB com aditivo



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.9.2 Teor de ar incorporado

Para a determinação do ar incorporado nas argamassas de revestimento no estado fresco foram realizados os procedimentos conforme as recomendações ABNT NBR NM 47. A realização deste ensaio foi de grande importância, pois o teor de ar incorporado pode interferir nos resultados de caracterização térmica e diretamente no comportamento das argamassas quando submetidas a envelhecimento acelerado.

3.3.9.3 Densidade de massa

A densidade de massa das argamassas de revestimento foi realizada seguindo as recomendações da ABNT NBR 13278:2005.

3.3.10 Ensaio nas argamassas de revestimento estado endurecido

Para a realização dos ensaios nas argamassas no estado endurecido utilizamos o número mínimo de três corpos de prova para cada traço. A etapa II deste estudo contempla os ensaios realizados após o processo de cura das amostras de argamassas de revestimento e do sistema de revestimento.

Para a moldagem dos corpos de prova foi necessário tomar extremo cuidado para vedação das formas a fim de evitar a perda de água das amostras, sendo utilizada cera odontológica aquecida para vedação das formas, bem como filme pvc esticável. Após a realização da moldagem as amostras permaneceram protegidas e armazenadas na sala de cura por sete dias, com temperatura e umidade controladas ($100 \pm 5 \%$), após este período as amostras foram desmoldadas, colocadas imersas em água e armazenadas na sala de cura por 28 dias.

Os ensaios Resistências mecânicas, módulo de elasticidade dinâmico, absorção por capilaridade, absorção total e índice de vazios foram realizados em amostras de argamassas de revestimento não cicladas e cicladas de maneira que pudéssemos fazer um estudo comparativo dos efeitos do ensaio de envelhecimento acelerado sobre o comportamento das argamassas de revestimento com agregados de diferentes coeficientes de expansão térmica.

3.3.10.1 Resistência à compressão e resistência à tração na flexão

Os ensaios foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da Unisinos seguindo as recomendações da ABNT NBR 13279:2005. Para a realização destes ensaios utilizamos corpos de prova 4 x 4 x 16 cm, utilizando o equipamento tipo prensa MTS modelo 647 25 A.

3.3.10.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio foi realizado utilizando o equipamento "Pundit" (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester). O ensaio foi realizado em corpos de prova 4 x 4 x 16 cm seguindo as recomendações da ABNT NBR 15630: 2009.

3.3.10.3 Absorção de água total, índice de vazios e massa específica

Os ensaios foram realizados em corpos de prova em forma de placa 20 x 20 cm e espessura aproximada de 2cm adaptando algumas recomendações da ABNT NBR 9778: 2005. Os corpos de prova foram imersos em água após 30 dias de secagem na estufa na temperatura de $40 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, permanecendo 72 horas imersos em água.

3.3.10.4 Absorção de água por capilaridade

Os ensaios foram realizados em corpos de prova 4 x 4 x 16 cm adaptando algumas recomendações da RILEM TC 116. Os tempos estimados para as leituras foram 0,1, 2, 5, 10, 15 e 30 minutos 1hora, 2 horas, 6 horas e 24horas (figura 21).

Figura 21 - Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.10.5 Variação dimensional e variação de massa

O ensaio foi realizado em corpos de prova 2,5 x 2,5 x 28 cm (figuras 22 e 23) seguindo as recomendações da ABNT NBR 15261: 2005. Para a moldagem dos corpos de prova foi necessário tomar extremo cuidado para vedação das formas a fim de evitar a perda de água das amostras, sendo utilizada cera odontológica aquecida para vedação das formas, bem como filme pvc esticável. Após a realização a moldagem as amostras permaneceram protegidas e armazenadas na sala de cura por sete dias, após este período as amostras foram desmoldadas para o início das medições.

Figura 22 - Amostras para ensaio de variação dimensional e variação de massa



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 23 - Ensaio de Variação dimensional e variação de massa



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.10.6 Ensaio de condutividade térmica

A realização do ensaio de condutividade térmica foi realizada em dois equipamentos distintos, a placa quente (figura 24) desenvolvida nas dependências da Unisinos conforme Simioni (2005) e o uso do Thermtest HFM 100 (figura 25) utilizado nas dependências de uma indústria de produtos para fabricação de poliuretano. Quanto ao uso da placa quente foi necessário realizar alguns ajustes no equipamento, garantindo uma aquisição correta das temperaturas nas faces das amostras, bem como um isolamento adequado do equipamento.

Figura 24 - Placa quente - Unisinos



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25 - Thermttest HFM 100



Fonte: Elaborado pela autora.

A placa quente desenvolvida é do tipo assimétrica, ou seja, é constituída de uma placa quente, uma placa fria e o sistema de ventilação cruzada. Este tipo de estrutura induz a uma perda de calor lateral, bem como uma perda na face superior da placa quente, gerando erros nos resultados obtidos. As aquisições de leituras de temperatura pelos termopares, de haste rígida (figura 26), utilizados no equipamento da placa quente apresentavam falhas devido as perdas de calor pela haste dos mesmos e pelo contato inadequado da haste com a superfície a ser medida.

Figura 26 - Termopares haste rígida



Fonte: Elaborada pela autora.

Para a montagem dos novos termopares seguiu-se as recomendações de Oliveski (2000). Os termopares com haste flexível (figura 27), do tipo K foram confeccionados com o uso de solda, uma lâmina de cobre com o objetivo de melhorar o contato com a amostra. Além disso, foi necessário modificarmos a metodologia de fixação dos termopares na amostra, fazendo-se o uso de cola de contato com secagem rápida e com alto valor de condutividade térmica, procurando certificar-se de que a tomada de leituras de temperatura seria na superfície desejada. Para um maior controle do ensaio optou-se por aumentar o número de termopares.

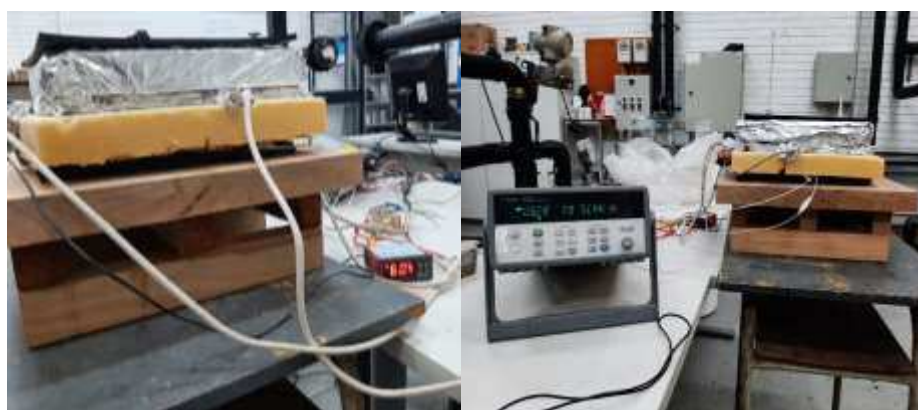
Figura 27 - Termopares de haste flexível



Fonte: Elaborada pela autora.

Após a montagem dos termopares tomou-se o cuidado de melhorar o isolamento lateral do equipamento, utilizando poliestireno expandido no entorno do equipamento, bem como lâminas de papel alumínio. O poliestireno expandido utilizado apresenta espessura de 4 cm. A função deste isolamento é evitar as fugas de calor lateral e pela face superior da placa quente. Também, substituiu-se o sistema de ventilação cruzada antes em aço por um material isolante. Na figura 28 está apresentada a placa quente modificada para ser utilizada neste estudo. O sistema de aquisição de dados foi o data logger Benchlink e o software foi o Agilent.

Figura 28 - Placa quente modificada



Fonte: Elaborada pela autora.

Fez-se o uso do Thermtest HFM 100 para obter os valores de condutividade térmica no intuito de validar os valores obtidos do equipamento placa quente modificado. O funcionamento deste equipamento segue os mesmos princípios da placa quente.

Quanto as amostras para os ensaios de condutividade térmica em ambos os equipamentos foram utilizadas amostras com medidas aproximadas de 20 x 20 cm e espessura igual a 2 cm, foi necessário fazer o polimento da superfície das amostras garantindo um bom contato entre o equipamento e as amostras. Após o polimento as amostras permaneceram na estufa a $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até a estabilização da massa.

3.3.10.7 Ensaio de envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado nos sistemas de revestimento utilizando a caixa térmica elaborada por Sentena (2015), porém houve a necessidade de ser modificada (figura29), pois ao realizarmos os primeiros testes

verificou-se que havia uma perda lateral de calor. A perda de calor prolongava o processo de aquecimento das amostras. Fez-se necessário confeccionar uma base com proteção lateral e revestida com folhas de papel alumínio de forma a acondicionar as amostras tendo o cuidado de mantê-las afastadas do piso (figura 30).

Figura 29 - Caixa térmica Sentena (2015) modificada



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 30 - Caixa térmica modificada - parte interna



Fonte: Elaborada pela autora.

Para a realização do ensaio de envelhecimento acelerado foi confeccionado um sistema de restrição em madeira de Grápia (figura 31), com alto grau de dureza uma moldura regulável de forma a impedir as movimentações do revestimento (NAHUZ, 2013; MORESCHI, 2014). Esta moldura foi impermeabilizada com a finalidade de evitar sua degradação ou empenamento ao longo do processo de

ciclagem térmica. Tomou-se o cuidado de manter a moldura presa somente na altura do revestimento sem contato com a placa cerâmica garantido a ocorrência de movimentações diferenciais de maior amplitude entre substrato e argamassa de revestimento.

Figura 31 - Sistema de restrição em madeira de Grápia

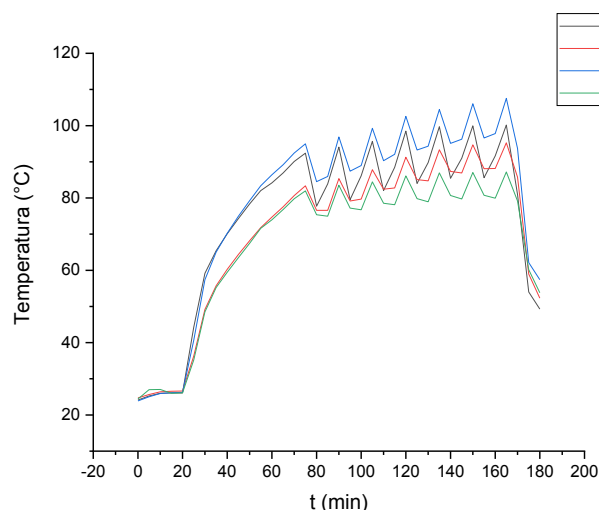


Fonte: Elaborada pela autora.

Aplicou-se a ciclagem térmica nas amostras das argamassas de revestimento em forma de placa 20 x 20 e nas amostras de argamassa de revestimento prismáticas, porém estas amostras não foram emolduradas, ou seja, os movimentos de expansão ocorreram de forma livre.

Quanto ao procedimento de ensaio foram realizadas várias repetições de forma que pudéssemos estabelecer os tempos de aquecimento, o patamar de temperatura e o tempo de resfriamento. Procurou-se estabelecer os tempos para que as faces revestidas chegassem a temperatura de $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ e que o patamar de temperatura fosse mantido por um período de 60 min conforme recomenda a ABNT NBR 15575:2013 parte 4. Verificou-se que não seria possível ensaiar os quatro tipos de sistemas de revestimento no mesmo período, pois por tratar-se de diferentes materiais com diferentes propriedades térmicas nas argamassas de revestimento AAN e AABG a temperatura excedia em 15°C o valor estipulado por norma, bem como o aquecimento de sua superfície acontecia de forma muito mais rápida.

Gráfico 12 - Ciclagem térmica dos sistemas de revestimento



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.10.8 Ensaio de aderência à tração

Para a realização dos ensaios de resistência de aderência à tração foi utilizado um dinamômetro marca Dinatest, modelo DS2- DPU-1100, os ensaios foram realizados seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 13528:2019 parte 1 e parte 2, porém foi necessário fazer algumas adaptações, visto que a norma recomenda que os ensaios sejam realizados em um painel de parede e no estudo em questão as amostras são placas cerâmicas com argamassa de revestimento.

Para a realização dos ensaios tanto nas amostras não cicladas como cicladas foram feitos cortes utilizando serra copo diamantada de diâmetro 50 mm, acopladas a furadeira. Após os cortes as superfícies das amostras foram limpas com auxílio de jato de ar e pincéis a fim de remover pulverulências. As pastilhas foram coladas com 24 horas de antecedência da realização do ensaio fazendo o uso de massa plástica adesiva de secagem rápida (figura 32).

Figura 32 - Pastilhas aplicadas no sistemas de revestimento



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.10.9 Microscopia eletrônica de varredura

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura foram realizados com microscópio eletrônico de varredura (MEV) (figura 33), modelo INSPECT F50, localizado no LabCEMM IDEIA, centro de apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico da PUCRS.

Figura 33 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Fonte: Elaborada pela autora.

As amostras de argamassas de revestimento para este ensaio foram produzidas com dimensões 1x 1 cm e com espessura de 3mm. O corte das amostras

foi realizado no laboratório LMC-Unisinos com o uso da serra de precisão em bebidas em álcool isopropílico no intuito de parar a hidratação do cimento. As imperfeições no corte das amostras foram corrigidas com o auxílio de corte e polimento com caneta, motor, discos de carbono e lixas madril odontológicas.

Para a preservação das amostras e interrupção da hidratação do cimento as amostras foram imersas em álcool isopropílico por 3h, levadas a estufa a temperatura de $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ até a constância de massa, foram executadas três repetições deste procedimento, posteriormente as amostras foram armazenadas no dessecador com sílicas e submetidas à vácuo.

Figura 34 - Serra de precisão com disco diamantado



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 35 - Caneta e disco diamantado odontológicos



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 36 - Amostras para os ensaios de MEV



Fonte: Elaborada pela autora.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises do aglomerante, dos agregados utilizados para compor os traços das argamassas de revestimento, das argamassas de revestimento no estado fresco e endurecido e o seu comportamento quando aplicadas em substrato cerâmico e submetidas à ensaios de envelhecimento acelerado.

4.1 SUBSTRATO

Os substratos utilizados foram as placas cerâmicas provenientes do corte dos blocos cerâmicos de paredes vazadas com função estrutural e de vedação, com dimensões de 140 X 190 X 290 mm. Os ensaios de caracterização realizados seguiram as recomendações prescritas na NM 15270 (ABNT, 2017). Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades do substrato bloco cerâmica vermelha estrutural e vedação

Características Geométricas			Características Físicas	Características Mecânicas
Área efetiva (cm ²)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Planeza das faces (mm)	Índice de absorção de água inicial (g/194cm ² /min)	Resistência a compressão (MPa)
38175	4,50	2,0	14,70	7,85

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados apresentados nos ensaios de caracterização dos blocos cerâmicos demonstram que o substrato apresenta valores de absorção inicial dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 15270- parte 1. Este parâmetro influencia a absorção de pasta da argamassa pelo bloco e, conseqüentemente, pode comprometer a aderência do sistema. Quanto à resistência à compressão os blocos apresentaram resultados dentro do esperado.

4.2. AGREGADOS

Com base na análise visual dos grãos das areias que compõem as argamassas de revestimento percebe-se diferenças importantes na sua textura superficial. Os

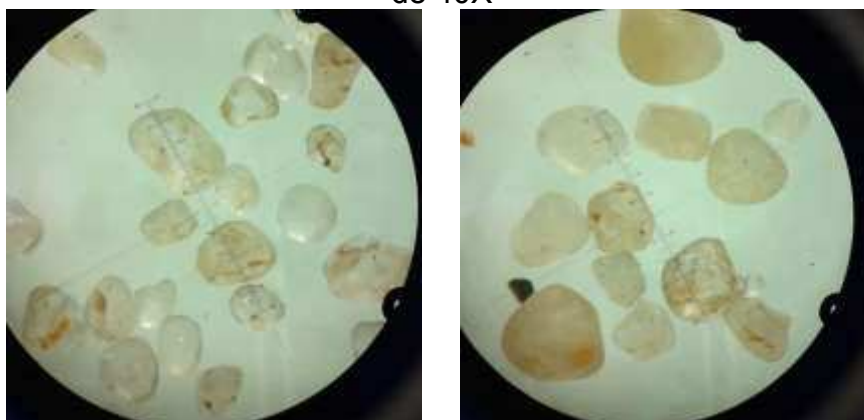
grãos de AN apresentam uma superfície lisa com desgastes ao longo do tempo ocasionados pela água.

4.2.1 Forma dos grãos

Nesta etapa serão apresentados os resultados obtidos na análise da forma dos grãos dos agregados utilizados na mistura.

Quanto ao grau de arredondamento e esfericidade utilizamos metodologia existente na literatura para sua determinação (TRISTÃO, 2005), observando as diferentes frações retidas nas peneiras # 600, #300 e #150, de cada umas das diferentes areias.

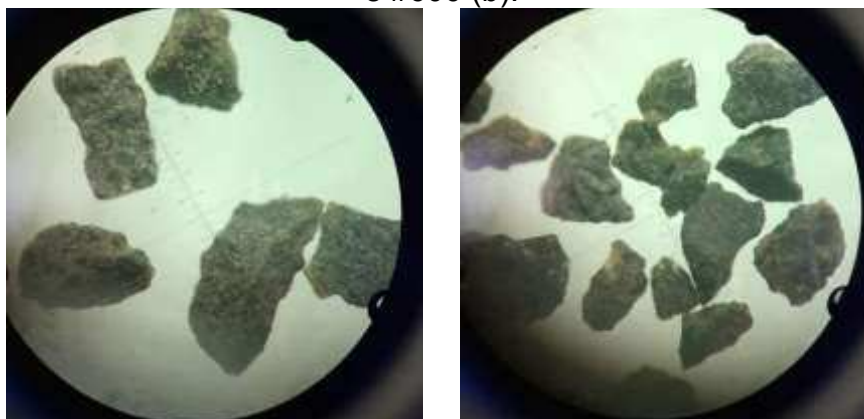
Figura 37 - Areia natural (AN) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b) com ampliação de 40X



(a) AN retida peneira # 300 (b) AN retida peneira # 600

Fonte: Elaborada pela autora.

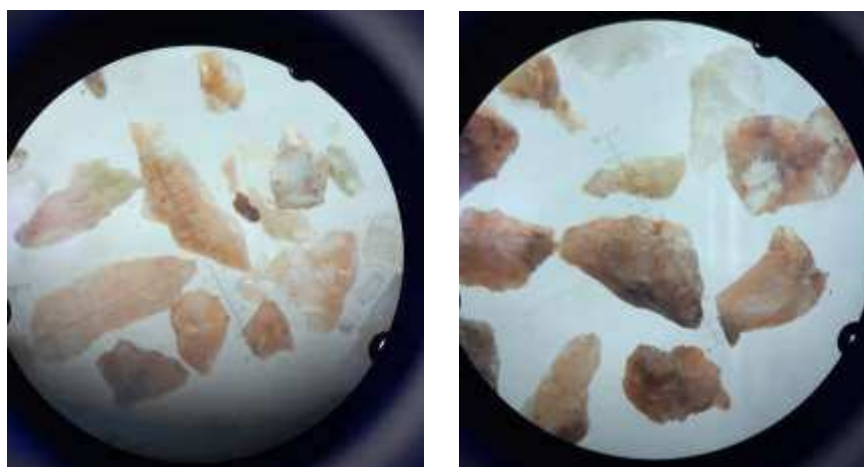
Figura 38 - Areia de britagem de rocha basáltica (ABB) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b).



(a) ABB retida peneira # 300 (b) ABB retida peneira # 600

Fonte: Elaborada pela autora.

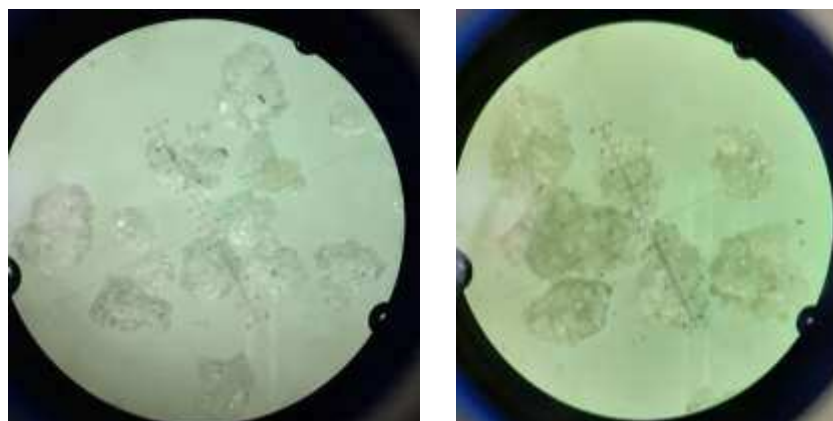
Figura 39 - Areia de britagem de rocha granítica (ABG) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b).



(a) ABG retido peneira # 300 (b) ABG retido peneira # 600

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 40 - Areia de britagem de rocha de quartzito (ABQ) retida nas peneiras # 300 (a) e #600 (b).



(a) ABQ retido peneira # 300 (b) ABQ retido peneira # 600

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao analisarmos a morfologia das areias utilizando as definições de esfericidade de Rittenhouse (1943) e os padrões gráficos da NBR 738 (1992), constatamos que areias naturais AN de rio apresentam grãos em formas subarredondadas, esfericidade alta com superfície lisa, devido ao desgaste natural ocasionado pela água. As areias ABB apresentaram grãos em formato subangulosos, de esfericidade baixa, com superfície rugosa e porosa. Esse formato sem cantos angulosos se deve ao tipo de britador utilizado para a cominuição da rocha. Os grãos de areia ABG, que foram cominuidos com britador de mandíbulas apresentam forma angulosa, com baixa

esfericidade, superfície rugosa e porosa. Já os grãos de quartzito apresentam a forma subangulosa, de baixa esfericidade com superfície rugosa e pouco porosa.

Tabela 13 - Resultado da análise de parâmetros texturais dos grãos.

	Areias	Tipo de britador	Esfericidade	Forma de grãos	Grau de esfericidade
Areia Natural	AN	XXXXXX	alta	subarredondados	0,78
	ABB	VSI	baixa	subangulosos	0,61
Areia de britagem	ABG	mandíbula	baixa	angulosos	0,57
	ABQ	mandíbula + moinho de bolas	baixa	subanguloso	0,59

Fonte: Elaborada pela autora.

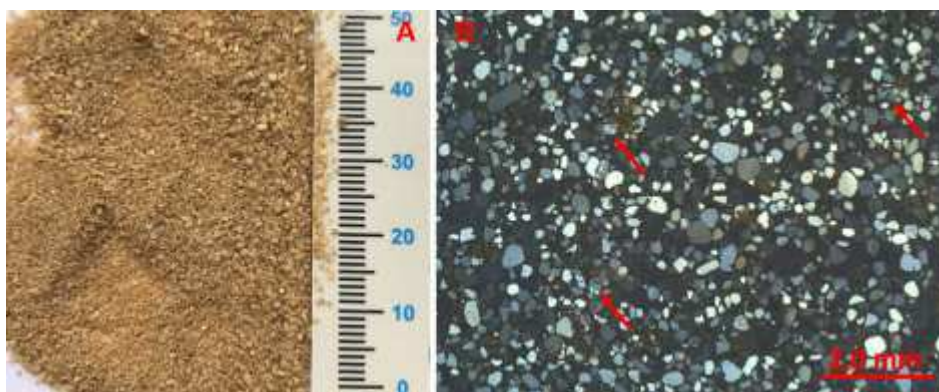
4.2.2 Análise petrográfica

O resultado da análise petrográfica das rochas utilizadas para produção das areias que compõem as argamassas de revestimento estão apresentados nos itens abaixo.

4.2.2.1 Areia

Amostra de areia inconsolidada, fina a média (menor que 0,5), bem selecionada, com grãos arredondados e com esfericidade alta, constituída de predominantemente de quartzo. Quanto a textura superficial, os grãos são lisos irregulares, mamelonados e foscos, estando recobertos por fina película de óxido com coloração alaranjada. O exame em estereomicroscópio revelou a ausência de matéria orgânica e o resultado é negativo para carbonatos no teste com HCl 10% a frio. Com auxílio de estereomicroscópio, em aumento de 7X, foi possível observar que, além de quartzo, a amostra também é formada por fragmentos de rochas (figura 41).

Figura 41 - Aspecto da amostra macroscópica



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 14 - Composição mineralógica da areia natural de rio

Mineralogia	%
Quartzo	97
Fragmentos de rocha n	2
Feldspatos	1
Turmalina	tr
Opacos	tr
Zircão	tr

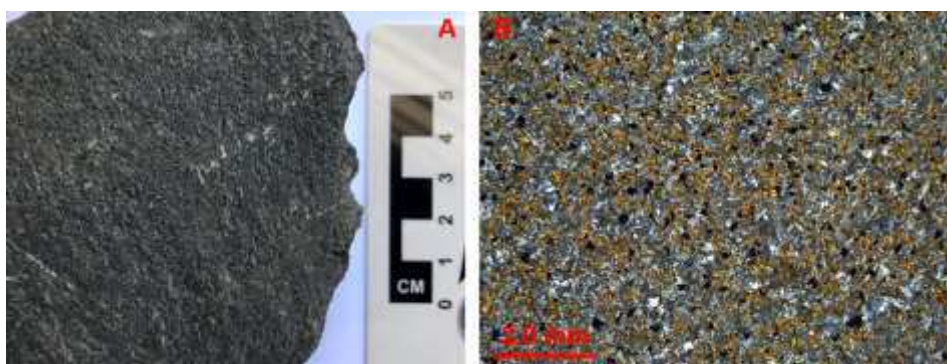
tr = traços (minerais em proporções menores que 1%).

Fonte: Elaborado pela autora

4.2.2.2 Basalto

Em amostra de mão, a rocha é melanocrática, de cor cinza na fratura fresca. A textura é equigranular fina a afanítica, com tamanho de grão menor que 1,0 mm. Com auxílio de estereomicroscópio, em aumento de 7X, foram observados diminutos cristais prismáticos, de minerais máficos e félsicos, aleatoriamente distribuídos (figura 42). O resultado é negativo para carbonatos no teste com HCl 10% a frio e a rocha apresentou magnetismo com imã de mão, indicando a presença de magnetita.

Figura 42 - Aspecto da amostra macroscópica



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 15 - Composição mineralógica d basalto

Mineralogia	%
Plagioclásio	65
Clinopiroxênios	31
Opacos	4
Apatita	tr
Quartzo	tr
Argilominerais	tr
Óxidos/hidróxidos	tr

tr = traços (minerais em proporções menores que 1%).

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2.3 Granito

Rocha leucocrática, de cor rosada, com pontuações verde escuras e textura porfírica onde destacam-se cristais rosados, ovóides de feldspato alcalino de grão grosso com até 8 mm. A matriz que envolve os pórfiros é xenomórfica, média a fina (tamanho dos cristais inferior a 5 mm), constituída predominantemente de quartzo esbranquiçado, feldspatos alcalinos rosados, plagioclásio de cor creme e lamelas escuras de biotita. Estruturalmente a rocha mostra uma foliação dada pelo alinhamento das micas e estiramento dos demais minerais. A rocha é coerente e fresca, com resultado negativo no teste com HCl 10%, a frio, para carbonatos.

Tabela 16 - Composição mineralógica do granito

Mineralogia	%
quartzo	65
ortoclásio	31
plagioclásio	4
Biotita alterada	tr
Muscovita/sericita	tr
Fluorita	tr
Apatita	tr

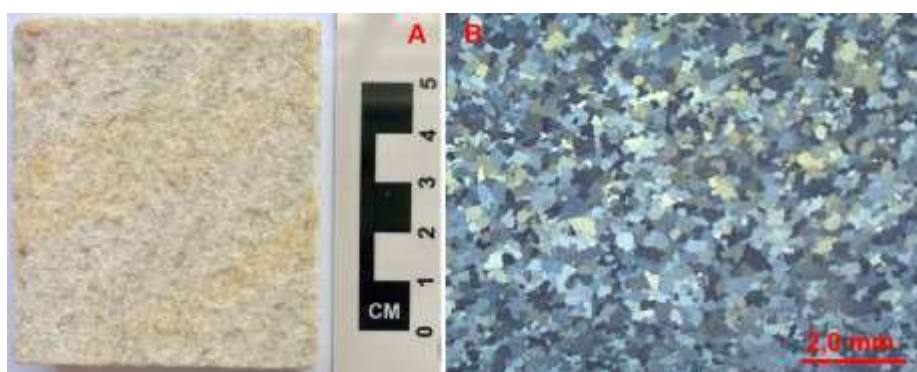
tr = traços (minerais em proporções menores que 1%).

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2.4 Quartzito

Em amostra de mão, a rocha é leucocrática de coloração esbranquiçada. A textura é equigranular fina, com tamanho de grão inferior a 1,0 mm. Com auxílio de estereomicroscópio, em aumento de 7X, foram observados diminutos cristais equidimensionais de quartzo e palhetas de muscovita, além de um alinhamento dos minerais, definindo uma foliação metamórfica. O resultado é negativo para carbonatos no teste com HCl 10% a frio e a rocha não apresentou magnetismo com imã de mão.

Figura 43 - Aspecto da amostra macroscópica



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 17 - Composição mineralógica do quartzito

Mineralogia	%
Quartzo	98
Muscovita	2
Opacos	tr
zircão	tr

tr = traços (minerais em proporções menores que 1%).

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Parâmetros térmicos

O resultado dos ensaios para caracterização térmica das argamassas de revestimento em amostras em forma de placas estão apresentadas na tabela 18.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de caracterização térmica das argamassas de revestimento (em placas)

Parâmetros térmicos						
	Condutividade térmica	Capacidade térmica	Calor específico	Difusividade térmica	Resistência térmica	Transmitância térmica
Material	K(w/(m.k))	C(J/k)	c (J/(Kg.K))	α (m ² /s)	R(m ² .K/W)	U(W/(m ² .K))
AAN	0,43947	24,1380	0,75477	0,00021	0,04874	20,5168
AABB	0,21079	25,6784	1,28584	0,03722	0,09645	10,3684
AABG	0,30311	24,2944	1,31917	0,06062	0,07215	13,8596
AABQ	0,16720	26,8902	1,27283	0,03465	0,13170	7,5931

Fonte: Elaborada pela autora.

Com base nos resultados obtidos das propriedades das argamassas de revestimentos pode-se constatar que as argamassas de revestimento AAN apresentaram menor valor de calor específico, demonstrando sua facilidade em variar a sua temperatura. As argamassas de revestimento AAN apresentaram baixa difusividade térmica (α). O valor de difusividade térmica das argamassas AAN nos mostra a taxa com a qual pode ocorrer a mudança de temperatura dentro desta argamassa ou a forma como o calor pode se propagar ao longo da espessura da placa. Com isso podemos concluir que o calor nas argamassas AAN se propaga muito rapidamente, isso se deve aos materiais que compõe a amostra, embora a amostra apresente uma expressiva porosidade constatada nos ensaios de absorção e no índice de vazios, o que nos levaria a uma menor condutividade térmica. A amostra foi ensaiada em condição não saturada, ou seja, com os poros preenchidos por ar. Esta condição de ensaios influencia diretamente nos valores de condutividade térmica do material, pois o ar apresenta uma condutividade térmica vinte e cinco (25) vezes menor que a da água. O valor de transmitância térmica (U) obtido nesta amostra nos mostra que ela apresenta maior facilidade para passagem de calor do que as amostras de AABB, AABG e AABQ. Esta facilidade com que a amostra AAN permite o fluxo de calor justifica o aumento expressivo dos esforços internos, gerando gradientes de temperatura que cooperam para a degradação ocorrida nas argamassas de revestimento aplicadas sobre o substrato cerâmico.

As argamassas de revestimento AABB apresentaram valor de transmitância térmica (U) 49,5% menor que as argamassas AAN e os valores de difusividade térmica (α) foram 98% maiores em relação ao obtido para AAN. Os valores encontrados para estas argamassas contribuem para o surgimento de tensões internas que propiciam a

fissuração e, conseqüentemente, a degradação das argamassas de revestimento, embora não tão expressivos como em AAN. O valor encontrado de condutividade térmica para as amostras AABB é 52,05% inferior em relação às argamassas AAN. Este valor obtido sofreu influência significativa da porosidade e do teor de ar incorporado da argamassa de revestimento ao ser comparada com a argamassa de referência AAN.

Pode-se verificar que as argamassas de revestimento AABG apresentaram valor de condutividade térmica (K) 31% inferior ao encontrado para as argamassas AAN. Já o valor obtido para transmitância térmica (U) é 31% menor que o das argamassas AAN. Os valores obtidos para estes parâmetros térmicos das argamassas de revestimento AABG explicam seu comportamento ao longo da ciclagem térmica.

As argamassas de revestimento que apresentaram um valor de condutividade térmica 62%(K) menor que as argamassas AAN foram as AABQ. Além disso, sua resistência (R) é superior às das outras argamassas de revestimento, enquanto a transmitância térmica (U) é 63% menor que o valor obtido para argamassas AAN, 45,2 % menor que AABG e 26,8 inferior ao valor obtido para as argamassas AABB. Podemos atribuir os valores obtidos para os parâmetros térmicos nesta argamassa à sua composição mineralógica, à sua porosidade e ao teor de ar incorporado durante a mistura. A presença de minerais do tipo muscovita no quartzito juntamente com o teor de ar incorporado e a porosidade conferem a estas argamassas uma característica de material isolante térmico, ou seja, com um comportamento bem diferenciado em relação às outras argamassas de revestimento confeccionadas para esta pesquisa.

4.3 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas de revestimento confeccionadas para este estudo estão apresentados de forma sintetizada na tabela abaixo.

4.3.1 Ensaios realizados nas argamassas de revestimento no estado fresco.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios realizados nas argamassas de revestimento no estado fresco

	Ensaio	Unidade	AAN	AABB	AABG	AABQ
Estado endurecido	Índice de consistência	mm	293	260	257	265
	Densidade de massa	g/m ³	1933,80	2129,14	1908,16	1986,01
	Teor de ar incorporado	%	4,00	7,00	8,00	7,00

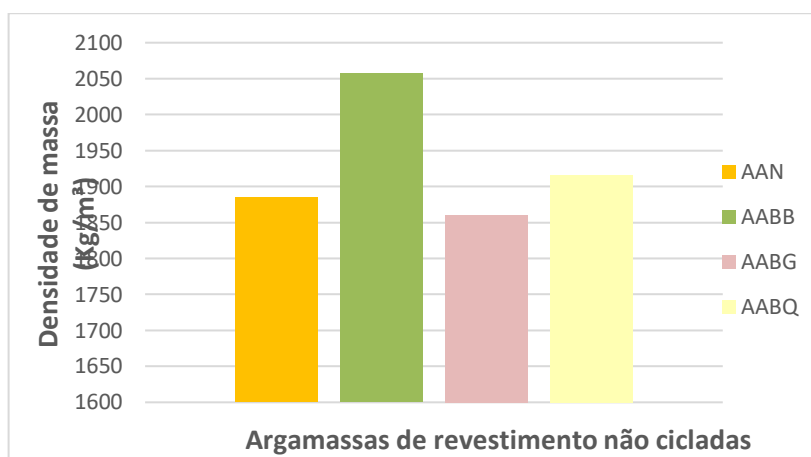
Fonte: Elaborada pela autora.

Constatamos, com base nos resultados dos índices de consistência obtidos no processo de confecção das argamassas, que em função da fixação da quantidade de água a ser utilizada em todas as argamassas, as misturas compostas por areia natural (AAN) apresentaram um espalhamento acima do ideal, além de apresentarem um valor significativamente maior em relação às outras argamassas compostas por agregados provenientes da britagem de rocha basáltica (AABB), rocha granítica (AABG) e rocha de quartzito (AABQ). Os valores obtidos ocorreram em função da necessidade de fixarmos a quantidade de pasta para todas as misturas, sendo que primeiramente foi determinada a quantidade de pasta nas argamassas AABB no intuito de obter um espalhamento o mais próximo possível de 260 ± 5 mm. A quantidade de água adicionada à mistura é influenciada diretamente pelos parâmetros texturais dos agregados, isto é, pela diferença de forma e rugosidade dos grãos e pelo percentual de finos incorporados à mistura, bem como pelo uso ou não de aditivo superplastificante. O percentual de finos adicionado à mistura foi padronizado com objetivo de obtermos granulometrias similares, portanto as diferenças significativas no espalhamento das argamassas se devem principalmente ao formato arredondado dos grãos e ao excesso de água utilizado na argamassa de referência (AN). As argamassas de revestimento AAN requerem uma quantidade menor de água para a sua mistura, pois apresentam uma área superficial de agregado inferior ao das outras argamassas, ademais o formato arredondado com alto grau de esfericidade dos grãos da areia de rio é benéfico para um melhor espalhamento (MASUERO, 2005; TRISTÃO, 2005).

O gráfico 13 apresenta o resultado do ensaio de densidade de massa das argamassas no estado fresco. As argamassas que apresentaram maior densidade de massa foram as AABB com valor superior em 9,2% ao valor da argamassa de

referência AAN, enquanto que as argamassas AABG apresentaram uma densidade de massa com valor inferior em 1,34 % a da argamassa de referência. Já as argamassas AABQ apresentaram valor de densidade de massa superior em 2,82% ao das argamassas AAN. As diferenças apresentadas podem ser explicadas em função da distribuição granulométrica, que pode promover ou não um melhor empacotamento dos grãos, bem como devido à forma dos grãos, da quantidade de pasta, da massa específica e da massa unitária dos agregados. No caso das argamassas estudadas as areias foram peneiradas e passaram por processo de fracionamento com o objetivo de obter composições granulométricas similares, assim como a quantidade de pasta manteve-se fixa para todos os traços. Já a massa específica das areias não apresentou diferenças significativas que pudessem influenciar os resultados obtidos para densidade de massa. Conforme a análise dos resultados as argamassas AABB apresentaram densidade de massa superior ao das argamassas AAN, embora o seu teor de ar incorporado tenha sido 75% superior. Podemos atribuir os resultados obtidos aos formatos subangulosos dos grãos de areias ABB e do seu grau de esfericidade baixo, proporcionando um melhor empacotamento dos grãos, bem como à quantidade de pasta entre os grãos, proporcionando um menor afastamento entre eles. Da mesma forma podemos analisar o fato da AABQ ter apresentado um valor de densidade de massa superior ao da areia natural e ao granito, pois os seus grãos, em formato subangulosos e angulosos, permitiram um melhor empacotamento dentro da mistura no estado fresco do que nas amostras AAN E AABG. Além disso verificamos que, nas amostras AABB e AABG, durante o ensaio de densidade de massa no estado fresco, houve uma grande perda de água por exsudação. Outro fator que pode ter interferido nos resultados é a quantidade de pasta resultante nessas amostras, que pode ter promovido uma maior aproximação dos grãos, o que não ocorreu na mesma intensidade nas argamassas AAN E AABG. Isso ocorreu em função da dosagem dos traços ter sido fixada a partir das argamassas de revestimento AABB, podendo em função do formato dos grãos ter sido insuficiente ou demasiada para os outros traços. Ocorre que a quantidade de pasta nas argamassas de revestimento com areia de britagem pode ter reduzido devido à exsudação ocorrida no processo de moldagem.

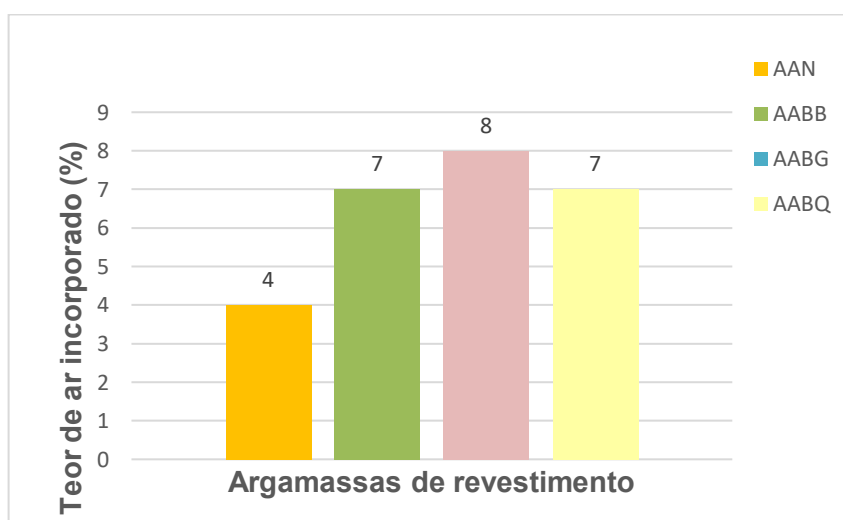
Gráfico 13 - Densidade de massa das argamassas de revestimento em estado fresco



Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto ao teor de ar incorporado nas argamassas de revestimento os resultados demonstram o aumento significativo, da ordem de 50%, nas argamassas de substituição AABB, AABG e AABQ (gráfico 14). O aumento do teor de ar incorporado das misturas, onde houve substituição do agregado miúdo, se deve não somente ao processo de mistura, mas também ao aditivo superplastificante utilizado no intuito de melhorar a trabalhabilidade das argamassas com areia de britagem. O alto teor de ar incorporado nas argamassas de revestimento com areia de britagem afeta diretamente no comportamento térmico destas argamassas, pois o ar apresenta uma condutividade térmica baixa, conferindo características de material isolante para estas argamassas.

Gráfico 14 - Teor de ar incorporado nas argamassas em estado fresco

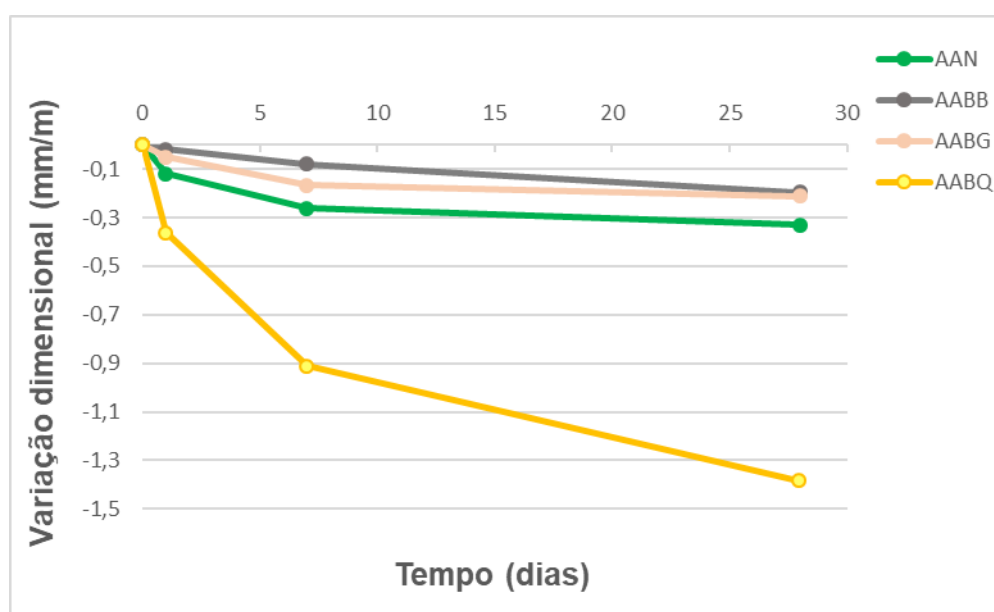


Fonte: Elaborada pela autora

4.3.2 Caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido (moldadas em prismas)

O gráfico 15 apresenta os resultados obtidos para variação dimensional no período de 28 dias. As argamassas de revestimento que apresentaram a maior variação dimensional nas idades ao longo deste período foram as ABBQ, seguidas das argamassas AAN e ABBG, enquanto as AABB apresentaram a menor variação dimensional. A forma do agregado, a porosidade e a quantidade de finos interferem diretamente na retração por secagem. No caso das argamassas confeccionadas para esta pesquisa utilizamos um percentual de finos fixo na mistura, bem como a quantidade de água. As argamassas de revestimento AABB, que apresentaram a menor variação dimensional, possuem em sua mistura grãos com formas consideradas subangulosas e de baixa esfericidade, o que pode propiciar restrições às movimentações geradas pela retração por secagem. Além disso, pois o formato dos grãos e a quantidade de pasta entre eles pode aumentar o atrito entre essas partículas de agregado miúdo.

Gráfico 15 - Variação de dimensional das argamassas

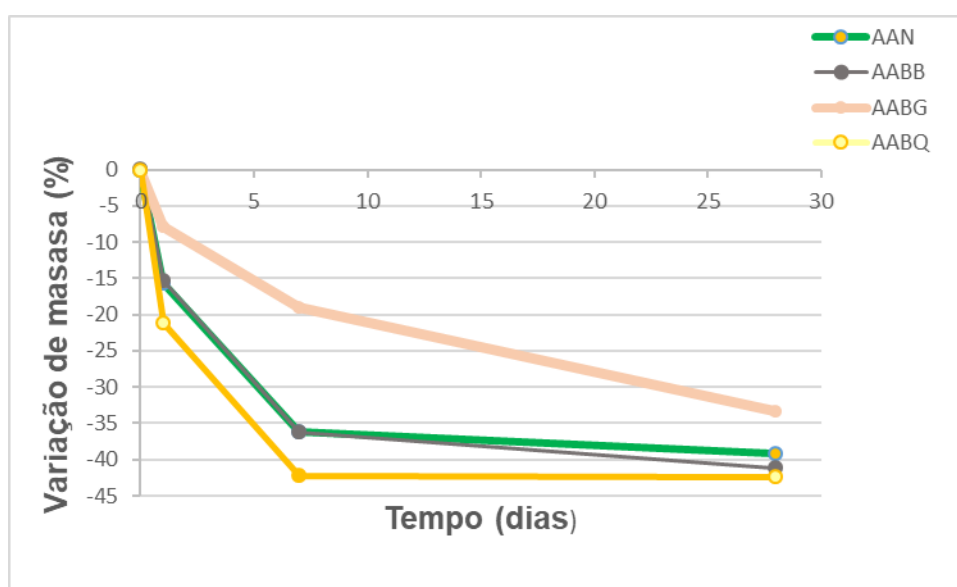


Fonte: Elaborado pela autora.

As variações de massa das argamassas de revestimento apresentadas no gráfico 16, também podem ser atribuídas à perda de água das misturas por evaporação ao longo do ensaio. As argamassas que apresentaram a maior perda de

massa foram as AABQ. Estas argamassas possuem em sua composição minerais hidratáveis que podem ter contribuído para os valores encontrados. Já argamassas AAN possuíam uma excessiva quantidade de água na mistura e apresentavam um teor de ar incorporado inferior ao das outras argamassas. Porém podemos observar que ao final dos 28 dias AAN, AABQ e AABB apresentam uma variação de massa com diferença pouco significativa.

Gráfico 16 - Variação de massa das argamassas



Fonte: Elaborada pela autora.

Cabe lembrar que os ensaios de retração por secagem ocorrem livremente, ou seja, sem restrições. As movimentações do processo de secagem são restritas pela forma como os grãos se arranjam dentro da estrutura e pelo atrito entre eles. Nas amostras AAN E AABQ os grãos apresentam uma superfície mais lisa, ao contrário do que ocorre com os grãos de AABB e AABQ, onde a superfície apresenta uma rugosidade significativa que influencia diretamente no atrito entre essas partículas, bem como na aderência entre a pasta e o grão. Esses fatores podem ter influência importante nas restrições às movimentações geradas pela perda de água para o ambiente.

Na tabela apresentamos os resultados obtidos ao ensaiar amostras de argamassas de revestimento no estado endurecido na forma prismática.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras prismáticas.

	Ensaio	Unidade	AAN		AABB		AABG		AABQ	
			NC	C	NC	C	NC	C	NC	C
Estado endurecido amostras prismáticas	Resistência à compressão	MPa	6,40	5,44	7,43	11,60	9,88	10,57	10,22	11,84
	Resistência à tração na flexão	MPa	1,44	1,22	2,75	4,37	2,89	5,03	1,80	3,38
	Módulo de elasticidade dinâmico	MPa	11,65	11,77	14,61	15,90	13,54	14,47	13,55	14,30
	Coefficiente de capilaridade	(g/cm ² .vh)	0,03	0,045	0,04	0,05	0,037	0,037	0,04	0,04

* NC - amostras não cicladas * C- amostras cicladas

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.3 Resistência à compressão e à tração na flexão

Nas figuras 44 apresentam-se os valores dos resultados dos ensaios de resistência à compressão das amostras de argamassas de revestimento no estado endurecido, obtidos antes e após a aplicação dos ciclos térmicos.

Figura 44 - Resistência à compressão em amostras não cicladas e cicladas



Fonte: Elaborada pela autora.

As argamassas de revestimento com areia natural (AAN), não cicladas, conforme o esperado, apresentaram resistência à compressão menor quando comparadas às argamassas de revestimento, onde o agregado foi substituído por areias de britagem de rocha basáltica (AABB), rocha granítica (AABG) e rocha de quartzito (AABQ). As argamassas de revestimento em que o agregado incorporado à mistura possui uma forma mais arredondada tendem a apresentar menores valores de resistência à compressão, pois o intertravamento entre os grãos ocorre de maneira reduzida. Além disso, o maior teor de água na pasta contribui para esta redução, pois teremos um revestimento com maior índice de vazios, ou seja, uma argamassa mais porosa no estado endurecido.

O formato alongado dos grãos e a presença de grãos mais angulosos nas argamassas constituídas por agregados provenientes da britagem de rochas (AABB, AABG E AABQ) contribuem significativamente para o aumento da resistência à compressão. O reduzido teor de água na mistura, bem como o melhor empacotamento dos grãos tende a produzir materiais com valores mais altos de resistências (TRISTÃO, 2005).

Ao comparar-se as amostras não cicladas (NC) e cicladas (C) pode-se observar que, conforme o esperado, AAN apresentaram uma perda nas resistências mecânicas. Os resultados demonstram uma perda de aproximadamente 15% tanto para resistência de compressão como para a resistência à tração na flexão. A redução nos valores das resistências, após a aplicação de 10 ciclos de aquecimento, foi pode ter sido ocasionada por um aumento das tensões internas nos poros saturados, ou parcialmente saturados, no processo de molhagem. O aumento das tensões internas durante o processo de ciclagem térmica, bem como a queda brusca de temperatura ocasionada pelo choque térmico podem ter contribuído significativamente para a degradação do sistema de revestimento com areia natural o que pode ser constatado com a queda nos valores das resistências mecânicas (tabela 20). A ocorrência de um aumento expressivo de fraturas verificada nos grãos de quartzo após a ciclagem térmica, colabora para a queda nas resistências mecânicas, bem como o aumento considerável do número de microfissuras na pasta no entorno desses grãos (figuras 45).

Figura 45 - Imagens (ANN) geradas no microscópio ótico com aumento de 100X.



(a) amostra AAN não ciclada.

(b) amostra AAN ciclada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Nas imagens acima pode-se observar a diferença de fraturamentos entre os grãos do quartzo, presentes na areia de rio, antes e após a aplicação da ciclagem térmica.

Alguns grãos de quartzo possuíam pequenas fraturas antes do ensaio, porém, após os 10 ciclos, houve o surgimento de fraturas de maior magnitude, aumentando sua ocorrência substancialmente, bem como alterando sua configuração com reflexos na transferência da fissuração para a pasta no entorno do grão (figura 45).

Figura 46 - Imagens (ANN) geradas no microscópio eletrônico de varredura com ampliação de 3000x.



a) amostra AAN não ciclada. (b) amostra AAN ciclada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se, na análise das imagens produzidas no MEV (figura 46), um aumento significativo do número de fissuras após a ciclagem térmica, assim como um aumento da espessura da interface agregado/pasta, demonstrando que a pasta está perdendo a sua aderência ao grão. Estes fatores influenciam diretamente na redução das resistências mecânicas das argamassas de revestimento.

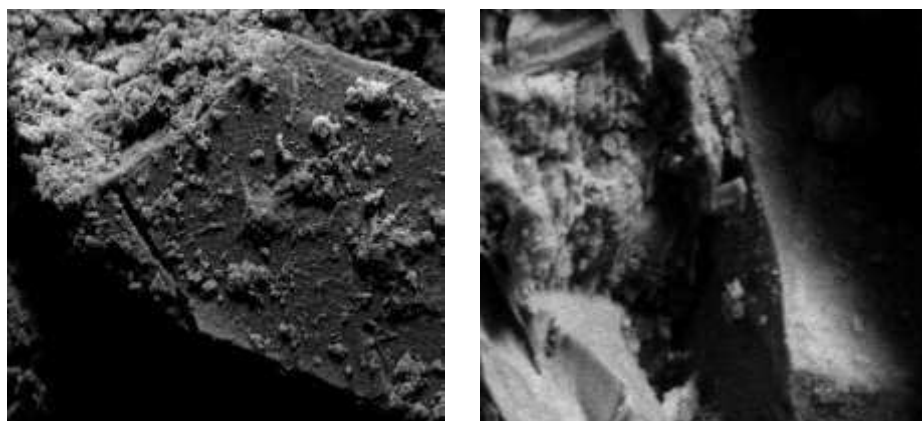
Ao contrário do esperado, as argamassas de revestimento AABB, AABG e AABQ apresentaram um aumento das resistências mecânicas após o processo de ciclagem térmica. Nota-se um aumento expressivo de 35% na resistência à compressão nas argamassas AABB, enquanto que em AABG foi de 6,5% e em AABQ houve um aumento de 13,7%. Estima-se que o uso de aditivo superplastificante nas argamassas de revestimento com agregados provenientes do processo de britagem resultou em um efeito de retardamento do processo de hidratação do cimento, propiciando assim um ganho de resistência ao longo dos ciclos de aquecimento e de resfriamento por aspersão de água. A incorporação de ar na mistura, a rugosidade superficial e o formato alongado dos grãos são parâmetros que influenciam na

melhora da resistência. Zeng, Fen-Chong e Dangla (2012) em suas pesquisas salienta que esses fatores combinados são favoráveis para o alívio das tensões internas e para melhora da resposta do revestimento a esses esforços durante a aplicação da ciclagem térmica. Outro fator que concorre para minimizar os efeitos da degradação acelerada nestas argamassas de revestimentos sujeitos à gradientes de temperatura são as propriedades térmicas dos materiais.

Segundo Shui *et al.* (2010) a exposição das argamassas de revestimento à gradientes de temperatura leva ao surgimento de tensões internas ocasionadas pelos diferentes CETs dos materiais que as compõem. O que diferencia o comportamento térmico das argamassas testadas nesta pesquisa são os agregados com diferentes CETs, o teor de ar incorporado, a sua porosidade e o percentual de cimento anidro existente na mistura durante a ciclagem térmica.

As argamassas AAN são compostas por areia natural que é formada por 97% de minerais de quartzo, os quais possuem o valor de CET mais alto entre os agregados utilizados nas argamassas deste estudo. Não obstante o CPV ARI que compõe esta argamassa é um cimento com menor quantidade de adições, ou seja, resulta em uma pasta constituída por hidróxido de cálcio (C-H) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Estes produtos de hidratação do cimento apresentam diferentes CETs produzindo movimentações diferenciais durante o ensaio de envelhecimento acelerado, o que acaba gerando tensões internas na pasta (SCHULSON; SWAINSON; HOLDEN, 2001).

Figura 47 - Imagens (AABB) geradas no microscópio eletrônico de varredura ampliação 2000x.

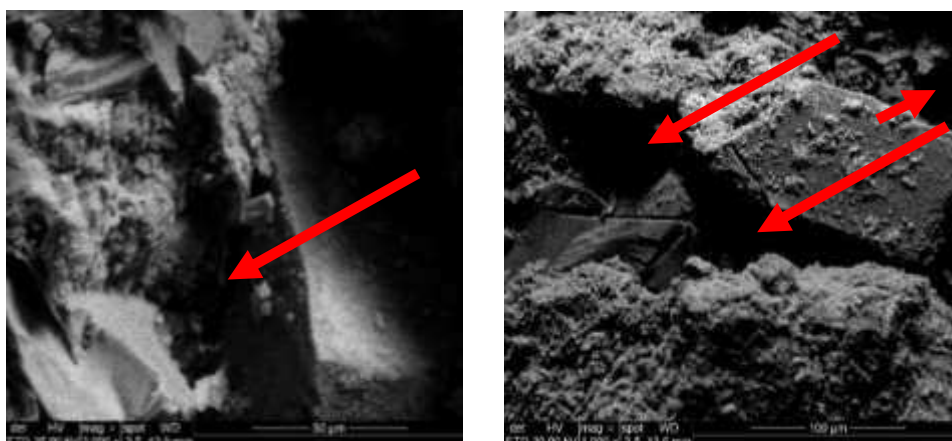


a) amostra ABB não ciclada.

(b) amostra ABB ciclada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 48 - Imagens (AABB) geradas no microscópio eletrônico de varredura
ampliação 2000x

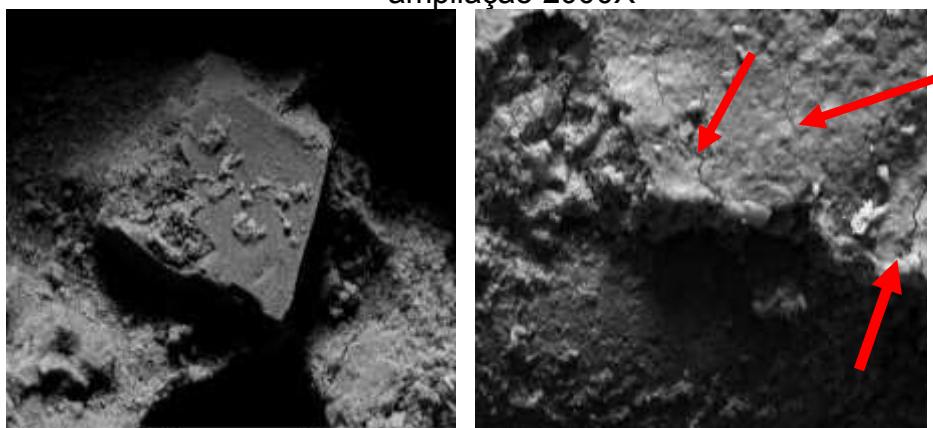


a) amostra ABB não ciclada. (b) amostra ABB ciclada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto aos resultados obtidos para as resistências mecânicas em AABB podemos observar que nas imagens produzidas no MEV (figura 47 e 48) ocorre uma elevada porosidade da pasta no entorno do grão de basalto, porém fica evidente a aderência da pasta ao grão. Estes vazios no entorno do grão absorvem os esforços internos gerados durante o processo de aquecimento das amostras. Não foi possível visualizar significativamente o surgimento de fissuras nas amostras cicladas que pudessem reduzir os valores encontrados nas amostras antes da ciclagem. Ao contrário do esperado houve uma hidratação tardia de cimento anidro, ocasionando um importante aumento das resistências de compressão e tração na flexão.

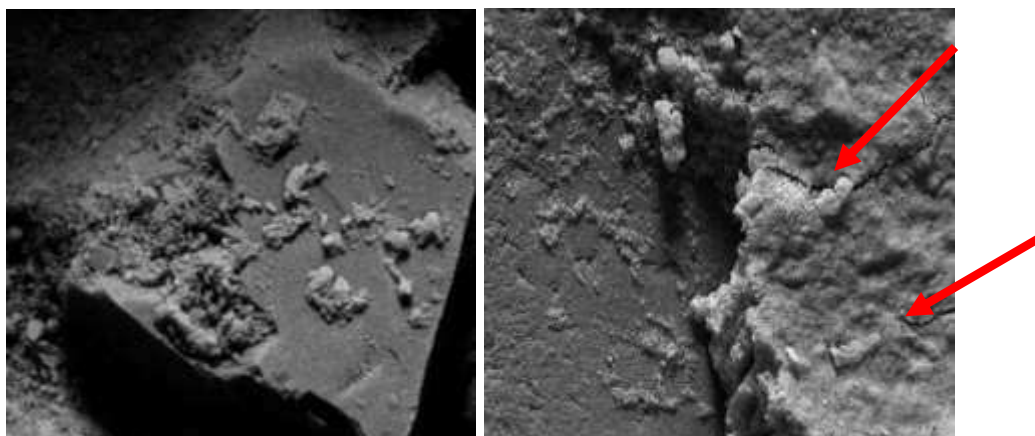
Figura 49 - Imagens (AABG) geradas no microscópio eletrônico de varredura
ampliação 2000X



a) amostra AABG não ciclada. (b) amostra AABG ciclada

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 50 - Imagens (AABG) geradas no microscópio eletrônico de varredura
ampliação 3000x

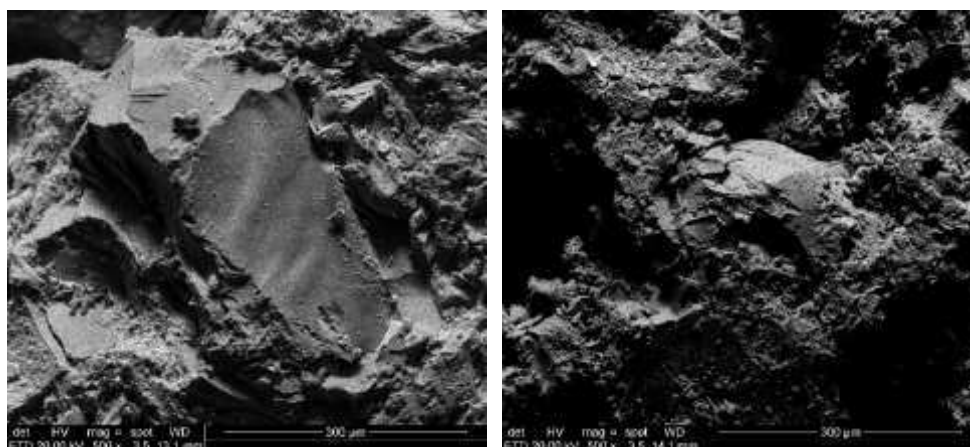


a) amostra AABG não ciclada. (b) amostra AABG ciclada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao observarmos as imagens produzidas no MEV (figura 49 e 50) das argamassas de revestimento AABG não cicladas, não são visualizadas fissuras na pasta no entorno do grão. Porém ao analisar as amostras após o ensaio de envelhecimento acelerado constata-se o surgimento de fissuras na pasta no entorno do grão. No entanto a presença de fissuração significativa não provocou uma redução nas resistências mecânicas das argamassas ABBG. Ao contrário do esperado houve um aumento das resistências mecânicas após a ciclagem térmica, incitado pela adição de aditivo superplastificante à mistura. O aditivo utilizado nesta pesquisa é a base de policarboxilatos e quando incorporado à mistura gera um retardo na hidratação do cimento. Rojas e Cincotto (2013) ressaltam que o retardo na hidratação ocorre devido à formação de uma camada envolvendo os grãos de cimento durante o efeito da dispersão, o que impede o contato da água diretamente com o grão e consequentemente dificultando a sua dissolução.

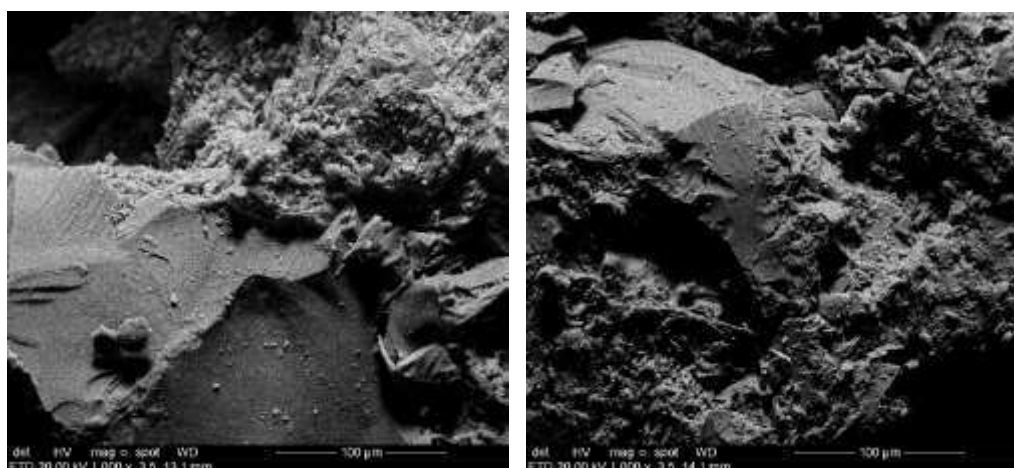
Figura 51 - Imagens (AABQ) geradas no microscópio eletrônico de varredura
ampliação 500



a) amostra ABBQ não ciclada. (b) amostra AABQ ciclada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 52 - Imagens (AABQ) geradas no microscópio eletrônico de varredura
ampliação 1000x



a) amostra ABBQ não ciclada. (b) amostra AABQ ciclada.

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao observar-se as imagens produzidas no MEV (figura 51 e 52) das argamassas de revestimento AABQ tanto não cicladas como cicladas, não constata-se a presença de fissuras na pasta no entorno do grão. Mas observa-se um aumento da porosidade na pasta após o processo de ciclagem térmica. Porém não houve perdas nas resistências mecânicas, pois assim como nas outras argamassas com areia de britagem e uso de aditivo, ocorreu um retardo da hidratação do cimento,

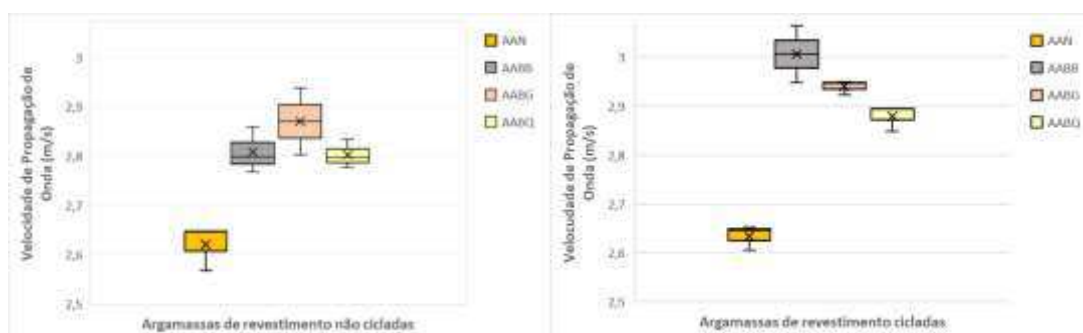
contribuindo para o aumento das resistências mecânicas ao longo dos processos de aquecimento e molhagem.

4.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

As argamassas de revestimento apresentaram um pequeno aumento no módulo de elasticidade dinâmico após a ciclagem térmica, ou seja, ocorreu um aumento na velocidade das ondas ultrassônicas (figura 53).

A hipótese formulada é de que o processo de envelhecimento acelerado provocou uma hidratação tardia dos grãos de cimento anidro, o que acabou reduzindo a porosidade das argamassas de revestimento AABB, AABG e AABQ, enquanto que nas argamassas de revestimento AAN, o aparecimento de fissuras impediu o aumento do módulo. Nota-se que o fenômeno de retardamento da hidratação não foi observado nas argamassas AAN, pois nestas não houve adição de aditivo superplastificante.

Figura 53 - Velocidade de onda ultrassônica nas amostras prismáticas.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.5 Ensaio realizados nas amostras de argamassas de revestimento (em placas)

Neste item estão apresentados os resultados dos ensaios obtidos usando amostras de argamassas de revestimento moldadas na forma de placa.

Tabela 21 - Ensaio realizados nas amostras de argamassas de revestimento em placas

Amostras de argamassaa de revestimento em placa										
Estado endurecido	Ensaio	Unidade	AAN		AABB		AABG		AABQ	
			NC	C	NC	C	NC	C	NC	C
	Absorção total	%	12,84	13,07	10,21	10,62	10,17	11,32	4,36	10,49
Índice de vazios	%	11,38	11,56	9,26	9,6	7,59	10,16	4,18	9,5	
Densidade de massa	g/m ³	56381,3		57339,4		47573,7		54975,3		
*NC- amostras não cicladas				*C- amostras cicladas						

Fonte: Elaborada pela autora

Ao comparar-se os resultados obtidos nas amostras de argamassas de revestimento (em prisma), antes da ciclagem térmica, observa-se que as argamassas AAN apresentavam resistências inferiores às outras argamassas. Isto se deve ao excesso de água de amassamento, o que gerou uma estrutura mais porosa no estado endurecido. Esta porosidade da argamassa pode ser observada (tabela 21) ao comparar os resultados de absorção total e índice de vazios em relação às argamassas constituídas por areia de britagem AAN, AABB e AABG. As argamassas AAN apresentam um percentual de absorção de água de 21% superior as argamassas AABB e AABG, e 66% superior às argamassas AABQ.

Ao analisar-se os resultados obtidos percebe-se que ocorreu um aumento de 1,8 % na absorção de água pelas amostras AAN. Isso se deve ao aumento da sua porosidade em aproximadamente 1,6% após a aplicação de ciclagem térmica. O processo de hidratação de cimento ao longo da ciclagem térmica nas amostras AABB, AABG E AABQ contribuiu para que estas argamassas apresentassem uma absorção menor em relação as amostras AAN. As amostras AABB apresentaram um aumento no índice de vazios de 3,7%, já as amostras AABG obtiveram um aumento de 1,34 %, enquanto as argamassas AABG aumentaram significativamente, em 127%.

O aumento da porosidade nas amostras AAN pode ser atribuído aos danos causados na microestrutura durante o processo de envelhecimento acelerado que contribuíram para o aumento de poros e fissuras na pasta. Essa degradação das argamassas AAN ocorrida durante o processo de ciclagem térmica propiciou a queda dos valores de resistências mecânicas e colabora significativamente para aumentar a absorção de água.

Gráfico 17 - Ensaios realizados nas amostras de argamassas de revestimento em placas.



Fonte: Elaborada pela autora.

O aumento de grande magnitude no índice de vazios das argamassas AABQ se deve à sua composição mineralógica e ao formato dos grãos, e vai ao encontro do aumento do percentual de água absorvido após o ensaio de absorção total. O arranjo e a forma dos grãos em placa de muscovita e o arredondamento dos grãos de quartzo presentes na areia de britagem de quartzito podem ter contribuído para a obtenção de um revestimento com maior porosidade, pois ao analisar-se os resultados obtidos percebe-se que ocorreu um aumento na absorção de água pelas amostras em forma de placa após a aplicação de ciclagem térmica. Além disso os minerais de muscovita (mica) presentes no quartzito são hidratáveis. Durante o processo de aquecimento, a temperaturas acima de 80° C, e durante o período de manutenção do patamar de temperatura, esses minerais desidrataram, enquanto que durante o ensaio de absorção total as amostras imersas em água tiveram seus minerais de muscovita reidratados. Isto não ocorre nas outras amostras de revestimento AAN, AAB e AABG, por não possuírem na composição de suas areias os minerais hidratáveis.

Quanto ao índice de vazios obtidos nas AABG, pode-se afirmar que o mesmo foi influenciado pela forma como os grãos estão arranjos dentro da estrutura. Acredita-se que o formato dos grãos com arestas mais angulosas, devido ao processo de britagem, tenha grande influência neste parâmetro. Estes valores encontrados para AABG validam os valores encontrados na absorção total.

Gráfico 18 - Índice de vazios



Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto aos resultados obtidos para densidade de massa das amostras em forma de placa (tabela 21), pode-se concluir que as argamassas que apresentaram a maior densidade de massa foram AAB, AAN e AABQ, respectivamente. Isto se deve ao melhor empacotamento dos grãos dessas argamassas, sendo também uma consequência do formato dos grãos. Por outro lado, as amostras AABG não apresentam um bom empacotamento, pois são constituídas de grãos angulosos, de baixa esfericidade, consequência do processo de britagem. Estes fatores contribuem significativamente para a presença de um grande número de vazios dentro da amostra, o que afeta diretamente nos resultados das densidades de massa. Outro fator que interfere na densidade de massa é a massa específica dos agregados, porém não foram encontradas diferenças significativas entre elas.

4.3.6 Ensaio realizado nas amostras de argamassas de revestimento aplicadas sobre o substrato cerâmico (em placas)

As diferentes argamassas de revestimento confeccionadas para esta pesquisa foram aplicadas em placas de revestimento cerâmico. Foram realizados ensaios de resistência de aderência à tração nas amostras do sistema de revestimento, antes e após a ciclagem (tabela 22).

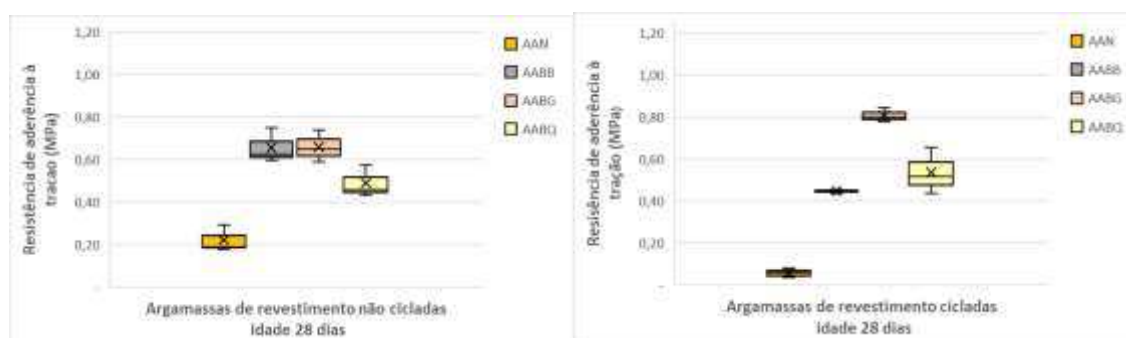
Tabela 22 - Ensaio realizados nas amostras de argamassas de revestimento em placas.

Resistência de aderência à tração (MPa)					
		NC	Desvio padrão	C	Desvio padrão
Areia Natural	NA	0,282	0,09	0,030	0,02
	AABB	0,564	0,16	0,400	0,10
Areia de britagem	AABG	0,650	0,09	0,720	0,17
	AABQ	0,610	0,24	0,440	0,21
*NC - amostras não cicladas			*C- amostras cicladas		

Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar, através dos resultados obtidos, que as amostras de argamassas de revestimento AAN apresentaram os menores valores para a resistência de aderência à tração antes e após a ciclagem térmica. Ao analisar o efeito da ciclagem térmica nos resultados para resistências de aderência destas argamassas verifica-se que houve uma redução expressiva. A forma de ruptura antes e após ciclagem térmica deu-se na superfície dos revestimentos (apêndice B), alterando apenas a sua profundidade. Percebe-se que houve relação da forma de ruptura com a degradação do revestimento após a ciclagem térmica, pois através das imagens realizadas no MEV e dos ensaios de absorção observamos um aumento da porosidade e um aumento da fissuração principalmente na superfície destes revestimentos.

Figura 54 - Resultados dos ensaios obtidos nos ensaios de resistência de aderência à tração



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos resultados obtidos podemos observar que AABB e AAN apresentaram uma redução nos valores de resistência de aderência à tração (figura 54). Através das imagens do microscópio eletrônico de varredura pode-se verificar que houve um aumento da fissuração na pasta comprometendo sua estrutura interna e conseqüentemente sua resistência de aderência à tração. Quanto à forma de ruptura não houve alterações após a ciclagem térmica, a zona de ruptura permaneceu na argamassa.

Quanto às amostras AABG E AABQ nota-se um aumento na resistência de aderência à tração. Este aumento pode ser atribuído a uma alteração na forma de ruptura. Constatou-se que antes da aplicação da ciclagem térmica a ruptura ocorreu na interface argamassa/substrato. E após a ciclagem ocorreu um aumento da resistência de aderência à tração na argamassa de revestimento. Considera-se que isto pode ser atribuído ao processo de hidratação do cimento ao longo dos ciclos térmicos, resultando em uma estrutura interna menos porosa e mais resistente.

4.3.7 Metodologia utilizada

Pode-se constatar que a exposição à 10 ciclos térmicos não foi suficiente para que as argamassas de revestimento aplicadas sobre substrato cerâmico apresentassem fissuração visível. Mas foram suficientes para que ocorresse fissuração significativa na microestrutura dos quatro tipos de argamassas de revestimento confeccionadas para esta pesquisa.

Observou-se diferenças significativas no tipo de termopares utilizados para verificação de temperatura nos ensaios de condutividade térmica e de envelhecimento acelerado. Os termopares de haste rígida testados apresentaram resultados com uma margem de erro expressiva no controle da temperatura dos ensaios. Deve-se procurar usar termopares de haste flexível tomando o cuidado de manter um excelente contato com a superfície onde a tomada de leitura de temperatura é realizada. Além disso, deve-se tomar cuidado com a sua fixação e isolamento, com o propósito de evitar erros de controle no experimento.

Pode-se perceber também, ao longo da realização dos ensaios de envelhecimento acelerado, a diferença de comportamento nas diferentes formas de amostras utilizadas. Constatou-se ainda as diferenças do nível de comprometimento

das argamassas de revestimento entre as sujeitas a restrição da movimentação e onde não utilizamos tal técnica.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste programa experimental chegou-se a algumas conclusões sobre a influência da utilização de diferentes agregados na composição dos traços das argamassas de revestimento, bem como sobre o comportamento térmico das mesmas.

Com relação aos resultados das caracterizações e ensaios:

Observou-se ser de grande importância a determinação da influência de parâmetros texturais do agregado miúdo para a obtenção de bons resultados no desempenho e durabilidade das argamassas de revestimento. Os parâmetros texturais contribuem para a redução da porosidade, para a obtenção de um melhor empacotamento, para a quantidade de pasta na mistura, bem como para a aderência da pasta ao agregado. É de suma importância a análise da composição mineralógica dos agregados que compõem a mistura, pois estes interferem significativamente no comportamento térmico das argamassas de revestimento, quando sujeitas à esforços internos e externos.

Pressupunha-se que a areia de rio AN, por apresentar grãos de quartzo arredondados, com alto grau de esfericidade e superfície lisa, contribuiria positivamente para a melhoria do desempenho das argamassas quando sujeitas a gradientes de temperatura. No entanto a argamassas de revestimento AAN foram as que apresentaram a maior porosidade, a maior fissuração na microestrutura, a maior espessura da zona de interface pasta/ agregado, ou seja, ficou evidente que ocorreu uma maior degradação na argamassa, com reflexos na queda expressiva das resistências mecânicas, comprometendo seu desempenho e durabilidade.

Quanto à resistência de aderência as argamassas de revestimento AAN apresentaram o pior desempenho, pois além dos valores obtidos serem inferiores aos das argamassas AABB, AABG e AABQ, a forma de ruptura ocorreu somente na superfície do revestimento. Essa forma de ruptura ocorrida mostra a magnitude da degradação superficial deste revestimento, como resultado dos efeitos nocivos do choque térmico nas argamassas de revestimento AAN.

As argamassas de revestimento AABB, constituídas de areias de britagem da rocha basáltica ABB, apresentaram um ganho nas resistências mecânicas aos 28 dias, antes e após a ciclagem térmica. O formato dos grãos subangulosos, de baixa esfericidade e com superfície rugosa contribuíram favoravelmente para o

comportamento térmico das argamassas de revestimento AABB, com aumento da aderência entre a pasta e o agregado. Além disso, a porosidade e o elevado teor de ar incorporado das argamassas de revestimento AABB foram extremamente importantes para absorção dos esforços internos gerados durante a ciclagem térmica, evitando o aparecimento expressivo de fissuras.

O retardo na hidratação do cimento, ocasionado pelo uso do aditivo, propiciou, em função do processo de molhagem necessário para o resfriamento das amostras ao longo do processo de ciclagem térmica, uma segunda etapa de hidratação do cimento, resultando na colmatação de poros e fissuras da argamassa. Acredita-se que esse processo de colmatação colaborou de forma significativa para o aumento das resistências de compressão, tração na flexão e da resistência de aderência à tração. A forma como ocorreu a ruptura nos ensaios de aderência não sofreu alterações após a ciclagem térmica.

As argamassas de revestimento AABG, constituídas por grãos de granito de forma angulosa, grau de esfericidade baixo e com rugosidade superficial significativa, apresentaram aumento nas resistências mecânicas. Os parâmetros texturais destes grãos de Areia ABG contribuíram para obtermos uma argamassa de revestimento mais porosa no estado endurecido. Da mesma forma como ocorrido nas argamassas AABB, verificou-se a colmatação dos poros e das fissuras ao longo do processo de envelhecimento. Após o envelhecimento acelerado houve um aumento da resistência de aderência à tração.

As argamassas de revestimento de AABQ também apresentaram aumento na resistência à compressão, assim como nas resistências à tração na flexão e de aderência à tração. Por outro lado, observou-se que esta argamassa de revestimento apresentou o maior índice de vazios, conseqüentemente a maior absorção total, bem como apresentou a maior perda de massa e variação dimensional. A composição mineral, os parâmetros texturais desta areia foram determinantes no comportamento desta argamassa, bem como o teor de ar incorporado à mistura.

As argamassas de revestimento AABQ apresentaram comportamento térmico característico de material isolante. De um modo geral as argamassas de revestimento que apresentaram o melhor comportamento foram as argamassas AABB.

Pode-se verificar a influência significativa dos teores de ar incorporado no comportamento térmico das argamassas com areia de britagem AABB, AABG e AABQ. Da mesma forma concluímos que os teores de ar incorporado foi um fator

importante no alívio das tensões internas geradas durante a aplicação da ciclagem térmica, com isso influenciando significativamente na maior ou menor degradação das argamassas de revestimentos estudadas, e conseqüentemente afetando expressivamente a sua durabilidade e seu desempenho.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) verificar o comportamento das argamassas de revestimento com cimentos com adições pozolânicas;
- b) verificar o comportamento das argamassas de revestimento com adição de cal e sem o uso de aditivo;
- c) verificar o nível de degradação em diferentes camadas ao longo da espessura da argamassa de revestimento.
- d) aprofundar o estudo da interface pasta/agregado nas argamassas de revestimento constituídas por diferentes areias de britagem.

REFERÊNCIAS

AGENCE QUALITÉ CONSTRUCTION. **L'étanchéité des façades 1: exigences et moyens**. Paris: EG, 1995. 72 p.

ALVES, Sandro Miguel Martins. **Um contributo para a sistematização do conhecimento da patologia da construção**. 2008. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. São Paulo: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. São Paulo: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. São Paulo: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações**. Parte 2: Método de célula da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. São Paulo: ABNT, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-4 – Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-4 – Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4 : Sistemas de vedações verticais internas e externas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211 – Agregados para concreto**. São Paulo: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. São Paulo: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). **O mercado de agregados no Brasil**. São Paulo: ANEPAC, nov. 2012.

BAUER, E. *et al.* Identification and quantification of failure modes of new buildings façades in Brasília. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS*, 12., 2011, Porto. **Proceedings [...]**. Porto: FEUP Edições, 2011. p. 1089-1096.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; SILVA, M. N. B. Estimate of the facades degradation with ceramic cladding: Study of Brasilia buildings. **Ceramica**, [S. l.], v. 61, n. 358, p. 151–159, 2015.

BAZANT, Z.; KAPLAN, M. **Concrete at high temperatures**: material properties and mathematical models. Harlow: Longman, 1996. 412 p.

BLUNDELL, R.; DIAMOND, C.; BROWNE, R. The properties of concrete subjected to elevated temperatures. **Technical Report**, London, n. 9, Jun. 1976.

BROEK, D. **The practical use of fracture mechanics**. Ohio: Kluwer Academic Publishers, 1998.

CARASEK, H.; FREITAS, J.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 57-73, jan. /mar. 2014.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. Porto Alegre: Amgh Editora, 2009.

CHIRDON, W. M.; AQUINO, W.; HOVER, K. C. A method for measuring transient thermal diffusivity in hydrating Portland cement mortars using an oscillating boundary temperature. **Cement and Concrete Research**, Ithaca, NY, v. 37, n. 5, p. 680-690, May 2007.

CUNHA, S.; AGUIAR, J.; PACHECO-TORGAL, F. Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 98, p. 89-101, Nov. 2015.

EMMEL, M. G.; ABADIE, M. O.; MENDES, N. New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings, **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 335–342, 2007.

ESQUIVEL, J. F. T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FAIREY, P. Radiant energy transfer and radiant barrier systems in buildings 1.

Florida Solar Energy Center, [S. l.], p. 1-5, May 1994.

FIORITTO A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução. São Paulo: Pini, 1994.

FU, Y.-F. *et al.* Experimental study of micro/macro crack development and stress–strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 789-797, 2004.

GASPAR, P.; BRITO, J. Mapping defect sensitivity in external mortar renders. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 19, n. 8, p. 571-578, 2005.

GOMES, M. G. *et al.* The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 135, p. 279-286, 2017.

HAGISHIMA, A.; TANIMOTO, J. Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. **Building and Environment**, [S. l.], v. 38, n. 7, p. 873–881. 2003.

HAHN, D. W.; ÖZISIK, M. N. **Heat conduction**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2012.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de física**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2, Gravitação, ondas e termodinâmica.

HEWITT, P. **Física conceitual-12**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. **Fundamentos de transferência de calor**. 4. ed. Tradução Ricardo Cruz. México: Prentice Hall, 2003. 912 p.

JAYAMAHA S. E. G.; WIJEYSUNDERA, N. E.; CHOU, S. K. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. **Building and Environment**, [S. l.], v. 31, n. 5, p. 399-47, 1996.

KAZMIERCZAK, C. de S.; BREZEZINSKI, D. E.; COLLATTO, D. Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, São Leopoldo, v. 3, n. 1, p. 47-58, 2007.

KIM, K. *et al.* Experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 363-371, Mar. 2003.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Principles of heat transfer**. St. Paul: West Publishing Company, 1993.

KREITH, F.; BOHN, M. S.; MANGLIK, R. M. **Princípios da transferência de calor**. São Paulo: Cengage, 2003.

LAZERA, F. R. **Avaliação do desempenho mecânico de argamassas térmicas em protótipos de parede**. Dissertação de mestrado. Universidade de Lisboa, 2016.

LIU, Y.; HARRIS, D. J. Full-scale measurements of convective coefficient on external surface of a low-rise building in sheltered conditions, **Building and Environment**, [S. l.], v. 42, n. 7, p. 2718–2736, 2007.

LUO, C. *et al.* A new stable finite volume method for predicting thermal performance of a whole building, **Building and Environment**, [S. l.], 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete**: microstructure, properties, and materials. New York: McGraw-Hill Education, 1994.

MENDES, N. *et al.* Moisture content influence on thermal conductivity of porous building materials. *In*: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 7., 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro, 2001. p. 957-963.

MEYERS, S. L. Thermal coefficient of expansion of portland cement: longtime tests. **Industrial and Engineering Chemistry**, [S. l.], v. 32, n. 8, p. 1107-1112, Aug. 1940.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. 194 f. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2014. Apostila.

MOSCOCO, Y. F. M. **Estudo numérico e experimental das tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2013a. 142 p.

MOSCOSO, Y. F. M. *et al.* Evaluation of resistance to fatigue due to thermal shock in ceramic facade coating system. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE, 13., 2013, Beijing. **Anais [...]**. Beijing: ICF: 2013b. não paginado.

MURUYAMA, I.; TERAMOTO, A.; IGARASHI, G. Strain and thermal expansion coefficients of various cement pastes during hydration at early ages. **Materials and Structures**, [S. l.], v. 47, p. 27-37, Jan. 2014.

NAHUZ, M. A. R. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2013.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução de R. A. Cremonesi. Porto Alegre: Bookman, 2014.

OLIVESKI, R. de C. **Análise numérica e experimental dos campos de temperatura e velocidade em armazenadores térmicos**. 2000. Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2000.

RITTENHOUSE, G. A visual method of estimating two-dimensional sphericity. **J Sedim Petrol**, [S. l.], n. 13, p. 79-81, 1943.

ROJAS, C. M.; CINCOTTO, M. A. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, jul./set. 2013.

ROUSAN, A. A.; ROY, D. M. A thermal comparator method for measuring thermal conductivity of cementitious materials. **Industrial & Engineering Chemistry**

Product Research and Development, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 349-351, 1983.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 47-56, 2011.

SCHULSON, E. M.; SWAINSON, I. P.; HOLDEN, T. M. Internal stress within hardened cement paste induced through thermal mismatch: Calcium hydroxide versus calcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 31, n. 12, p. 1785-1791, 2001.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. **Física: calor, ondas e óptica**. [S. l.], 1973.

SENTENA, J. A. A. **Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassa submetidos a ciclos térmicos**. [S. l.], 2015.

SENTENA, J. A. A.; KAZMIERCZAK, C. de S.; KREIN, L. A. Degradação de revestimentos de argamassa com finos de resíduos de concreto por ciclos térmicos. **Ambiente e Construção**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 211-224, mar. 2018.

SHAO, J. *et al.* A novel method for full-scale measurement of the external convective heat transfer coefficient for Building horizontal roof, **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 41, n. 8, p. 840–847, 2009.

SHUI, Z. *et al.* Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 24, n. 9, p. 1761-1767, Sep. 2010.

SISSOM, L. E., PITTS, D. R. **Fenômenos de transporte**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. 2005. 286 f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento**. 2007. 159 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

XU, Y.; CHUNG, D. D. L. Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], n. 30, p. 59–61, 2000.

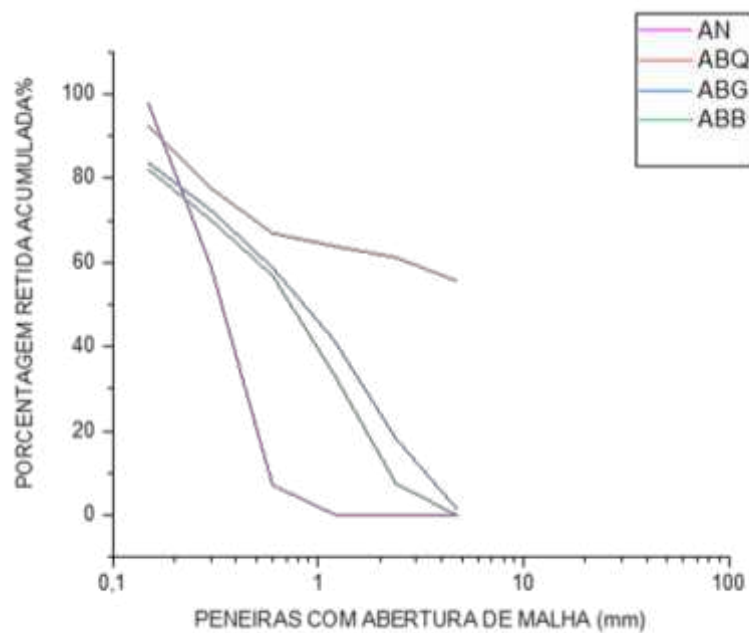
XU, Y.; CHUNG, D. D. L. Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 59-61, 2000.

ZENG, Q. *et al.* Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 468-475,

Mar. 2012.

APÊNDICE A - DADOS PROGRAMA EXPERIMENTAL

Gráfico 19 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 23 - Resistência à compressão de amostras não cicladas

Rc - AMOSTRAS NÃO CICLADAS IDADE 28 DIAS									
TRAÇO	Idade	N	A [m2]	fator correção	F [N]	Rc(MPa)	Média	Desvio Padrão	
AN	28	1	0,0256	1,000	10177	6,36	6,40	0,44	
			0,0256	1,000	10931	6,83			
		2	0,0256	1,000	10680	6,68			
			0,0256	1,000	10806	6,75			
		3	0,0256	1,000	9172	5,73			
			0,0256	1,000	9633	6,02			
ABB	28	1	0,0256	1,000	10806	6,75	7,43	0,87	
			0,0256	1,000	9926	6,20			
		2	0,0256	1,000	9800	6,13			
			0,0256	1,000	12690	7,93			
		3	0,0256	1,000	9926	6,20			
			0,0256	1,000	8544	5,34			
ABG	28	1	0,0256	1,000	15287	9,55	9,88	0,64	
			0,0256	1,000	15454	9,66			
		2	0,0256	1,000	15203	9,50			
			0,0256	1,000	13193	8,25			
		3	0,0256	1,000	13528	8,46			
			0,0256	1,000	13654	8,53			
ABQ	28	1	0,0256	1,000	13318	8,32	10,22	0,66	
			0,0256	1,000	13570	8,48			
		2	0,0256	1,000	12774	7,98			
			0,0256	1,000	14952	9,35			
		3	0,0256	1,000	14272	8,92			
			0,0256	1,000	15580	9,74			

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 24 - Resistência à compressão de amostras cicladas

Rc - AMOSTRAS CICLADAS								
TRAÇO	Idade	N	A [m2]	fator correção	F [N]	Rc(MPa)	Média	Desvio Padrão
AN	28	1	0,0256	1,000	8591	5,37	5,44	0,48
			0,0256	1,000	8831	5,52		
		2	0,0256	1,000	8053	5,03		
			0,0256	1,000	10149	6,34		
		3	0,0256	1,000	8504	5,32		
			0,0256	1,000	8082	5,05		
ABB	28	1	0,0256	1,000	14573	9,11	11,60	1,90
			0,0256	1,000	13365	8,35		
		2	0,0256	1,000	20547	12,84		
			0,0256	1,000	20802	13,00		
		3	0,0256	1,000	17371	10,86		
			0,0256	1,000	16598	10,37		
ABG	28	1	0,0256	1,000	11935	7,46	10,57	1,39
			0,0256	1,000	11151	6,97		
		2	0,0256	1,000	15537	9,71		
			0,0256	1,000	15205	9,50		
		3	0,0256	1,000	14059	8,79		
			0,0256	1,000	16963	10,60		
ABQ	28	1	0,0256	1,000	18137	11,34	11,84	1,49
			0,0256	1,000	13253	8,28		
		2	0,0256	1,000	14048	8,78		
			0,0256	1,000	19423	12,14		
		3	0,0256	1,000	15244	9,53		
			0,0256	1,000	16609	10,38		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 25 - Resistência á tração na flexão de amostras não cicladas

Rf - AMOSTRAS NÃO CICLADAS IDADE 28 DIAS							
TRAÇO	Idade	N	F [N]	L(mm)	Rf(Mpa)	Média	Desviopadrão
AN	28	1	626	100	1,4672	1,4414	0,03873
		2	596	100	1,3969		
		3	623	100	1,4602		
ABB	28	1	941	100	2,2055	2,7461	0,19209
		2	1055	100	2,4727		
		3	896	100	2,1000		
ABG	28	1	941	100	2,2055	2,8930	0,12936
		2	988	100	2,3156		
		3	878	100	2,0578		
ABQ	28	1	756	100	1,7719	1,7953	0,03315
		2	776	100	1,8188		
		3			0,0000		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 26 - Resistência á tração na flexão de amostras cicladas

Rf-AMOSTRAS CICLADAS							
TRAÇO	Idade	N	F [kN]	L(mm)	Rf(Mpa)	Média	Desvio padrão
AN	28	1	738	100	1,7297	1,2211	0,14418
		2	825	100	1,9336		
ABB	28	1	1520	100	3,5625	3,6703	0,36148
		2	1440	100	3,3750		
		3	1738	100	4,0734		
ABG	28	1	1601	100	3,7523	5,0258	0,15022
		2	1603	100	3,7570		
		3	1491	100	3,4945		
ABQ	28	1	1387	100	3,2508	3,3797	0,18230
		2	1497	100	3,5086		
		3	1446	100	3,3891		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 27 - Densidade de massa

ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO					
TRAÇO	Mc(g)	M CIL(g)	VCIL(cm3)	d (Kg/m³)	A%
AN	3042,00	2212,40	429,00	1933,80	4
ABB	3125,80	2213,40	429,00	2126,81	7
ABG	3031,00	2214,40	429,00	1905,83	8
ABQ	3065,4	2215,40	429,00	1986,01	7

ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO NÃO CICLADO				ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO CICLADO			
TRAÇO	mCP(g)	VCP(cm3)	d (Kg/m³)	TRAÇO	mCP(g)	VCP(cm3)	d (Kg/m³)
AN	410,62	217,92	1884,27	AN	379,95	217,92	1743,53
ABB	478,00	232,30	2057,65	ABB	460,44	232,30	1982,06
ABG	427,30	229,76	1859,77	ABG	403,97	229,76	1758,23
				ABQ	422,43	228,16	1851,46

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 28 - Resultados de parâmetros térmicos

PLACA QUENTE										
MATERIAL	K(w/(m.k))	$\Delta X(m)$	$\Delta T(K)$	q(w/m ²)	C(J/k)	c(J/(Kg.K))	Q(W)	α (m ² /s)	R(m ² .K/W)	U(W/(m ² .K))
AAN	0,43947	0,0214	274,500	6625,870732	24,1379626	0,75	271,6607	0,0002	0,04874053	20,51680672
AABB	0,21079	0,0203	277,019	7113,398795	25,6783787	1,29	271,6607	0,0372	0,09644670	10,36842105
AABG	0,30311	0,0219	270,019	6559,951222	24,294406	1,32	271,6607	0,0606	0,07215202	13,85962506
AABQ	0,16720	0,02202	279,850	7525,227147	26,8902167	1,27	271,6607	0,0347	0,13169856	7,593097184

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 29 - Resultado do índice de vazios

Índice de vazios - não cicladas					Índice de vazios - cicladas				
TRAÇO	ms	msat	lv	A	TRAÇO	ms	msat	A	
AN	1399,20	1578,90	11,38	12,84	AN	1385,80	1566,90	11,56	13,07
ABB	1462,50	1611,80	9,26	10,21	ABB	1264,70	1399,00	9,60	10,62
ABG	1418,10	1534,60	7,59	8,22	ABG	1332,70	1483,50	10,17	11,32
ABQ	1262,6	1317,70	4,18	4,36	ABQ	1262,6	1395,10	9,50	10,49

PLANILHA ULTRASSOM - AMOSTRAS NÃO CICLADAS

Idade	Traço	CP	Ultrassom (Tempo em μs)			Comprimento (mm)			Velocidade (m/s)				Ed(GPa)	Vm	Ed(GPa)
			a	b	c	a	b	c	a	b	c	média			
28 DIAS	AN	1	61,1	60,7	60,4	160,70	160,80	160,80	2,630	2,649	2,662	2,647	11,8835		
		2	61,1	60,4	60,4	160,50	160,50	160,50	2,627	2,657	2,657	2,647	11,8833	2,6202	11,6452
		3	63,1	62,4	62,4	160,80	160,70	160,70	2,548	2,575	2,575	2,566	11,1689		
	ABB	4	55,8	56,9	56,2	161,00	161,00	160,80	2,885	2,830	2,861	2,859	15,1337		
		5	57,6	57,6	57,4	160,90	161,00	161,00	2,793	2,795	2,805	2,798	14,4960	2,8081	14,6059
		6	58,2	58,2	58,1	161,00	161,00	161,00	2,766	2,766	2,771	2,768	14,1879		
	ABG	1	51,1	57,4	56,2	161,00	160,90	160,80	3,151	2,803	2,861	2,938	14,4513		
		2	57,9	57,4	57,6	160,80	160,70	160,80	2,777	2,800	2,792	2,797	0,0000	2,8704	9,1993
		3	57,4	57,4	57,4	161,00	160,80	160,80	2,805	2,801	2,801	2,803	13,1465		
	ABQ	4	58,4	57,6	57,9	161,00	161,00	160,90	2,757	2,795	2,779	2,777	13,3023		
		5	57,6	57,7	57,4	161,00	161,00	161,00	2,795	2,790	2,805	2,797	13,4926	2,8024	13,5478
		6	57,1	56,4	56,9	161,00	161,00	160,80	2,820	2,855	2,826	2,833	13,8485		

PLANILHA ULTRASSOM - AMOSTRAS CICLADAS

Idade	Traço	CP	Ultrassom (Tempo em μs)			Comprimento (mm)			Velocidade (m/s)			Vmédia(m/s)	Ed(GPa)	Vmédia(m/s)	Ed(GPa)
			a	b	c	a	b	c	a	b	c				
28 DIAS	AN	1	53,4	53,4	53,4	141,61	141,61	141,61	2,652	2,652	2,652	2,652	11,9259		
		2	52,4	52,4	52,4	138,62	138,62	138,62	2,645	2,645	2,645	2,645	11,8679	2,6344	11,7701
		3	53,9	54,6	54,4	141,50	141,50	141,50	2,625	2,592	2,601	2,606	11,5166		
	ABB	4	46,1	46,4	47,4	142,88	142,88	142,88	3,099	3,079	3,014	3,064	17,3895		
		5	49,4	49,4	48,9	145,19	145,19	145,19	2,939	2,939	2,969	2,949	16,1060	3,0067	11,1652
		6	51,4	51,4	51,4	142,28	142,28	142,28	2,768	2,768	2,768	2,768	0,0000		
	ABG	1	48,9	49,9	48,9	145,20	145,20	145,20	2,969	2,910	2,969	2,949	14,5611		
		2	48,9	47,9	49,4	143,62	143,62	143,62	2,937	2,998	2,907	2,948	14,5419	2,9400	14,4678
		3	48,9	48,4	48,6	142,15	142,15	142,15	2,907	2,937	2,925	2,923	14,3002		
	ABQ	4	49,6	49,4	49,9	143,65	143,65	143,65	2,896	2,908	2,879	2,894	14,4498		
		5	50,6	50,9	50,4	144,26	144,26	144,26	2,851	2,834	2,862	2,849	14,0028	2,8793	14,3015
		6	49,6	49,4	49,9	143,66	143,66	143,66	2,896	2,908	2,879	2,894	14,4518		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE B - FORMAS DE RUPTURA - ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Figura 55 - Formas de ruptura



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 56 - Amostras de AAN



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 57 - Amostras de AABB



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 58 - Amostras de AABG



Fonte: Elaborada pela autora.