



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DISCUSSÃO SOBRE MÉTODOS ACELERADOS PARA A
AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DE
REVESTIMENTOS DE ARGAMASSAS SUBMETIDOS A
CICLOS TÉRMICOS: APLICAÇÃO EM ARGAMASSA
COM FÍLER DE CONCRETO**

JEFERSON ALCANTARA ALVES SENTENA

São Leopoldo, Setembro 2015.

JEFERSON ALCANTARA ALVES SENTENA

**DISCUSSÃO SOBRE MÉTODOS ACELERADOS PARA A
AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DE
REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA SUMETIDOS A
CICLOS TÉRMICOS: APLICAÇÃO EM ARGAMASSA COM
FILER DE CONCRETO**

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

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

Banca examinadora: Prof.^a Dra. Ângela Borges Masuero
Prof.^a Dra. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo, Setembro 2015.

S478d

Sentena, Jeferson Alcantara Alves.

Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassas submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com filer de concreto / Jeferson Alcantara Alves Sentena. – 2015.

152 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

“Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak”.

1. Argamassa. 2. Resíduos como materiais de construção. 3. Materiais de construção – Reaproveitamento. 4. Concreto. I. Título.

CDU 691.53

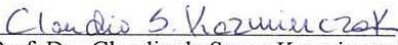
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252)

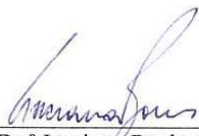
JEFERSON ALCANTARA ALVES SENTENA

**“DISCUSSÃO SOBRE MÉTODOS ACELERADOS PARA A
AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO
DE REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA SUBMETIDOS A
CICLOS TÉRMICOS: APLICAÇÃO EM ARGAMASSA COM
FILER DE CONCRETO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 28 de setembro de 2015


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Orientador - UNISINOS


Prof.ª Dr.ª Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof.ª Dr.ª Ângela Borges Masuero - UFRGS


Prof.ª Dr.ª Marlova Piva Kulakowski - UNISINOS

Dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos órgãos de fomento à pesquisa, pela concessão da bolsa e financiamento de pesquisa ao FINEP e pelo financiamento de pesquisa ao CNPq.

Ao meu orientador Claudio de Souza Kazmierczak pelo incentivo na busca do conhecimento e pela amizade desde a iniciação científica até a pós-graduação.

Aos professores do PPGEC da UNISINOS pela seriedade com que constroem os alicerces da nossa experiência em pesquisa.

À secretária do PPGEC, Simone Trisch sempre disposta de forma solidária e também aos seus colegas.

Aos laboratoristas do LMC, Ingrid Vergara Schorr, Maurício Shäfer e Rodrigo Périco de Souza pelo coleguismo infalível no desempenho das atividades.

Ao sr. Roque Schneider pelas conversas amigáveis e por ter sido sempre muito prestativo junto ao Laboratório de Metalurgia.

Ao itt FUSE, sr. Edilar Predabon pela boa recepção no instituto e ao laboratorista Luiz Felipe Bastos Silveira pelo auxílio na execução dos ensaios.

A Professora Beatriz Sallet coordenadora do curso de fotografia e aos laboratoristas Maurício Montana, Vanessa Silva e Matheus Piccoli, pelo empréstimo de equipamentos e assessoramento técnico.

Ao Sr. Airton e João junto à maquetaria da UNISINOS.

Aos laboratoristas João e André junto ao Laboratório de Construção Civil (LC).

À Alini Camacho e Tamires da Silviera pela ajuda na elaboração dos ensaios junto ao Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais.

À colega Michele Goulart junto ao Itt Fóssil.

Ao professor Leonardo Campos Inocencio e ao laboratorista Arel Hadi Rey Antonio pelo auxílio no desenvolvimento de métodos de ensaio junto ao LASERCA.

À bolsista de iniciação científica Cíntia Timóteo pela generosidade em prestar serviço de forma voluntária, incansável e sempre comprometida com o sucesso dos ensaios.

Ao bolsista Laércio Krein pela disposição e seriedade no desempenho das atividades.

Às empresas Britasinos Concretos Ltda, Pauluzzi blocos cerâmicos e ao Sr. Rogério da Hidracal pela doação de materiais para a pesquisa.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	JUSTIFICATIVA.....	26
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>27</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>27</i>
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	GRADIENTES TÉRMICOS EM FACHADAS REVESTIDAS COM ARGAMASSA.....	30
2.2	DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE FACHADA COM ARGAMASSA SUBMETIDOS A GRADIENTES TÉRMICOS	34
2.3	AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES CAUSADAS POR GRADIENTES TÉRMICOS POR MEIO DE ENSAIOS ACELERADOS	37
2.3.1	<i>Estudos sobre a durabilidade de revestimentos de argamassa por meio de ensaios acelerados ..</i>	<i>40</i>
2.3.2	<i>Alguns Métodos de ensaio especificados em normas aplicáveis a revestimentos de argamassa ..</i>	<i>44</i>
2.3.3	<i>Formas de avaliação da deterioração decorrente do envelhecimento do revestimento em ensaios acelerados.....</i>	<i>45</i>
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.1	PROGRAMA DO EXPERIMENTO	54
3.1.1	<i>Fatores e níveis de controle.....</i>	<i>56</i>
3.1.2	<i>Fatores fixos</i>	<i>56</i>
3.1.3	<i>Fatores variáveis.....</i>	<i>57</i>
3.2	MATERIAIS.....	57
3.2.1	<i>Aglomerantes.....</i>	<i>57</i>
3.2.2	<i>Aditivo plastificante.....</i>	<i>59</i>
3.2.3	<i>Agregados.....</i>	<i>59</i>
3.2.4	<i>Água.....</i>	<i>63</i>
3.2.5	<i>Blocos cerâmicos.....</i>	<i>63</i>
3.3	MÉTODOS.....	64
3.3.1	<i>Chapisco.....</i>	<i>64</i>
3.3.2	<i>Produção da argamassa.....</i>	<i>64</i>
3.3.3	<i>Ensaio das argamassas no estado fresco.....</i>	<i>66</i>
3.3.4	<i>Ensaio das argamassas no estado endurecido</i>	<i>72</i>
3.3.5	<i>Produção e cura dos sistemas de revestimento</i>	<i>80</i>
3.3.6	<i>Ensaio dos revestimentos no estado endurecido</i>	<i>83</i>
3.3.7	<i>Desenvolvimento do método para envelhecimento acelerado por gradiente térmico</i>	<i>92</i>
3.3.8	<i>Desenvolvimento do método de ciclagem térmica por irradiação em caixas térmicas.....</i>	<i>99</i>
3.3.9	<i>Ciclagem nas caixas térmicas</i>	<i>103</i>
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	109
4.1	INFLUÊNCIA DAS DUAS FORMAS DE CICLAGEM TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS.....	109
4.1.1	<i>Propagação de ondas por ultrassom.....</i>	<i>109</i>
4.1.2	<i>Massa específica através do método da picnometria</i>	<i>110</i>
4.1.3	<i>Absorção inicial de água.....</i>	<i>110</i>
4.1.4	<i>Resistência de aderência à tração.....</i>	<i>113</i>
4.1.5	<i>Estudo comparativo entre resistência de aderência à tração (RA), extensão de aderência e forma de ruptura</i>	<i>117</i>
4.2	INFLUÊNCIA DA CICLAGEM NO MÉTODO DAS CAIXAS TÉRMICAS NOS REVESTIMENTOS ...	118
4.2.1	<i>Absorção de água total.....</i>	<i>118</i>
4.2.2	<i>Estimativa da quantidade de vazios nas argamassas</i>	<i>119</i>
4.2.3	<i>Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.....</i>	<i>119</i>
4.2.4	<i>Análise da dureza superficial com durômetro Shore D.....</i>	<i>120</i>

4.3	INFLUÊNCIA DA CICLAGEM NO MÉTODO DAS CAIXAS TÉRMICAS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM FORMA DE PRISMA	120
4.3.1	<i>Densidade de massa</i>	122
4.3.2	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i>	122
4.3.3	<i>Resistência à tração na flexão</i>	123
4.3.4	<i>Resistência à compressão</i>	124
4.3.5	<i>Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade</i>	124
5	CONCLUSÕES	126
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
	APÊNDICE	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos da NBR 15575-4 relacionados com revestimentos.....	30
Tabela 2 – Porosidade determinada por imersão em água e por PIM, em função da exposição a diversas temperaturas.....	39
Tabela 3 – Resumo dos resultados de caracterização das argamassas no estado endurecido em 28 dias	41
Tabela 4 - Fissuras visíveis a olho nu (cm/m ²) x %RCD x número de ciclos térmicos.	42
Tabela 5 - Principais parâmetros de alguns métodos de ensaio para avaliação da durabilidade por gradiente térmico	45
Tabela 6 - Caracterização dos grãos CII F-32	58
Tabela 7 - Características da Cal CH-I	58
Tabela 8 - Caracterização dimensional da Cal CH-I	59
Tabela 9 - Características do aditivo plastificante.....	59
Tabela 10 - Composição granulométrica dos agregados miúdos	60
Tabela 11 - Caracterização dos agregados	60
Tabela 12 - Caracterização dos grãos do filer	62
Tabela 13 - Compacidade do material seco	63
Tabela 14 - Características do componente cerâmico baseadas nas médias das amostragens. 64	
Tabela 15 – Massas dos materiais utilizados nas misturas das argamassas e as relações de água	65
Tabela 16 – Teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco.....	70
Tabela 17 - Características das argamassas no estado endurecido.....	73
Tabela 18 - Distribuição do volume de mercúrio intrudido nas amostras de argamassa.	76
Tabela 19 - Determinações de temperaturas do ciclo nas caixas térmicas, nos tempos 30, 60 e 120 min.....	106
Tabela 20 - Gradientes térmicos nas condições: seco (ao ar) e úmido (após aspersão de água)	107
Tabela 21 - Massa específica (g/cm ³) pelo método de picnometria	110
Tabela 22 - Características da absorção inicial dos revestimentos não ciclados.....	110
Tabela 23 - Características da absorção inicial dos revestimentos ciclados na câmara climática	111
Tabela 24 -- Características da absorção inicial dos revestimentos ciclados nas caixas térmicas	112
Tabela 25 – Médias das resistências de aderência à tração.....	113
Tabela 26 - Médias das resistências de aderência à tração e médias das características da forma de ruptura.....	114
Tabela 27 - Médias das falhas de aderência e resistências de aderência à tração	117
Tabela 28 – Médias das falhas na extensão de aderência argamassa/chapisco.....	117
Tabela 29 - Absorção total das amostras não cicladas e caixa térmica	118
Tabela 30 - Características da esclerometria	120
Tabela 31 - Gradiente térmico nos prismas de argamassa e nos revestimentos, durante o patamar	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação máxima de temperaturas na fachada	31
Figura 2 - Variação da condutividade térmica de concreto, argamassa e pasta de cimento	33
Figura 3 - Processos de transferência de calor nos revestimentos.....	34
Figura 4 - Volume específico da água a diferentes temperaturas.....	35
Figura 5 - Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas	36
Figura 6 - Relação entre a Resistência à flexão e o índice de degradação nas argamassas	36
Figura 7 - Relação entre porosidade total de água e porosidade por intrusão de mercúrio	40
Figura 8 - Equipamento para ensaio de gradiente térmico do IPT (1998).....	41
Figura 9 - Sistema de aquecimento por irradiação (a) e resfriamento por água (b) utilizado por Esquivel (2009).....	43
Figura 10 - Valores médios de resistência de aderência	43
Figura 11 - Variação da resistência à compressão em prismas	44
Figura 12 - Corpo de prova para ensaio de capilaridade (a) e visualização do procedimento de ensaio (b).....	47
Figura 13 - Variação da atenuação versus porosidade. Saturação total (ST), saturação parcial (SP) e seca (S). Onda longitudinal (a) e onda transversal (b).	50
Figura 14 – Velocidade de onda Rayleigh (RW) versus porosidade em pasta de cimento completamente saturada (a), 70 % saturada (b), 30 % saturada (c) e seca (d).	51
Figura 15 - Resistência superficial com esclerômetro e durômetro, aos 180 dias	52
Figura 16 - Resistência superficial com choque de esfera, penetração controlada e esclerômetro, aos 180 dias	53
Figura 17 - Organograma do programa experimental.....	55
Figura 18 - Granulometria do cimento CII F-32	58
Figura 19 - Granulometria Cal CH-I.....	59
Figura 20 - Britador de mandíbulas (a) e britador de rolo (b).....	61
Figura 21 - Distribuição granulométrica a laser do filler.....	62
Figura 22 - Amostra do bloco cerâmico.....	63
Figura 23 - Argamassadeira de bancada (a) e argamassadeira de eixo horizontal (b).....	65
Figura 24 - Trabalhabilidade em função do uso de aditivo.....	67
Figura 25 - Curva de tensão X deslocamento (v= 0,1mm/s).....	68
Figura 26 - Curva de tensão X deslocamento (v= 3mm/s).....	68
Figura 27 - Ar incorporado x Densidade de massa.....	70
Figura 28 - Volume dos materiais (%) que compõem as argamassas	71
Figura 29 - Retenção de água X água total	72
Figura 30 - Serra de precisão (a) e amostra 7x7x20 mm (b).....	75
Figura 31 - Volume de poros acumulados das argamassas.....	75
Figura 32 - Argamassas na ocasião da absorção de água por capilaridade.....	78
Figura 33 - Medição da variação dimensional por retração	79
Figura 34 - Variação dimensional por retração (argamassas de 2; 4,5; 7 e 9,5 % de filler)	79
Figura 35 - Corte em serra diamantada (a) e armazenamento em laboratório (b).....	80
Figura 36 - Aparato utilizado para a aplicação do chapisco (a) e chapisco aplicado (b).....	81
Figura 37 - Caixa de queda (a), argamassa após o lançamento (b) e após o sarrafeamento (c).....	82
Figura 38 - Placas armazenadas em sala climatizada (a) e estufa de secagem (b)	83
Figura 39 - Imagem da visualização da onda ultrassônica.....	84
Figura 40 - Furadeira e serra copo (a), cortes no revestimento (b), cola e pastilhas aplicadas (c) e arrancamento (d)	85
Figura 41 - Corpo de prova extraído (a), áreas dos cortes (b) e procedimento de ensaio (c) ..	85

Figura 42 - Estúdio fotográfico (a) e corpo-de-prova (b)	86
Figura 43 - Clip da área de análise (a), classes criadas (b) e agrupamento de classes (c)	87
Figura 44 - Ensaio esclerométrico nos revestimentos.....	88
Figura 45 - Processo de medição com paquímetro (a) e desenho em escala produzido em software CAD (b).....	89
Figura 46 - Durômetro Shore D.....	89
Figura 47 - Amostra com 2% de fíler (a) e amostra com 9,5% de fíler (b)	90
Figura 48 - Amostra com 2% de fíler (a) e com 9,5% de fíler (b).....	90
Figura 49 - Aparato para fotografia (a) e amostra impregnada (b).....	91
Figura 50 – Seleção da área (a), área de análise (b), classes criadas (c) e classes combinadas (d)	91
Figura 51 - Dimensões traçadas com software CAD.....	92
Figura 52 - Termopar tipo K (a), leituras preliminares em ambiente (b) e leitura em estufa (c)	93
Figura 53 - Furadeira de bancada (a), detector de metais (b) e corte com exposição do furo na interface (c).....	93
Figura 54 - Exterior da câmara climática (a) e interior da câmara (b).....	94
Figura 55 - Peças cerâmicas no interior da câmara	95
Figura 56 - Influência do revestimento na temperatura interna.....	95
Figura 57 - Prismas 40x40x160 mm instrumentados no interior da câmara.....	96
Figura 58 - Variação das temperaturas internas das argamassas, 20-60°C taxa 5°C/min (A=2%; B=4,5%; C=7% e D=9,5% fíler)	96
Figura 59 - Monitoramento das temperaturas na argamassa 4,5% de fíler, 20-60°C, taxa 5°C/min.....	97
Figura 60 – Formato do ciclo térmico.....	97
Figura 61 – Revestimentos argamassados acondicionados no interior da câmara	98
Figura 62 - TC-08 Thermocouple Data Logger instalado no PC	99
Figura 63 - Lâmpada aquecida exposta ao ambiente (a) e lâmpada aquecida no protótipo da caixa (b).....	100
Figura 64 - Câmera usada com o auxílio de um tripé	101
Figura 65 - Amostra exposta ao ambiente (a) e leitura térmica da amostra no protótipo de MDF (b).....	101
Figura 66 - Temporizador (a), isolamento com folha de alumínio (b) e lâmpadas acionadas (c)	102
Figura 67 - Caixas em aquecimento (a) e processo de resfriamento(b).....	102
Figura 68 - Avaliação térmica de caixas em aquecimento (a), peças aquecidas (b), em resfriamento (c) e peças resfriadas (d)	103
Figura 69 - Forma do ciclo térmico (ciclo 34).....	104
Figura 70 - Ciclagem em andamento, aquecimento (a) e resfriamento com aspersão de água (b)	105
Figura 71 - Temperaturas durante a ciclagem nas caixas térmicas, superfícies dos revestimentos (úmida) e interface revestimento/cerâmica.	106
Figura 72 - Aumento da temperatura dos revestimentos expostos ao ar.....	107
Figura 73 - Aumento da temperatura dos revestimentos após aspersão de água	107
Figura 74 – Microclima da sala ao longo do período de ciclagem	108
Figura 75 – Microclima da sala ao longo do período de dois dias	108
Figura 76 - Velocidade de pulso da onda ultrassônica nos revestimentos.....	109
Figura 77 – Absorção inicial dos revestimentos não ciclados.....	111
Figura 78 – Absorção inicial dos revestimentos ciclados na câmara climática	112
Figura 79 – Absorção inicial dos revestimentos ciclados nas caixas térmicas	113

Figura 80 – Médias das resistências de aderência dos revestimentos dentro do universo avaliado	113
Figura 81 – Resistência de aderência à tração (RA) e forma de ruptura dos revestimentos não ciclados	115
Figura 82 - Resistência de aderência e forma de ruptura dos revestimentos ciclados na câmara climática	115
Figura 83 - Resistência de aderência e forma de ruptura dos revestimentos ciclados nas caixas térmicas	116
Figura 84 – Médias dos resultados entre não ciclados e os dois métodos de ciclagens	117
Figura 85 - Presença de vazios em revestimentos ciclados e não ciclados	119
Figura 86 - Índice esclerométrico	119
Figura 87 - Dureza superficial, índice Shore D	120
Figura 88 - Monitoramento das temperaturas do revestimento x prisma	121
Figura 89 - Densidade de massa - ciclado e não ciclado	122
Figura 90 - Módulo de elasticidade dinâmico - ciclado e não ciclado	123
Figura 91 - Resistência de tração na flexão - ciclado e não ciclado	123
Figura 92 - Resistência à compressão - ciclado e não ciclado	124
Figura 93 - Absorção de água por capilaridade - ciclado x não ciclado	124

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC – Agregado Reciclado de Concreto
ASTM – American Society for Testing and Materials
CET – Coeficiente de Expansão Térmica
CH – hidróxido de cálcio
C-S-H – silicato de cálcio hidratado
FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos
itt FOSSIL – Instituto Tecnológico de Micropaleontologia
itt FUSE – Instituto Tecnológico em Ensaio e Segurança Funcional
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
MDF – Medium-Density Fiberboard
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
NM – Norma MERCOSUL
NBR – Norma Brasileira Regulamentada
PIM – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
RCD – Resíduo de construção e demolição
RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systemes de Construction et Ouvrages
SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

% – porcentagem ou percentagem
°C – grau(s) Celsius
h – hora(s)
Ra – resistência de aderência à tração
a/c – relação água/cimento
 μm – micrômetro ou micron
kg – quilograma(s)
PF – perda ao fogo
RI – resíduo insolúvel
– abertura de malha da peneira
W – watts
mm – milímetro(s)
MPa – mega Pascal
min – minuto(s)
 mm^2 – milímetro(s) quadrado(s)
g – grama(s)
s – segundo(s)
MF – microfios
v – velocidade
GPa – giga Pascal
N – Newton(s)
Rf – resistência à tração na flexão
kHz – quilohertz
Ed – módulo de elasticidade dinâmico
 ρ – densidade de massa aparente
 μ – coeficiente de Poisson
 \emptyset – diâmetro
rpm – rotações por minuto

RESUMO

SENTENA, JEFERSON ALCANTARA ALVES. **Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassas submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com filer de concreto.** São Leopoldo, 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

A construção civil tem apresentado um grande crescimento nesta última década. Junto à construção, cresce a demanda por matéria prima e há um aumento da geração de resíduos nos canteiros de obras e em indústrias ligadas ao setor. Segundo o Ministério de Minas e Energias (MME) no ano de 2008, a estimativa de produção de areia chegou a 279 milhões de toneladas e estima-se que em 2030 possa chegar a 1,276 bilhões de toneladas. O uso de resíduos de construção e demolição para a produção de argamassas de revestimento pode trazer benefícios econômicos e ambientais, no entanto, sua utilização somente é possível se o revestimento for durável, suportando as ações ambientais. O presente estudo consiste no desenvolvimento, aplicação e comparação entre dois métodos de ensaio de ciclagem térmica. O primeiro se baseia na NBR 15575-4:2013, que estabelece um método para a avaliação da durabilidade de componentes de vedação em edifícios, utilizando caixas térmicas irradiantes, que consiste na exposição unilateral da alvenaria revestida a ciclos de aquecimento e resfriamento simultâneo à molhagem do revestimento. Utilizando-se esse método, também foram submetidos a exposição térmica prismas de cada argamassa, nas dimensões de 40x40x160 mm. No segundo método, o sistema revestido é totalmente exposto a variações de temperaturas, permanecendo em uma câmara climática que executa repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento. As argamassas utilizadas foram produzidas no traço 1:1:6 em volume (cimento, cal e areia) utilizando-se cimento CP II F-32, cal CH-I em pasta, areia de rio e filer produzido a partir de agregado reciclado de concreto (ARC), adicionado nos teores de 2; 4,5; 7 e 9,5% em relação à massa da areia, e aplicadas sobre substrato de cerâmica vermelha. A primeira atividade do programa experimental consistiu no desenvolvimento dos métodos para a realização da ciclagem térmica e em sua avaliação. Posteriormente, foram produzidas as argamassas e revestimentos, e realizadas as ciclagens térmicas. O método que utiliza uma câmara climática para a ciclagem térmica demonstrou menor potencial de degradação das argamassas; o método das caixas térmicas demonstrou maior eficiência no envelhecimento acelerado dos revestimentos e prismas de argamassas. A exposição à ciclagem térmica resultou em expressiva perda das propriedades das argamassas testadas na forma de prisma, em todos os teores de adição de filer de ARC. A ciclagem dos revestimentos de argamassa aplicados sobre substrato cerâmico apresentou menor degradação que os prismas, sendo que os dois revestimentos com baixo teor de adição (2 e 4,5% de filer) apresentaram maior degradação nas argamassas e os demais revestimentos (com 7 e 9,5% de filer) apresentaram as menores resistências de aderência à tração.

Palavras-chave: envelhecimento acelerado, filer reciclado de concreto; revestimento de argamassa, durabilidade frente a ciclos térmicos.

ABSTRACT

SENTENA, JEFERSON ALCANTARA ALVES. **Discussion of accelerated methods for evaluation of aging of mortar coatings under thermal cycles: application in mortars with concrete's filler.** São Leopoldo, 2015. 152 f. Thesis (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

Construction industry has shown a significant growth this past decade. With it, grows the demand for raw materials and there is a generation of waste at construction sites and in industries linked to the sector. According to the Ministry of Mines and Energy (MME) in 2008, sand production reached an estimated 279 million tonnes and it is estimated that in 2030 its production can reach 1.276 billion tons. The use of construction and demolition waste for the production of coating mortars can bring economic and environmental benefits, but its use is only possible if the coating is durable, supporting environmental actions. This study is the development, application and comparison between two thermal cycling test methods. The first method is based on the NBR 15575-4:2013 standard, uses radiant boxes and consists in unilateral exposure of masonry coated to simultaneous cycles of heating and cooling under wetting. This method were also underwent to thermal exposure 3 prisms of each mortar, in the dimensions of 40x40x160 mm. In the second method, the coated system is fully exposed to temperature variations and remains in a climatic chamber that performs repeated heating and cooling cycles. The mortars used and applied to ceramic substrates have been produced in a proportion of 1: 1: 6 by volume (cement, lime and sand) using Brazilian cement CP II F-32, CH-I lime putty, river sand and filler produced from recycled concrete aggregate (RCA), in compositions with varying content (2, 4.5; 7 and 9.5%) relative to the mass of sand. The first activity of the experimental program was the development of the methods for performing thermal cycling and in their assessment. Mortars and coatings were produced, and then was performed thermal cycling. The method using a climatic chamber for thermal cycling has showed lower efficiency for the degradation of mortar; the method that uses radiant thermal boxes has demonstrated greater efficiency in the accelerated aging of the coatings. The thermal cycling exposure resulted in a significant loss of properties of the prisms, in all addition levels of ARC's filler. The thermal cycling in mortar applied on the ceramic substrate showed less degradation than the prisms, and the two coatings with a low content of filler (2% and 4.5%) showed higher degradation in mortars while other coatings (with 7 and 9.5% of filler) had the lowest coating bond strength.

Key-words: accelerated aging, filler of recycled concrete; mortar coating, durability against thermal cycles.

1 INTRODUÇÃO

O relatório anual apresentado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013) aponta um consumo de 71,0 milhões de toneladas de cimento em 2013 com um consumo per capita de 353 kg/hab., representando um crescimento de 2,4% sobre ano anterior. Este crescimento é acompanhado por um grande consumo de recursos naturais utilizados como matéria prima, e ainda uma grande produção de resíduos resultantes do processo de produção. A Resolução nº 307, de 05/07/2002, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), determina a responsabilidade do gerador pelo resíduo de construção e demolição produzido, o que está exigindo do setor maior responsabilidade com relação seus resíduos. Uma das alternativas encontradas para amenizar o problema é a incorporação de parte desses resíduos na produção de materiais da própria construção civil, como as argamassas. Entretanto, a incorporação de resíduos em materiais de construção civil de uma forma inadequada pode acarretar em degradação precoce, decorrente da ação do clima, em função da ação da umidade, aquecimento e resfriamento, dentre outros. Uma lista de deteriorações que podem ocorrer prematuramente nas argamassas de revestimento foi elaborada por Carasek (2010). A deterioração prematura dos componentes de uma edificação promove impactos ambientais, uma vez que a necessidade de manutenção ou demolição pode gerar resíduos e atividades industriais. Para que se possa implementar processos de reciclagem, surge a necessidade da investigação prévia do desempenho dos novos materiais, através de eficientes ensaios de laboratório, para a viabilização de um produto que atenda aos critérios de desempenho.

Recentemente foi instituída, no Brasil, a Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT 2013) que entrou em vigor em 2014. A referida norma na sua parte 4 está relacionada a sistemas de vedação, como os sistemas de alvenaria com revestimentos de argamassa, e relaciona requisitos que podem ser relacionados com esse sistema, como: funcionalidade, requisitos de segurança estrutural, estanqueidade, desempenho térmico, desempenho acústico, durabilidade e manutenibilidade. No tocante a durabilidade, a Norma apresenta um método de ensaio acelerado que simula os efeitos da variação térmica e exposição a chuva que o revestimento estará submetido ao longo da sua vida útil, recomendado para se definir a aceitação ou não de sistemas de vedação verticais em edifícios no tocante a este requisito. O método descrito pela norma, entretanto, não permite uma avaliação detalhada da degradação ocorrida em função do ensaio de envelhecimento, e ainda não há estudos avaliando sua aplicabilidade em argamassas de revestimento com a incorporação de resíduos.

Este trabalho busca contribuir para a avaliação da durabilidade dos revestimentos de argamassa, em especial aquelas com incorporação de resíduos de concreto. É realizada uma investigação do comportamento de revestimentos de argamassa frente às variações térmicas, considerando-se a incorporação do agregado reciclado de concreto (ARC) como uma alternativa para diminuir o consumo de agregado natural.

1.1 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa visa colaborar com o desenvolvimento e aprimoramento dos ensaios de avaliação de argamassas por ciclagem térmica em ensaios de envelhecimento acelerado, e contribuir para o uso racional dos resíduos da construção através de sua incorporação na produção de argamassas.

A geração de resíduos é um tema relevante para o setor de construção civil, e é regida pela Resolução nº 307, de 05/07/2002, pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que estabeleceu instrumentos que determinam a responsabilidade do gerador do RCD e classificam as categorias de aproveitamento. Em função das construções tomarem proporções constantemente maiores em consequência do aumento da população das cidades, e do surgimento constante de novos materiais e processos construtivos, surgiram normas que estabelecem critérios mínimos de desempenho para edificações. Em termos internacionais, a primeira norma implementada foi a ISO 6241 (ISO, 1984), que definiu a durabilidade nas edificações, de modo genérico. No Brasil, a avaliação de desempenho de edificações é regida pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

Diversos autores buscam formas para simular ou testar a ação do clima e assim verificar a influência das variações de temperatura nas argamassas e as suas relações com a durabilidade, como Guimarães *et al.* (2002); Miranda e Selmo (2003); Esquivel (2009); Ballester *et al.* (2009); Saraiva, Bauer e Bezerra (2011) e Freitas, Carasek e Cascudo (2014). Entretanto, os estudos ainda são poucos e não contemplam o uso de argamassas de revestimento com resíduos.

Esse estudo é desenvolvido para que se obtenha informações sobre o comportamento de argamassas de revestimento com a incorporação de resíduos e para avaliar seu comportamento a partir do envelhecimento acelerado por ciclagem térmica. É também um incentivo à possibilidade de se melhorar o padrão de qualidade das construções e à preservação do meio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral a discussão sobre formas de avaliação da degradação de revestimentos de argamassa com a incorporação de resíduos de concreto, utilizando-se métodos de ensaio acelerado por ciclos térmicos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- I. Identificar métodos para a realização de envelhecimento acelerado de revestimentos de argamassas;
- II. Identificar métodos e propriedades utilizados para a avaliação da degradação ocorrida em revestimentos de argamassa submetidos a ensaios acelerados de envelhecimento;
- III. Aplicar métodos de ensaio de envelhecimento acelerado em argamassas e revestimentos com diferentes teores de adição de filer de agregado miúdo reciclado de concreto.
- IV. Avaliar a eficiência dos métodos e propriedades adotados para a avaliação da degradação ocorrida nas argamassas e revestimentos submetidos a ensaios acelerados de envelhecimento.
- V. Avaliar comparativamente as alterações ocorridas nas argamassas de revestimento com adição filer de concreto em função de ensaios de envelhecimento acelerado.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa encontra-se dividida em 5 capítulos:

No primeiro capítulo – Introdução - encontra-se a introdução do tema, justificativa e objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 - referencial teórico - apresenta uma contextualização sobre os alguns aspectos da bibliografia que fazem parte dos assuntos abordados nesse estudo: inicia-se abordando gradientes térmicos em fachadas de edifícios e a degradação resultante deste tipo de exposição. A seguir é realizada uma discussão sobre o uso de ensaios acelerados para a avaliação comparativa entre sistemas de revestimento, apresentando-se aspectos sobre

durabilidade, métodos de ensaio e formas de avaliação da deterioração ocorrida ao longo do ensaio.

O capítulo 3, programa experimental, descreve as variáveis do programa experimental, os materiais aplicados na produção das argamassas e os métodos adotados e desenvolvidos para avaliação dos resultados dos experimentos.

O capítulo 4 é composto por: apresentação dos resultados, análises e discussões comparativas sobre os diferentes produtos dos experimentos.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A escolha de materiais, componentes e sistemas construtivos a serem utilizados na construção de uma edificação costuma ser realizada a partir de sua adequação às especificações de normas prescritivas, elaboradas a partir da experiência adquirida com o seu uso. Entretanto, é comum que novos materiais e componentes não possam ser avaliados pelos ensaios especificados nas normas prescritivas ou não sejam aprovados nas condições de ensaio especificadas nestas normas. Para atendimento a estes a avaliação de desempenho na construção civil se tornou uma necessidade em função do contínuo aumento na quantidade de novos materiais, componentes e sistemas construtivos disponibilizados pelo mercado, e da necessidade do estabelecimento de critérios para a sua comercialização.

As primeiras normas de desempenho foram criadas pela *International Organization for Standardization* (ISO). A norma ISO 6241 faz uma avaliação do desempenho da edificação na fase pós-ocupação e estabelece 14 itens como sendo os requisitos do usuário com relação à edificação. A norma foi publicada em 1984 e revisada em 2010, e é utilizada como referência para a seleção de requisitos de desempenho que devem ser atendidos nas edificações. (ISO, 1984).

Em 2008, o Brasil estabeleceu sua própria norma de desempenho, procurando estabelecer requisitos mínimos de desempenho nas construções, garantias e responsabilidades. A norma NBR 15.575 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, foi baseada na ISO 6241, e seus requisitos e critérios de desempenho são válidos em todo o país, devendo-se considerar as especificidades de exposição distintas de cada região. A NBR 15.575 foi revisada em 2013, e a partir da revisão passou a contemplar quaisquer edifícios habitacionais (sem a limitação de altura). Comparando as duas normas, verifica-se que a ISO 6241 define durabilidade nas edificações de um modo mais genérico, enquanto que a NBR 15.575 faz sua definição propondo assegurar a capacidade funcional e as características estéticas mesmo com os desgastes naturais dos seus materiais e durante toda sua vida útil. Nas duas normas, o requisito econômico está diretamente vinculado ao requisito vida útil do sistema, tendo em vista os custos de manutenção e demolição, no entanto, a norma brasileira também considera os custos necessários para a destinação final dos sistemas, após a demolição.

A norma brasileira está dividida em 6 partes, sendo que a parte 4, relacionada a sistemas de vedação é a que se aplica aos sistemas de alvenaria com revestimento de argamassa. São estabelecidos 14 requisitos dos quais 5 estão apresentados e detalhados na Tabela 1:

Tabela 1 - Requisitos da NBR 15575-4 relacionados com revestimentos

Categoria	Requisitos
7. Requisitos de Segurança Estrutural	Ações transmitidas por portas; Cargas de ocupação incidentes em guarda-corpos e para-ventos de janelas; Deslocamentos, fissuração e ocorrência de falhas nos sistemas de vedações verticais internas e externas; Estabilidade e resistência estrutural dos sistemas de vedação internos e externos; Impacto de corpo-mole nos sistemas de vedações verticais internas e externas, com ou sem função estrutural; Impacto de corpo mole nos sistemas de vedações verticais internas e externas – para casas térreas – com ou sem função estrutural; Impacto de corpo duro incidente nos SVVIE, com ou sem função estrutural; Solicitações de cargas provenientes de peças suspensas atuantes nos sistemas.
10. Estanqueidade	Infiltração de água dos sistemas de vedações verticais externas (fachadas); Umidade nas vedações verticais externas e internas decorrente da ocupação do imóvel;
11. Desempenho Térmico	Aberturas para ventilação; Adequação de paredes externas.
12. Desempenho Acústico	Níveis de ruído admitidos na habitação.
14. Durabilidade e Manutenibilidade	Ação de calor e choque térmico; Manutenibilidade dos sistemas de vedações verticais internas e externas; Vida útil de projeto dos sistemas de vedações verticais externas e internas.

Fonte: Elaborado pelo autor

O requisito de desempenho 14 - Durabilidade e manutenibilidade - tem uma relação direta com o presente estudo.

A durabilidade dos revestimentos de fachada está relacionada à sua interação com fenômenos climáticos (FREITAS; CARASEK; CASCUDO, 2014). Dentre outros fatores responsáveis pela degradação das argamassas, ressalta-se a influência das variações térmicas a que a fachada da edificação está sujeita.

2.1 GRADIENTES TÉRMICOS EM FACHADAS REVESTIDAS COM ARGAMASSA

Assim como outros materiais empregados na construção civil, as argamassas de revestimento estão sujeitas a dilatações com o aumento de temperatura, e a contrações com a

sua diminuição. A intensidade e a forma da variação dimensional vão depender da variação da temperatura e da composição do material, além das características do sistema sobre a qual a argamassa está aplicada.

A variação de temperatura é decorrente das alterações típicas entre o dia e a noite, entre as estações do ano e de eventuais mudanças bruscas de temperatura, como as decorrentes de chuva sobre uma fachada aquecida.

Além da variação de temperatura decorrente de fatores externos, as fachadas também estão sujeitas a gradientes de temperatura (que ocorrem entre diversas regiões do sistema de fechamento vertical) em função das propriedades dos materiais e do sistema de vedação utilizado. Guimarães *et al.*(2002) realizaram um estudo para observar as variações de temperatura em fachadas de edificações com revestimento de argamassa. Enquanto as temperaturas ambientais variavam entre 14°C e 37°C, e a umidade relativa do ar entre 19% e 63%, nos blocos cerâmicos revestidos com argamassa, com acabamento de pintura na cor preta, a temperatura superficial superou em 57% a temperatura do meio ambiente. O gráfico da Figura 1 demonstra as temperaturas encontradas, em função do tipo de substrato e revestimento superficial, em uma das fachadas do estudo.

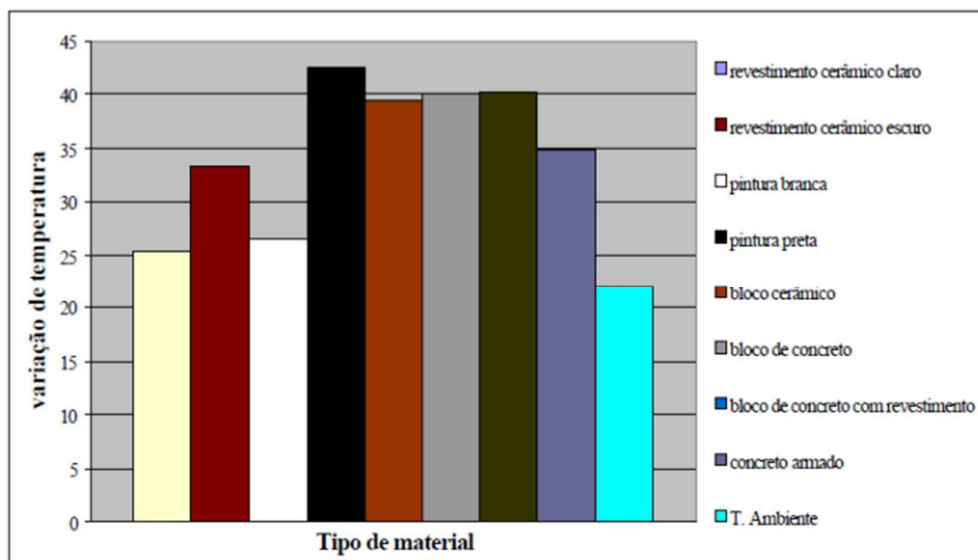


Figura 1 - Variação máxima de temperaturas na fachada

Fonte: Guimarães *et al.*(2002)

Observando-se os valores de temperatura superficial, constata-se que podem ocorrer simultaneamente, em uma mesma fachada, diferentes temperaturas, que geram tensões térmicas distintas que devem ser suportadas pela argamassa de revestimento.

As diferenças de temperatura que ocorrem ao longo do tempo e as decorrentes do uso de materiais com propriedades térmicas diferentes geram tensões internas nas argamassas, que resultam na formação de fissuras que aumentam em quantidade e dimensão até provocarem a deterioração do revestimento. Em estudo realizado por Saraiva, Bauer e Bezerra (2011), sobre descolamentos de revestimentos cerâmicos em fachadas, foi constatada a existência de tensões na interface entre a argamassa colante e as placas cerâmicas em decorrência de esforços de origem térmica, sendo constatado um aumento de tensões em torno de 60% nas placas cerâmicas com maior coeficiente de absorção térmica. Segundo os autores, a camada de acabamento, quando submetida a tensões térmicas, gera tensões diferenciais em relação às camadas inferiores do revestimento.

Um dos principais motivos da degradação das fachadas em função de gradientes térmicos é a existência de materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica (CET) na composição da argamassa de revestimento.

Segundo Schulson, Swainson e Holden (2001), o coeficiente de expansão térmica é um parâmetro fundamental para determinar a tensão interna entre as diferentes fases em materiais à base de cimento e possibilita prever possíveis danos induzidos pelas diferentes dilatações térmicas de cada fase. Como exemplo, a contração térmica diferencial entre hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) induz tensões internas no interior de pasta de cimento no estado endurecido após o resfriamento (SCHULSON; SWAINSON; HOLDEN, 2001).

Valores típicos para CET de pasta de cimento em estado endurecido são de 15 a 20 x 10⁻⁶ / °C (Mayers 1940). Valores para CET de agregados variam de 5 a 12 x 10⁻⁶ / °C (GHABEZLOO, 2011).

Zeng et al. (2012), estudaram o coeficiente de expansão térmica em pastas de cimento com ar incorporado e em argamassas com porosidades diferentes. Os resultados mostram que a porosidade tem efeito significativo sobre a deformação térmica e que o CET diminui com aumento da porosidade.

Shui *et al.* (2010) observaram que para um aquecimento de 20 °C a 85 °C não há uma relação linear entre a dilatação térmica e a mudança de temperatura. Este comportamento é atribuído à mudança da morfologia do gel C-S-H ocorrida durante o aquecimento, que altera a estrutura dos poros e conseqüentemente o CET da pasta de cimento Portland.

Kim *et al.* (2003), estudando a condutividade térmica em concreto, argamassa e pasta de cimento, identificaram sete fatores que afetam a condutividade térmica: idade, volume de agregado, quantidade de cimento, tipos de aditivos, fração de finos dos agregados, temperatura e estado de umidade da amostra. Nos gráficos da Figura 2 podemos observar as seguintes relações: (a) variação da condutividade térmica em função da idade, (b) variação da condutividade térmica função da relação a/c e da quantidade de umidade das amostras e (c) variação da condutividade térmica em função do volume de agregado.

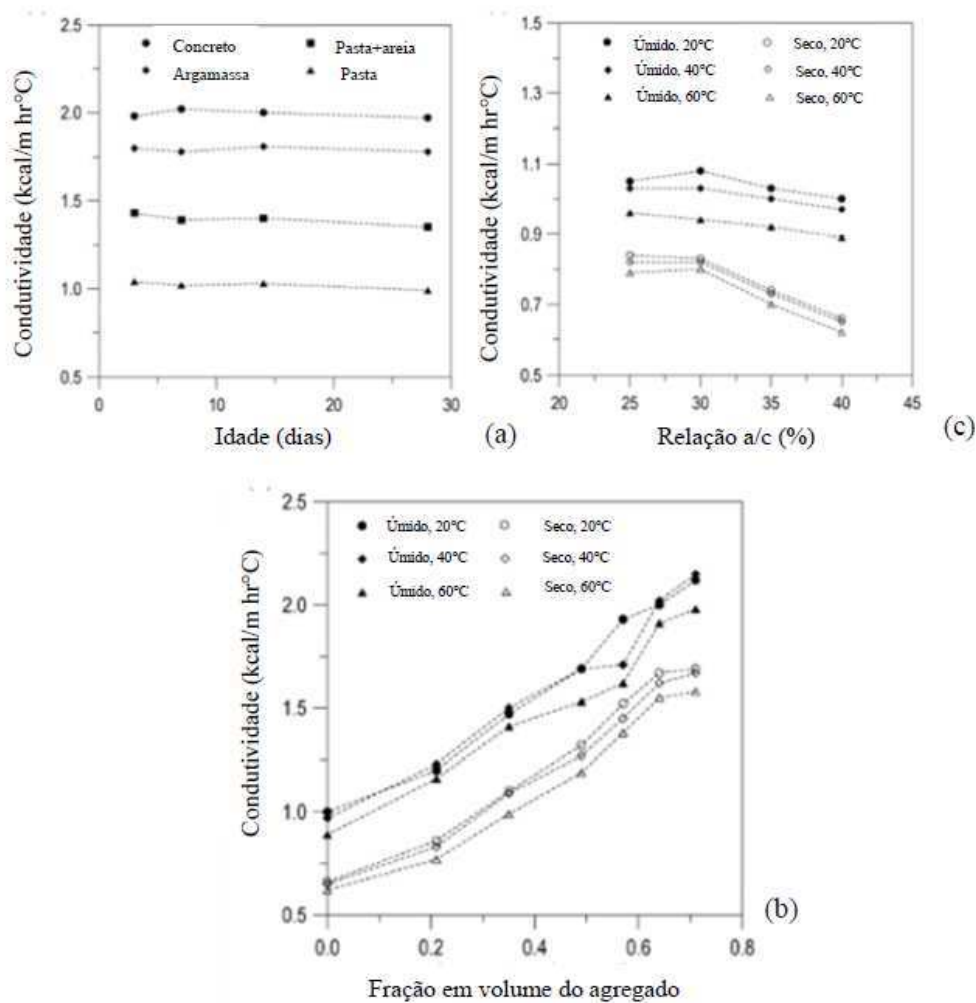


Figura 2 - Variação da condutividade térmica de concreto, argamassa e pasta de cimento

Fonte: Kim *et al.*(2003)

Os autores relatam que o volume de agregado e as condições de umidade da amostra são os principais fatores que alteram a condutividade de amostras à base de cimento.

2.2 DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE FACHADA COM ARGAMASSA SUBMETIDOS A GRADIENTES TÉRMICOS

O processo de degradação decorrente de gradientes térmicos em localidades onde as edificações são sujeitas a invernos rigorosos e baixas temperaturas se distingue do ocorrido em climas temperados em função da forte degradação proveniente de ocorrências de gelo e degelo, pois o fenômeno de expansão que acompanha a mudança de estado da água se soma às variações dimensionais decorrentes da diferença de temperatura e pode acelerar fortemente o processo de degradação do revestimento. Desta forma, a ocorrência de gelo e degelo é um fator que precisa ser considerado na avaliação da durabilidade.

- Degradação de revestimentos decorrente de gradientes térmicos com exposição a temperaturas elevadas

Em revestimentos sujeitos a gradientes térmicos cujas temperaturas mínimas não resultem na ocorrência de gelo e degelo são simuladas alterações de temperatura típicas do dia e da noite, sendo também usual a simulação de choques térmicos, reproduzindo variações súbitas de temperatura em um curto espaço de tempo, como as que ocorrem durante a ação de chuva sobre uma fachada aquecida.

Os processos de transferência de calor que ocorrem em um sistema de revestimento durante o dia e a noite são resumidos na Figura 3.

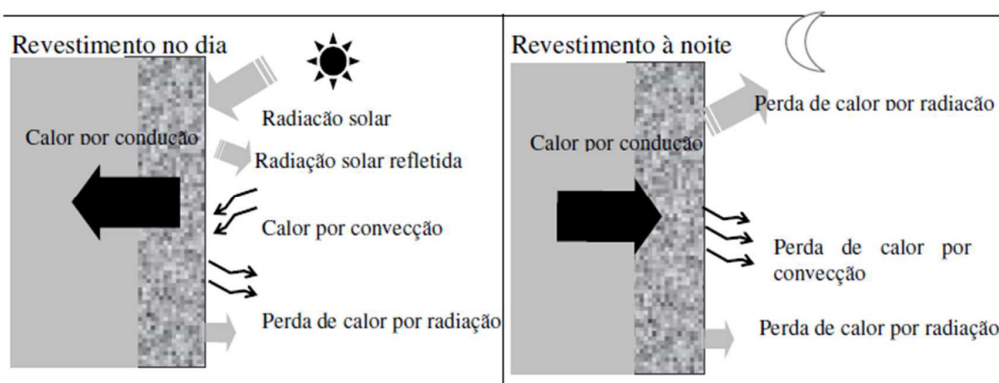


Figura 3 - Processos de transferência de calor nos revestimentos

Fonte: Esquivel (2009)

A durabilidade dos revestimentos de fachada está relacionada à sua interação com fenômenos climáticos (FREITAS; CARASEK; CASCUDO, 2014). Assim como outros

materiais empregados na construção civil, as argamassas de revestimento estão sujeitas a dilatações com o aumento de temperatura, e a contrações com a sua diminuição. A intensidade e a maneira da variação dimensional vão depender da variação da temperatura e da composição do material.

Em estudo realizado por Saraiva, Bauer e Bezerra (2011), sobre descolamentos de revestimentos cerâmicos em fachadas, foi constatada a existência de tensões na interface entre a argamassa colante e as placas cerâmicas em decorrência de esforços de origem térmica, sendo constatado um aumento de tensões em torno de 60% nas placas cerâmicas com maior coeficiente de absorção térmica. Segundo os autores, a camada de acabamento, quando submetida a tensões térmicas, gera tensões diferenciais em relação às camadas inferiores do revestimento.

- Degradação de revestimentos decorrente de gradientes térmicos com baixas temperaturas

Em países de clima frio, a agressividade decorrente da variação térmica é avaliada considerando-se simultaneamente a grande capacidade de degradação causada pela presença da água no interior dos poros dos materiais cimentícios, em função da variação volumétrica da água causada pelo congelamento. Segundo Chatterji (1999), no interior da argamassa a temperatura da água raramente baixa além de -10°C , porém esta temperatura já é suficiente para gerar expansões. O gráfico da Figura 4 possibilita observar as mudanças de volume da água em um intervalo de variação de temperatura. A leitura demonstra um decréscimo no volume específico da água aos 4°C e, logo depois, enquanto a temperatura cai ocorre um aumento de volume quase que na mesma proporção. A diferença do tipo de comportamento entre as temperaturas positivas e negativas está relacionada com a sua mudança de estado físico.

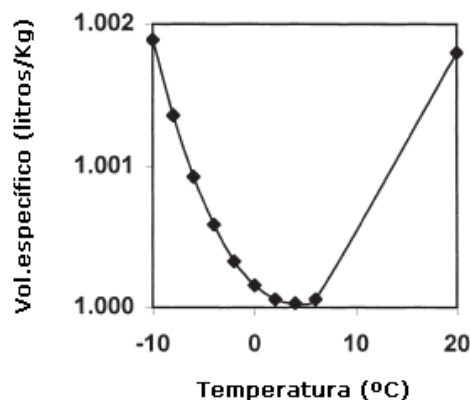


Figura 4 - Volume específico da água a diferentes temperaturas

Fonte: Chatterji (1999)

O aumento do volume resultante do congelamento gera tensões que provocam a perda de coesão da argamassa e causa deste modo a degradação. Botas (2009) simulou ciclos de gelo e degelo em diversos tipos de argamassas, entre elas, algumas mistas de cal e cimento Portland, em proporção 1:1:6 utilizando areia de rio. Foram observados diferentes graus de degradação entre as argamassas, sendo possível identificar e estabelecer uma relação entre a degradação e a porosidade (Figura 5) e com a resistência a flexão dessas argamassas (Figura 6).

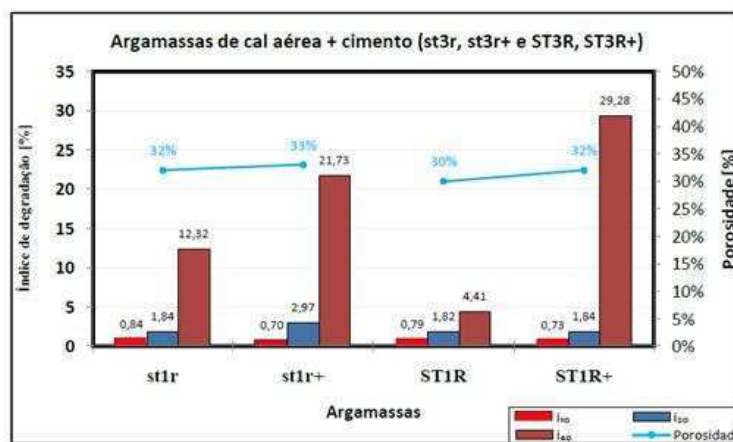


Figura 5 - Relação entre a porosidade e o índice de degradação nas argamassas

Fonte: Botas (2009)

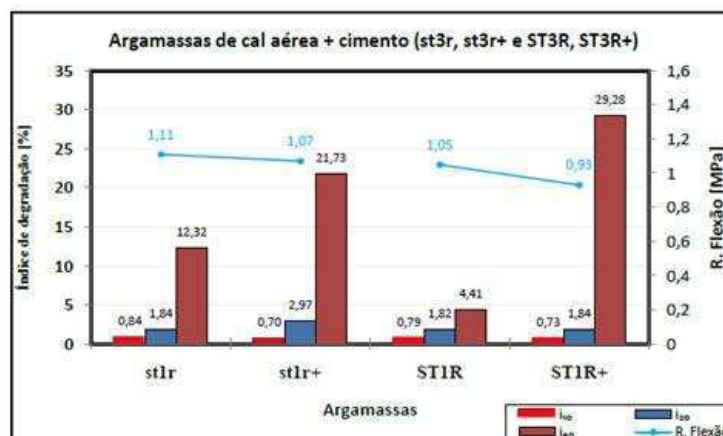


Figura 6 - Relação entre a Resistência à flexão e o índice de degradação nas argamassas

Fonte: Botas (2009)

O autor também ressalta que o teor de umidade da argamassa é muito importante, pois as tensões que deterioram as argamassas somente ocorrem quando os poros estão saturados ou quase saturados; caso contrário, o aumento de volume resultante do congelamento da água não afeta o material, pois o volume final da água congelada é inferior ao volume dos poros. (BOTAS, 2009). Observa-se a perda de propriedades mecânicas de todas as argamassas em função do aumento no número de ciclos de variação térmica, e um aumento do índice de porosidade, o que diminui a sua durabilidade.

2.3 AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES CAUSADAS POR GRADIENTES TÉRMICOS POR MEIO DE ENSAIOS ACELERADOS

Para uma correta especificação de materiais e componentes da construção, que sejam compatíveis com as condições de exposição a que estarão submetidos ao longo da vida útil do edifício, é necessário que se possa estimar o seu comportamento nestas condições de exposição. Uma das formas mais utilizadas para a estimativa da vida útil é a realização de ensaios acelerados de envelhecimento. Para isso é necessário o desenvolvimento de métodos de ensaio confiáveis, que permitam simular adequadamente as condições de stress a que a edificação estará submetida. Entre estas, ressaltamos as simulações de comportamento em função de gradientes térmicos, e a necessidade de especificação dos parâmetros a serem avaliados ao longo dos ensaios.

O gradiente de temperatura a ser utilizado nos ensaios acelerados deve reproduzir os fenômenos químicos e físicos que ocorrem em situações normais de exposição. As temperaturas extremas a serem utilizadas, assim como o ciclo de aquecimento e resfriamento a serem adotados são objeto de discussão por diversos autores. Os parâmetros adotados devem ser suficientes para acelerar o processo de degradação, mas não devem gerar fenômenos de degradação que não possam ocorrer na exposição natural. Segundo Zeng *et al.* (2012) temperaturas de até 50 °C não geram danos de secagem a materiais cimentícios. Portanto, em um ensaio acelerado a temperatura máxima a ser atingida deve ser superior a esta. Janotka e Nürnbergerová (2005), após um período de cura de 28 dias (20 °C, UR 100 %) promoveram a exposição de amostras de concreto a ciclos de aquecimento (até 100 °C) e resfriamento (até 20 °C com UR=60 %) e concluíram que há queda de massa nas amostras devido à água liberada em qualquer elevação da temperatura. Os autores observaram significativas mudanças no comportamento de contração/expansão e no módulo de elasticidade dinâmico. Shui *et al.* (2010) realizaram ensaios com UR controlada > 85 %. As amostras foram aquecidas de 20 °C até 85

°C a uma taxa de aquecimento de 0,5 °C por minuto. Para cada incremento de temperatura de 5 °C, a temperatura do forno foi mantida constante durante 2 min para permitir o equilíbrio da temperatura das amostras. Faure et al (2012) observaram que a secagem em estufa a 80 °C, usada como referência para a determinação do teor de água de amostras cimentícias, permite a evaporação de água livre com a mínima decomposição de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Ao se comparar os resultados dos autores citados, pode-se estimar que a temperatura máxima do ensaio acelerado deve ficar na faixa de 50°C a 80 °C.

A principal alteração física resultante do processo de ciclagem térmica é a geração de fissuras na microestrutura da argamassa, que ao longo de ciclos repetidos aumentam em quantidade e dimensões, alterando a distribuição de poros da argamassa, o que resulta na perda de suas propriedades mecânicas.

Gallé (2001) realizou uma investigação a respeito de métodos e processos para o estudo de alterações nas propriedades de materiais produzidos à base de cimento. Segundo ele, a porosidade e a distribuição do tamanho dos poros são parâmetros essenciais para descrever as propriedades de transporte dos materiais e as suas propriedades mecânicas. O autor considera que os processos de degradação química e os modelos de comportamento mecânico precisam ser completos, reprodutíveis e significativos, dando informação sobre a microestrutura de materiais cimentícios. Segundo ele, o método de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) é uma ferramenta qualitativa usada para a avaliação da microestrutura, porém fica limitada a um intervalo de poros entre cerca de 375 µm e 3 nm (com pequenas variações, dependendo do equipamento utilizado).

De acordo com Faure *et al* (2012), os poros em pasta de cimento podem ser classificados em função de sua dimensão: entre 0,5 a 2,5 nm - espaço intrapartículas dos hidratos; 2,5 a 10 nm - espaço exterior aos hidratos (os poros <10 nm são os poros que se encontram na fase gel resultante da hidratação do cimento); 10 a 50 nm - poros capilares; 0,05 a 10 µm – macroporos (as duas últimas faixas correspondem à rede de poros que poderá conter água nas formas gasosa e/ou líquida). O autor utiliza as faixas referidas para analisar, individualmente, os efeitos da exposição de exemplares cimentícios a ciclos continuados de degradação por gradientes de temperatura.

Caré (2008) produziu pastas de cimento que foram curadas por 6 meses, idade que o autor considerou necessária para que fenômenos de hidratação não alterassem a microestrutura das pastas durante os ensaios acelerados. Após a cura, as amostras foram secas

nas temperaturas de 45; 80 e 105 °C, até constância de massa, sendo posteriormente analisadas, observando-se que as variações térmicas induziram a formação de uma rede de fissuras macroscópicas e modificaram a distribuição do tamanho de poros, principalmente pelo aumento da porosidade capilar. O autor concluiu que a porosidade total aumenta e os poros se tornam maiores, à medida em que a temperatura utilizada no tratamento térmico se eleva, o que pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Porosidade determinada por imersão em água e por PIM, em função da exposição a diversas temperaturas.

	A (W/C = 0.35)				B (W/C = 0.45)				C (W/C = 0.60)			
	Φ_W (%)	Φ_{Hg} (%)	R_c (nm)	ρ_s (kg/m ³)	Φ_W (%)	Φ_{Hg} (%)	R_c (nm)	ρ_s (kg/m ³)	Φ_W (%)	Φ_{Hg} (%)	R_c (nm)	ρ_s (kg/m ³)
-I	–	13,8	20	1940	–	15,5	10	1850	–	28,2	15	1510
45 °C	22.9	13.1	20	1880	31.7	19.3	15	1780	36.7	29.5	20	1560
80 °C	26.9	14.1	60	1830	32.2	20.5	40	1710	41.6	31.4	50	1340
105 °C	31.2	18.8	60	1860	37.5	24.8	40	1580	43.8	29.6 ^a	50	1390

Φ_W = porosidade medida por imersão em água; Φ_{Hg} = porosidade determinada pela intrusão de mercúrio (%); R_c = o raio crítico (nm) medido pelo teste de PIM e ρ_s = peso específico da amostra seca (kg/m³).

Fonte: Caré (2008)

Caré (2008) ressalta que os processos de aquecimento induziram um aumento da porosidade conectada devido à pressão de vapor de água nos poros não conectados, e que o efeito das tensões térmicas é mais importante para materiais densos ou com porosidade desconectada. O autor salienta que a porosidade total determinada por PIM é inferior a determinada por imersão em água (Figura 7). Ainda assim, concluiu que as medições de PIM podem ser consideradas como um bom indicador para avaliar o dano induzido por aumento de temperatura.

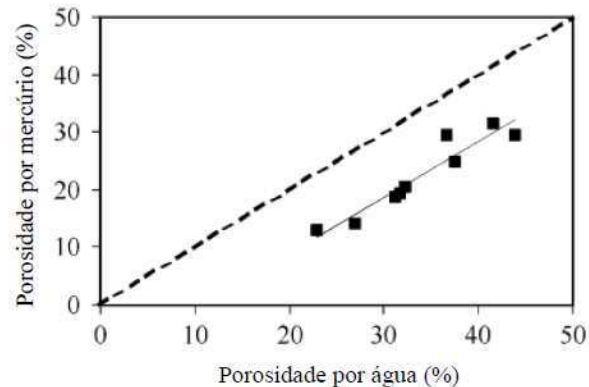


Figura 7 - Relação entre porosidade total de água e porosidade por intrusão de mercúrio

Fonte: Caré (2008)

Em estudo realizado por Lino (2013) foram determinadas as características superficiais e de absorção de água em revestimentos de argamassas expostas ao ar livre nas idades de 28, 90 e 180 dias. Foi determinada a variação da dureza superficial com Durômetro Shore e Esclerômetro em todas as idades. Em geral as leituras de durezas entre os dois métodos de ensaio apresentaram-se coerentes, o que indica que há uma relação entre a dureza superficial e o fenômeno de degradação da argamassa.

2.3.1 Estudos sobre a durabilidade de revestimentos de argamassa por meio de ensaios acelerados

Roman *et al.* (2000) estudaram o comportamento de peças cerâmicas revestindo painéis de alvenaria construídos com blocos cerâmicos nas dimensões de 91 x 91 cm. Os painéis de alvenaria foram revestidos com uma camada de argamassa de emboço no traço 1:2:6 em volume e as peças cerâmicas foram coladas com argamassa tipo AC II e posteriormente foi aplicado rejunte com espessura de 6 mm. Após 28 dias do assentamento um dos painéis foi ciclado em câmara climática (FITOCLIMA 1500EDTU20 da Aralab). Foram executados 120 ciclos de 3 h de duração cada e as temperaturas variaram, do mínimo de 18 °C em média até 68°C no máximo, com umidades de 60 e 98%. Foram efetuados testes de resistência de aderência à tração nos painéis ciclados e não ciclados, utilizando serra copo diamantada de Ø 50 mm. Não foi possível verificar diferenças significativas na aderência entre os painéis ciclados e não ciclados, mas houve diferenças significativas na forma de ruptura.

Miranda e Selmo (2003) produziram argamassas com incorporação de RCD em diferentes proporções (Tabela 3) e submetem-nas a 10 ciclos térmicos de aquecimento e umedecimento utilizando o método IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS,

1998), semelhante ao adotado posteriormente na NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Para isso foi construído um painel térmico de dimensões 1,3 x 2,3m, composto por 98 lâmpadas de 150 W (Figura 8).



Figura 8 - Equipamento para ensaio de gradiente térmico do IPT (1998)

Fonte: Miranda e Selmo (2003)

Tabela 3 – Resumo dos resultados de caracterização das argamassas no estado endurecido em 28 dias

Argamassa	Valores médios			
	Resistência à tração na flexão* (MPa)	Resistência à compressão* (MPa)	Módulo de elasticidade * (GPa)	Retração por secagem total (%)
18% T2	0,87	2,43	2,8	-0,090
18% T4	0,92	2,46	2,8	-0,073
18% T6	0,89	2,57	3,4	-0,090
25% T2	0,94	2,94	3,4	-0,105
25% T4	0,85	2,56	2,8	-0,141
25% T6	1,04	3,29	3,9	-0,118
32% T2	1,29	4,71	5,1	-0,133
32% T4	0,97	3,20	3,1	-0,148
32% T6	1,32	4,33	4,9	-0,175
24% Mista	0,74	1,55	3,2	-0,083

Fonte: Miranda e Selmo (2003)

No estudo realizado, cujos resultados estão sumarizados nas Tabela 4, as ocorrências de fissuras são observadas nas argamassas com maior rigidez (com exceção da argamassa mista com cal hidratada). Os autores levantam a hipótese de que a fissuração ocorreu

na argamassa mista por esta conter granulometria mais fina no agregado utilizado. Observa-se que algumas das argamassas já apresentavam fissuras anteriormente aos ciclos térmicos, o que dificulta a análise isolada do parâmetro “envelhecimento por choque térmico”.

Tabela 4 - Fissuras visíveis a olho nu (cm/m²) x %RCD x número de ciclos térmicos.

	Argamassa									
	18% T2	18% T4	18% T6	25% T2	25% T4	25% T6	32% T2	32% T4	32% T6	24% Mista
Antes do choque	0	0	0	0	0	0	0	124	0	15
1º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0
2º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0
3º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2
6º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7º ciclo	0	0	0	0	0	0	4,9	1	2	0
8º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
10º ciclo	0	0	0	0	0	0	0	8	0	1,2
Total choque	0	0	0	0	0	0	4,9	28	4,5	5,2
Total geral	0	0	0	0	0	0	4,9	152	4,5	20,2

Fonte: Miranda e Selmo (2003)

Esquivel (2009) submeteu argamassas a base de cimento a ciclos térmicos e concluiu que cinco propriedades influenciam o comportamento dessas argamassas frente ao choque térmico: resistência mecânica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica. Antes do ensaio, foram feitas simulações numéricas em programa computacional para testar adequar as dimensões dos seus sistemas de revestimento à forma de exposição e estimar o comportamento de macro defeitos provocados. O método de ensaio foi semelhante ao estabelecido pela NBR 15575-4 (ABNT 2013). Foram estabelecidas as temperaturas máxima de 70°C e mínima de 23°C e, conforme visto na Figura 9, adotado como sistema de aquecimento painel radiante com lâmpadas incandescentes e resfriamento a base de água durante 30 ciclos térmicos. A temperatura foi monitorada por sensores térmicos instalados na superfície dos revestimentos.

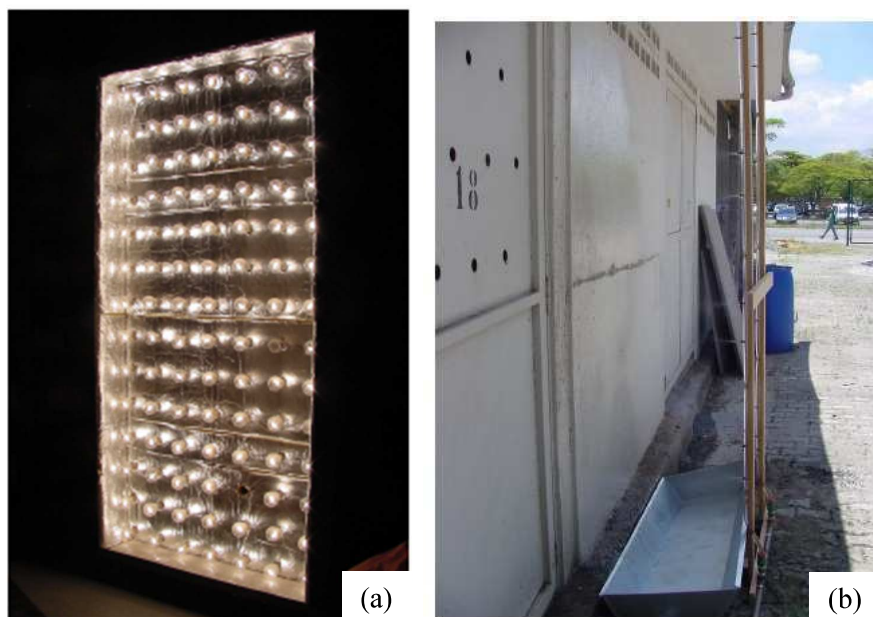


Figura 9 - Sistema de aquecimento por irradiação (a) e resfriamento por água (b) utilizado por Esquivel (2009).

Fonte: Esquivel (2009)

Após sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento por aspersão de água, os revestimentos foram submetidos ao ensaio de resistência de aderência à tração. Os resultados podem ser observados na Figura 10.

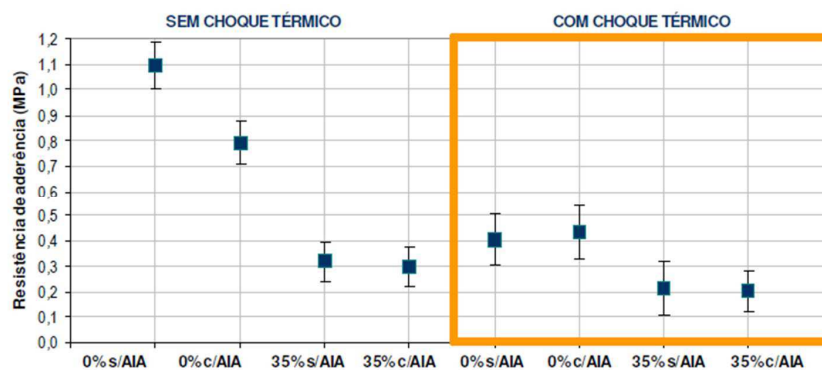


Figura 10 - Valores médios de resistência de aderência

Fonte: Esquivel (2009)

O choque térmico promoveu a diminuição na resistência de aderência em todas as combinações, sendo mais pronunciada no revestimento sem macro defeitos de interface e sem

aditivo incorporador de ar (ESQUIVEL, 2009). Não foi possível isolar a ação provocada pelo choque térmico, uma vez que foram provocados 35% de macro defeitos na interface entre a argamassa e o substrato, e esses podem ter absorvido movimentos diferenciais provocados pelas tensões térmicas do ensaio. O autor constata, a partir da observação comparativa entre revestimentos que não possuíam macro defeitos, que o gradiente térmico se comportou de forma diferente e levanta a hipótese de que pode ter havido acúmulo de água nos vazios promovidos pelos macrodefeitos, que interferiram no processo de ciclagem. O gráfico da Figura 11 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão de prismas extraídos dos corpos-de-prova ensaiados.

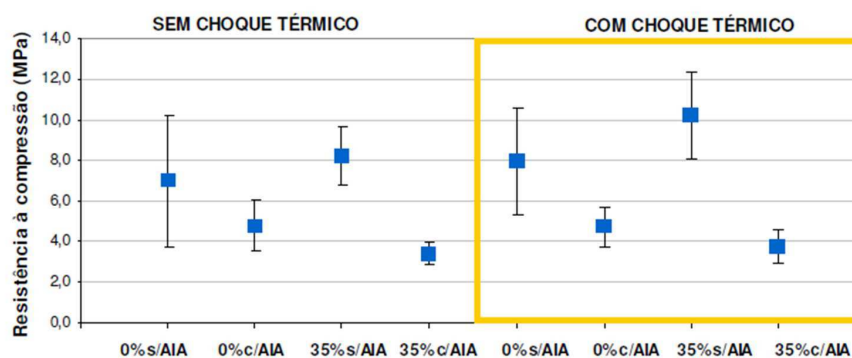


Figura 11 - Variação da resistência à compressão em prismas

Fonte: Esquivel (2009)

Percebe-se que as resistências à compressão se apresentam muito próximas, não sendo possível distinguir o processo de degradação decorrente da ciclagem térmica.

A partir dessas considerações, percebe-se que há necessidade de adoção de outros ensaios que permitam a avaliação da degradação de revestimentos de argamassa expostos a ensaios de envelhecimento acelerado por gradientes térmicos, visto que o acompanhamento por avaliação visual das fissuras superficiais e da resistência de aderência não são eficientes para distinguir o nível de degradação em muitos sistemas de revestimento.

2.3.2 Alguns Métodos de ensaio especificados em normas aplicáveis a revestimentos de argamassa

Na Tabela 5 são sumarizados alguns parâmetros de métodos de ensaio acelerados utilizados para a avaliação da durabilidade de revestimentos por gradiente térmico.

Tabela 5 - Principais parâmetros de alguns métodos de ensaio para avaliação da durabilidade por gradiente térmico

Norma/Método	Equipamento	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Número de ciclos	Tempo de duração do ciclo
NBR 15.575-4 Anexo E	Aquecimento com painel radiante e resfriamento com aspersão de água	20±03	80±03	10	Aquecimento + 1 h + resfriamento
UNE - EN 13687-2:2002	Aquecimento por 5 h45 min e aspersão de água por 15 min	21±2	60±10	Especificado na prEN 1504	6 h
prEN 16306	-	20	80	20	24h

Obs.: A norma brasileira tem o objetivo de avaliar sistemas de fechamento vertical de edifícios; a norma UNE tem o objetivo de avaliar a compatibilidade térmica de produtos e sistemas de reparo, incluindo pastas, argamassas, concretos e sistemas de proteção superficial; a norma prEN tem o objetivo de avaliação da deterioração de placas de mármore em fachadas.

Fonte: elaborado pelo autor

Os gradientes de temperatura recomendados pelas normas citadas não são muito diferentes, variando entre 20°C e 80°C. As normas recomendam a adoção de choque térmico (simulando a ação da chuva sobre uma fachada muito aquecida) procurando especificar um procedimento de ensaio que melhor represente a situação real de exposição a que o sistema estará submetido ao longo de sua vida útil.

No Brasil, a norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013), no seu anexo E, prevê um método de ensaio acelerado que avalia o efeito da exposição do revestimento ao calor e a resfriamento por choques térmicos em sistemas verticais de alvenaria. O método sugerido pela norma apresenta as seguintes características: exposição do sistema (tipicamente uma parede de alvenaria revestida com argamassa) a dez ciclos de aquecimento e resfriamento consecutivos, com o uso de painel radiante, para aquecimento do revestimento até sua temperatura superficial atingir 80±3 °C, manutenção desta temperatura por uma hora e resfriamento com aspersão de água até que a temperatura superficial atinja 20±3 °C. Os registros de temperatura devem ser executados por 5 termopares dispostos na superfície.

2.3.3 Formas de avaliação da deterioração decorrente do envelhecimento do revestimento em ensaios acelerados

Além da definição do método utilizado para o envelhecimento acelerado, é de extrema importância uma correta especificação das formas de avaliação do dano causado pelos

ciclos de envelhecimento acelerado. A NBR 15575-4 especifica como parâmetros de avaliação o “aparecimento de fissuras, trincas, deslocamentos ou outras deteriorações em ambas as faces do corpo-de-prova”, e a “avaliação do deslocamento horizontal após 45min de estabilização da temperatura superficial em $(80\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C})$ e imediatamente após o resfriamento”, ao longo de 10 ciclos de ensaio. A ocorrência de fissuras ou de algum dos demais sintomas de degradação citados é suficiente para que o sistema seja reprovado no requisito durabilidade, segundo a norma. Entretanto, a simples avaliação visual do revestimento e da deformação existente no sistema não fornecem informações sobre as alterações de microestrutura que podem estar ocorrendo ao longo do processo de envelhecimento a que a amostra está sendo submetida, o que geralmente impossibilita uma análise quantitativa da diferença de desempenho entre diversos sistemas de revestimento.

Com vistas a permitir uma melhor identificação das eventuais alterações de propriedades do sistema de revestimento em função do ensaio de envelhecimento, é necessário que sejam realizados outros ensaios de avaliação, além dos citados na referida norma brasileira. Nesse sentido, serão discutidos a seguir algumas alternativas de ensaios para esta avaliação.

a. Avaliação da fissuração nos revestimentos.

A NBR 15575-4 impõe como parâmetro de aceitação de desempenho o não “aparecimento de fissuras e trincas”, mas não fornece subsídios para que sejam adotados procedimentos visando a melhoria de sistemas que não atendam a esta especificação.

A avaliação da fissuração permite uma comparação mais objetiva para o desenvolvimento de traços de argamassa com incorporação de resíduos, sendo possível avaliar de que modo diferentes materiais e parâmetros de dosagem exercem influência na fissuração de revestimento, seja ao longo do processo de cura ou da vida útil dos revestimentos, esta última simulada pelo ensaio de envelhecimento acelerado.

Um método que pode ser adotado consiste no registro fotográfico da superfície do revestimento, com uso de câmera de alta resolução, e posterior determinação da área fissurada. Este método permite a avaliação da evolução do nível de fissuração ao longo do tempo, e a comparação deste parâmetro entre os diversos sistemas de revestimento utilizados. Rosa (2013) utilizou essa forma de avaliação para determinar a determinação de fissuração em várias idades de revestimentos de argamassa.

b. Determinação da absorção de água do sistema composto pelo revestimento aplicado sobre a base de cerâmica vermelha.

Segundo Caré (2008), as modificações decorrentes da ciclagem térmica podem ser constatadas por meio de alterações na porosidade capilar dos revestimentos. Um método de ensaio utilizado para a determinação da absorção de água por capilaridade é baseado no procedimento descrito na recomendação RILEM TC 116-PCD, e consiste na determinação da capilaridade à água por fluxo unilateral no revestimento. Para tal, são extraídos corpos-de-prova circulares da alvenaria (com diâmetro de 50mm, e altura correspondente à espessura do revestimento somada à do substrato cerâmico, visualizado na Figura 3a). Estes exemplares são secos em estufa, tem sua lateral selada e posteriormente são submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade, por imersão parcial em recipiente com água. Em períodos determinados, os exemplares são pesados e a diferença de massa é utilizada para o cálculo da absorção capilar. Como resultado do ensaio, é traçada uma curva de absorção capilar, onde é possível identificar o momento em que a água absorvida atinge o substrato, e realizar um estudo exclusivo da permeabilidade do revestimento. Além da determinação da capilaridade, o ensaio permite uma estimativa do volume total de poros capilares dos sistemas ensaiados. A Figura 12 demonstra detalhes do ensaio, que vem sendo utilizado por diversos autores (Troian (2010), Werle (2010) e Erhart (2014) utilizaram este método, observando boas correlações com outros métodos de ensaio).

Caré (2008), utilizou um método semelhante para avaliar a penetração de cloretos em amostras de pastas de cimento, que juntamente com o ensaio de PIM contribuiu para a caracterização da porosidade das amostras.



Figura 12 - Corpo de prova para ensaio de capilaridade (a) e visualização do procedimento de ensaio (b)

Fonte: do autor

Uma variação ao ensaio anterior é o método proposto pelo Anexo D da NBR 15.575 - 4, que permite a avaliação da permeabilidade à água de sistemas compostos por alvenaria e

revestimento. Este método é utilizado para a análise do desempenho de alvenarias por Hattge (2004). Entretanto, este método permite a evaporação de água do sistema durante a execução do ensaio, e sofre grande influência do preparo da base (chapisco) e do tipo de bloco cerâmico utilizado, sendo impossível avaliar exclusivamente a influência do revestimento.

c. Determinação da resistência de aderência à tração e da forma de ruptura por tração.

A determinação da resistência de aderência à tração do revestimento é realizada segundo as especificações da NBR 13528 (ABNT, 2010). Este método permite avaliar se a resistência de aderência do revestimento se encontra acima dos parâmetros especificados pela Norma NBR 13749 (ABNT, 2013) (os limites inferiores variam entre 0,2 e 0,3 MPa, dependendo do local e do tipo de acabamento do sistema de vedação vertical), antes e após a conclusão dos ciclos do ensaio acelerado, e também estimar a perda de aderência ao longo do ensaio. Entretanto, como a resistência de aderência é influenciada por diversos fatores, como as características da argamassa, as características do substrato utilizado e as condições de aplicação de revestimento (como a energia de aplicação e as condições de evaporação de água), é comum que ocorra uma elevada dispersão de resultados, que segundo Carasek (2012) varia entre 10% e 60%. A autora considera aceitáveis ensaios cujo coeficiente de variação seja igual ou inferior a 25%. Esta elevada variação dos resultados muitas vezes impede uma análise conclusiva sobre o comportamento do revestimento.

A NBR 13528 (ABNT, 2010) também especifica que a forma de ruptura em cada ensaio de arrancamento seja identificada, considerando que rupturas do tipo coesiva (ocorridas no interior da argamassa ou do substrato) são as mais desejáveis, em detrimento de rupturas do tipo adesiva (em interfaces do sistema), que estão associadas a maior risco de manifestações patológicas. A forma de ruptura de cada teste de arrancamento pode ser identificada por meio de fotografia digital de alta resolução, separação da imagem por escalas de cores e contagem de pixels.

d. Avaliação do volume de vazios na argamassa.

A determinação do volume de vazios existentes na argamassa de revestimento pode ser realizada a partir de diversos métodos, sendo mais comum a imersão em água. É preciso extrair testemunhos do sistema composto pelo revestimento aplicado sobre a base de cerâmica vermelha, por meio de corte com serra circular ou serra copo, realizar o corte transversal destas amostras, e posteriormente determinar a quantidade de vazios existente. Um método que oferece mais informações é o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, que determina a distribuição de poros dos exemplares (discutida no item 2.3). Outra forma de se realizar esta

avaliação é pela estimativa de volume de poros em seções transversais a partir de análise de imagens digitais de alta resolução, com posterior separação da imagem por escalas de cores e contagem de pixels.

Um método indireto para estimar a variação do volume de vazios é a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, que permite determinar o aumento da porosidade do revestimento em função do aparecimento de fissuras. Segundo Silva, Ferreira e Dias (2013), o método de propagação de ondas ultrassônicas atualmente é o método não destrutivo mais utilizado na engenharia, com frequências que variam de 20 até 150 kHz, devido a facilidades de aplicação e operacionalidade como o emprego de aparelhos portáteis. Lafhaj *et al.* (2005) explicam que o ultrassom pode ser utilizado eficazmente para investigar de algumas propriedades em concretos, incluindo durabilidade. O estudo dos autores investigou a relação entre parâmetros ultrassônicos, porosidade e permeabilidade de amostras de argamassas confeccionadas em forma cilíndrica com diâmetro de 37 mm e altura de 10 mm, produzidas com 7 diferentes relações a/c (0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55 e 0,6). As amostras inicialmente submetidas à cura saturada (28 dias em solução água/cal) foram acondicionadas a 60 °C por períodos de tempo determinados. Esse método de secagem permitiu a obtenção de três condições de saturação: Saturação total (ST), quando o teor de água é mais do que 85% da amostra totalmente saturados, saturação parcial (SP) quando está entre 45 e 55% e seca (S) quando a saturação é inferior a 10%. Posteriormente os autores submeteram as amostras a três análises de laboratório: espectroscopia de ultrassom de banda larga, porosidade e permeabilidade a gás. A técnica de ultrassom foi aplicada no modo de pulso-eco em uma faixa de frequências de 0,5 a 1 MHz, utilizando um amplificador de sinal (pulser-receiver Panametrics 5055), e um osciloscópio digital ligado em um PC. Para o acoplamento foi utilizada uma placa de 10 mm de Plexiglas com finas camadas de acoplantes nas interfaces. A avaliação por ultrassom demonstrou que a velocidade da onda é afetada tanto pela porosidade como pelo teor de água, dessa forma, a velocidade de ambas as ondas (longitudinal e transversal) aumentaram com o aumento no teor de água. Em comparação com o material seco, a presença de água no interior dos poros no material saturado proporciona rigidez adicional (Lafhaj *et al.*, 2005). Contudo, os autores ressaltam que a permeabilidade não depende apenas da porosidade, mas também da irregularidade, da superfície específica, da distribuição de poros, do tamanho dos poros e da conectividade da rede de poros das amostras. A relação encontrada entre os valores de atenuação do ultrassom e a porosidade das amostras podem ser visualizados na Figura 13.

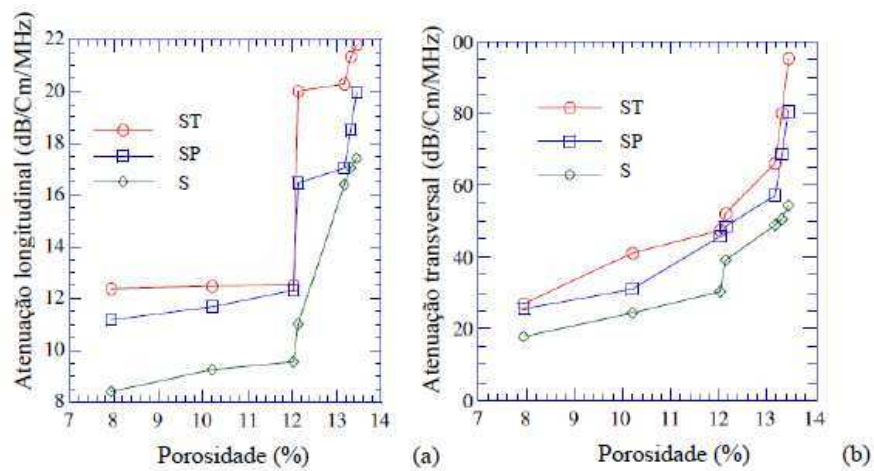


Figura 13 - Variação da atenuação versus porosidade. Saturação total (ST), saturação parcial (SP) e seca (S). Onda longitudinal (a) e onda transversal (b).

Fonte: Lafhaj *et al.* (2005)

Segundo Soltani *et al.* (2013) parâmetros ultrassônicos são sensíveis à porosidade, porque a porosidade influencia o módulo de elasticidade, que por sua vez determina os parâmetros ultrassônicos, como a velocidade da onda testaram pastas de cimento. O autor realizou um experimento com 5 relações a/c (0,3; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7) (Figura 14). Após cura na condição saturada por 28 dias foram secas em estufa a 60 °C para até atingirem quatro condições de saturação de água (saturado, 70%, 30% e seco). Para a avaliação da porosidade por ultrassom foram adotadas frequências de ondas de 200 ou 350 kHz. Nas amostras com saturação parcial houve uma diminuição da velocidade com o aumento da porosidade. Nas amostras com 70% de saturação, a velocidade diminuiu em 36 e 35% para os transmissores de 200 e 350 kHz respectivamente em um aumento de porosidade de 23 para 45%. Nas amostras completamente saturadas e no estado seco ocorreu um inicial aumento da velocidade OR para os valores de porosidades mais baixos, seguido por uma redução.

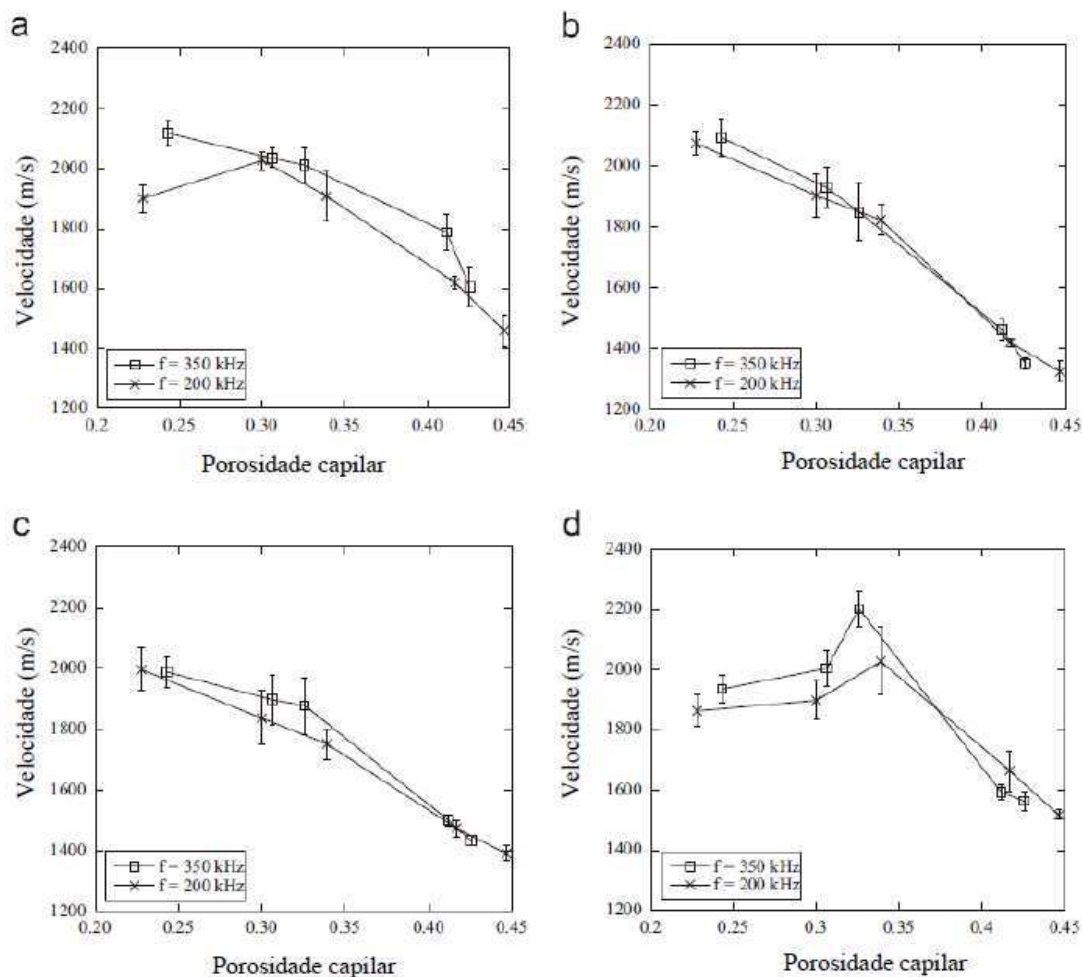


Figura 14 – Velocidade de onda Rayleigh (RW) versus porosidade em pasta de cimento completamente saturada (a), 70 % saturada (b), 30 % saturada (c) e seca (d).

Fonte: Soltani *et al.* (2013)

e. Determinação da dureza superficial por meio de durômetro e esclerômetro.

A determinação da dureza superficial tem o objetivo de verificar alterações de dureza decorrentes do processo de deterioração do revestimento devido aos ciclos térmicos. Estima-se que ocorra uma diminuição gradativa da dureza superficial do revestimento submetido ao ensaio de envelhecimento acelerado, embora em algumas situações seja possível ocorrer o inverso, em consequência de carbonatação ou de hidratação da parcela de aglomerantes não hidratados por ocasião do início dos ensaios.

Segundo Silva, Ferreira e Dias (2013), ensaios não destrutivos como o de esclerometria tem se considerado como de importância para inspeções e investigações de laboratório. Entretanto, os

autores afirmam que apesar das tendências de comportamento constatadas nos resultados obtidos com este equipamento é difícil se obter uma interpretação precisa dos resultados, possivelmente em virtude da sensibilidade do equipamento diante da heterogeneidade das amostras.

Outro método utilizado para a avaliação da dureza superficial está descrito na ASTM D 2240-5, e consiste na determinação da dureza superficial do revestimento com Durômetro Shore.

Lino (2013) avaliou a superfície do revestimento de argamassa cimentícias de 2 paredes, uma voltada para o norte e outra para o sul, expostas ao tempo 3 anos, utilizando como métodos de ensaio ultrassom, choque de esfera e esclerômetro Schmidt tipo L (Figura 15 e Figura 16). Os resultados encontrados para as avaliações das respectivas paredes foram 2010-2200, 1070-1180, e 900-980 m/s e 13,6; 15,8 e 15,6 mm para ultrassom e choque de esfera respectivamente, no entanto, para as leituras com esclerômetro Schmidt tipo L os resultados foram de 73 a 77 e com o durômetro Vickers variaram entre 28 e 33.

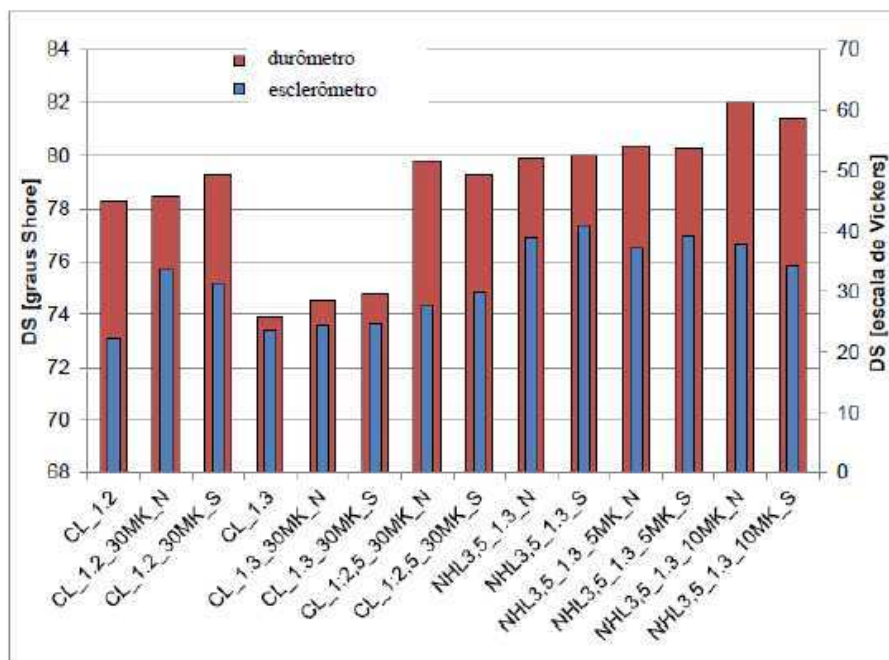


Figura 15 - Resistência superficial com esclerômetro e durômetro, aos 180 dias

Fonte: Lino (2013)

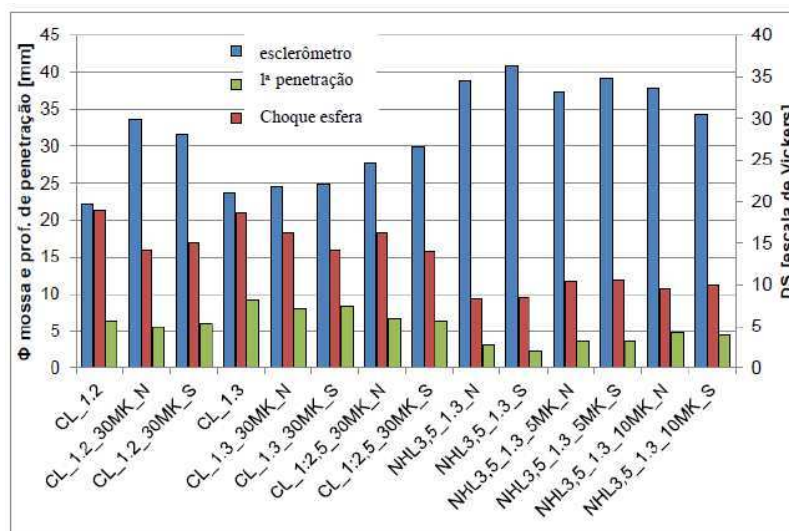


Figura 16 - Resistência superficial com choque de esfera, penetração controlada e esclerômetro, aos 180 dias

Fonte: Lino (2013)

A variação nos resultados encontrados pelo autor, para um mesmo revestimento por diferentes métodos de ensaio, evidencia a necessidade de uma avaliação comparativa com a esclerometria para uma clara interpretação do comportamento superficial de um revestimento. Entretanto, Alves, Carasek e Cascudo (2010) consideram que o ensaio por esclerômetro de pêndulo permite a avaliação de revestimentos de argamassa com composições distintas, mas não é eficiente para determinar variações de umidade.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

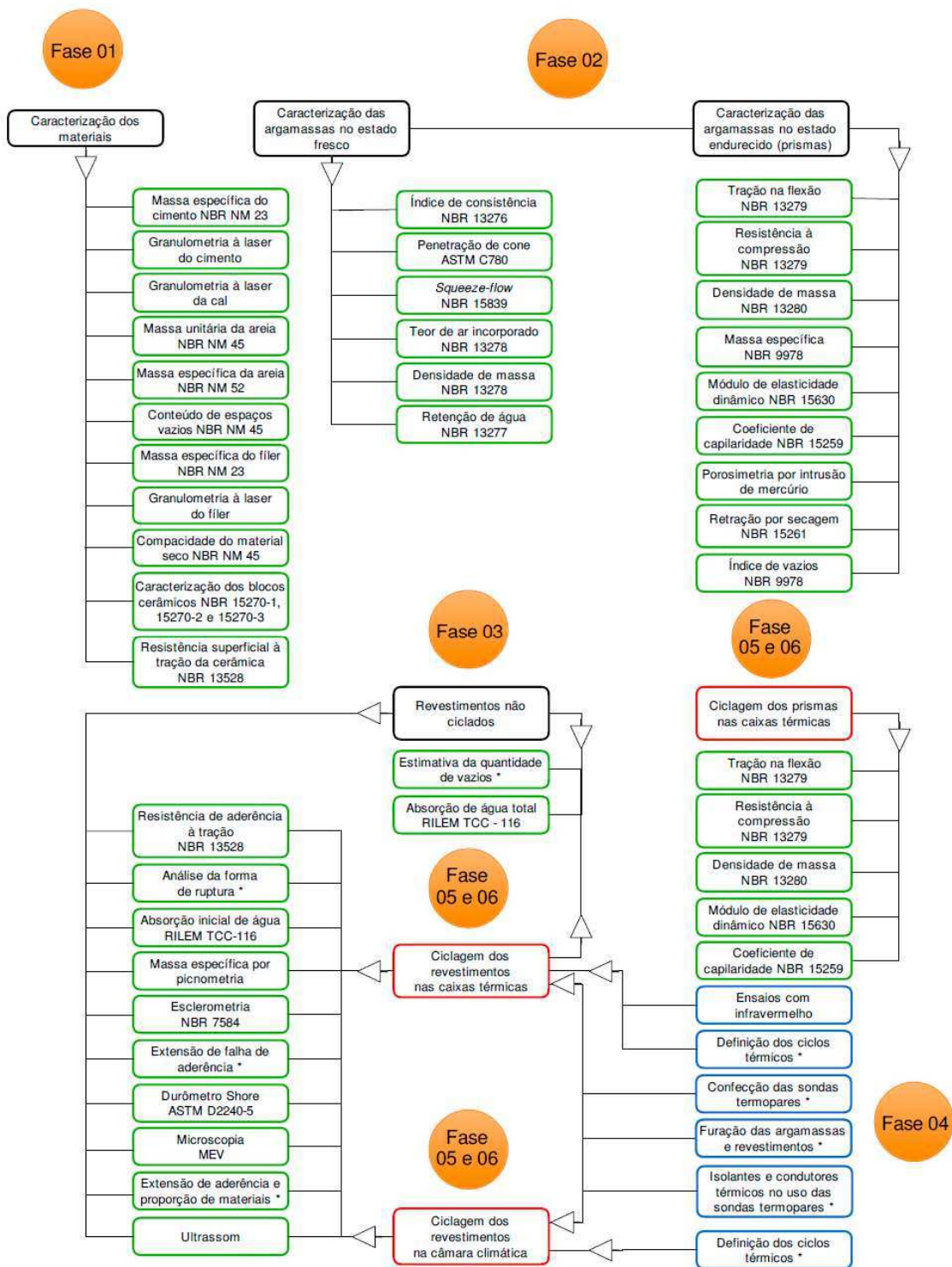
Neste capítulo será apresentada a metodologia experimental desenvolvida para este estudo. Seu objetivo foi avaliar o desempenho de revestimentos de argamassa submetidos a envelhecimento acelerado em dois processos: Câmara climática e painel radiante, por meio de diversos ensaios de caracterização. O método de ensaio por painel radiante seguiu as especificações da norma ABNT NBR 15575-4, com a adoção de 40 ciclos (e não apenas 10 ciclos, como especificado pela norma). O método de envelhecimento acelerado por câmara climática foi desenvolvido neste trabalho e será detalhado no item seguinte, onde são especificados os patamares de temperatura utilizados, os tempos de duração de cada ciclo e o número de ciclos de exposições aos choques térmicos.

Para os ensaios, foram utilizados quatro tipos de revestimento, obtidos a partir de um traço de argamassa onde foram adicionados quatro diferentes teores de fíler de agregado proveniente da moagem de concreto (ARC). São grandes as variações possíveis na quantidade de fíler dos agregados miúdos utilizáveis, com essa variação na proporção de fíler se pretende cobrir faixas de granulometrias de areias que possuem diferentes quantidades de grãos < 0,075mm. Esses agregados oriundos da cominuição de concreto produziram amostras de 4 argamassas diferentes e possibilitaram uma maior gama de comparações com resultados produzidos por outros estudos.

Foram realizados ensaios de caracterização na matéria prima e nas argamassas (no estado fresco e no estado endurecido), nos blocos cerâmicos e nos revestimentos de argamassa. Posteriormente foram executados os ensaios térmicos pilotos, os ensaios térmicos de exposição e os ensaios de caracterização do revestimento de argamassa após a exposição térmica.

3.1 PROGRAMA DO EXPERIMENTO

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Construção (LC), no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC), no Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (itt FUSE), no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital (LASERCA), no Laboratório de Usinagem, no Laboratório de Valorização de Materiais (LVMC) e no Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (itt FÓSSIL), dentro do campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos que fizeram parte desta pesquisa, detalhando as fases experimentais adotadas. Na Figura 17 é apresentado um organograma das atividades realizadas.



*Procedimentos desenvolvidos para esse programa experimental

Figura 17 - Organograma do programa experimental

Fase 1 - foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais e componentes a serem utilizados;

Fase 2 - foram realizados os ensaios para análise das propriedades das argamassas de revestimento nos estados fresco e endurecido;

Fase 3 - foram realizados os ensaios de caracterização dos sistemas de revestimentos aplicados sobre os substratos cerâmicos;

Fase 4 - foram realizados os ensaios-pilotos, determinantes para a elaboração do modelo do processo de ciclagem térmica no método de câmara climática e das caixas térmicas;

Fase 5 - foram realizados os ensaios de exposição aos choques térmicos de todas os revestimentos e das argamassas no estado endurecido (prismas) através da execução de sucessivos ciclos térmicos;

Fase 6 - foram avaliadas as propriedades das argamassas e revestimentos submetidas ao envelhecimento, por meio dos ensaios selecionados para este fim e realizando uma comparação entre os desempenhos dos quatro tipos de revestimentos utilizados e da eficiência dos dois métodos de ensaio de envelhecimento.

3.1.1 Fatores e níveis de controle

A fim de contemplar os objetivos deste programa experimental, foram empregados fatores fixos, fatores variáveis e variáveis de resposta.

3.1.2 Fatores fixos

- Tipo de substrato;
- Tipos de aglomerantes e agregados;
- Granulometria dos agregados;
- Traço do chapisco: 1:3;
- Traço da argamassa de revestimento: 1:1:6;
- Relação água/cimento nas argamassas de chapisco e de revestimento;
- Índice de consistência das argamassas;
- Método de produção do chapisco e da argamassa;
- Forma de aplicação do chapisco;
- Forma de aplicação da argamassa de revestimento;

- Processo de cura do chapisco e da argamassa.

3.1.3 Fatores variáveis

- 4 diferentes teores de fíler para a composição da areia, resultando em 4 argamassas com diferentes propriedades;

- 2 formas de ciclagem térmica: variação de temperatura ambiente (câmara climática) e aquecimento por irradiação e resfriamento com água (painel radiante);

O resultado desse processo levou à observação do comportamento de 4 argamassas diferentes, produzidas com fíler de ARC, a partir de duas formas de ciclagens térmicas distintas.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Aglomerantes

Os aglomerantes utilizados neste trabalho são o cimento Portland CP II-F-32 e a cal hidratada CH I. Optou-se pelo uso do cimento Portland CP II-F, por adotar como adição o fíler calcário em pequena quantidade, ser facilmente encontrado e de ampla utilização no estado do Rio Grande do Sul. Para um maior controle de suas propriedades o cimento foi adquirido de um único lote. Para a massa específica do cimento encontrou-se $2,91 \text{ g/cm}^3$, a partir de ensaios executados segundo as recomendações da NBR NM 23(ABNT, 2000). A granulometria do referido cimento segue abaixo (Figura 18) e sua respectiva caracterização de grãos na (Tabela 6). Todas as análises de difração a laser desse estudo foram realizadas no LCVMat da UNISINOS com o equipamento Microtrac S3500 e com o uso de um dispersante álcool isopropílico.

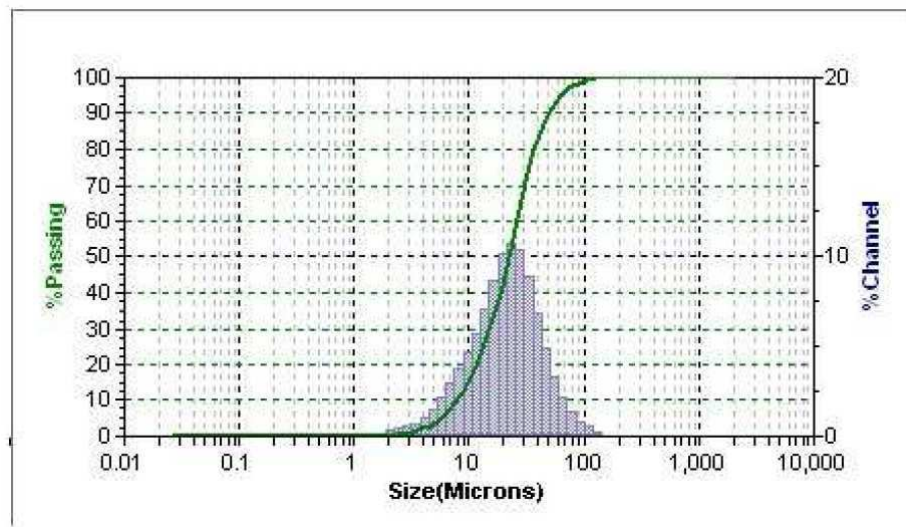


Figura 18 - Granulometria do cimento CII F-32

Tabela 6 - Caracterização dos grãos CII F-32

Grãos passantes (%)	10	50	90
Tamanho máximo (µm)	7,88	22,06	49,10

Selecionou-se a cal hidratada CH I para compor as argamassas deste trabalho devido à sua pureza. A cal foi adquirida em sacos de 20 kg, de um único lote e sua caracterização segue abaixo (Tabela 7).

Tabela 7 - Características da Cal CH-I

Característica	UN	Resultado
PF	%	21,00
RI + SiO ₂	%	3,20
MgO	%	30,30
H ₂ O combinada	%	17,00
CO ₂	%	4,00
CO ₃ residual	%	9,09
(CaO + MgO) não hidratada	%	21,17
CaO disponível	%	35,80
Densidade aparente	g/cm ³	0,523
# 200 (0,075mm)	%	2,60

Fonte: o fabricante

A cal foi utilizada na forma de pasta, para isso, o método previu a mistura da cal com água com no mínimo 24 horas de antecedência a sua utilização na produção das argamassas. Esse processo tem o objetivo de garantir a adsorção de água pela cal, e que a quantidade de água para a mistura se mantivesse a mesma ao longo de todas as produções de pasta (o teor de água médio obtido pela secagem em estufa foi de 38,1%). Na sequência é apresentada a granulometria da cal (Figura 19) e a caracterização dos grãos na Tabela 8.

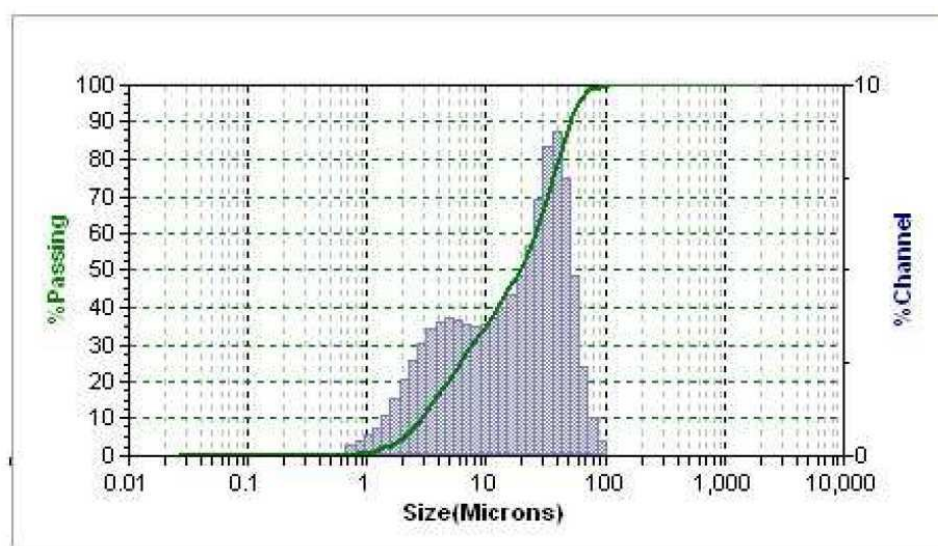


Figura 19 - Granulometria Cal CH-I

Tabela 8 - Caracterização dimensional da Cal CH-I

Grãos passantes (%)	10	50	90
Tamanho máximo (µm)	2,87	18,97	50,55

3.2.2 Aditivo plastificante

Tabela 9 - Características do aditivo plastificante

Teste	Método BASF	Método BASF	Unidade
Aparência	TM 761 B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112 B	5 - 7	-
Densidade	TM 103 B	1,067 - 1,107	g/cm ³
Sólidos	TM 613 B	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cps

Fonte: O fabricante

O aditivo plastificante GLENIUM[®] 51 foi utilizado por Westerholm *et al.* (2008) e Sato *et al.* (2013) com desempenho satisfatório. A escolha por esse tipo de aditivo baseia-se em sua eficiência em estudos realizados pelo Grupo de Pesquisa e por ele não incorporar ar. Suas características estão na Tabela 9.

3.2.3 Agregados

Foram utilizados como agregados uma areia natural de rio e de origem quartzosa, da região de Porto Alegre, rio Jacuí, na sua composição granulométrica natural.

Utilizaram-se os grãos de areia passantes na peneira 4,8 mm, que posteriormente foram lavados em água corrente até que o fluxo de água limpa indicasse a ausência de fíler. Segundo Westerholm *et al.* (2008) e Arnold (2011) a forma dos grãos pode influenciar as propriedades das argamassas de maneira significativa. Dessa forma procurou-se manter a

mesma natureza do material para a fração < 0,075 mm, utilizando-se filer de ARC em todas as argamassas.

As areias peneiradas e lavadas foram secas em estufa com temperatura de 100 ± 5 °C até que se constatasse constância de massa e conseqüentemente sem a presença umidade. Esta areia foi utilizada em todos os ensaios do experimento, e permaneceu armazenada em recipientes estanques (isolada da umidade do ambiente até o momento de sua efetiva utilização).

3.2.3.1 Caracterização do agregado natural

A massa unitária no estado solto foi determinada conforme os procedimentos da NM 45 (ABNT, 2006), esta e outras características do agregado constam na Tabela 11. Quanto à composição granulométrica, as areias foram submetidas ao processo de peneiramento utilizando as peneiras definidas na NBR NM 248 (ABNT, 2003), os resultados estão exibidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição granulométrica dos agregados miúdos

Peneira (mm) Série normal	Retida (%)	Acumulada (%)
2,4	17,9	17,9
1,2	18,3	36,2
0,6	15,5	51,7
0,3	17,3	68,9
0,15	15,5	84,5
Fundo	15,5	100,0
Módulo de finura		2,59

Tabela 11 - Caracterização dos agregados

Característica	Método	Resultado
Massa unitária no estado solto (g/cm^3)	NBR NM 45	1,55
Massa específica (g/cm^3)	NBR NM 52	2,54
Conteúdo de espaços vazios (%)	NBR NM 45	43,70

3.2.3.2 Obtenção do ARC

Foi utilizado filer proveniente da britagem de agregados reciclados de resíduos de concretos, empregados na produção de elementos pré-fabricados submetidos à cura térmica a vapor, com resistência de 37,0 MPa, fornecidos por uma empresa de pré-moldados de concreto da cidade de Porto Alegre/RS. Os resíduos de concreto foram beneficiados nos Laboratórios de Construção e no de materiais de Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, em quatro etapas:

- a) Cominuição do agregado, com martelo pneumático;
- b) Cominuição com britador de mandíbulas (Figura 20.a);
- c) Cominuição do agregado triturado no britador de rolo (Figura 20.b);

d) Peneiramento, através de agitador de peneiras, para a separação dos fíler;



Figura 20 - Britador de mandíbulas (a) e britador de rolo (b)

Para o processo de peneiramento, foi utilizado um agitador de peneiras da marca Kamacha, de dimensões de 500x500 mm com tempo de vibração de 10 min. Foram usadas as peneiras 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm. Após, o material passante na peneira 0,075 mm, foi seco em estufa na temperatura de (100 ± 5) °C e em seguida permaneceu armazenado em tonéis no LMC da UNISINOS, até o momento de sua utilização.

A massa específica do filer de ARC foi determinada conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2000), resultando em $2,37 \text{ g/cm}^3$. O valor é coerente com o encontrado por outros autores. Ledesma *et al.* (2014) utilizaram ARC com densidade de $2,2 \text{ g/cm}^3$ e Jiménez *et al.* (2013) utilizaram resíduo cerâmico com densidade de $2,14 \text{ g/cm}^3$ para a substituição de areia na produção de argamassas.

Para determinação da distribuição granulométrica das partículas do ARC, se utilizou o método de granulometria por difração a laser, com analisador de distribuição de tamanho de partículas (Figura 21). A partir desse método foi possível identificar os tamanhos médios das partículas do filer e suas respectivas distribuições de grãos (Tabela 12).

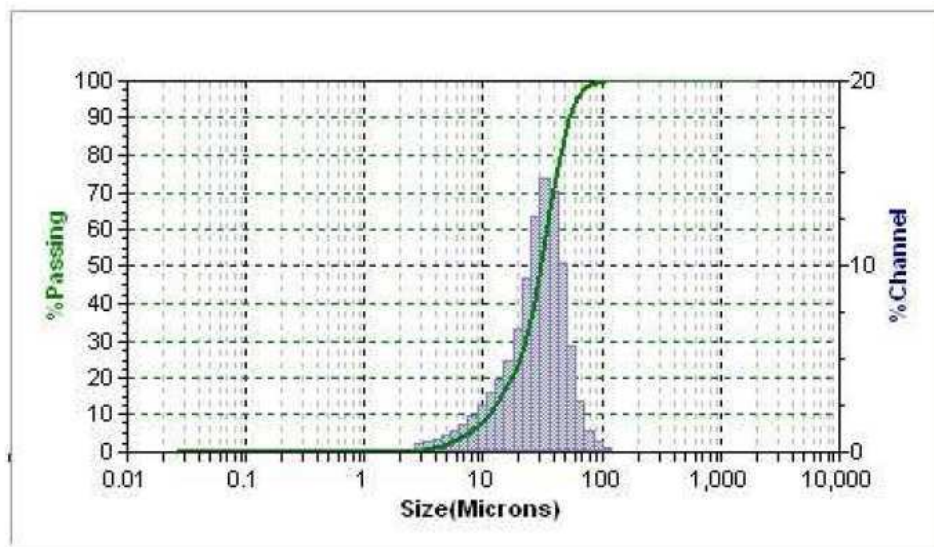


Figura 21 - Distribuição granulométrica a laser do filer

Tabela 12 - Caracterização dos grãos do filer

Grãos passantes (%)	10	50	90
Tamanho máximo (µm)	11,11	30,87	52,81

3.2.3.3 Massa unitária dos materiais secos

A determinação da massa unitária foi utilizada para a determinação do teor ideal de adição de finos, correspondente a maior compacidade de materiais secos. Também foi utilizada para justificar o desempenho da argamassa com propriedades do estado seco e do estado endurecido.

A partir de consecutivas intervenções na composição granulométrica dos grãos da mistura foi possível analisar as alterações que a adição de grãos menores, que nesse caso se dá pelo filer, produz no preenchimento dos vazios entre os grãos maiores e em que momento esse incremento tende a diminuir a compacidade da mistura. Foram efetuadas 5 repetições para cada mistura e os resultados desse ensaio estão expostos na Tabela 13. Utilizaram-se recipientes plásticos para o acondicionamento da mistura dos materiais secos utilizados em cada traço. Os materiais areia, cimento, filer e cal, foram depositados no recipiente plástico nessa ordem e em seguida foram colocados no interior de um jarro do moinho de bolas para que se fizesse a mistura, homogeneizada por um período de tempo de 20 min. O método adotado para a determinação da compacidade do material seguiu a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Tabela 13 - Compacidade do material seco

Fíler (%)	2	4,5	7	9,5
Massa unitária (g/cm ³)	1,846	1,847	1,850	1,837
Desv. padrão	4,194	2,735	3,057	5,364

Verifica-se que o acréscimo de fíler até o teor de 7% proporciona maior compacidade para os materiais utilizados na argamassa, e que a partir deste ponto o efeito benéfico da adição de fíler cessa, como pode se verificar no próximo teor de adição (9,5%), onde a compacidade diminui.

3.2.4 Água

A água utilizada para a produção das argamassas é a mesma fornecida pela rede pública da cidade de São Leopoldo-RS.

3.2.5 Blocos cerâmicos

Foram utilizados blocos cerâmicos nas dimensões de 140x190x290 mm, estes blocos foram obtidos em uma olaria localizada na região. Os blocos foram adquiridos já queimados, de uma empresa que fornece produtos normatizados para o mercado.

Os blocos foram submetidos a ensaios de caracterização, segundo as normas NBR 15270-1, 15270-2 e 15270-3 (ABNT, 2005). Os resultados dos ensaios executados se encontram na Tabela 14. Os blocos foram avaliados e as tolerâncias dimensionais foram alcançadas satisfatoriamente. Os blocos possuíam uma das faces estriada, e essa foi a escolhida para receber o revestimento. A escolha por blocos com paredes maciças se justifica pelas condições de homogeneidade da condutividade térmica ao longo do material nos ensaios de ciclagem (Figura 22).



Figura 22 - Amostra do bloco cerâmico

Tabela 14 - Características do componente cerâmico baseadas nas médias das amostragens

Características Geométricas			Características Físicas		Características Mecânicas	
Área da face (mm ²)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Planeza da face (mm)	Massa seca (g)	Índice de absorção de água (g/193,55cm ²)/min.	Resistência à compressão característica (MPa)	Resistência superficial à tração da cerâmica (MPa)
40109	1,96	2,19	7085,87	11,67	12,94	1,43

A determinação da resistência à tração é referente à superfície da face utilizada para a aplicação do chapisco, e conseqüentemente para a aplicação do revestimento. Uma pastilha foi colada na superfície da cerâmica e posteriormente após a cura da cola foi feito o arrancamento utilizando-se como referência a NBR 13528 (ABNT, 2010).

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Chapisco

A argamassa de chapisco foi produzida no traço de 1:3, em volume com areia passante na peneira de malha 4,8 mm e a aplicação foi feita de forma manual por um profissional experiente, que analisou a trabalhabilidade da misturada e chegou-se a relação a/c (água/cimento) de 1,09 adotada para todas as produções. O chapisco foi curado pelo prazo de 72 h em ambiente de laboratório, sendo que após esse prazo foi aplicado o revestimento de argamassa. Após o período de cura também foi realizada a determinação da resistência de aderência à tração conforme recomendações da NBR 13528 (ABNT, 2010). A resistência média de 0,75 MPa foi determinada a partir do arrancamento de 18 exemplares.

3.3.2 Produção da argamassa

3.3.2.1 Ajuste dos traços

As argamassas foram produzidas no traço em volume em cimento, cal e areia, 1:1:6, com adição de filer em percentual sobre a massa da areia. Com exceção do traço de referência, os demais traços tiveram a quantidade de água fixa e a trabalhabilidade se manteve através da dosagem de aditivo a base de policarboxilato.

3.3.2.2 Processo de mistura

As argamassas utilizadas para as determinações e caracterizações foram produzidas em argamassadeira de bancada (Figura 23.a) e para a confecção dos revestimentos, que exigiam uma produção maior de argamassa, em uma argamassadeira de eixo horizontal (Figura 23.b). Foram estabelecidas as quantidades de materiais (Tabela 15) e se mantiveram para qualquer

produção efetuada nesse estudo, apenas com o aumento em proporção para a argamassadeira de eixo horizontal.

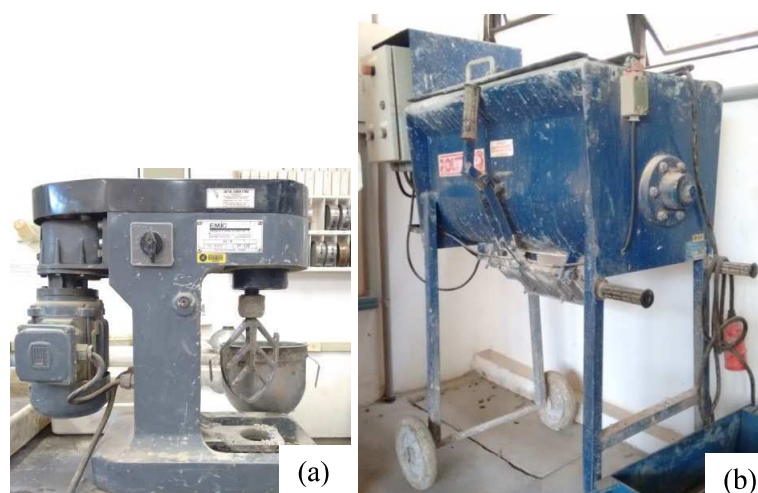


Figura 23 - Argamassadeira de bancada (a) e argamassadeira de eixo horizontal (b)

Ficaram estabelecidas para ambas as formas de produção a sequência e o tempo de mistura dos materiais e assim foram mantidos em todas as dosagens. Por possuir tamanho de grão menor se comparados com os grãos da areia o fíler foi misturado previamente com o cimento, em todas as produções. O processo de mistura foi executado em velocidade baixa e teve início com a areia, pasta de cal e a água no interior da betoneira. Após ter sido acionada permanece pelo tempo de 2 min, após esse prazo se interrompe o processo por 30 s para que sejam raspados quaisquer materiais que eventualmente possam ter aderido nas partes da argamassadeira e novamente é acionada para a adição da mistura de cimento com o fíler que acontece dentro do primeiro minuto seguinte. Após é adicionado o aditivo e a betoneira continua ligada por mais 4 minutos.

Tabela 15 – Massas dos materiais utilizados nas misturas das argamassas e as relações de água

Material (g) / Teor de fíler	2%	4,5%	7%	9,5%
Cimento	1	1	1	1
Cal em pasta	1,153	1,153	1,153	1,153
Areia	9,298	9,298	9,298	9,298
Fíler	0,186	0,418	0,651	0,883
Água adicionada*	1,298	1,298	1,298	1,298
Aditivo	-	0,0002	0,0005	0,0015
Água/cimento**	1,737	1,737	1,737	1,737
Água /material seco**	0,155	0,152	0,149	0,146
Água total**	1,737	1,737	1,737	1,737

* Referente à água misturada no momento da mistura

**Incluí também a água da pasta de cal

3.3.3 Ensaios das argamassas no estado fresco

Utilizou-se a NBR 13277 (ABNT, 2005) como referência para a moldagem e para os ensaios das argamassas. Para cada mistura foram realizadas pelo menos três repetições de cada ensaio.

3.3.3.1 Índice de consistência por espalhamento e por penetração de cone

A quantidade de água da argamassa com 2% de fíler foi ajustada para que se obtivesse uma consistência de (260 ± 5) mm logo após a mistura. A partir do resultado encontrado para a quantidade de água nesse ensaio, a quantidade de água foi fixada para todas as outras argamassas. As argamassas foram moldadas em sala climatizada com temperatura de (23 ± 2) °C e umidade de (60 ± 10) %. O ensaio de índice de consistência seguiu os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2005). A penetração de cone conforme a Norma ASTM C780 (2010) também foi utilizada para a observação das possíveis variações de comportamento entre essas argamassas.

Houve aumento da demanda de água na medida em que se aumentou o teor de fíler, sendo assim, para que se mantivesse a quantidade de água fixa conforme a determinação inicial, a correção da trabalhabilidade foi obtida com o progressivo aumento no teor do aditivo plastificante (Figura 24). Em todas as misturas, o aditivo plastificante GLENIUM® 51 apresentou eficiência para que a argamassa atingisse o índice de consistência desejado. Os resultados estão coerentes com as observações de Westerholm *et al.* (2008).

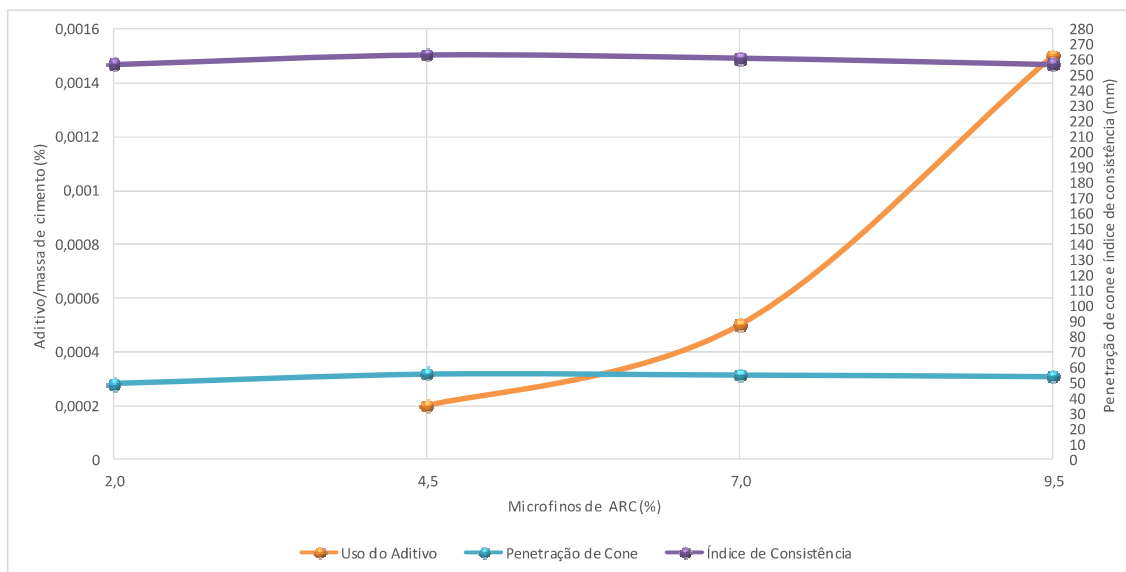


Figura 24 - Trabalhabilidade em função do uso de aditivo

A argamassa com o maior teor de fíler (9,5 %) utilizou a maior quantidade de aditivo para atingir o resultado determinado para o índice de consistência e para o ensaio de penetração de cone, portanto, demonstra a pior trabalhabilidade entre todas as argamassas testadas.

3.3.3.2 *Squeeze - flow*

O método foi utilizado para a avaliação da trabalhabilidade da argamassa, por ser capaz de detectar com uma boa precisão as alterações nas características reológicas do material. O método de ensaio ocorreu de acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010).

O ensaio foi executado em duas velocidades de aplicação: 3 mm/s e 0,1 mm/s. O tempo decorrido desde o término do preparo da argamassa até o início efetivo da compressão foi de 10 min para a velocidade de 3 mm/s (Figura 26) e de 15 min para a de 0,1 mm/s (Figura 25).

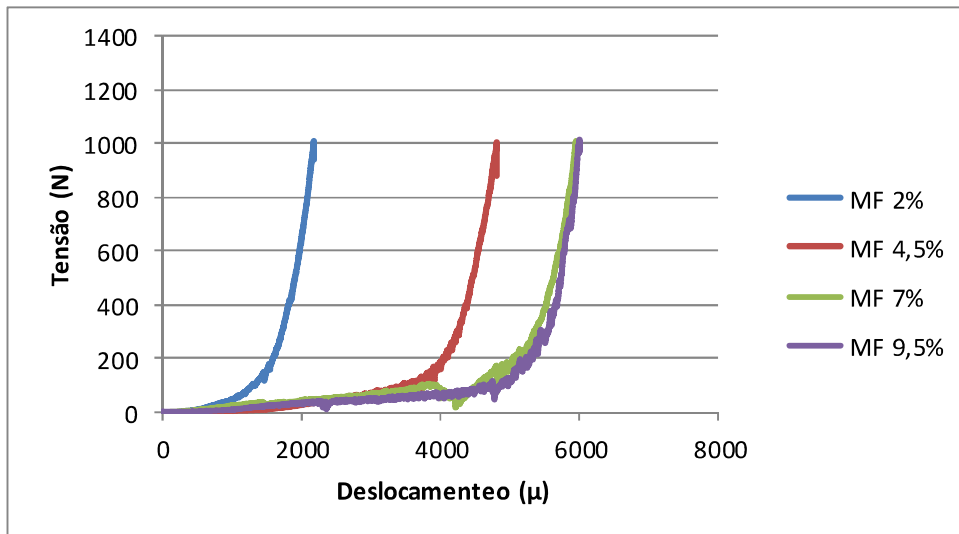


Figura 25 - Curva de tensão X deslocamento ($v=0,1\text{mm/s}$)

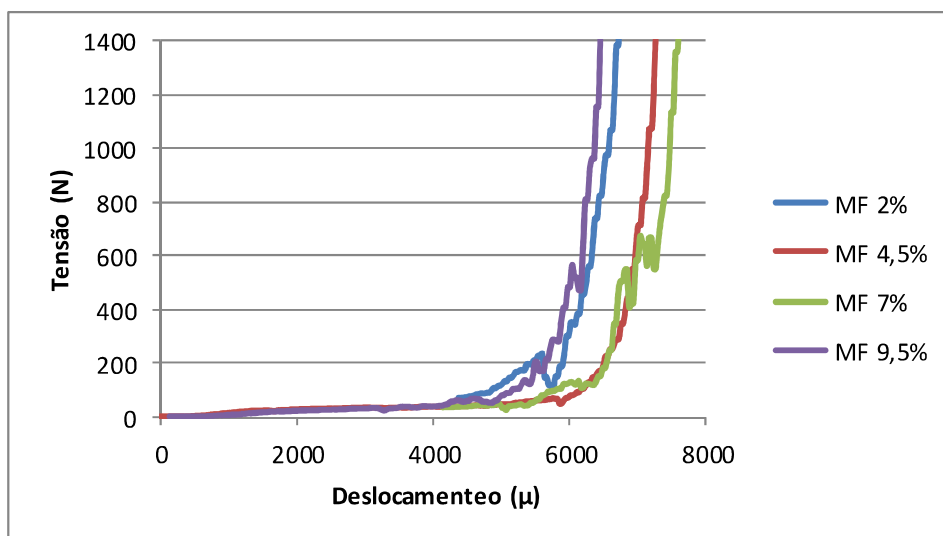


Figura 26 - Curva de tensão X deslocamento ($v=3\text{mm/s}$)

Comparando os resultados dos ensaios de índice de consistência e de penetração de cone pode-se observar que o comportamento entre as argamassas é quase constante (Figura 24). No entanto, a partir do ensaio de *squeeze-flow* (Figura 25), é possível identificar diferenças de trabalhabilidade entre as argamassas. A maior diferença de deformação em função do acréscimo no teor de fíler, que ocorre entre o teor de 2% e 4,5%, registrado no ensaio a 0,1 mm/s também foi observado no ensaio de penetração de cone.

Observa-se que houve um aumento gradativo da trabalhabilidade das argamassas a partir do aumento do teor de fíler, porém em um comparativo entre as duas velocidades de aplicação da carga houve uma evidente mudança na tendência do comportamento da argamassa

produzida com o maior teor de fíler (9,5%). Essa argamassa não segue a tendência de comportamento para aumentar o deslocamento e mantém aquele atingido pela argamassa com 7% de fíler na velocidade de 0,1 mm/s (Figura 25). Essa diferença se acentua quando há um aumento na velocidade de aplicação da carga e em comparação com as demais, ela resulta em menor deslocamento na velocidade de aplicação de 3 mm/s (Figura 26). Essa observação conduz a conclusão de que o traço de 9,5% de fíler é excessivo e prejudica a movimentação relativa entre os grãos na mistura, o que já era previsto em função dos resultados do ensaio de compacidade (Tabela 13).

Embora seja observado diferenças na viscosidade plástica, exibidas nas descontinuidades das curvas das argamassas que contém 7 e 9,5% de fíler (Figura 25), depois ampliado para a argamassa com 2% de fíler (Figura 26), as tendências das curvas para todas as argamassas se mantém para as duas velocidades de aplicação. Os resultados estão coerentes com Westerholm *et al.* (2008) eles observam que a viscosidade é menos sensível que a tensão de escoamento e que a tensão demonstra significativas mudanças com a alteração da velocidade de aplicação da compressão.

Apesar da argamassa com 4,5% de fíler não conter o maior deslocamento pode reproduzir a melhor trabalhabilidade, produto da relação viscosidade/deslocamento, possivelmente ocasionado pelo teor de fíler associado à quantidade de água e aditivo utilizado na mistura. Embora a argamassa com 2% de fíler não contenha aditivo plastificante, o fluxo de material apresenta certa descontinuidade que é minorada no teor de 4,5%, esse resultado pode ser explicado pela influência do aumento de fíler nas características granulométricas que diminuíram os vazios e melhoraram a fluidez. De acordo com o ensaio de compacidade (Tabela 13) o menor desvio padrão associado a massa unitária da argamassa com teor de 4,5 % de fíler pode estar associado a um maior desempenho para essa mistura. Segundo Arnold (2011) pode ocorrer diferentes interações nas propriedades granulométricas, em função das proporções de fíler, e acarretarem mudanças nas propriedades das argamassas.

A partir dos resultados desse ensaio pode-se concluir também que o teor de 4,5% de fíler é o limite para significativos aumentos da tensão de escoamento. Westerholm *et al.* (2008) também encontrou limite para a incorporação de finos em seus estudos.

3.3.3.3 Teor de ar incorporado

O ensaio Pressométrico foi adotado para medir a quantidade de ar aprisionado, em amostras das argamassas de cada mistura. O ensaio ocorreu em ambiente de laboratório no Laboratório de Material de construção (LMC), da UNISINOS conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005). Nos resultados da Tabela 16 fica evidenciado o acréscimo de ar incorporado.

Tabela 16 – Teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco

Fíler (%)	2	4,5	7	9,5
Teor de ar (%)	4,8	5,5	6,4	7,0
Densidade (g/cm ³)	2088,8	2033,3	2008,4	1961,3

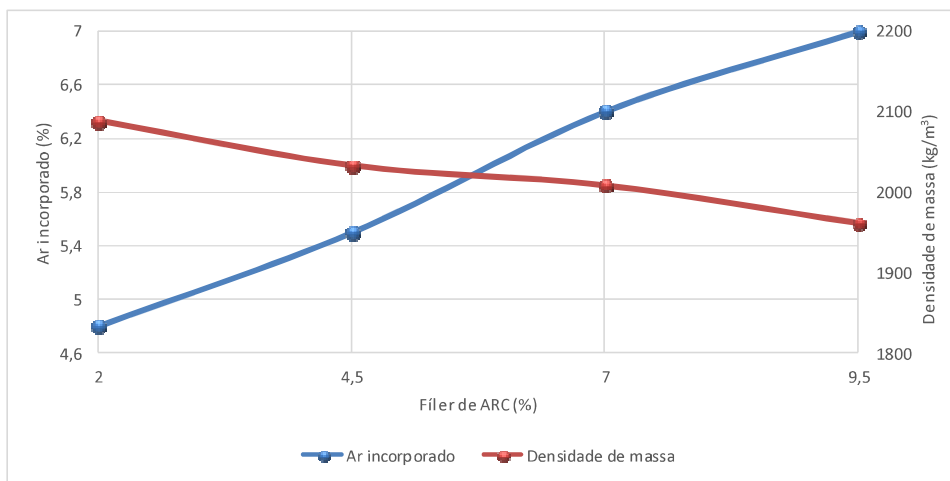


Figura 27 - Ar incorporado x Densidade de massa

Os resultados estão coerentes com as observações de Angelim R., Angelim C. e Carasek (2003). Os autores encontraram aumentos no teor de ar incorporado, que foram relacionados com o aumento do módulo de finura e com o aumento do teor de fíler.

Segundo Bauer *et al.* (2012), o acréscimo de ar incorporado em argamassas na ordem de 1,5 % já causam diferenças no comportamento do regime de movimentação de água de revestimentos no estado fresco, portanto, é possível que para as diferenças de 1,6 % entre as argamassas com 2 e 7 % de fíler e de 2,2 % entre as argamassa com 2 e 9,5 % de fíler sejam significativas para que diferenças no regime de movimentação de água ocasione diferenças de comportamento nos revestimentos.

3.3.3.4 Composição das argamassas no estado fresco

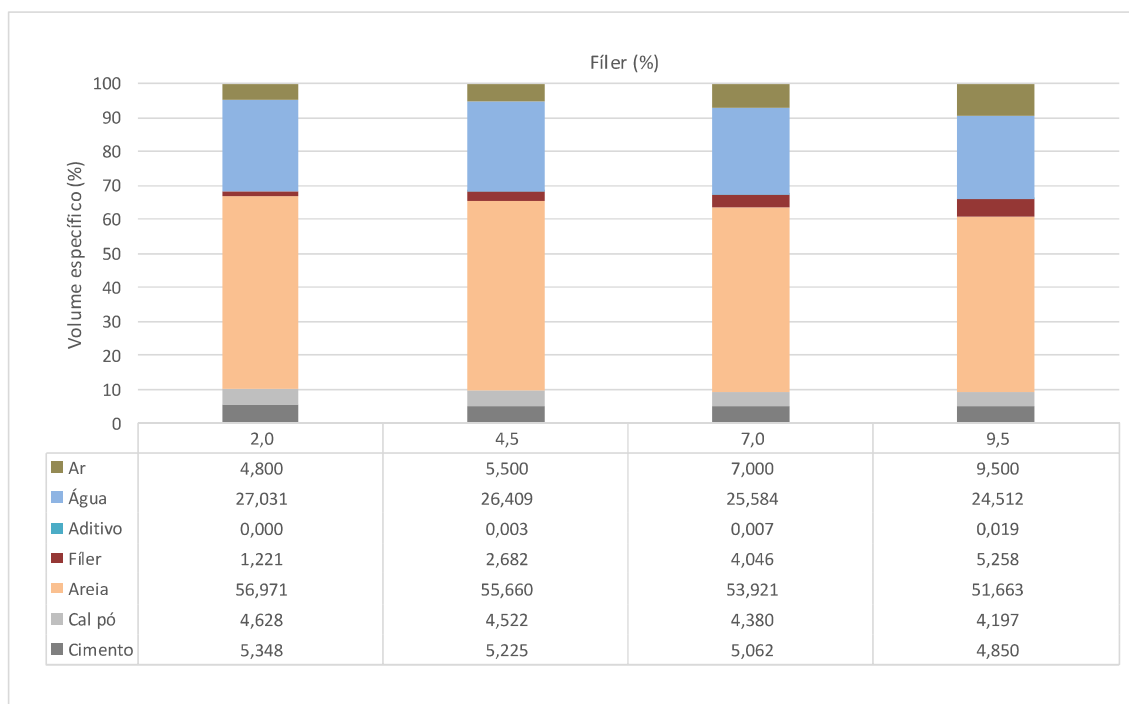


Figura 28 - Volume dos materiais (%) que compõem as argamassas

O gráfico da Figura 28 mostra o incremento no volume das pastas das argamassas na medida em que se adicionam maiores teores de fíler e também demonstra a contribuição do teor de ar incorporado nesse aumento de volume. Apesar de haver diferenças de comportamento entre as argamassas no ensaio de *squeeze-flow*, o agrupamento nos valores de deformação a 3 mm/s indicam que o aumento no volume da pasta atenuou as diferenças causadas pelo acréscimo de fíler.

Segundo Kim *et al.* (2003) o aumento no volume de agregado é um dos fatores que afeta e aumenta a condutividade térmica. Muito embora haja um acréscimo de fíler de até 9,5% em relação a areia, o aumento no teor de ar incorporado e aditivo também deve ser considerado.

De acordo com os resultados do ensaio de massa unitária dos materiais secos, o aumento no teor de fíler para 9,5 % prejudicou a compactidade, conforme visto no ensaio de *squeeze-flow* que mostrou redução no fluxo de material. Embora tenha havido nessa argamassa a maior incorporação de ar no estado fresco, os resultados indicam que o efeito não foi suficiente para evitar o atrito excessivo entre as partículas, sendo assim, houve perda da capacidade de deslocamento sob a ação de tensões.

3.3.3.5 Densidade de massa

Nesse estudo foi utilizada a NBR 13278 (ABNT, 2005) como referência para a execução dos ensaios, seus resultados estão expressos na Tabela 16.

Observa-se uma diminuição crescente da densidade de massa com o aumento do teor de filer. O resultado é justificado pelo aumento no teor de ar incorporado, que supera o aumento de massa decorrente da adição do filer. Essa relação é exposta no gráfico da Figura 27. Os resultados encontrados estão coerentes com aqueles observados por Jiménez *et al.* (2013) e Ledesma *et al.* (2014), que também identificaram uma diminuição da densidade a medida em que se aumentava o teor de substituição de RCD.

3.3.3.6 Retenção de água no estado fresco

O ensaio seguiu o estabelecido na NBR 13277 (ABNT, 2005) e os resultados apontam elevada retenção de água para todas as argamassas testadas (Figura 29), o que pode auxiliar a cura dos revestimentos e diminuir a retração por secagem. Deve-se considerar, entretanto, que quando a argamassa é aplicada sobre um substrato este irá exercer absorção de água sobre a argamassa, e a movimentação de água irá ser alterada. Bauer *et al.* (2012) não conseguiram associar o transporte de água do revestimento à retenção de água da argamassa, e ressaltam que a tensão de sucção originária do bloco de alvenaria tende a ser diferente daquela empregada nesse ensaio.

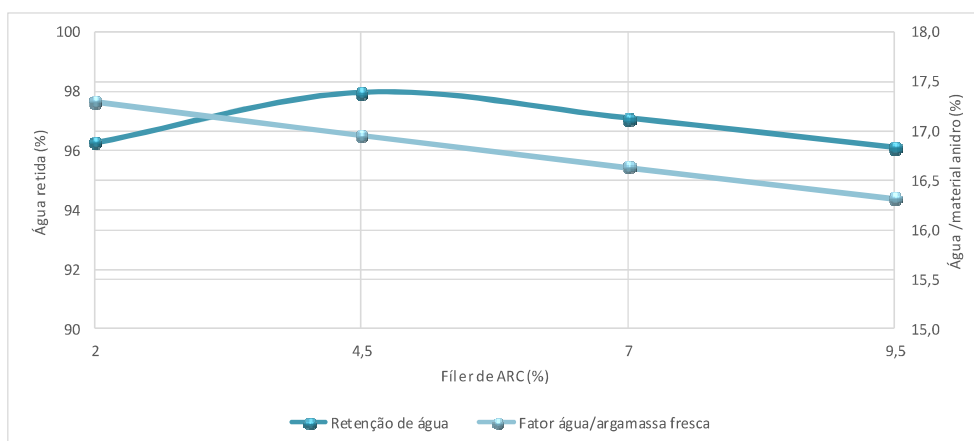


Figura 29 - Retenção de água X água total

3.3.4 Ensaio das argamassas no estado endurecido

A investigação das propriedades de resistência mecânica é justificada por estar relacionada com várias outras propriedades que conferem resistência para a argamassa suportar diferentes tensões. Essas tensões podem ocorrer a partir de variações dimensionais causadas

por dilatações ou contrações que são provocadas por variações de temperatura, quando o revestimento é exposto a variações climáticas. Os resultados dos ensaios de resistência de tração na flexão, resistência à compressão, densidade de massa, módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de capilaridade se encontram na Tabela 17.

Tabela 17 - Características das argamassas no estado endurecido

Teor Fíler (%)	Tração na flexão (MPa) NBR 13279:2005	Resistência à compressão (MPa) NBR 13279:2005	Densidade de massa aparente (kg/m³) NBR 13280:2005	Massa específica (g/cm³) NBR 9778:2005	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) NBR 15630:2009	Coeficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2}) NBR 15259:2005	Índice de vazios (%) NBR 9778:2005
2	2,407	7,540	1915	2,46	14,571	0,437	23,87
4,5	2,402	7,467	1881	2,40	13,687	0,376	24,99
7	2,355	7,481	1864	2,41	13,731	0,323	25,46
9,5	2,297	6,981	1864	2,38	12,960	0,313	26,52

Todas as argamassas foram desmoldadas vinte e quatro horas após a moldagem e permaneceram em ambiente de laboratório com umidade e temperatura controladas por vinte e oito dias. Após esse prazo, um lote foi destinado à execução dos ensaios do estado endurecido na condição de temperatura de 23±2 °C e umidade relativa (UR) de 60±10 % conforme definições das normas técnicas adotadas, outro lote foi seco em estufa em temperatura de (100±5) °C para a execução de ensaios do estado endurecido que determinam secagem a essa temperatura e um último lote foi colocado em estufa à temperatura de (60±5) °C até a constância de massa e permaneceu nela até o momento da ciclagem térmica. Esse método se fez necessário para que não houvesse risco de que o período de cura se prolongasse além dos vinte e oito dias em função do processo de hidratação do cimento ser continuado. Esse fato poderia comprometer a comparação dos resultados dos ensaios das propriedades do estado endurecido daquelas que foram cicladas com as de referência ensaiadas antes da exposição aos ciclos térmicos.

3.3.4.1 Resistência à tração na flexão

As argamassas moldadas foram submetidas ao ensaio para a determinação da resistência à tração na flexão, segundo especificações da NBR 13279 (ABNT, 2005). O ensaio foi executado em uma prensa com velocidade de carregamento de 50±10 N/s em prismas com dimensões de 40x40x160mm. A tração na flexão é obtida através da Equação 1:

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

R_f = é a resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os suportes (mm);

b = maior dimensão da seção transversal do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

Embora houvesse uma expectativa de aumento da resistência de tração na flexão a partir do aumento do teor de fíler os resultados do ensaio mostraram uma queda dessa resistência. A resistência à compressão, o módulo de elasticidade dinâmico, e a densidade também foram reduzidas. Os resultados indicam uma maior capacidade de deformação dessa argamassa, na medida em que se aumento o teor de fíler.

3.3.4.2 Resistência à compressão

Os prismas com dimensões 40x40x160 mm foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, de acordo com os padrões estabelecidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Observa-se que há uma maior perda da resistência à compressão no traço com o maior percentual de fíler, havendo coerência com aquele encontrado no resultado de resistência de tração na flexão. Esse resultado se justifica pelo aumento no acréscimo de ar incorporado e consequente aumento na porosidade total, que pode ser comprovada nos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio.

3.3.4.3 Determinação da densidade de massa aparente

A densidade aparente foi determinada conforme a NBR 13280 (2005).

Apesar de pequenas variações nos resultados desse ensaio e na massa específica, o decréscimo da densidade aparente é confirmado pela mesma tendência de comportamento encontrada nos ensaios de massa específica, resistências mecânicas e índice de vazios. O aumento de vazios a partir do aumento da incorporação de ARC torna as argamassas menos densas e provoca a diminuição da resistência, da mesma forma que melhora sua capacidade de deformação, o que pode ser identificado no módulo de elasticidade dinâmico.

3.3.4.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os ensaios de PIM foram realizados no LMC da UNISINOS, com um Porosímetro a mercúrio microprocessado modelo PoreMaster 33, adotando-se uma pressão que varia de 0 a 0,34 MPa para o sistema de baixa pressão e de 0,34 a 227,37 MPa para o sistema de alta pressão e ângulo de contato de 140°. O ensaio foi realizado para uma amostra de cada mistura, para a realização desse ensaio foram subtraídas com serra de precisão à 150 rpm (Figura 30, a)

amostras da região central dos prismas moldados 40x40x160mm, reduzidas até as dimensões de 7x7x20 mm (Figura 30, b) e observando-se a preservação da integridade da forma da amostra.

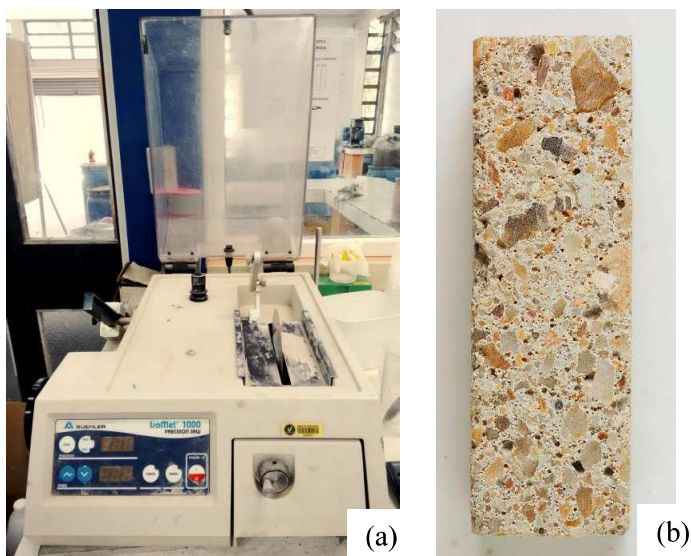


Figura 30 - Serra de precisão (a) e amostra 7x7x20 mm (b)

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio visa caracterizar a distribuição dos poros com o objetivo de se verificarem diferenças de comportamento nas diferentes argamassas. Seus resultados podem ser visualizados na Figura 31 e na Tabela 18.

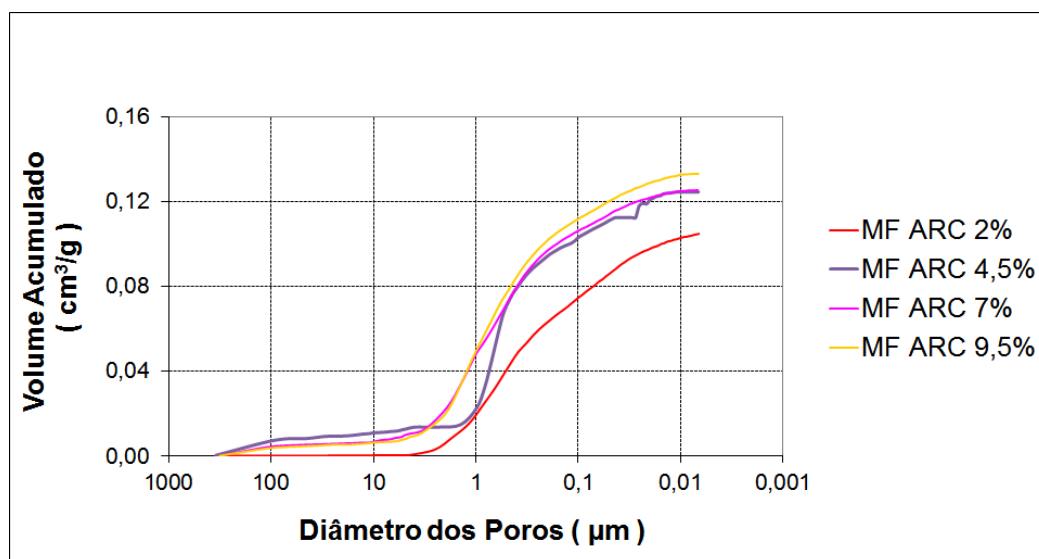


Figura 31 - Volume de poros acumulados das argamassas

A Figura 31 representa a distribuição dos poros das argamassas de acordo com o volume de mercúrio intrudido. A Tabela 18 contém os resultados da distribuição do volume de mercúrio em três faixas de diâmetros médios de poros e volume total intrudido nas amostras. Segundo Zeng et al. (2012) a análise dos resultados de porosimetria deve ser realizada por faixas de distribuição granulométrica, sendo proposta a divisão de poros entre os diâmetros: $e \geq 5$; $0,05 \leq \emptyset < 5$ e $< 0,05 \mu\text{m}$, entre poros que contém ar e regiões de interface de grãos, poros capilares e vazios com eles conectados e dimensões que já se aproximam da escala do gel C-S-H. Segundo Faure et al (2012) em toda essa faixa de tamanhos de poros pode haver água na forma líquida ou vapor.

Tabela 18 - Distribuição do volume de mercúrio intrudido nas amostras de argamassa.

Filer (%)	2	4,5	7	9,5
\emptyset Poro (μm)	Volume de mercúrio (cm^3/g)			
$< 0,05$	0,0176	0,0128	0,0104	0,0122
$0,05 \leq \emptyset < 5$	0,0867	0,0991	0,1058	0,1131
≥ 5	0,0005	0,0126	0,0091	0,0078
Volume total	0,1048	0,1245	0,1253	0,1331

Os resultados demonstram uma tendência de ganho de porosidade total na medida em que se aumenta o teor de filer. Quanto às dimensões de poros, os resultados assumiram comportamentos semelhantes para as argamassas em que houve acréscimos de filer nos teores de 4,5; 7 e 9,5%, e um comportamento isolado foi observado para a argamassa com 2% de filer (Figura 31).

3.3.4.5 Índice de vazios e massa específica

Os ensaios de foram realizados em três prismas de dimensões de 40x40x160mm, para cada mistura de argamassa, conforme procedimentos descritos na norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

A massa específica das argamassas diminui com o aumento do teor de filer nos traços com 2 e 4,5%, no entanto, houve uma manutenção da densidade no demais (7 e 9,5%). As variações são causadas pelo acréscimo no teor de filer e possivelmente por consequência o aumento do teor de ar incorporado. Esses resultados são coerentes com os de propriedades mecânicas, que apontam perdas nas resistências com o aumento no teor de filer.

Desses ensaios, o índice de vazios parece representar com mais acurácia as diferentes características dessas argamassas, nesse caso o aumento da presença de vazios representa uma diminuição na densidade. Quando comparadas a massa específica e a densidade

de massa aparente, fica clara a tendência de perda das propriedades entre os teores de 2 e 9,5% de filler, enquanto que os teores de 4,5 e 7% representam uma faixa de transição cujas características dificilmente são apuradas pelos métodos de ensaio adotados. Percebe-se o mesmo com as resistências mecânicas. Considerando os resultados comparados de massa específica e resistência à compressão a tendência é a formação de 2 grupos, um formado a partir dos teores de 2% de filler e outro com os demais teores.

3.3.4.6 Módulo de elasticidade dinâmico

É necessário o conhecimento do módulo de elasticidade de todas as misturas envolvidas, assim como, as observações dessa propriedade ao longo dos ensaios de exposições aos ciclos térmicos. Segundo Esquivel (2009), investigando a influência de choques térmicos em revestimentos de argamassas cimentícias, o módulo de elasticidade do revestimento pode exercer uma influência considerável no nível de tensões atingidas no revestimento quando submetido à exposição térmica.

No ensaio foi utilizado o equipamento de ultrassom do tipo PUNDIT Lab desenvolvido pela Proceq SA. Consiste em uma fonte e dois transdutores de 45 kHz, o primeiro aplica as ondas acústicas de ultrassom e o segundo transdutor recebe o pulso acústico e dessa forma registra-se o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso. Utilizado de forma direta a espessura do material provoca o afastamento dos transdutores e permite determinar a velocidade de projeção do som no material que está sendo submetido ao ensaio. Os ensaios para o registro do módulo de elasticidade dinâmico seguiram os procedimentos da NBR 15630 (ABNT, 2009) em amostras de dimensões 40x40x160 mm.

$$E_d = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{(1+\mu)(1+2\mu)}{1-\mu} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico em MPa

v = velocidade em que a onda ultrassônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal em km/s

ρ = densidade de massa aparente do corpo-de-prova em kg/m³

μ = Coeficiente de Poisson, valor = 0,2

A diminuição do módulo de elasticidade dinâmico demonstra conformidade com os resultados de tração na flexão, que apresentam decréscimo da resistência a partir das mesmas

condições. O acréscimo de ar incorporado demonstra ter superado a diminuição da porosidade aberta que ocorre pelo acréscimo de filler, já que uma diminuição do módulo dinâmico implica na atenuação da onda sônica que é favorecida pelo aumento de vazios numa porosidade total maior. Os resultados estão coerentes com aqueles observados por Silva *et al.*(2009), da mesma forma como nesse estudo foi observada perda gradativa no módulo de elasticidade dinâmico e aumento no índice de vazios associado ao aumento no teor de ar incorporado.

3.3.4.7 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A absorção de água e o coeficiente de capilaridade das diferentes argamassas produzidas foram determinados seguindo a norma NBR 15259 (ABNT, 2005). Para cada traço foram ensaiados no mínimo três prismas com dimensões de 40x40x160 mm (Figura 32).



Figura 32 - Argamassas na ocasião da absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade diminui com o acréscimo de filler. Apesar do incremento do índice de vazios das argamassas (Tabela 18), ocorre diminuição da velocidade de absorção capilar das argamassas. Esses resultados estão coerentes com as observações de Silva *et al.*(2009) e de Stolz (2011) que observaram uma influência na perda da capacidade de absorção capilar a partir do aumento de vazios.

Esse ensaio tem grande importância no estudo, se considerarmos a capacidade de uma avaliação direta do comportamento das argamassas com relação à cinética de absorção de água. Como um dos métodos de envelhecimento por ciclagem térmica prevê ações de umedecimento e secagem para o resfriamento, existe a ação de choque térmico no resfriamento e o desempenho da capacidade de absorver e evaporar a água, promovido pela porosidade aberta, pode ser de grande significância no processo de degradação.

3.3.4.8 Retração

Essa propriedade tem papel fundamental no desempenho do revestimento e por haver possibilidades de provocar fissurações, afeta a estanqueidade e por consequência também

a condutibilidade térmica do material. A retração linear seguiu adaptada aos procedimentos da NBR 15261 (ABNT, 2005) e para a execução dos ensaios foram utilizados três prismas para cada argamassa confeccionada (Figura 33).



Figura 33 - Medição da variação dimensional por retração

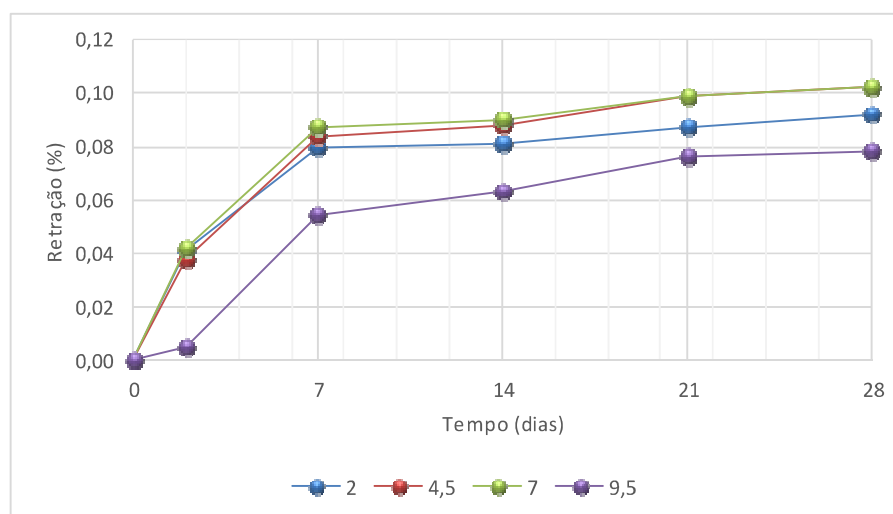


Figura 34 - Variação dimensional por retração (argamassas de 2; 4,5; 7 e 9,5 % de fíler)

O aumento de retração é proporcional ao aumento do teor de fíler (Figura 34), sendo que a maior intensidade de perda de massa ocorreu durante o primeiro dia. A retração linear parece estar relacionada com a granulometria da areia, que é alterada em função dos diferentes teores de fíler acrescentados. Angelim R., Angelim S. e Carasek (2003) também observaram a diminuição da retração para argamassas produzida com uma areia que possuía menor módulo de finura.

3.3.5 Produção e cura dos sistemas de revestimento

3.3.5.1 Confeção das placas cerâmicas

Os blocos destinados ao revestimento com argamassa foram cortados com serra diamantada no sentido longitudinal da dimensão de 290 mm de forma que fosse extraída sua parede externa, para que posteriormente fosse revestida (Figura 35.a). O processo resultou em placas de dimensões aproximadas 20x190x290 mm e teve os objetivos de: diminuir o volume do material acondicionado nos limites internos da câmara climática estabelecido pelo seu volume útil e reduzir a altura das caixas térmicas, propiciando uma redução do material empregado para suas construções e diminuído os seus pesos, já que, nos intervalos entre o processo de aquecimento e o de resfriamento elas precisavam ser levantadas de forma manual. Após o corte as placas foram lavadas com esponja em água corrente para que se eliminasse qualquer resíduo do corte da sua superfície e posteriormente armazenadas em laboratório. As placas permaneceram em ambiente controlado de laboratório (Figura 35.b) pelo período mínimo de 14 dias, para que estivessem nas mesmas condições de umidade e de temperatura na ocasião do recebimento do chapisco, quanto ao teor de umidade, as placas foram pesadas até não se constatarem variações de massa superiores a 0,5%.

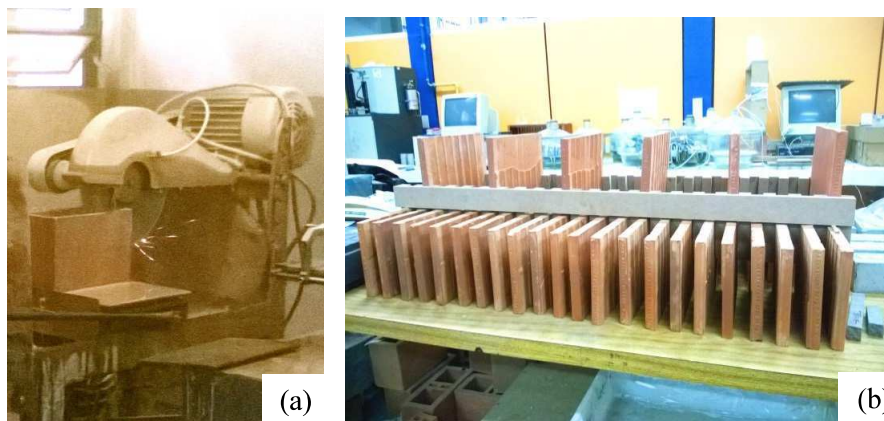


Figura 35 - Corte em serra diamantada (a) e armazenamento em laboratório (b)

3.3.5.2 Aplicação do chapisco

O traço utilizado para a produção da argamassa de chapisco foi 1:3, segundo Kazmierczak, Brezezinski e Collatto (2007) a adoção desse traço favoreceu a aderência de revestimentos em substrato cerâmico. A adoção do chapisco para o preparo do substrato têm o objetivo de melhorar a aderência dos revestimentos e produzir melhores condições de avaliação do desempenho da resistência de aderência à tração.

A argamassa de chapisco foi aplicada de forma manual por um profissional experiente. O chapisco foi curado pelo prazo de 72 h em ambiente de laboratório sendo que após esse prazo foi aplicado o revestimento de argamassa. Para que a aplicação manual fosse produzida de forma que pudesse simular mais apropriadamente a condição vertical com que normalmente são produzidas as alvenarias e para que o trabalho do aplicador pudesse ser favorecido pelas condições ergonômicas no desempenho da tarefa, foi produzido um aparato como um cavalete (Figura 36.a) com um compartimento nas dimensões próximas as das placas cerâmicas para a sua inserção. A aplicação manual demonstrou possuir algumas irregularidades na sua distribuição ao longo da superfície do substrato (Figura 36.b), boas condições aparentes de aderência e ao longo do estudo não foram constatadas falhas de extensão de aderência na interface chapisco/substrato.

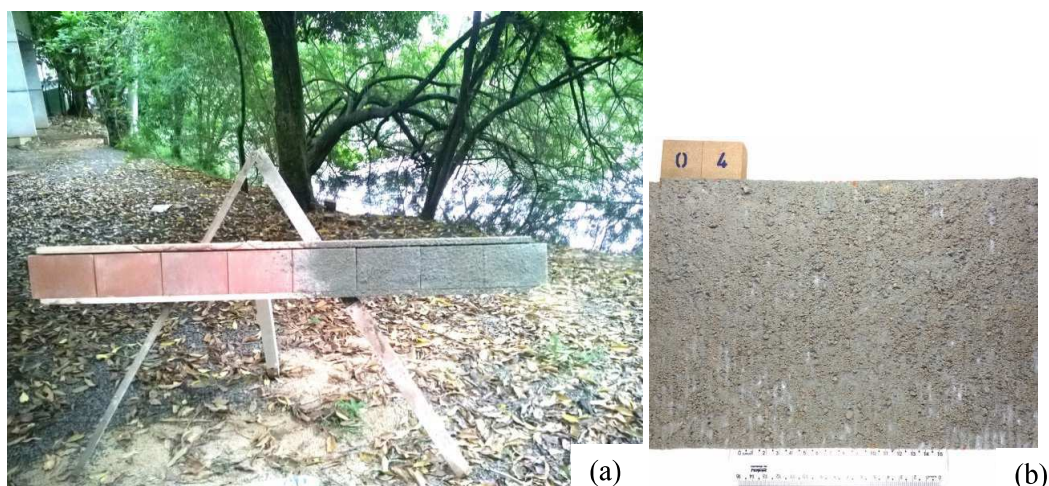


Figura 36 - Aparato utilizado para a aplicação do chapisco (a) e chapisco aplicado (b).

3.3.5.3 Revestimento das placas cerâmicas

Passadas 72h da cura do chapisco foi realizado o revestimento dos blocos com uma espessura fixada em 20 ± 2 mm. O processo utilizou-se de uma caixa de queda utilizada no LMC da UNISINOS, similar ao de outros pesquisadores (COSTA et al., 2007; PAES, BAUER e CARASEK, 2003 e BAUER et al., 2012). Foi adotada a seguinte sequência: lançamento da argamassa, após cinco minutos houve a realização do sarrafeamento e após quinze minutos a execução do desempenho. As dimensões do compartimento que contém a argamassa são diferentes das dimensões ocupadas pelas duas placas revestidas com chapisco na parte inferior (Figura 37.a) e após o lançamento observa-se uma diferente distribuição da argamassa lançada sobre as placas (Figura 37.b), contudo, o sarrafeamento acaba por regularizar a distribuição da argamassa deixando a superfície uniforme (Figura 37.c). Durante os ensaios em que ocorreram

cortes nas peças revestidas notou-se recorrentes falhas de aderência na interface argamassa/chapisco, mesmo naquelas não submetidas a ciclos térmicos. Em função dessa constatação um método para o registro das ocorrências foi desenvolvido e os resultados serão apresentados posteriormente.

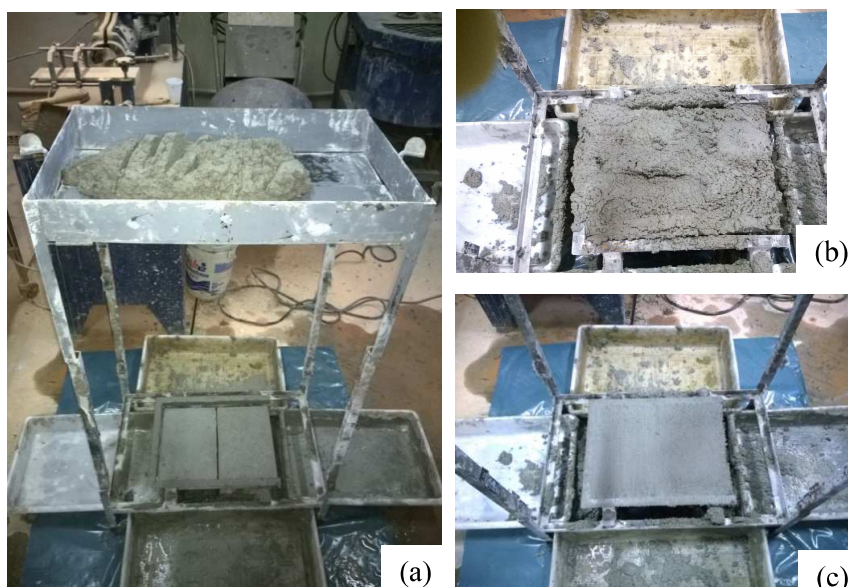


Figura 37 - Caixa de queda (a), argamassa após o lançamento (b) e após o sarrafeamento (e)

Segundo Scartezini e Carasek (2003) um período de cura úmida melhora a aderência do revestimento. Pereira, Carasek e Francinete Jr. (2005) observaram um aumento na resistência média de revestimentos que sofreram cura úmida por 3 dias, dessa forma adotou-se um procedimento de cura para os revestimentos. Os revestimentos foram curados no LMC da UNISINOS, em câmara úmida por 3 dias para garantir a umidade necessária à hidratação do cimento e por 25 dias em ambiente de laboratório com temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa (UR) de (60 ± 10) % (Figura 38.a). Segundo Paes, Bauer e Carasek (2003) o processo de cura composto procura evitar possíveis fissurações por retração na secagem e minimizar o impacto da maior movimentação de água por exsudação nos instantes iniciais do processo de cura. Durante o período de cura não foi observada nenhuma fissura na superfície dos revestimentos.

Após 28 dias de cura todos os blocos revestidos destinados aos ensaios térmicos foram secos em estufa a uma temperatura média de (60 ± 5) °C para que fosse eliminado qualquer teor de umidade (Figura 38.b). Essa medida pretendeu interromper o processo de hidratação do cimento em todos os revestimentos testados, uma vez que houve produções de

revestimentos em momentos distintos e foram previstos ciclos térmicos por métodos diferentes e em diferentes períodos de tempo.



Figura 38 - Placas armazenadas em sala climatizada (a) e estufa de secagem (b)

3.3.6 Ensaio dos revestimentos no estado endurecido

3.3.6.1 Fissuração no revestimento

Durante a cura das argamassas de revestimento, foram realizadas observações com o objetivo de documentar o surgimento de fissuração através de registros fotográficos. O registro inicialmente pretendia acompanhar eventuais processos de fissuração que se desencadeassem ao longo dos ciclos de exposições dos revestimentos. Em nenhum momento foi notado qualquer surgimento de fissuração nas superfícies dos revestimentos desse estudo, portanto, os registros fotográficos não estão documentados neste trabalho.

3.3.6.2 Propagação de ondas por ultrassom

O tipo de método adotado para o ensaio de ultrassom foi a transmissão indireta, quando dois transdutores são utilizados (um transmissor e outro receptor), ambos posicionados na superfície do revestimento e nesse caso com uma distância de 8 cm medidas a partir dos centros dos transdutores de 54 kHz e de diâmetro Ø50 mm. Os parâmetros foram ajustados de modo que o comportamento da onda pudesse ser visualizado na tela do laptop conectado em um aparelho *Pundit Lab* da *Proceq SA* (Figura 39). O ajuste dos parâmetros resultou em uma amplitude de saída de 500 V com um ganho para a recepção do sinal de 50x. Essas configurações foram mantidas para a obtenção da média de 20 leituras da velocidade de pulso em cada uma das 2 amostras de cada traço em todas as condições (não cicladas, cicladas na câmara climática e cicladas nas caixas térmicas). O acoplante utilizado foi uma camada de

vaselina em espessura suficiente para o adequado contato do transdutor com a superfície do revestimento e todas as amostras foram secas à (60 ± 5) °C antes dos ensaios.

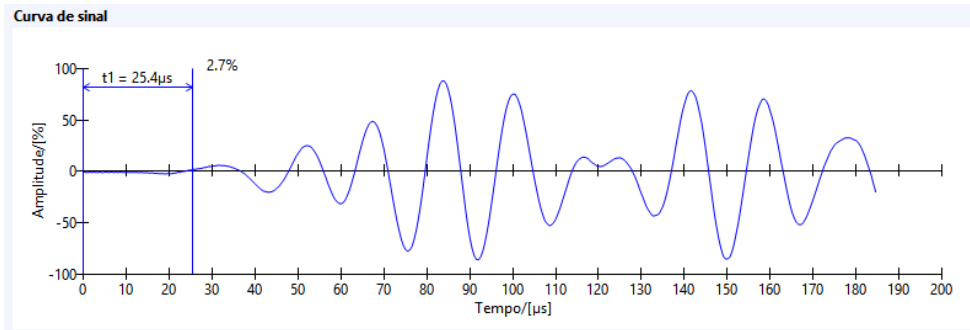


Figura 39 - Imagem da visualização da onda ultrassônica

3.3.6.3 Determinação da resistência de aderência à tração

A determinação da resistência de aderência à tração dos revestimentos seguiu as recomendações da NBR 13528 (ABNT, 2010). O processo de corte buscou propiciar um corte de maneira contínua em um eixo vertical, e ocorreu no Laboratório de Usinagem da UNISINOS. Foi utilizada uma serra copo diamantada de dimensões internas de $\varnothing 50$ mm, acoplada em uma furadeira de bancada (Figura 40.a). Após os cortes as peças sofreram limpeza com um jato de ar para eliminar qualquer resíduo que dificultasse a aderência da cola na superfície do revestimento (Figura 40.b). Foram considerados espúrios os valores compreendidos fora do intervalo entre a média menos um desvio e a média mais um desvio padrão.



Figura 40 - Furadeira e serra copo (a), cortes no revestimento (b), cola e pastilhas aplicadas (c) e arrancamento (d)

3.3.6.4 Absorção inicial de água

O ensaio seguiu o procedimento RILEM TCC-116. Três amostras de cada argamassa, a de referência e as argamassas dos revestimentos submetidos aos dois processos de ciclagem, foram extraídas. Inicialmente as amostras foram secas em estufa a $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até a constância de massa. A quantidade de água absorvida foi medida através de sucessivas medições de massa por pesagens até o tempo de 96 h (Figura 41). A absorção total de água das amostras foi realizada às 96 h, período em que se verificou a saturação das amostras. Os resultados desse ensaio serão mostrados e discutidos no capítulo seguinte.

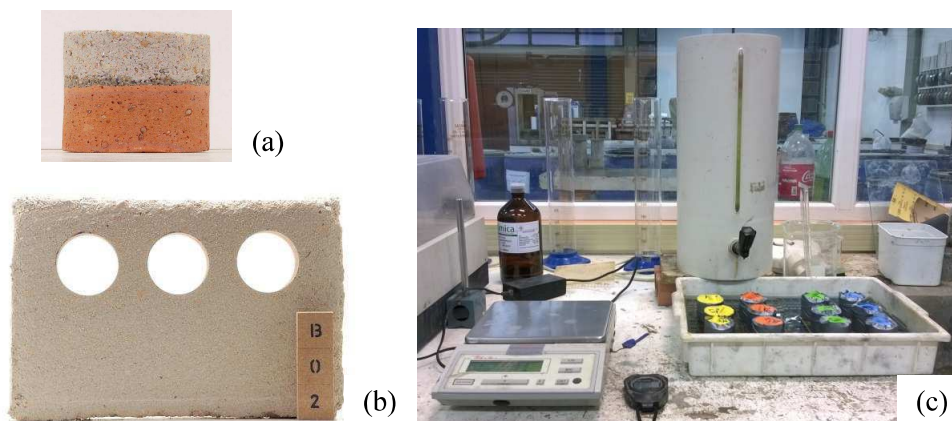


Figura 41 - Corpo de prova extraído (a), áreas dos cortes (b) e procedimento de ensaio (c)

3.3.6.5 Análise da forma de ruptura pela quantificação de pixels

O método foi desenvolvido de forma a possibilitar a quantificação das formas de ruptura estabelecidas pela NBR 13528 (ABNT, 2010).

Angelim R., Angelim S. e Carasek (2003) observaram que a análise da forma de ruptura é importante para auxiliar na avaliação de comportamentos dos revestimentos. Diversos autores (FERREIRA, 2009; FABRO *et al.*, 2011; WERLE, KAZMIERCZAK e KULAKOWSKI, 2011; AZENHA, FARIA e FIGUEIRAS, 2011; GIROTTO, BARBOSA e MACIEL, 2014) utilizaram imagens digitais e programas computacionais para a análise de pixels e desenvolvimento de métodos de ensaio para uso em diversas finalidades.

Para que se obtivesse a maior eficiência na obtenção dos resultados, foram criadas duas etapas no processo:

- a) Captura das imagens fotográficas;
- b) Processamento para contagem de pixels com critérios previamente estabelecidos;

As amostras foram fotografadas com câmera Nikon, configurada com distância focal de 135 mm (teleobjetiva disponível para a compressão da perspectiva), f/22, ISO-100 e velocidade de obturador 1/2 s, nas mesmas condições de iluminação, para a posterior caracterização da forma de arrancamento através de quantificação de pixels da imagem digital (Figura 42.a). Fez-se necessário um controle das condições de iluminação e técnicas para a captura das imagens fotográficas de cada corpo-de-prova (Figura 42.b), para que dessa forma fosse possível promover uma adequada comparação entre as amostras fotografadas em diferentes ocasiões, já que algumas variáveis de exposição poderiam causar interferência nas imagens digitais.

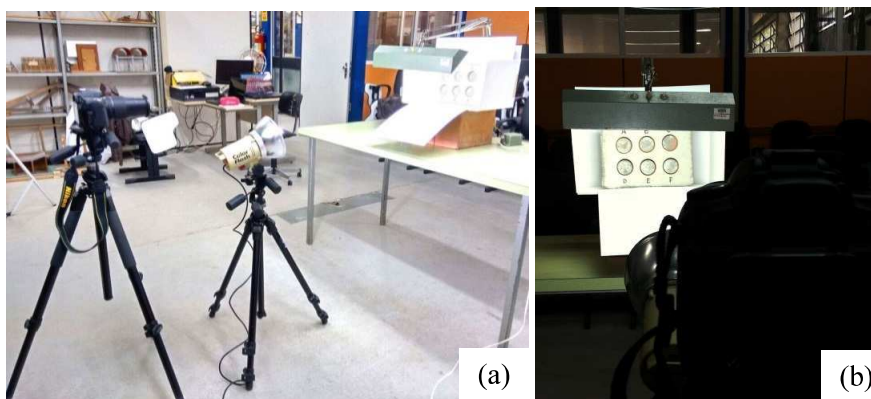


Figura 42 - Estúdio fotográfico (a) e corpo-de-prova (b)

As imagens capturadas foram processadas em um software de mapeamento da empresa ArcGis, dedicado à análise de dados geospaciais, no qual foi feita contagem de pixels por meio da classificação visual de cores falsas nas áreas que sofreram os arrancamentos. Com base nas características de semelhança entre pixels, foi possível calcular as proporções entre argamassa, chapisco, substrato superficial e substrato rompido.

O método desenvolvido no software Arcmap para análise de rupturas consiste em utilizar fotografias dos sistemas de revestimentos e aparar as imagens para mapear e classificar somente as regiões submetidas ao arrancamento (Figura 43.a). A classificação é baseada na semelhança entre pixels agrupados e cria cores falsas (Figura 43.b), que compreendem cada classe de pixel, para melhor visualização e separação de cada material do revestimento arrancado. A determinação do número de classes para cada furo foi feita por tentativa escolhendo-se quantas fossem necessárias para representar fielmente a região do arrancamento. As classes foram agrupadas para separar as camadas de substrato superfície, substrato rompido, chapisco e argamassa, e desses grupamentos eram obtidas as somas de pixels (Figura 43.c). Da contagem de pixels de cada camada, foram calculadas as porcentagens de cada material presente em cada área de arrancamento.

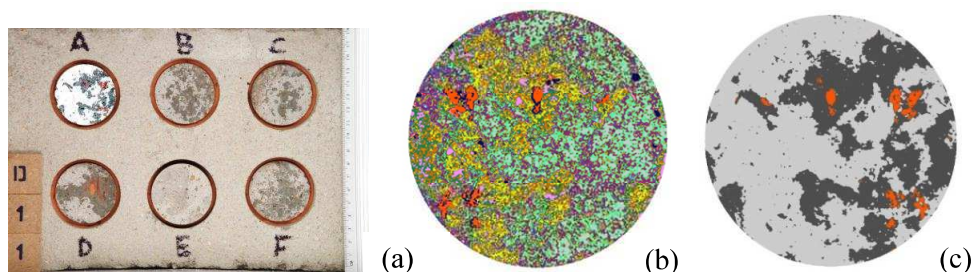


Figura 43 - Clip da área de análise (a), classes criadas (b) e agrupamento de classes (c)

3.3.6.6 Massa específica através do método da picnometria

A adoção desse método procurou identificar possíveis variações nas massas específicas das argamassas após o processo de revestimento, seja pela influência do substrato em função da sucção de água ou pela execução dos ciclos térmicos provocados pelos dois métodos diferentes. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Valorização de Materiais (LVMC), utilizando um picnometro AccuPyc II 1340 Pycnometer e gás hélio, o equipamento exibe os resultados com a precisão de 4 casas decimais e a média a partir de 10 leituras de cada amostra.

3.3.6.7 Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão

O uso do método de ensaio procurou avaliar as durezas superficiais dos revestimentos produzidas com diferentes percentuais de fíler e as possíveis variações de comportamento posteriormente as ciclagens térmicas. Utilizou-se o equipamento esclerômetro de reflexão SILVERSCHMIDT versão PC tipo N (energia de impacto de 2,207 Nm). Foram efetuadas 12 leituras, 6 em cada uma das duas áreas no centro de cada peça (Figura 44), a forma de aplicação em um eixo vertical foi preservada ao longo de todos os ensaios. O ensaio ocorreu depois dos ensaios de resistência de aderência à tração para evitar possíveis danos causados pela energia de impacto do aparelho, e seguiu de forma adaptada a NBR 7584 (ABNT, 2012). Os ensaios foram realizados com os exemplares apoiados sobre um colchão de areia previamente nivelado (Figura 44).



Figura 44 - Ensaio esclerométrico nos revestimentos

3.3.6.8 Avaliação da extensão de falha de aderência na interface argamassa/chapisco

Todas as peças foram cortadas ao meio no sentido longitudinal e quantificada a chamada falha central (FC). Também foram cortadas as bordas nesse mesmo sentido sendo quantificadas as falhas de aderência na borda da amostra (FB). Todas as falhas foram identificadas na interface argamassa/chapisco. Com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 45.a) foram apuradas todas as extensões com falta de aderência, das duas faces cortadas. Posteriormente foram produzidos desenhos em software CAD e a partir de uma projeção dessas fissuras até a área do arrancamento, foi feita a análise da influência dessas fissuras nas áreas de arrancamento (Figura 45.b). O resultado é expresso em percentual da área de arrancamento coincidente com a área fissurada.

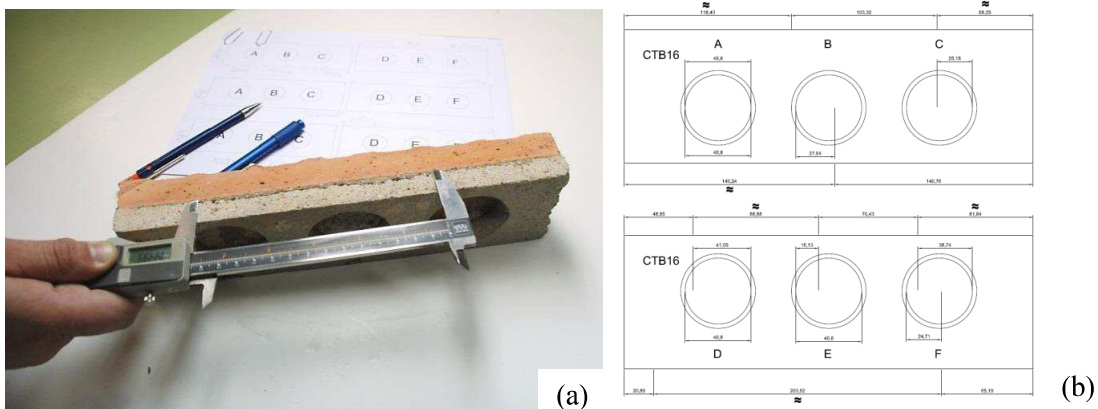


Figura 45 - Processo de medição com paquímetro (a) e desenho em escala produzido em software CAD (b)

3.3.6.9 Análise da dureza com durômetro Shore tipo D

O método seguiu as especificações da ASTM D 2240-5. As peças foram limpas com jato de ar, a fim de limpar grãos soltos ou pó, e 12 leituras em cada peça foram efetuadas (Figura 46).



Figura 46 - Durômetro Shore D

3.3.6.10 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para as observações no MEV, foram extraídas dos revestimentos, através de corte na serra de precisão, amostras com dimensões médias de 12x20x7 mm. Foram analisados revestimentos de referência (não ciclados) com 2 e 9,5% de fíler, e provenientes dos dois processos de ciclagem. Entretanto, apesar de ter sido possível identificar diferenças nas características das superfícies das pastas entre as amostras dos revestimentos com os diferentes teores de fíler (Figura 47), a análise não permitiu a observação de alterações entre as amostras cicladas e não cicladas.

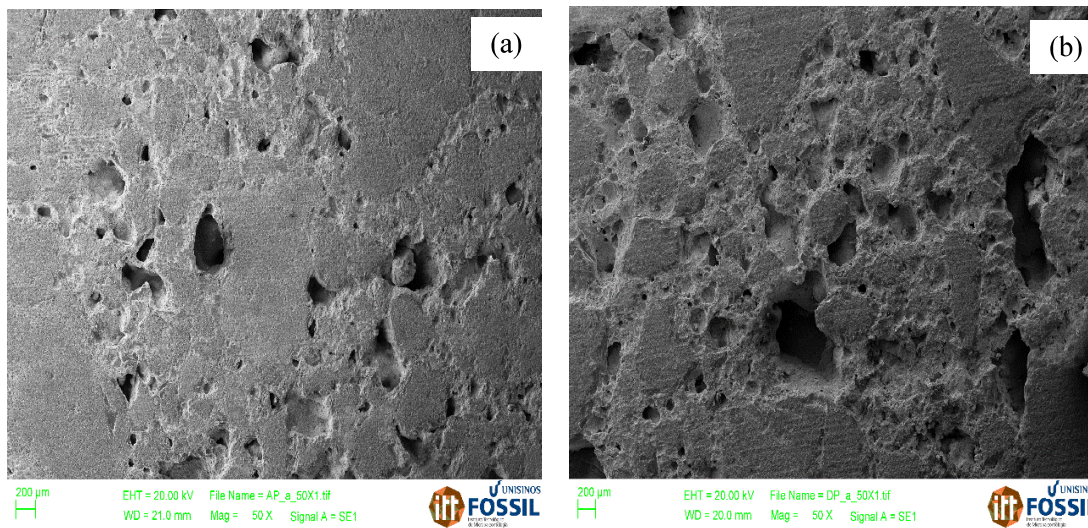


Figura 47 - Amostra com 2% de filer (a) e amostra com 9,5% de filer (b)

A visualização de um maior teor de vazios nas argamassas com maior teor de filer motivou o desenvolvimento de um método capaz de fazer uma estimativa da quantidade de vazios presentes nas superfícies dessas amostras, que será assunto do próximo item.

3.3.6.11 Análise de estimativa de quantidade de vazios na argamassa

Pela observação visual, a partir do uso de imagens fotográficas digitais ampliadas (Figura 48), confirmou-se a presença de vazios nas diferentes argamassas, contudo, para uma avaliação adequada foi necessário o desenvolvimento de um método de ensaio específico.

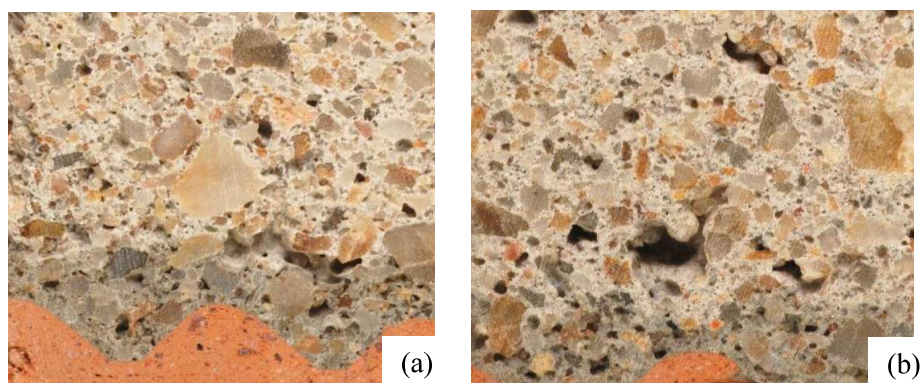


Figura 48 - Amostra com 2% de filer (a) e com 9,5% de filer (b)

Neste ensaio, foram utilizadas 6 amostras metalizadas com ouro, de dimensões aproximadas de 12x20x7 mm, provenientes do processo de ciclagem pelas caixas térmicas e outras de referência que não foram submetidas a nenhum processo de ciclagem. Caré (2008) observa que a pigmentação de amostras para a caracterização de fissuras macroscópicas é amplamente utilizada.

As amostras foram fotografadas com câmera Nikon, objetiva de 60 mm, inclinada 90° (Figura 49.a). As configurações da câmera foram ajustadas em função da qualidade da imagem ampliada e também da estabilidade do aparelho: ISO-200, abertura f/22 e velocidade de obturador 1/50 s, que possibilitou minimizar a influência de ruídos na imagem (Figura 49.b).

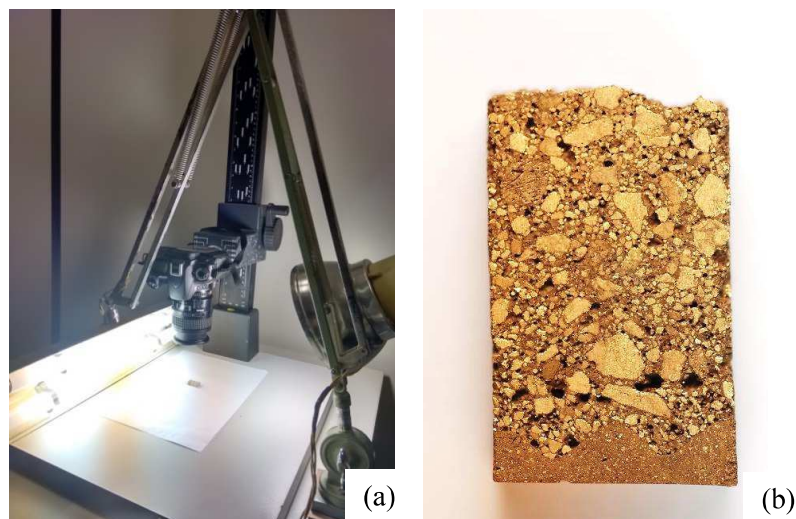


Figura 49 - Aparato para fotografia (a) e amostra impregnada (b)

Na segunda etapa as amostras na forma de imagem digital são processadas em software Arcmap da seguinte forma: a área de análise foi delimitada por um polígono retangular padrão usado para recorte em todas as imagens e posteriormente ocorre a criação de classes por semelhança de pixels, o agrupamento das classes a partir da observação do operador e por fim a contagem de pontos. A sequência do processo de contagem de pixels esta ilustrada na Figura 50.

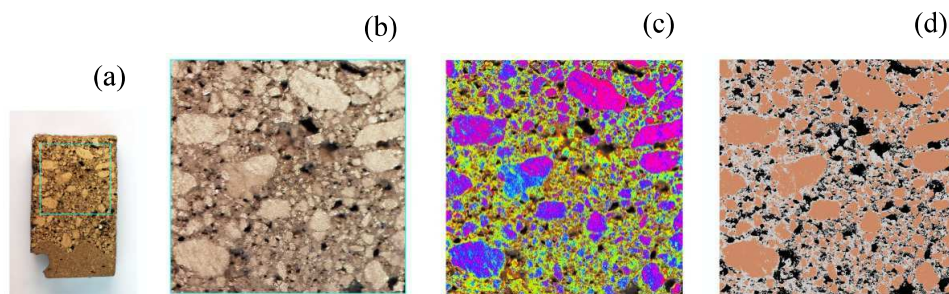


Figura 50 – Seleção da área (a), área de análise (b), classes criadas (c) e classes combinadas (d)

3.3.6.12 Análise das extensões de aderências e proporções de materiais no sistema de revestimento

A obtenção das imagens para a quantificação da extensão de aderência foi realizada segundo o método adotado para a estimativa de quantidade de vazios. As análises da extensão de aderência do chapisco e a proporção argamassa/chapisco foram produzidas através de software AutoCAD. Das amostras analisadas, duas delas possuíam alto nível de estrias na cerâmica e em outras duas as superfícies cerâmicas eram pouco estriadas. As fotos foram postas em uma escala conveniente por meio da relação entre suas dimensões e as médias das medidas feitas com um paquímetro digital da amostra física, as medições e os redimensionamentos das imagens foram produzidos no software CAD. As extensões de substrato e chapisco, bem como as áreas de chapisco e de argamassa foram produzidas manualmente no AutoCAD com a criação de polilinhas e calculadas por ferramentas disponíveis no próprio software (Figura 51). Com esses dados, foram calculadas as proporções de aderência de chapisco no substrato e as proporções encontradas entre a argamassa e o chapisco.

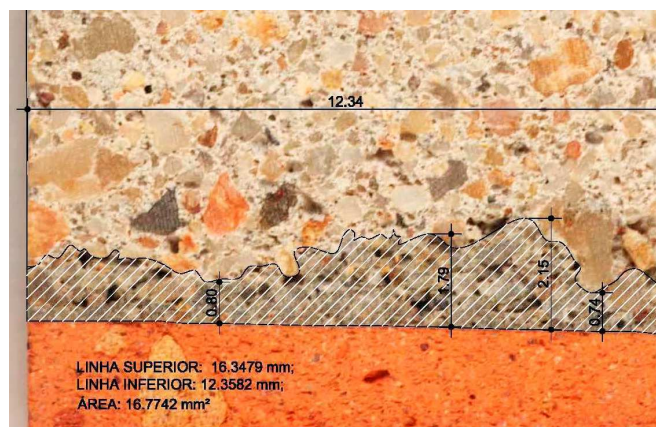


Figura 51 - Dimensões traçadas com software CAD

3.3.7 Desenvolvimento do método para envelhecimento acelerado por gradiente térmico

3.3.7.1 Confecção das sondas termopares

Foram utilizados termopares do tipo K, com cabo de 4 m de extensão encapsulados com haste inox 316, diâmetro 4,7x100 mm (Figura 52.a), calibrados previamente para se verificar a precisão e repetibilidade (Figura 52 b e c). As leituras foram determinadas com um TC-08 Thermocouple Data Logger conectado a um PC e comparadas com as leituras de um termômetro com coluna de mercúrio devidamente aferido. Essas diferenças identificadas foram consideradas no tratamento dos dados obtidos nos ensaios.

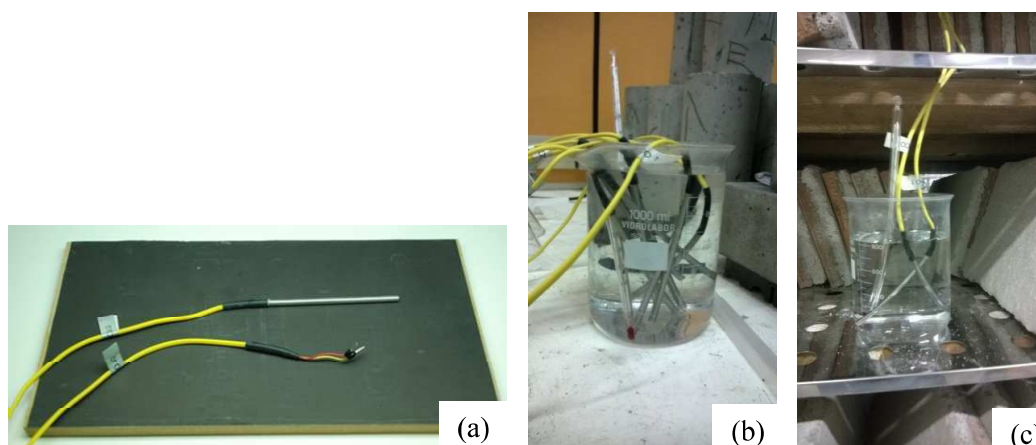


Figura 52 - Termopar tipo K (a), leituras preliminares em ambiente (b) e leitura em estufa (c)

3.3.7.2 Furos para introdução das sondas termopares

A furação dos corpos-de-prova para a inserção dos termopares foi realizada com furadeira de bancada e com eixo fixo na vertical (Figura 53.a). A confecção do furo remove o chapisco e produz uma área entre a argamassa e o substrato (Figura 53.c). O posicionamento dos furos foi conferido com um pacômetro (Figura 53b.) e após os ensaios cada peça foi cortada para a conferência desse resultado.

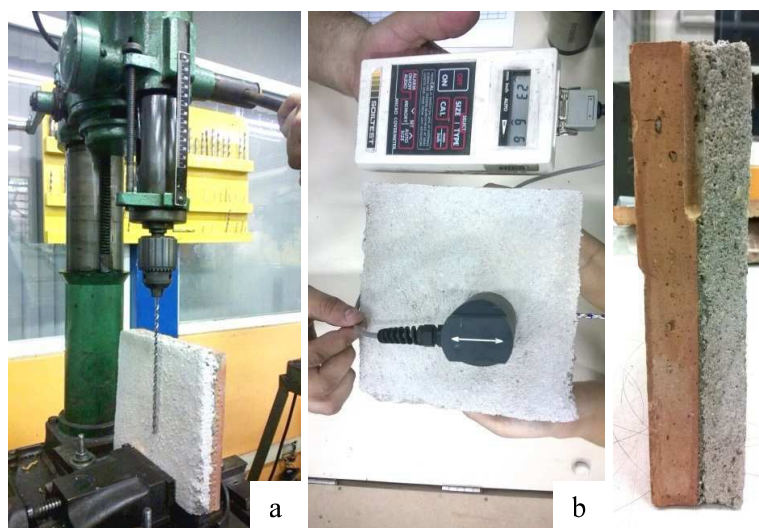


Figura 53 - Furadeira de bancada (a), detector de metais (b) e corte com exposição do furo na interface (c)

3.3.7.3 Características da Câmara climática utilizada

Foram realizados ensaios com câmara climática e com painel irradiante. A câmara climática utilizada, modelo ETSP-TH 392C (Figura 54.a) está instalada nas dependências do campus da UNISINOS, no itt Fuse, opera na faixa de -70 até $+180$ °C (Figura 54.a), e conta com controle interno de umidade, sendo todos os parâmetros programáveis.



Figura 54 - Exterior da câmara climática (a) e interior da câmara (b)

O volume interno possui forma prismática nas dimensões 750x700x600 mm e prateleiras móveis, como pode ser observado na Figura 54.b. A câmara climática foi instrumentada com duas centrais Data Logger TH500 Hynux que deixaram disponíveis o uso de 12 canais. As leituras foram coletadas e gravadas em cada segundo durante todos os processos de ciclagem.

3.3.7.4 Monitoramento das temperaturas no interior dos corpos de prova

Inicialmente foram testados dois corpos-de-prova com termopares no interior, uma placa revestida e uma placa cerâmica. Observou-se um atraso para que o termopar no interior do corpo de prova revestido atingisse o equilíbrio térmico (Figura 56). Esse resultado demonstrou que a temperatura no interior da amostra que contém o revestimento estava sendo influenciada pela variação da espessura e pelos diferentes materiais que compõe o sistema de revestimento desde a temperatura ambiente.

A fim de preservar as amostras revestidas confeccionadas para os ensaios de ciclagens térmicas, foram utilizadas nesses testes peças cerâmicas. As peças foram instrumentadas e foi avaliada a influência do ar aquecido, por influência do ambiente, no interior do furo produzido para a intrusão do termopar. Essa influência poderia causar um erro de leitura da temperatura das paredes do orifício que estavam sendo aquecidas por indução através do material. Foram testadas três situações, uma delas sem o isolamento do furo, outra com silicone para alta temperatura e uma terceira com terra refratária, também na mesma

ocasião foi testado o benefício do uso de pasta térmica para melhorar a área de contato na extremidade do termopar (Figura 55). Os resultados mostraram que a terra refratária propiciou o melhor isolamento térmico para o orifício e comprovou o benefício da pasta térmica para a leitura das temperaturas internas. A utilização da terra refratária e o uso de pasta térmica foram adotados para todos os ensaios seguintes de ciclagem térmica, incluindo aqueles produzidos nas caixas térmicas.



Figura 55 - Peças cerâmicas no interior da câmara

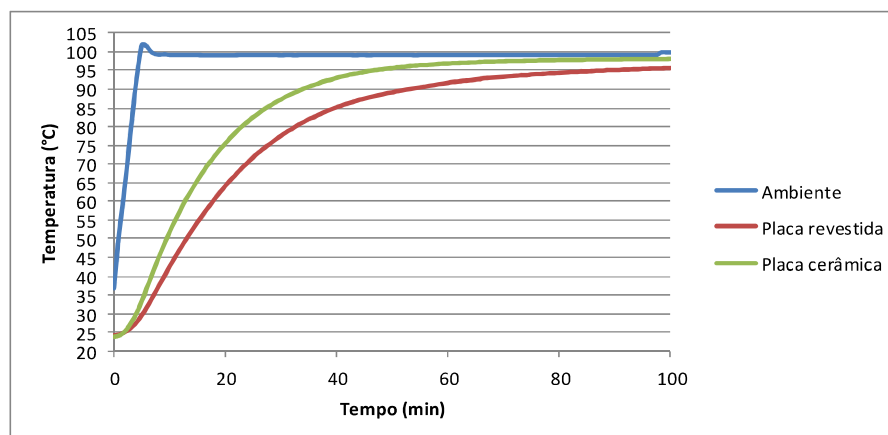


Figura 56 - Influência do revestimento na temperatura interna

3.3.7.5 Comportamento das argamassas à exposição térmica

Para que fossem estabelecidos os tempos necessários para o aquecimento, patamar e resfriamento, fez-se necessário um estudo a respeito das possíveis diferenças da condutividade da energia térmica nas 4 argamassas do estudo. Usaram-se prismas de argamassa com dimensões 40x40x160 mm (Figura 57), produzidos conforme a descrição que segue: após 28 dias de cura os corpos-de-prova foram secos a uma temperatura média de (60 ± 5) °C para que fosse eliminado qualquer teor de umidade. Enquanto permaneceram na estufa o processo de

secagem foi definido a partir de sucessivas pesagens até se constatar constância de massa e após essa etapa foram submetidos ao ensaio em câmara climática.



Figura 57 - Prismas 40x40x160 mm instrumentados no interior da câmara

Os resultados indicam que existe semelhança do comportamento de condutividade térmica entre todas as argamassas do estudo (Figura 58) moldadas na forma de prisma, e que há uma pequena diferença na exposição térmica sofrida que depende do local onde o material é posicionado na câmara, porém essa diferença tende a ser suprimida com a criação de um patamar de aquecimento, já que as temperaturas entram em equilíbrio (Figura 59).

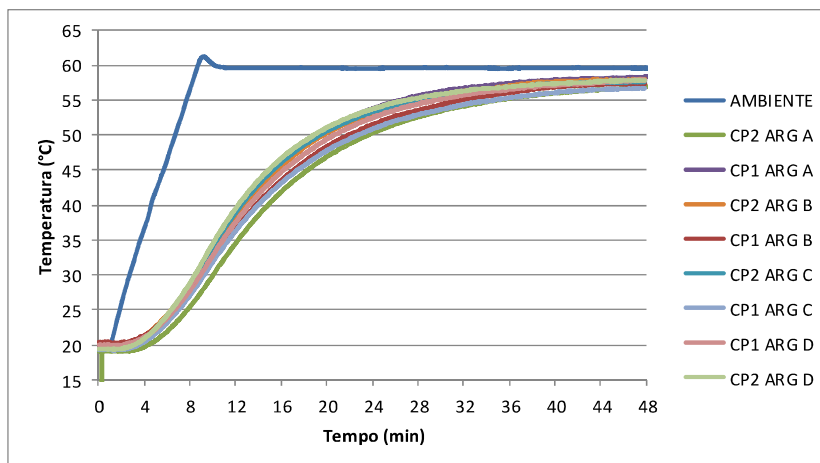


Figura 58 - Variação das temperaturas internas das argamassas, 20-60°C taxa 5°C/min (A=2%; B=4,5%; C=7% e D=9,5% filler)

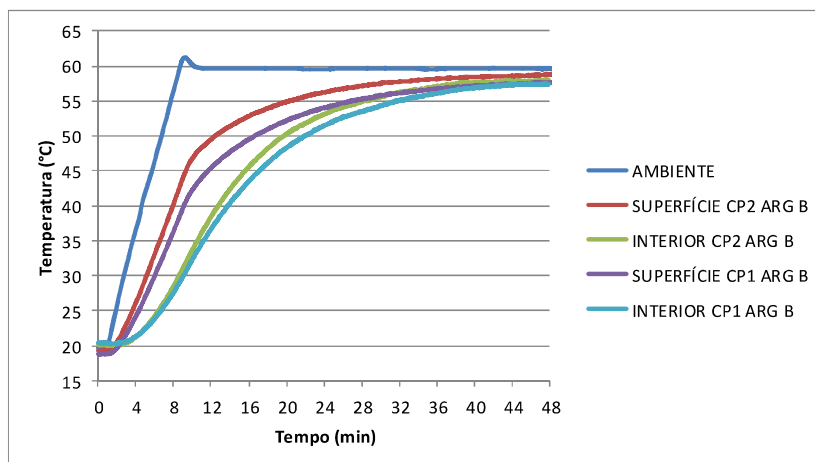


Figura 59 - Monitoramento das temperaturas na argamassa 4,5% de filler, 20-60°C, taxa 5°C/min.

3.3.7.6 Definição do ciclo térmico

A câmara climática foi ajustada para que se obtivessem as temperaturas mínima e máxima desejadas em um intervalo de tempo otimizado, essa medida procurou reduzir o tempo total de duração da ciclagem. Observa-se que as temperaturas do material não entram em equilíbrio com a temperatura do ambiente da câmara (Figura 60), isso ocorre por que o rendimento da evolução da temperatura diminui com aproximação dos valores entre elas.

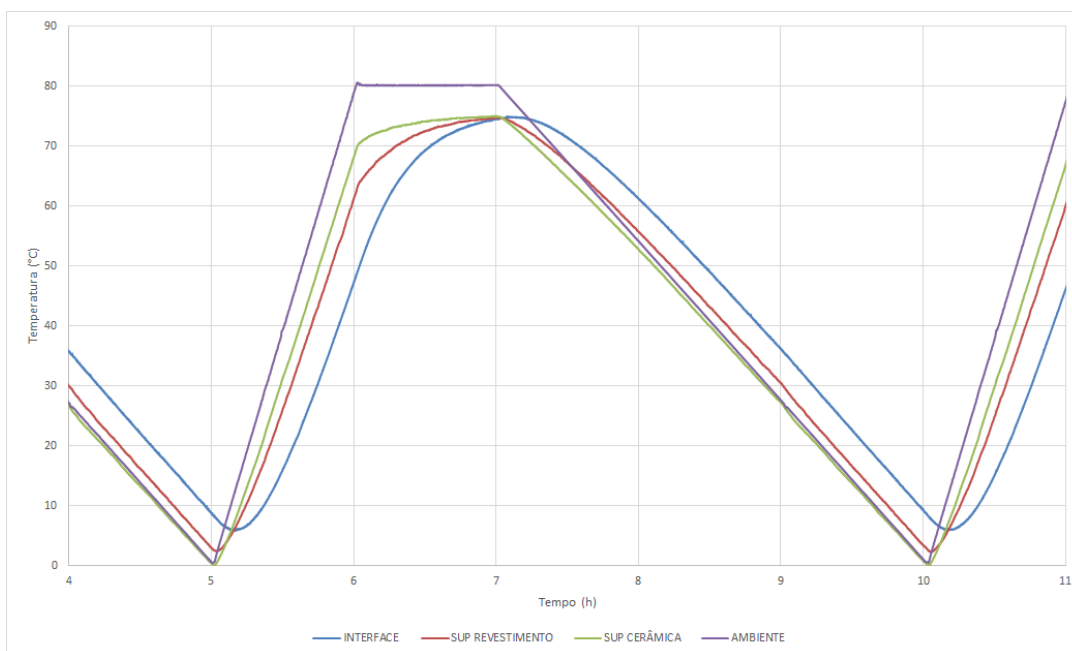


Figura 60 – Formato do ciclo térmico

Foram acondicionadas placas cerâmicas com revestimentos aplicados na câmara e submetidas a ciclos térmicos de ensaios preliminares. Dessa forma foi estabelecido para os ciclos térmicos na câmara climática um tempo de 60 min para o aquecimento, um patamar de 60 min e um período de resfriamento de 180 min, totalizando um tempo total de 300 min e criando uma variação térmica na superfície dos revestimentos de aproximadamente 75 °C e com umidade no interior da câmara configurada para 0 %.

Observa-se que a cerâmica é a primeira a atingir a temperatura de equilíbrio com a temperatura estabelecida para o patamar, logo em seguida a superfície do revestimento e por último a interface entre os dois. Esse resultado indica que houve uma perda de energia térmica da área da interface para o revestimento e demonstra que primeiramente é o calor transmitido pela cerâmica que influencia a interface revestimento/substrato. Somente quando a frente térmica avançou pelo revestimento em direção a interface é que se estabelece o equilíbrio térmico.

Para a ciclagem definitiva, quatro corpos-de-prova de cada revestimento foram depositados na câmara, separadas por elementos cortados de tijolos refratários na forma de pequenos prismas e que mantinham as placas revestidas afastadas para facilitar a movimentação do ar no ambiente interno entre elas (Figura 61). Esses revestimentos foram ciclados de uma única vez e os ciclos foram monitorados por termopares instalados nos revestimentos para possibilitar a detecção de qualquer alteração possível no funcionamento do equipamento ao longo de 40 ciclos consecutivos.



Figura 61 – Revestimentos argamassados acondicionados no interior da câmara

3.3.8 Desenvolvimento do método de ciclagem térmica por irradiação em caixas térmicas

3.3.8.1 Central de coleta de dados

As leituras coletadas pelos ciclos produzidos nas caixas térmicas foram feitas a partir de uma central de aquisição de dados TC-08 Thermocouple Data Logger com 8 canais com capacidade de medições no intervalo -270 até 1820°C a conversão foi feita por um software do próprio fabricante instalado em um PC por conexão USB (Figura 62). O equipamento produziu leituras de temperaturas no ambiente do interior das caixas, interface chapisco/substrato, superfície do revestimento, superfície inferior da cerâmica e também em prismas de argamassa (na sua superfície e no seu interior).



Figura 62 - TC-08 Thermocouple Data Logger instalado no PC

3.3.8.2 Avaliação da eficiência do sistema de aquecimento

O uso de um painel radiante é descrito na NBR 15575-4 (ABNT, 2013) como um método para a exposição à ação de calor e choque térmico. Entretanto, a norma não detalha suficientemente o equipamento, nem especifica as condições do ambiente em que deve ser desenvolvido, a forma da aspersão de água para o resfriamento, detalhes técnicos da fonte de irradiação e do período de tempo de cada fase do processo.

Ballester *et al.* (2009) utilizou lâmpadas de radiação infravermelho para ensaios de exposição térmica e atingiu uma temperatura de 80 °C com eficiência. Dessa forma o equipamento adaptado para esse estudo previu a utilização de lâmpadas com concentração de radiação infravermelha de 250 W, sendo adotada uma para cada corpo-de-prova. A homogeneidade do aquecimento na superfície do revestimento foi monitorada com o auxílio de termopares posicionados na superfície. Observou-se uma diferença de até 20 °C entre diferentes

posições dos termopares (Figura 63 a.). Na execução do teste foi observado que a temperatura no centro da superfície tende a se estabilizar em 80 °C.

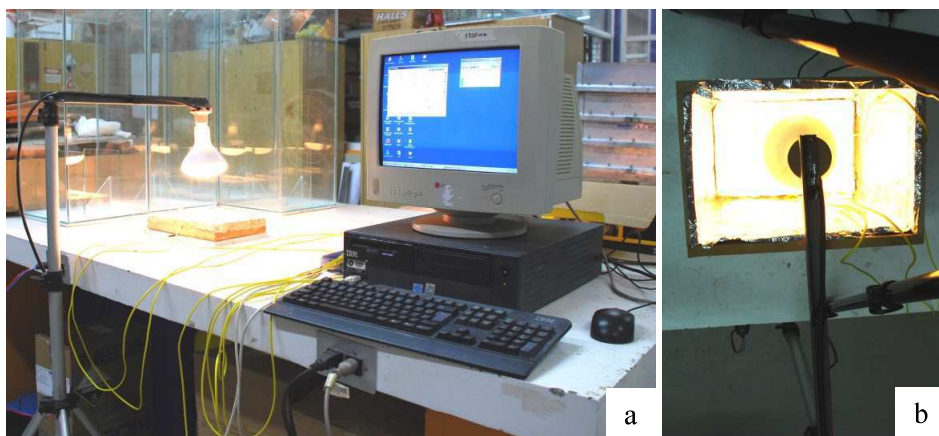


Figura 63 - Lâmpada aquecida exposta ao ambiente (a) e lâmpada aquecida no protótipo da caixa (b)

Para melhor avaliação dos dados obtidos pelos termopares se fez uso simultâneo de uma câmera de infravermelho modelo FLIR A310, com capacidade de leituras de -20 até 120 °C. Através deste equipamento foi possível o registro da forma da distribuição das temperaturas na superfície do revestimento (Figura 64). O ensaio mostrou que há concentração de calor no centro do corpo-de-prova com forma circular e uma dispersão que ocorre por resfriamento se distribuindo com uma queda de temperatura gradual em direção as bordas da peça (Figura 65 a.), de modo similar ao observado pela medição com os termopares. Para melhorar a distribuição do aquecimento foi criado um protótipo de MDF (placa de fibra de média densidade) revestido internamente por uma folha de alumínio (Figura 63 b.) na forma de caixa, porém apenas com as paredes laterais. A avaliação das leituras produzidas pelos termopares de superfície demonstrou uma distribuição regular da temperatura ao longo da superfície, dados esses comprovados pela leitura da câmera térmica (Figura 65 b.).

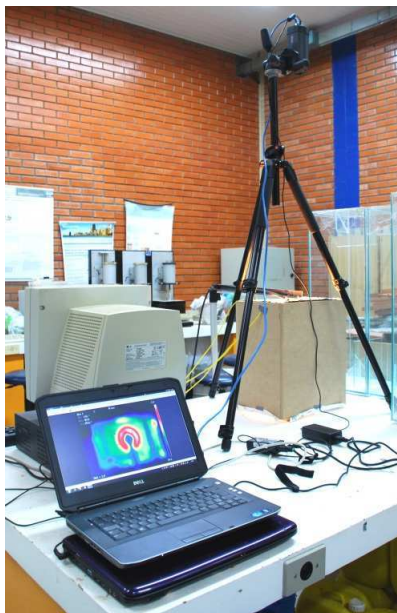


Figura 64 - Câmera usada com o auxílio de um tripé

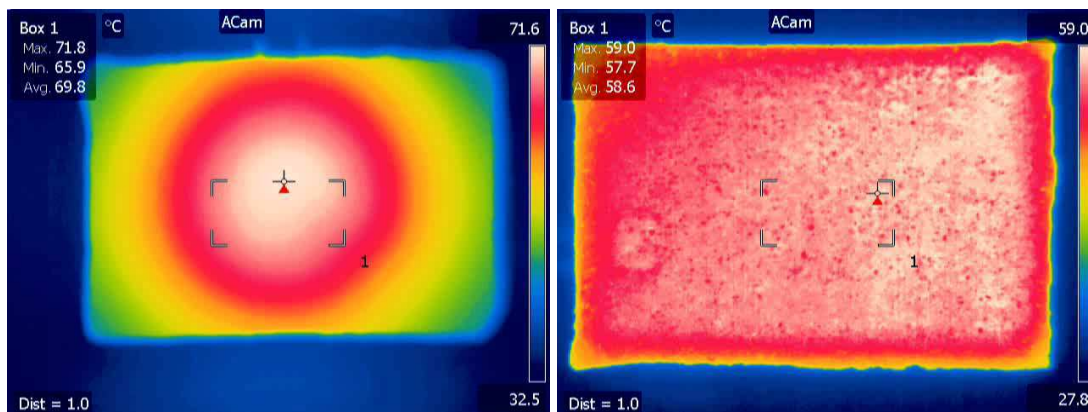


Figura 65 - Amostra exposta ao ambiente (a) e leitura térmica da amostra no protótipo de MDF (b)

3.3.8.3 Produção das caixas térmicas de aquecimento

Foram produzidas duas caixas térmicas de dimensões 50x40x140 cm, em MDF 18 mm, cada uma dotada de um temporizador que permitia programações de tempo (Figura 66 a.). A programação se torna importante para a utilização das lâmpadas de forma intermitente, já que o uso contínuo faria as temperaturas se elevarem além do proposto. As caixas foram revestidas internamente com folha de alumínio. Foram feitos furos em cada um dos lados menores para favorecerem a ventilação do ambiente interior (Figura 66 b.), instaladas as lâmpadas e realizado o teste de funcionamento (Figura 66 c.).

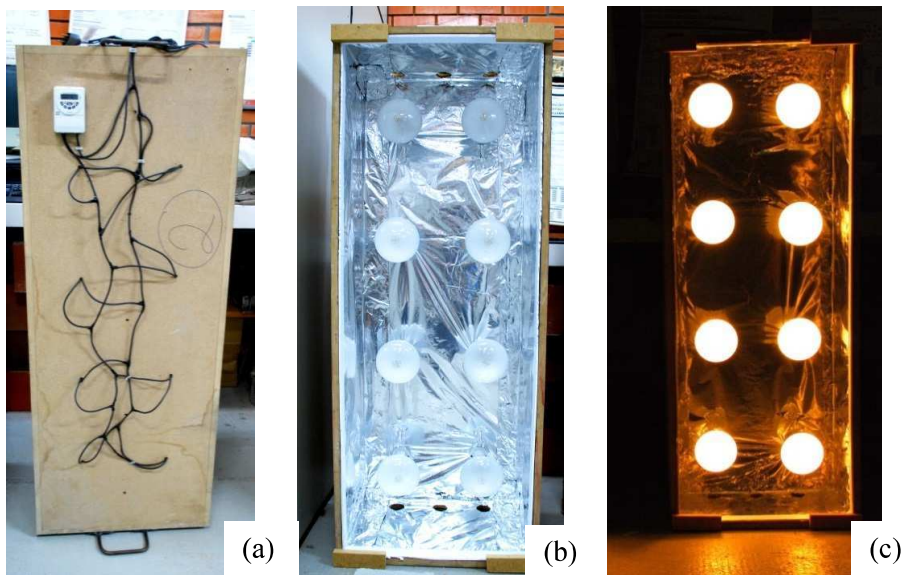


Figura 66 - Temporizador (a), isolamento com folha de alumínio (b) e lâmpadas acionadas (c)

3.3.8.4 Avaliação da eficiência do uso das caixas térmicas

As leituras de temperatura da câmera térmica foram acompanhadas em tempo real, durante as etapas de aquecimento (Figura 67 a.) e resfriamento (Figura 67 b.).

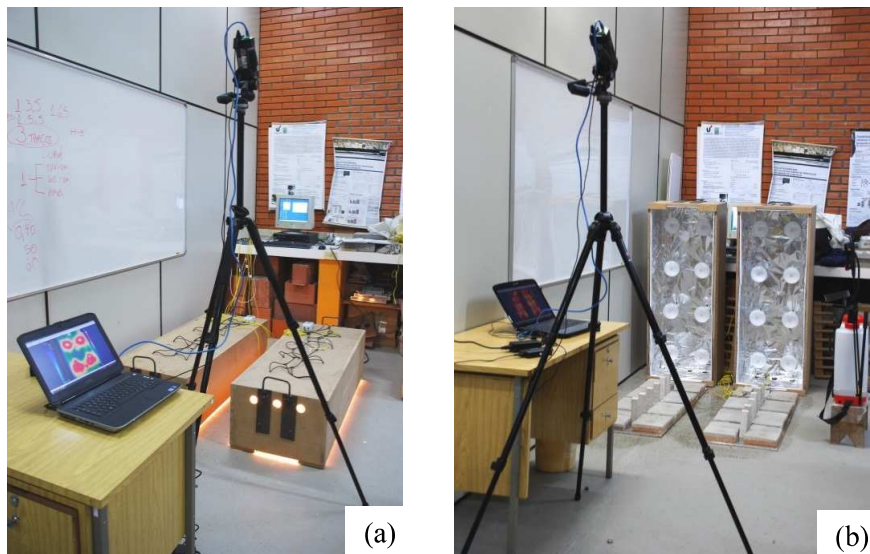


Figura 67 - Caixas em aquecimento (a) e processo de resfriamento(b)

Os resultados indicaram que o sistema isolamento bloqueou até 60% da perda de energia térmica do interior para o exterior das caixas (Figura 68 a.). As leituras indicaram que o aquecimento ocorreu de forma homogênea em todas as superfícies de revestimentos testadas (Figura 68 b.). Durante o resfriamento foi observado um gradiente térmico do centro em direção as bordas dos revestimentos e do topo em direção as bases dos prismas colocados entre

as duas fileiras de placas revestidas (Figura 68 c.). Este gradiente se mantém até o resfriamento total (Figura 68 d.).

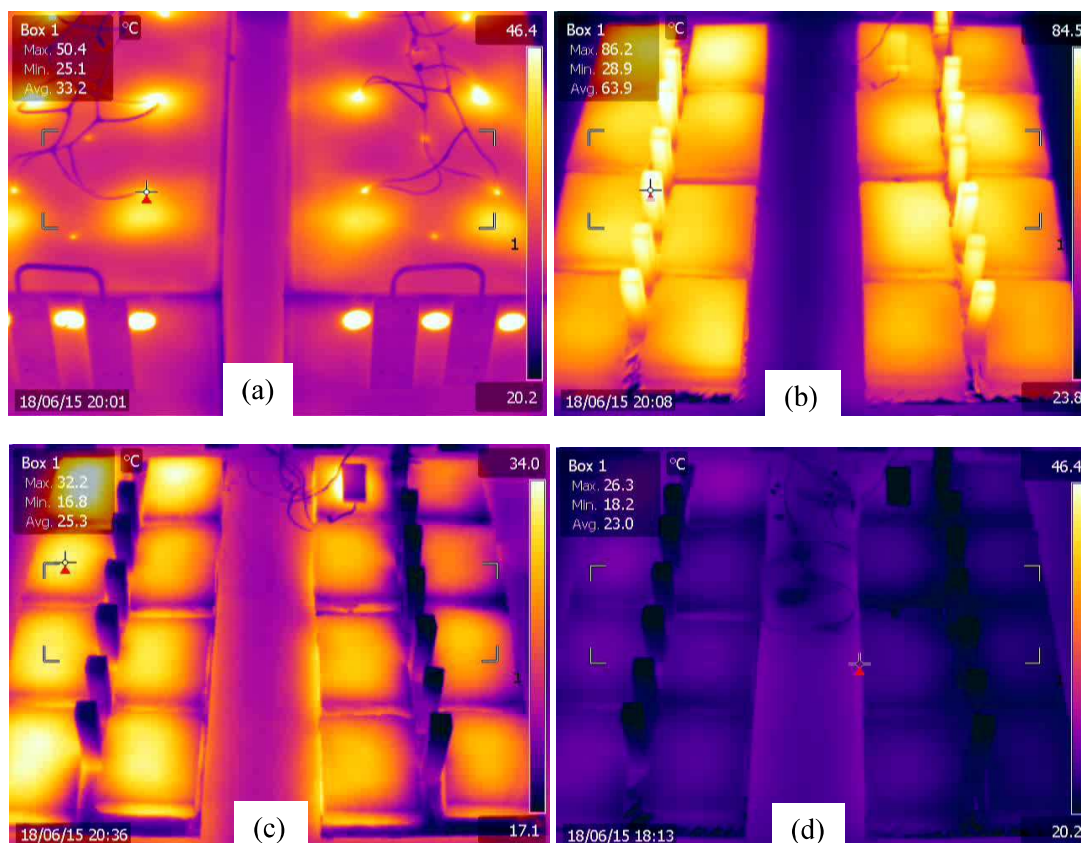


Figura 68 - Avaliação térmica de caixas em aquecimento (a), peças aquecidas (b), em resfriamento (c) e peças resfriadas (d)

3.3.9 Ciclagem nas caixas térmicas

A partir de diversos ensaios preliminares foi possível se ajustar os intervalos de tempo para acionamento das lâmpadas. A temperatura do interior do laboratório foi monitorada ao longo de todos os ciclos térmicos. Tal como na ciclagem da câmara climática se manteve o patamar de 60 min após o aquecimento e posteriormente se iniciou o processo de resfriamento dos revestimentos até a retomada da temperatura ambiente pelo equilíbrio das temperaturas (Figura 69). Ao contrário do adotado no sistema de câmara, neste procedimento o resfriamento foi acelerado por meio de molhagem, o que resulta em um choque térmico por resfriamento nas peças ensaiadas. Este procedimento é especificado pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013), e foi utilizado por outros pesquisadores para o envelhecimento acelerado a partir de exposição térmica (MIRANDA; SELMO, 2003 e ESQUIVEL, 2009). Janotka e Nürnbergerová (2005) observaram que quedas bruscas na temperatura de materiais cimentícios após a elevação da temperatura pode ocasionar degradação. Em seus estudos os autores observaram que

resfriamento rápido foi mais prejudicial do que a elevação da temperatura. Schulson, Swainson e Holden (2001) concluíram que contrações diferenciais entre produtos da hidratação do cimento podem ocorrer devido a resfriamento. Um novo ciclo somente foi iniciado quando constatada as condições de equilíbrio de temperatura em todos os meios monitorados. O ciclo térmico foi determinado de forma que permitiu uma variação térmica na superfície do revestimento, com temperatura mínima de (20 ± 5) °C e média máxima no patamar de (85 ± 3) °C, o que atende o requisito da norma e é coerente com o especificado por outros autores (CARÉ, 2008; JANOTKA; NÜRNBERGEROVÁ, 2005; ZENG *et al.*, 2012 e SHUI *et al.*, 2010).

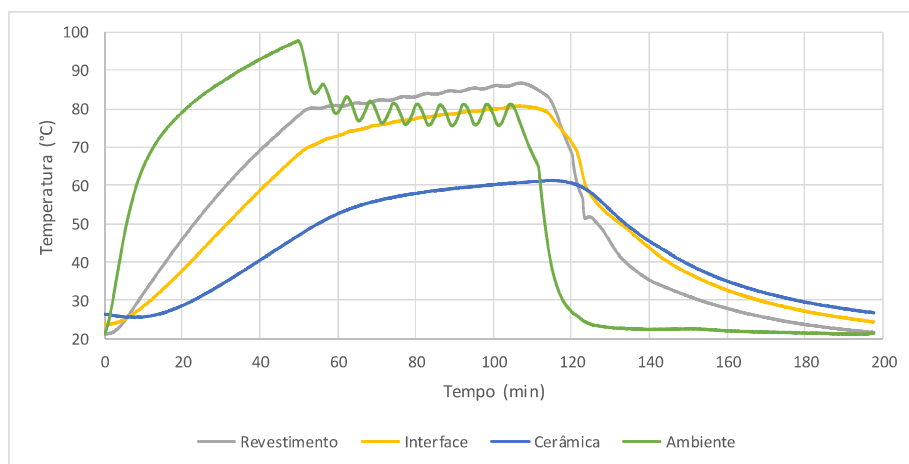


Figura 69 - Forma do ciclo térmico (ciclo 34)

Nesse método de ciclagem a energia térmica é conduzida de forma unidirecional, diferente daquela produzida na câmara climática. O aquecimento do material é produzido por indução a partir da superfície do revestimento até atingir a interface com o substrato e posteriormente aquecendo a cerâmica. Com o tempo de aquecimento de 60 min, um patamar de 60 min e um resfriamento de aproximadamente 60 min, cada ciclo teve uma duração estimada em 240 min. O resfriamento ocorreu com uso de um aspersor de água manual (Figura 70), que permitiu a aspersão a partir de um jato contínuo sobre os revestimentos. Foram produzidos um total de 40 ciclos e todos os revestimentos foram ciclados ao mesmo tempo.

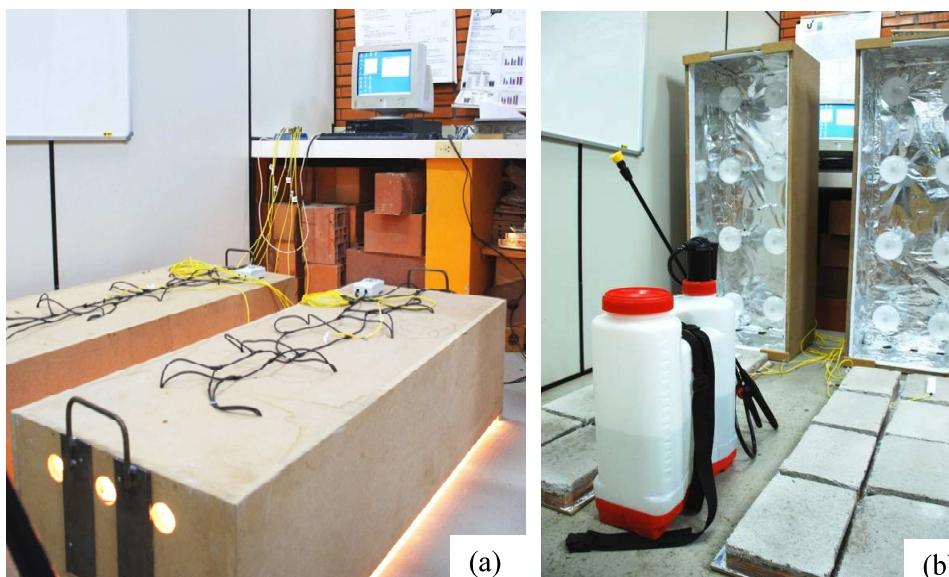


Figura 70 - Ciclagem em andamento, aquecimento (a) e resfriamento com aspersão de água (b)

3.3.9.1 Monitoramento simultâneo das temperaturas nos revestimento com 2 e 9,5 % de fíler

O monitoramento das temperaturas do revestimento com o teor de fíler de 2 % e o acompanhamento simultâneo do revestimento com teor de fíler de 9,5 % possibilitou reconhecer diferenças de condutividade térmica e diferenças entre gradientes térmicos ocasionados pela diferença de temperatura entre a superfície do revestimento e a interface do revestimento com a base cerâmica. Através dos resultados do gráfico da Figura 71 foi possível identificar a influência mais significativa das variações de temperatura no revestimento que possui 2% de fíler. Apesar do maior ganho de temperatura na superfície do revestimento que contém 2% de fíler, se comparado com o de 9,5 % de fíler, na fase de resfriamento esse revestimento demonstra significativamente maior queda na temperatura da superfície, o que sugere maior condutividade térmica. A Tabela 19 apresenta os valores de temperaturas registrados nos tempos 30, 60 e 120 min, nas fases de aquecimento, patamar e resfriamento respectivamente. Os valores de resfriamento apresentam aproximadamente 82% de diferença entre os gradientes térmicos desses revestimentos.

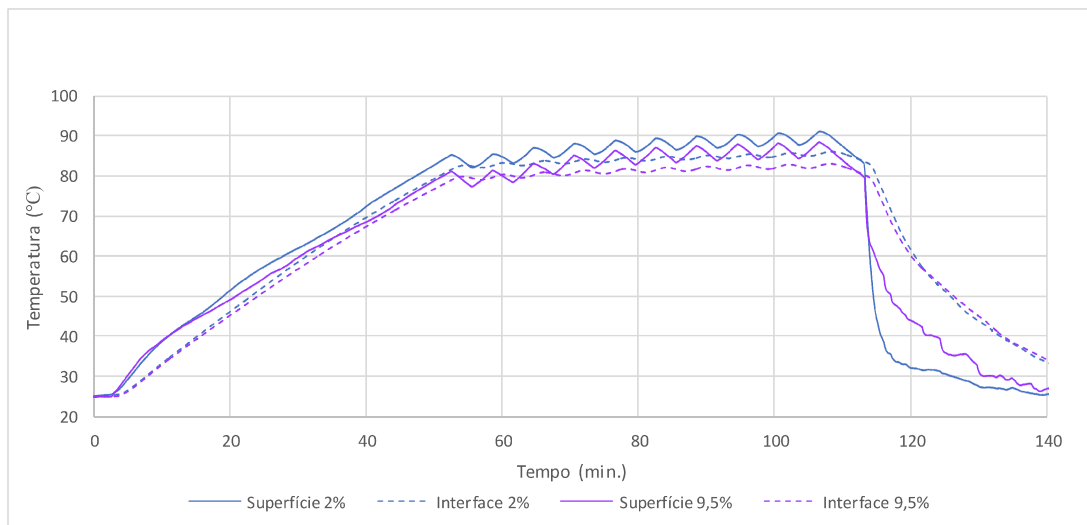


Figura 71 - Temperaturas durante a ciclagem nas caixas térmicas, superfícies dos revestimentos (úmida) e interface revestimento/cerâmica.

Tabela 19 - Determinações de temperaturas do ciclo nas caixas térmicas, nos tempos 30, 60 e 120 min.

Teor filer (%)	2			9,5		
Tempo (min)/Fase do ciclo	Temperatura Superficial (°C)	Temperatura Interface (°C)	Gradiente térmico (°C)	Temperatura Superficial (°C)	Temperatura Interface (°C)	Gradiente térmico (°C)
30 (Aquecimento)	61,87	58,50	3,37	59,65	56,76	2,89
60 (Patamar)	84,78	83,21	1,57	80,02	80,31	0,29
120 (Resfriamento)	32,10	61,73	29,63	43,98	60,24	16,26

3.3.9.2 Variação de temperatura durante a etapa de resfriamento em função do teor de umidade nos revestimentos

O gráfico da Figura 72 demonstra o comportamento da superfície e da interface dos revestimentos (2 e 9,5% de filer) na condição seco (expostos ao ar) e o gráfico da Figura 73 os revestimentos com os mesmos teores de filer na condição úmido (após aspersão de água), evidenciando as diferenças de comportamento. O comportamento na condição úmida sugere um aumento da condutividade térmica a partir da maior presença da água nos poros dos revestimentos. Na Tabela 20 estão relacionados os gradientes térmicos desses revestimentos nas duas condições, nos tempos 10, 20, 30 e 40 min. de aquecimento. Maiores gradientes térmicos associados a uma exposição de maior período de tempo podem ocasionar mais degradação por tensões diferenciais.

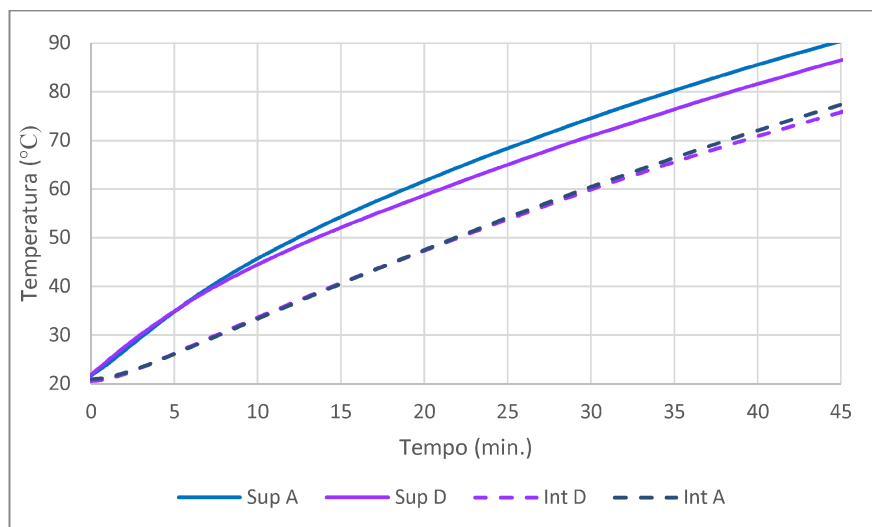


Figura 72 - Aumento da temperatura dos revestimentos expostos ao ar.

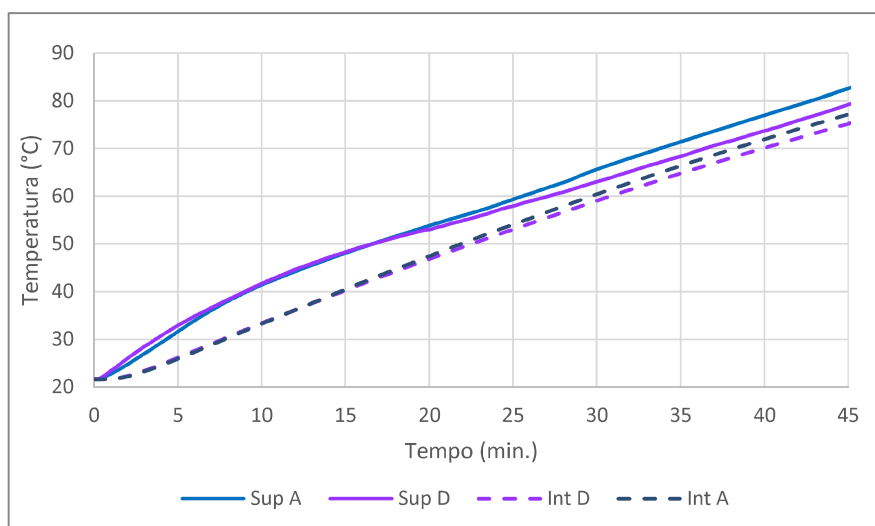


Figura 73 - Aumento da temperatura dos revestimentos após aspersão de água

Tabela 20 - Gradientes térmicos nas condições: seco (ao ar) e úmido (após aspersão de água)

Teor de filler (%)	2			9,5		
	Gradiente térmico úmido (°C)	Gradiente térmico seco (°C)	Diferença (%)	Gradiente térmico úmido (°C)	Gradiente térmico seco (°C)	Diferença (%)
10	8,09	12,28	31	8,19	10,78	25
20	6,36	14,17	55	6,17	11,36	45
30	5,17	14,07	65	3,95	11,03	63
40	5	13,45	66	3,55	10,66	63

3.3.9.3 Monitoramento da temperatura ambiente

Durante todo o processo de ciclagem nas caixas térmicas o ambiente foi monitorado por um sensor Tinytag TGU-4500, que possibilita a leitura de temperaturas -25 até +85 °C e

umidade relativa de 0 até 95 %. Exemplos do microclima durante os ensaios são visualizados nas Figuras 74 e 75.

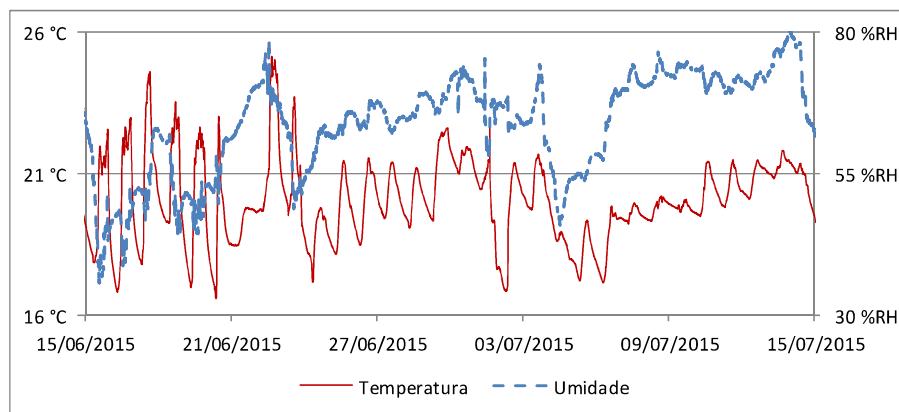


Figura 74 – Microclima da sala ao longo do período de ciclagem

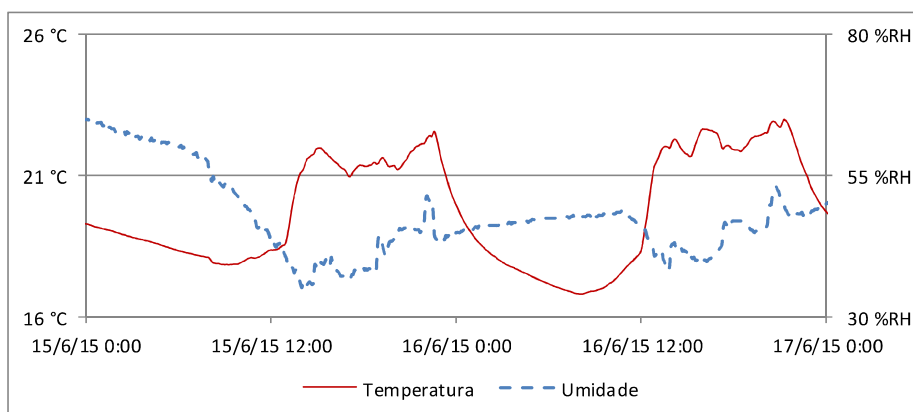


Figura 75 – Microclima da sala ao longo do período de dois dias

O acompanhamento demonstra que houve variações de umidade e de temperatura, contudo, houve pequena influência do calor liberado pelo processo de resfriamento na elevação da temperatura do ambiente. Avaliando-se todos os gráficos obtidos ao longo dos ciclos térmicos concluiu-se que as variações ambientais não causaram variações significativas na velocidade de aquecimento e de resfriamento e tão pouco afetaram o equilíbrio das temperaturas para a retomada do ciclo seguinte, já que as quedas de temperatura ocorrem em períodos após a ciclagem e as maiores quedas de temperaturas são registradas nos momentos em que as atividades estavam interrompidas.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esse capítulo é composto pelos resultados obtidos nos ensaios do estado endurecido que incluem prismas e revestimentos confeccionados com as argamassas submetidas a ciclos térmicos através de dois métodos de ciclagem distintos, além das respectivas referências não submetidas aos ciclos térmicos.

4.1 INFLUÊNCIA DAS DUAS FORMAS DE CICLAGEM TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS

Os métodos de ensaios determinados para a avaliação dos revestimentos buscam fazer uma comparação entre os revestimentos não ciclados, ciclados na câmara climática e ciclados nas caixas térmicas e as diferentes influências causadas pelas ciclagens em função das diferentes adições de fíler.

Inclui-se nesses um método desenvolvido para o diagnóstico das diferenças causadas por influência da ciclagem térmica na forma de ruptura dos revestimentos e para apontar o mais eficiente método para o envelhecimento entre os dois testados.

4.1.1 Propagação de ondas por ultrassom

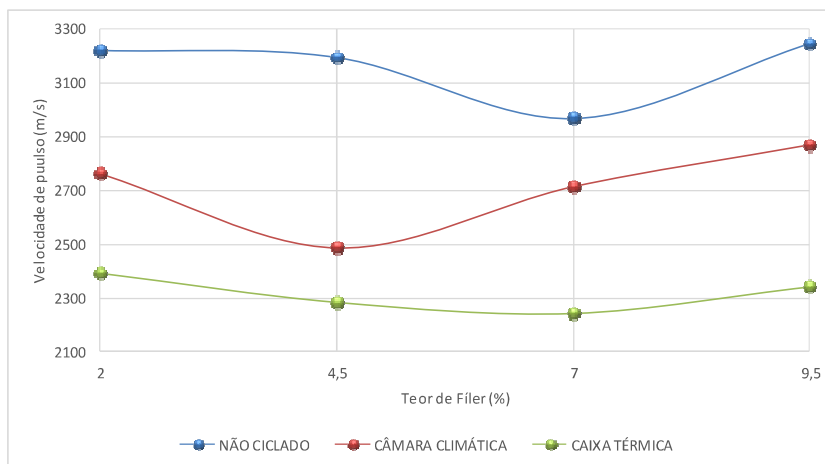


Figura 76 - Velocidade de pulso da onda ultrassônica nos revestimentos

A variação de velocidade de onda em cada situação de análise (não ciclado e os dois tipos de ciclagem térmica) é de até 279 m/s. Apesar desta dispersão, são observadas diferenças entre as leituras nas três situações (Figura 76), indicando perda na velocidade de propagação da onda ultrassônica em função das ciclagens térmicas, possivelmente decorrentes de um aumento na quantidade de vazios resultante do processo de degradação dos revestimentos. Não foram

encontradas diferenças significativas entre os diferentes traços, provavelmente em função de restrições da metodologia, que não é capaz de distinguir pequenas diferenças de densidade entre os exemplares.

4.1.2 Massa específica através do método da picnometria

Os resultados apurados estão expressos na Tabela 21.

Tabela 21 - Massa específica (g/cm³) pelo método de picnometria

Filer (%)	2	Desvio padrão (g/cm ³)	4,5	Desvio padrão (g/cm ³)	7	Desvio padrão (g/cm ³)	9,5	Desvio padrão (g/cm ³)
Revestimento não ciclado	2,546	0,0019	2,546	0,0022	2,557	0,0022	2,531	0,0022
Revestimento ciclado na câmara climática	2,547	0,0017	2,545	0,0022	2,538	0,0025	2,513	0,0026
Revestimento ciclado nas caixas térmicas	2,549	0,0030	2,551	0,0036	2,552	0,0016	2,552	0,0030

Apesar dos indícios de aumento de porosidade observados nos itens anteriores, a ciclagem não resultou em diferenças de massa específica detectáveis entre os diferentes revestimentos, mesmo após a exposição aos ciclos térmicos.

4.1.3 Absorção inicial de água

Foram analisadas as primeiras duas horas de absorção inicial em todos os revestimentos.

Nos revestimentos não ciclados é observado um aumento na velocidade de absorção inicial conforme é acrescentado filer à argamassa (Figura 77). Esses resultados indicam um aumento no índice de poros responsáveis pela sucção de água nos revestimentos com o aumento do teor de filer. As características da absorção desses revestimentos constam na Tabela 22.

Tabela 22 - Características da absorção inicial dos revestimentos não ciclados

Tipo de revestimento	Coefficiente de determinação (r ²)	Equação da reta
2% de filer	0,9900	y = 0,0121x + 0,0154
4,5% de filer	0,9946	y = 0,0142x + 0,0175
7% de filer	0,9894	y = 0,0174x + 0,0148
9,5% de filer	0,9997	y = 0,0212x + 0,0190

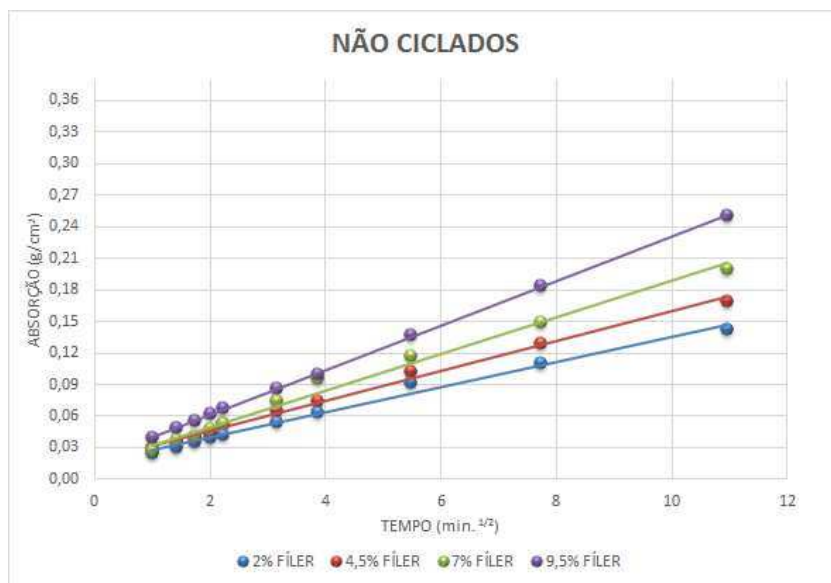


Figura 77 – Absorção inicial dos revestimentos não ciclados

A absorção inicial dos revestimentos submetidos à ciclagem térmica na câmara climática (Figura 78) mostram semelhança de comportamento para todos os revestimentos, demonstrando que esse método de ciclagem não apresenta agressividade suficiente para causar diferenças significativas na absorção inicial dos revestimentos. Essa mesma conclusão foi observada nos ensaios de resistências de aderência à tração e análise da forma de ruptura. As características da absorção inicial dos revestimentos ciclados na câmara climática são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 - Características da absorção inicial dos revestimentos ciclados na câmara climática

Tipo de revestimento	Coefficiente de determinação (r^2)	Equação da reta
2% de fíler	0,9926	$y = 0,0125x + 0,0048$
4,5% de fíler	0,9952	$y = 0,0139x + 0,0135$
7% de fíler	0,9720	$y = 0,0166x + 0,0235$
9,5% de fíler	0,9995	$y = 0,0236x + 0,0163$

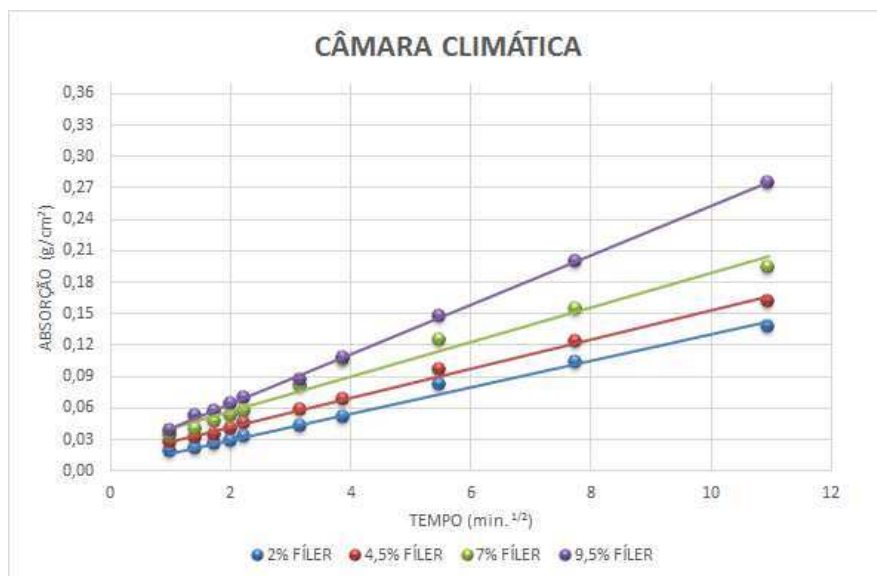


Figura 78 – Absorção inicial dos revestimentos ciclados na câmara climática

Os revestimentos ciclados nas caixas térmicas, ao contrário daqueles submetidos a envelhecimento acelerado em câmara climática, apresentam resultados entre si. Houve um aumento da absorção inicial para os revestimentos que possuem os menores teores de fíler, indicando que houve um aumento no índice dos poros capilares responsáveis pela sucção de água (Figura 79 e Tabela 24). Considerando um possível aumento da porosidade, esses resultados confirmam a hipótese de maior degradação desses revestimentos, da mesma forma como observado nos resultados de ensaio de análise da forma de ruptura, que demonstrou maior ocorrência de ruptura nas argamassas. Segundo Caré (2008) tensões térmicas são mais intensas para materiais mais densos, o que pode justificar o comportamento de alteração da capilaridade mais acentuado para os revestimentos que contêm 2 e 4,5 % de fíler. Os dois maiores teores de fíler demonstraram diferentes comportamentos, aquele que possui 7% de fíler manteve o comportamento das amostras de referência e registrou igual velocidade de absorção enquanto que houve uma diminuição da velocidade de absorção para o que possui 9,5% de fíler.

Tabela 24 -- Características da absorção inicial dos revestimentos ciclados nas caixas térmicas

Característica	Coefficiente de determinação	Equação da reta
Revestimentos 2% de fíler	$R^2 = 0,9989$	$y = 0,0275x + 0,0025$
Revestimentos 4,5% de fíler	$R^2 = 0,9987$	$y = 0,0195x + 0,0101$
Revestimento 7% de fíler	$R^2 = 0,9922$	$y = 0,0166x + 0,0167$
Revestimento 9,5% de fíler	$R^2 = 0,9976$	$y = 0,0169x + 0,0031$

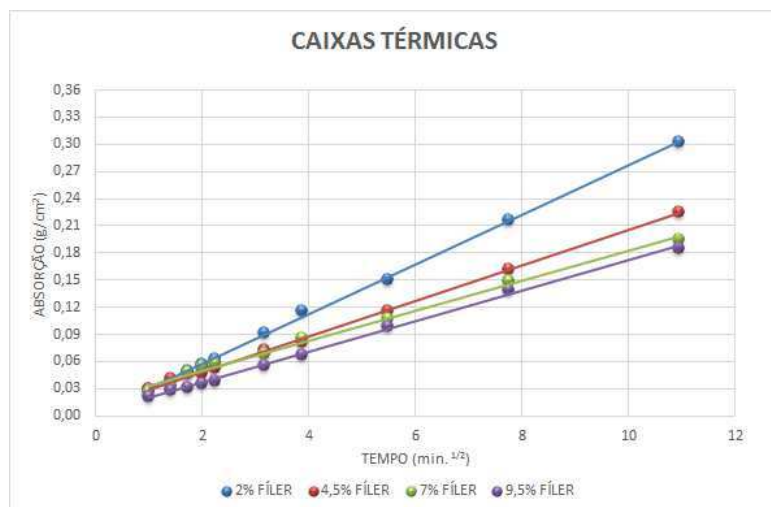


Figura 79 – Absorção inicial dos revestimentos ciclados nas caixas térmicas

4.1.4 Resistência de aderência à tração

Os valores de resistência de aderência são visualizados na Tabela 25 e na Figura 80.

Tabela 25 – Médias das resistências de aderência à tração

Fíler (%)	Não ciclado (NC)			Câmara climática (CC)			Caixa térmica (CT)		
	Leituras	R.A. (MPa)	D. P.	Leituras	R.A. (MPa)	D. P.	Leituras	R.A. (MPa)	D. P.
2,0	12	0,88	0,17	10	1,00	0,31	12	0,93	0,27
4,5	12	0,94	0,32	12	1,16	0,20	13	0,92	0,27
7,0	13	0,77	0,30	10	0,78	0,34	11	0,54	0,26
9,5	12	0,94	0,21	10	0,87	0,33	16	0,57	0,31

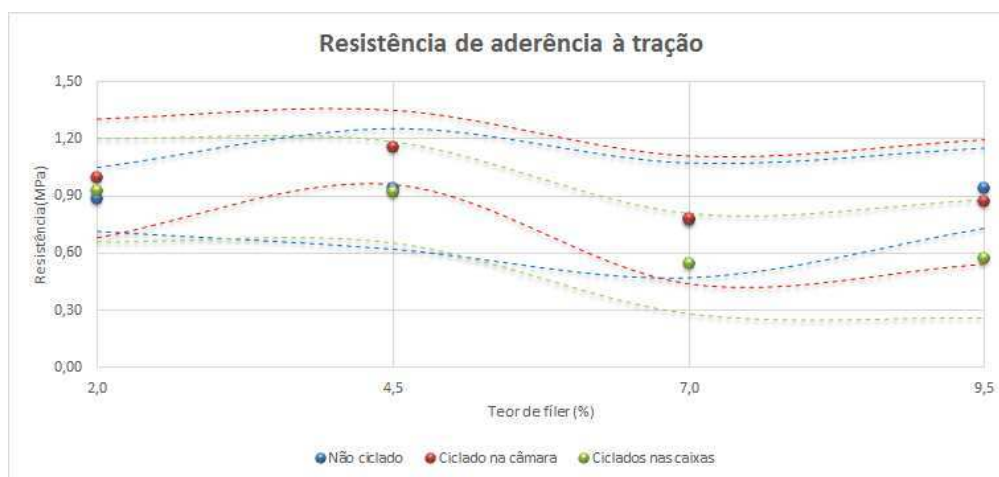


Figura 80 – Médias das resistências de aderência dos revestimentos dentro do universo avaliado

Os valores de resistência de aderência apresentam uma dispersão elevada, com coeficientes de variação na ordem de 0,3 MPa, o que dificulta a avaliação da degradação dos revestimentos. Entretanto, algumas conclusões gerais podem ser realizadas.

Comparando-se os dois métodos de ensaio verifica-se que a ciclagem através do método das caixas térmicas provocou queda nas resistências de aderência dos traços com maior teor de filer, enquanto o método de câmara climática não gerou diferenças significativas de comportamento com relação aos revestimentos não ciclados.

Nota-se que as diferenças de reologia entre as argamassas influenciou a aderência dos revestimentos, sendo observados dois patamares de comportamento, um com resistências maiores para 2 e 4,5% de filer e outro para 7 e 9,5% de filer. A ciclagem através do método com caixas térmicas provocou maior queda nas resistências de aderência dos traços com maior teor de filer.

4.1.4.1 Análise da forma de ruptura

A partir da análise da forma de ruptura foi possível fazer uma avaliação comparativa entre os diferentes revestimentos e as distintas metodologias adotadas para a ciclagem térmica. A Tabela 26 demonstra que os revestimentos possuem boa aderência na interface chapisco/substrato, por apresentar melhores resistências ligadas aos percentuais de ruptura dessa interface e/ou ao rompimento do substrato. Observa-se perda de resistência na argamassa submetida ao método de ciclagem pelas caixas térmicas, onde houve maior percentual de ruptura do revestimento e conseqüentemente diminuição nos percentuais de ruptura da interface chapisco/substrato.

Tabela 26 - Médias das resistências de aderência à tração e médias das características da forma de ruptura

Tipo de exposição	Resistência de aderência à tração (MPa)	Argamassa (%)	Interface Arg./chap. (%)	Interface Chap./subst. (%)	Substrato (%)
Não ciclado	0,83	46,72	42,44	10,23	0,60
Câmara climática	0,85	43,70	44,95	10,98	0,36
Caixa térmica	0,70	58,03	37,40	4,43	0,14

Conforme visualizado na Figura 81, embora as resistências de aderência dos revestimentos não ciclados expressem resultados próximos, sua forma de ruptura é distinta. No revestimento com 2% de filer há 24% de substrato aparente, representando a melhor aderência possível entre a argamassa e o chapisco. A argamassa com o teor de 7% de filer apresentou a

maior queda na resistência de aderência, queda na área de substrato aparente e um aumento da área de chapisco, o que configura perda de aderência na interface argamassa/chapisco.

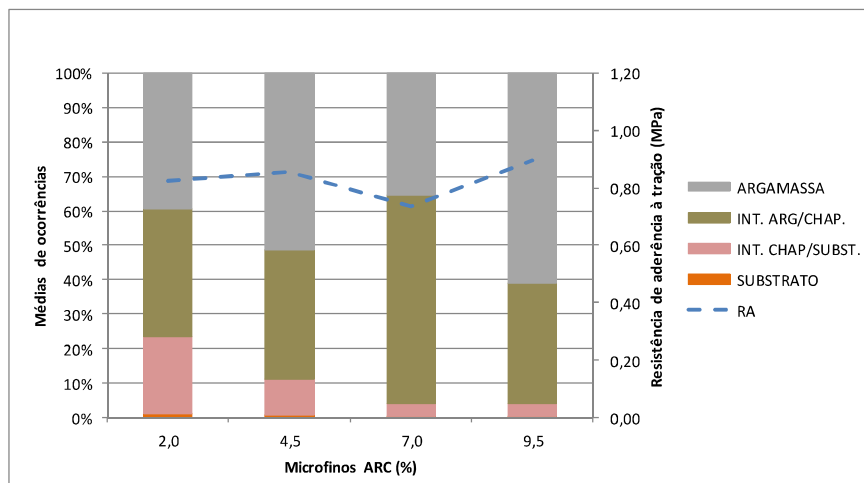


Figura 81 – Resistência de aderência à tração (RA) e forma de ruptura dos revestimentos não ciclados

Comparando-se os valores de resistência de aderência dos revestimentos ciclados na câmara climática (Figura 82) com os encontrados nos revestimentos de referência (não ciclados – Figura 81) observa-se que não há diferenças expressivas entre eles, o que demonstra que a ciclagem térmica na câmara climática não foi suficiente para promover uma degradação significativa. Nos revestimentos ciclados, a área de substrato aparente é maior naqueles com percentuais menores de filer, demonstrando que ainda há boa aderência na interface argamassa/chapisco.

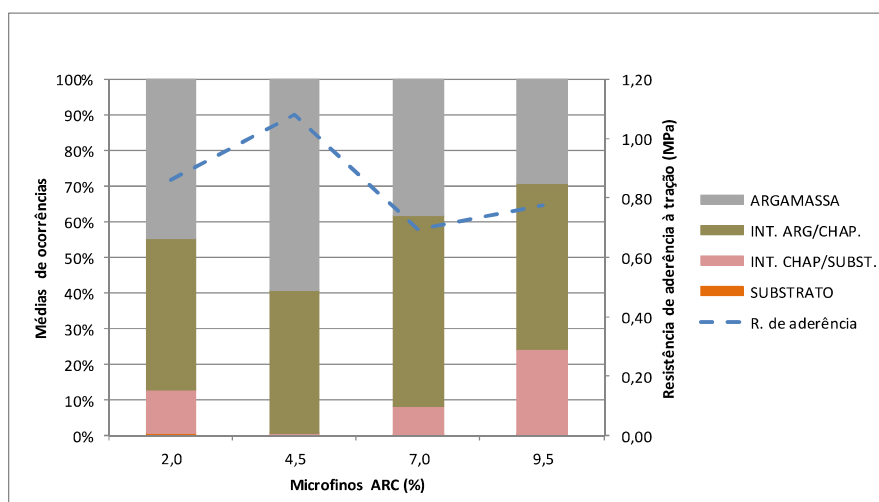


Figura 82 - Resistência de aderência e forma de ruptura dos revestimentos ciclados na câmara climática

Os resultados dos revestimentos submetidos à ciclagem através do método das caixas térmicas são visualizados na Figura 83.

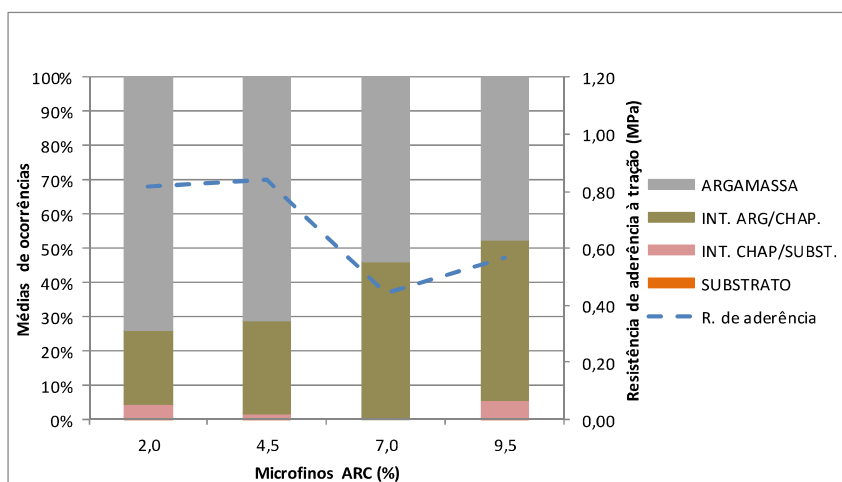


Figura 83 - Resistência de aderência e forma de ruptura dos revestimentos ciclados nas caixas térmicas

A diminuição da área de substrato aparente em todos os revestimentos submetidos à ciclagem térmica através do método das caixas térmicas é consequência da degradação do sistema de revestimento, que passa a apresentar uma resistência a tração inferior à do substrato. O aumento significativo do percentual de ruptura na argamassa de revestimento aponta para uma maior degradação da argamassa nessa forma de ciclagem térmica. Observa-se maior degradação para as argamassas nos revestimentos produzidos com os dois menores teores de filler e uma degradação também na interface argamassa/chapisco para os dois maiores teores de filler, uma vez que há equilíbrio na forma de ruptura argamassa e argamassa/chapisco combinada com uma queda significativa da resistência de aderência à tração.

Zeng et al. (2012) observaram menor degradação com o aumento da porosidade, em função do CET diminuir em argamassas mais porosas. As argamassas com maior teor de filler apresentaram maior índice de vazios e menor densidade (vistos na Tabela 17), que podem ter diminuído a restrição à deformação decorrente dos ciclos de aquecimento e/ou resfriamento no interior do revestimento, o que explica a menor degradação no interior da argamassa desses revestimentos.

4.1.4.2 Avaliação de extensão de falhas na interface argamassa/chapisco

Foram observadas falhas na extensão de aderência em todas as amostras. Dentre as possíveis causas para este comportamento, a que parece mais provável é a falta de uniformidade na energia de aplicação do revestimento, realizado pela caixa de queda. As falhas ocorreram em menor quantidade nas argamassas com 2% de filler, o que pode estar relacionado com o teor

de ar incorporado (Tabela 28). Devido à irregularidade da ocorrência das falhas na área central da amostra, não se pode fazer essa mesma correlação Tabela 27.

Tabela 27 - Médias das falhas de aderência e resistências de aderência à tração

Método	Resistência de aderência à tração (MPa)	F. L. C. Falha linear central (%)	F. L. P. Falha linear periférica (%)
Não ciclado	0,83	33,87	50,74
Câmara climática	0,85	33,34	47,55
Caixa térmica	0,70	40,87	54,93

Tabela 28 – Médias das falhas na extensão de aderência argamassa/chapisco

Filer (%)	Não cicladas (%)	Câmara climática (%)	Caixas térmicas (%)
2	24,50	26,49	20,24
4,5	48,88	40,80	66,53
7	69,07	72,12	62,98
9,5	60,49	47,62	77,34

Foi observado um aumento das falhas de extensão de aderência, tanto nas medidas das leituras efetuadas na região central do corpo de prova quanto nas medições efetuadas nas bordas, para os revestimentos ciclados nas caixas térmicas. Esse resultado é coerente com a hipótese de maior degradação das argamassas através desse método de ciclagem se considerar a maior queda nas médias dos resultados de resistência de aderência também nesse método.

4.1.5 Estudo comparativo entre resistência de aderência à tração (RA), extensão de aderência e forma de ruptura

As médias dos resultados entre não ciclados e os dois métodos de ciclagens pode ser visualizada na Figura 84.

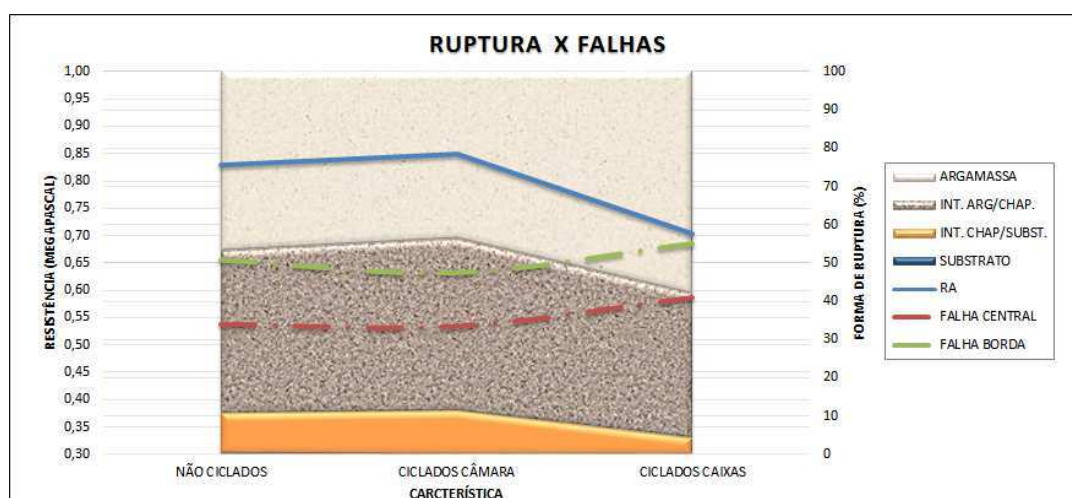


Figura 84 – Médias dos resultados entre não ciclados e os dois métodos de ciclagens

A mensuração da perda de extensão de aderência demonstra que uma grande parcela delas surgiu antes da ciclagem dos revestimentos, muito embora haja um aumento na quantificação dessas falhas a partir do processo de ciclagem nas caixas térmicas indicando que houve maior degradação da interface argamassa/chapisco. Esse fato associado ao aumento da quantidade de argamassa rompida corrobora a conclusão de que há um aumento da degradação do sistema de revestimento através desse método de ciclagem térmica.

4.2 INFLUÊNCIA DA CICLAGEM NO MÉTODO DAS CAIXAS TÉRMICAS NOS REVESTIMENTOS

A partir da constatação de que o processo de ciclagem promovido pelas caixas térmicas é o mais agressivo, permitindo a comparação da deterioração nos diversos tipos de revestimento utilizados, julgou-se conveniente uma exploração mais apurada a respeito da influência desse ensaio nas propriedades dos revestimentos. O estudo foi realizado a partir da determinação da absorção de água dos revestimentos não ciclados e dos submetidos à ciclagem nas caixas térmicas, e da estimativa da quantidade de vazios dos revestimentos com teor de 2 e 9,5% de fíler. A verificação da absorção de água foi considerada por Caré (2008) uma importante propriedade para a avaliação do envelhecimento, juntamente com ensaios de PIM.

4.2.1 Absorção de água total

Os resultados da absorção total de água são mostrados na Tabela 29. Os resultados demonstram um aumento de porosidade para os teores de 2 e 4,5% de fíler em relação aos mesmos teores dos revestimentos não ciclados e a manutenção da porosidade para os revestimentos com 7 e 9,5% de fíler.

Tabela 29 - Absorção total das amostras não cicladas e caixa térmica

Característica	Unidade	Teor de fíler (%)			
		2	4,5	7	9,5
Não ciclado	g/cm ²	0,490	0,461	0,760	0,648
Caixa térmica	g/cm ²	0,780	0,754	0,763	0,624

4.2.2 Estimativa da quantidade de vazios nas argamassas

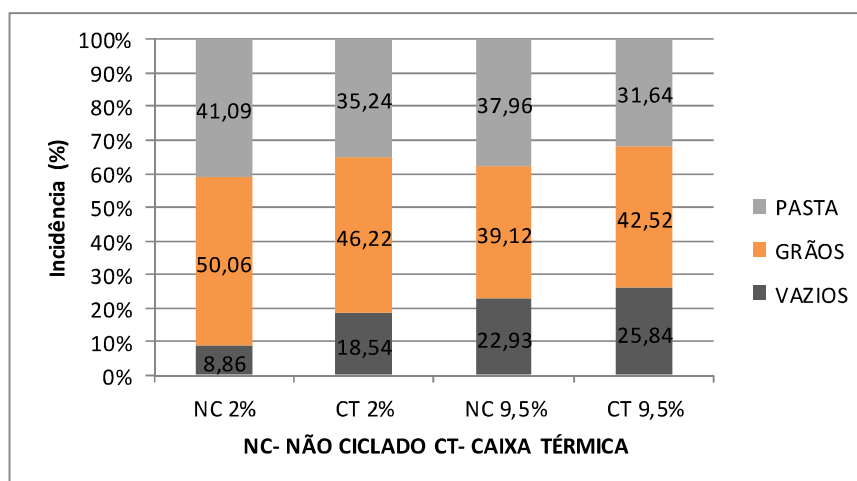


Figura 85 - Presença de vazios em revestimentos ciclados e não ciclados

Observa-se na Figura 85 que há um aumento no número de vazios na superfície à medida que se faz acréscimo do teor de fíler e que a ciclagem na caixa térmica proporciona aumento na quantidade de poros. Esse resultado é coerente com o aumento do teor de ar incorporado observado no estado fresco e com a perda das propriedades mecânicas observada no estado endurecido com o aumento no teor de fíler. A análise da forma de ruptura indica maior degradação nas argamassas com 2% de fíler.

4.2.3 Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão

Na Figura 86 e na Tabela 30 são observados os resultados da avaliação do índice esclerométrico dos revestimentos avaliados.

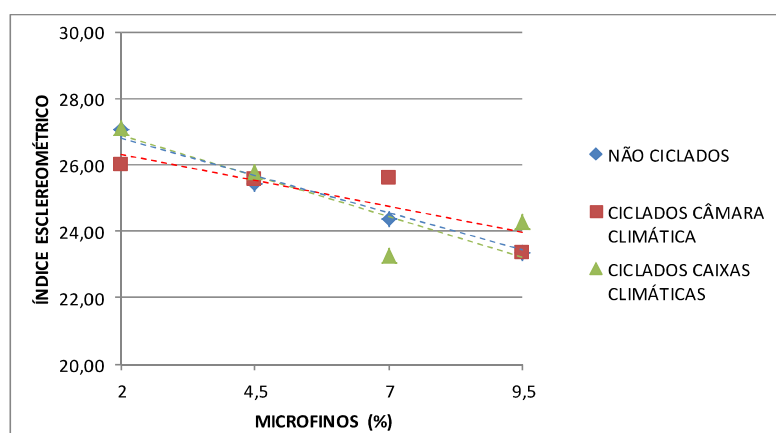


Figura 86 - Índice esclerométrico

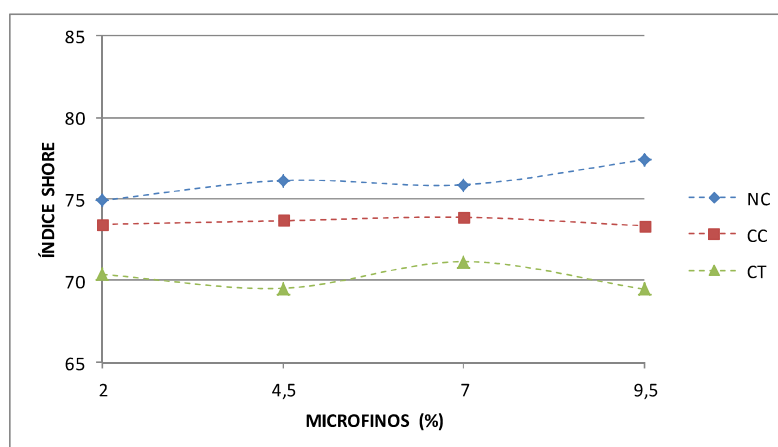
Tabela 30 - Características da esclerometria

Característica	Coefficiente de determinação	Equação da reta
Revestimentos não ciclados	$R^2 = 0,9840$	$y = -0,4878x + 27,853$
Revestimentos ciclados em câmara climática	$R^2 = 0,7182$	$y = -0,3139x + 26,933$
Revestimentos ciclados em caixa térmica	$R^2 = 0,7171$	$y = -0,4444x + 27,67$

Não foi possível identificar diferenças entre os revestimentos por meio de esclerometria. Estima-se que a elevada energia de impacto do equipamento se distribuiu ao longo de todo o corpo-de-prova, gerando muito ruído no índice esclerométrico, e impedindo uma análise adequada da camada de revestimento. Contudo, pode-se concluir que o acréscimo de filer contribuiu para a perda da dureza superficial em todos os revestimentos testados.

4.2.4 Análise da dureza superficial com durômetro Shore D

Na Figura 87 são observados os resultados da avaliação de dureza superficial por meio de durômetro Shore tipo D.

**Figura 87 - Dureza superficial, índice Shore D**

Os valores de dureza superficial Shore determinados indicam perda de dureza superficial em função das ciclagens térmicas, e são coerentes com os resultados dos ensaios de resistência de aderência à tração e a análise da forma de ruptura.

4.3 INFLUÊNCIA DA CICLAGEM NO MÉTODO DAS CAIXAS TÉRMICAS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM FORMA DE PRISMA

Os métodos de ensaio relacionados a seguir expressam os resultados de estudos executados com argamassas moldadas em prismas 40x40x160 mm, submetidos ao mesmo processo de ciclagem dos revestimentos. São apresentados resultados de ensaios de resistência de tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e absorção por capilaridade. Embora os corpos-de-prova de argamassa apresentem condições de deterioração

diferentes dos encontrados em revestimentos, os resultados desta análise fornecem informações importantes para um estudo comparativo entre as argamassas.

As variações térmicas ocorridas durante os ciclos de envelhecimento acelerado em caixa térmica constam no gráfico da Figura 88.

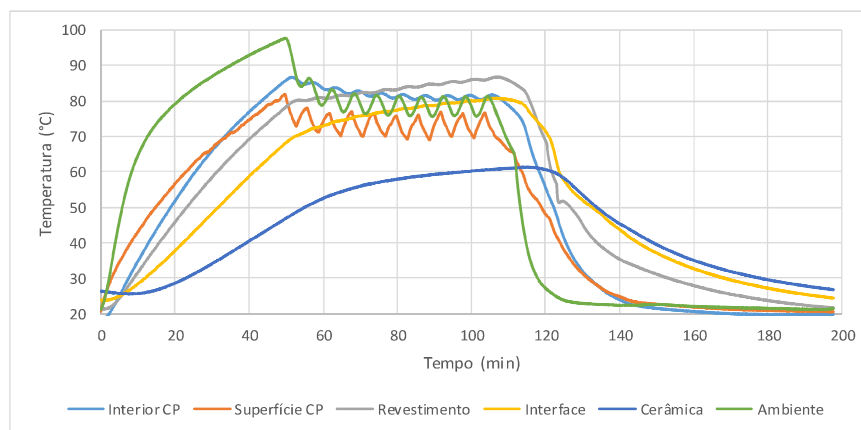


Figura 88 - Monitoramento das temperaturas do revestimento x prisma

A Figura 88 demonstra que os prismas de argamassa sofreram variações térmicas distintas dos revestimentos aplicados sobre o substrato de cerâmica vermelha. No aquecimento, o interior do prisma atinge a temperatura máxima de aproximadamente 85°C por volta de 50 min, enquanto que a interface do revestimento não chega a atingir essa temperatura. Essas temperaturas internas somente estarão emparelhadas aos 110 min. No processo de resfriamento as temperaturas do prisma atingem o equilíbrio com o ambiente aos 160 min enquanto que as do revestimento somente a partir dos 200 min. A oscilação do aquecimento provocada pela intermitência das lâmpadas provoca uma pequena queda na energia térmica do exemplar ao longo do patamar, o que não ocorre com o revestimento que demonstra uma maior capacidade para armazenar essa energia. Verifica-se que há maior condutividade térmica nas argamassas moldadas na forma de prisma e, portanto, um ciclo térmico mais agressivo para essas argamassas. No intervalo entre o desligamento e novo acionamento das lâmpadas, foram registrados gradientes térmicos que diferem em quase duas vezes entre os prismas e os revestimentos (Tabela 31): os prismas apresentam uma variação média de 12 °C e os revestimentos de 6 °C em cada intervalo.

Tabela 31 - Gradiente térmico nos prismas de argamassa e nos revestimentos, durante o patamar

Tempo (min.)	Interior CP (°C)	Superfície CP (°C)	Revestimento (°C)	Interface (°C)
82,72	81,39	69,20	84,05	77,88
88,72	81,16	68,97	84,78	78,70
94,75	81,25	70,00	85,50	79,50
Médias	81,27	69,39	84,78	78,69
Gradiente (°C)	11,88		6,08	

4.3.1 Densidade de massa

Observa-se que a ciclagem térmica gera uma diminuição na densidade de massa das argamassas, e que há um crescente aumento na diferença de densidade entre as argamassas não cicladas e cicladas, na medida em que se aumenta o teor de fíler na argamassa (Figura 89).

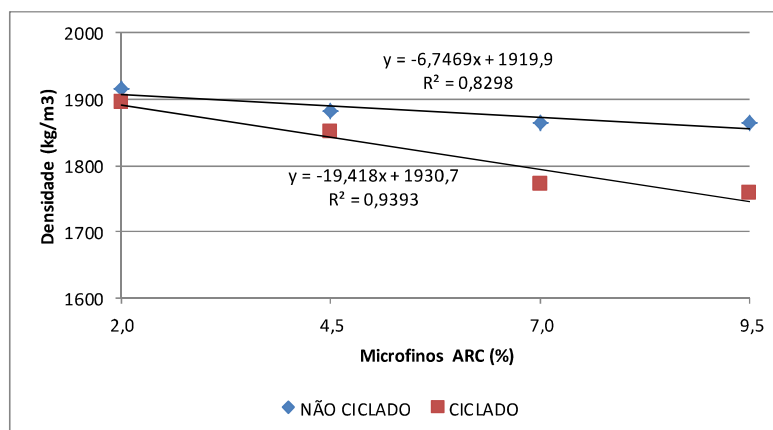


Figura 89 - Densidade de massa - ciclado e não ciclado

4.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Os módulos de elasticidade das argamassas antes e após a ciclagem são observados na Figura 90.

Todas as argamassas são constituídas pelos mesmos materiais, e as diferenças de módulo de elasticidade dinâmico são causadas pela adição do fíler e a sua contribuição para a mudança do volume de vazios das argamassas.

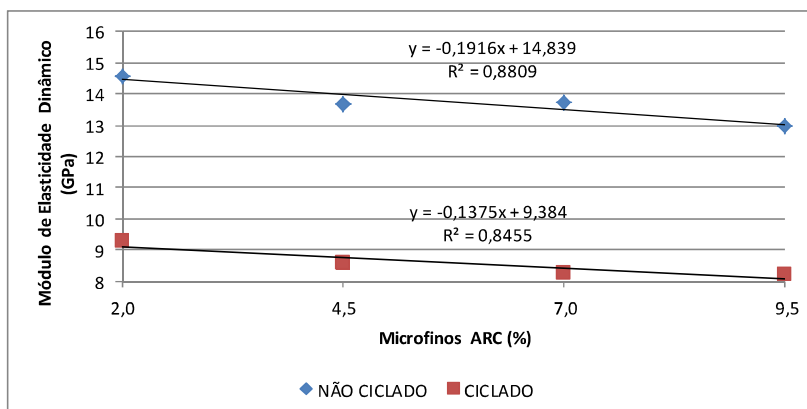


Figura 90 - Módulo de elasticidade dinâmico - ciclado e não ciclado

Observa-se que a ciclagem térmica gera uma expressiva diminuição no módulo de elasticidade das argamassas (perdas na ordem de 40 %), e que há uma tendência de queda com o acréscimo de fíler. O comportamento está coerente com as observações de Janotka e Nürnbergerová (2005), os autores também observaram diminuição no módulo de elasticidade dinâmico após tratamento térmico.

4.3.3 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão dos prismas de argamassa é visualizada na Figura 91.

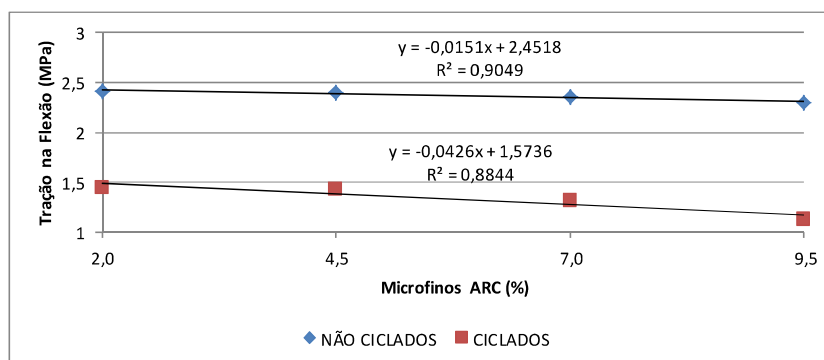


Figura 91 - Resistência de tração na flexão - ciclado e não ciclado

Observa-se uma tendência de perda da resistência à tração na flexão com o acréscimo do teor de fíler em função dos ciclos térmicos e, da mesma forma como ocorrido nos corpos-de-prova de referência, esse comportamento se acentua mais nos maiores teores de adição. Os resultados são coerentes com os encontrados para a densidade e o módulo de elasticidade dinâmico. Zeng et al. (2012) conclui que o CET, indicador da capacidade de deformação, aumenta com a diminuição da porosidade, que no caso em questão se relaciona diretamente com o aumento do teor de fíler. Portanto, o aumento do teor de fíler gera maiores

tensões térmicas e conseqüente perda da resistência. Outro aspecto importante na degradação ocorre devido ao processo de molhagem das amostras adotado para a etapa de resfriamento. Ghabezloo, Sulem e Saint-Marc (2009) afirmam que a pressurização térmica do fluido existente nos poros da argamassa é um aspecto importante no acúmulo de tensões no processo térmico, que gera significativas diferenças entre as resistências à compressão entre amostras cicladas e não cicladas por gradiente térmico.

4.3.4 Resistência à compressão

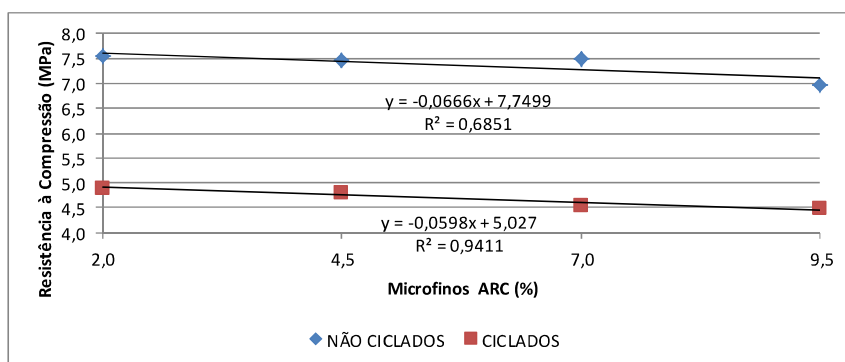


Figura 92 - Resistência à compressão - ciclado e não ciclado

Seguindo a mesma tendência de comportamento dos resultados do ensaio de resistência de tração na flexão, os resultados do ensaio de resistência à compressão demonstram perdas de resistência em todas as argamassas (Figura 92).

4.3.5 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

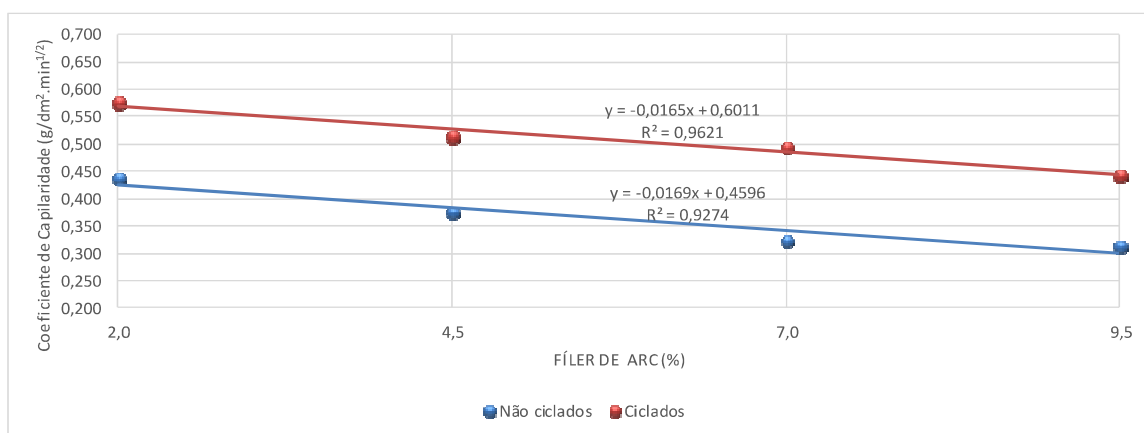


Figura 93 - Absorção de água por capilaridade - ciclado x não ciclado

Os resultados de absorção capilar apontam para um incremento na porosidade capilar após a ciclagem térmica Figura 93. Houve um aumento na capilaridade de forma equivalente para todos os teores de filler adotados.

Observa-se, para os ensaios com prismas de argamassa, coerência entre todos os ensaios realizados, ao contrário do ocorrido nos ensaios com as mesmas argamassas na forma de revestimento aplicado sobre substrato de cerâmica vermelha.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos desse trabalho, foram executados dois métodos de envelhecimento acelerado para argamassas de revestimento e avaliados os efeitos dos sucessivos ciclos térmicos. Considerando-se os métodos de ensaio adotados e as restrições do programa experimental dessa pesquisa, é possível fazer as seguintes considerações:

Com relação aos métodos de envelhecimento acelerado utilizados:

- O método da ciclagem através das caixas térmicas com simulação de chuva provou ser o mais eficiente método para envelhecimento acelerado, capaz de gerar degradação em todos os revestimentos e prismas testados.

- A simulação de chuva adotada para o processo de ciclagem das caixas térmicas, causando choque térmico por resfriamento, permite o resfriamento da superfície do revestimento em aproximadamente 90 min. A câmara climática, que não se utiliza de choque térmico, tem um ciclo de resfriamento mais longo, de 180 min.

- Os gradientes térmicos ocorridos na superfície do revestimento e na interface revestimento/substrato pouco alteraram as características dos revestimentos. A ausência de uma fissuração expressiva é comprovada pelos ensaios de massa específica por picnometria.

- Observaram-se diferenças expressivas no comportamento das argamassas testadas na forma de prisma em todos os teores de filler, a partir da ciclagem térmica no método de caixas térmicas. Em comparação com as argamassas de referência, essas argamassas mantiveram suas tendências de comportamento, no entanto, houve perda significativa em todas as propriedades.

Com relação às propriedades adotadas para a avaliação do envelhecimento das argamassas e revestimentos:

- O ensaio de ultrassom se mostrou adequado para avaliar a degradação dos revestimentos, distinguindo claramente os exemplares de referência daqueles submetidos aos dois tipos de ciclagem térmica, que apresentaram grandes diferenças de velocidade de propagação de onda. As diferenças de densidade entre os revestimentos de referência, entretanto, não são detectáveis por esta técnica.

- A determinação da resistência de aderência do revestimento não se mostrou uma técnica adequada para a avaliação da deterioração dos revestimentos ao longo dos ciclos de ensaio. O método desenvolvido para a análise da forma de ruptura, por sua vez, permitiu a avaliação do efeito dos ciclos de envelhecimento acelerado nos diferentes revestimentos submetidos a ciclagem. Observou-se maior degradação nos revestimentos com os dois menores teores de fíler, no processo de ciclagem pelas caixas térmicas.

- A determinação da absorção inicial de água permitiu a detecção da degradação dos revestimentos com os teores de 2 e 4,5% de fíler, depois de terem sido submetidos a ciclagem nas caixas térmicas. Nesse método, houve inversão do comportamento, pois os revestimentos com as menores velocidades de absorção, após essa ciclagem apresentaram as maiores velocidades. Acredita-se que a degradação desses revestimentos resultou em incremento na quantidade de poros capilares.

- A absorção de água total dos revestimentos é proporcional ao nível de degradação dos revestimentos. Foram constatadas maiores absorções em todos os revestimentos depois da ciclagem nas caixas térmicas.

- A avaliação pelo esclerômetro de reflexão mostra que, nas argamassas não cicladas, existe uma diminuição da dureza superficial à medida que se aumenta o teor de fíler. Entretanto, o método não permitiu a detecção de variações de dureza superficial nos revestimentos em função das ciclagens. A ineficácia do método possivelmente é decorrente da excessiva energia aplicada na percussão e da pequena espessura do sistema formado por revestimento e substrato.

- O ensaio de dureza superficial com durômetro Shore D mostrou uma pequena perda de dureza entre os revestimentos expostos à câmara climática e os não ciclados e maior perda para o ciclado nas caixas térmicas, porém não foi capaz de detectar diferenças entre os diferentes teores de fíler. É possível que a rugosidade superficial das amostras tenha prejudicado as leituras pelo instrumento.

Com relação ao desempenho dos revestimentos:

- Através do estudo da compacidade, verifica-se que a composição granulométrica adotada na produção das argamassas, a partir da adição de fíler de ARC, pode resultar em melhora nas propriedades das argamassas até determinado limite (7% de adição), a partir do qual há perda de trabalhabilidade e propriedades mecânicas.

- O acréscimo de filer de ARC nas argamassas exige, para a manutenção da trabalhabilidade, que sejam adotadas medidas de compensação, como o uso de aditivo plastificante. O aumento do teor de ar incorporado, ocasionado pelo maior consumo de aditivo superplastificante, diminui a densidade de massa das argamassas.

- O teor de adição de 4,5% de filer de ARC resultou na argamassa mais trabalhável. A partir de 7% o comportamento da argamassa começa a ficar comprometido e com 9,5% há sensível perda de trabalhabilidade, verificada por meio do ensaio de squeeze flow. O aumento excessivo da coesão e a falta de compacidade produzida pelo excessivo acréscimo de filer, no teor de 9,5%, aparentemente são os responsáveis pela trabalhabilidade inadequada encontrada nesta argamassa.

- A densidade de massa não é um parâmetro eficiente para a caracterização das argamassas. Outros ensaios como a determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmica demonstraram maior sensibilidade para avaliar as argamassas.

- A porosidade total influencia as resistências mecânicas das argamassas. Embora o acréscimo de filer tenha auxiliado no preenchimento dos espaços vazios este não foi suficiente para aumentar a resistência mecânica.

- O aumento no teor de filer de ARC resulta em menor absorção de água por capilaridade, embora o ensaio de porosimetria tenha indicado um aumento da porosidade total da argamassa. Este fenômeno pode ser explicado pela influência da maior incorporação de ar e o aumento do número de poros de maiores dimensões.

- A variação da energia de aplicação do revestimento influencia significativamente o surgimento de falhas na extensão de aderência na interface chapisco/substrato. Apesar da observação de falhas que diminuem a extensão de aderência, não foi possível relacionar esta propriedade com as médias das resistências de aderência a tração ou com a perda de propriedades devido ao processo de ciclagem térmica (o único procedimento em que ficou evidenciada a maior perda de extensão de aderência foi a ciclagem por caixas térmicas). Somente houve alguma relação entre a extensão de aderência e a resistência de aderência nos revestimentos com os dois maiores teores de filer.

- O revestimento com adição de 2% de filer de ARC possui o menor índice de vazios antes da ciclagem. Entretanto, em função do aumento desses vazios por degradação ao longo da ciclagem, observa-se que após a ciclagem este revestimento é o que apresenta a maior quantidade de vazios.

- Considerando-se a forma de ruptura das argamassas de revestimento, as argamassas com os dois menores teores de fíler da ARC apresentaram os maiores índices de ruptura na argamassa após a ciclagem térmica nas caixas. Estas argamassas possuem os maiores valores de resistência a tração na flexão, densidade de massa e módulo de elasticidade dinâmico no estado endurecido.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho apresentaram-se outras possibilidades de pesquisas, que podem auxiliar no desenvolvimento de outras análises com propósitos semelhantes. Assim, constam para trabalhos futuros as seguintes sugestões:

- A exposição aos ciclos térmicos de argamassas sobre diferentes bases;
- Avaliação da influência de outras taxas de variação térmica na ciclagem e suas possíveis relações de degradação;
- Avaliação das características microestruturais dos revestimentos submetidos à ciclagem térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A.S.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Influência da umidade do revestimento na resistência superficial avaliada por diferentes métodos de ensaio. In: Congresso Português de Argamassas de Construção, 3., 2010, Lisboa. **Anais...** Lisboa: APFAC, 2010. v. 1. p. 1-13.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C780 – 10:** Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry. Philadelphia, 2010.

_____. **ASTM D 2240-05:** Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness. Philadelphia, 2005.

ANGELIM, R.; ANGELIM, S.; CARASEK, H. Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003. v. 1, p. 159-168.

ARNOLD, D.C.M. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FORMA DOS GRÃOS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.** 185 f. São Leopoldo, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 11579:** Determinação da finura por meio da peneira 75 μ m (200). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **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.

_____. **ABNT NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13528:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da absorção de água e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **ABNT NBR 15270-1:** Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 15270-1:** Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 15270-3:** Componentes cerâmicos. Parte 3: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 15575-1:** Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 15575-4:** Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 15839:** Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos — Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR 5734:** Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico: método de ensaio – Especificação. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **ABNT NBR 7584:** Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR 8490:** Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **ABNT NBR 8802:** Concreto endurecido – determinação da velocidade de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecido – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

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

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

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 53:** Teor de material fino que passa através da peneira 75µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2002.

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

AZENHA, M.; FARIA, R.; FIGUEIRAS, H. Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, i. 11, p. 4232-4240, Nov. 2011.

BALLESTER, P. *et al.* Effect of brief heat-curing on microstructure and mechanical properties in fresh cement based mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 39, i. 7. p. 573-579, July 2009.

BAUER, E. *et al.* A influência do transporte de água no comportamento dos revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS E ETICS, 4, 2012, COIMBRA. **Anais...** Lisboa: APFAC, 2012.

BOTAS, S.M.S. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS EM CLIMAS FRIOS**. 176 f. Lisboa, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

BRAGA, M.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 960-968, Nov. 2012.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: ISAIA,G.C., 2010. v. 2.

_____. **Patologia das argamassas de revestimento**. In: Isaia, G.C.. (Org.). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 1, p. 1-11.

_____. Avaliação de resultados do ensaio de resistência de aderência de revestimentos de argamassa. **Téchne** [on line], ed. 185, ano 20, jun. 2012.

CARÉ, S. Effect of temperature on porosity and on chloride diffusion in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 22, i. 07, p. 1560-1573, July 2008.

CHATTERJI, S. Aspects of the freezing process in a porous material–water system - Part 1 - Freezing and the properties of water and ice. **Cement and Concrete Research**, v. 29, issue 4. p. 627-630, 1999.

_____. _____. Part 2 - Freezing and properties of frozen porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, issue 4. p. 781-784, 1999.

CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.A.C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio**. 1ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: [s.n.], 1995.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA) **Resolução 307/2002: Gestão dos resíduos da construção civil**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702>>. Acesso em: 4 ago. 2014.

COSTA, E.B.C.; CARASEK, H. Influência dos parâmetros de ensaio na determinação da resistência de aderência de revestimentos de argamassa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 17-35, out./dez. 2009.

_____. *et al.* Avaliação do Método de Ensaio Brasileiro para Medida da Resistência de Aderência à Tracção de Revestimentos de Argamassa. In: Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 2, 2007, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, 2007. v. 1. p. 1-12.

ERHART, R.L. **INFLUÊNCIA DO CHAPISCO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ NA ADERÊNCIA DE ARGAMASSA EM SUBSTRATOS CERÂMICOS COM DIFERENTES POROSIDADES.** 203 p. São Leopoldo, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2014.

ESQUIVEL, J.T. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CHOQUE TÉRMICO NA ADERÊNCIA DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA.** 262 f. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009.

EUROPEAN STANDARD (EN). **prEN 16306:** Natural stone test methods – Determination of resistance of marble to termal and moisture cycles. Austria, 2011.

_____. **UNE-EN 13687-2:2002:** Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of termal compability – Part 2: Thunder-shower cycling (termal shock). 1st ed. Spain, 2002.

FABRO, F. *et al.* Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 2, p. 191-212, jun. 2011.

FARAGE, M.C.R.; SERCOMBE, J.; GALLÉ, C. Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300 C°. **Cement and Concrete Research**, v. 33, i. 7, p. 1047-1056, July 2003.

FAURE, P.F. *et al.* Drying effect on cement paste porosity at early age observed by NMR methods. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 496-503, Apr. 2012.

FERREIRA, C.C.; BERGMANN, C.P. Formação da eflorescência em cerâmica vermelha: fatores de influência no transporte dos íons SO_4^{2-} e Ca^{2+} . **Cerâmica**, v. 57, n. 343, p. 356-363, jul./ago. 2011.

FREITAS, J.G. de; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 14, p. 57-73, 2014.

GALLÉ, C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. **Cement and Concrete Research**, v. 31, i. 10, p. 1467-1477, Oct. 2001.

GHABEZLOO, S. Micromechanics analysis of thermal expansion and thermal pressurization of a hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 41, i. 5, p. 520–532, May 2011.

_____.; SULEM, J.; SAINT-MARC, J. The effect of undrained heating on a fluid-saturated hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 39, i. 1, p. 54–64, Jan. 2009.

_____.; _____. Stress dependent thermal pressurization of a fluid-saturated rock. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 42, i. 1, p. 1-24, 2009.

GIROTTO, L.S.; BARBOSA, M.P.; MACIEL, G.F. Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 1, p. 24-52, fev. 2014.

GUIMARÃES, L.E. *et al.* Acompanhamento das variações das temperaturas superficiais dos principais materiais utilizados em fachadas. In: II Encontro sobre Pesquisas de Materiais de Construção, **2**, 2002, Goiânia. Anais em CD-Rom. Goiânia: 2002. p. 1-14.

HATTGE, A.F. **ESTUDO COMPARATIVO SOBRE A PERMEABILIDADE DAS ALVENARIAS EM BLOCOS CERÂMICOS E ALVENARIAS EM BLOCOS DE CONCRETO**. 136 f. Porto Alegre, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 6241:** Performance standards in building -- Principles for their preparation and factors to be considered. Geneva, 1984.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Critérios mínimos de desempenho para habitações de interesse social. São Paulo: IPT, 1998.

JANOTKA, I.; NÜRNBERGEROVÁ, T. Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. **Nuclear Engineering and Design**, v. 235, i. 17-19., p. 2019-2032, Aug. 2005.

JIMÉNEZ, J.R. *et al.* Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 679-690, Nov. 2013.

KAZMIERCZAK, C.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**, v. 3, n. 1, p. 47-58, jan./jun. 2007.

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

LAFHAJ, Z.; GOUEYGOU, M. Experimental study on sound and damaged mortar: Variation of ultrasonic parameters with porosity. **Construction and building materials**, v. 23, n. 2, p. 953–956, Feb. 2009.

_____. *et al.* Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 4, p. 625–633, Apr. 2006.

LEDESMA, E. F. *et al.* Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 289-298, Nov. 2014.

LINO, G.A.L. **Caracterização *in situ* de rebocos com base em cal e metacaulino aplicados em muretes experimentais**. 125 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

MEYERS, S.L. Thermal Coefficient of Expansion of Portland Cement – LONG-TIME TESTS. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 32, no. 8, p. 1107-1112, Aug. 1940.

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Efeito de choques térmicos na fissuração de revestimentos de argamassa com RCD. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2003. v. 1. p. 607-618.

PAES, I.L.; BAUER, E.; CARASEK, H. Influência da estrutura de poros dos diferentes materiais componentes do sistema de revestimento em argamassa no transporte e fixação de água. In: VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción - CONPAT, 7, 2003, Mérida - México. **Anais...** Mérida: CONPAT, 2003. v. 1. p. 8-15.

PEREIRA, T.A.R. **Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas**. 151 f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

PEREIRA, P.C.; CARASEK, H.; FRANCINETE JR., P. INFLUÊNCIA DA CURA NO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS COM ARGAMASSAS INORGÂNICAS. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas / 1st. International Symposium on Technology of Mortars, 2005, Florianópolis.

RILEM TCC 116 PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. **Materials and Structures**, v. 32, n. 217, p. 174-179, abr. 1999.

ROMAN, L.M.F. *et. al.* Análise da Resistência de Aderência em Sistemas de Revestimento Cerâmico Submetidos à Ciclos Higrotérmicos. In: VIII Encontro Nacional de Tecnologia do

Ambiente Construído (ENTAC): Modernidade e Sustentabilidade, 8, 2000, Salvador/BA. **Anais...** Salvador: ENTAC, 2000.

ROSA, M. **ANÁLISE DO EFEITO DO TEOR DE MICROFINOS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM UTILIZAÇÃO DE AREIA DE BRITAGEM BASÁLTICA.** 110 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. **Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica.** Brasília: Universidade de Brasília, 2011.

SATO, V.Y. *et. al.* Aplicação dos Conceitos de Reologia no Estudo de Pastas Cimentícias In: 55 Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2013. p. 1-14.

SCARTEZINI, L.M.B.; CARASEK, H. Avaliação da perda de água da argamassa fresca para o substrato por sucção capilar. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2003. v. 1. p. 251-264.

_____.; _____. Fatores que exercem influência na resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassa. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2003. v. 1. p. 545-558.

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**, v. 31, i. 12, p. 1785–1791, Dec. 2001.

SHUI, Z.-h. *et. al.* Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 24, i. 9, p. 1761-1767, Sept. 2010.

SILVA, T.J. da; FERREIRA, G.; DIAS, J.F. INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS NOS RESULTADOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO. *Ciência & Engenharia*, v. 22, n.1, p. 103-113, jan. – jun. 2013.

SILVA, N.G. **AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO E DA FISSURAÇÃO EM REVESTIMENTO DE ARGAMASSA NA FASE PLÁSTICA**. 329 p. Florianópolis, 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2011.

_____. *et al.* EFEITOS DO AR INCORPORADO NAS PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO E AREIA. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51, 2009, Curitiba. **CONCRETOS PARA INFRAESTRURA SUSTENTÁVEL**. Anais do CBC2009, IBRACON: Curitiba, 2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual: 2013**. Rio de Janeiro: SNIC, 2013. 39 p.

SOLTANI, F. *et al.* Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content. *NDT&E International*, v. 54, p. 75-83, Mar. 2013.

STOLZ, C.M. **INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS REOLÓGICOS DE ARGAMASSAS E A ÁREA POTENCIAL DE CONTATO DE SUBSTRATOS NA ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**. 162 f. Porto Alegre, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

TROIAN, A. **AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO FRENTE À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS**. 127 f. São Leopoldo, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2010.

WERLE, A.P. **DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO, COM ÊNFASE NA CARBONATAÇÃO**. 159 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2010.

_____; KAZMIERCZAK, C.S.; KULAKOWSKI, M.P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 213-228, abr./jun. 2011.

WESTERHOLM, M. *et. al.* Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 274-282, Apr. 2008.

ZENG, Q. *et. al.* Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 28, i. 1, p. 468-475, Mar. 2012.

APÊNDICE

Tabela 1 - Esclerometria

Fíler (%)	Nome da amostra	Leituras											
		NÃO CICLADOS											
2	A07	32,5	30	30,5	27	30,5	28,5	26	26,5	25,5	26,5	30	30,5
2	A15	26	24,5	22,5	24,5	26,5	23	23,5	25	22	24	24,5	28
2	A17	30	28,5	27	27,5	28,5	24	34	32	28	27,5	25,5	27,5
4,5	B05	25	25	24,5	24,5	26,5	23,5	26	25,5	24,5	26	24,5	25
4,5	B01	24	25,5	25,5	25	25,5	23,5	25	25	27	26,5	23	27
4,5	B15	25,5	21	29	24,5	25	27	27,5	27,5	27,5	25,5	25	25
7	C06	22,5	25	24	29,5	26,5	23,5	21,5	26,5	25	24	24,5	25,5
7	C15	27,5	27	24,5	23,5	25,5	23,5	27	25	26,5	29	26	27,5
7	C08	29,5	25	25	22,5	24,5	23	25	24,5	25,5	27,5	27	31
9,5	D08	23	26,5	24	22,5	25,5	21	22,5	23,5	24,5	25,5	22,5	24,5
9,5	D13	24	23	24	24	27	26	25	25,5	26,5	24	20,5	24
9,5	D11	25	25,5	25	26,5	24	29	21,5	24	22,5	19,5	25	19
CÂMARA CLIMÁTICA													
2	A03	25	26	21,5	23,5	27,5	24,5	21	25,5	22	25,5	28,5	23,5
2	A19	26,5	29	30	30,5	25	31	27	26,5	32	26,5	28	32
2	A11	26	24	24,5	25,5	24,5	23,5	26	23	25	26,5	25	24,5
4,5	B10	22,5	23	24	26	25	24,5	26,5	27	28,5	25	27,5	27,5
4,5	B12	27,5	27	26	25	24	27	29	23	26,5	25	26,5	28
4,5	B09	26,5	24	26,5	25,5	25	24,5	27	25,5	25,5	22	24	22
7	C12	24,5	25	26,5	25,5	27	25	20,5	27	24,5	22,5	23	24
7	C11	23	23	22,5	22	25	26	25,5	25	25	24,5	23,5	26,5
7	C10	27,5	25,5	29,5	24,5	28	26,5	30	29,5	29	27,5	31	27
9,5	D10	24,5	25	23,5	26	27	24	26	20,5	23,5	27	20,5	22
9,5	D09	23,5	20,5	21	23,5	24	23,5	24	20,5	20	22	21	22,5
9,5	D05	23	24	27	22	25,5	24	23	24	23	24,5	22	23,5
CAIXAS TÉRMICAS													
2	A06	31,5	27	28	29	27	25	33	32,5	27	32,5	26,5	34,5
2	A07	32,5	30	30,5	27	30,5	28,5	26	26,5	25,5	26,5	30	30,5
2	A10	25	21	24,5	24	22	24,5	29,5	28,5	27	27,5	25	28,5
4,5	B08	25	25,5	25,5	24,5	25,5	25	30	24,5	26	27,5	23	26,5
4,5	B13	29	26,5	27,5	30,5	23,5	23	26,5	28	24	27	24,5	24
4,5	B16	28,5	27	29	29,5	26,5	21	25,5	23	27	24	25	23
7	C04	24,5	21,5	22,5	21	23	24	18,5	18	17	23	17	16,5
7	C09	22,5	23,5	24,5	23	22	23,5	26	28	28	26,5	26	25
7	C14	19,5	22	22	23	24	26,5	24	26	24	24,5	23,5	23
9,5	D03	23	20	19,5	17	22,5	22,5	25,5	24	22,5	26,5	23,5	20,5
9,5	D14	18	11,5	22	14,5	18	18	25,5	27	25	25	25,5	25,5
9,5	D16	29	26	27,5	24	24	24	28	25,5	26	25,5	24,5	24

Tabela 2 – Dureza superficial Shore D

Teor de filer (%)	Nome da amostra	Leituras											
		NÃO CICLADOS											
2	A05	66	71	60	71	68	72	71	74	74	71	73	73
2	A15	68	72	71	67	73	74	74	78	75	75	75	80
2	A17	70	70	68	70	65	67	70	73	73	71	71	72
4,5	B01	80	78	78	76	78	76	76	74	76	76	78	79
4,5	B05	76	79	72	75	81	79	75	76	75	79	81	73
4,5	B15	68	73	73	75	66	73	73	75	72	78	75	74
7	C06	75	75	76	74	78	74	78	75	75	78	78	77
7	C08	70	70	72	70	77	77	77	74	77	76	76	72
7	C13	81	77	79	75	75	77	79	77	78	75	79	78
9,5	D08	74	74	78	74	74	76	78	76	76	76	78	76
9,5	D11	78	81	79	76	76	76	79	73	77	80	74	74
9,5	D15	79	81	81	80	80	80	77	79	80	81	80	75
CÂMARA CLIMÁTICA													
2	A03	75	75	70	70	72	72	70	72	75	74	73	77
2	A11	73	70	79	77	77	70	70	74	74	76	79	72
2	A19	72	74	74	73	72	75	72	72	75	78	77	76
4,5	B09	77	75	77	70	77	75	74	72	72	75	72	74
4,5	B10	75	72	70	74	72	75	78	72	77	78	74	74
4,5	B12	72	72	72	72	72	72	72	74	72	72	72	72
7	C10	76	70	76	76	75	70	74	78	78	78	78	74
7	C11	72	70	70	70	70	76	70	75	75	75	77	70
7	C12	73	73	78	75	76	70	75	72	74	70	76	74
9,5	D05	72	72	72	74	74	72	77	75	76	77	72	74
9,5	D09	70	73	75	70	70	75	75	73	73	72	74	77
9,5	D10	72	72	72	72	70	70	76	76	72	76	76	73
CAIXAS TÉRMICAS													
2	A06	70	72	68	67	69	71	72	68	72	70	73	73
2	A07	70	68	72	70	70	70	71	70	70	70	72	69
2	A10	71	72	68	70	70	70	71	70	70	72	72	71
4,5	B08	65	65	68	69	65	69	71	70	70	71	72	71
4,5	B13	72	67	70	71	74	68	67	65	67	71	69	69
4,5	B16	70	72	72	70	72	71	71	68	66	70	73	72
7	C04	73	70	72	73	68	71	70	73	74	69	70	72
7	C09	73	73	72	72	70	67	71	75	70	73	74	70
7	C14	72	73	69	71	65	65	71	74	71	69	71	68
9,5	D03	74	72	70	74	70	68	65	66	69	65	70	71
9,5	D14	70	72	70	73	68	70	68	70	70	70	68	72
9,5	D16	70	68	72	68	70	68	66	70	71	64	70	69

Tabela 3 – Resultados de caracterização de: resistência de aderência à tração x falhas extensão de aderência argamassa/chapisco/hattge

Característica	Arrancamento		Falha de aderência argamassa/chapisco (%)		Tipo de ruptura (%)			
	Nome da amostra/local de extração	Resistência de aderência (mpa)	Falha linear central	Falha linear periférica	Argamassa	Int. Arg/chap.	Int. Chap/subst.	Substrato
NÃO CICLADO	2% de filer							
	A05_A	1	0,00	0,00	77,64	19,05	3,31	0,00
	A05_B	0,66	0,00	0,00	66,56	32,40	1,04	0,00
	A05_C	0,99	0,00	0,00	33,28	53,03	8,64	5,05
	A05_D	0,86	0,00	100,00	23,15	68,24	8,61	0,00
	A05_E	1,18	49,69	0,00	26,85	66,22	5,00	1,93
	A05_F	0,96	16,54	88,45	64,24	31,07	4,69	0,00
	A15_A	1,07	0,00	0,00	58,56	36,15	5,29	0,00
	A15_B	0,7	100,00	0,00	55,22	44,78	0,00	0,00
	A15_C	0,71	95,59	0,00	40,13	48,11	10,97	0,80
	A15_D	1,11	0,00	0,00	59,06	40,94	0,00	0,00
	A15_E	0,76	93,60	51,56	49,62	47,48	2,90	0,00
	A15_F	0,59	32,88	32,88	52,65	47,35	0,00	0,00
	A17_A	0,82	0,00	0,00	13,19	14,81	69,74	2,25
	A17_B	0,96	0,00	0,00	29,90	26,86	43,25	0,00
	A17_C	0,59	0,00	100,00	35,19	39,75	25,06	0,00
	A17_D	0,65	32,25	54,03	11,02	30,31	57,71	0,96
	A17_E	0,83	0,00	0,00	6,75	30,08	57,59	5,58
	A17_F	0,58	0,00	67,66	9,84	45,66	43,24	1,27
	4,5% de filer							
	B01_A	0,45	76,95	90,32	38,19	61,81	0,00	0,00
	B01_B	1,26	77,81	0,00	88,61	11,39	0,00	0,00
	B01_C	1,04	0,00	100,00	-	-	-	-
	B01_D	0,66	100,00	100,00	72,64	27,36	0,00	0,00
	B01_E	0,68	53,95	94,91	73,17	26,83	0,00	0,00
	B01_F	1,21	0,00	61,37	69,67	30,33	0,00	0,00
	B14_A	0,65	98,42	95,45	16,68	80,35	2,97	0,00
	B14_B	1,21	0,00	0,00	35,12	25,26	37,23	2,39
	B14_C	0,58	86,37	0,00	52,42	47,58	0,00	0,00
	B14_D	0,23	100,00	100,00	48,09	51,91	0,00	0,00
B14_E	1,24	0,00	0,00	75,84	24,16	0,00	0,00	
B14_F	0,33	75,85	89,75	40,69	59,31	0,00	0,00	
B15_A	1,06	0,00	19,04	52,05	45,32	2,63	0,00	
B15_B	0,47	0,00	0,00	87,14	12,86	0,00	0,00	
B15_C	1,31	88,45	7,40	58,94	21,15	18,87	1,04	
B15_D	1,14	100,00	0,00	33,59	26,33	38,53	1,55	

CÂMARA	B15_E	0,16	0,00	0,00	77,13	22,87	0,00	0,00
	B15_F	1,13	0,00	25,46	34,42	26,49	35,15	3,94
	7% de filer							
	C08_A	0,82	0,00	100,00	48,59	48,43	2,98	0,00
	C08_B	0,88	53,37	100,00	36,52	63,48	0,00	0,00
	C08_C	0,06	0,00	90,52	22,64	77,36	0,00	0,00
	C08_D	0,92	0,00	0,00	23,51	58,62	17,86	0,00
	C08_E	0,36	0,00	0,00	48,47	51,53	0,00	0,00
	C08_F	0,99	0,00	97,96	27,35	67,88	4,78	0,00
	C13_A	0,33	84,91	100,00	28,41	71,59	0,00	0,00
	C13_B	0,42	100,00	100,00	13,19	86,81	0,00	0,00
	C13_C	0,12	7,40	100,00	7,55	92,45	0,00	0,00
	C13_D	0,89	31,09	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
	C13_E	0,98	100,00	0,00	45,93	53,32	0,75	0,00
	C13_F	0,60	81,38	100,00	32,86	64,53	0,00	2,61
	C15_A	0,03	100,00	71,61	15,70	84,30	0,00	0,00
	C15_B	1,30	0,00	75,35	18,42	48,84	20,76	11,98
	C15_C	0,19	58,75	70,37	29,51	70,49	0,00	0,00
	C15_D	0,95	76,06	100,00	8,78	65,61	25,41	0,21
	C15_E	0,39	0,00	100,00	16,63	83,37	0,00	0,00
	C15_F	1,03	22,65	100,00	29,97	70,03	0,00	0,00
	9,5% de filer							
	D08_A	0,84	0,00	100,00	58,29	39,54	2,18	0,00
	D08_B	0,38	53,37	100,00	45,83	54,17	0,00	0,00
	D08_C	0,92	0,00	90,52	12,33	49,28	37,01	1,37
	D08_D	1,18	0,00	0,00	71,06	28,25	0,69	0,00
	D08_E	0,91	0,00	0,00	65,28	34,72	0,00	0,00
	D08_F	1,23	0,00	97,96	59,40	40,60	0,00	0,00
	D11_A	1,16	0,00	48,73	62,13	36,01	1,86	0,00
	D11_B	0,57	0,00	100,00	49,80	50,20	0,00	0,00
	D11_C	0,48	83,04	75,69	62,30	37,70	0,00	0,00
	D11_D	1,10	6,36	100,00	43,27	48,96	6,16	1,61
	D11_E	0,58	21,74	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
	D11_F	1,01	60,18	86,68	56,77	43,23	0,00	0,00
	D13_A	0,02	61,43	0,00	14,17	85,83	0,00	0,00
	D13_B	1,18	0,00	100,00	80,07	19,93	0,00	0,00
	D13_C	0,46	100,00	0,00	49,62	50,38	0,00	0,00
	D13_D	0,95	100,00	0,00	84,95	15,05	0,00	0,00
	D13_E	0,97	0,00	100,00	52,70	47,30	0,00	0,00
	D13_F	0,59	76,50	100,00	74,13	25,87	0,00	0,00
	2% de filer							
	A03_A	1,14	14,35	0,00	5,89	24,22	66,65	3,25
	A03_B	0,38	100,00	0,00	30,20	69,80	0,00	0,00
	A03_C	0,83	57,69	0,00	57,14	26,67	15,46	0,73
	A03_D	1,18	34,91	35,18	27,33	39,32	31,86	1,48

A03_E	0,36	100,00	100,00	32,29	67,71	0,00	0,00
A03_F	0,14	56,77	79,10	17,74	82,26	0,00	0,00
A11_A	0,54	0,00	50,01	59,36	40,64	0,00	0,00
A11_B	1,33	0,00	0,00	86,68	13,32	0,00	0,00
A11_C	0,87	54,60	0,00	56,36	43,64	0,00	0,00
A11_D	1,04	0,00	100,00	74,03	20,26	5,71	0,00
A11_E	1,30	0,00	100,00	39,03	25,19	13,00	22,78
A11_F	0,83	47,92	0,00	41,64	57,32	1,04	0,00
A19_A	0,5	100,00	0,00	46,61	53,39	0,00	0,00
A19_B	1,16	67,32	52,83	47,93	52,07	0,00	0,00
A19_C	1,33	0,00	10,39	54,99	36,45	8,56	0,00
A19_D	0,22	27,49	99,96	28,62	71,38	0,00	0,00
A19_E	0,53	0,00	26,92	30,80	69,20	0,00	0,00
A19_F	1,36	0,00	98,02	33,17	66,52	0,31	0,00
4,5% de filer							
B09_A	1,53	0,00	100,00	72,24	27,76	0,00	0,00
B09_B	1,34	0,00	0,00	35,61	61,56	1,54	1,30
B09_C	-	100,00	0,00	27,06	69,94	3,00	0,00
B09_D	0,14	0,00	100,00	14,84	85,16	0,00	0,00
B09_E	0,14	0,00	100,00	36,84	63,16	0,00	0,00
B09_F	1,09	100,00	43,23	23,85	76,15	0,00	0,00
B10_A	0,63	92,35	100,00	32,92	67,08	0,00	0,00
B10_B	1,32	0,00	0,00	72,40	27,60	0,00	0,00
B10_C	1,71	0,00	100,00	77,16	22,84	0,00	0,00
B10_D	0,56	100,00	46,38	40,14	59,86	0,00	0,00
B10_E	1,43	0,00	0,00	83,46	16,54	0,00	0,00
B10_F	1,28	0,00	0,00	86,61	13,39	0,00	0,00
B12_A	1,28	0,00	0,00	48,78	48,96	1,51	0,75
B12_B	1,30	0,00	100,00	82,83	15,57	1,60	0,00
B12_C	0,13	64,65	100,00	26,80	73,20	0,00	0,00
B12_D	0,90	0,00	100,00	71,74	27,21	1,05	0,00
B12_E	1,31	0,00	100,00	78,75	21,25	0,00	0,00
B12_F	0,52	84,25	0,00	53,79	44,72	1,50	0,00
7% de filer							
C10_A	0,63	51,12	88,59	47,72	24,45	27,83	0,00
C10_B	1,23	100,00	27,51	50,56	29,61	19,83	0,00
C10_C	0,96	0,00	95,12	21,45	46,23	31,49	0,84
C10_D	0,3	71,49	18,75	37,58	62,42	0,00	0,00
C10_E	1,01	0,00	18,75	79,09	20,91	0,00	0,00
C10_F	0,55	0,00	100,00	26,63	66,03	7,08	0,25
C11_A	1,02	100,00	0,00	16,62	71,27	12,11	0,00
C11_B	0,33	45,78	100,00	23,51	76,49	0,00	0,00
C11_C	-	0,00	13,51	-	-	-	-
C11_D	-	9,76	100,00	28,56	71,44	0,00	0,00
C11_E	1,15	100,00	100,00	26,85	73,02	0,00	0,13

CAIXAS TÉRMICAS	C11_F	0,01	59,81	100,00	10,45	89,55	0,00	0,00	
	C12_A	0,21	0,00	100,00	16,93	83,07	0,00	0,00	
	C12_B	0	0,00	100,00	50,53	49,47	0,00	0,00	
	C12_C	1,1	0,00	100,00	59,90	37,66	2,44	0,00	
	C12_D	0,42	0,00	100,00	17,64	81,26	1,10	0,00	
	C12_E	0,64	0,00	100,00	54,00	46,00	0,00	0,00	
	C12_F	-	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	
	9,5% de filer								
	D05_A	1,25	100,00	0,00	87,59	12,41	0,00	0,00	
	D05_B	0,51	100,00	0,00	25,40	74,60	0,00	0,00	
	D05_C	1,47	0,00	0,00	81,79	18,21	0,00	0,00	
	D05_D	0,63	28,22	100,00	63,80	36,20	0,00	0,00	
	D05_E	0	100,00	100,00	13,60	85,92	0,48	0,00	
	D05_F	1,04	0,00	100,00	68,92	31,08	0,00	0,00	
	D09_A	0,69	0,00	44,80	7,01	27,44	65,55	0,00	
	D09_B	-	0,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	
	D09_C	1,18	0,00	100,00	18,15	34,18	46,15	1,52	
	D09_D	0,09	100,00	100,00	19,85	80,15	0,00	0,00	
	D09_E	0,21	0,00	100,00	48,69	51,31	0,00	0,00	
	D09_F	0,85	6,42	0,00	11,34	25,55	61,70	1,41	
	D10_A	1	60,02	0,00	17,47	82,53	0,00	0,00	
	D10_B	0,09	8,51	66,11	32,55	67,45	0,00	0,00	
	D10_C	0,19	85,05	0,00	32,65	67,35	0,00	0,00	
	D10_D	0,71	0,00	90,11	21,58	48,33	30,10	0,00	
	D10_E	0,8	100,00	0,00	6,67	57,81	34,64	0,87	
	D10_F	0,34	74,83	41,29	53,87	46,13	0,00	0,00	
	2% de filer								
A06_A	0,29	0,00	55,32	35,31	64,69	0,00	0,00		
A06_B	0,79	100,00	0,00	87,56	12,44	0,00	0,00		
A06_C	1,43	42,76	0,00	85,08	14,92	0,00	0,00		
A06_D	0,65	100,00	0,00	82,10	17,90	0,00	0,00		
A06_E	0,48	100,00	0,00	94,32	5,68	0,00	0,00		
A06_F	0,82	65,15	0,00	92,97	7,03	0,00	0,00		
A07_A	0,68	100,00	0,00	39,67	60,33	0,00	0,00		
A07_B	0,57	100,00	0,00	48,67	51,33	0,00	0,00		
A07_C	0,44	100,00	0,00	20,84	79,16	0,00	0,00		
A07_D	0,95	0,00	42,88	74,04	25,96	0,00	0,00		
A07_E	0,99	0,00	0,00	83,68	16,32	0,00	0,00		
A07_F	0,77	38,40	0,00	19,00	28,75	50,50	1,74		
A10_A	0,93	0,00	100,00	91,04	8,96	0,00	0,00		
A10_B	0,81	0,00	0,00	86,49	13,51	0,00	0,00		
A10_C	1,13	0,00	100,00	88,19	11,81	0,00	0,00		
A10_D	0,72	0,00	0,00	92,60	7,40	0,00	0,00		
A10_E	1,28	0,00	0,00	80,88	19,12	0,00	0,00		
A10_F	1,41	0,00	0,00	76,35	23,65	0,00	0,00		

4,5% de filer							
B08_A	0	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B08_B	0,71	59,06	0,00	93,56	6,44	0,00	0,00
B08_C	0,73	0,00	53,74	75,91	24,09	0,00	0,00
B08_D	0,74	87,71	100,00	88,45	11,55	0,00	0,00
B08_E	0,98	34,47	100,00	95,48	4,52	0,00	0,00
B08_F	0,96	82,78	52,80	24,58	53,98	21,01	0,43
B13_A	0,47	100,00	100,00	34,52	65,48	0,00	0,00
B13_B	0,36	32,84	79,87	36,20	63,80	0,00	0,00
B13_C	0,98	47,20	29,96	100,00	0,00	0,00	0,00
B13_D	1,07	100,00	21,86	59,18	40,82	0,00	0,00
B13_E	1,45	26,60	18,08	69,40	30,60	0,00	0,00
B13_F	0,71	0,00	100,00	75,48	24,52	0,00	0,00
B16_A	0,53	100,00	100,00	47,61	52,39	0,00	0,00
B16_B	1,37	59,06	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
B16_C	0,98	0,00	53,74	89,41	10,59	0,00	0,00
B16_D	0,59	87,71	100,00	13,93	86,07	0,00	0,00
B16_E	0,84	34,47	100,00	69,47	30,53	0,00	0,00
B16_F	1,13	82,78	52,80	93,34	6,66	0,00	0,00
7% de filer							
C04_A	0,5	61,47	93,91	50,11	49,89	0,00	0,00
C04_B	0,51	0,00	0,00	60,72	39,28	0,00	0,00
C04_C	0,93	6,54	5,11	75,18	24,82	0,00	0,00
C04_D	0,81	93,91	76,73	56,33	43,67	0,00	0,00
C04_E	0,24	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C04_F	0,5	5,11	100,00	43,30	56,70	0,00	0,00
C09_A	0,27	50,00	100,00	37,11	62,89	0,00	0,00
C09_B	0,23	0,00	100,00	50,90	49,10	0,00	0,00
C09_C	0,54	17,91	100,00	49,24	50,76	0,00	0,00
C09_D	0,07	85,43	22,09	19,99	80,01	0,00	0,00
C09_E	0,1	0,00	0,00	23,85	76,15	0,00	0,00
C09_F	0,32	10,66	0,00	65,64	34,36	0,00	0,00
C14_A	0,15	50,00	100,00	46,28	53,72	0,00	0,00
C14_B	0,99	0,00	100,00	92,65	7,35	0,00	0,00
C14_C	0	17,91	100,00	33,97	66,03	0,00	0,00
C14_D	0,3	85,43	22,09	41,47	58,53	0,00	0,00
C14_E	0,64	0,00	0,00	83,06	16,94	0,00	0,00
C14_F	0,84	10,66	0,00	76,37	23,03	0,61	0,00
9,5% de filer							
D03_A	0,63	0,00	100,00	85,03	14,97	0,00	0,00
D03_B	2,72	0,00	86,88	90,56	9,44	0,00	0,00
D03_C	0,76	100,00	0,00	97,30	2,70	0,00	0,00
D03_D	0,87	0,00	72,59	53,32	31,16	14,61	0,91
D03_E	0,72	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
D03_F	0,5	58,93	100,00	79,80	20,20	0,00	0,00

	D14_A	2,73	0,00	0,00	95,60	4,40	0,00	0,00
	D14_B	0,15	0,00	99,12	25,15	74,85	0,00	0,00
	D14_C	0,58	85,64	100,00	49,38	50,62	0,00	0,00
	D14_D	0,24	12,03	100,00	66,16	33,84	0,00	0,00
	D14_E	1,29	100,00	40,77	39,62	60,38	0,00	0,00
	D14_F	0,91	15,66	100,00	17,93	40,97	40,25	0,85
	D16_A	0,69	100,00	100,00	31,56	64,52	3,46	0,45
	D16_B	0,58	100,00	100,00	21,46	78,54	0,00	0,00
	D16_C	0,31	66,35	100,00	25,18	62,08	12,73	0,00
	D16_D	0,19	0,00	72,59	13,20	86,80	0,00	0,00
	D16_E	0,22	0,00	100,00	28,56	71,44	0,00	0,00
	D16_F	0,46	72,65	52,35	27,41	58,04	14,54	0,00