

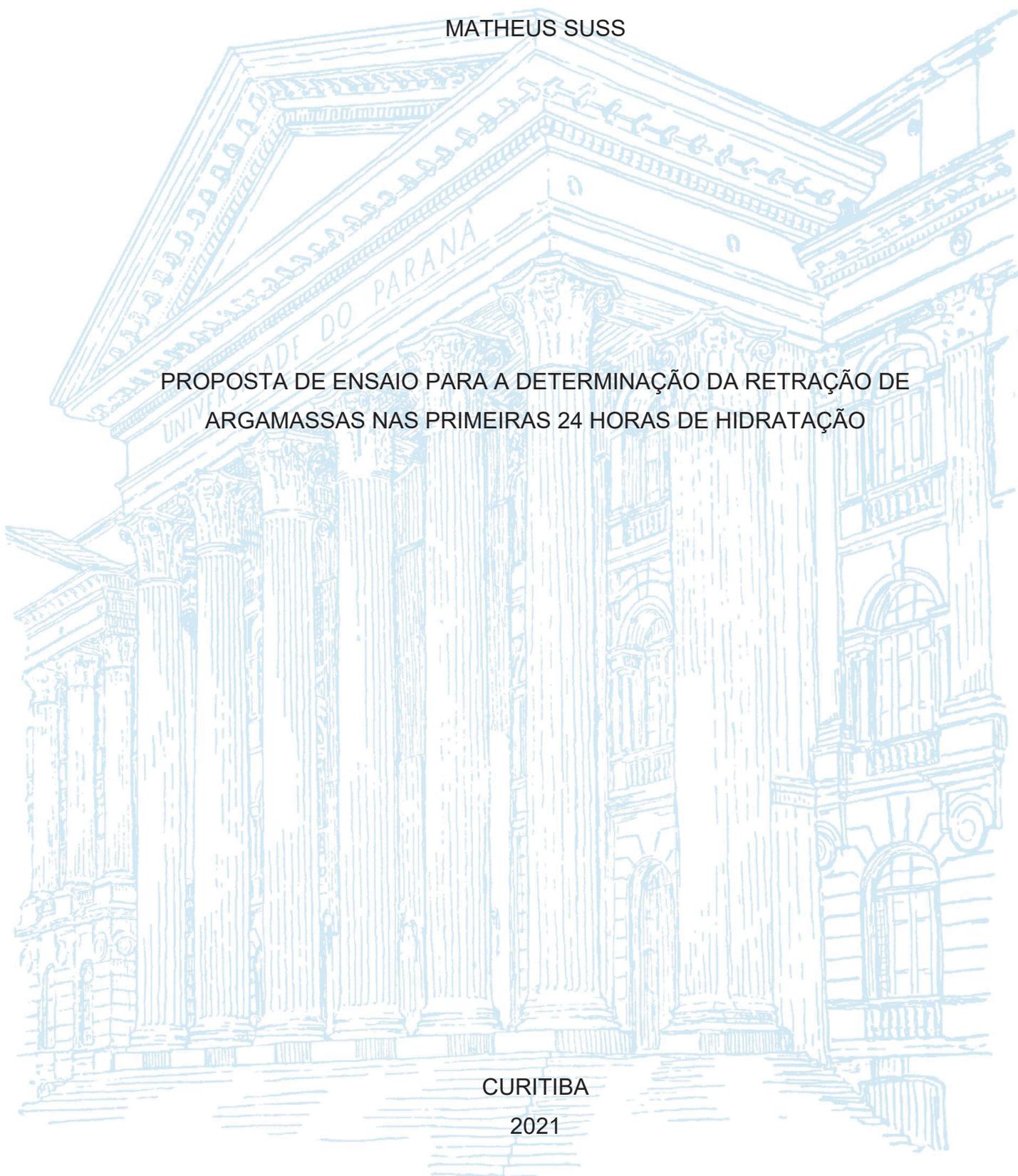
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS SUSS

PROPOSTA DE ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DA RETRAÇÃO DE
ARGAMASSAS NAS PRIMEIRAS 24 HORAS DE HIDRATAÇÃO

CURITIBA

2021



MATHEUS SUSS

PROPOSTA DE ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DA RETRAÇÃO DE
ARGAMASSAS NAS PRIMEIRAS 24 HORAS DE HIDRATAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Professora Dr^a Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa.

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S964p

Suss, Matheus

Proposta de ensaio para a determinação da retração de argamassas nas primeiras 24 horas de hidratação [recurso eletrônico] / Matheus Suss - Curitiba, 2021.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

1. Construção civil. 2. Argamassa. 3. Resistência de materiais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Costa, Marianne do Rocio de Mello Maron da. III. Título.

CDD 691.5

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Junior CRB9/1797



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MATHEUS SUSS** intitulada: **PROPOSTA DE ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DA RETRAÇÃO DE ARGAMASSAS NAS PRIMEIRAS 24 HORAS DE HIDRATAÇÃO**, sob orientação da Profa. Dra. MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Novembro de 2021.

Assinatura Eletrônica

29/11/2021 09:26:22.0

MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

29/11/2021 09:27:18.0

RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

29/11/2021 09:38:16.0

PEDRO KOPSCHITZ XAVIER BASTOS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha **mãe** pelo amor e suporte.

Aos meus **pais** pela vida.

Agradeço à minha **professora orientadora** Dr^a Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa pela orientação e paciência.

Agradeço ao meu **tio** Iran por ideias e auxílios pragmáticos na confecção do ensaio dessa pesquisa.

Agradeço à minha **amada**, Camila Kloss, por me apoiar e me ajudar praticamente e emocionalmente.

Agradeço ao meu **amigo** Everton Kemper Melara por toda ajuda e parceria no laboratório. Também, agradeço ao meu **amigo** André Luis Meier pela ajuda e disponibilidade.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná e a todos os meus **professores** da graduação e mestrado por me proporcionarem a oportunidade de conhecer a Engenharia Civil por me ensinarem tanto.

Agradeço à **CAPES** pelo apoio financeiro que possibilitou essa pesquisa.

“Mon champ, dit Goethe, c'est le temps”

Albert Camus, *Le Mythe de Sisyphe*, 1942, p. 73.

RESUMO

A retração de materiais cimentícios é um fenômeno complexo que pode resultar em fissuração deletéria à durabilidade desses materiais. As principais manifestações patológicas causadas pela retração são empenamento, descolamento e fissuração e suas consequências, como infiltração e ingresso de agentes agressivos. Esse fenômeno vem sendo amplamente estudado e mensurado em diversas abordagens para concretos endurecidos. No entanto, existe carência de estudos quanto a esse fenômeno em argamassas de revestimento no estado fresco, estado no qual ocorre a retração no estado plástico, ou seja, quando o material está mais suscetível a apresentar microfissuras devido às condições externas de temperatura e umidade do meio no qual está inserido e às condições internas da mistura, principalmente o processo de hidratação. A norma brasileira NBR15261 “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional” aborda a retração a longo prazo sem ênfase na fase inicial (<24h) da hidratação, que contém o estado plástico do material cimentício. Portanto, o principal objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um método de mensuração da retração nas primeiras vinte e quatro horas de hidratação de argamassas. Foi proposto um estudo para a definição de um método de determinação da retração inicial em argamassas, em escala laboratorial, a partir de amostras prismáticas, utilizando: o molde da norma NBR15261 (285x25x25mm); elementos rígidos que transmitem deslocamentos horizontais da amostra para relógios comparadores. Foram estudados traços de argamassa de cimento (cimento:areia em volume) com a relação água/matérias secas fixa em 0,168 e variando a relação aglomerante/agregados linearmente: 33% (1:3); 25% (1:4); e 17% (1:6). Também foram estudadas argamassas mistas (cimento:cal:areia em volume) com a relação água/aglomerantes fixa em 0,9 e a relação cal/aglomerantes variando linearmente: 30% (1:1:6); 45% (1:1,8:7,6); e 60% (1:3,5:10,5). Para os traços de argamassa de cimento foram aplicadas diferentes exposições ao ambiente (selado, aberto e vento). A retração a longo prazo dada pela NBR 15261 também foi obtida. As análises indicaram que o ensaio proposto foi sensível o suficiente para indicar relações estatisticamente significativas entre as retrações iniciais máximas e a variação da concentração dos aglomerantes, assim como indicar variações de comportamento da retração inicial. O aumento da concentração de cimento causou um aumento da retração inicial média de 76% nas amostras expostas ao ar, 54% nas expostas ao vento de 5m/s e 22% nas seladas.

Palavras-chave: Retração plástica. Retração inicial. Retração no estado endurecido. Argamassa. Método de ensaio de retração.

ABSTRACT

Cementitious materials' shrinkage is a complex phenomenon that can result in deleterious cracking to the durability of these materials. The main pathological manifestations caused by the retraction are curling, detachment and cracking and their consequences such as infiltration and ingress of aggressive agents. This phenomenon has been widely studied and measured in several approaches for hardened concretes. However, there is a lack of studies regarding this phenomenon in fresh mortar, a state in which shrinkage occurs in the plastic state, that is, when the material is more susceptible to microcracks due to the external temperature and humidity conditions of the ambient in which it is inserted and the internal conditions of the mixture due mainly to the hydration process. The Brazilian standard NBR15261 "Mortar for laying and covering walls and ceilings - Determination of dimensional variation" addresses long-term shrinkage without emphasis on the initial phase (<24h) of hydration that contains the plastic state of the cementitious material. Therefore, the main objective of the present work is the development of a method for measuring the shrinkage in the first twenty-four hours of hydration of mortars. A study was proposed to define a method for determining the initial shrinkage in mortars, on a laboratory scale, from prismatic specimens, using: the mold of the NBR15261 (285x25x25mm); rigid elements that transmit horizontal displacements of the sample to digital dial gauges. Traits of simple mortar (cement:sand in volume) with the water/dry materials ratio fixed at 0.168 and varying the alomerant/aggregate ratio linearly were studied: 33% (1:3); 25% (1:4); and 17% (1:6). Mixed mortars (cement:lime:sand in volume) were also studied with the water/binder ratio fixed at 0.9 and the lime/binder ratio varying linearly: 30% (1:1:6); 45% (1:1.8:7.6); and 60% (1:3.5:10.5). For the simple mortar mixes, different exposures to the environment (sealed, open and wind) were applied. The long-term shrinkage given by NBR 15261 was also obtained. The analyzes indicated that the proposed method was sensitive enough to indicate statistically significant relationships between the maximum initial shrinkages and the variation in the concentration of binders, as well as to indicate variations in the behavior of the initial shrinkage. The increase in cement concentration caused an increase in the average initial shrinkage of 76% in the specimens simply exposed to air, 54% in those exposed to 5m/s wind and 22% in sealed specimens.

Keywords: Plastic shrinkage. Initial shrinkage. Shrinkage in the hardened state.
Mortar. Shrinkage measurement method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FISSURAS MAPEADAS CAUSADAS POR REDUÇÃO DO VOLUME DA ARGAMASSA	25
FIGURA 2 – MANCHAS DE EFLORESCÊNCIA ASSOCIADAS A FISSURAÇÃO MAPEADA EM FACHADA DE REVESTIMENTO DE ARGAMASSA	26
FIGURA 3 – EMPENAMENTO DE CONTRAPISO	27
FIGURA 4 – MAPEAMENTO DOS MECANISMOS E ESTÁGIOS DA RETRAÇÃO TOTAL	30
FIGURA 5 – CRONOLOGIA DA RETRAÇÃO INICIAL	31
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DA RETRAÇÃO INICIAL.....	32
FIGURA 7 – DESENVOLVIMENTO ESTRUTURAL E A RETRAÇÃO PLÁSTICA ...	34
FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DOS MECANISMOS DA RETRAÇÃO PLÁSTICA TÍPICA	35
FIGURA 9 – CONTRIBUIÇÃO DAS FASES DO CIMENTO PARA A RETRAÇÃO QUÍMICA.....	39
FIGURA 10 – RETRAÇÃO AUTÓGENA E O CALOR DE HIDRATAÇÃO ACUMULATIVA APÓS 72H DE HIDRATAÇÃO PARA DIFERENTES RELAÇÕES A/C.....	41
FIGURA 11 – ESTADOS DA ÁGUA NA MATRIZ CIMENTÍCIA.....	46
FIGURA 12 – PORO CAPILAR E A TENSÃO SUPERFICIAL	47
FIGURA 13 – VARIAÇÃO DE PRESSÃO DE SEPARAÇÃO DURANTE PREENCHIMENTO GRADUAL DE MACROPORO.....	48
FIGURA 14 – PÓRTICO DE APARELHO COMPARADOR NBR 15261 COM BARRA METÁLICA DE CALIBRAÇÃO	56
FIGURA 15 – MOLDE DE RETRAÇÃO NBR 15261 (MEDIDAS EM MM).....	57
FIGURA 16 – MOLDE DA NBR 15261 UTILIZADO NO MÉTODO PROPOSTO	58
FIGURA 17 – ELEMENTO RÍGIDO VISÃO VERTICAL	59
FIGURA 18 – ELEMENTO RÍGIDO VISÃO ISOMÉTRICA	59
FIGURA 19 – MEDIDAS DO REBITE	59
FIGURA 20 – REBITE.....	60
FIGURA 21 – CABEÇA DO REBITE MAIOR DO QUE ORIFÍCIO DO BLOCO DO MOLDE	61
FIGURA 22 – REBITE SOLDADO AO ELEMENTO RÍGIDO	61

FIGURA 23 – DETALHES DA MONTAGEM DO CONECTOR	62
FIGURA 24 – SOBREPOSIÇÃO DO ELEMENTO RÍGIDO SOBRE CORPO DE PROVA PARA DEMONSTRAR SUA POSIÇÃO INTERNAMENTE...	62
FIGURA 25 – RELÓGIO COMPARADOR TMX DIGITAL DE CURSO MÁXIMO 12,7mm E PRECISÃO DE 0,001mm E SEUS SUPORTES.....	63
FIGURA 26 – CÂMERAS E SEU SUPORTES	64
FIGURA 27 – CROQUI DE VISTA SUPERIOR DA CONEXÃO FINAL ENTRE OS ELEMENTOS CRIADOS E O RELÓGIO COMPARADOR	64
FIGURA 28 – CROQUI DE VISTA LATERAL DA CONEXÃO FINAL ENTRE OS ELEMENTOS CRIADOS E O RELÓGIO COMPARADOR	65
FIGURA 29 – CONEXÃO FINAL ENTRE OS ELEMENTOS CRIADOS E O RELÓGIO COMPARADOR EM FUNCIONAMENTO.....	65
FIGURA 30 – ENSAIO COM VENTO.....	66
FIGURA 31 – CÂMARA SECA DISPONÍVEL NO LABORATÓRIO LAME. A) PORTA TIPO FRIGORÍFICO; B) CÂMARA SECA E SEU AR CONDICIONADO E JANELA FECHADA; C) DESUMIDIFICADORES.	67
FIGURA 32 – EXECUÇÃO DOS GOLPES DA PRIMEIRA CAMADA.....	71
FIGURA 33 – EXECUÇÃO DOS GOLPES DA PRIMEIRA CAMADA.....	72
FIGURA 34 – INSERÇÃO DOS ELEMENTOS RÍGIDOS E ROSQUEAMENTO DOS CONECTORES.....	73
FIGURA 35 – ROSQUEAMENTO DOS CONECTORES COM OS RELÓGIOS.....	73
FIGURA 36 – CÂMERAS POSICIONADAS SOBRE OS RELÓGIOS, ENSAIO PRONTO PARA O INÍCIO DAS LEITURAS.....	74
FIGURA 37 – LVDT COMERCIAL	182
FIGURA 38 – EXTENSÔMETRO.....	182
FIGURA 39 – ESQUEMA DE ENSAIO DE BAO <i>et. al.</i> (2015).....	184
FIGURA 40 – RESULTADO DA DIC TRIDIMENSIONAL	185
FIGURA 41 – MOLDE ASTM C1576-13 COM PROFUNDIDADES DIFERENCIAIS INDUTORAS DE FISSURRAÇÃO	188

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – OCORRÊNCIA DE DEFEITOS EM REBOCOS EM PAREDES CONTÍNUAS	26
GRÁFICO 2 – CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA MÉDIA APÓS SER PENEIRADA	Erro! Indicador não definido.
GRÁFICO 3 – PORCENTAGENS RETIDAS DA AREIA MÉDIA APÓS SER PENEIRADA	54
GRÁFICO 4 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS MISTAS SEPARADAS POR TRAÇO	81
GRÁFICO 5 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS MISTAS SEPARADAS POR TRAÇO.....	82
GRÁFICO 6 – INTERVALOS DE CONFIANÇA DE MÉDIAS DA RETRAÇÃO INICIAL MÁXIMA PARA OS TRAÇOS DE ARGAMASSAS MISTAS	83
GRÁFICO 7 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS MISTAS E SEUS RESPECTIVOS TEMPOS T10 E T90	84
GRÁFICO 8 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS MISTAS E SUAS SÉRIES COM MAIOR CORRELAÇÃO LINEAR PARA CÁLCULO DE VELOCIDADE DE RETRAÇÃO.....	85
GRÁFICO 9 – VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA NO PERÍODO INTERMEDIÁRIO E A COMPARAÇÃO COM A RELAÇÃO CAL/AGLOMERANTES	86
GRÁFICO 10 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS DIVIDIDAS POR TRAÇO	87
GRÁFICO 11 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS DIVIDIDAS POR TRAÇO.....	88
GRÁFICO 12 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO AR E SUAS SÉRIES SELECIONADAS PARA CÁLCULO DE VELOCIDADE	89
GRÁFICO 13 – COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIAS E RELAÇÃO AGLOMERANTE/AGREGADO PARA ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS	90
GRÁFICO 14 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS COM FILME PVC.....	91

GRÁFICO 15 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS POR FILME PVC DIVIDIDAS POR TRAÇO ...	92
GRÁFICO 16 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS COM FILME PVC E SUAS CURVAS DE TENDÊNCIA LOGARÍTMICAS	93
GRÁFICO 17 – COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIAS E RELAÇÃO ALGOMERANTE/AGREGADO PARA ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS POR FILME PVC	94
GRÁFICO 18 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO DE 5m/s	95
GRÁFICO 19 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO 5m/s E SUAS SÉRIES SELECIONADAS PARA O CÁLCULO DE VELOCIDADE	96
GRÁFICO 20 – COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIAS E RELAÇÃO ALGOMERANTE/AGREGADO PARA ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO DE 5m/s	97
GRÁFICO 21 – VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO DIANTE DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÕES AO AR	98
GRÁFICO 22 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:3 DIANTE DA VARIAÇÃO DAS DIFERENTES EXPOSIÇÕES AO AR	99
GRÁFICO 23 – INTERVALOS DE CONFIANÇA DE MÉDIAS DA RETRAÇÃO MÁXIMA DO TRAÇO 1:3 EM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO	100
GRÁFICO 24 – CURVAS DE RETRAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:4 DIANTE DA VARIAÇÃO DAS DIFERENTES EXPOSIÇÕES AO AR	101
GRÁFICO 25 – INTERVALOS DA RETRAÇÃO MÁXIMA EM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO PARA O TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:4.....	101
GRÁFICO 26 – CURVAS DE RETRAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:6 DIANTE DA VARIAÇÃO DAS DIFERENTES EXPOSIÇÕES AO AR	102

GRÁFICO 27 – INTERVALOS DA RETRAÇÃO MÁXIMA EM RELAÇÃO À VARIACÃO DE EXPOSIÇÃO PARA O TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:6.....	103
GRÁFICO 28 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA MISTA COM VARIACÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL.....	107
GRÁFICO 29 – PERDAS DE MASSA MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA MISTA COM VARIACÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL.....	108
GRÁFICO 30 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTOS AO AR.....	109
GRÁFICO 31 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO SELADOS POR FILME PVC.....	109
GRÁFICO 32 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA EXPOSTOS AO VENTO (5m/s).....	110
GRÁFICO 33 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:3 COM VARIACÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR	111
GRÁFICO 34 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:4 COM VARIACÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR	111
GRÁFICO 35 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:6 COM VARIACÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR	112
GRÁFICO 36 – PERDA DE MASSA MÉDIA A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:3 COM VARIACÃO DO TIPO DE EXPOSIÇÃO.....	113
GRÁFICO 37 – PERDA DE MASSA MÉDIA A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:4 COM VARIACÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR	114
GRÁFICO 38 – PERDA DE MASSA MÉDIA A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:6 COM VARIACÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR	114

GRÁFICO 39 – PERDAS DE MASSA MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTOS AO AR.	116
GRÁFICO 40 – PERDAS DE MASSA MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO SELADOS POR FILME PVC.....	116
GRÁFICO 41 – PERDAS DE MASSA MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA EXPOSTOS AO VENTO (5m/s).....	117
GRÁFICO 42 – PROPORÇÃO DE ABORDAGENS ADOTADAS PARA INTERPRETAR A RETRAÇÃO PLÁSTICA	177
GRÁFICO 43 – FREQUÊNCIA DE MATERIAL.....	179

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FASES DE HIDRATAÇÃO E OS ESTÁGIOS E TIPOS DE RETRAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCOS	31
TABELA 2 – MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA EM ARGAMASSAS.....	51
TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO DA AREIA.....	53
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CP-II-F	54
TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO CP-II-F	55
TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CIMENTO CP-II-F.....	55
TABELA 7 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CAL CH-I	55
TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA CAL CH-I.....	55
TABELA 9 – RESUMO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS REGISTRADAS DURANTE OS ENSAIOS.....	68
TABELA 12 – TRAÇOS DE ARGAMASSA MISTA ADOTADOS, SUAS PROPORÇÕES E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	69
TABELA 10 – TRAÇOS EM VOLUME DE ARGAMASSA DE CIMENTO ADOTADOS E SUAS PROPORÇÕES	70
TABELA 11 – TRAÇOS DE ARGAMASSA DE CIMENTO ADOTADOS, SUAS PROPORÇÕES E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	70
TABELA 13 – ENSAIOS REALIZADOS	76
TABELA 14 – CLASSIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DO EXPERIMENTO	78
TABELA 15 – CPs DOS ENSAIOS SELADOS	79
TABELA 16 – CPs DE TODOS OS ENSAIOS	80
TABELA 17 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA OBTIDA NOS ENSAIOS DE ARGAMASSA MISTA	82
TABELA 18 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE OS TEMPOS T10 E T90 (RETIRADOS COM PRECISÃO DE 1 SEGUNDO).....	84
TABELA 19 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE A PERDA DE MASSA APÓS 24 HORAS DE HIDARATAÇÃO	86

TABELA 20 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO AR SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA.....	88
TABELA 21 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTA AO AR SOBRE A PERDA DE MASSA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS	90
TABELA 22 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DO TRAÇO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO AR SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA.....	91
TABELA 23 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO SELADA POR FILME PVC SOBRE A PERDA DE MASSA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS.....	94
TABELA 24 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DO TRAÇO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO 5m/s SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA	95
TABELA 25 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTA AO VENTO 5m/s SOBRE A PERDA DE MASSA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS.....	97
TABELA 26 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA NOS DIFERENTES TRAÇOS DE ARGAMASSA DE CIMENTO	98
TABELA 27 – TEMPOS MÉDIOS T10 E T90 DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO PARA AS EXPOSIÇÕES AO VENTO (5m/s) E EXPOSTA AO AR. 104	
TABELA 28 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR SOBRE O T90 E O T10 DOS DIFERENTES TRAÇOS DE ARGAMASSA DE CIMENTO	104
TABELA 29 – COMPARAÇÃO DE PERDAS DE MASSA MÉDIAS APÓS 24 HORAS DE HIDRATAÇÃO.....	105
TABELA 30 – RESUMO DOS RESULTADOS DA RETRAÇÃO INICIAL OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO	105
TABELA 31 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE A RETRAÇÃO A LONGO PRAZO.....	106

TABELA 32 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AGLOMERANTE/AGREGADOS SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA NAS EXPOSIÇÕES ADOTAS.....	108
TABELA 33 – COMPARAÇÃO DA MAGNITUDE DA RETRAÇÃO MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO PARA AS DIFERENTES EXPOSIÇÕES ADOTAS	110
TABELA 34 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR ADOTADAS SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA A LONGO PRAZO ..	112
TABELA 35 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR ADOTADAS SOBRE A PERDA DE MASSA MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO	113
TABELA 36 – COMPARAÇÃO DA MAGNITUDE DA PERDA DE MASSA MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO PARA AS DIFERENTES EXPOSIÇÕES ADOTADAS	115
TABELA 37 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA CONCENTRAÇÃO DE AGLOMERANTE/AGREGADOS SOBRE A EVAPORAÇÃO MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO NAS EXPOSIÇÕES ADOTADAS.....	115
TABELA 38 – RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA RETRAÇÃO A LONGO PRAZO.....	117
TABELA 39 – RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA RETRAÇÃO A LONGO PRAZO EM COMPARAÇÃO COM OS OBTIDOS PELO MÉTODO PROPOSTO (RETRAÇÃO).....	118
TABELA 40 – RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA RETRAÇÃO A LONGO PRAZO EM COMPARAÇÃO COM OS OBTIDOS PELO MÉTODO PROPOSTO (PERDA DE MASSA).....	118
TABELA 41 – APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE DO CSTB (1993) SOBRE OS RESULTADOS DO RETRAÇÃO A LONGO PRAZO E A RETRAÇÃO TOTAL.....	119
TABELA 41 – COMPARAÇÃO ENTRE A RETRAÇÃO INICIAL E A LONGO PRAZO E SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA A RETRAÇÃO TOTAL.....	120
TABELA 42 – RESULTADOS DOS TERMOS DE BUSCA	173
TABELA 43 – PERGUNTAS 5W1H	174
TABELA 44 – VARIÁVEIS DE CONTROLE AMBIENTAL.....	175
TABELA 45 – DURAÇÃO DOS MÉTODOS PROPOSTOS	176

TABELA 46 – MEDIDAS E SUAS FREQUÊNCIAS NOS ESTUDOS	177
TABELA 47 – OBJETIVOS.....	180
TABELA 48 – TECNOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO.....	185
TABELA 49 – MATERIAIS DOS MOLDES	187
TABELA 50 – FORMATOS DOS MOLDES.....	187
TABELA 51 – FONTE DE RESTRIÇÃO.....	188
TABELA 52 – LEITURAS	189
TABELA 53 – RESULTADOS DE REVISÃO SISTEMÁTICA DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA	190
TABELA 54 – LEGENDA 5W1H.....	192

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABS	- Acrilonitrilo-butadieno-estireno
a/c	- água/cimento
BCIS	- <i>The Building Cost Information Service</i>
C-S-H	- Silicato de Cálcio Hidratado
DIC	- <i>Digital Image Correlation</i>
DSR	- <i>Design Science Research</i>
FBG	- <i>Fiber Bragg grating</i>
LAME	- Laboratório de Materiais e Estruturas
LATECA	- Laboratório de Tecnologia de Argamassas
LVDT	- <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
NBR	- Norma técnica brasileira
PAS	- Ponto de Auto Suporte ou Ponto de Auto Sustentação
PPP-BOTDA	- <i>Pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis</i>
T90	- Tempo em que a retração atinge 90% da máxima
T10	- Tempo em que a retração atinge 10% da máxima
TEA	- Tempo de entrada do ar
TS	- Tempo de secagem
UFPR	- Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS	22
1.1.1 Objetivo geral	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	23
1.2 JUSTIFICATIVA	23
1.2.1 Ambiental e econômica	23
1.2.2 Tecnológica	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 O FENÔMENO DA RETRAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	29
2.1.1 Retração plástica.....	32
2.1.1.1 Ocorrência dos mecanismos da retração plástica	34
2.1.1.2 Interpretação da retração plástica de materiais cimentícios	35
2.1.2 Retração autógena e química	37
2.1.3 Retração química	38
2.1.4 Retração por secagem	41
2.1.5 Retração térmica	43
2.1.6 Retração por carbonatação	44
2.1.7 Mecanismos dinâmicos da água interna que regem a retração	44
2.1.7.1 Estados da água.....	44
2.1.7.2 Tensão superficial.....	46
2.1.7.3 Pressão de separação em macroporos	48
2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	49
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	53
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	53
3.1.1 Areia.....	53
3.1.2 Cimento.....	54
3.1.3 Cal.....	55
3.2 MOLDE E INSTRUMENTAÇÃO.....	56
3.2.1 Ensaio NBR 15261	56
3.2.2 Molde e instrumentação do método de ensaio proposto	57
3.3 CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO AO AR ADOTADAS	65

3.4 CONDIÇÕES DE CURA.....	67
3.5 FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	68
3.6 PROCEDIMENTO E ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL	71
3.6.1 Procedimento de ensaio.....	71
3.6.2 Procedimento de mistura.....	75
3.6.3 Ensaio realizados	75
3.6.4 Coleta de dados	76
3.6.5 Análise dos resultados	77
3.6.6 Variáveis do experimento	77
3.6.7 Delimitação do trabalho.....	78
4 RESULTADOS.....	79
4.1 INTRODUÇÃO	79
4.2 RETRAÇÃO INICIAL (MÉTODO PROPOSTO).....	80
4.2.1 Retração inicial dos traços de argamassa mista	80
4.2.2 Retração inicial dos traços de argamassa de cimento	86
4.2.2.1 Argamassas de cimento expostas ao ar.....	87
4.2.2.2 Argamassas de cimento seladas com filme de PVC	91
4.2.2.3 Argamassas de cimento expostas ao vento	94
4.2.2.4 Comparação entre exposições para cada argamassa de cimento	97
4.2.3 Tabulação de resultados da retração inicial	105
4.3 RETRAÇÃO A LONGO PRAZO.....	105
4.3.1 Retração a longo prazo dos traços de argamassa mista	106
4.3.2 Retração a longo prazo dos traços de argamassa de cimento.....	108
4.3.3 Tabulação de resultados da retração a longo prazo e comparação com a retração inicial	117
4.4 CONCLUSÕES	121
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS.....	125
APÊNDICE 1 – TABELAS DETALHADAS DOS TRAÇOS ADOTADOS PELA PRESENTE PESQUISA.....	137
APÊNDICE 2 – GRÁFICOS DE RETRAÇÃO INICIAL DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	139
APÊNDICE 3 – RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	173

1 INTRODUÇÃO

Durante as primeiras horas de hidratação, materiais cimentícios, como as argamassas, estão sujeitos a diversas variáveis que, combinadas, podem resultar em uma variação dimensional denominada retração inicial. Essa diminuição de volume, somada à retração a longo prazo, é notória pela sua capacidade de causar fissuração do material.

Metha & Monteiro (2008) afirmam que a retração, quer seja plástica, por secagem ou autógena, pode ser uma das causas da fissuração de materiais cimentícios, comprometendo assim sua vida útil e sua resistência, além de aumentar a interferência de agentes agressivos. De acordo com Maltese *et. al.* (2005), “a retração é um dos principais motivos de falhas em argamassas, como empenamento (*curling*), fissuração e descolamento”. Kayondo *et. al.* (2019) constataram que os principais mecanismos que promovem a fissuração plástica são: assentamento de partículas sólidas; exsudação; evaporação; movimento capilar; acabamento da superfície. Estes, combinados, levam a uma contração tridimensional de volume do material cimentício, que em suas primeiras horas ainda não desenvolveu resistência mecânica para suportá-la. Portanto, se essa movimentação for contida, ocorrerão fissuras no estado plástico como resultado.

Várias estratégias de mitigação de retração em materiais cimentícios já foram propostas. Exclusivamente em relação a argamassas e à mitigação da retração plástica, podem-se notar como estratégias: uso do cimento sufoaluminato de cálcio (Péra & Ambroise, 2004; Le-Bihan, 2012); cura externa (Kronlöf *et. al.*, 1995); adições como fibras (Tolêdo Filho & Sanjuán, 1999; Tolêdo Filho *et. al.*, 2005; Banthia & Gupta, 2007, 2009), cinza volante (Ravina, 1986) e aditivos químicos (Le-Bihan, 2012).

Mensurar a variação volumétrica permite compreender melhor os mecanismos que regem o comportamento desses materiais sob a influência da retração inicial, além de prever futuros problemas de durabilidade. Maior conhecimento sobre esse fenômeno contribui para o estudo de como evitá-lo. Por isso procede a necessidade da existência de métodos facilmente reproduzíveis.

Existem diversas maneiras de interpretar a variação causada pela retração no estado plástico, uma delas é a quantificação de fissuras, a única que possui métodos de mensuração normatizados (ASTM C1579-21 e GBT 50082-2009). Outras maneiras de interpretação, como pelos deslocamentos lineares horizontais ou verticais, não

foram desenvolvidas em métodos normatizados. Porém, grandes centros de pesquisas, excluindo a pesquisa brasileira, já exploraram esses métodos amplamente (Silva, 2011). No Brasil a única norma que se propõe a mensurar a retração em argamassas é a NBR 15261 (ABNT, 2005), porém ela prevê a medição da retração somente no estado endurecido.

Nacionalmente, há poucas propostas de métodos de medição da retração no estado plástico, dentre eles os propostos pelos seguintes pesquisadores: Bastos (2001), Silva (2011) e Giroto *et. al.* (2011).

O método de Détriché (1977), ampliado pelas condições aplicadas por Bastos *et al.* (2001), se baseia na retração livre por deslocamentos horizontais utilizando LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) como equipamento de medição. O mesmo equipamento foi utilizado por Silva (2011) em sua adaptação unilateral de retração livre para argamassas de revestimento, a partir do estudo de fibras em concreto desenvolvido pelos pesquisadores Wongtanakitcharoen & Naaman (2007). Giroto *et. al.* (2011) propuseram a adaptação do método de Soroushian & Ravanbakhsh (1998), que analisaram a fissuração em concretos para argamassas. Ele se baseia no mesmo princípio de profundidade diferencial do molde para induzir fissuras indicado na ASTM C1576-13.

Dentro deste contexto, o objetivo neste trabalho é propor um método de ensaio para a determinação da retração em argamassas nas primeiras vinte e quatro horas de hidratação, através da abordagem de deslocamentos lineares horizontais. O fenômeno da retração plástica, que contempla o período do primeiro contato da mistura cimentícia com a água até o seu tempo de início de pega, cuja resistência a solicitações é baixa ou nula até este momento, merece atenção especial por ser a mais crítica, logo deve ser estudado e mensurado.

1.1 OBJETIVOS

Nessa subseção serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo propor um ensaio para a determinação da retração em argamassas nos estados plástico e endurecido nas primeiras vinte e quatro horas de hidratação do cimento, através da medida de deslocamentos lineares horizontais.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- comparar a magnitude da retração inicial com a retração a longo prazo, dada pelo ensaio da NBR 15261 “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional” (ABNT, 2005);
- verificar o efeito da exposição inicial dos corpos de prova às condições ambientais propostas nesse trabalho na retração inicial e a longo prazo da NBR 15261.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nesta seção apresentam-se as justificativas que incentivam a presente pesquisa.

1.2.1 Ambiental e econômica

O desenvolvimento contemporâneo da civilização tem um impacto significativo em nosso ambiente. Portanto, a construção civil ambientalmente sustentável depende de, entre outros: economia de recursos naturais e redução da quantidade de resíduos, incluindo resíduos pós-produção, como os gerados pela manutenção (Lenart & Gruszczyński, 2019). Sendo a retração um fenômeno com potencial de provocar manifestações patológicas em revestimentos de argamassa, pode-se entender que ela afeta a durabilidade desse sistema e aumenta a necessidade por manutenção. Essas duas consequências afetam o meio ambiente por aumentarem o consumo dos materiais da construção civil, particularmente o cimento, que é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (Lehne & Preston, 2018). Portanto, criar novas ferramentas que permitam melhor compreender

o fenômeno da retração – que é o principal objetivo da presente pesquisa – é uma das maneiras de contribuir para aumentar a durabilidade e o desempenho de um material muito utilizado por uma das indústrias mais poluentes no mundo.

De acordo com Gaspar *et. al.* (2002), a importância econômica, social e ambiental da manutenção e da reabilitação de estruturas pode ser facilmente reconhecida quando se considera que elas representam 35% do investimento total em construção na Europa, chegando até 50% em alguns países (Ueda & Takewaka, 2007). Portanto, dentro da construção civil procede que projetos, execução e materiais priorizem a durabilidade das estruturas, para que as novas estruturas tenham vida útil maior e menor necessidade por manutenção e, conseqüentemente, representem menor impacto econômico.

Sabe-se que o fenômeno da retração em materiais cimentícios pode afetar a durabilidade de revestimentos de argamassa e, por conseqüência, pode aumentar a necessidade de manutenção. De acordo com Silva (2011), “a manutenção e os reparos em revestimentos de argamassas, principalmente das fachadas de grandes edifícios, tornam-se onerosos, pois exigem equipamentos e materiais apropriados e, também, mão-de-obra qualificada”. O controle da fissuração por retração plástica deve ser uma consideração importante do projeto em relação à mitigação de fissuras em diferentes idades e, por sua vez, minimizando os custos de manutenção a longo prazo (Branston *et. al.*, 2016). A criação de ensaios padronizados que facilitem o estudo desse fenômeno pode contribuir para estudar meios de evitá-lo, o que pode contribuir para a redução de gastos de manutenção.

No intuito de justificar os argumentos, a seguir são apresentadas as principais manifestações patológicas causadas ou facilitadas pela retração e que ampliam a necessidade pela manutenção. De acordo com Maltese *et. al.* (2005), “a retração é um dos principais motivos de falhas em argamassas, como empenamento (*curling*), fissuração e descolamento”. Cincotto¹ (1997, apud Miranda, 2000) afirma que entre os problemas observados em revestimentos de argamassa no Brasil, a fissuração e o descolamento são os mais frequentes. Também de acordo com Cincotto (1988), “as fissuras mapeadas têm formas variadas e distribuem-se por toda a superfície do

¹ CINCOTTO, M.A. **Alguns pontos para reflexão e debate**. Obra, n.96, p.19-20, nov., 1997.

revestimento, sendo basicamente decorrentes da retração da argamassa de base”. A FIGURA 1 ilustra a fissuração reconhecida como mapeada.

FIGURA 1 – FISSURAS MAPEADAS CAUSADAS POR REDUÇÃO DO VOLUME DA ARGAMASSA

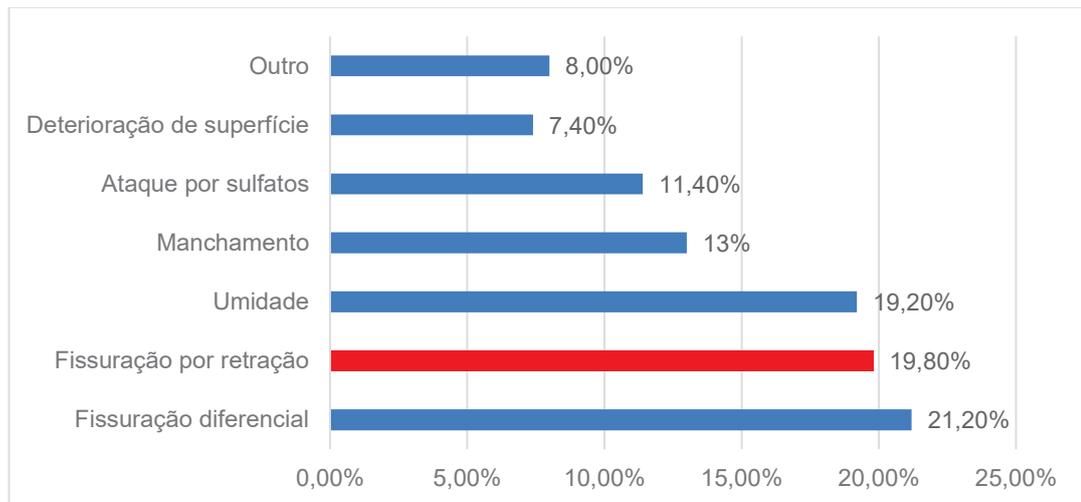


Fonte: esquerda – Leal² (2003, apud Segat, 2005), direita – o autor (2019).

Em um estudo sobre quantificação, análise e categorização de defeitos em revestimentos de argamassa cimentícia em fachadas, Gaspar & de Brito (2005), a partir de uma amostra de 150 fachadas no sul de Portugal, encontraram uma incidência de fissuração por retração em paredes contínuas (sem aberturas) em quase 20% dos casos (GRÁFICO 1). O estudo concluiu que a fissuração é a manifestação patológica mais comum e grave em argamassas de revestimento nas fachadas estudadas.

² LEAL, U. **Fachadas e paredes estão doentes**: apesar da maior oferta de argamassas e do compromisso dos fabricantes com a qualidade dos produtos, mais trincas e fissuras são visíveis nas edificações... *Téchne – A Revista do Engenheiro Civil*, São Paulo, ano 11, n. 76, p. 48-52, jul. 2003.

GRÁFICO 1 – OCORRÊNCIA DE DEFEITOS EM REBOCOS EM PAREDES CONTÍNUAS



FONTE: adaptado de Gaspar & Brito (2005).

Ainda, as fissuras não são apenas esteticamente negativas, mas também permitem a penetração de substâncias prejudiciais e podem levar à rápida deterioração das estruturas; principalmente a penetração de água, microrganismos e cloretos (Branston *et. al.*, 2016). Thomaz (1989) ainda cita problemas como manchas de umidade, bolor e lixiviação que pode causar eflorescências (a FIGURA 2 apresenta um exemplo de eflorescências associadas à fissuração mapeada em fachada de revestimento de argamassa).

FIGURA 2 – MANCHAS DE EFLORESCÊNCIA ASSOCIADAS A FISSURAÇÃO MAPEADA EM FACHADA DE REVESTIMENTO DE ARGAMASSA

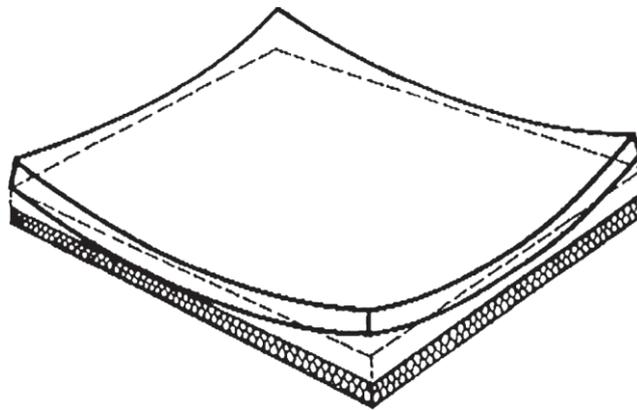


Fonte: Efflock (2015).

Uma manifestação patológica diretamente causada pela retração é o empenamento. Trata-se de uma distorção de um elemento originalmente plano em um elemento de forma curva causada pela retração induzida por um gradiente

diferencial de umidade ao longo da espessura do elemento (Jaafri *et. al.*, 2019). De acordo com Le-Bihan *et. al.* (2012), as variações dimensionais de um contrapiso, quando a superfície superior seca, assumem várias formas; perto das bordas do contrapiso, a consequência do gradiente de deformação é uma distorção para cima que é maior nos cantos: empenamento (FIGURA 3). Este fenômeno é comumente observado em argamassas autonivelantes utilizadas no revestimento de pisos.

FIGURA 3 – EMPENAMENTO DE CONTRAPISO



Fonte: Péra & Ambroise (2004).

1.2.2 Tecnológica

Como será exposto na parte sistemática da revisão bibliográfica, existem diversos métodos e instrumentações para medir a retração plástica de materiais cimentícios. Porém, apenas dois métodos (ASTM C1576-13 e GBT 50082-2009) são normatizados e nenhum deles utiliza a abordagem dos deslocamentos lineares horizontais.

De acordo com Hammer (2007), concretos chamados de concretos de alto desempenho, por geralmente possuírem baixa relação água/cimento (a/c), são especialmente suscetíveis à fissuração causada pela retração plástica. Isso é apontado pelo autor e outros – Wu *et. al.* (2017), Melo Neto (2008) – como sendo um grande motivador para o estudo da retração inicial que contempla o período do estado plástico do material. Isso se reflete na escolha de materiais a serem estudados, visto que em torno de 60% dos métodos de mensuração da retração plástica priorizam exclusivamente o concreto e apenas 28% abrangem argamassas, de acordo com os resultados do estudo realizado na seção 2.2.

De acordo com Silva (2011), muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre a retração plástica nos grandes centros de pesquisas em vários países do mundo. Porém, no Brasil, pesquisas sobre este assunto são muito escassas. Cabe destacar a pesquisa de Bastos (2001), na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que ampliou as condições de ensaio do equipamento do *Institut national des sciences appliquées* - INSA de Toulouse, França.

Diante do exposto, pode-se notar a necessidade de um método nacional que seja, preferencialmente, de fácil execução, para a medição da retração inicial em argamassas. O método proposto se inspira no estudo de Bastos (2001), ampliando o estudo para argamassas simples de cimento, adotando diferentes exposições ao ar e optando por instrumentação financeiramente acessível.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma revisão da literatura abrangendo os tópicos: o fenômeno da retração em materiais cimentícios, manifestações patológicas provenientes da retração em argamassas de revestimento e uma revisão sistemática dos métodos existentes para mensurar a retração plástica em materiais cimentícios.

2.1 O FENÔMENO DA RETRAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

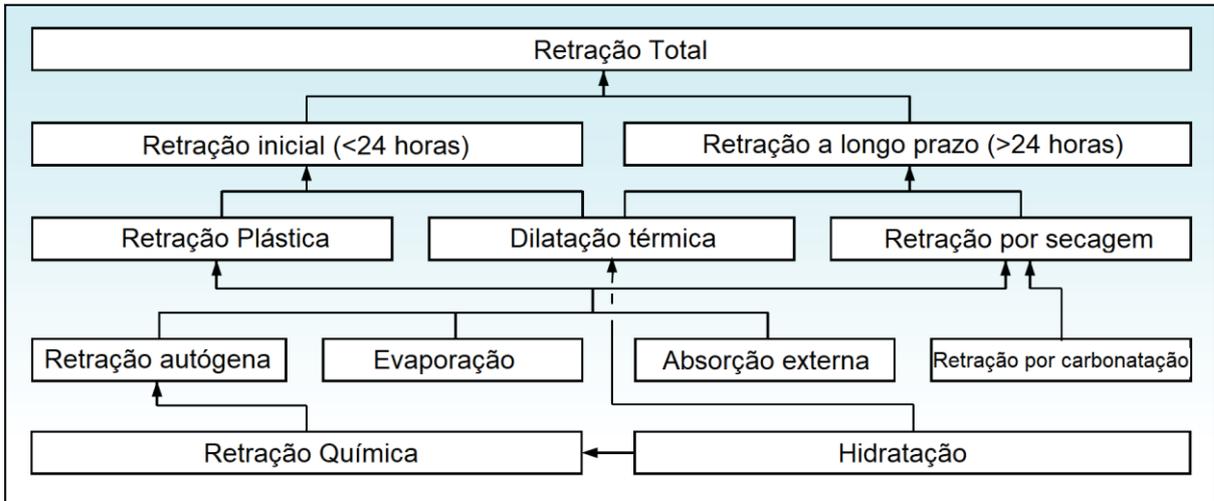
Após o primeiro contato com a água, os materiais cimentícios sofrem alterações volumétricas de contração. Isso se dá pelo menor volume dos produtos da hidratação comparados com seus componentes anidros, pela perda de água para o ambiente, para o substrato e para a hidratação (Hua *et. al.*, 1995). Essa contração em volume é denominada pela literatura como retração.

O fenômeno da retração pode ser dividido em dois estágios: inicial e tardio, ou “a longo prazo” (Holt, 2001). O estágio inicial é geralmente atribuído ao primeiro dia de hidratação do cimento, que é quando ocorrem o início e o fim da pega deste material, além do endurecimento inicial. As idades posteriores, ou a longo prazo, referem-se àquelas a partir de 24 horas. Na literatura, de um modo geral, a retração a longo prazo recebe muito mais atenção do que a que ocorre no estágio inicial (Holt, 2005).

Existem diversos tipos de retração e este é um dos fatores que contribuem para a complexidade do fenômeno (Giroto, 2012). É consensual na literatura o reconhecimento de seis tipos principais de retração: plástica, química, autógena, por secagem, térmica e por carbonatação (Khairallah, 2009). A retração plástica ocorre nas primeiras horas do estágio inicial, e a retração por carbonatação ocorre no estágio de longo prazo, sendo que os outros tipos de retração ocorrem em ambos os estágios (TABELA 1).

Esping (2007), desconsiderando mecanismos de expansão e restrições de movimento, propõe uma esquematização dos mecanismos da retração total dividida entre os estágios inicial e a longo prazo (FIGURA 4).

FIGURA 4 – MAPEAMENTO DOS MECANISMOS E ESTÁGIOS DA RETRAÇÃO TOTAL



Fonte: traduzido de Esping (2007).

Pode-se observar que Esping (2007) não indica uma ligação, nesse esquema, entre a retração por secagem e a retração inicial, apesar do próprio autor afirmar que a retração por secagem precoce, que é resultado da perda de água para o meio externo nas primeiras horas de hidratação, exerce grande influência sobre a retração no estado plástico.

No intuito de esclarecer a cronologia das fases de hidratação, início e fim de pega do cimento e sua relação com os diferentes tipos de retração dos materiais cimentícios, foi desenvolvida a TABELA 1 a partir dos estudos de Hammer (2007) e Holt (2001). Os tempos, em horas, que marcam início e fim de pega determinados pela agulha de Vicat, foram retirados dos estudos de Justnes *et. al.* (2000) e são especialmente sensíveis à variação da relação água/cimento da mistura, aditivos aceleradores e retardadores de hidratação e diferentes tipos de cimento. Na TABELA 1 foram utilizados valores aproximados desses tempos.

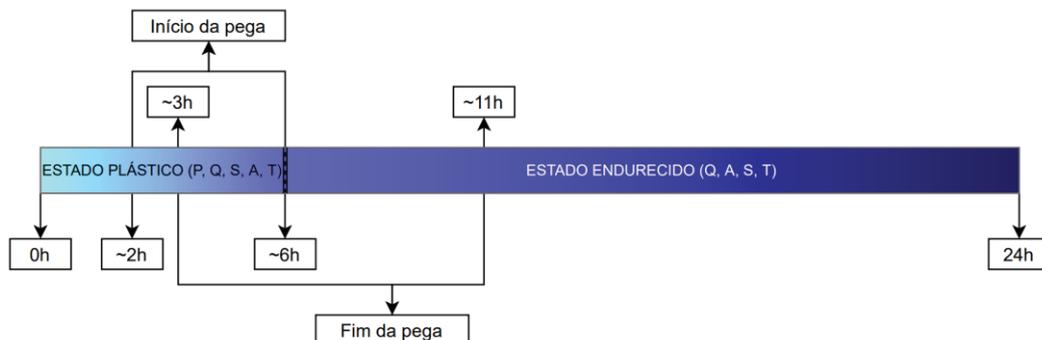
TABELA 1 – FASES DE HIDRATAÇÃO E OS ESTÁGIOS E TIPOS DE RETRAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCOS

Fase/ Estado (Hammer, 2007)		Plástico e semi-plástico (até início da pega)	Endurecimento inicial e estado endurecido (após início da pega)	Endu
Tempo a partir do primeiro contato com a água (Justnes <i>et. al.</i> , 2000)		0 a 6h	3 a 24h	24
Estágio de retração (Holt, 2001)		Estágio inicial		Longo
Tipos de retração possíveis	Plástica	X		
	Autógena	X	X	
	Química	X	X	
	Térmica	X	X	
	Secagem	X	X	
	Carbonatação			

Fonte: o autor (2021).

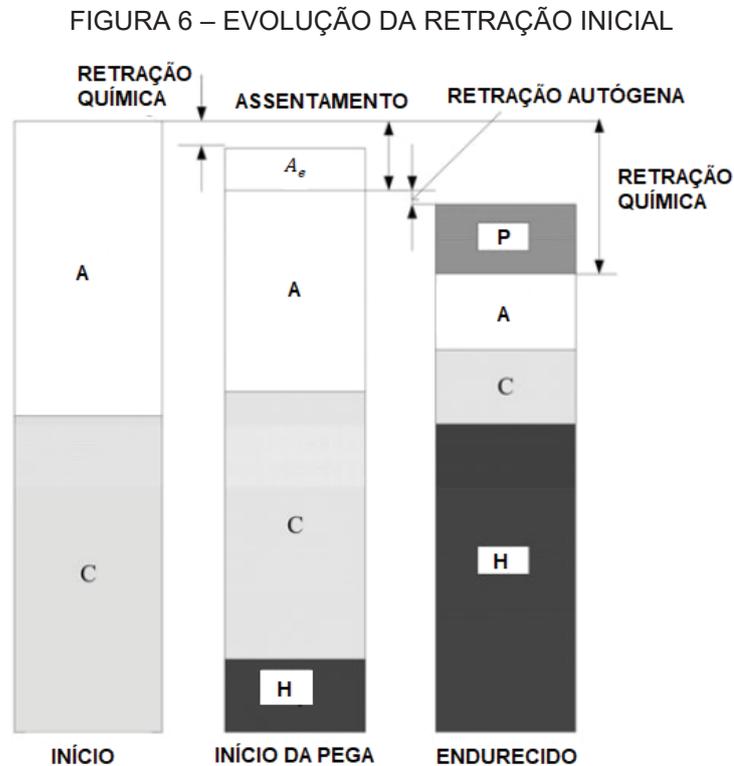
Para o adequado entendimento a respeito da ocorrência sequencial de eventos de retrações que se espera medir, porém não diferenciar, ou seja, medi-las como um conjunto, está apresentada na FIGURA 5 uma linha do tempo das retrações que ocorrem até vinte e quatro horas. Ela é baseada nos mesmos princípios utilizados na TABELA 1, apresentando os tempos de início e fim de pega do cimento determinados a partir do aparelho de Vicat e como eles se relacionam com os estados plástico e endurecido. Os valores de tempo de pega se basearam nos tempos aproximados extremos obtidos nos estudos de Justnes *et. al.* (2000), usados apenas como referência para a criação da linha do tempo: sua presença serve como ilustração da divisão do estado plástico e endurecido que ocorre no início da pega.

FIGURA 5 – CRONOLOGIA DA RETRAÇÃO INICIAL



Legenda: P, retração plástica; Q, retração química; S, retração por secagem; A, retração autógena; T, retração térmica. Fonte: o autor (2021).

Uma evolução da retração em relação aos estágios de hidratação e os diferentes tipos de retração podem ser observados na FIGURA 6.



Legenda: A, água; C, cimento anidro; H, produtos da hidratação; A_e , água exsudada; P, poros vazios. Fonte: traduzido de Lin & Huang (2010).

O termo “assentamento” se refere à retração plástica que ocorre no sentido vertical, melhor explicado no item 2.1.1.2.

Os diferentes tipos de retração e seus mecanismos são explicados nos subitens a seguir. Vale notar que o método proposto pelo presente trabalho pretende obter a mensuração da retração inicial sem diferenciar entre os diferentes tipos, obtendo, portanto, uma retração inicial total.

2.1.1 Retração plástica

Tolêdo Filho *et. al.* (2005) afirmam que “a retração plástica é a alteração dimensional que ocorre em todos os materiais à base de cimento nas primeiras horas após o início da hidratação, quando a mistura se encontra no estado plástico e ainda não obteve resistência significativa”. Ou seja, a retração plástica se refere a uma

parcela do estágio inicial da retração que estaria entre o primeiro contato com a água e o fim do estado plástico do material, contemplando todas as deformações causadas pelos vários tipos de retração que atuam durante esse período (esses tipos seriam: retração química, autógena, secagem e térmica). Metha & Monteiro (2008) também intitulam a retração plástica de retração pré-endurecimento ou pré-pega.

Hammer (2007) divide a idade inicial em três fases consecutivas:

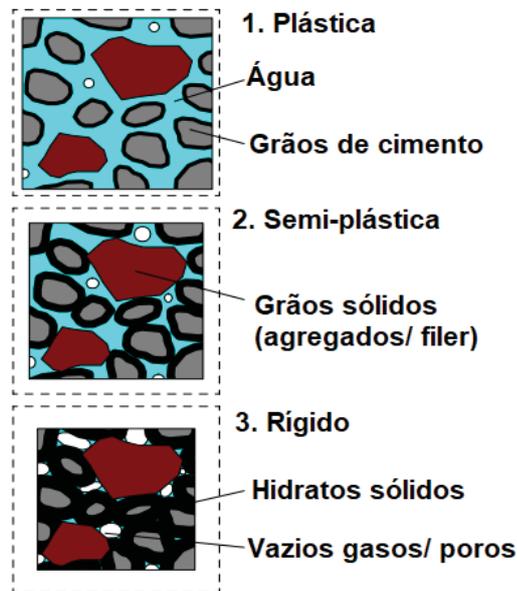
1. "Fase líquida": até a formação do esqueleto mineral causada pela hidratação ou até a formação de um sistema de menisco formado por evaporação, ou seja, até que a pasta/argamassa/concreto possa sustentar seu próprio peso (ponto de auto-suporte, PAS). É a fase em que a retração autógena é igual à retração química e se manifesta apenas em assentamento (deslocamento vertical, vide sub-tópico 2.1.1.2), ou seja, não há deformação horizontal nesse período.

2. "Fase semilíquida": fase até a pega inicial, momento em que a pasta/argamassa/concreto pode ser trazida de volta à fase líquida com agitação. O início dessa fase é marcado pelo momento em que a pressão da água nos poros começa a produzir tensões e, conseqüentemente, a deformação horizontal (contração) começa a se desenvolver.

3. "Fase de endurecimento inicial": início da pega até algumas horas após o fim da pega. Nessa fase há um desenvolvimento significativo da rigidez.

A fase líquida somada à fase semilíquida corresponde à fase plástica. Esping (2007) chama as três fases de: plástica, semi-plástica e rígida, e fornece a ilustração delas que pode ser observada na FIGURA 7.

FIGURA 7 – DESENVOLVIMENTO ESTRUTURAL E A RETRAÇÃO PLÁSTICA



Fonte: adaptado de Esping (2007).

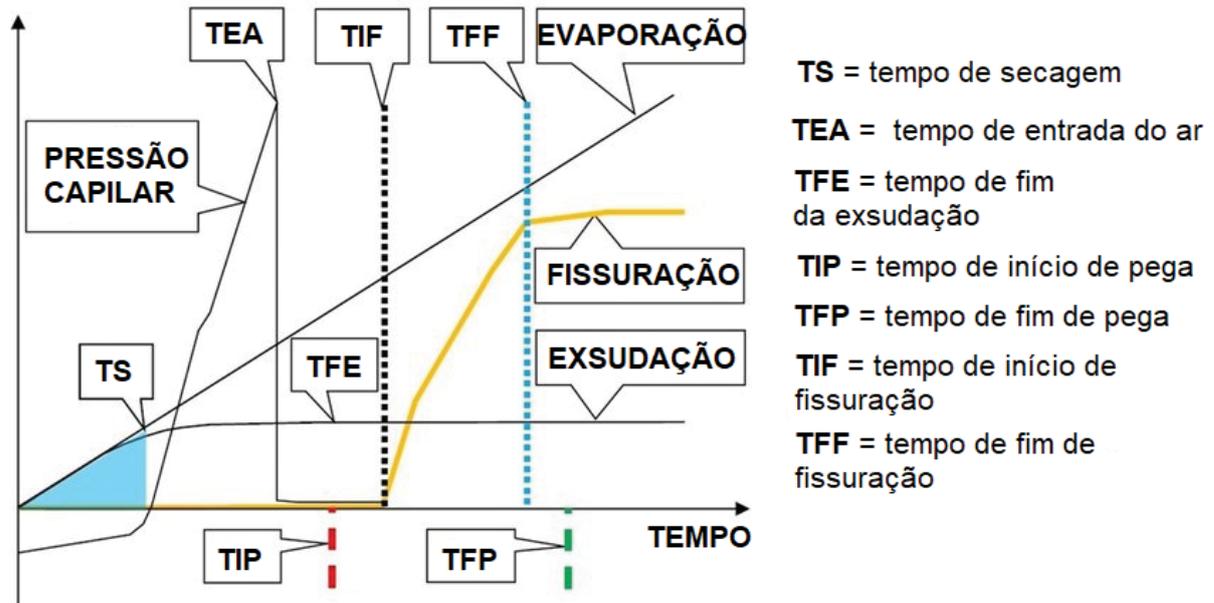
2.1.1.1 Ocorrência dos mecanismos da retração plástica

Sayahi *et. al.* (2014), após uma revisão de diversos estudos sobre a retração plástica em materiais cimentícios, expõem a seguinte explicação da típica evolução do fenômeno:

Após a moldagem, uma fina película de água cobre a superfície do material e um sistema de poros interconectados, completamente saturados, é formado. Pouco tempo depois, o tempo de secagem (TS) é atingido, quando a taxa de evaporação da água excede a taxa de exsudação do material. A exsudação trata-se do processo em que a água flui da parte interna do material em direção à sua superfície, devido ao efeito da gravidade e sedimentação de partículas, causando acúmulo de água na superfície (Powers, 1968). Após o TS, o filme fino de água desaparece devido à evaporação e a água no sistema de poros começa a evaporar (retração por secagem). Este momento é o início do aumento da pressão capilar que se converte de uma pressão de compressão em uma pressão de tração (a pressão capilar é compressiva antes do TS devido à pressão hidrostática interna da água no material). A pressão capilar continua aumentando até o ar ingressar no sistema de poros. Este tempo é definido como o tempo de entrada do ar (TEA). Consequentemente, a pressão capilar diminui repentina e drasticamente, pois a pasta não consegue mais resistir à pressão

capilar de tração. O valor da pressão capilar no momento da entrada de ar é crítico, pois os poros vazios formam pontos fracos na superfície do material, que podem ser a origem da localização da fissura. Esse resumo pode ser observado no esquema da FIGURA 8.

FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DOS MECANISMOS DA RETRAÇÃO PLÁSTICA TÍPICA



Fonte: adaptado de Sayahi *et. al.* (2014).

2.1.1.2 Interpretação da retração plástica de materiais cimentícios

De acordo com a literatura, a retração plástica pode ser mensurada por diversas abordagens, expostas nos subitens a seguir:

a) Deslocamentos lineares

Hammer (2007) afirmou: “a mudança de volume é basicamente uma deformação volumétrica, mas, do ponto de vista prático, é conveniente considerar deformações lineares, comumente chamadas de assentamento plástica e retração plástica”. De acordo com Ghourchian (2018), durante a exsudação da água, a retração plástica ocorre somente na direção vertical (assentamento), direção do vetor de aceleração da gravidade. De acordo com Hammer (2007), “a retração autógena pode ser o principal contribuinte para o assentamento plástica (o único se não houver expulsão de ar, exsudação, evaporação ou dilatação térmica)”. Portanto, uma maneira

de interpretar o progresso da retração plástica seria pela medição dos deslocamentos verticais, como pode ser observado nos estudos de Qi *et. al.* (2003), Kauffman *et. al.* (2004) e Kwak *et. al.* (2010).

Durante o endurecimento, após a percolação externa de água, a retração plástica também começa a se manifestar na direção horizontal (Ghourchian, 2018). De acordo com Newlands *et. al.* (2008), a magnitude e a duração da contração vertical é muito pequena se comparada às mudanças de comprimento. Portanto, esses pesquisadores acreditam que, baseados no conceito fundamental da retração plástica de Powers (1968), medições lineares são suficientes para descrever o fenômeno. Esta visão é também a de outros autores que optaram pela mesma abordagem, como: Orr & Haigh (1971), Kovler (1994), Sanjuán & Moragues (1994), Al-Amoudi *et. al.* (2007), Ghoddousi & Javid *et. al.* (2010).

b) Quantificação e análise de fissuras

A retração plástica é relevante porque ela pode causar fissuras e estas são prejudiciais ao desempenho dos materiais cimentícios. Portanto, é pertinente caracterizar a intensidade do fenômeno através de sua principal consequência, as fissuras (Johansen & Dahl, 1993; Banthia *et. al.*, 1993; Nemoz-Gaillard *et. al.*, 2002; Yan & Yan-Hui, 2011; Lin *et. al.*, 2012; Ruiz-Ripoll *et. al.*, 2013). Os únicos ensaios de mensuração de retração plástica que são oficialmente normatizados utilizam a abordagem da quantificação e análise de fissuras manualmente. As normas correspondentes a esses ensaios são: a ASTM C1579-13 e a GBT 50082-2009 (norma chinesa).

c) Taxa de evaporação e exsudação

Um importante fator que rege o aparecimento de fissuras causadas pela retração plástica é o desenvolvimento de pressão capilar próximo à superfície do concreto, que ocorre quando a taxa de evaporação excede a taxa de exsudação (Qi *et. al.*, 2004). A taxa de evaporação é mensurada através da medida contínua da massa da amostra enquanto endurece. As medidas de taxa de exsudação se baseiam na medida contínua da água percolada à superfície da amostra.

d) Poro-pressão

Radocea (1992) propôs um modelo matemático para prever o comportamento da retração plástica baseado na relação entre a pressão capilar e a taxa de evaporação de água. Inicialmente, a pressão em um determinado ponto corresponde à pressão hidrostática da argamassa (que é dada pela altura de medição e a densidade da matriz). Com o progresso da hidratação, o desenvolvimento de uma estrutura interna capaz de suportar solicitações da gravidade por si só provoca a diminuição da poro-pressão. Após esse ponto de auto sustentação, a hidratação contínua, que consome água, promove uma diminuição gradual da pressão interna, isto é, o aumento da tensão da água dos poros devido à formação de vácuo e/ou menisco (vide sub-tópico 2.1.7.2) é causada pela retração química e qualquer secagem externa (evaporação). A relação entre a variação da poro-pressão interna e os deslocamentos verticais e horizontais foi estudada em amostras de argamassa por Kronolöf *et. al.* (1995).

e) Variação volumétrica

A retração plástica é uma variação volumétrica. Métodos que mensuram essa variação geralmente têm a intenção de isolar os efeitos das retrações inclusas à plástica: autógena, química, secagem e térmica. Um desses métodos se baseia em leituras de variação de nível de água sobre uma amostra em um tubo de Erlenmeyer, a partir de um picnômetro (Tazawa *et. al.*, 1994; Justnes *et. al.*, 2000). Também existe o método de *Le Chatelier*: uma amostra envolta por invólucro de látex tem sua variação volumétrica deduzida pelo seu empuxo – medida constante da variação de massa dentro de um banho de água (Loukili *et. al.*, 2000; Lura & Jensen, 2006). Esse método foi criticado por fornecer resultados tecnicamente irrelevantes (Tazawa *et. al.*, 1994) e também por apresentarem dificuldades técnicas na instrumentação (Jensen & Hansen, 2001; Lura & Jensen, 2005; Pei *et. al.*, 2014).

2.1.2 Retração autógena e química

A parte da retração que não é causada por alteração de volume devido à perda ou entrada de água, variação de temperatura, aplicação de força ou restrições externas de movimento pode ser considerada como retração autógena (Wu *et. al.*, 2017). Com o tempo, a água livre na matriz diminui gradualmente, devido à hidratação progressiva do cimento, o que resulta na diminuição da umidade relativa interna. Esse

fato cria um número expressivo de poros na pasta de cimento endurecida e uma subsequente diminuição gradual de sua saturação. Essa diminuição submete a superfície interna do poro a uma pressão interna. Para restabelecer o estado de equilíbrio na superfície côncava interna do poro, a tensão capilar aumenta – diminui o raio do menisco (vide sub-tópico 2.1.7.2) – o que resulta na manifestação da retração autógena (Fisher & Israelachvili, 1981). Pelo fato de o progresso da hidratação causar a retração autógena é que ela é considerada um produto da retração química (Hammer, 2007).

2.1.3 Retração química

Os produtos da hidratação do cimento são de volume menor que o dos materiais anidros da mistura e, por isso, há uma redução de volume em função da hidratação – por consequência, ocorre a retração química (Brouwers, 2007; Holt, 2001). Na hidratação do cimento, o volume absoluto de hidratos formados (V_h) é menor que a soma dos volumes da água consumida (V_a) e o cimento hidratado (V_{ch}):

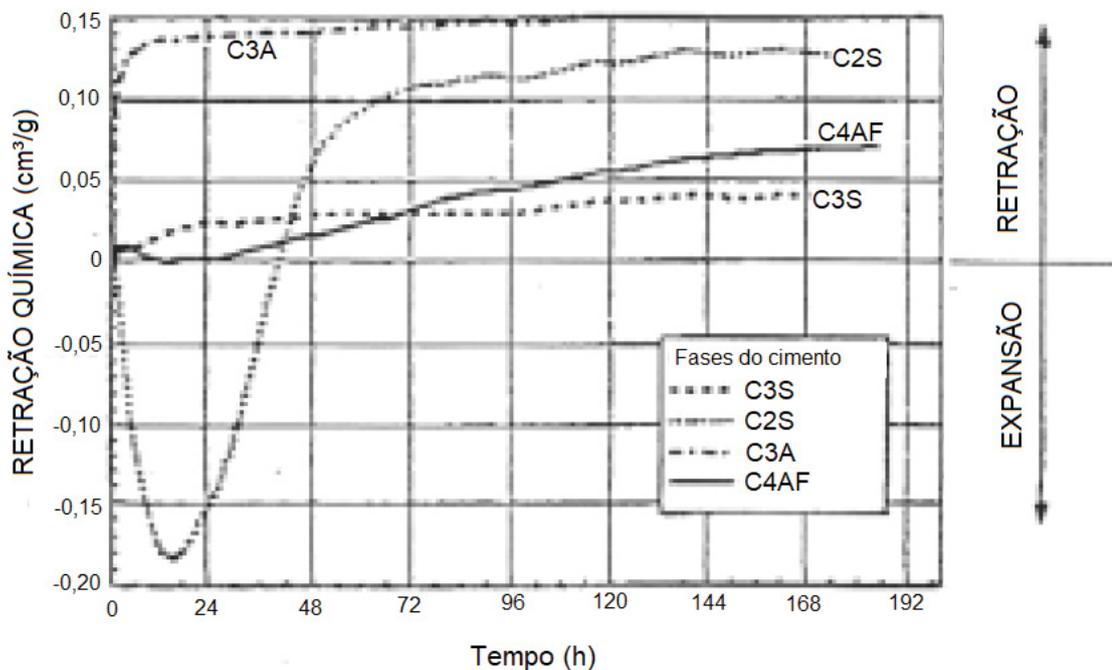
$$V_h = V_a + V_{ch} - \Delta V$$

sendo que ΔV corresponde a contração de *Le Chatelier* (Hua *et. al.*, 1995; Metha & Monteiro, 2008).

Durante as primeiras horas de hidratação, enquanto a pasta cimentícia se comporta como um líquido, a gravidade faz com que a retração autógena seja completamente atribuída à ação da retração química, ou seja, elas constituem o mesmo fenômeno nesse período (Holt, 2001; Hammer, 2007). Quando a hidratação cria um esqueleto com rigidez capaz de impedir o colapso do material pela força da gravidade – ponto de auto sustentação/suporte (PAS) –, a retração autógena se torna menor que a retração química e poros começam a aparecer na pasta (Hammer, 2007). Portanto, o PAS coincide com o ponto de diferenciação entre a retração química e a autógena.

Paulini³ (1996, apud Holt, 2001) modelou teórica e individualmente os componentes do clínquer (C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF) que influenciam a retração química e, conseqüentemente, a autógena até o PAS. O modelo demonstrou que o C_2S se expande no primeiro dia de hidratação, enquanto os outros componentes sofrem retração. A retração dada pela hidratação do C_3S e C_4AF ocorre vagarosa e gradualmente ao longo de vários dias, enquanto a retração atribuída ao C_3A ocorre rapidamente nas primeiras horas devido à sua alta velocidade de hidratação (FIGURA 9).

FIGURA 9 – CONTRIBUIÇÃO DAS FASES DO CIMENTO PARA A RETRAÇÃO QUÍMICA



Fonte: adaptado de Paulini³ (1996, apud Holt, 2001).

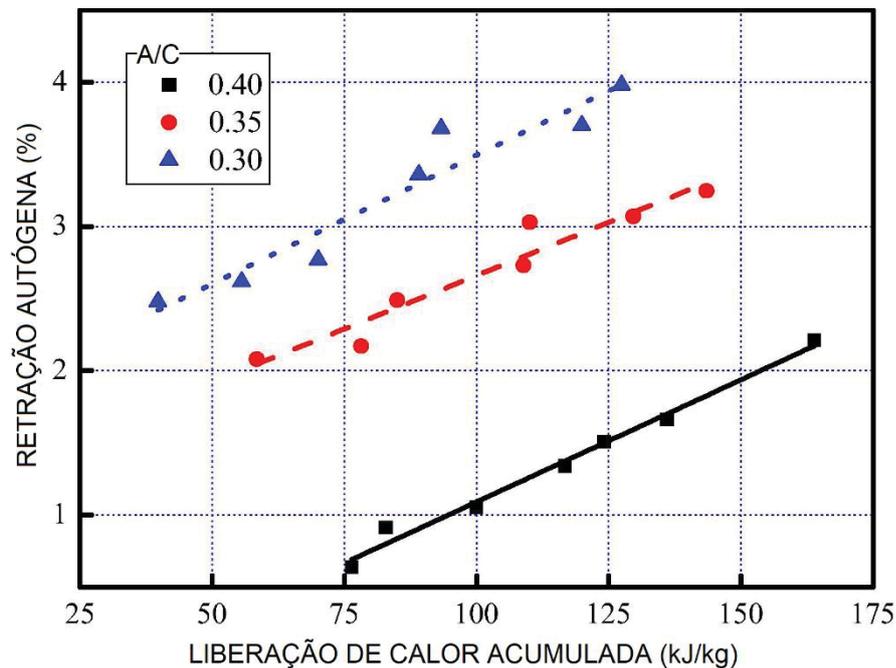
Portanto, um cimento com alta concentração de C_3A provavelmente vai apresentar maior retração química do que um cimento com baixa concentração deste composto (Hammer, 2007; Holt, 2001). Porém, a contribuição de cada fase do cimento para a retração depende da quantidade de reação que já ocorreu (grau de hidratação).

³ PAULINI, P. **Outlines of Hydraulic Hardening - an Energetic Approach**. Workshop NTNU/SINTEF - Trondheim, Norway, Early Volume Changes and Reactions in Paste - Mortar - Concrete. Novembro, 1996.

De acordo com Holt (2001), a relação água/cimento e a finura do cimento afetam apenas a taxa de retração química (um cimento mais fino terá uma velocidade de hidratação maior do que a de um móido grosseiramente). A magnitude final de retração química, à medida que o grau de hidratação se aproxima de 100%, será influenciada apenas pela composição química do cimento e não pela sua finura ou sua concentração em relação à água. Ao contrário, a retração autógena é especialmente sensível à variação da relação a/c: quanto menor for a quantidade de água disponível para a hidratação (menor a/c), maior será a retração autógena (WU *et. al.*, 2017, Hu *et. al.*, 2017; Holt, 2001). De acordo com Hammer (2007), *filler* natural ou areia fina (0 a 2mm) não possuem influência significativa sobre a retração autógena.

Hu *et. al.* (2017) estudaram a relação do calor de hidratação e as retrações químicas e autógenas em argamassas. Os resultados do estudo mostraram que, para amostras com a mesma relação a/c, a retração autógena aumentou linearmente com o calor acumulado da hidratação. Geralmente, um calor de hidratação acumulado mais alto indica maior taxa de hidratação e retração química, além de levar a uma retração autógena mais alta. De acordo com os resultados do estudo, o calor acumulado liberado durante o processo de hidratação foi aumentado gradualmente com o aumento da razão a/c, o que deveria ter resultado em maior retração autógena. No entanto, a retração autógena diminuiu com o aumento da relação a/c. Os autores justificaram esse comportamento pela influência do ganho de resistência das amostras durante o período após a formação da matriz autossustentável (PAS, ponto em que o material é capaz de se auto sustentar diante esforços da gravidade). A FIGURA 10 mostra a relação entre a retração autógena e o calor de hidratação acumulativa após 72h de hidratação para argamassas com diferentes relações a/c.

FIGURA 10 – RETRAÇÃO AUTÓGENA E O CALOR DE HIDRATAÇÃO ACUMULATIVA APÓS 72H DE HIDRATAÇÃO PARA DIFERENTES RELAÇÕES A/C



Fonte: adaptado de Hu *et. al.* (2017).

Resumindo, Hu *et. al.* (2017) encontraram que, com a diminuição da razão *a/c*, a retração química diminui enquanto a retração autóloga aumenta. A correlação positiva entre a liberação de calor acumulada e a retração autóloga também pode ser confirmada pelos estudos de Melo Neto (2008).

2.1.4 Retração por secagem

De acordo com Barcelo *et. al.*⁴ (1999, apud Esping, 2007), existem duas forças principais para a retração “*early-age*” (inicial): a contração causada pela hidratação e reações químicas, produzindo retração autóloga; e a contração causada por evaporação do material fresco, referida pelo autor como retração por secagem precoce. De acordo com Tolêdo Filho *et. al.* (2005), a retração por secagem é causada pela evaporação da água interna da matriz cimentícia devido à menor umidade do ambiente externo dos materiais cimentícios. Esta perda também pode ocorrer pela

⁴ BARCELO, L.; BOIVIN, S.; RIGAUD, S.; ACKER, P.; CLAUD, B.; BOULAY, C. “**Linear vs. Volumetric autogenous shrinkage measurement: Material behaviour or experimental artefact?**”, Proceedings of the 2nd International Seminar on Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology, pp. 109-125, Lund, 1999.

sucção do substrato devido à diferença de umidade entre este e o material. A acumulação de moléculas de água exsudadas aumenta a umidade superficial e, conseqüentemente, diminui a evaporação. Assim, vento pode acelerar o processo, pois remove as moléculas de água que escapam (Sayahi *et. al.*, 2014). Portanto, a retração por secagem sofre influência dos seguintes fatores externos: temperatura do ambiente; umidade relativa do ambiente e umidade do substrato; e velocidade do vento incidente na superfície do material (ACI 224, 1998).

Swamy & Stravides⁵ (1979, apud Tolêdo Filho *et. al.*, 2005) afirmam que pastas de cimento endurecido apresentam alta retração por secagem quando comparadas ao concreto, que, por outro lado, mostra uma retração relativamente menor, porque as alterações de volume são amplamente restringidas pela rigidez dos agregados. De acordo com Silva (2011), “a areia ou agregado miúdo é o material de maior proporção na composição das argamassas, portanto, é um dos principais fatores responsáveis pelas restrições às deformações no estado fresco”.

A temperatura da amostra, a do ambiente e principalmente a relação entre as duas influenciam a perda de água e, conseqüentemente, também influenciam os mecanismos da retração por secagem, apesar de não haver uma correlação direta com o aumento ou a diminuição dessas variáveis em relação à retração.

Um efeito considerável da temperatura é seu impacto sobre a taxa de evaporação, sendo que um ambiente excessivamente quente vai acelerar a evaporação, que conseqüentemente vai acelerar a retração (Almusallam *et. al.*, 1999). Porém, em condições normais, a diminuição da temperatura do ar ao redor pode contribuir para o aumento da evaporação. Isso ocorre porque a pressão do vapor diminui com a temperatura e, portanto, resulta em uma diferença maior entre a pressão do vapor do ar circundante e a do menisco da água dos poros. E, ao contrário, uma temperatura mais baixa do material em relação à temperatura do ar reduz a evaporação. A contração térmica é particularmente importante no início do endurecimento, quando a capacidade de tensão de tração é mínima (Hammer, 2007).

Outro efeito pode ser atribuído à influência da temperatura na água adsorvida. Como será descrito no tópico 2.1.7, a retração também depende da quantidade de água adsorvida pelo gel C-S-H. A quantidade de água que o gel é capaz de adsorver

⁵ SWAMY, R.; STRAVIDES, H. **Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage**. ACI J 1979; 86: 443–60, 1979.

aumenta à medida que a temperatura diminui. Quando a temperatura cai e não há água extra disponível, o gel fica relativamente menos saturado e diminui. A quantidade de retração induzida dessa maneira depende do estado de saturação do gel e, portanto, da umidade interna da amostra (Powers, 1958).

Destarte, aqui se faz necessária uma distinção importante. A retração por secagem é comumente associada à retração que ocorre a longo prazo. É correto chamar o ensaio ofertado pela NBR 15261 “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional” de ensaio de retração por secagem. Apesar da norma utilizar a palavra secagem apenas uma vez, e para se referir a uma fase, ela não a utiliza para caracterizar a retração:

Esta Norma estabelece o método para determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear) das argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos na fase de endurecimento e secagem, curadas em condições padronizadas (ABNT, 2005, p. 1).

Adotando-se que o nome “retração por secagem” se refira à diminuição de volume causada pela perda de água para o ambiente externo, seja o ambiente o ar ou o substrato, surge um conflito para identificar “retração por secagem” como a retração a longo prazo. Em condições normais, o início da evaporação coincide com o início da hidratação, que se dá com o primeiro contato com a água. Autores como Holt (2001) e Esping (2007) utilizam o termo “retração por secagem”, seguindo o padrão de muitos outros autores, para se referirem à retração a longo prazo, ao mesmo tempo em que admitem sua presença e importância desde o início da hidratação.

2.1.5 Retração térmica

O principal efeito da variação da temperatura que é comumente associado à retração térmica é a fissuração causada pela contração volumétrica que ocorre após a dilatação térmica resultante do calor de hidratação. Kosmatka & Panarese⁶ (1988, apud Holt, 2001) afirmam que o calor inicial de hidratação de um concreto comum é

⁶ KOSMATKA, S.; PANARESE, W. **Design and Control of Concrete Mixtures**, 13th Edition, Portland Cement Association, Skokie, 205 pp, 1988.

de cerca de 5 a 8 °C de aumento da temperatura adiabática por 45kg de cimento. Assim, uma mistura de argamassa terá uma quantidade maior de calor gerado em comparação com uma mistura de concreto, uma vez que é mais rica em cimento (Holt, 2001). O aumento de calor ocorre normalmente nas primeiras 12 horas. Durante o período de esfriamento há a contração. Parte da expansão térmica é elástica, pois o material retornará às suas dimensões originais após o resfriamento subsequente. Mas qualquer porção não elástica resultará em deformação permanente (Holt, 2001).

A retração térmica também pode ocorrer devido a menores temperaturas do ar em relação ao material cimentício, visto que, de acordo com Hammer (2007), ela pode constituir uma força para a deformação do sistema de meniscos na fase líquida, já que esta fase é marcada por baixa resistência. Além disso, o autor aponta que o coeficiente de contração térmica de concretos varia com a idade e é relativamente alto durante o estado plástico.

2.1.6 Retração por carbonatação

A carbonatação ocorre quando os produtos de hidratação do cimento reagem, na presença de umidade, com o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera (Silva, 2011).

A decomposição do hidróxido de cálcio, que se encontra sob tensão, seguida da deposição do carbonato de cálcio em espaços não sujeitos a tensão, é um dos fatores da retração por carbonatação. Outro fator que induz retração durante a carbonatação é a liberação da água não evaporável durante a reação de carbonatação (Coelho, 2002).

2.1.7 Mecanismos dinâmicos da água interna que regem a retração

A complexidade da retração pode ser atribuída ao fato de ser regida por variáveis e mecanismos dinâmicos (Melo Neto, 2008). Os próximos quatro sub-tópicos expõem as variáveis e mecanismos da água interna que influenciam a retração autógena e de secagem após o endurecimento (Hua *et. al.*, 1995).

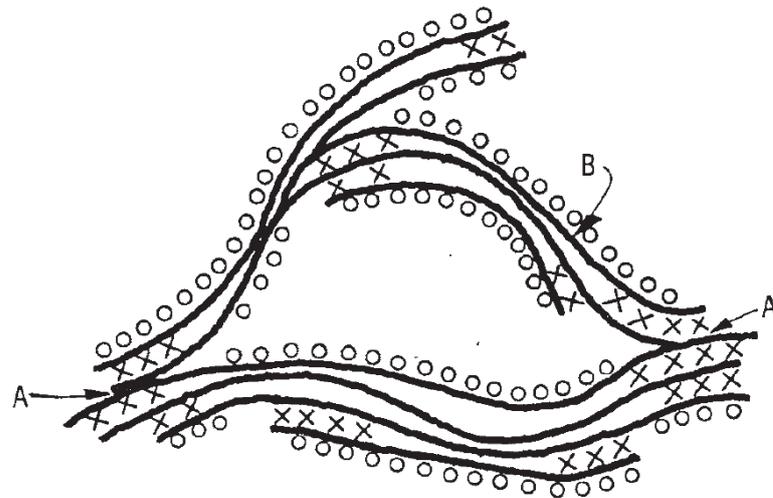
2.1.7.1 Estados da água

A porosidade e a composição da matriz de materiais cimentícios permitem que a água interna a esses materiais seja encontrada em quatro estados diferentes de acordo com Mehta & Monteiro (2008).

- Água quimicamente combinada: esta água não é perdida pela secagem normal por ser parte integrante da microestrutura de vários produtos da hidratação do cimento.
- Água interlamelar: esta corresponde a uma camada de água monomolecular entre as faces dos cristais de C-S-H e, por ser fortemente mantida por ligação de hidrogênio, só é removida em umidades relativas abaixo de 11% (Taylor, 1997).
- Água adsorvida: esta é a água adsorvida à superfície dos sólidos na pasta de cimento hidratada. Foi sugerido que até seis camadas moleculares de água (1,5nm) podem ser fisicamente mantidas presas à superfície por ligações de hidrogênio que diminuem de força nas camadas mais distantes, tornando uma grande parcela desse tipo de água suscetível à evaporação, sendo a maioria perdida quando exposta à 30% de umidade relativa.
- Água capilar: é a água presente em vazios maiores que 50Å (5nm). É aquela livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. Ela pode ser dividida em: a água em grandes vazios (maiores que 50nm), que pode ser chamada de água livre porque sua remoção não causa nenhuma alteração de volume; e a água retida por tensão capilar em pequenos capilares (5 a 50nm), cuja remoção pode causar retração.

A FIGURA 11 ilustra esses diferentes estados da água em relação aos cristais de C-S-H.

FIGURA 11 – ESTADOS DA ÁGUA NA MATRIZ CIMENTÍCIA



Legenda: A – ligações interparticulares; X – água interlamelar; O – água fisicamente adsorvida; B – cristais de C-S-H; pode se considerar que o vazio no centro representa a água capilar. Fonte: Feldman & Sereda (1968).

2.1.7.2 Tensão superficial

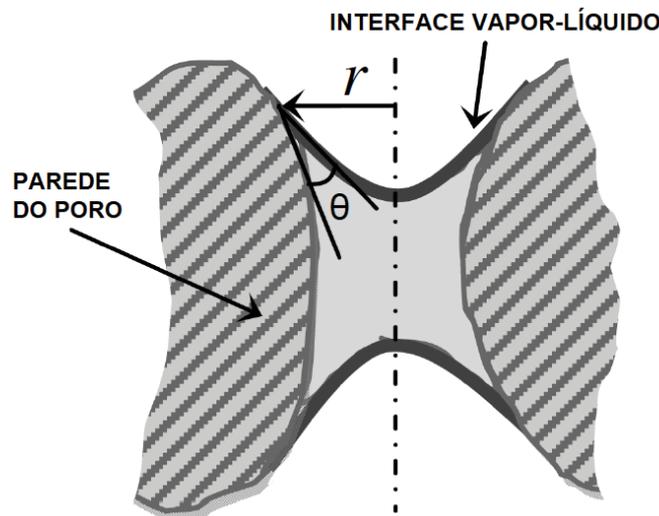
A tensão superficial resulta da assimetria de forças atrativas entre átomos ou moléculas nas proximidades da superfície do material, onde existe a transição entre meios. Essa assimetria produz uma pequena variação nas distâncias atômicas ou moleculares que induz uma tensão tangente à superfície (Hua *et. al.*, 1995).

Em materiais cimentícios, a variação da tensão superficial possui uma relação proporcionalmente indireta com a quantidade de água adsorvida, e esta, por sua vez, está sujeita à variação da umidade relativa (Hua *et. al.*, 1995; Melo Neto, 2008). Portanto, o aumento da tensão superficial da água, causada pela redução de umidade relativa, causa retração. Hua *et. al.* (1995) chamam esse efeito de mecanismo de variação da tensão superficial de partículas coloidais.

A segunda maneira por meio da qual a tensão superficial causa retração é pela tensão capilar. Para condições não-saturadas, em geral, os poros capilares – 5nm a 1000nm (Metha & Monteiro, 2008) – englobam água e vapor de água (Hua *et. al.*, 1995). Essa transição entre fase líquida e gasosa permite a aparição do menisco (curvatura causada pelo contingente de moléculas que se adsorvem a superfície

sólida para satisfazerem o desequilíbrio de ligações). A FIGURA 12 oferta uma representação visual desse fenômeno.

FIGURA 12 – PORO CAPILAR E A TENSÃO SUPERFICIAL



Legenda: r , raio de curvatura do menisco; θ , ângulo de contato entre a superfície da água e a parede do poro. Fonte: adaptado de Gong *et. al.* (2014).

Se o menisco é côncavo, a pressão no líquido é menor que a pressão externa (do vapor de água), fazendo com que as paredes do poro se aproximem umas das outras (Metha & Monteiro, 2008). É essa força de aproximação entre as paredes dos poros capilares que causa a retração.

Esse efeito é reforçado pela diferença de potencial químico entre a água de poros de diferentes dimensões. Quando a umidade relativa é reduzida, a água em poros maiores (100nm - 10mm) evapora primeiro e, devido ao menor potencial químico da água em poros pequenos (1 - 100nm), a água sempre flui para poros menores (Gong *et. al.*, 2014). E são nos poros menores que a tensão capilar possui maior efeito (maior capacidade de retração), sendo maximizada – de acordo com Young⁷ (1988 apud Melo Neto, 2002) e Xi & Jennings⁸ (1989 apud Melo Neto, 2002) – em poros com diâmetros abaixo ou iguais a 2,5nm em ambientes com umidades

⁷ YOUNG, J.F. **Physical mechanisms and their mathematical descriptions**. In: Z.P. Bazant (Ed.), *Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Wiley, Chichester, p. 63-98, 1988.

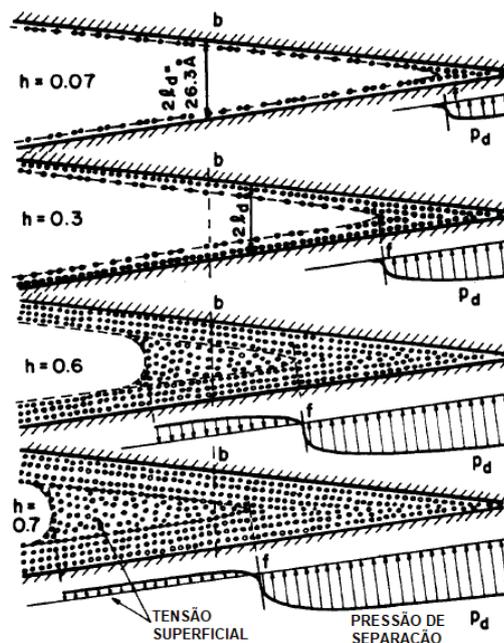
⁸ XI, Y. & JENNINGS, H.M. **Relationships between microstructure and creep and shrinkage of cement paste**. *Materials science of concrete III*, Ed. Jan Skalny, pp. 37-69, 1989.

relativas entre 40 e 50%. Hua *et. al.* (1995) elegem a tensão capilar como o principal mecanismo da retração autógena, que foi melhor explicada no tópico 2.1.2.

2.1.7.3 Pressão de separação em macroporos

A camada de água adsorvida aumenta proporcionalmente com o aumento da umidade relativa, porém esse aumento pode ser limitado pela pequena distância entre duas superfícies sólidas (como ocorre entre as faces dos cristais de C-S-H). Nesse caso, se a umidade relativa for aumentada continuamente, a adsorção da água tende a separar as duas superfícies sólidas (pressão de separação). Essa pressão atinge seu valor máximo no estado saturado; portanto, quando o sistema passa do estado saturado para um estado não saturado, há retração, porque a pressão de separação diminui e as superfícies se aproximam (Hua *et. al.*, 1995). A pressão de separação também pode aparecer em escalas maiores. A FIGURA 13 demonstra o preenchimento gradual de um macroporo variando com a umidade interna dele (h). Pode-se observar o aumento da camada adsorvida e o conseqüente aumento da pressão de separação.

FIGURA 13 – VARIAÇÃO DE PRESSÃO DE SEPARAÇÃO DURANTE PREENCHIMENTO GRADUAL DE MACROPORO



Legenda: umidade interna do poro (h); pressão de separação (P_d). Fonte: traduzido de Bažant (1972).

2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O levantamento bibliográfico sobre os métodos de medição da retração plástica em materiais cimentícios foi baseado em revisão sistemática – ferramenta 5W1H (*Who, Where, What, When, Why, How*). Essa ferramenta serviu de base na pesquisa bibliográfica para a identificação das diversas tecnologias e abordagens que já foram adotadas em pesquisas para mensurar o fenômeno da retração plástica em materiais cimentícios. A proposta por uma abordagem sistemática foi escolhida com o propósito de analisar quantitativamente dados técnicos sobre esses métodos, em vez de simplesmente expor e analisá-los qualitativamente.

Os métodos escolhidos usam uma das três seguintes abordagens para avaliar a retração plástica: deslocamentos horizontais, deslocamentos verticais ou quantificação e análise de fissuras. Portanto, a tecnologia dos métodos que medem a taxa de evaporação, exsudação e poro-pressão não foi detalhada na abordagem sistemática, apesar da presença dessas medições terem sido registradas. Também, foram excluídas da amostra de estudos as abordagens por variação volumétrica por, em geral, terem propósito mais voltado para a distinção entre tipos de retração que ocorrem dentro do estágio plástico.

Todos os resultados tabelados e explicados e o método aplicado podem ser encontrados no APÊNDICE 3 do presente trabalho.

Considerando o período do estado plástico, era de se esperar que a maioria dos estudos (74%) propusesse métodos com duração até 24 h. Levando em conta a importância da influência das variáveis do ambiente – temperatura, vento e umidade –, procede que 49% desses estudos possuam controle sobre essas variáveis. Foi notada uma maior frequência de abordagens pelas perspectivas da fissuração e dos deslocamentos horizontais. Foi encontrado que a abordagem por deslocamentos horizontais é a mais comum, aparecendo em 57,1% dos estudos. Em seguida, as caracterizações de fissuração (49%). Por último, a menos frequente, deslocamentos verticais, com 18,4%. A maior diferença entre as abordagens horizontal e vertical possivelmente corrobora o argumento de Newlands *et. al.* (2008), no qual afirmam que medições lineares horizontais são suficientes para descrever o fenômeno da retração plástica e são maiores do que as verticais.

Foi observada uma nítida priorização de estudos de retração plástica em concretos sobre argamassas. O concreto aparece em 63,3% dos estudos, muito mais do que os outros materiais: 26,5% para argamassas e 16,3% para pastas cimentícias. Também se notou uma baixa incidência de métodos normatizados brasileiros, possivelmente apontando para uma necessidade de estudos que caracterizem a retração plástica em materiais cimentícios disponíveis no mercado nacional.

Existe uma tendência de preferência por equipamentos eletrônicos, como os transdutores, sobre equipamentos analógicos ou mecânicos. Isso pode se dar pela facilidade de leitura ofertada por esses equipamentos, que podem ser conectados a computadores. Esse fato complementa a perspectiva observada de que existe uma evolução tecnológica e de complexidade entre os métodos, favorecendo técnicas mais complexas e unindo mais de uma abordagem em um mesmo método. Porém, a consequência dessa tendência é deixar os ensaios mais caros.

As técnicas podem ser divididas entre duas grandes categorias: retração livre e retração restringida. As de retração livre se baseiam nos deslocamentos lineares. Assim, a maioria se baseia na medição do movimento de elementos rígidos ou placas de metal embutidos na amostra usando LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Esse equipamento é um transdutor: aparelho capaz de traduzir deslocamentos físicos em variações de corrente elétrica, assim fornecendo um meio de ler deslocamentos com grande precisão, até 0,01 μm (TESA, 2020).

Atualmente existem técnicas baseadas na inscrição no núcleo de uma fibra óptica interna através da variação sistemática do índice de refração de uma fonte ultravioleta. Isso fornece uma leitura longitudinal da deformação da amostra em vez de pontual como a solução com o LVDT, porém ela sofre do mesmo problema – a baixa aderência entre o material inserido para transmitir deslocamentos e a argamassa no início de sua hidratação –, além de ser ainda mais cara.

Os métodos de retração restringida, em geral, se concentram nas medições de fissuras: comprimentos, larguras, desenvolvimentos e mapeamentos. Uma técnica relativamente recente é a DIC (*Digital Image Correlation*), que acompanha a superfície da amostra com uma câmera e através de softwares é capaz de fornecer uma projeção 3D das deformações causadas pela retração. Ela apresenta as vantagens de não ter contato com a amostra, o que previne a possível inserção de artefatos na medição, e de poder acompanhar deslocamentos lineares além de análise de fissuras; porém ela também é financeiramente onerosa.

A quantidade de estudos encontrados, não se limitando àqueles que propõe métodos novos, variações ou combinações, ressalta a importância que a academia dá a esse problema. Um resumo com o autor, duração de ensaio, abordagem, tecnologia empregada, e medidas do molde dos estudos da revisão sistemática que contemplam argamassas pode ser observado na TABELA 2.

TABELA 2 – MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA EM ARGAMASSAS

(continua)

Responsável	Duração	Medidas/ Abordagem	Tecnologia	Molde
Ravina (1986)	4h	Deslocamentos horizontais	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e relógios comparadores de precisão	Paralelepédico (28x7x7cm)
Baron (1971 apud Brüll <i>et al.</i> , 1980)	48h	Deslocamentos horizontais e “temp.”	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e LVDT	Paralelepédico (28x7x7cm)
Sanjuán, Moragues (1994)	6h	Deslocamentos horizontais	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e induzir fissuramento, Extensômetros	Paralelepédico (15x120x2cm)
Kronlöf <i>et. al.</i> (1995)	9h	Deslocamentos verticais, horizontais, pressão capilar e taxa de evaporação	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e LVDT	Paralelepédico (27x27x10cm)
				(conclusão)
Responsável	Duração	Medidas/ Abordagem	Tecnologia	Molde
Sanjuán, Moragues (1994)	6h	Deslocamentos horizontais	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e induzir fissuramento, Extensômetros	Paralelepédico (15x120x2cm)
Kronlöf <i>et. al.</i> (1995)	9h	Deslocamentos verticais, horizontais, pressão capilar e taxa de evaporação	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e LVDT	Paralelepédico (27x27x10cm)
Filho & Sanjuán (1999)	3,5h	Deslocamentos horizontais, desenvolvimento e dimensões de fissuras	Elementos rígidos para transmitir e restringir deslocamentos, Extensômetros	Livre: Paralelepédico (15x120x1,5cm) Restringido: Anelar (15cm d)
Bastos <i>et. al.</i> (2001)	24h	Deslocamentos horizontais	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e LVDT	Livre e restringida: Paralelepédico (15x40x1,5 a 2,5cm)
Kwak <i>et al.</i> (2010)	3,5h	Deslocamentos verticais	Laser (sensor CMOS)	Cilíndrico (15cm d x 15cm h)
Messan <i>et. al.</i> (2010)	24h	Tensão diferencial da superfície da amostra	DIC, Câmera CCD	Livre: Paralelepédico (50x50x1,5cm)

Silva (2011)	20h	Deslocamentos horizontais	Elementos rígidos com extremidade móvel	Livre e restringida: Paralelepédico (10x40x2cm)
Giroto <i>et. al.</i> (2011)	-	Desenvolvimento, quantidade e dimensões de fissuras	DIC, Câmera	Restringida: Paralelepédico (20x20x1cm)
Le-Bihan <i>et. al.</i> (2012)	72h	Deslocamentos verticais e horizontais, taxa de evaporação	DIC, Câmera	Paralelepédico (50x7x3cm)
Pei <i>et. al.</i> (2014)	168h	Deslocamentos horizontais, desenvolvimento, dimensões e localização longitudinal de fissuras	Fibra ótica (Fiber Bragg grating para deslocamentos e temperatura)	Cilíndrico (15cm d x 25 cm h)
Bao <i>et. al.</i> (2015)	168h	Deslocamentos horizontais, desenvolvimento, dimensões e localização longitudinal de fissuras	Fibra ótica (PPP-BOTDA)	Cilíndrico (2,5cm d x 38 cm h)
Dzayea <i>et. al.</i> (2018)	66,67h	Deslocamentos verticais, horizontais e pressão capilar	DIC, LVDT, Câmera ATV Stingray	Cúbico (15x15x15cm)
Método proposto pelo presente trabalho	24h	Deslocamentos horizontais	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos e relógio comparador	Livre e Restringida: Paralelepédico (28,5x2,5x2,5cm)

Fonte: o autor (2021).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta seção será apresentada a metodologia experimental que foi adotada neste trabalho, o qual tem por objetivo criar um novo método de mensurar a retração ocorrida nas primeiras 24 horas de hidratação em argamassas. O método se baseou na abordagem por deslocamentos lineares horizontais. A escolha por essa abordagem foi norteadada pela revisão da literatura, como exposto no subitem 2.1.1.2.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram estudadas argamassas de cimento e mistas, sendo que os materiais utilizados foram: areia, cimento e cal. Nos sub-itens a seguir, é apresentada a caracterização dos materiais.

3.1.1 Areia

Foi escolhida uma areia média proveniente de leito de rio. Para se adequar à granulometria comum utilizada em traços empregados na indústria da construção civil em argamassas de revestimento, essa areia média foi peneirada. A peneira escolhida foi a de 2mm de abertura. A TABELA 3 apresenta os resultados da caracterização do material e a normativa do ensaio.

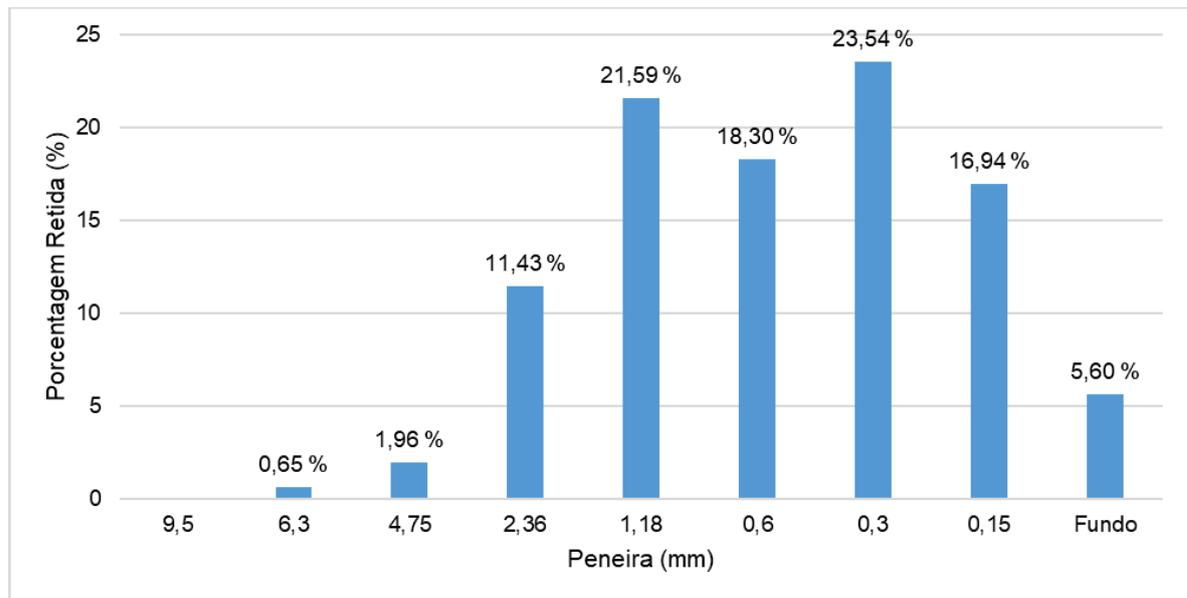
TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

Massa unitária	1,45 g/m ³	NBR 16972:2021
Massa específica	2,49 g/m ³	NBR 16972:2021
Teor de material pulverulento	4,09%	NBR 16973:2021
Absorção	1,00%	NBR 16916:2021

Fonte: o autor (2021).

Também foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (2003a), o ensaio de determinação da composição granulométrica (GRÁFICO 2).

GRÁFICO 2 – PORCENTAGENS RETIDAS DA AREIA MÉDIA APÓS SER PENEIRADA



Fonte: o autor (2021).

3.1.2 Cimento

Foi escolhido um cimento tipo CP-II-F porquê sua adição, fíler, é quimicamente inerte, assim não conferindo influência química sobre o comportamento da retração. A caracterização do aglomerante cimento foi fornecida pela fabricante Itambé e pode ser observada nas TABELA 4, TABELA 5 e TABELA 6.

TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CP-II-F

Componente/ Ensaio	%
Perda ao fogo (PF)	6,74
Anidrido silícico (SiO ₂)	18,32
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,06
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	2,77
Óxido de cálcio (CaO)	61,58
Óxido de magnésio (MgO)	2,47
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	2,65
Equivalente alcalino (em Na ₂ O)	0,73
Resíduo insolúvel (RI)	1,2

FONTE: Cia de Cimento Itambé (2021).

TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO CP-II-F

Exp. Quente	Tempos de Pega (min)		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Massa unitária	Massa específica
	Início	Fim	%	cm ² /g	%	%	g/cm ³	g/cm ³
0	185	255	25,7	3.360	2,3	11,4	1,40	3,06

FONTE: Cia de Cimento Itambé (2021).

TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CIMENTO CP-II-F

Resistência à Compressão (MPa)			
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
15,3	27,7	33,2	40,6

FONTE: Cia de Cimento Itambé (2021).

Tanto a massa específica quanto a massa unitária do cimento foram também fornecidas pela fabricante e são 3,11 g/cm³ e 1,45 g/cm³ respectivamente.

3.1.3 Cal

Foi escolhida uma Cal do tipo I, classe de maior pureza. Sua caracterização foi fornecida pelo fabricante e pode ser observada na TABELA 7 e na TABELA 8.

TABELA 7 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CAL CH-I

Ensaio	Resultado	Ensaio	Resultado
Perda ao Fogo (PF)	25,64%	Anidrido Carbônico (CO ₂)	4,54%
Silica e Resíduo Insolúvel (SiO ₂ + RI)	5,48%	Oxidos Totais não Hidratados	6,13%
Óxido de Cálcio (CaO)	40,52%	Água Combinada	21,10%
Óxido de Magnésio (MgO)	28,36%	CaO não Hidratado	0,00%
Óxidos Totais (CaO + MgO) NV	92,63%	CaO + MgO	68,87%

FONTE: Cal Cem (2021).

TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA CAL CH-I

Ensaio	Resultado
Granulometria # 30 (0,60 mm)	0%
Granulometria # 200 (0,075 mm)	6%
Massa específica	2,8 g/cm ³
Massa unitária	0,6 g/cm ³

FONTE: Cal Cem (2021).

3.2 MOLDE E INSTRUMENTAÇÃO

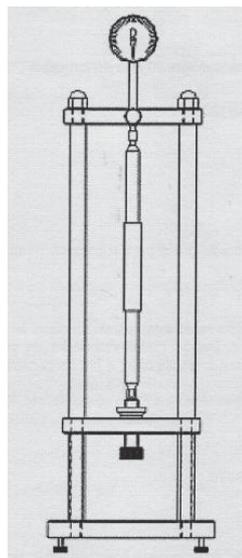
Nesta subseção se apresenta o procedimento de ensaio prescrito na NBR 15261 e o molde e a instrumentação propostos pelo presente trabalho.

3.2.1 Ensaio NBR 15261

A NBR 15261 “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)” aborda a retração a longo prazo através da abordagem de deslocamentos lineares horizontais.

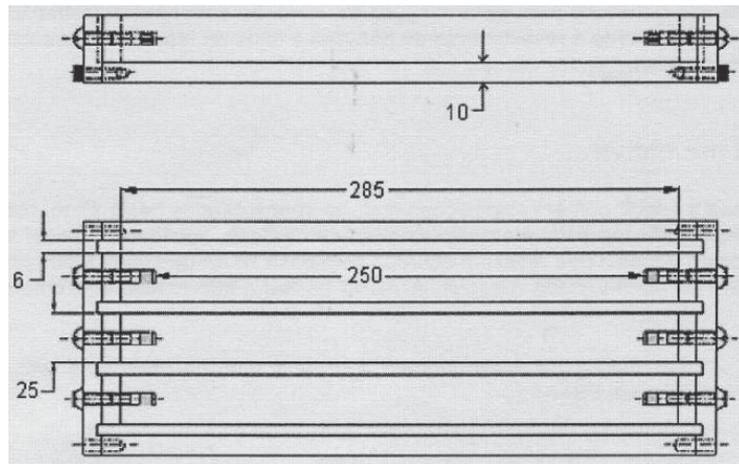
A norma prescreve a mensuração da retração através de corpos de prova prismáticos moldados com pinos de medida (parafusos) que permitem a medição da expansão ou contração do molde quando posicionados num pórtico equipado com relógios comparadores (FIGURA 14). A FIGURA 15 expõe o molde de aço prescrito na norma:

FIGURA 14 – PÓRTICO DE APARELHO COMPARADOR NBR 15261 COM BARRA METÁLICA DE CALIBRAÇÃO



FONTE: ABNT (2005).

FIGURA 15 – MOLDE DE RETRAÇÃO NBR 15261 (MEDIDAS EM MM)



FONTE: ABNT (2005).

A leitura proposta pela norma ocorre nos momentos: 0, 1, 7 e 28 dias após o desmolde da amostra, que ocorre após 48 ± 6 horas a partir da moldagem, ou seja, considera apenas a retração no estado endurecido. Isso significa que a variação dimensional ocorrida nas primeiras horas de hidratação não é mensurada.

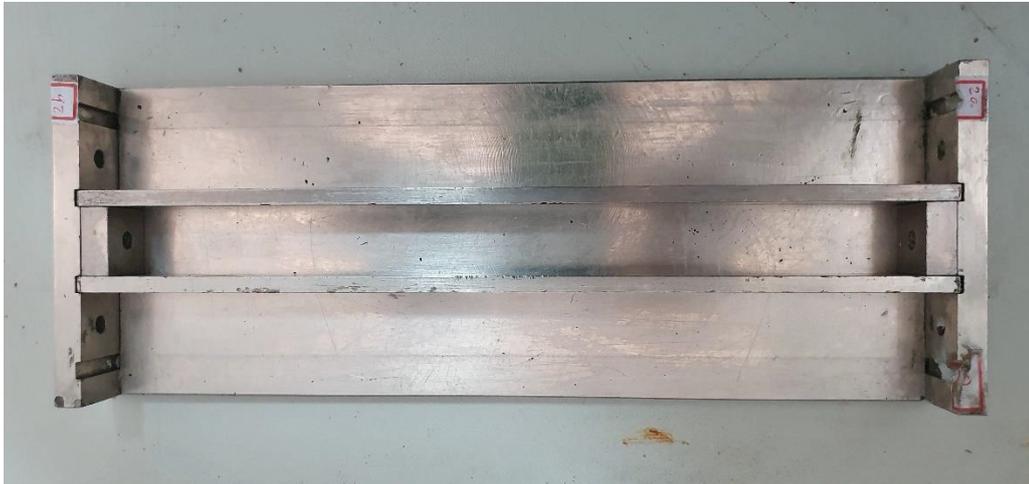
Durante essas primeiras 48 ± 6 horas, a norma prescreve que as três amostras sejam mantidas em condições de laboratório (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 5\%$) e cobertas com filme PVC. O filme PVC é exigido para proteger a amostra de perda de umidade. Essa orientação possivelmente revela a intenção da norma de minimizar a retração inicial, porém, como demonstrado na subseção 2.1, a retração inicial está sujeita a outros mecanismos além da evaporação. Após a desmoldagem, a norma prescreve que a amostra fique armazenada em câmara seca (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $50 \pm 5\%$) durante o período das leituras, ou seja, até 28 dias.

Destarte, o método proposto pelo presente trabalho pode fornecer um meio de preencher a lacuna de informação da NBR 15261, ou seja, possibilita a medição dos deslocamentos lineares horizontais durante as primeiras 24 horas de hidratação na condição selada. Também, foram propostas, como será explicado mais a frente, diferentes condições de exposição ao ar além da selada. Portanto, além do método proposto, serão coletadas as medidas no estágio a longo prazo, afim de compará-las.

3.2.2 Molde e instrumentação do método de ensaio proposto

O método de ensaio proposto utilizou o mesmo molde prismático metálico da NBR 15261, com as dimensões: 285 mm x 25 mm x 25 mm (FIGURA 16).

FIGURA 16 – MOLDE DA NBR 15261 UTILIZADO NO MÉTODO PROPOSTO

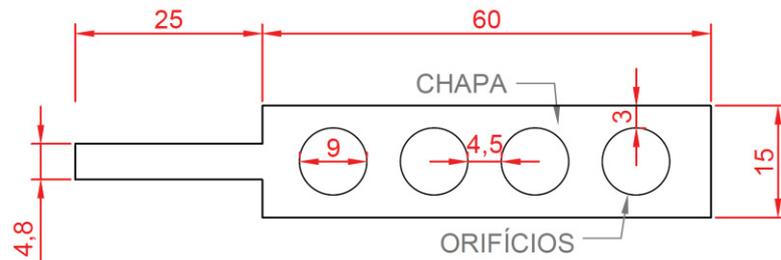


FONTE: o autor (2021).

A escolha de utilizar o mesmo molde se deu pela possibilidade de executar as medidas a longo prazo descritas pela norma e, conseqüentemente, ampliar o estudo da retração no estudo proposto.

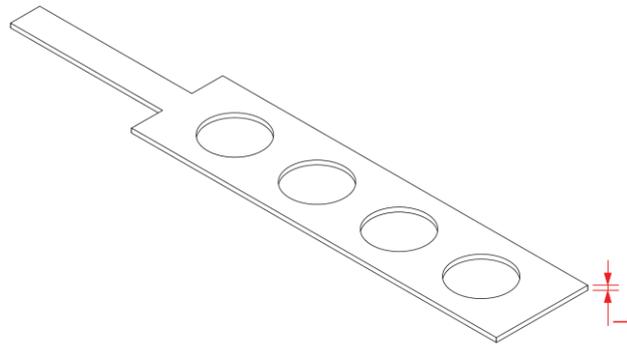
Foi utilizado um elemento rígido, inserido na argamassa fresca durante a moldagem, para transferir os deslocamentos do material, causados pela retração, para relógios comparadores. O elemento rígido consiste em uma chapa metálica (AÇO SAE 1006) com orifícios para melhor engaste na argamassa. As dimensões do elemento rígido podem ser observadas na FIGURA 17. As dimensões e a quantidade de orifícios foram escolhidas através de diversos testes com configurações diferentes do elemento rígido, sendo que a adotada pelo método proposto foi a que obteve as melhores respostas.

FIGURA 17 – ELEMENTO RÍGIDO VISÃO VERTICAL



Observação: medidas em mm. FONTE: o autor (2021).

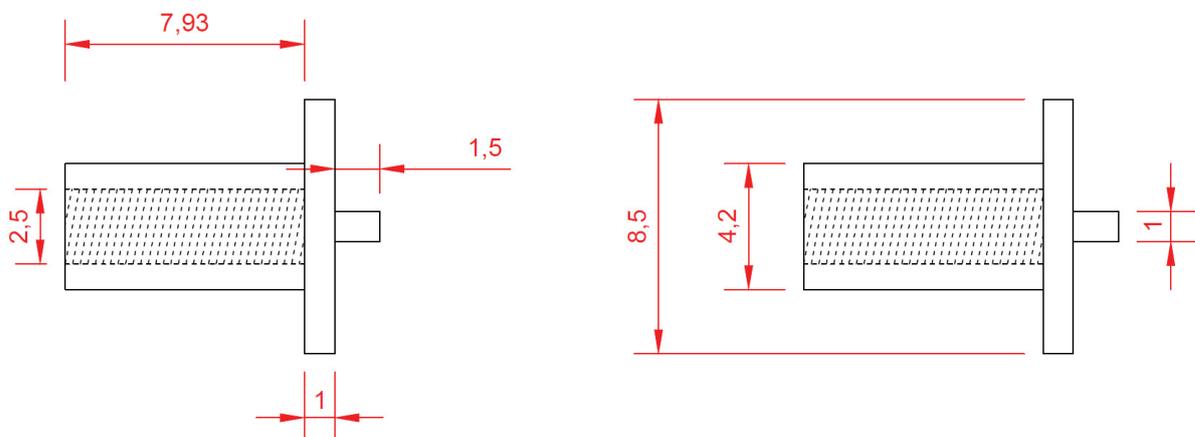
FIGURA 18 – ELEMENTO RÍGIDO VISÃO ISOMÉTRICA



Observação: medidas em mm. FONTE: o autor (2021).

Na extremidade desse elemento rígido foi soldado um rebite dotado de rosca 2,5mm (FIGURA 19 e FIGURA 20) que permitiu a conexão da placa com um conector (FIGURA 23).

FIGURA 19 – MEDIDAS DO REBITE



Observação: medidas em mm. FONTE: o autor (2021).

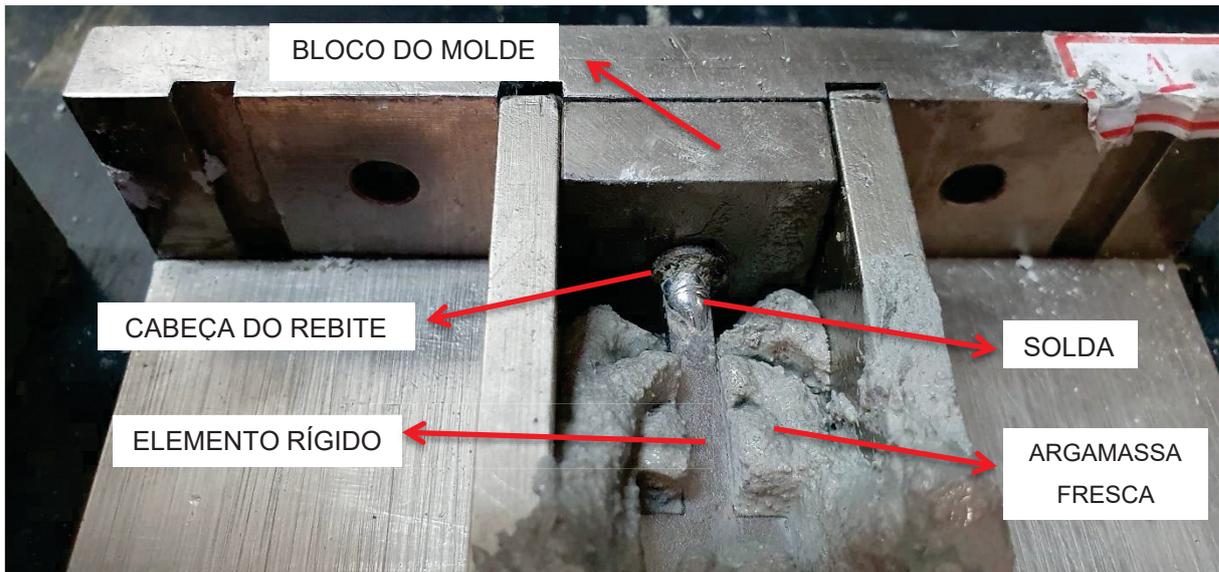
FIGURA 20 – REBITE



FONTE: o autor (2021).

As dimensões do rebite foram escolhidas de acordo com a necessidade de encaixe com o bloco do molde (FIGURA 21). O comprimento foi delimitado pela espessura do bloco do molde para que não houvesse travamento durante a desmoldagem; o diâmetro do corpo aproximou-se do diâmetro do orifício do bloco do molde para evitar a saída eventual de água ou material, mas ainda assim possibilitar sua livre movimentação; e o diâmetro da cabeça do rebite é maior do que o orifício do bloco do molde para evitar a saída de água e material.

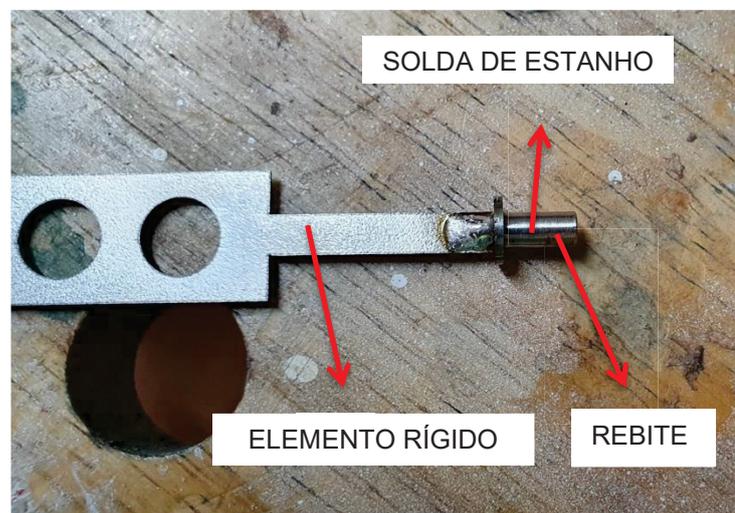
FIGURA 21 – CABEÇA DO REBITE MAIOR DO QUE ORIFÍCIO DO BLOCO DO MOLDE



FONTE: o autor (2021).

A soldagem entre o rebite e o elemento rígido foi realizada com solda de estanho e pode ser observada na FIGURA 22.

FIGURA 22 – REBITE SOLDADO AO ELEMENTO RÍGIDO

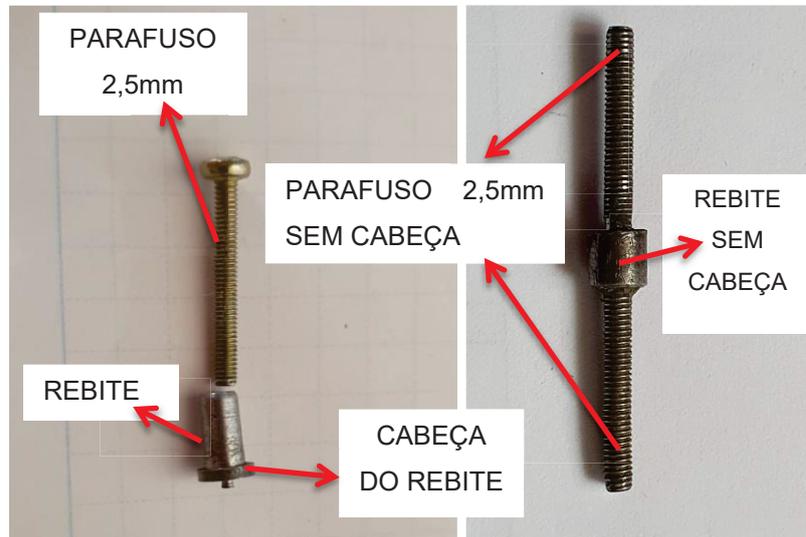


FONTE: o autor (2021).

Como o rebite e o relógio comparador possuem pontas com rosca de 2,5mm, um conector foi desenvolvido a partir de parafusos de 2,5mm. Não foram encontrados comercialmente parafusos de rosca 2,5mm com comprimento maior do que 25mm, e esse comprimento, por ser demasiadamente curto, não permitia um rosqueamento satisfatório entre o rebite e o relógio. Portanto, foi produzido um conector com dois

parafusos sem cabeça unidos por um rebite sem cabeça através de rosqueamento e cola instantânea, como exemplificado na FIGURA 23.

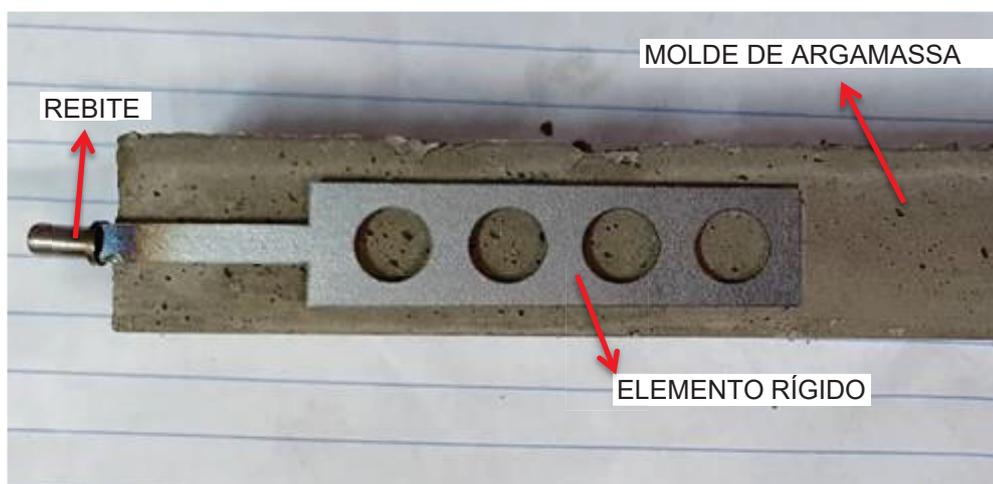
FIGURA 23 – DETALHES DA MONTAGEM DO CONECTOR



NOTA: à esquerda, parafuso e rebite antes se serem cortados e conectados; à direita, conector pronto: dois parafusos sem cabeça rosqueados e colados em um rebite sem cabeça. Fonte: o autor (2021).

A projeção do elemento rígido sobre um corpo de prova de argamassa, demonstrando como ele se posiciona internamente, pode ser observado na FIGURA 24.

FIGURA 24 – SOBREPOSIÇÃO DO ELEMENTO RÍGIDO SOBRE CORPO DE PROVA PARA DEMONSTRAR SUA POSIÇÃO INTERNAMENTE



FONTE: o autor (2021).

O relógio comparador foi escolhido como equipamento de medição: marca TMX, precisão de $0,001\text{mm}$ (10^{-6}m) – o suficiente para captar os deslocamentos da retração e próximo da precisão de leitura fornecida por um LVDT, *Linear Variable Differential Transformer*, 10^{-8}m , além de significativamente mais barato. Os relógios podem ser observados na FIGURA 25.

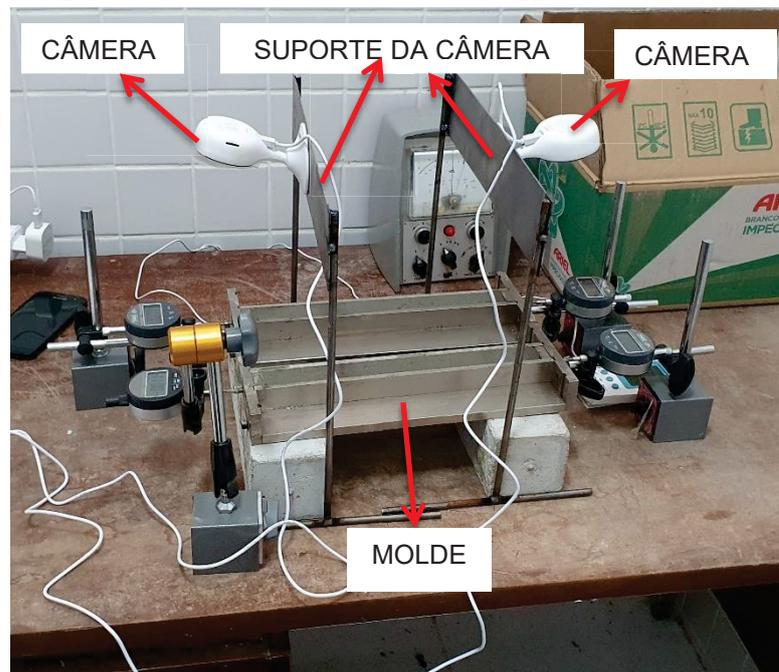
FIGURA 25 – RELÓGIO COMPARADOR TMX DIGITAL DE CURSO MÁXIMO 12,7mm E PRECISÃO DE 0,001mm E SEUS SUPORTES



FONTE: o autor (2021).

Para se obter as leituras dos quatro relógios, foram utilizadas duas câmeras, apoiadas em suportes metálicos, que os monitoraram por 24h (FIGURA 26), de modo a se realizar as leituras sem a necessidade de acompanhamento do ensaio durante as 24 horas consideradas.

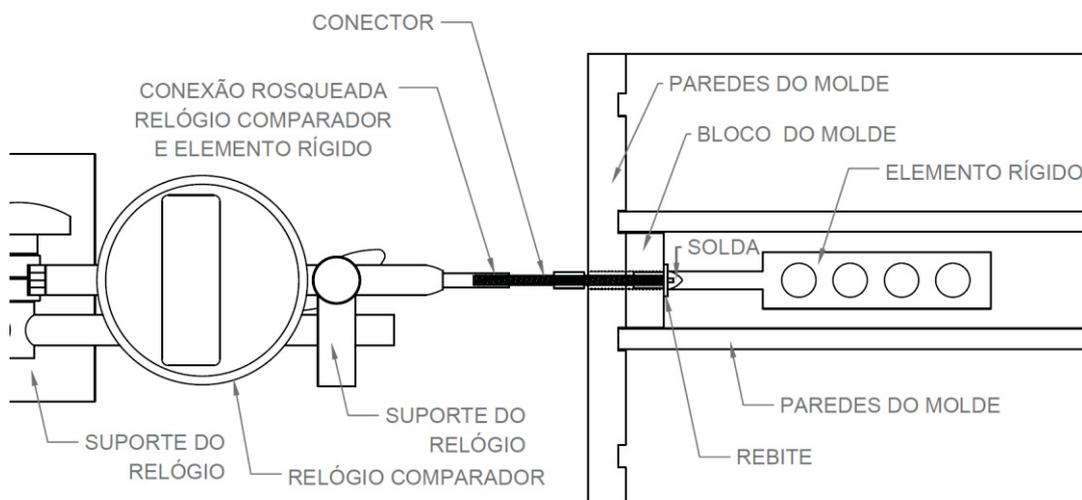
FIGURA 26 – CÂMERAS E SEU SUPORTES



FONTE: o autor (2021).

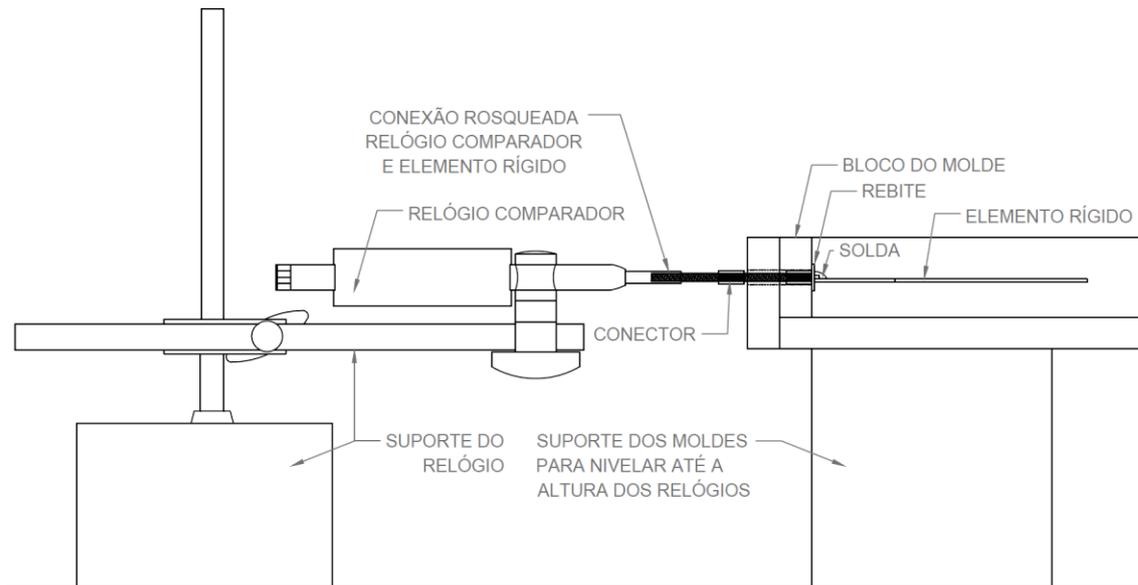
A conexão final entre os elementos criados e o relógio comparador pode ser observada nos croquis da FIGURA 27 e FIGURA 28. A conexão já em funcionamento pode ser observada na FIGURA 29.

FIGURA 27 – CROQUI DE VISTA SUPERIOR DA CONEXÃO FINAL ENTRE OS ELEMENTOS CRIADOS E O RELÓGIO COMPARADOR



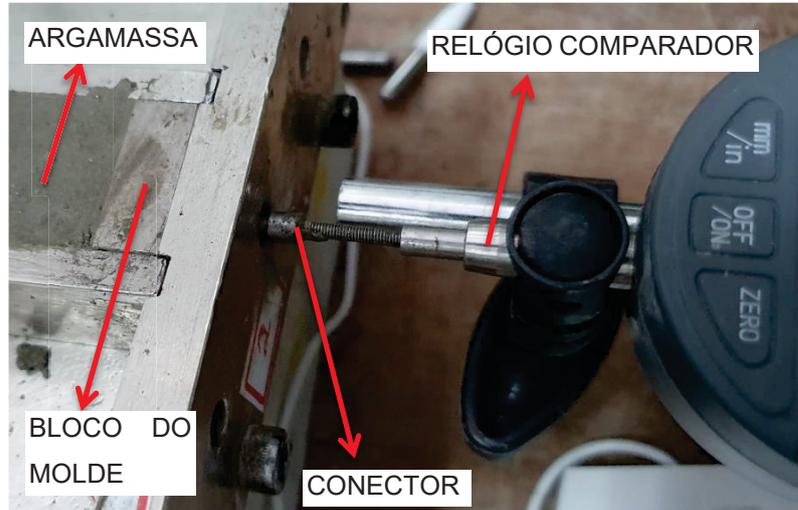
FONTE: o autor (2021).

FIGURA 28 – CROQUI DE VISTA LATERAL DA CONEXÃO FINAL ENTRE OS ELEMENTOS CRIADOS E O RELÓGIO COMPARADOR



FONTE: o autor (2021).

FIGURA 29 – CONEXÃO FINAL ENTRE OS ELEMENTOS CRIADOS E O RELÓGIO COMPARADOR EM FUNCIONAMENTO



FONTE: o autor (2021).

3.3 CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO AO AR ADOTADAS

Como descrito no tópico 3.2.1, a NBR 15261 exige que as amostras permaneçam durante as primeiras 48 ± 6 h em condições de laboratório, cobertas por filme PVC e, após desmoldagem, em câmara seca. O presente trabalho adotou

também as seguintes condições iniciais de exposição ao ar em condições ambientais de laboratório:

1. Selada: coberta por filme PVC (de acordo com a orientação da NBR 15261);
2. Exposta ao ar: sem filme PVC ou incidência de vento sobre a superfície, exposta ao ar;
3. Exposta a vento de 5m/s produzido por um ventilador fixo, durante as primeiras 24h de hidratação (FIGURA 30).

Como exposto na revisão bibliográfica, a relação entre a perda de água e a retração é bastante direta. Portanto, essas condições de exposição que induzem diferentes influências na perda de água da mistura foram escolhidas para avaliar o ensaio proposto e sua sensibilidade.

A temperatura e a umidade foram registradas durante a execução dos ensaios pelo monitoramento de câmara de um termo-higrômetro.

A velocidade do vento do ventilador, o qual foi sempre posicionado na mesma distância em relação aos moldes, foi determinada a partir de cinco leituras de um anemômetro (CFM/CMM Modelo DT-619) posicionado na distância da posição central dos moldes.

FIGURA 30 – ENSAIO COM VENTO



FONTE: o autor (2021).

3.4 CONDIÇÕES DE CURA

A câmara seca disponível no LAME (Laboratório de Materiais e Estruturas da UFPR) é um espaço pequeno, aproximadamente 9m², dotada de ar condicionado, desumidificador, uma porta isolante (como de frigorífico) e sua única janela permanece constantemente fechada (FIGURA 31).

FIGURA 31 – CÂMARA SECA DISPONÍVEL NO LABORATÓRIO LAME. A) PORTA TIPO FRIGORÍFICO; B) CÂMARA SECA E SEU AR CONDICIONADO E JANELA FECHADA; C) DESUMIDIFICADORES.



FONTE: o autor (2021).

Apesar dos esforços para manter as variáveis ambientais da câmara seca em estabilidade, foi observada uma grande variabilidade de temperaturas e umidades relativas. Considerando os limites de condições ambientais da câmara seca propostos pela NBR 15261 ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 5\%$), constatou-se que, durante o tempo de todos os ensaios realizados, a temperatura ambiente se manteve em média 27,16% do tempo fora dos limites, e a umidade relativa 48,84%. De todos os registros, as médias máximas e mínimas e o quanto estiveram fora do limite da norma, tanto para a

temperatura quanto para a umidade relativa, foram respectivamente: 26,9°C (1,9°C acima do limite da norma), 18,7°C (2,3°C abaixo do limite da norma); 60% (5% acima), 37% (8% abaixo).

A TABELA 9 apresenta um resumo das leituras obtidas em todos os ensaios. A amplitude entre as médias dessas variáveis provavelmente se dá pelo fato de os ensaios terem sido realizados ao longo de meses (entre março/2021 e julho/2021), com diferentes perfis de temperatura e umidade que acabaram influenciando o ambiente da câmara seca, que, comprovadamente, possui isolamento e capacidade de estabilizar o ambiente imperfeitos. Isso, muito provavelmente, contribuiu para a variabilidade dos resultados.

TABELA 9 – RESUMO DA VARIÁVEIS AMBIENTAIS REGISTRADAS DURANTE OS ENSAIOS

Variável	Valor
Temperatura média das médias	22,4 °C
Umidade média das médias	47 %
Desvio padrão das médias de temperatura	2,34 °C
Desvio padrão das médias de umidade	5,99 %
Maior temperatura média	26,9 °C
Menor temperatura média	18,7 °C
Maior umidade média	60 %
Menor umidade média	37 %
Temperatura máxima	29,5 °C
Temperatura mínima	18,4 °C
Umidade máxima	68 %
Umidade mínima	30 %

FONTE: o autor (2021).

O APÊNDICE 2 apresenta uma justaposição das variações de temperatura, das variações de umidade relativa da câmara seca e das curvas de retração de todos os ensaios do método proposto.

3.5 FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS

De acordo com Neville (2002), a retração plástica é maior quanto maior for o teor de cimento da mistura e, de acordo com Silva (2011), um dos principais fatores responsáveis pelas restrições às deformações no estado fresco de argamassas são os agregados.

Portanto, foram adotados traços com relações agregado/aglomerante diferentes com o objetivo de se avaliar comportamentos similares prováveis, porém de magnitudes de retração inicial (<24 horas) diferentes. Foram estudados traços em volume de argamassa de cimento, apenas cimento, areia e água, e traços de argamassa mista: incluindo o aglomerante cal.

Utilizando o traço 1:1:6 em volume como referência (ou seja, mantendo a relação em massa agregados/total constante), os traços adotados de argamassa mista seguiram um aumento linear da relação cal/aglomerantes em massa: 0,30; 0,45; e 0,60. O mesmo proposto por Bastos (2001) a fim de comparações. A relação água/aglomerantes foi mantida constante em 0,91 (resultando na mesma relação água/materiais secos de 0,17 dos traços de argamassa de cimento), portanto, os traços diferentes entre si possuem consistências variáveis. Os traços de argamassa mista adotados, suas proporções e índices de consistência podem ser observados na TABELA 10.

TABELA 10 – TRAÇOS DE ARGAMASSA MISTA ADOTADOS, SUAS PROPORÇÕES E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Composição/ Relação/ Índice	Constituinte	Traços de argamassa mista		
		1:1:6	Cal 45	Cal 60
Composição em volume	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Cal	1,000	1,889	3,500
	Areia	6,000	7,600	10,500
	Água	1,301	1,648	2,277
Composição em massa	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Cal	0,429	0,810	1,500
	Areia	6,227	7,887	10,897
	Água	1,301	1,648	2,277
Água/Cimento		1,301	1,648	2,277
Água/Aglomerantes		0,911	0,911	0,911
Aglomerantes/Agregados		0,229	0,229	0,229
Água/Materiais Secos		0,170	0,170	0,170
Índice de Consistência (NBR 13276)		233 mm	218 mm	194 mm

FONTE: o autor (2021).

Entre os traços de argamassas de cimento, se propôs uma variação linear na proporção volumétrica do aglomerante cimento. Os traços em volume são 1:3 e 1:4, que são amplamente utilizados na indústria da construção civil (Almeida, 2010), e 1:6. Eles podem ser observados na TABELA 11.

TABELA 11 – TRAÇOS EM VOLUME DE ARGAMASSA DE CIMENTO ADOTADOS E SUAS PROPORÇÕES

Traço em volume	Proporção em volume		
	Cimento	Areia	Aglomerante/ Agregado
1:3	25%	75%	33%
1:4	20%	80%	25%
1:6	14%	86%	16,6%

FONTE: o autor (2021).

Dentro dos traços de cimento propostos, tentou-se fixar a relação água/aglomerante (0,7 e 0,9 foram testadas). Porém, não foi encontrada uma relação em que os três traços se encontrassem numa faixa trabalhável de consistência (índice de consistência determinado pela NBR 13276). O traço 1:3 se apresentou muito fluído, com consistências superiores a 330mm, e o traço 1:6 muito seco, com consistência inverificável pelo método, visto que a argamassa se desmoronava em vez de se espalhar radialmente pela mesa, dificultando a medição.

Portanto, para os traços de cimento, optou-se por adotar uma relação água/materiais secos constante de 0,17. Os traços adotados variam, entre si, a relação aglomerante/agregados em 8,33% em volume e 8,03% em massa; suas proporções e seu índice de consistência determinado pela NBR 13276 – Determinação do índice de consistência – podem ser observados na TABELA 12.

TABELA 12 – TRAÇOS DE ARGAMASSA DE CIMENTO ADOTADOS, SUAS PROPORÇÕES E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Composição/ Relação/ Índice	Constituinte/ Relação	Traços de argamassa de cimento		
		1:3	1:4	1:6
Composição em volume	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Areia	3,000	4,000	6,000
	Água	0,699	0,876	1,229
Composição em massa	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Areia	3,113	4,151	6,227
	Água	0,699	0,876	1,229
Água/Aglomerante		0,699	0,876	1,229
Aglomerantes/Agregados		0,321	0,241	0,161
Água/Materiais Secos		0,170	0,170	0,170
Índice de Consistência (NBR 13276)		259 mm	243 mm	223 mm

FONTE: o autor (2021).

3.6 PROCEDIMENTO E ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

O método proposto consiste no monitoramento por câmeras do deslocamento linear horizontal de dois elementos rígidos ligados a relógios comparadores e inseridos em uma amostra de argamassa em estado fresco com as dimensões 285x25x25mm – as mesmas dimensões do molde NBR 15261 – durante as primeiras 24h de hidratação. Nos próximos sub-itens serão explicados o procedimento de ensaio e a estratégia adotada no trabalho.

3.6.1 Procedimento de ensaio

Os ensaios do método proposto foram executados na seguinte sequência:

1. Dois moldes metálicos, indicados na NBR 15261, são untados com óleo mineral;
2. O orifício dos blocos do molde e a superfície externa do corpo do rebite (FIGURA 32) recebem uma camada de vaselina em pasta para impedir a possível saída de água e material e para diminuir o eventual atrito entre eles;

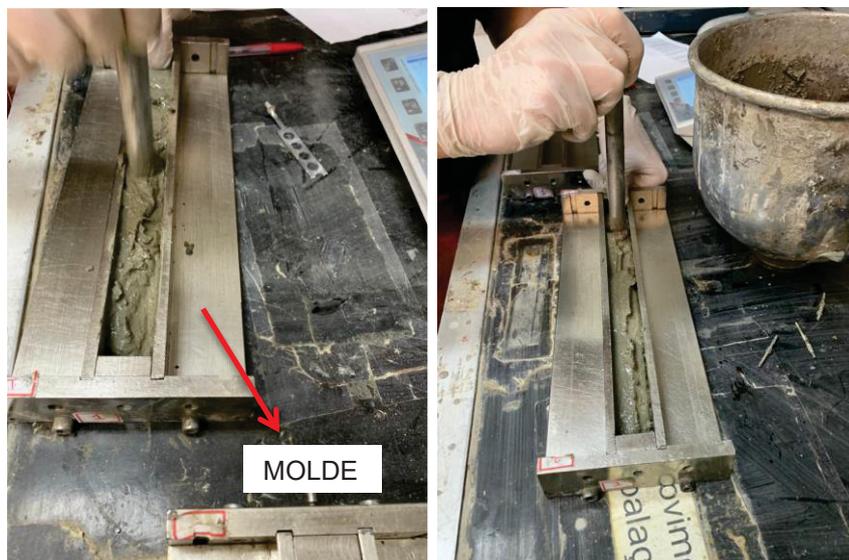
FIGURA 32 – EXECUÇÃO DOS GOLPES DA PRIMEIRA CAMADA



FONTE: o autor (2021).

3. Com as quantidades de material do traço já pesadas e separadas, a mistura da argamassa segue o procedimento proposto pela NBR 16541 e a hora de início da mistura é anotada;
4. Em seguida são moldadas duas amostras, uma em cada molde (cada ensaio é repetido duas vezes, resultando em 4 amostras por ensaio). Como orientado pela NBR 15261, elas são moldadas em duas camadas com 25 golpes cada e arrasamento final com espátula (FIGURA 33);

FIGURA 33 – EXECUÇÃO DOS GOLPES DA PRIMEIRA CAMADA



FONTE: o autor (2021).

5. Após os golpes da primeira camada da amostra, os elementos rígidos são inseridos em cada uma das extremidades do molde e rosqueados em seus conectores (FIGURA 34). Depois é realizada a segunda camada;

FIGURA 34 – INSERÇÃO DOS ELEMENTOS RÍGIDOS E ROSQUEAMENTO DOS CONECTORES



FONTE: o autor (2021).

6. A massa de cada um dos conjuntos, molde e corpo de prova de argamassa fresca, é registrada.
7. Em seguida, os moldes são levados à câmara seca e posicionados abaixo das câmeras. Então, os conectores são rosqueados aos relógios (FIGURA 35) que já estão em posição nivelada para recebe-los. Assim, se iniciam as medições.

FIGURA 35 – ROSQUEAMENTO DOS CONECTORES COM OS RELÓGIOS



FONTE: o autor (2021).

8. Junto com os deslocamentos, a variação da temperatura e a umidade são registradas por duas câmeras, uma sobre cada par de relógios (FIGURA 36), por 24 horas;

FIGURA 36 – CAMÊRAS POSICIONADAS SOBRE OS RELÓGIOS, ENSAIO PRONTO PARA O INÍCIO DAS LEITURAS



FONTE: o autor (2021).

9. Após 24 horas, além de os moldes serem pesados, as amostras são desmoldadas, suas primeiras medições no pórtico da NBR 15261 são executadas e, em seguida, tais amostras são armazenadas na câmara seca, sendo retiradas apenas para as medidas seguintes: 1, 7, 14, 21 e 28 dias.

A decisão de desmoldar os corpos de prova após 24 horas, em vez de 48 horas como a NBR 15261 prescreve, veio de uma necessidade de manter o cronograma de ensaios propostos exequível. Portanto, os resultados da retração a longo prazo obtidos nesse estudo não podem ser comparados diretamente com os resultados externos à pesquisa que seguem a normativa de 48h para desmoldagem da NBR 15261.

3.6.2 Procedimento de mistura

Com o objetivo de minimizar o erro aleatório nos resultados, proveniente da heterogeneidade da mistura de argamassa, foi adotada a padronização do procedimento de mistura, que possibilita uma homogeneidade maior do material. Para isso, a mistura da argamassa seguiu o procedimento proposto pela NBR 16541 “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios” (ABNT, 2016). As formulações são previamente pesadas e separadas em sacos plásticos para facilitar a dinâmica diária dos ensaios e permitir uma mistura dos elementos anidros antes de sua aplicação.

De acordo com a NBR 16541, os passos da mistura são os seguintes:

1. Colocar toda a argamassa anidra na cuba do misturador;
2. Acionar o misturador na velocidade baixa e adicionar 75% da água de mistura à argamassa (com uma proveta ou recipiente similar) nos 10s iniciais, misturando até completar o tempo de 30s desde o acionamento do misturador;
3. Mudar para velocidade alta e misturar por mais 60s;
4. Parar o misturador, retirar a pá de mistura e raspar toda a superfície interna da cuba e da pá. Efetuar esta tarefa e recolocar a pá em um intervalo de 90s (caso essa etapa seja concluída em tempo inferior, deixar a argamassa em repouso até completar os 90s);
5. Acionar o misturador na velocidade baixa e adicionar o restante da água (25%) em 10s, continuando a misturar até completar 60s.

3.6.3 Ensaios realizados

A TABELA 13 expõe um resumo dos ensaios executados com o método proposto, considerando o tipo de argamassa, a nomenclatura do traço e a exposição ao ar.

TABELA 13 – ENSAIOS REALIZADOS

Tipo de argamassa	Nome do traço	Condição de exposição ao ar
Simples	1:3	Exposta ao ar
	1:4	Exposta ao ar
	1:6	Exposta ao ar
	1:3	Selada
	1:4	Selada
	1:6	Selada
	1:3	Vento 5m/s
	1:4	Vento 5m/s
	1:6	Vento 5m/s
Mista	1:1:6	Exposta ao ar
	Cal 45	Exposta ao ar
	Cal 60	Exposta ao ar

FONTE: o autor (2021).

Cada um dos ensaios foi realizado duas vezes, sendo dois corpos de prova produzidos em cada, ou seja, foram estudados quatro corpos de prova de cada ensaio.

Os testes com argamassas mistas foram executados com o objetivo de comparar com o resultado da pesquisa de Bastos (2001), no intuito de entender a viabilidade do método proposto. Portanto, para essas argamassas, se aplicou apenas uma das condições adotada por Bastos (2001): exposta ao ar e substrato liso impermeável. As argamassas de cimento e os traços adotados nelas são uma proposta do presente trabalho e optou-se por aplicar as diferentes exposições ao ar apenas nelas.

3.6.4 Coleta de dados

A coleta das leituras de deslocamento, temperatura e umidade do ambiente foi realizada assistindo às gravações e anotando as variações registradas a cada 5 minutos por 24h. Para se obter o deslocamento linear total (mm) de um corpo de prova, foram somadas as leituras obtidas nos dois relógios ligados a ele. Por fim, para se obter a retração total ocorrida em cada leitura (mm/m), a soma das leituras foi dividida pela distância do centro dos elementos rígidos.

Foi coletada a perda de massa inicial (após as primeiras 24 horas de hidratação) para cada corpo de prova subtraindo-se o peso final do inicial do conjunto molde e corpo de prova (perda de massa).

As medições da retração a longo prazo e da perda de massa a longo prazo seguiram o disposto pela NBR 15261, exceto a primeira leitura, que ocorreu no primeiro dia e não após 48 horas como a norma prescreve.

3.6.5 Análise dos resultados

O estudo dos resultados foi realizado por meio de análises de variância ANOVA com 5% de nível de significância. Essa avaliação procura descobrir, estatisticamente, a validade de duas hipóteses: H0 (hipótese nula), na qual não há diferenças significativas entre os grupos (sendo “grupos” os resultados de uma amostra influenciados por um fator); H1 (hipótese alternativa) - há diferença significativa entre os grupos provocada pelo fator controlável investigado (Ribeiro & Caten, 2003). Pode-se descartar H0, ou seja, existe diferenças significativas entre os grupos provocada pelo fator controlável em estudo, quando o valor F calculado for maior que o valor F tabelado e, concomitantemente, o valor-P for menor do que 0,05, de acordo com o nível de significância de 5% (Ribeiro & Caten, 2003).

Para auxiliar na visualização da diferenciação da influência estatística de fatores, foram adotados gráficos de intervalos de confiança para médias de grupo. Eles consistem em amplitudes de valores que apresentam a probabilidade de conter a verdadeira média de cada população, sendo calculados através do desvio padrão combinado: média ponderada do desvio padrão dos grupos.

3.6.6 Variáveis do experimento

A estratégia da metodologia exige que sejam devidamente reconhecidas as variáveis do experimento e sua classificação: independentes, aquelas que não são moderadas ou influenciadas por outras, e dependentes, aquelas que são influenciadas pelas independentes. A TABELA 14 expõe as variáveis envolvidas no experimento.

TABELA 14 – CLASSIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS DO EXPERIMENTO

Classificação	Grupo	Variável
Variáveis independentes	Ambiente	Temperatura do ambiente
		Umidade Relativa
		Exposição ao ar (simples, selada ou vento)
		Incidência ou ausência de vento por 24h
	Aglomerantes	Cimento Portland CP-II-F-32
		Cal Hidratada CH-I
	Agregado	Areia média
	Traços em volume	Argamassas Simples (1:3 – 1:4 – 1:6)
		Argamassas Mistas (1:1:6 – Cal 45 – Cal 60)
	Procedimento de mistura	NBR 16541 (ABNT, 2016)
	Ensaio de tempo de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Ensaio de retração	NBR 15263 (ABNT, 2005)	
	Método proposto	
Variáveis dependentes	Evaporação	Perda de água nas primeiras horas 24 horas
	Retração	Deslocamento linear inicial: 24 horas
		Deslocamento linear: 0, 1, 7 e 28 dias (NBR 15261)

Fonte: o autor (2021).

3.6.7 Delimitação do trabalho

As delimitações do presente estudo podem ser atribuídas aos seguintes fatores:

- as características e propriedades específicas dos materiais utilizados nos experimentos: areia, cimento Portland (CP-II-F), cal (CH I) e água.
- os traços adotados;
- o enfoque do estudo na mensuração do fenômeno da retração inicial em suas primeiras 24 horas de hidratação e a longo prazo de uma maneira generalista. Portanto, não objetivou-se diferenciar a contribuição de cada um dos tipos de retração existente (química, autógena, por secagem, térmica, por carbonatação) para a deformação total.

4 RESULTADOS

Nessa seção serão expostos e discutidos os resultados da presente pesquisa.

4.1 INTRODUÇÃO

Antes da apresentação dos resultados, se faz necessário expor problemas ocorridos na pesquisa que provavelmente tiveram impacto sobre os resultados.

Um fato recorrente na medida da retração foi a ausência de deslocamento em um ou mais dos relógios. O ocorrido se observou em todas as pontas de todos os moldes, e no mínimo uma vez em cada relógio.

Quando uma ou as duas pontas de um molde não registravam deslocamento algum, a leitura era descartada e o ensaio era repetido até que houvesse, no mínimo, quatro corpos de prova para o ensaio em questão.

Porém, esse procedimento não foi adotado nos ensaios selados porque a baixa magnitude de deslocamento registrada nestes ensaios não permite descartar deslocamentos mínimos ou ausentes. No entanto, foram descartados dois corpos de prova nos quais os relógios das duas extremidades se mantiveram estáticos. A TABELA 15 apresenta o quantitativo de corpos de prova (CPs) dos ensaios selados e a relação dos que deslocaram ou não os relógios, além daqueles que foram descartados.

TABELA 15 – CPs DOS ENSAIOS SELADOS

ITEM	QUANTIDADE
Total de CPs	14
CPs que deslocaram os dois relógios	3
CPs que deslocaram apenas um relógio	9
CPs que moveram nenhum dos relógios e foram descartados	2

FONTE: o autor (2021).

A TABELA 16 apresenta a quantidade total de todos os ensaios e a relação dos que deslocaram ou não os relógios e os que foram descartados seguindo o critério explicado.

TABELA 16 – CPs DE TODOS OS ENSAIOS

ITEM	QUANTIDADE
Total de CPs	57
CPs que deslocaram os dois relógios	40
CPs que deslocaram apenas um relógio e foram contabilizados	9
CPs que deslocaram apenas um relógio e foram descartados	5
CPs que não deslocaram os dois relógios e foram descartados	3
CPs descartados	8
Proporção de vezes que se detectou deslocamento	82,46%
Proporção de vezes que não se detectou deslocamento	17,54%

FONTE: o autor (2021).

A natureza do motivo da ausência de deslocamentos é incerta e necessitaria de um estudo maior do ensaio proposto com variação da instrumentação adotada. Suspeita-se que o rosqueamento entre o conector e o relógio possam ter sido uma das causas, visto que com o uso, a rosca do parafuso do conector pode sofrer um desgaste físico e, conseqüentemente, pode comprometer a conexão entre o aparelho medidor e o elemento rígido. Também, apesar dos esforços, pode ter ocorrido percolação de material cimentício para o orifício do bloco do molde, com conseqüente travamento do deslocamento do rebite. Ainda, considerando que a massa do sistema (elemento rígido, rebite, solda, conector e relógio comparador) pode ser relativamente alta para ser puxada pela argamassa, pequenas interferências podem afetar a leitura.

Quanto às temperaturas e umidades relativas da câmara seca e sua influência nos resultados de retração máxima, foi aplicado um modelo ANOVA de efeitos mistos usando as variáveis ambientais como fatores aleatórios. Porém, não foi encontrada uma correlação estatística significativa entre elas e a retração máxima registrada para todos os traços estudados. O APÊNDICE 2 apresenta as variações de temperatura e umidade do ambiente para cada ensaio realizado.

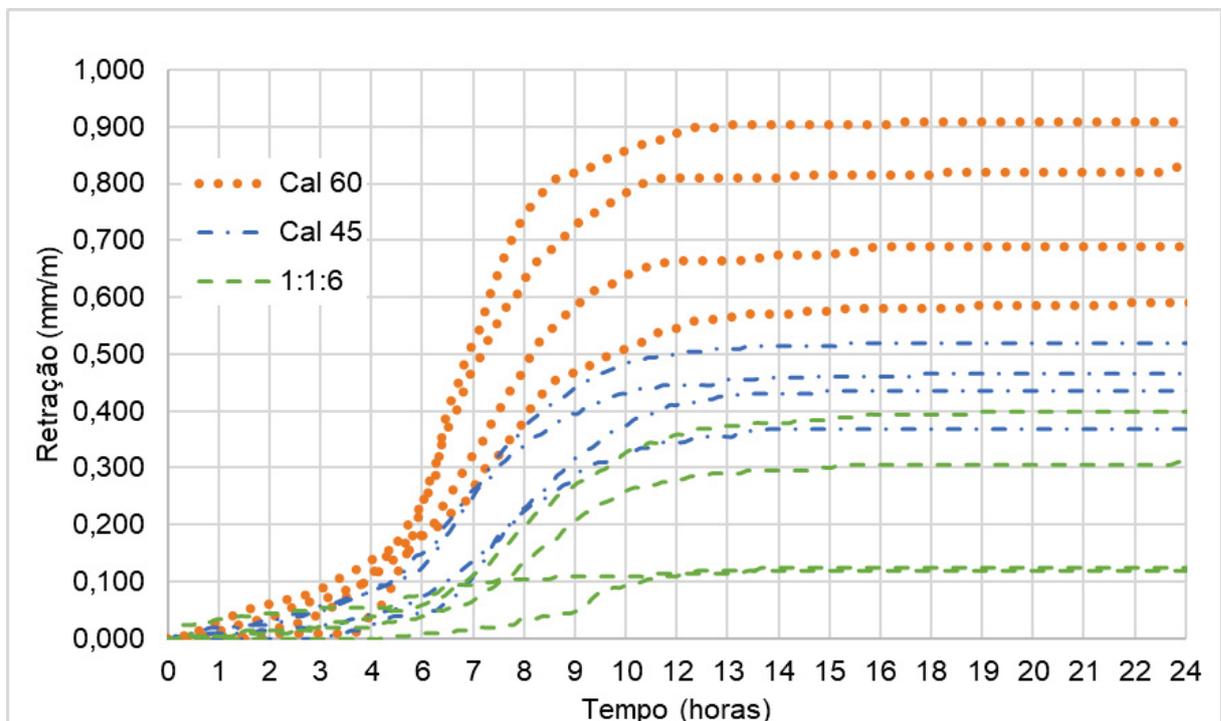
4.2 RETRAÇÃO INICIAL (MÉTODO PROPOSTO)

Os próximos subitens exibem os resultados obtidos através do método proposto pela presente pesquisa.

4.2.1 Retração inicial dos traços de argamassa mista

O GRÁFICO 3 expõe as curvas de retração resultantes dos ensaios realizados com os traços de argamassa mista e exposição simples ao ar. Como pode ser observado, as curvas entre os traços com diferentes concentrações de aglomerante apresentaram comportamentos similares: um estágio inicial de velocidade de retração baixa, um estágio intermediário de retração rápida e um estágio final de estagnação da retração.

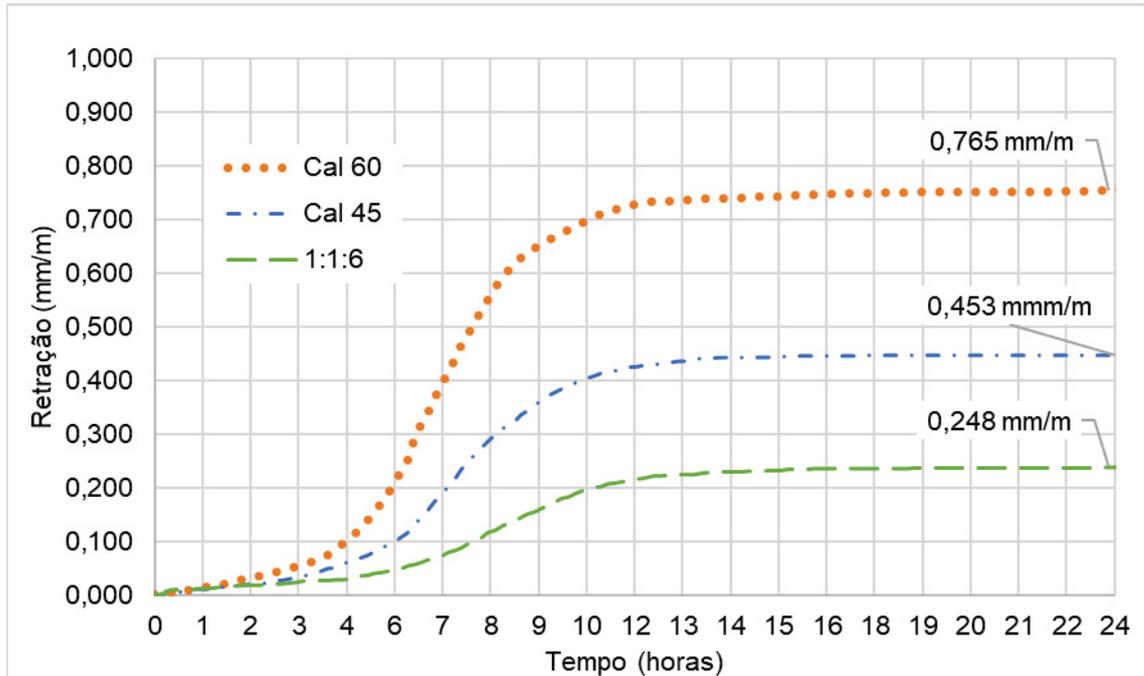
GRÁFICO 3 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS MISTAS SEPARADAS POR TRAÇO



FONTE: o autor (2021).

Apesar de as curvas apresentarem comportamentos semelhantes, há uma diferença na magnitude da retração entre os traços, como pode ser observado no GRÁFICO 4, que apresenta as curvas médias dos traços de argamassa mista. As curvas médias foram obtidas através da soma da retração medida em cada momento, para cada um dos traços, e posterior divisão dessa soma pelo número de ensaios para cada ensaio (quatro).

GRÁFICO 4 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS MISTAS SEPARADAS POR TRAÇO



FONTE: o autor (2021).

Para compreender estatisticamente se houve influência significativa da variação da concentração da cal sobre o valor máximo médio de retração (aqui nomeado de retração máxima) obtido em cada ensaio, aplicou-se uma análise de variância ANOVA (com 5% de nível de significância). Como pode ser observado na TABELA 17, concluiu-se que a variação da concentração da cal teve um efeito significativo sobre a magnitude da retração máxima.

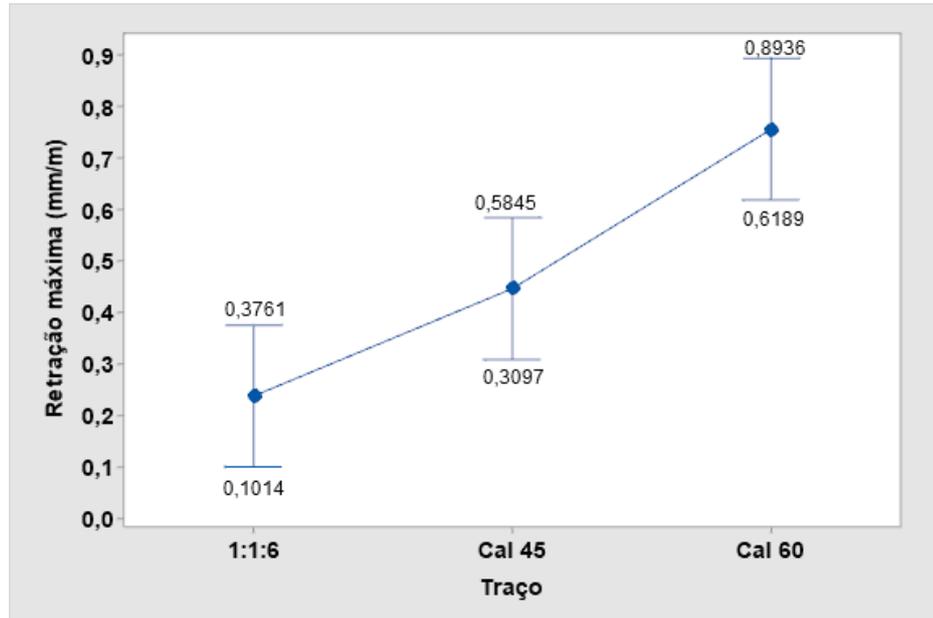
TABELA 17 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA OBTIDA NOS ENSAIOS DE ARGAMASSA MISTA

Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Varição de traço	18,378	4,256	0,001	Significativo

FONTE: o autor (2021).

As variações, que são de 15% em massa da relação cal/argomaterantes, provocaram uma elevação da retração máxima média de 82,3% do traço 1:1:6 para o Cal 45, e de 68,7% do traço Cal 45 para o Cal 60. Esse resultado é compatível com o estudo de Bastos (2001). O GRÁFICO 5 apresenta os intervalos da retração máxima em relação aos traços.

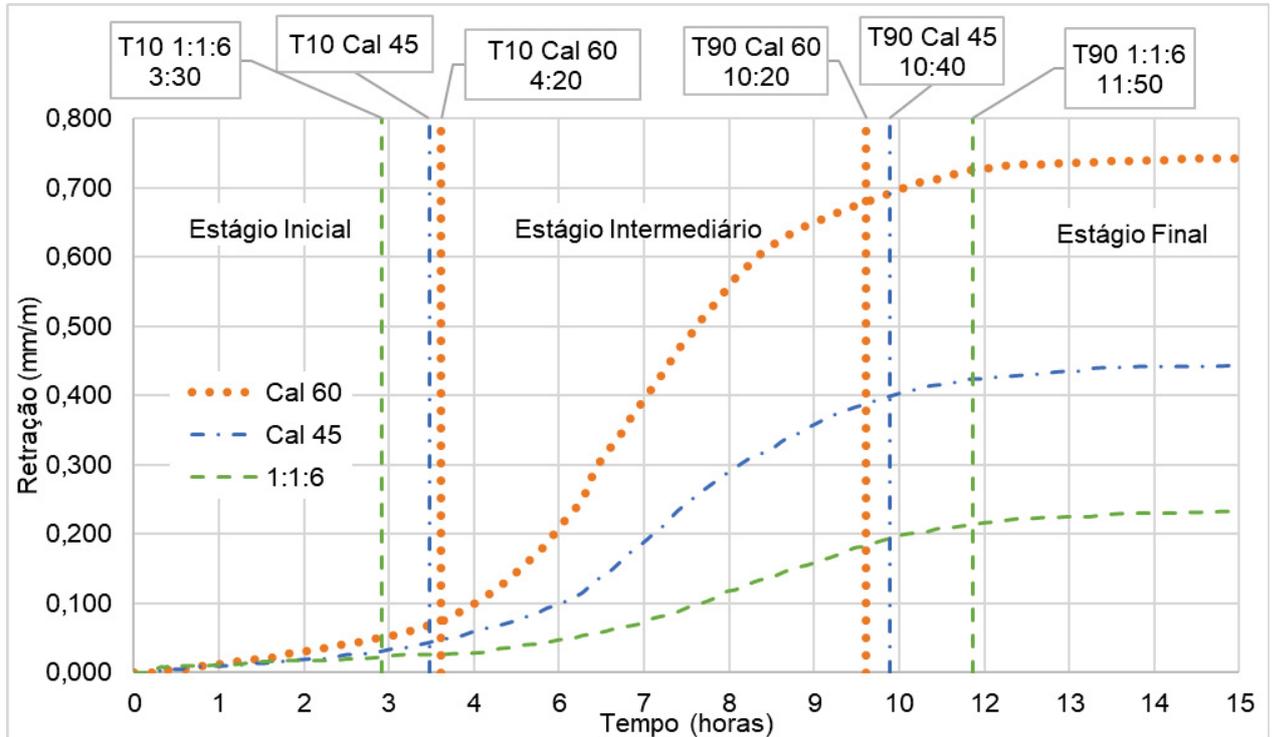
GRÁFICO 5 – INTERVALOS DE CONFIANÇA DE MÉDIAS DA RETRAÇÃO INICIAL MÁXIMA PARA OS TRAÇOS DE ARGAMASSAS MISTAS



NOTA: intervalos de variação calculados a partir do desvio padrão combinado. FONTE: o autor (2021).

Para diferenciar os estágios de retração encontrados (inicial, intermediário e final), foram utilizados os tempos exatos em que a retração atinge 10% (T10) e 90% (T90) do seu valor máximo. O GRÁFICO 6 apresenta linhas verticais cortando as curvas de retração média para cada traço, indicando seus respectivos T10 e T90. Pode-se observar uma tendência de que quanto maior a relação cal/aglomerantes, mais se aproximam o T10 e o T90, ou seja, um maior teor de cal aumenta a inclinação da curva de retração. Isso sugere a influência do teor de cal na velocidade de retração. Os tempos indicados na abcissa do GRÁFICO 6 mostram o momento em que a média atingia o valor com precisão de ± 5 minutos.

GRÁFICO 6 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS MISTAS E SEUS RESPECTIVOS TEMPOS T10 E T90



NOTA: escala do tempo utilizada em 15 horas para melhorar a visualização das linhas verticais que indicam os tempos T10 e T90. FONTE: o autor (2021).

Também foi realizada uma análise de variância entre os traços e os tempos T10 e T90 de todos os ensaios (retirados com precisão exata – subtraindo-se a hora em que a argamassa alcançou 10% ou 90% da retração máxima total da hora inicial da mistura do material). Apesar da tendência observada, não se encontrou significância entre os tempos e os traços (TABELA 18).

TABELA 18 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE OS TEMPOS T10 E T90 (RETIRADOS COM PRECISÃO DE 1 SEGUNDO)

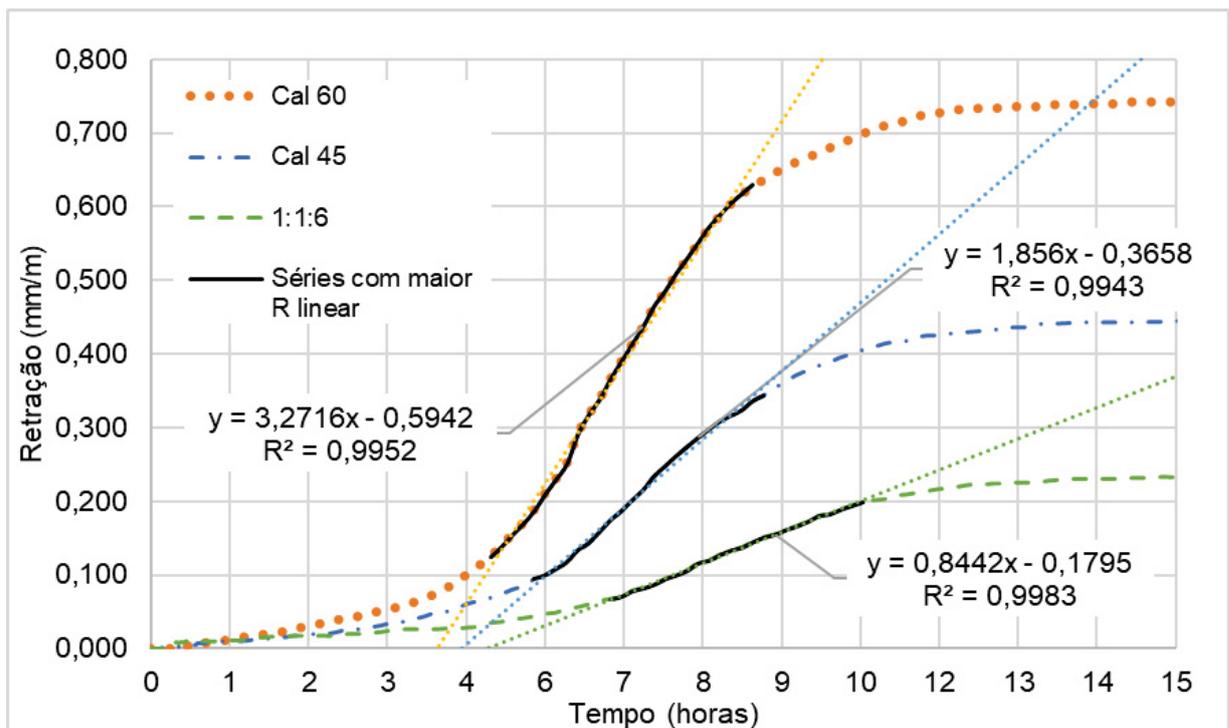
Tempo	Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
T10	Varição de traço	0,146	4,256	0,866	Não significativo
T90	Varição de traço	0,991	4,256	0,408	Não significativo

FONTE: o autor (2021).

Para melhor caracterizar a diferença de comportamento entre as curvas médias de retração, foi selecionada a série de cada curva de dados, dentro do estágio intermediário, que obtivesse a maior correlação linear (R). Essa seleção da série foi feita a partir de todos os dados dentro do estágio intermediário e se excluindo os

extremos simultaneamente, assim aumentando a correlação linear da série até que ela diminuísse. A partir da função linear ($f(x) = ax + b$) encontrada para cada traço, usando um tempo x_0 e x que resultaram, respectivamente, em uma retração y_0 e y , foi possível calcular a taxa de variação da retração média em relação ao tempo analisado, que pode ser interpretado como uma velocidade de retração que, dentro do proposto, seria a maior velocidade de retração para cada média analisada. Constatou-se que, durante esse período, a velocidade de retração média do traço Cal 60 é em média $3,79E-5$ mm/m/s, 76% maior do que a do traço Cal 45 ($2,15E-5$ mm/m/s) e 370% maior do que a do traço 1:1:6 ($1,02E-5$ mm/m/s). O GRÁFICO 7 mostra as séries selecionadas para cada traço.

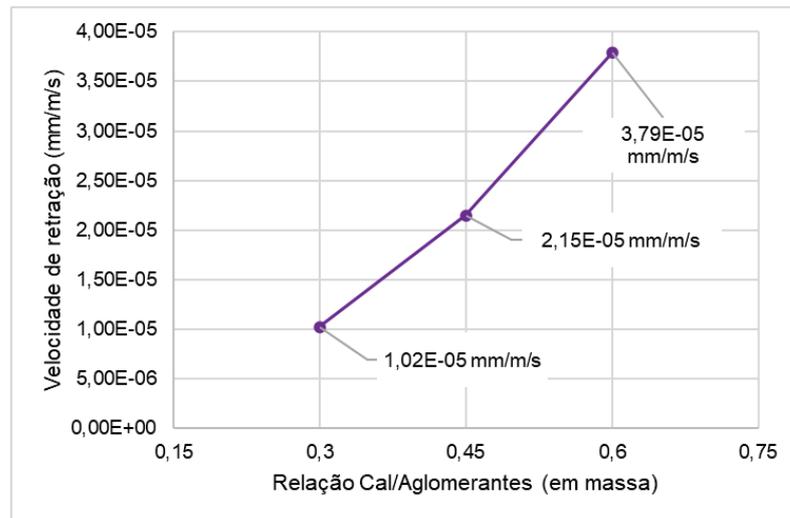
GRÁFICO 7 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS MISTAS E SUAS SÉRIES COM MAIOR CORRELAÇÃO LINEAR PARA CÁLCULO DE VELOCIDADE DE RETRAÇÃO



NOTA: escala do tempo utilizada em 15 horas para melhorar a visualização das séries selecionadas para o cálculo da velocidade de retração durante o estágio intermediário. Linhas pontilhadas representam a linha de tendência linear retirada da série com maior R linear dentro do estágio intermediário. FONTE: o autor (2021).

Portanto, conclui-se que a variação da relação cal/aglomerantes aumentou a velocidade da retração durante o estágio intermediário (GRÁFICO 8).

GRÁFICO 8 – VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA NO PERÍODO INTERMEDIÁRIO E A COMPARAÇÃO COM A RELAÇÃO CAL/AGLOMERANTES



FONTE: o autor (2021).

Também foi avaliada a perda de massa das argamassas nas primeiras 24 horas e concluiu-se que a variação da concentração de cal não provocou uma influência significativa (TABELA 19).

TABELA 19 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE A PERDA DE MASSA APÓS 24 HORAS DE HIDRATAÇÃO

Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Varição de traço	4,237	4,256	0,0505	Não significativo

FONTE: o autor (2021).

O traço Cal 60 apresentou, em média, uma perda de massa de 32,60%; o Cal 45, 31,76%; e o 1:1:6, 27,76%. O resultado não era esperado devido à correlação inversa entre a concentração de cal e a perda de água por evaporação e à capacidade de retenção de água da cal (Bastos, 2001).

4.2.2 Retração inicial dos traços de argamassa de cimento

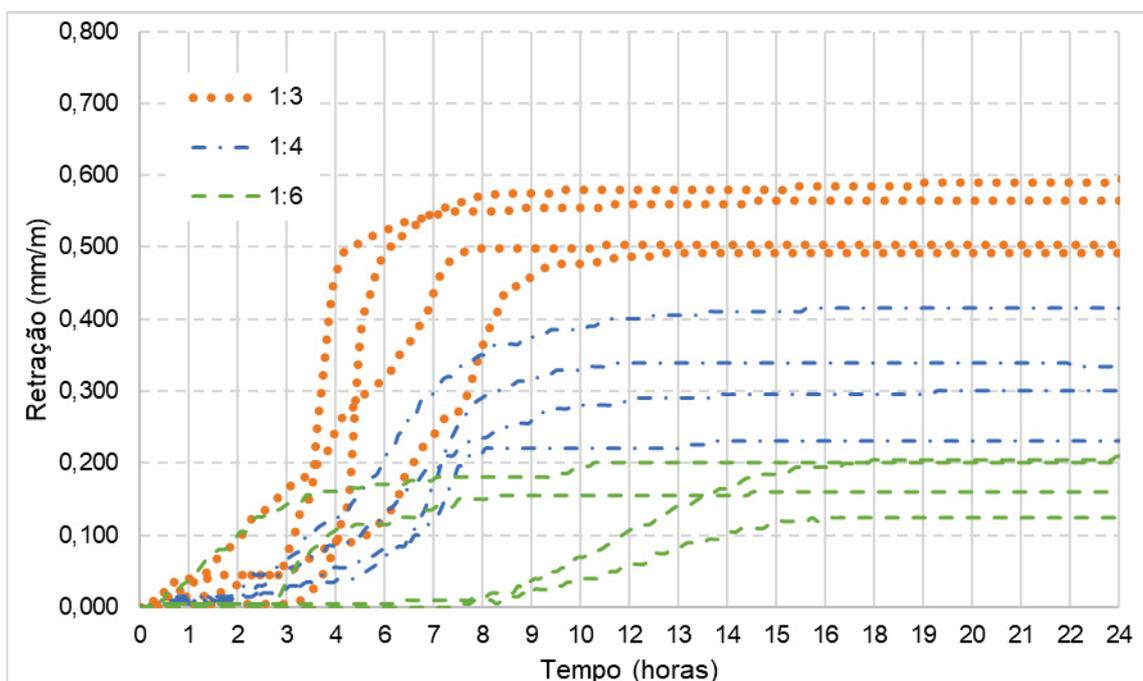
Os traços de argamassa de cimento foram expostos a três condições de exposição ao ar diferentes: exposta ao ar, selada por filme PVC e ao vento de 5m/s. Foram utilizados traços com relação água/materias secos constante de 0,17, variando a proporção aglomerantes/agregados em 8,33% em volume. Os próximos subitens

expõem os resultados encontrados para cada tipo de exposição e a comparação entre eles.

4.2.2.1 Argamassas de cimento expostas ao ar

O GRÁFICO 9 demonstra as curvas de retração registradas para as argamassas expostas ao ar.

GRÁFICO 9 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS DIVIDIDAS POR TRAÇO



FONTE: o autor (2021).

Pode-se observar que o comportamento entre elas não é tão similar quanto ao comportamento entre as curvas de retração de argamassas mistas. Acredita-se que essa variabilidade maior entre os resultados das argamassas de traços de cimento se deva à escolha de manter a relação água/materiais secos constante em vez da relação água/aglomerantes. Essa decisão foi tomada porque as argamassas traços escolhidos, 1:3, 1:4 e 1:6, não obtiveram boa consistência com a abordagem da relação água/aglomerantes constante. Porém, é possível perceber visualmente pelo GRÁFICO 9 que a variação aglomerantes/agregados resultou em magnitudes de retração diferentes. Para compreender estatisticamente se houve influência

significativa na retração atingida entre os traços adotados, executou-se uma análise de variância (TABELA 20).

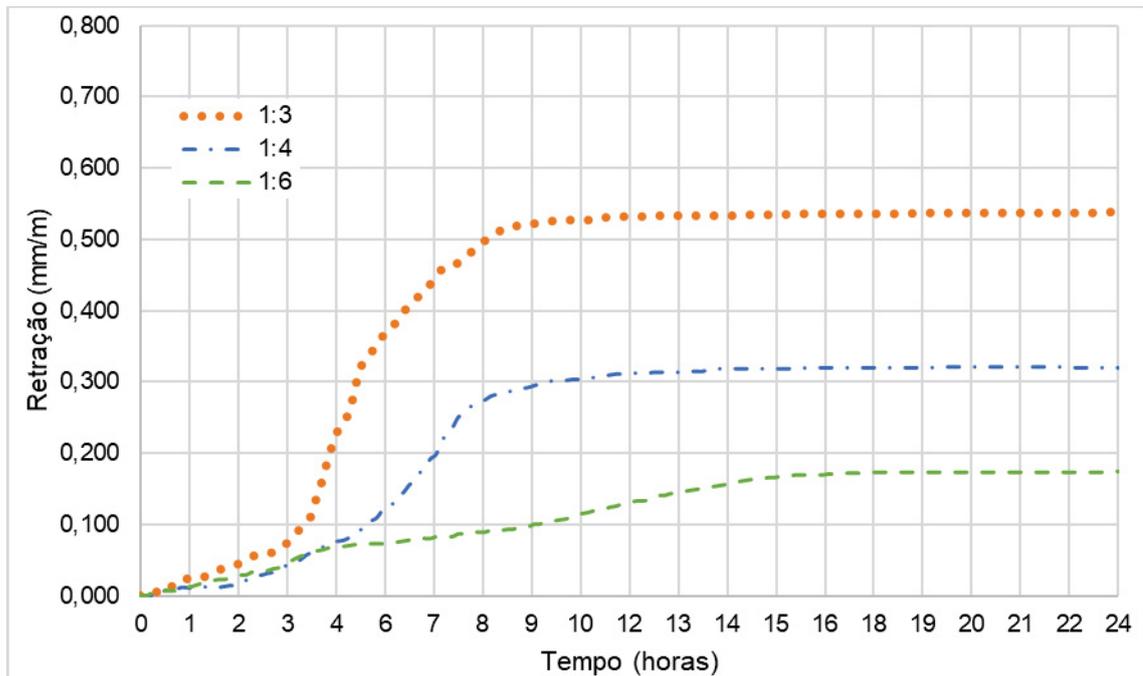
TABELA 20 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO AR SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA

Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Varição de traço	40,87	4,27	0,000	Significativo

FONTE: o autor (2021).

Conclui-se então que a variação da relação aglomerante/agregados teve um impacto significativo sobre a magnitude da retração. Esse impacto pode ser melhor observado no GRÁFICO 10, que apresenta as curvas médias do ensaio exposto ao ar de argamassas de cimento.

GRÁFICO 10 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIAS DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS DIVIDIAS POR TRAÇO

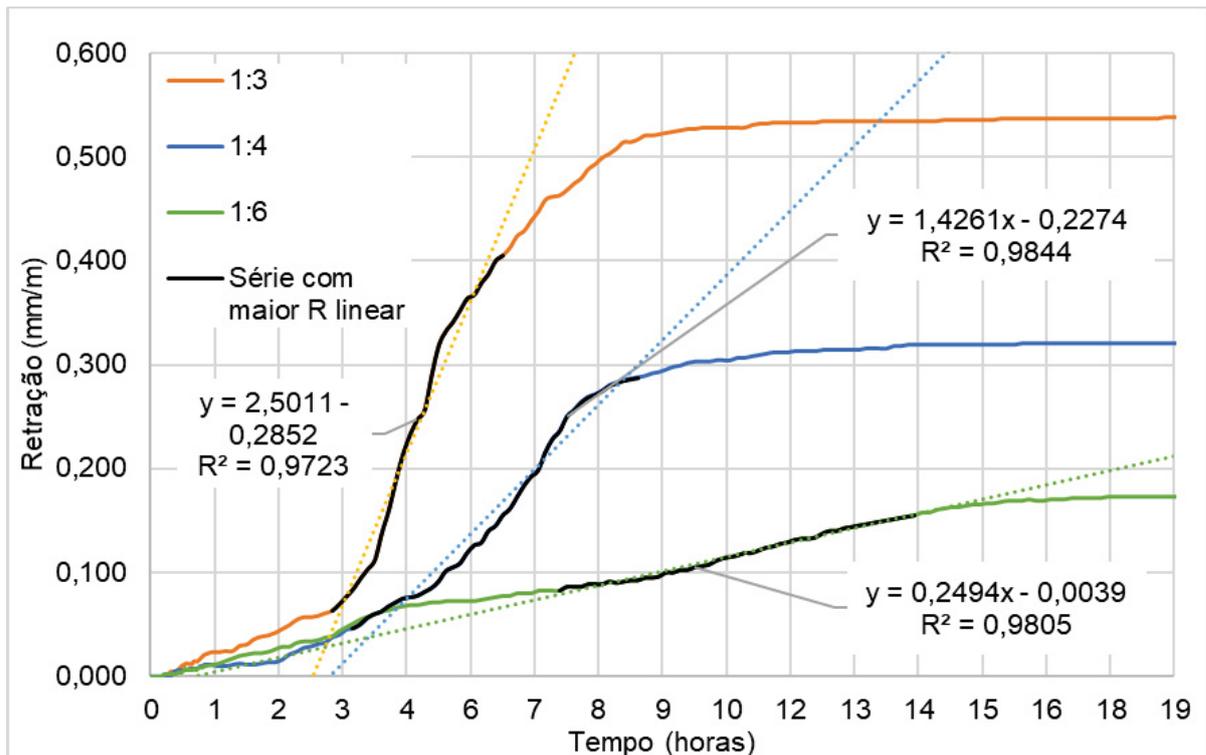


FONTE: o autor (2021).

A velocidade de retração para os traços de argamassa de cimento expostos ao ar foi obtida utilizando o mesmo método de correlação linear usado para os traços de argamassa mista. Encontrou-se que a velocidade média da retração no período intermediário do traço 1:3 foi de $2,89E-5$ mm/m/s, 75% maior do que a do traço 1:4

($1,65E-5$ mm/m/s) e 835% maior do que a do traço 1:6 ($3,09E-6$ mm/m/s). O GRÁFICO 11 mostra as séries selecionadas para cada traço utilizadas para encontrar a velocidade máxima.

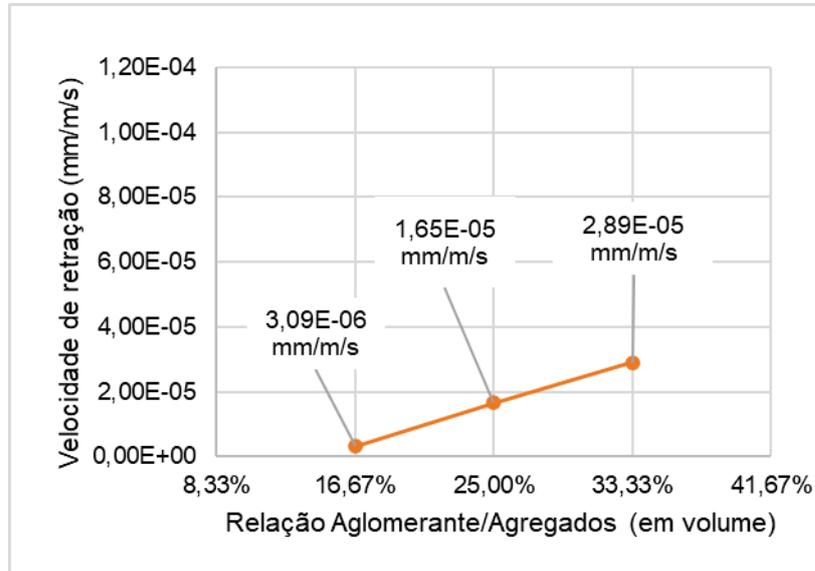
GRÁFICO 11 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO AR E SUAS SÉRIES SELECIONADAS PARA CÁLCULO DE VELOCIDADE



NOTA: escala do tempo do gráfico utilizada em 19 horas para melhorar a visualização das séries selecionadas para o cálculo da inclinação do estágio intermediário. Linhas pontilhadas representam a linha de tendência linear retirada da série com maior R linear dentro do estágio intermediário. FONTE: o autor (2021).

A relação entre a velocidade média da retração e os teores de aglomerantes e agregados estudados no ensaio proposto podem ser observados no GRÁFICO 12.

GRÁFICO 12 – COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIAS E RELAÇÃO AGLOMERANTE/AGREGADO PARA ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS



NOTA: escala vertical adotada igual à escala do gráfico com o maior valor.

FONTE: o autor (2021).

A perda de massa após 24 horas no traço com a maior relação cimento/agregados, o 1:3, foi a menor em média (14,47%), enquanto a perda do traço 1:6, o com a menor relação de cimento/agregados, foi a maior (19,23%). O traço 1:4 resultou na perda média intermediária (16,19%).

TABELA 21 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTA AO AR SOBRE A PERDA DE MASSA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS

Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Variação de traço	16,366	4,256	0,001	Significativo

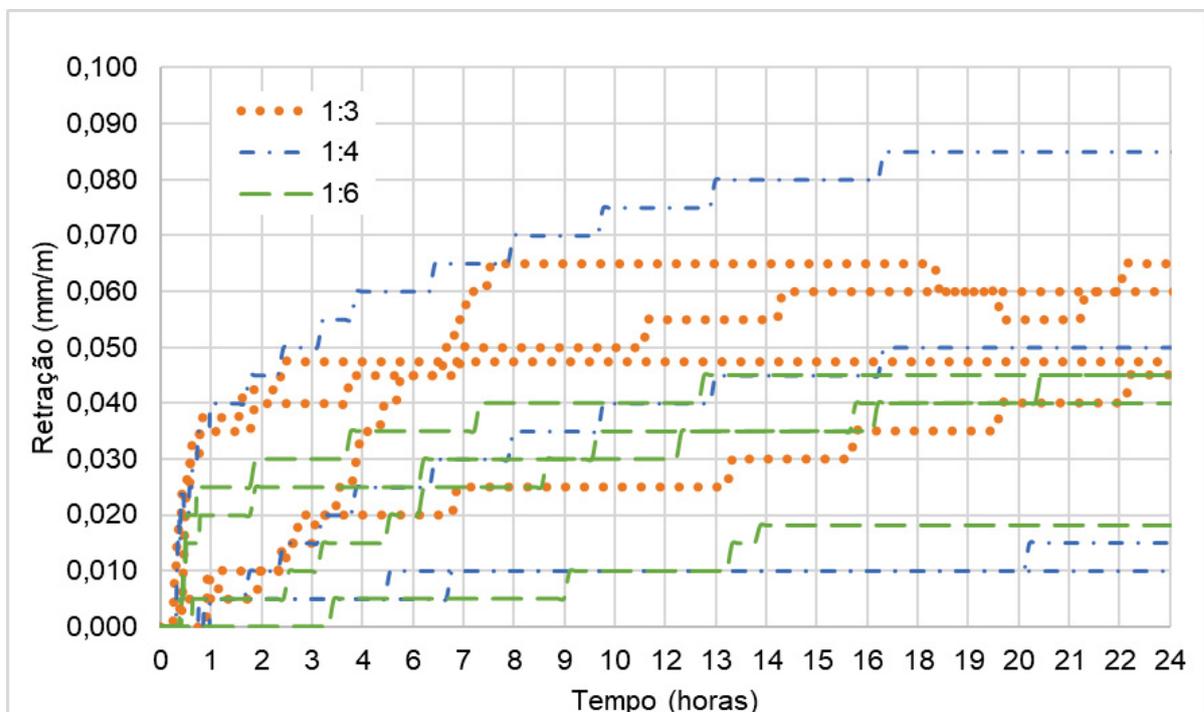
FONTE: o autor (2021).

A análise de variância (TABELA 21) confirmou uma influência inversamente proporcional entre a concentração de cimento e a perda de massa. Isso sugere que uma maior quantidade de cimento consome mais a água disponível da mistura, sugerindo uma maior hidratação, conseqüentemente uma maior retração química. Ao mesmo tempo, ocorre a saída de água de canais mais finos quando o teor de aglomerantes é maior, o que causa maior retração.

4.2.2.2 Argamassas de cimento seladas com filme de PVC

Os ensaios selados foram marcados por retrações de baixa magnitude (máximo de 0,085mm/m) e comportamentos de curvas de baixa dispersão entre os traços. O GRÁFICO 13 apresenta as curvas de retração obtidas para os ensaios selados.

GRÁFICO 13 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS COM FILME PVC



FONTE: o autor (2021).

A análise visual do gráfico não fornece uma diferenciação clara entre o comportamento dos traços e essa observação é confirmada pela análise de variância da influência do traço sobre a retração máxima nos ensaios selados, que resultou em não significativa (TABELA 22).

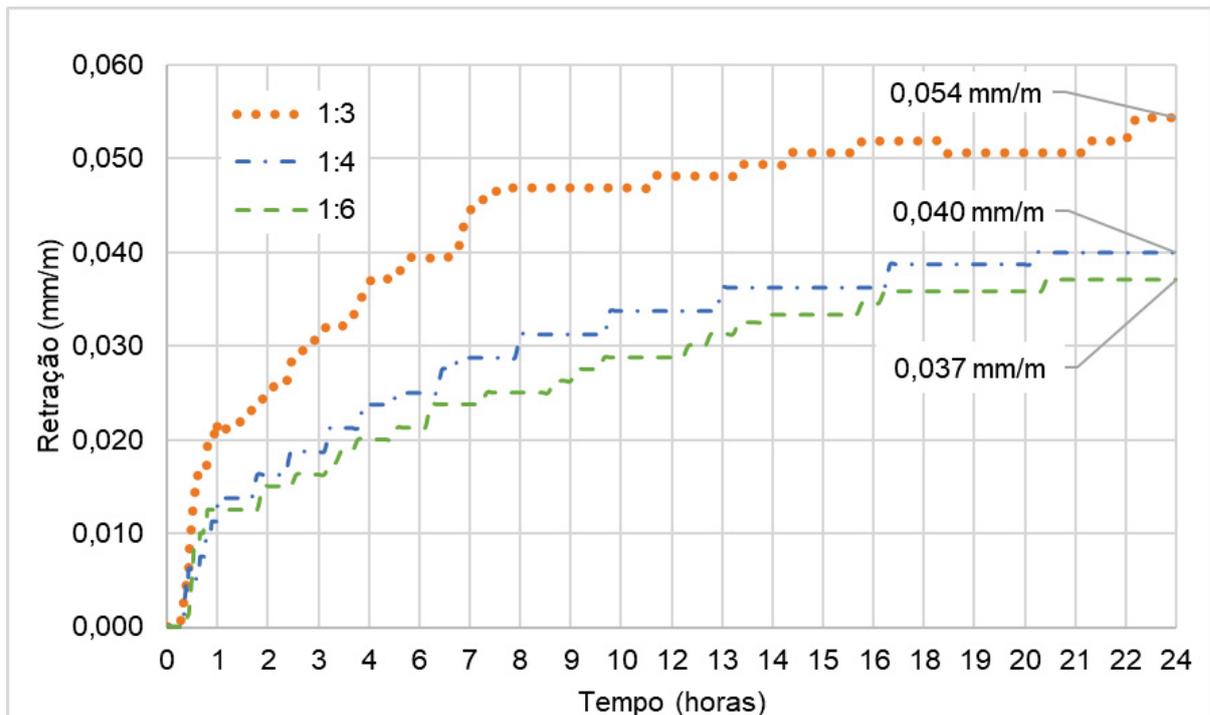
TABELA 22 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DO TRAÇO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO AR SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA

Fonte	$F_{\text{calculado}}$	F_{tab}	Valor-P	Conclusão
Variação de traço	0,701	4,267	0,521	Não Significativo

Fonte: o autor (2021).

Apesar da insignificância estatística, pode-se observar visualmente uma pequena diferença entre as curvas médias de cada traço selado (GRÁFICO 14).

GRÁFICO 14 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIAS DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS POR FILME PVC DIVIDIDAS POR TRAÇO



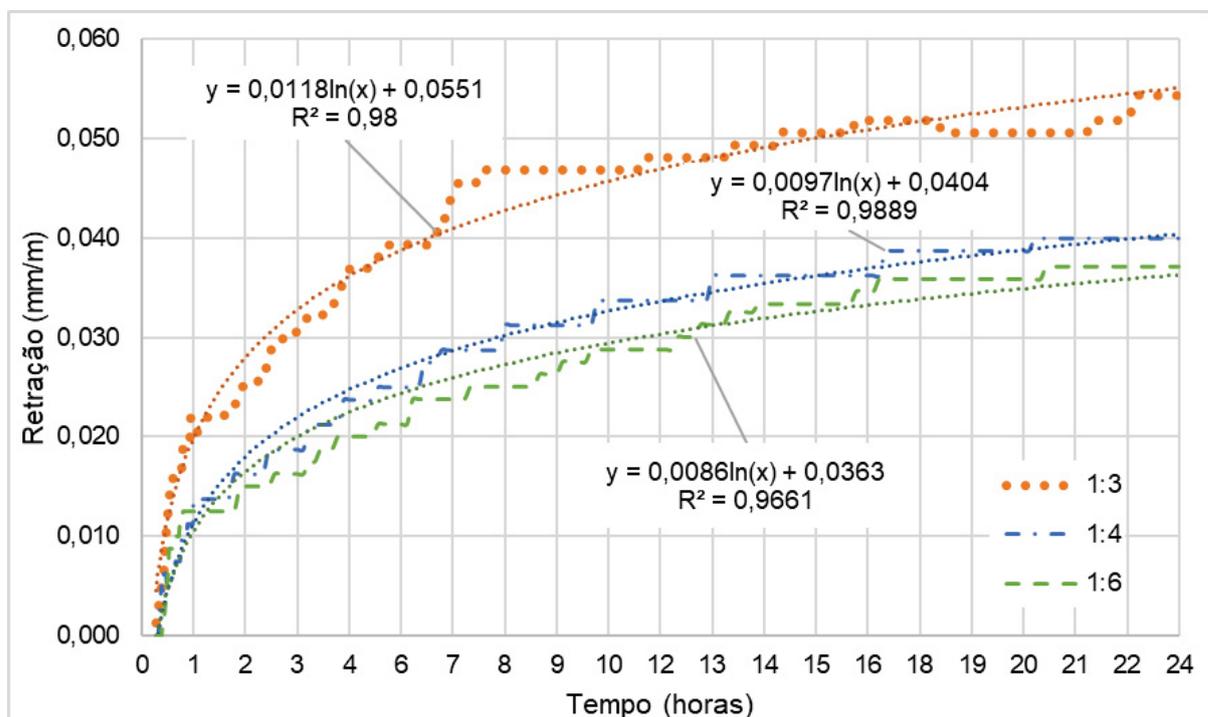
FONTE: o autor (2021).

A falta de consistência nos resultados pode ter várias causas. Uma delas pode ser atribuída ao fato de que nove dos quatorze corpos de prova, 64%, que foram estudados selados não apresentaram deslocamento em um dos relógios, e dois deles, 14%, não apresentaram deslocamento algum. Isso pode indicar uma falha na capacidade do método proposto em detectar retrações de baixa magnitude.

O comportamento das curvas médias de retração para a condição selada apresentou um padrão destoante do encontrado nas demais condições de exposição. Portanto, o estudo da velocidade de retração não utilizou o mesmo método de correlação linear, mas sim uma correlação logarítmica com toda a série de dados da curva de retração média de cada traço (GRÁFICO 15). Tendo em vista a variabilidade de resultados e tendência das curvas, a indicação dos três estágios de retração foi impossibilitada. Caso fosse utilizado o mesmo método, a retração ocorrida no início, que é a maior, seria ignorada e haveria uma baixa correlação linear. Portanto,

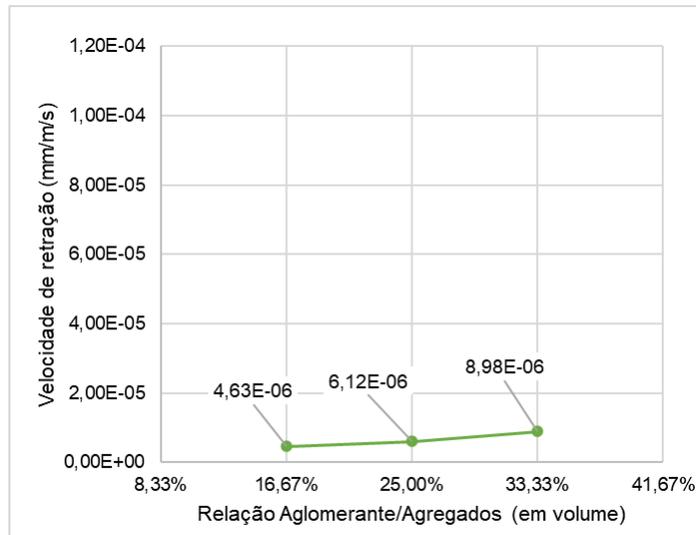
utilizando o momento em que o registro de retração começa, que seria, devido à natureza matemática da curva logarítmica, o momento de maior velocidade de retração, constatou-se: uma velocidade de retração média para o traço 1:3 de $8,98E-06$ mm/m/s, 47% maior do que a do traço 1:4 ($6,12E-06$ mm/m/s), e 94% maior que do traço 1:6 ($4,63E-06$ mm/m/s). Essas velocidades e sua comparação com a concentração de aglomerantes podem ser observadas no GRÁFICO 16.

GRÁFICO 15 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS COM FILME PVC E SUAS CURVAS DE TENDÊNCIA LOGARÍTMICAS



FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 16 – COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA E RELAÇÃO ALGOMERANTE/AGREGADO PARA ARGAMASSAS DE CIMENTO SELADAS POR FILME PVC



NOTA: escala vertical adotada igual à escala do gráfico com o maior valor.

FONTE: o autor (2021).

A análise de variância sobre a relação dos traços e a perda de massa (TABELA 23) se manteve consistente com o encontrado nos ensaios expostos ao ar: quanto maior a concentração de cimento, menor é a perda de massa após 24 horas. O traço 1:3 perdeu 3,05%, em média, da sua massa; o traço 1:4 perdeu 3,89%; e o traço 1:6 perdeu 5,09%. Isso corresponderia a uma perda de massa 76,16% menor, em média, do que a registrada no traço exposto ao ar, o que indica que a cobertura de PVC diminui drasticamente a evaporação durante as primeiras 24 horas de hidratação.

TABELA 23 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO SELADA POR FILME PVC SOBRE A PERDA DE MASSA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS

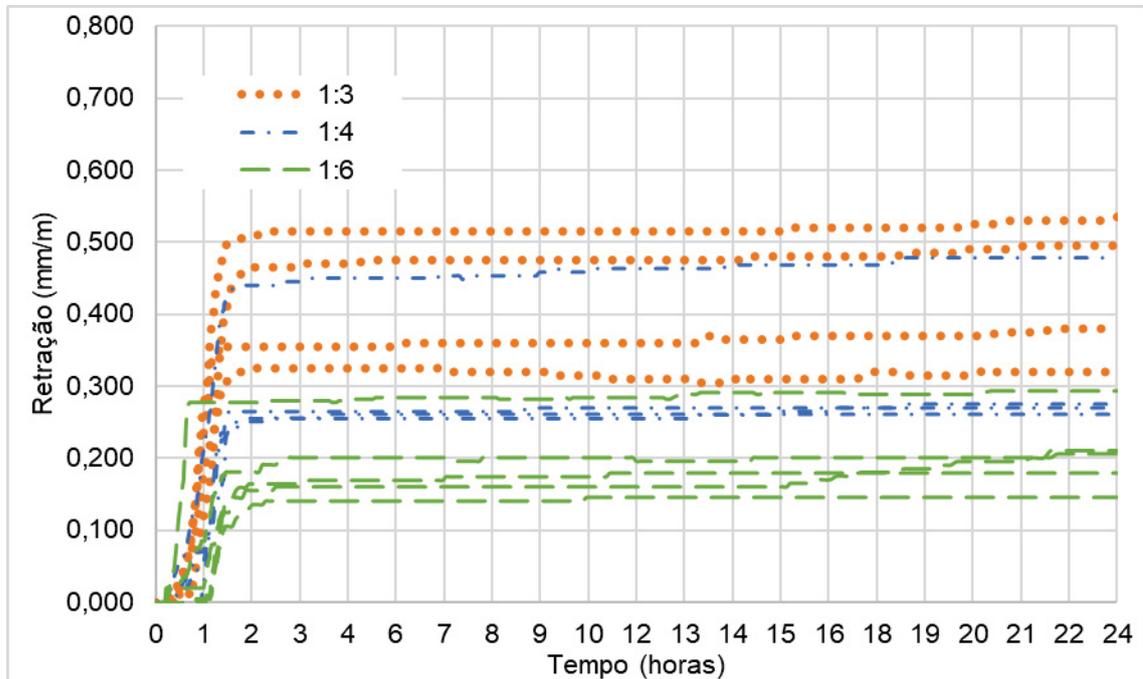
Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Varição de traço	13,229	4,256	0,002	Significativo

FONTE: o autor (2021).

4.2.2.3 Argamassas de cimento expostas ao vento

As curvas de retração dos traços de argamassa de cimento, expostas ao vento de 5 m/s, foram marcadas por um crescimento abrupto inicial seguido por uma estagnação também abrupta (GRÁFICO 17).

GRÁFICO 17 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO DE 5m/s



FONTE: o autor (2021).

Assim como as argamassas expostas ao ar, as argamassas expostas ao vento também apresentaram uma resposta significativa na retração máxima causada pela variação do traço (TABELA 24), ou seja, pelo teor de cimento.

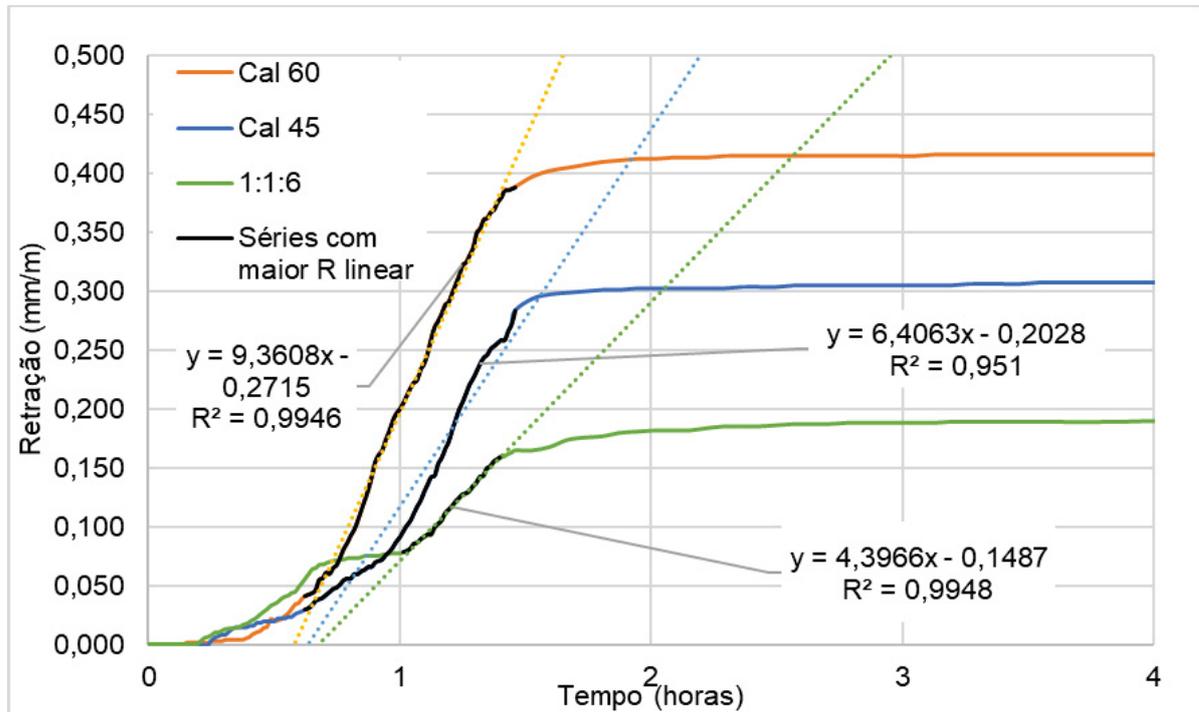
TABELA 24 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DO TRAÇO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO DE 5m/s SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA

Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Varição de traço	10,790	4,103	0,003	Significativo

Fonte: o autor (2021).

A velocidade de retração média dentro do estágio intermediário, para os traços expostos ao vento de 5 m/s, resultou em 1,08E-4 mm/m/s para o traço 1:3, 46% maior do que a do traço 1:4 (7,41E-5 mm/m/s) e 113% maior do que a do traço 1:6 (5,09E-5 mm/m/s).

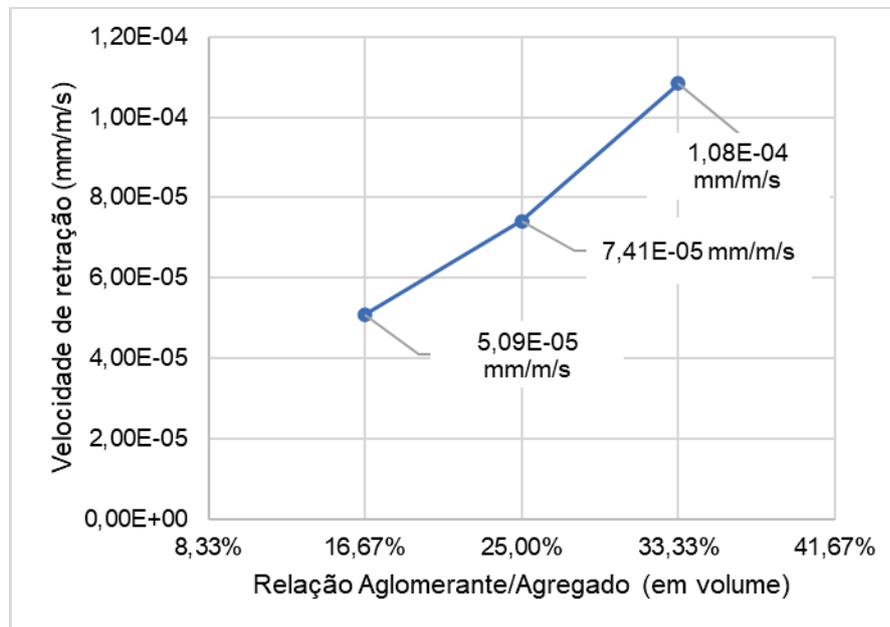
GRÁFICO 18 – CURVAS MÉDIAS DE RETRAÇÃO INICIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO DE 5m/s E SUAS SÉRIES SELECIONADAS PARA O CÁLCULO DE VELOCIDADE



NOTA: escala do tempo do gráfico utilizada em 4 horas para melhorar a visualização das séries selecionadas para o cálculo da inclinação do estágio intermediário. Linhas pontilhadas representam a linha de tendência linear retirada da série com maior R linear dentro do estágio intermediário. FONTE: o autor (2021).

A relação entre as velocidades de retração média para o período intermediário dos traços expostos ao vento pode ser observada no GRÁFICO 19.

GRÁFICO 19 – COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA E RELAÇÃO ALGOMERANTE/AGREGADO PARA ARGAMASSAS DE CIMENTO EXPOSTAS AO VENTO DE 5m/s



FONTE: o autor (2021).

A perda de massa registrada após as primeiras 24 horas para os traços expostos ao vento também resultou em significativa variação em função do traço (TABELA 25). Novamente, a maior evaporação encontrada foi no traço 1:6 (24,68% em média), a intermediária no traço 1:4 (19,71%), e a menor no traço com a maior concentração de cimento, o 1:3 (16,7%).

TABELA 25 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTA AO VENTO 5m/s SOBRE A PERDA DE MASSA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS

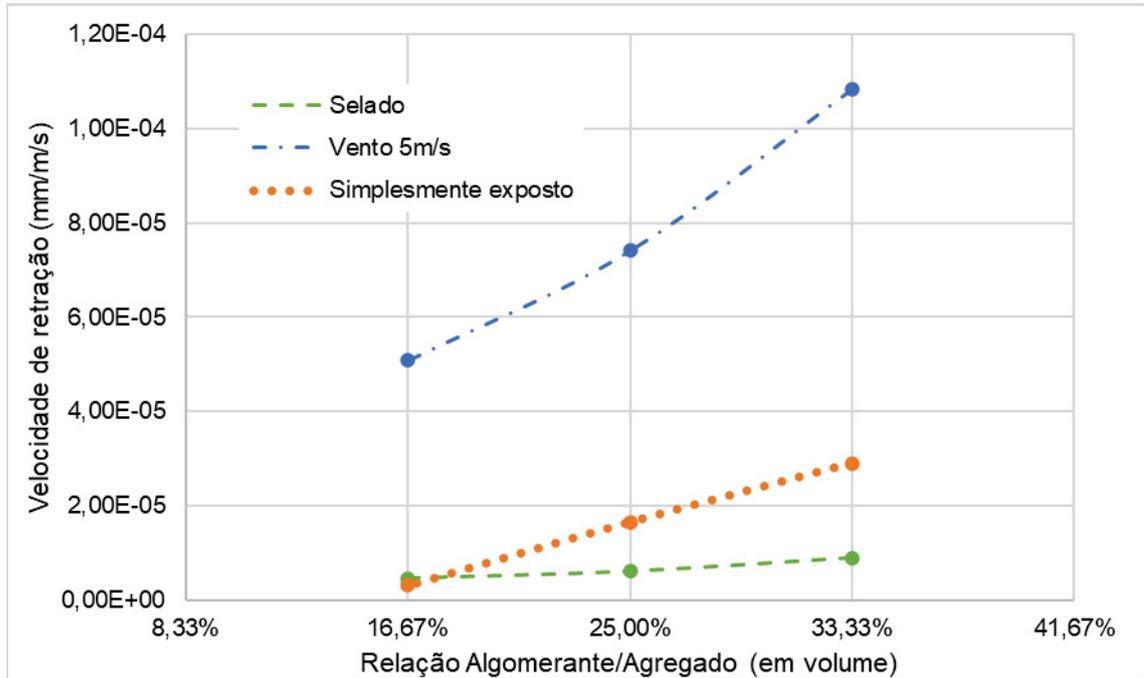
Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Varição de traço	72,070	4,102	0,000	Significativo

FONTE: o autor (2021).

4.2.2.4 Comparação entre exposições para cada argamassa de cimento

O GRÁFICO 20 apresenta a comparação entre as velocidades de retração média das argamassas de cimento no período intermediário, separadas pelas diferentes exposições empregadas nos ensaios e as diferentes relações aglomerante/agregados.

GRÁFICO 20 – VELOCIDADES DE RETRAÇÃO INICIAL MÉDIA DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO DIANTE DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÕES AO AR



FONTE: o autor (2021).

Pode-se observar uma tendência em relação ao aumento da velocidade de retração em função de uma condição mais intensa de exposição ao ar. Também nota-se que a diferença de magnitude da velocidade entre os traços com diferentes relações aglomerante/agregado é intensificada pela maior intensidade de exposição ao ar, visto que as curvas se tornam mais inclinadas em função dessa exposição.

A análise de variância para o efeito das diferentes exposições sobre a retração máxima registrada nas argamassas de cimento obteve significância em todos os traços (TABELA 26).

TABELA 26 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA REGISTRADA NOS DIFERENTES TRAÇOS DE ARGAMASSA DE CIMENTO

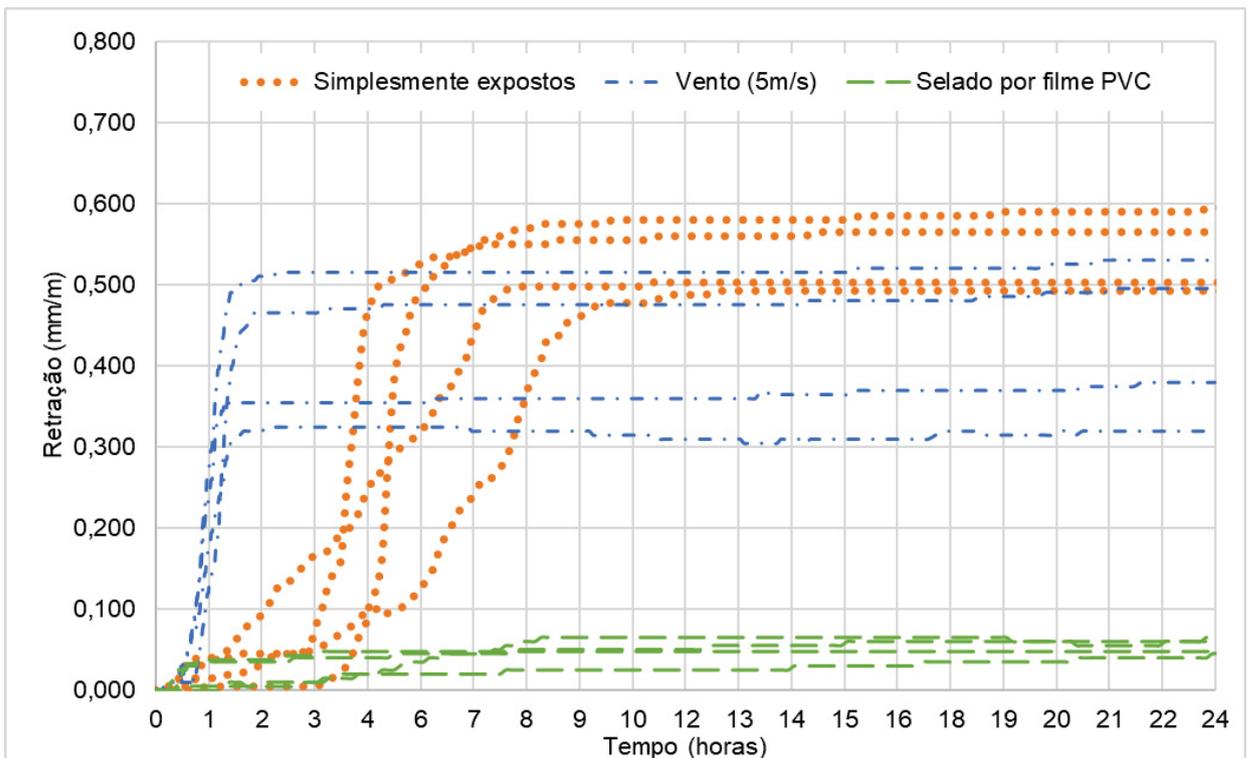
Traço analisado	Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
1:3	Exposição	64,525	4,256	0,000	Significativo
1:4	Exposição	17,316	4,256	0,001	Significativo
1:6	Exposição	36,886	4,256	0,000	Significativo

FONTE: o autor (2021).

No entanto, esperava-se que a retração máxima obtida na exposição ao vento fosse consistentemente maior do que a retração na exposição ao ar em todos os

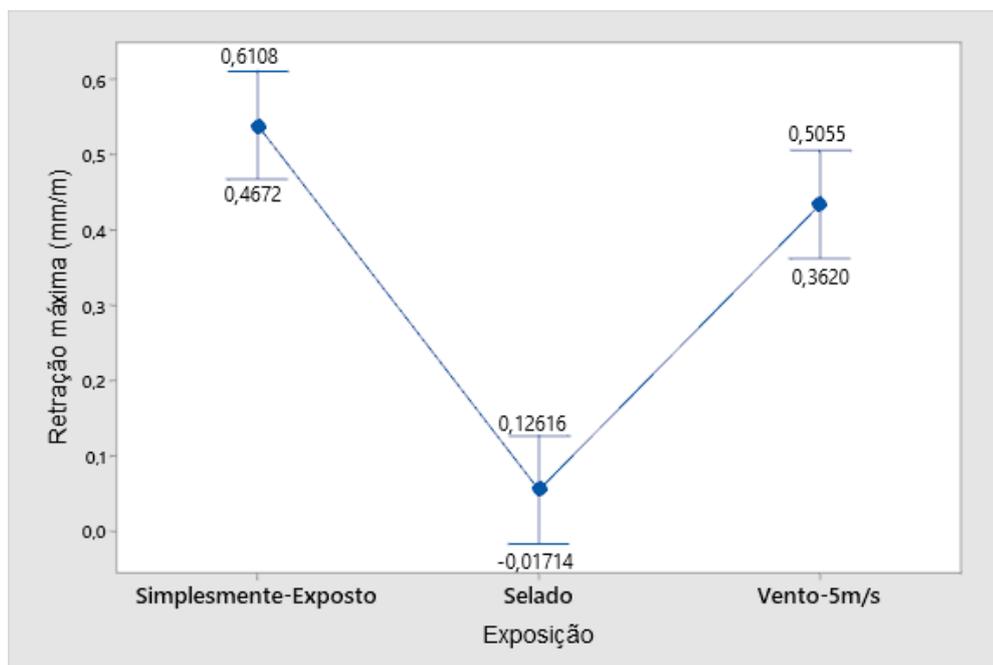
traços. Porém, não foi o caso. A retração máxima ocorrida ao vento para o traço 1:3 foi 21,04% menor, em média, do que a exposta ao ar. Enquanto isso, a retração máxima registrada selada foi 89,62% menor, em média, do que a exposta ao ar. O GRÁFICO 21 e o GRÁFICO 22 apresentam os resultados da retração para o traço 1:3 diante das diferentes condições de exposição.

GRÁFICO 21 – CURVAS DE RETRAÇÃO INICIAL DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:3 DIANTE DA VARIAÇÃO DAS DIFERENTES EXPOSIÇÕES AO AR



FONTE: o autor (2021).

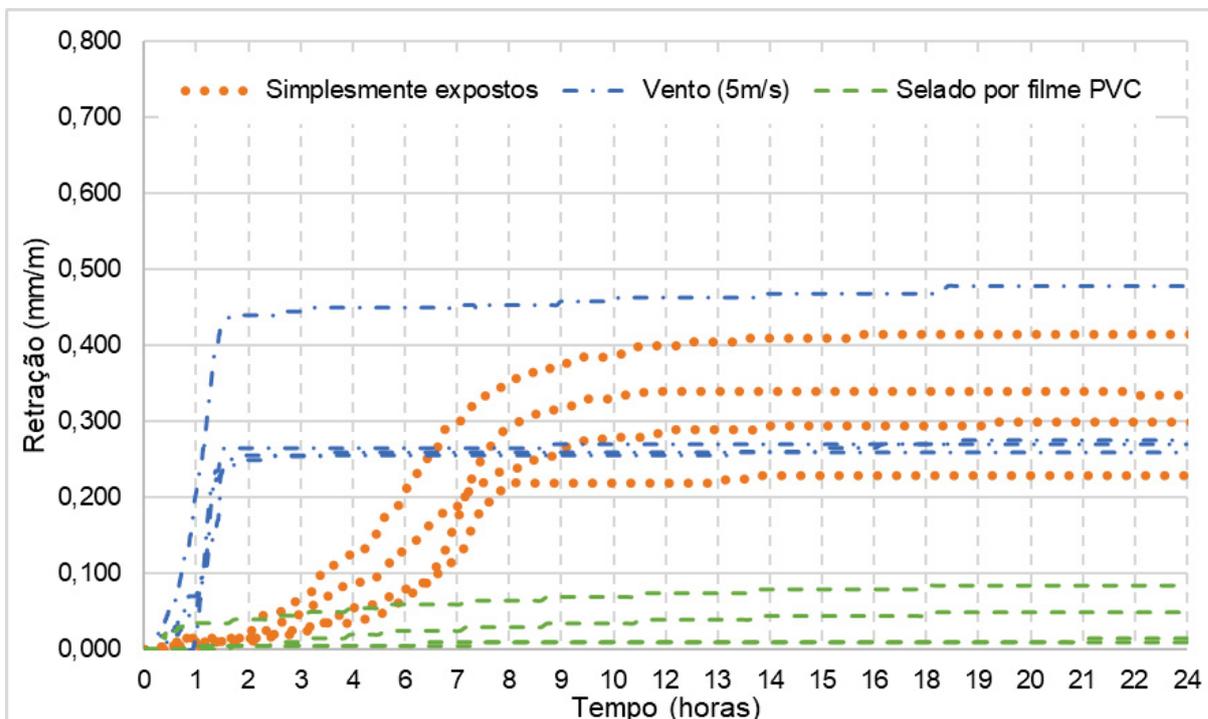
GRÁFICO 22 – INTERVALOS DE CONFIANÇA DE MÉDIAS DA RETRAÇÃO MÁXIMA DO TRAÇO 1:3 EM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO



FONTE: o autor (2021).

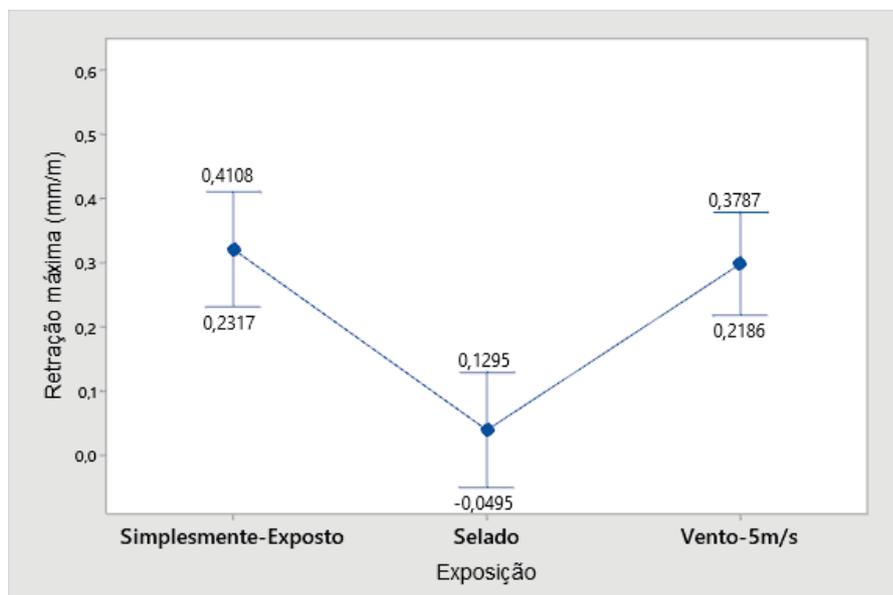
Diferentemente, o traço 1:4 registrou retrações médias dos corpos de prova expostos ao vento 0,14% maior do que os expostos ao ar; e os corpos de prova selados 87,55% menor. O GRÁFICO 23 e o GRÁFICO 24 apresentam, respectivamente: as curvas de retração do traço 1:4 diante das diferentes condições de exposição e os intervalos de confiança para as retrações médias deste traço.

GRÁFICO 23 – CURVAS DE RETRAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:4 DIANTE DA VARIAÇÃO DAS DIFERENTES EXPOSIÇÕES AO AR



FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 24 – INTERVALOS DA RETRAÇÃO MÁXIMA EM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO PARA O TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:4

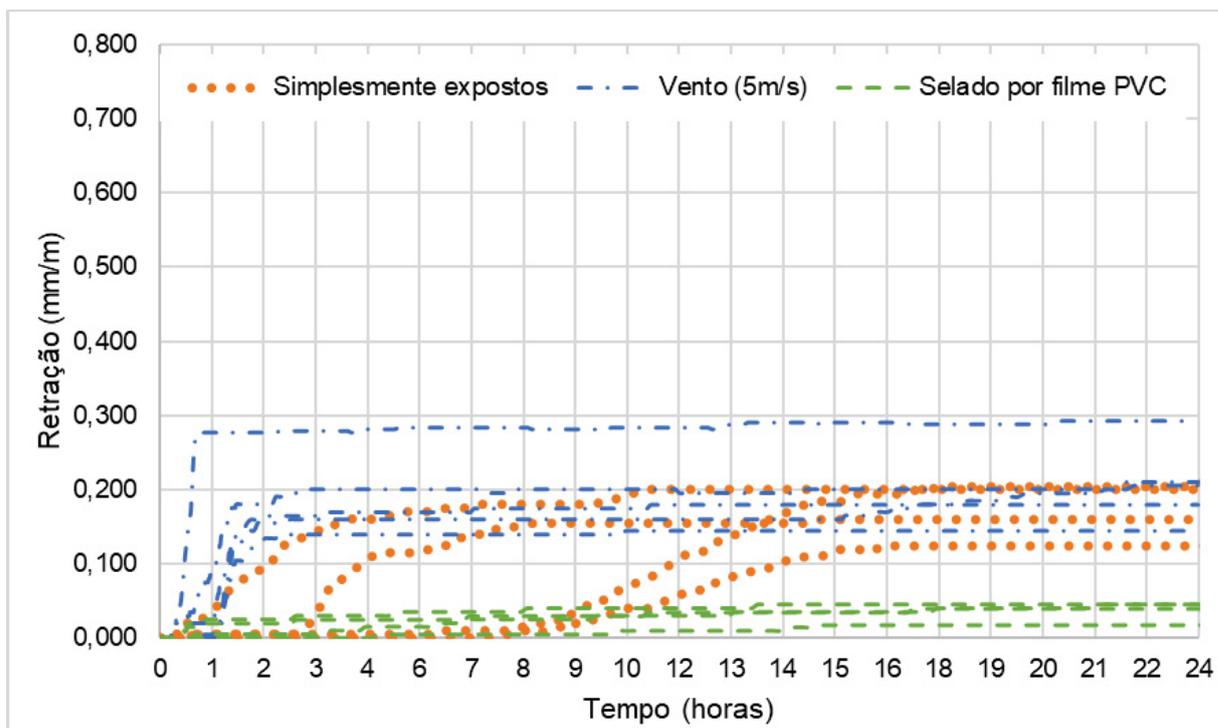


FONTE: o autor (2021).

O traço 1:6 obteve média de retração máxima dos corpos de prova expostos ao vento superior aos expostos ao ar, mas apenas marginalmente (2,88%). Os

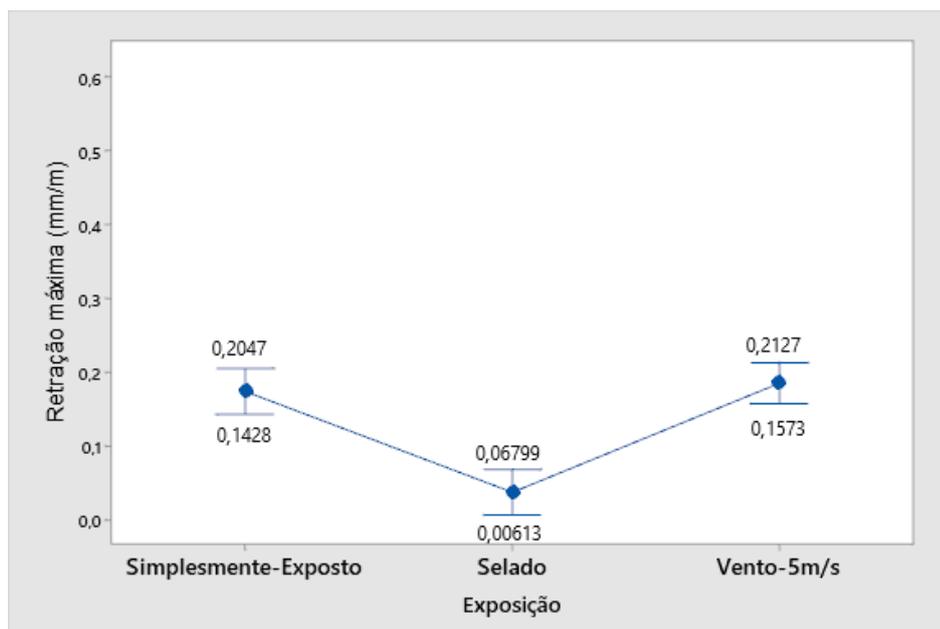
selados para esse traço tiveram médias de retração máxima 78,76% menores do que os expostos ao ar. O GRÁFICO 25 e GRÁFICO 26 expõem os resultados do traço 1:6 em relação à retração de diferentes exposições.

GRÁFICO 25 – CURVAS DE RETRAÇÃO DO TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:6 DIANTE DA VARIACÃO DAS DIFERENTES EXPOSIÇÕES AO AR



FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 26 – INTERVALOS DA RETRAÇÃO MÁXIMA EM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DE EXPOSIÇÃO PARA O TRAÇO DE ARGAMASSA DE CIMENTO 1:6



FONTE: o autor (2021).

Destarte, pode-se afirmar que o maior impacto observado na variação de exposição ao ar foram dois aspectos.

Primeiro, a diminuição da magnitude da retração máxima para os ensaios selados com filme PVC quando comparados aos expostos ao ar (uma redução em média de: 89,91% para o traço 1:3; 87,55% para o 1:4; e 78,81% para o 1:6). Isso indica, como esperado, que a menor perda de água por evaporação reduz drasticamente a retração inicial – o que mostra a grande contribuição da retração por secagem (por evaporação) para a retração inicial. Porém, a retração registrada na condição selada não foi nula, possivelmente acusando a capacidade do ensaio em registrar a contribuição dos outros tipos de retração além da de secagem.

Segundo, nota-se a expressiva diferença entre o comportamento das curvas de retração dos corpos de prova expostos ao vento quando comparado com o comportamento dos corpos expostos ao ar. É visualmente evidente que o vento faz com que o aumento da retração se inicie mais cedo e mais rápido, por isso a aparência mais “íngreme” da curva no estágio inicial. A comparação entre essas duas exposições em relação ao tempo médio em que a retração atinge 10% e 90% da retração máxima (T10 e T90) pode ser observada na TABELA 27.

TABELA 27 – TEMPOS MÉDIOS T10 E T90 DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO PARA AS EXPOSIÇÕES AO VENTO (5m/s) E AO AR.

Tipo de tempo	Traço	Simplesmente Exposto	Vento (5m/s)
T90	1:3	06:43:08	01:32:03
	1:4	08:55:26	02:07:25
	1:6	10:31:47	01:54:42
T10	1:3	02:48:38	00:44:00
	1:4	03:13:30	00:37:51
	1:6	05:28:28	01:02:06

FONTE: o autor (2021).

A análise de variância, que resultou em “significativo” para a influência da exposição (vento e exposto ao ar) sobre os tempos T10 e T90, pode ser observada na TABELA 28.

TABELA 28 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR SOBRE O T90 E O T10 DOS DIFERENTES TRAÇOS DE ARGAMASSA DE CIMENTO

Tipo de Tempo	Traço analisado	Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
T90	1:3	Exposição	22,955	5,987	0,003	Significativo
	1:4	Exposição	195,554	5,987	0,000	Significativo
	1:6	Exposição	14,126	5,591	0,007	Significativo
T10	1:3	Exposição	9,624	5,987	0,021	Significativo
	1:4	Exposição	64,433	5,987	0,000	Significativo
	1:6	Exposição	5,880	5,591	0,046	Significativo

FONTE: o autor (2021).

O resultado inesperado da retração máxima da argamassa exposta ao vento ser menor ou apenas marginalmente maior do que a exposta ao ar, pode ser explicada pela perda de água precoce. Como o vento acelera a perda de água por evaporação, é provável que mais tarde, nas primeiras 24 horas, as argamassas expostas ao vento disponham de menos água para hidratação do que as expostas ao ar, o que poderia minimizar o impacto da contribuição da hidratação para a retração total, como a retração química. Outras velocidades de vento menores possivelmente inclinarão menos as curvas de retração e produzirão diferentes magnitudes de retração inicial.

A TABELA 29 apresenta uma comparação das perdas de massa ao final das primeiras 24 horas de hidratação. Pode-se observar a capacidade das concentrações mais altas de cimento em conter a água, além da evaporação significativamente maior

das condições exposta ao ar e exposta ao vento quando comparadas com a selada por filme PVC.

TABELA 29 – COMPARAÇÃO DE PERDAS DE MASSA MÉDIAS APÓS 24 HORAS DE HIDRATAÇÃO

Exposição	1:3	1:4	1:6
Selado por filme PVC	3,0%	3,9%	5,1%
Simplemente exposto ao ar	14,5%	16,2%	19,2%
Vento (5m/s)	16,7%	19,7%	22,8%

FONTE: o autor (2021).

4.2.3 Tabulação de resultados da retração inicial

A TABELA 30 expõe os resultados mais relevantes da retração inicial obtidos pelo método proposto para os dois tipos de argamassas utilizadas.

TABELA 30 – RESUMO DOS RESULTADOS DA RETRAÇÃO INICIAL OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO

Argamassa	Exposição	Traço	Retração inicial máxima média (mm/m)	Perda de massa após 24h de hidratação (%)	T10 (h)	T90 (h)
Simples	Simplement e exposto ao ar	1:3	0,539	14,5	2:48	6:43
		1:4	0,321	16,2	3:13	8:55
		1:6	0,174	19,2	5:28	10:31
	Selado por filme PVC	1:3	0,054	3,0	0:42	7:04
		1:4	0,040	3,9	0:22	5:39
		1:6	0,037	5,1	0:08	8:42
	Vento 5m/s	1:3	0,434	16,7	0:44	1:32
		1:4	0,321	19,7	0:37	2:07
		1:6	0,185	24,5	1:02	1:54
Mista	Simplement e exposto ao ar	Cal 60	0,756	36,6	3:44	10:19
		Cal 45	0,447	31,8	4:15	10:38
		1:1:6	0,239	27,7	4:24	11:13

FONTE: o autor (2021).

4.3 RETRAÇÃO A LONGO PRAZO

Os próximos subitens apresentam os resultados obtidos para as retrações a longo prazo utilizando o método proposto pela NBR 15261 com a variação de dois aspectos: desmoldagem dos corpos de prova após 24 horas em vez de 48 horas

devido a restrições do cronograma dos ensaios propostos; e adoção de condições de cura inicial. As medidas foram feitas nas seguintes idades: 1, 7, 14, 21 e 28 dias.

4.3.1 Retração a longo prazo dos traços de argamassa mista

Os resultados da retração média a longo prazo dos corpos de prova de argamassas mistas foram superiores em todas as idades - 1, 7, 21 e 28 dias -, para o traço com menor concentração de cal, 1:1:6 (0,488mm/m, retração máxima média), e menor para o de maior concentração, Cal 60 (0,364mm/m). O resultado estatisticamente significativo da análise ANOVA sobre a influência da concentração de cal sobre a retração máxima a longo prazo pode ser observado na TABELA 31.

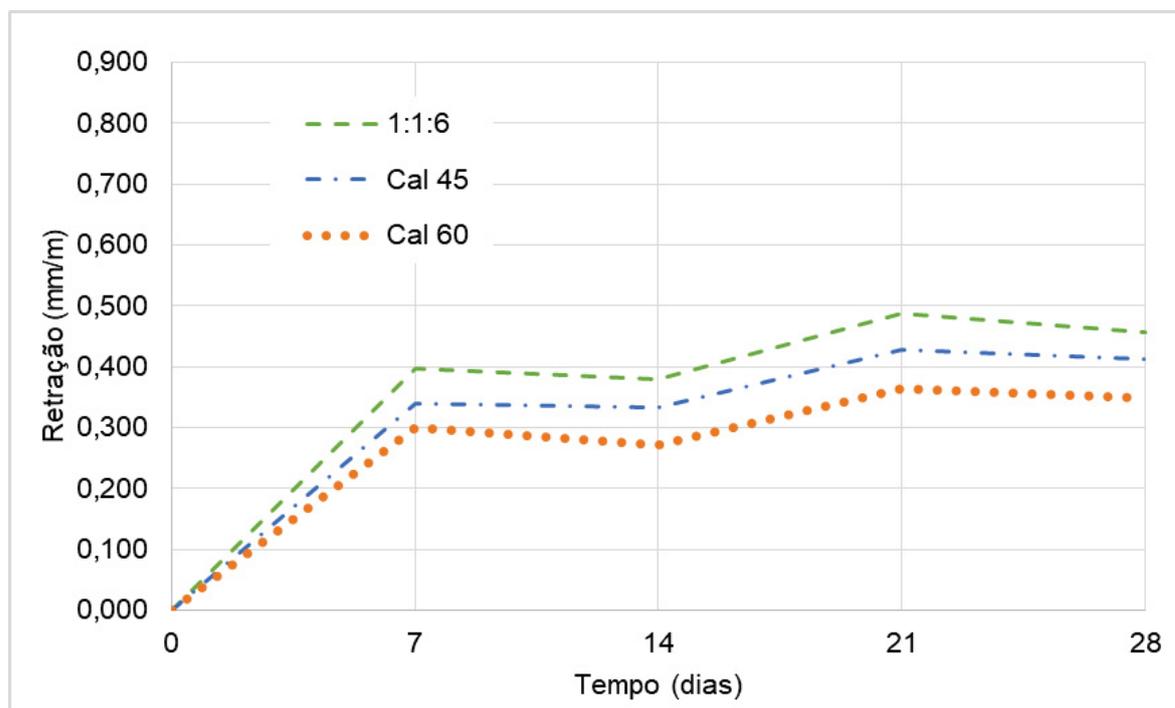
TABELA 31 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL SOBRE A RETRAÇÃO A LONGO PRAZO

Fonte	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Varição de traço	22,709	4,256	0,000	Significativo

FONTE: o autor (2021).

O GRÁFICO 27 apresenta a variação média da retração a longo prazo para os traços de argamassa mista estudados.

GRÁFICO 27 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA MISTA COM VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL



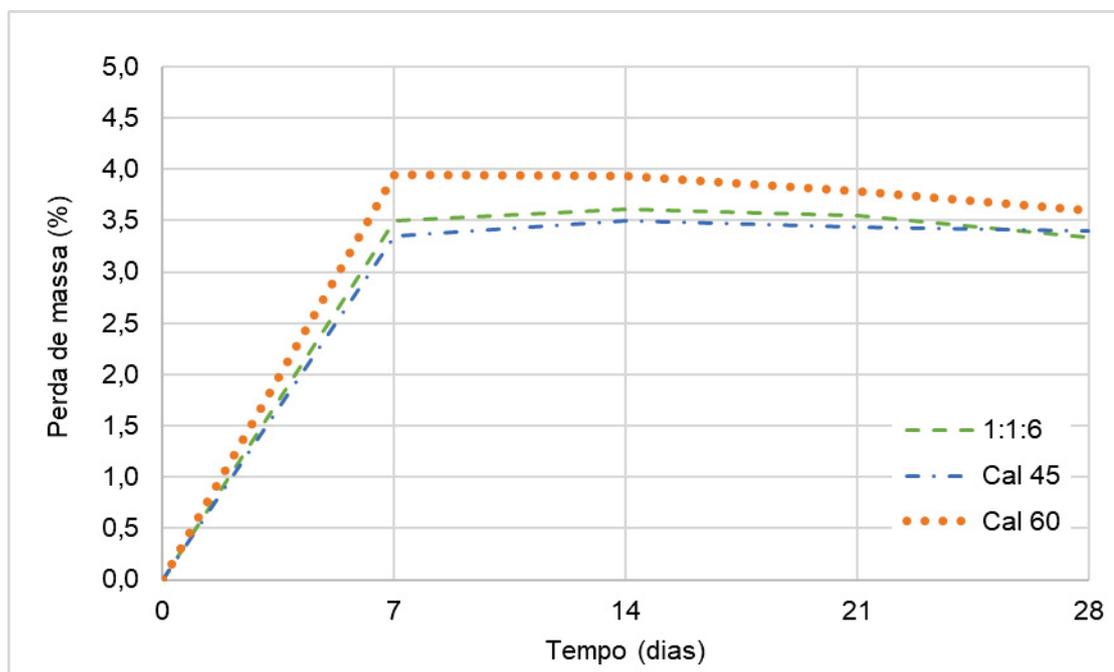
FONTE: o autor (2021).

Esperava-se que a retração a longo prazo seguisse o padrão da retração inicial: maior para os traços mais ricos em cal.

A influência da cal é maior na perda de água nas primeiras horas por conta da saída de água de canais mais finos. Com o tempo (dias), a argamassa fica mais rígida e esse mecanismo deixa de ter tanta influência. Assim como observado na evaporação do primeiro dia de hidratação (item 4.2.1), não foi encontrada influência significativa da variação de concentração de cal sobre a perda de massa a longo prazo nos traços de argamassa mista.

O GRÁFICO 28 apresenta a variação média da perda de massa dos corpos de prova de argamassa mista separada por traço. Pode-se notar uma declinação tardia das curvas a partir de 7 dias, o que significa ganho de massa. Isso pode ser sinal de carbonatação da cal, fenômeno que deve se acentuar em medidas em idades mais avançadas.

GRÁFICO 28 – PERDAS MÉDIAS DE MASSA A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA MISTA COM VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CAL



FONTE: o autor (2021).

4.3.2 Retração a longo prazo dos traços de argamassa de cimento

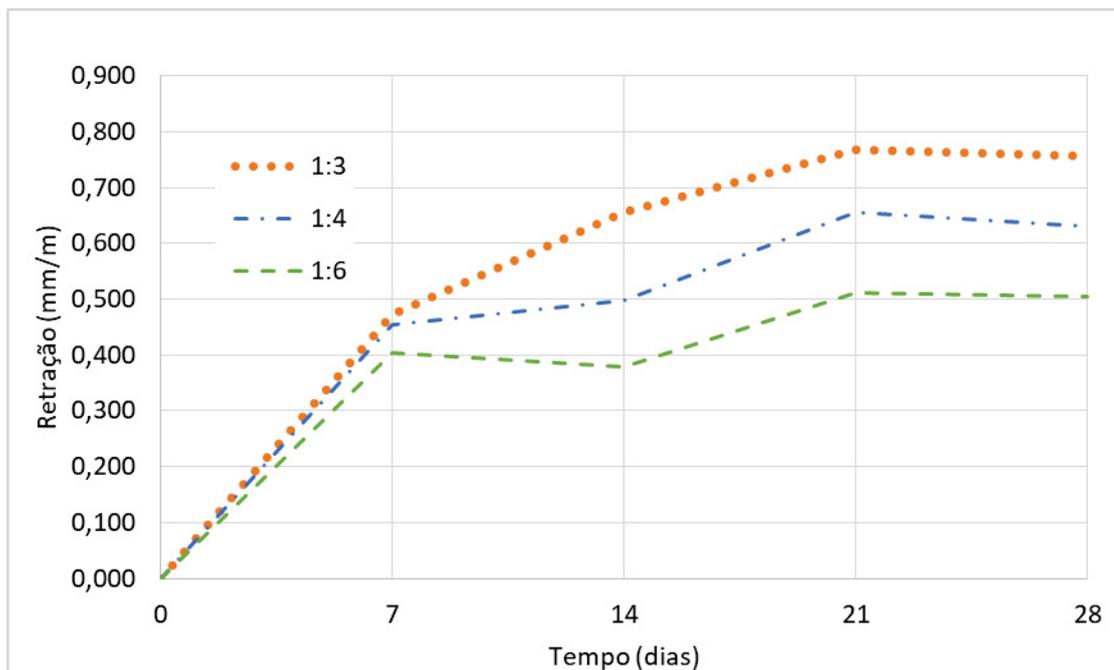
O GRÁFICO 29, o GRÁFICO 30 e o GRÁFICO 31 apresentam a variação da retração média a longo prazo nos três casos de exposição ao ar, diferenciando-se os traços. Apesar de em todos os gráficos a retração média a longo prazo ser maior para o traço 1:3 (0,722mm/m, retração máxima média), intermediária para o 1:4 (0,661mm/m), e menor para o 1:6 (0,550mm/m), a variação da concentração de aglomerante/agregados nos traços de argamassa de cimento foi significativamente influente sobre a retração máxima a longo prazo apenas no caso dos corpos de prova expostos ao ar (TABELA 32).

TABELA 32 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AGLOMERANTE/AGREGADOS SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA NAS EXPOSIÇÕES ADOTAS

Fonte	Exposição analisada	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Traço	Simplemente exposto	5,618	3,982	0,021	Significativo
	Selado	2,613	3,982	0,118	Não significativo
	Vento	0,365	3,982	0,701	Não significativo

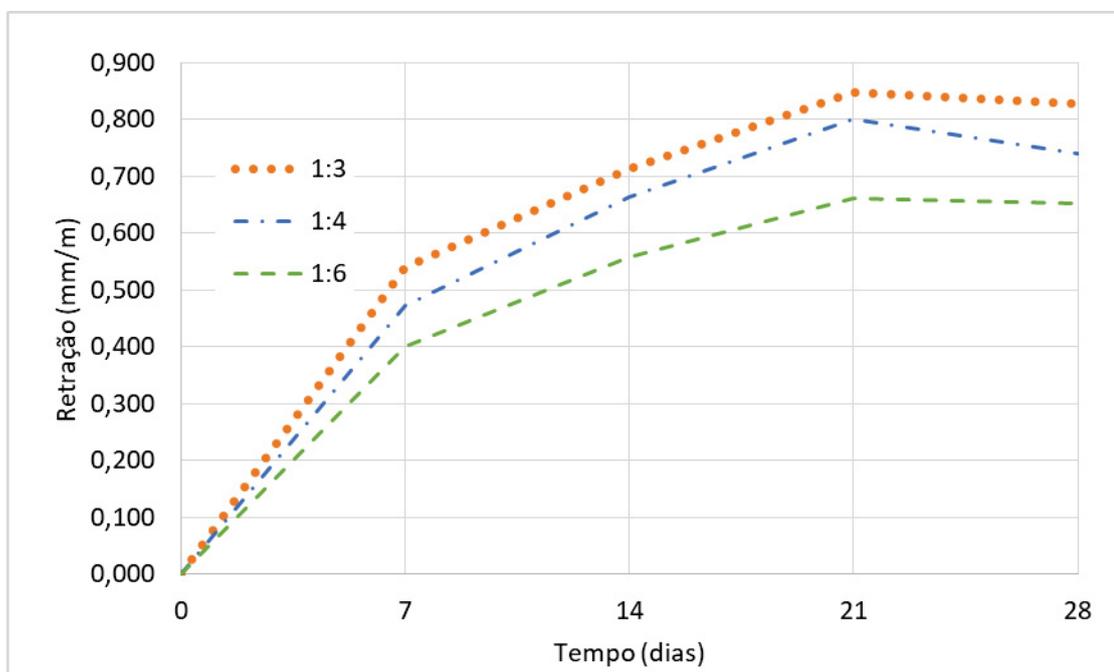
FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 29 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTOS AO AR



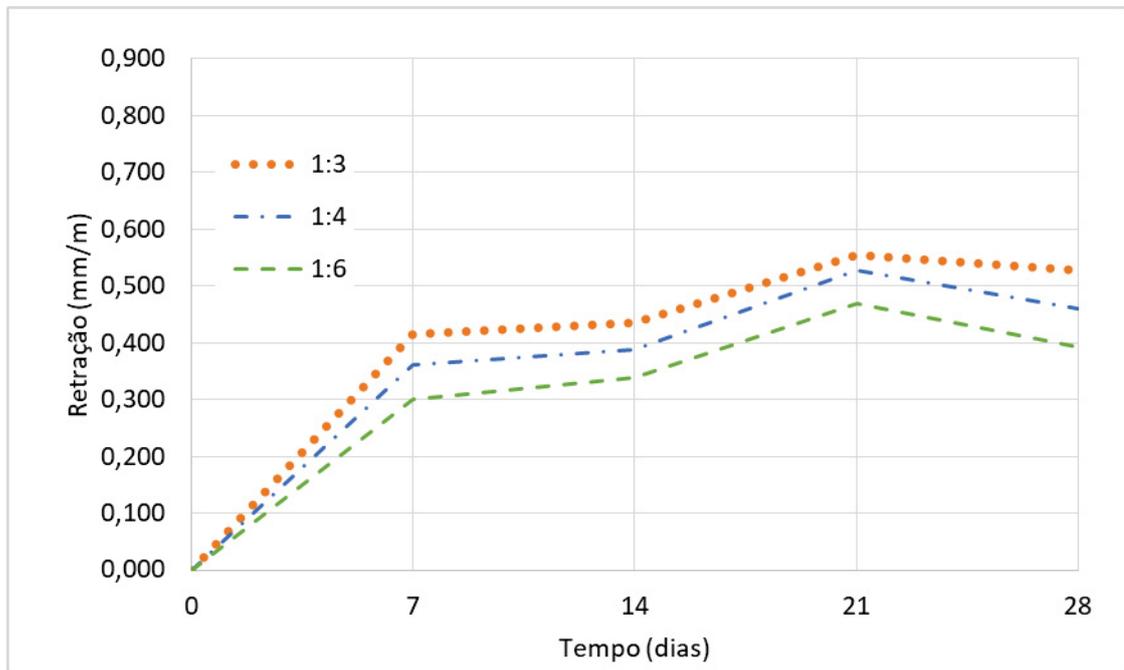
FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 30 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO SELADOS POR FILME PVC



FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 31 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTOS AO VENTO (5m/s)



FONTE: o autor (2021).

Observou-se pelos resultados que a retração a longo prazo foi maior para os corpos de prova selados (0,770mm/m, retração máxima média), intermediário para os expostos ao ar (0,648mm/m) e menor para os expostos ao vento (0,516mm/m). Utilizando a retração a longo prazo máxima média do traço de argamassa de cimento 1:6 exposto ao vento como base para comparação, foi montada a TABELA 33 para demonstrar a diferença da magnitude entre as retrações considerando traço e tipo de exposição.

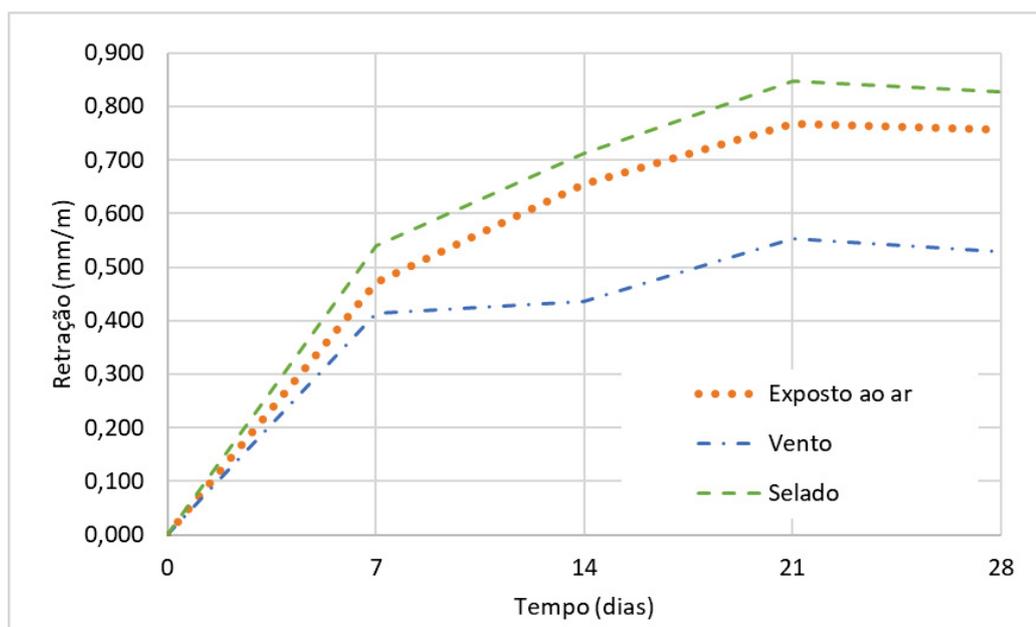
TABELA 33 – COMPARAÇÃO DA MAGNITUDE DA RETRAÇÃO MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO PARA AS DIFERENTES EXPOSIÇÕES ADOTAS

Exposição	Traço		
	1:3	1:4	1:6
Selado	81%	71%	41%
Simplesmente exposto	64%	40%	11%
Vento	17%	13%	0%

FONTE: o autor (2021).

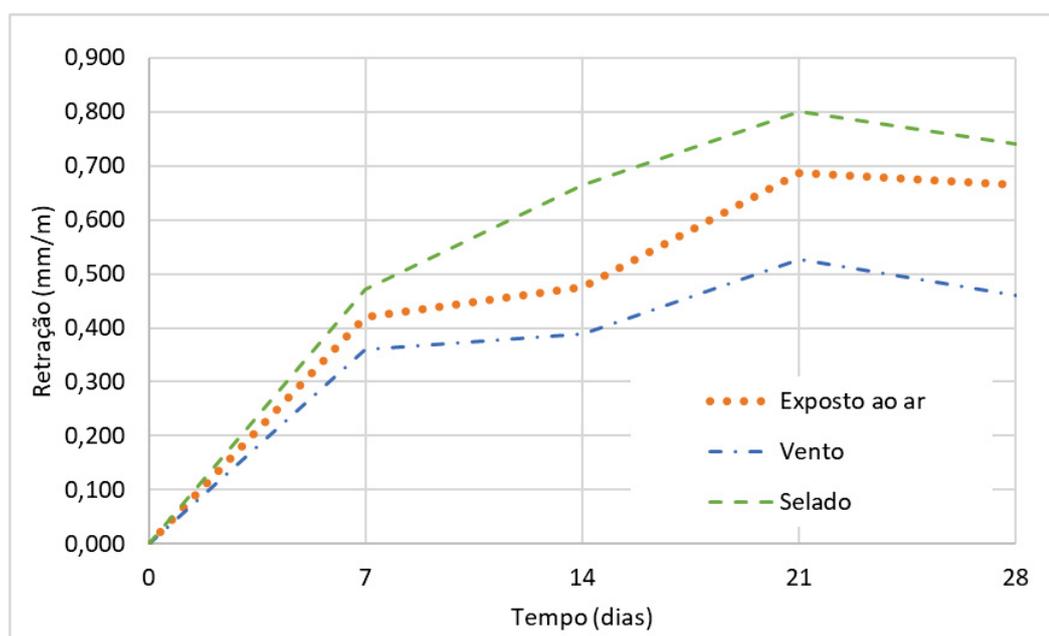
O GRÁFICO 32, o GRÁFICO 33 e o GRÁFICO 34 apresentam a variação da retração a longo prazo média para cada traço, separando os diferentes tipos de exposição.

GRÁFICO 32 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:3 COM VARIÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR



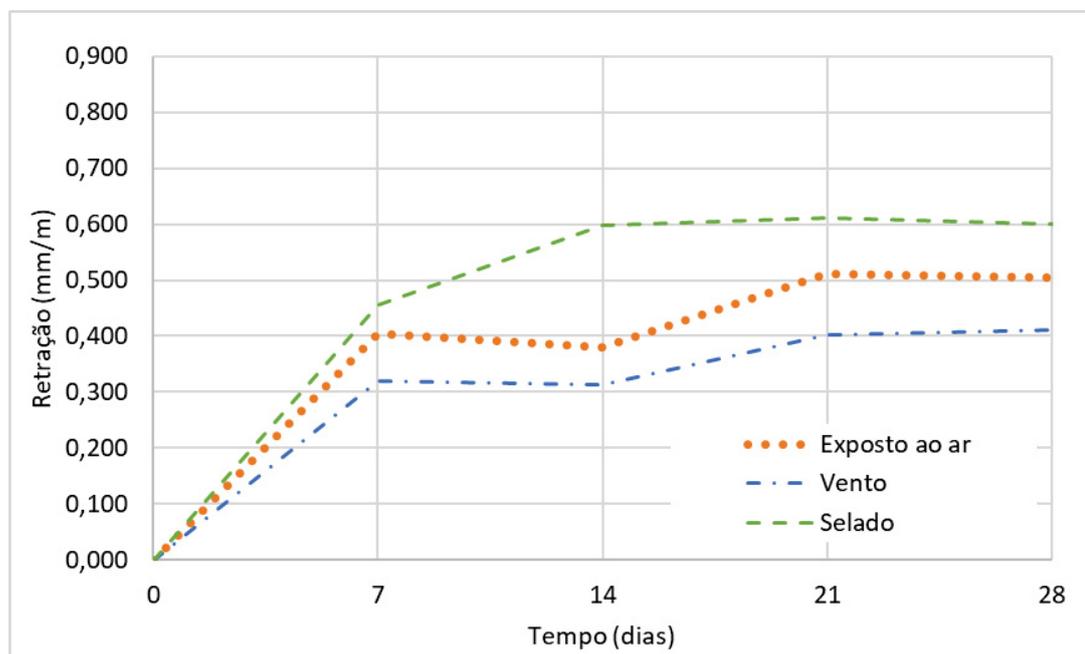
FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 33 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:4 COM VARIÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR



FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 34 – RETRAÇÕES MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:6 COM VARIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR



FONTE: o autor (2021).

Entende-se que o fato de o filme PVC ter minimizado a evaporação no primeiro dia de hidratação, ou seja, nas idades a longo prazo os corpos de prova que foram selados teriam mais água disponível do que os expostos ao ar e ao vento, os tornou mais suscetíveis a sofrer a retração por secagem que os outros já sofreram, resultando numa retração a longo prazo maior.

A influência estatisticamente significativa da exposição sobre a retração máxima média a longo prazo só não foi constatada para o traço 1:6 (TABELA 34). Acredita-se que isso ocorra devido à menor magnitude das retrações desse traço, o que diminui a dispersão das retrações (menores resultados de retração são mais próximos entre si) e dificulta a verificação da significância com o tamanho da amostra.

TABELA 34 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR ADOTADAS SOBRE A RETRAÇÃO MÁXIMA A LONGO PRAZO

Fonte	Traço analisado	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Exposição	1:3	9,879	3,982	0,006	Significativo
	1:4	5,065	3,982	0,019	Significativo
	1:6	3,402	3,982	0,074	Não significativo

FONTE: o autor (2021).

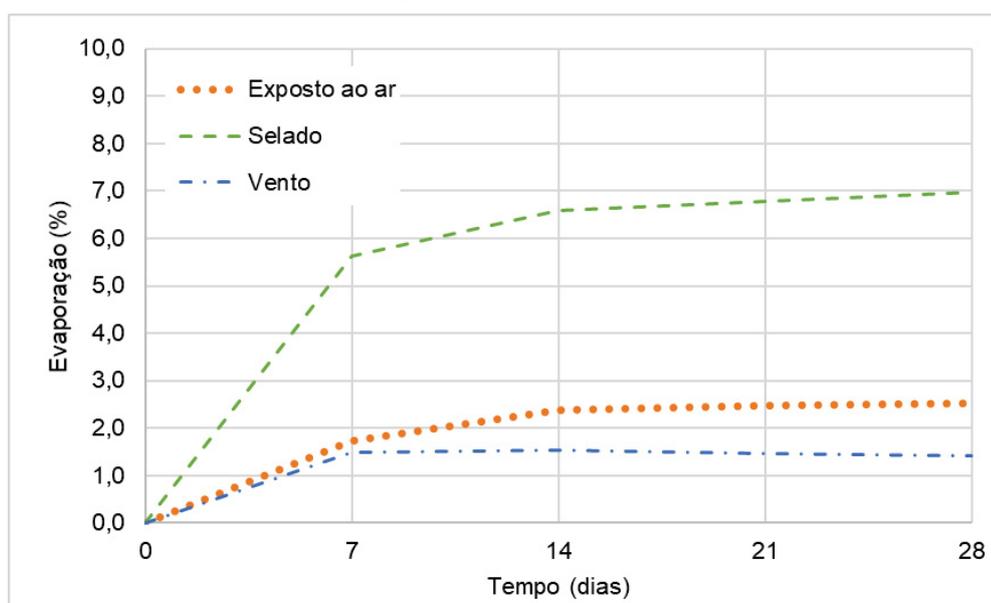
O comportamento da retração a longo prazo encontrado foi reafirmado pelos resultados da perda de massa máxima média a longo prazo, sendo que os corpos de prova selados apresentaram a maior porcentagem (7,76% em média para todos os traços), os expostos ao ar a intermediária (3,37%), e os expostos ao vento a menor (1,18%), como evidenciado pelo GRÁFICO 35, GRÁFICO 36 e GRÁFICO 37, assim como a TABELA 35, que apresenta os resultados significativos da análise estatística. Portanto, dentro da análise comparativa entre as exposições, os corpos de prova que apresentaram as maiores retrações a longo prazo foram também aqueles que perderam mais massa a longo prazo, possivelmente dando destaque para o papel da retração por secagem.

TABELA 35 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DAS EXPOSIÇÕES AO AR ADOTADAS SOBRE A PERDA DE MASSA MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO

Fonte	Traço analisado	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Exposição	1:3	476,58	3,982	0,000	Significativo
	1:4	388,38	3,982	0,000	Significativo
	1:6	176,40	3,982	0,000	Significativo

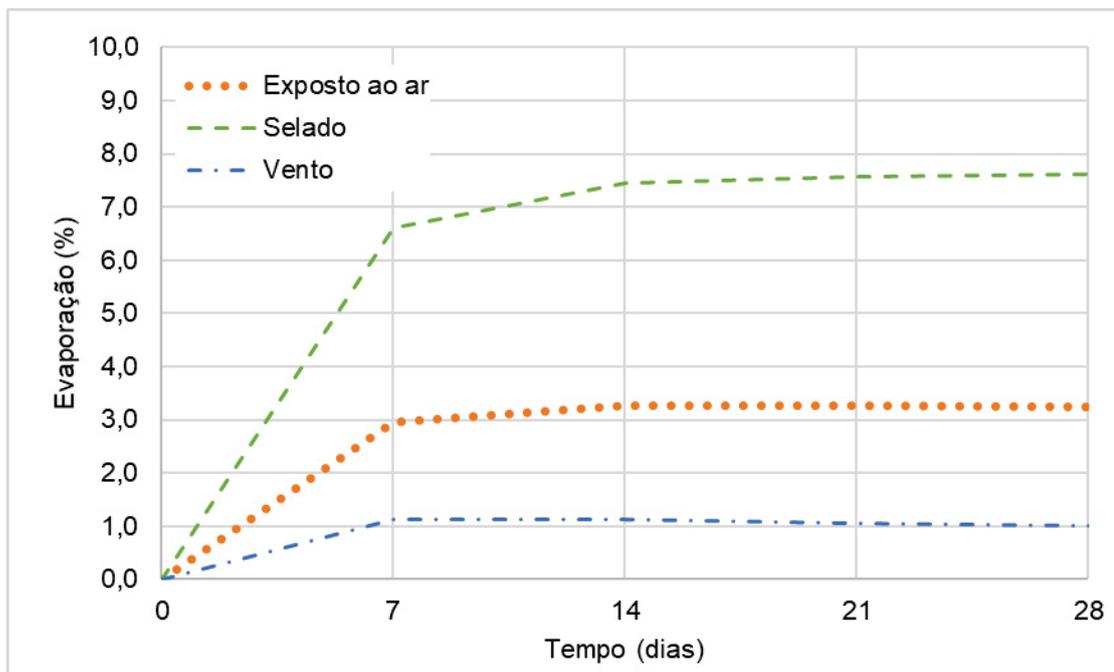
FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 35 – PERDA DE MASSA MÉDIA A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:3 COM VARIAÇÃO DO TIPO DE EXPOSIÇÃO



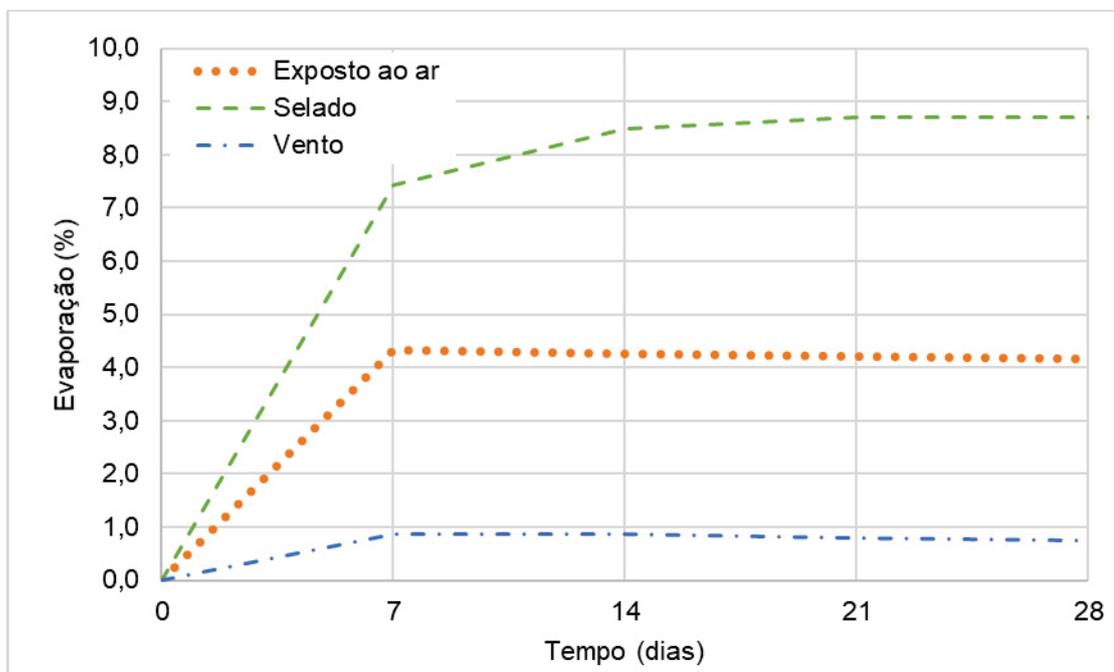
FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 36 – PERDA DE MASSA MÉDIA A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:4 COM VARIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR



FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 37 – PERDA DE MASSA MÉDIA A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO TRAÇO 1:6 COM VARIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO AR



FONTE: o autor (2021).

A TABELA 36 foi montada para demonstrar a diferença de magnitude entre as perdas de massa máximas médias para cada caso.

TABELA 36 – COMPARAÇÃO DA MAGNITUDE DA PERDA DE MASSA MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO PARA AS DIFERENTES EXPOSIÇÕES ADOTADAS

Exposição	Traço		
	1:3	1:4	1:6
Selado	6,97%	7,63%	8,70%
Simplesmente exposto	2,52%	3,27%	4,33%
Vento	1,53%	1,13%	0,86%

FONTE: o autor (2021).

Observa-se que a variação dos corpos de prova submetidos à mesma condição de exposição ao ar inicial obteve evaporações maiores quanto menor fosse a concentração de aglomerante. Porém, comportamento oposto foi encontrado na exposição ao vento, mas não se obteve influência significativa (TABELA 37).

Entende-se que a maior concentração de aglomerante do traço capacita a mistura a aproveitar melhor a água disponível através da hidratação. Esse fato, somado à menor superfície específica do aglomerante em relação ao agregado, permite concluir o porquê traços mais ricos em aglomerante perdem menos água do que traços mais pobres.

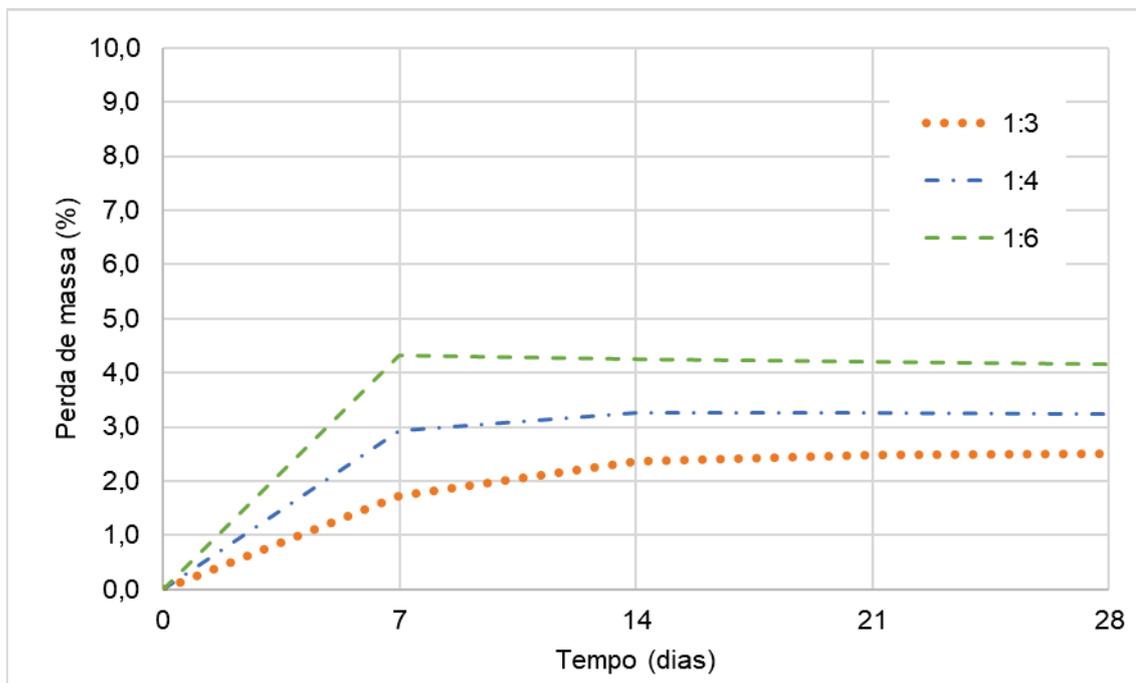
TABELA 37 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IMPACTO DA CONCENTRAÇÃO DE AGLOMERANTE/AGREGADOS SOBRE A EVAPORAÇÃO MÁXIMA MÉDIA A LONGO PRAZO NAS EXPOSIÇÕES ADOTADAS

Fonte	Exposição analisada	F _{calculado}	F _{tab}	Valor-P	Conclusão
Traço	Simplesmente exposto	34,279	3,982	0,001	Significativo
	Selado	18,703	3,982	0,028	Significativo
	Vento	3,940	3,982	0,051	Não significativo

FONTE: o autor (2021).

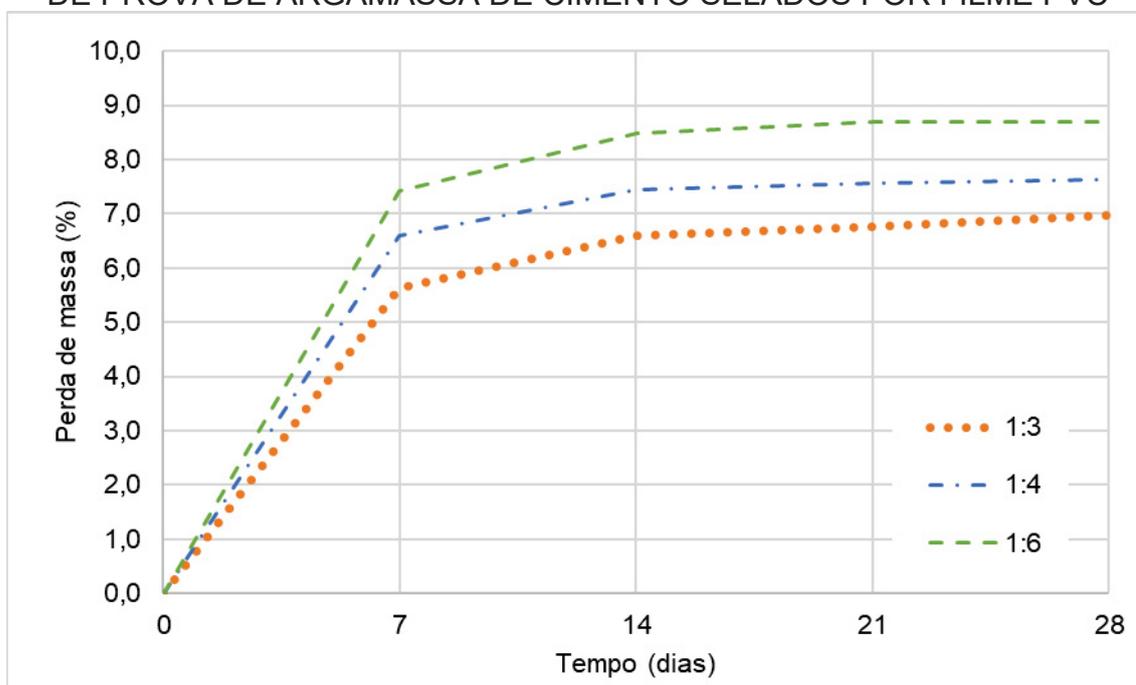
O GRÁFICO 38, o GRÁFICO 39 e o GRÁFICO 40 apresentam os resultados da perda de massa a longo prazo separados para cada condição de exposição.

GRÁFICO 38 – PERDAS DE MASSA MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTOS AO AR



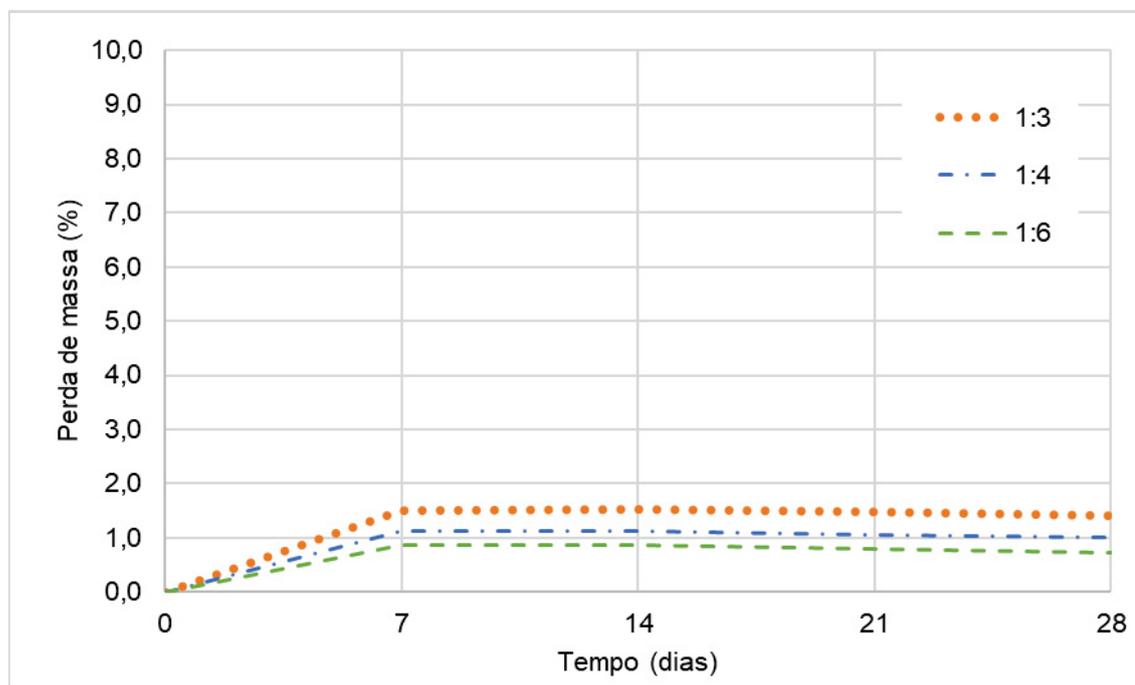
FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 39 – PERDAS DE MASSA MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO SELADOS POR FILME PVC



FONTE: o autor (2021).

GRÁFICO 40 – PERDAS DE MASSA MÉDIAS A LONGO PRAZO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA DE CIMENTO EXPOSTOS AO VENTO (5m/s)



FONTE: o autor (2021).

4.3.3 Tabulação de resultados da retração a longo prazo e comparação com a retração inicial

A TABELA 38 expõe os resultados máximos médios da retração a longo prazo e sua perda de massa máxima média.

TABELA 38 – RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA RETRAÇÃO A LONGO PRAZO

Argamassa	Exposição	Nome do Traço	Retrações máximas médias (mm/m)	Perdas de massa máximas médias (%)
Simples	Exposta ao ar	1:3	0,768	2,52
		1:4	0,656	3,27
		1:6	0,520	4,33
	Selado por filme PVC	1:3	0,848	6,97
		1:4	0,800	7,63
		1:6	0,661	8,70
	Vento 5m/s	1:3	0,550	1,53
		1:4	0,528	1,13
		1:6	0,469	0,86
Mista	Exposta ao ar	Cal 60	0,488	3,61
		Cal 45	0,428	3,49
		1:1:6	0,364	3,94

FONTE: o autor (2021).

A TABELA 39 e a TABELA 40 apresentam um comparativo entre a retração e as perdas de massa iniciais e a longo prazo, respectivamente. A última coluna das tabelas foi destinada à razão entre a medição a longo prazo e a inicial, ou seja, quanto maior a porcentagem, maior foi a representatividade da medição no estágio a longo prazo.

TABELA 39 – RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA RETRAÇÃO A LONGO PRAZO EM COMPARAÇÃO COM OS OBTIDOS PELO MÉTODO PROPOSTO (RETRAÇÃO)

Exposição	Nome do Traço	Retrações máximas médias (mm/m)		Retração total (mm/m)	Comparação (longo prazo/inicial)
		Inicial	A longo prazo		
Simplesmente exposto	1:3	0,539	0,768	1,307	42%
	1:4	0,321	0,656	0,977	104%
	1:6	0,174	0,520	0,694	199%
Selado por filme PVC	1:3	0,054	0,848	0,902	1459%
	1:4	0,040	0,800	0,840	1900%
	1:6	0,037	0,661	0,698	1684%
Vento 5m/s	1:3	0,434	0,550	0,984	27%
	1:4	0,321	0,528	0,849	65%
	1:6	0,185	0,469	0,654	154%
Simplesmente exposto	Cal 60	0,756	0,488	1,244	-35%
	Cal 45	0,447	0,428	0,875	-4%
	1:1:6	0,239	0,364	0,603	52%

FONTE: o autor (2021).

TABELA 40 – RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA RETRAÇÃO A LONGO PRAZO EM COMPARAÇÃO COM OS OBTIDOS PELO MÉTODO PROPOSTO (PERDA DE MASSA)

Exposição	Nome do Traço	Perdas de massa máximas médias (%)		Perda de massa total (mm/m)	Comparação (longo prazo/inicial)
		Inicial	A longo prazo		
Simplesmente exposto	1:3	14,50	2,52	17,016	-83%
	1:4	16,20	3,27	19,473	-80%
	1:6	19,20	4,33	23,532	-77%
Selado por filme PVC	1:3	3,00	6,97	9,968	132%
	1:4	3,90	7,63	11,529	96%
	1:6	5,10	8,70	13,804	71%
Vento 5m/s	1:3	16,70	1,53	18,232	-91%
	1:4	19,70	1,13	20,834	-94%
	1:6	24,50	0,86	25,364	-96%
Simplesmente exposto	Cal 60	25,10	3,61	28,712	-86%
	Cal 45	24,40	3,49	27,894	-86%
	1:1:6	21,40	3,94	25,344	-82%

FONTE: o autor (2021).

Nota-se que quando selados nas primeiras 24 horas de hidratação, os corpos de prova tendem a retrair e perder mais água a longo prazo do que os corpos de prova em outras condições, porém eles retraem no total em média 15% a menos do que os expostos ao ar e 1% a menos do que os expostos ao vento.

Excluindo os corpos de prova selados, a retração a longo prazo dos corpos de prova de argamassa de cimento foi 98% maior do que a retração inicial. Porém, considerando que a retração inicial se refere ao primeiro dia de hidratação e a retração a longo prazo se refere aos primeiros 28 dias de idade, pode-se entender a importância do estágio inicial.

O CSTB (1993), *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, apresenta uma classificação de susceptibilidade à fissuração em função da magnitude da retração a longo prazo: retrações a longo prazo menores do que 0,7mm/m são classificadas como baixa susceptibilidade; entre 0,7 a 1,2mm/m, média susceptibilidade; e acima de 1,2mm/m é classificada como alta susceptibilidade à retração. Aplicando essa classificação nos resultados médios obtidos de retração a longo prazo e também sobre a retração total, obtemos a TABELA 41:

TABELA 41 – APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE DO CSTB (1993) SOBRE OS RESULTADOS DA RETRAÇÃO A LONGO PRAZO E DA RETRAÇÃO TOTAL

Exposição	Nome do Traço	Retrações máximas médias (mm/m)	
		A longo prazo	Retração total (mm/m)
Simplesmente exposto	1:3	0,768	1,307
	1:4	0,656	0,977
	1:6	0,520	0,694
Selado por filme PVC	1:3	0,848	0,902
	1:4	0,800	0,840
	1:6	0,661	0,698
Vento 5m/s	1:3	0,550	0,984
	1:4	0,528	0,849
	1:6	0,469	0,654
Simplesmente exposto	Cal 60	0,488	1,244
	Cal 45	0,428	0,875
	1:1:6	0,364	0,603

LEGENDA: de acordo com CSTB (1993); em verde, baixa susceptibilidade ($\leq 0,7$ mm/m); em amarelo, média susceptibilidade ($0,7 \leq$ retração a longo prazo $\leq 1,2$ mm/m); em vermelho, alta susceptibilidade ($\geq 1,2$ mm/m). FONTE: o autor (2021).

Repara-se que a classificação elenca apenas 4 dos 12 casos estudados com probabilidade média de susceptibilidade à fissuração, sendo os restantes de probabilidade baixa. Porém, se aplicada a classificação considerando o que foi

retraído no primeiro dia de hidratação somado à retração a longo prazo (retração total), 50% dos casos estudados passam para uma classificação de susceptibilidade mais grave, o que agrega peso para a consideração da contribuição da retração inicial.

A TABELA 42 apresenta a contribuição da retração inicial e da a longo prazo para a total (a soma das duas). As barras horizontais azuis ilustram a contribuição de cada parcela de retração para a total.

TABELA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE A RETRAÇÃO INICIAL E A RETRAÇÃO A LONGO PRAZO E SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA A RETRAÇÃO TOTAL

Exposição	Nome do Traço	Retração total (mm/m)	Porcentagem de contribuição para a retração total			
			Inicial	A longo prazo		
Simplesmente exposto	1:3	1,307		41,24%		58,76%
	1:4	0,977		32,87%		67,13%
	1:6	0,694		25,05%		74,95%
Selado por filme PVC	1:3	0,902		6,03%		93,97%
	1:4	0,840		4,76%		95,24%
	1:6	0,698		5,31%		94,69%
Vento 5m/s	1:3	0,984		44,08%		55,92%
	1:4	0,849		37,80%		62,20%
	1:6	0,654		28,29%		71,71%
Simplesmente exposto	Cal 60	1,244		60,78%		39,22%
	Cal 45	0,875		51,09%		48,91%
	1:1:6	0,603		39,61%		60,39%

FONTE: o autor (2021).

O método proposto pela norma NBR 15261 se assemelha à condição selada por filme PVC adotada no presente trabalho e, como percebe-se, nessa condição a retração total ocorre majoritariamente no período a longo prazo, o que aponta para o fato de a norma não estar perdendo tanto da leitura da retração total nessa condição por desconsiderar a retração inicial.

Porém, a condição de exposição das argamassas dentro da prática da engenharia civil é muito mais próxima das condições exposta ao ar e ao exposta vento. Como demonstrado, o comportamento da retração total observada nessas condições mais próximas da realidade da construção civil são bem diferentes. Portanto, se o propósito é estudar argamassas de revestimento e seu comportamento real na prática da construção civil, a norma é carente de precisão por ignorar a retração inicial, sendo o método proposto o início de uma tentativa de preencher essa lacuna.

4.4 CONCLUSÕES

As principais conclusões sobre os resultados obtidos com o método de ensaio proposto são as seguintes:

O método proposto, quando não aplicado em argamassas com superfícies seladas, é capaz de mensurar a retração inicial com sensibilidade o suficiente para distinguir as concentrações diferentes de aglomerante adotadas, tanto para argamassas de cimento quanto para as mistas.

Observou-se em argamassas de cimento que concentrações maiores de cimento provocam maior retração inicial (um aumento de 8,3% da relação aglomerante/agregado em volume registrou, em média, um aumento de 76% nos corpos expostos ao ar, 54% nos expostos ao vento de 5m/s e 22% nos selados) e aumentam a velocidade do fenômeno durante seu período de maior aumento, estágio intermediário (em média: 254% nos expostos ao ar, 46% nos expostos ao vento de 5m/s e 39% nos selados). Porém, o aumento da concentração de aglomerante teve uma relação inversamente proporcional com a perda de massa após 24 horas de hidratação (redução em média de 13% para os corpos de prova expostos, 17% para os expostos ao vento e 23% para os selados), possivelmente indicando a ação durante o período inicial da retração química e autógena além da retração por secagem.

A retração inicial é significativamente minimizada com a redução da evaporação superficial por meio da selagem com filme PVC, sendo ela maior em outras condições de exposição: 6,5 vezes maior, em média, na exposta ao ar e 6 vezes, em média, na exposta ao vento (5m/s). O mesmo comportamento ocorre sobre a velocidade da retração inicial durante seu período de maior aumento, estágio intermediário (1,2 vezes maior, em média, na exposta ao ar e 10,7 vezes maior, em média, na exposta ao vento).

Observou-se em argamassas mistas que concentrações maiores de cal provocam maior retração inicial e maior velocidade de retração (um aumento de 15% da relação cal/aglomerantes em massa registrou, em média, um aumento de 78% na retração inicial e 93% na velocidade da retração inicial).

A classificação de susceptibilidade à fissuração da retração do CSTB (1993) foi alterada em 50% dos casos para um nível mais grave quando a retração inicial foi levada em consideração.

A retração a longo prazo medida pela NBR 15261 não contempla situações mais realistas de aplicação de argamassas por ignorar a retração inicial, o que pode ser contemplado pelo ensaio proposto no presente estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um método de mensuração da retração inicial em argamassas foi proposto utilizando a abordagem dos deslocamentos horizontais. O ensaio é interessante quanto ao baixo custo, considerando que foram adotados relógios comparadores, instrumento significativamente mais barato que o LVDT, o qual geralmente é adotado em ensaios que utilizam a mesma abordagem, além do fato de que a leitura não dependeu de coletores de dados digitais, instrumentos usados para conectar os relógios à computadores, mais caros do que as câmeras. Destarte, a presente pesquisa, inspirada pelo trabalho de Bastos (2001), demonstra a viabilidade técnica experimental e financeira do método proposto para mensurar a retração inicial em argamassas. Espera-se que trabalhos futuros aumentem a amostra de ensaios, melhorando o método proposto e confirmando sua viabilidade para que, um dia, se torne uma ferramenta útil no meio científico que estuda a retração inicial de materiais cimentícios.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos desafios encontrados no desenvolvimento do método proposto, sugere-se que qualquer pesquisa futura que tente reproduzi-lo siga as seguintes recomendações:

- Se possível, utilizar uma câmara seca com melhor capacidade de regularizar a temperatura e umidade;
- Criar um conector monolítico através de usinagem no intuito de minimizar os artefatos inseridos na medida da retração pela combinação dos diferentes componentes adotados nessa pesquisa;
- Se o orçamento ou as circunstâncias da pesquisa permitirem, utilizar aparelho mais preciso e que transfira suas medições em tempo real para um computador;
- Reproduzir uma maior quantidade de ensaios com traços de argamassa com baixa propensão à retração para testar a sensibilidade do ensaio para retrações de baixa magnitude; também, reproduzir o ensaio com traços com menores variações de concentração de aglomerantes para testar a sensibilidade do ensaio;

- Reproduzir uma maior quantidade de ensaios com diferentes velocidades de vento.
- Em geral, aumentar o tamanho da amostra para aumentar a confiabilidade do ensaio.

REFERÊNCIAS

A

- ABREU, Wagner Gomes de. **Identificação de práticas sustentáveis aplicadas às edificações**. Dissertação de Mestrado. 150fls. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Niterói, Universidade Federal Fluminense, 2012.
- ACI – American Concrete Institute. **Committee 224 – Causes, evaluation and repair of cracks in concrete structures**. Manual of Concrete Practice. Detroit, 1998.
- AL-AMOUDI, O.S.B.; MASLEHUDDIN, M.; SHAMEEM, M; IBRAHIM, M. **Shrinkage of plain and silica fume cement concrete under hot weather**, Cement and Concrete Composites, 29, p. 690–699, 2007.
- ALMEIDA, J. G. R. Tensão nos solos. Geotecnia 1, 2013. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Disponível em:< <https://www.slideserve.com/waseem/tens-es-nos-solos>>. Acessado em: 12 de abril de 2020.
- ALMEIDA, J. L. M. S. L. **Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil — especialização em Materiais e Processos de Construção) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57494/1/000141371.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2021.
- ALMUSALLAM, A.; ABDUL-WARIS, M.; MASLEHUDDIN, M.; AL-GAHTANI, A. **Placing and shrinkage at extreme temperatures**. Concrete International, Vol.21, pp.75-79, 1999.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). **ASTM C1579-21**. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert), West Conshohocken, PA, 2021.
- _____. **ASTM D4610-98**, Standard Guide for Determining the Presence of and Removing Microbial (Fungal or Algal) Growth on Paint and Related Coatings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16916**: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

Autocore Robotica. Strain Gauge - Extensômetro de Resistência Elétrica Disponível em: <<https://www.autocorerobotica.com.br/strain-gauge-extensometro-de-resistencia-eletrica>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

autogenous shrinkage – Proceedings of international workshop on shrinkage of concrete. Hiroshima, 2000.

B

BANTHIA, N.; AZZABI, M.; PIGEON, M. **Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites**. *Materials and Structures*, 26, p. 405–413, 1993.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. **Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays**, *Materials and Structures*, 42, p. 567–579, 2009.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. **Test method for evaluation of plastic shrinkage cracking in fiber-reinforced cementitious materials**, *Exp. Tech.* 31, p. 44–48, 2007.

BANTHIA, N.; YAN, C.; MINDESS, S. **Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: a novel test technique**, *Cem. Concr. Res.* 26, p. 9–14, 1996.

BAO, Y.; MENG, W.; CHEN, Y.; CHEN, G.; KHAYAT, K. **Measuring mortar shrinkage and cracking by pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis with a single optical fiber**, *Materials Letters*, 145, p. 344-346, 2015.

BASTOS, P. K. X.; DÉTRICHÉ, C.; BALAYSSAC, J.; CONCOTTO, M. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas de revestimento**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

BATALHA, N. M. L. **Avaliação do fenômeno do Curling em pavimentos industriais de betão armado não aderentes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas), Instituto Politécnico de Leiria, 2017.

Disponível em:

<[https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/3176/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Na dia%20Batalha_Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20fen%C3%B3meno%20do%20](https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/3176/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Na%20dia%20Batalha_Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20fen%C3%B3meno%20do%20)

Curling%20em%20pavimentos%20industriais%20de%20bet%C3%A3o%20armado%20n%C3%A3o%20aderentes.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2020.

BAŽANT, Z. P. **Thermodynamics of hindered adsorption and its Implications for hardened cement paste and concrete**. Cement and Concrete Research. Vol. 2, pp. 1-16, 1972.

BENITE, Anderson. **Emissões de carbono e a construção civil**. São Paulo: CTE (Centro de Tecnologia de Edificações), 2011.

BJØNTEGAARD, Ø.; HAMMER, T. A.; SELLEVOLD, E. J. **On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete**. The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2004.

BOSHOFF, W. P.; COMBRINCK, R. **Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete**, Cem. Concr. Res., 48, p. 34–39., 2013.

BRANCH, J.; HANNANT, D. J.; MULHERON, M. **Factors affecting the plastic shrinkage cracking of high-strength concrete**. Magazine of Concrete Research, 54, p. 347–354, 2002.

BRANSTON, J.; DAS, S.; KENNO, S.; TAYLOR, C. **Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage**. Cement and Concrete Composites, 74, 2016.

BROUWERS, H. J. H; CHEN, W. **The hydration of slag, part 1: reaction models for alkaliactivated slag**. Journal Materials Science, v. 42, p. 428 – 335, 2007.

BRÜLL, L.; KOMLOS, K.; MAJZLAN, B. **Early shrinkage of cement pastes, mortars, and concretes**, Matér. Constr. 13, p. 41–45, 1980.

C

CAL CEM INDÚSTRIA. **Laudo De Análise Física & Química Cal Hidratada CHI Lote 02-2021/05**. Maio de 2021.

CIA DE CIMENTO ITAMBÉ. **Relatórios de ensaio**. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=368&chave=2021-5>. Acesso em: 20 de julho. 2021.

CINCOTTO, M.A. **Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações**. In: Tecnologia de edificações. São Paulo: Pini, p. 549-554, 1988.

CLARKE, M.; HORTON, R. **Bringing it all together: Lancet-Cochrane collaborate on systematic reviews**, 2001.

COELHO, M., A., M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de altoforno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

COMBRINCK, R.; BOSHOFF, W. P. **Fundamentals of plastic settlement cracking in concrete**, in: *Constr. Materials and Structures, Proc. First Int. Conf. Constr. Materials and Structures*, p. 354, 2014.

CROMARTY, R. E.; BRYDEN, J. G. **An apparatus for measuring dimensional changes in fresh cement paste**, *Mag. Concr. Res.* 19, p. 239–242, 1967.

D

DÉTRICHÉ, C. H. **Contribution à l'étude des déformations des couches minces de mortiers de liants hydrauliques**. Toulouse, 247 p. Tese (Doutorado) – Université Paul Sebatier de Toulouse, 1977.

DZAYEA, E. D.; TSANGOURIA, E.; SPIESSENSA, K.; DE SCHUTTERB, G.; AGGELIS, D., G. **Digital image correlation (DIC) on fresh cement mortar to quantify settlement and shrinkage**. *Department of Mechanics of Materials and Constructions*, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 2018.

E

EFFLOCK. *Elastomeric paints are a wise choice for efflorescence prevention*, julho de 2015. Disponível em: <https://www.elflock.com.au/blogs/news/34811908-elastomeric-paints-are-a-wise-choice-for-efflorescence-prevention>. Acesso em: 10 mai. 2020.

ESPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete - effects of fine aggregate and limestone filler**. Tese (Doutorado) – Chalmers University of Technology, Suécia, 204 p., 2007.

F

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. J. **A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties**. *Matériaux et Constructions*, 1(6), 509–520, 1968.

FISHER, L. R.; ISRAELACHVILI, J. N. **Experimental studies on the applicability of the Kelvin equation to highly curved concave menisci**, *J. Colloid Interface Sci.* 80 (2) 528–541, 1981.

G

GASPAR, P.; de BRITO, J. **Mapping defect sensitivity in external mortar renders**. *Construction and Building Materials*, 19(8), 571–578, 2005.

GASPAR, P.; de BRITO, J.; FLORES COLEN, I. **Maintenance and Durability of External Mortars and Renders Applied to Field Conditions**. *World Congress on Housing Construction – An Interdisciplinary Task* September 9-13, Coimbra, Portugal, 2002.

GB/T 50082-2009: **Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete.** China building industry press, 2009.

GHODDOUSI, P., JAVID, A. A. S. **Plastic Shrinkage Evaluation of Self-Consolidating Concrete as Repair Materials Based on Restrained and Free Strain Measurements**, in: Des. Prod. Place. Self-Consol. Concr., Springer, p. 295–306, 2010.

GHOURECHIAN, S. **Plastic shrinkage cracking in concrete: from mechanisms to mitigation strategies**, University of Tehran, 2018.

GIROTTI, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, 2012.

GIROTTI, L., S.; VITA, M., O.; BARBOSA, M., P.; REPETTE, W., L. **Cracking and plastic shrinkage test of self-compacting concrete in fresh state: test procedure.** Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2011.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. **Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/5, São Paulo: EPUSP, 21 p., 2008.

GONG, F.; ZHANG, D.; SICAT, E.; UEDA, T. **Empirical Estimation of Pore Size Distribution in Cement, Mortar, and Concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, 26(7), 2014.

H

HAMMER, T. A. **Deformations, strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases.** Thesis for the degree of doctor of Norwegian University of Science and Technology, 2007.

HAMMER, T. A.; FOSSÅ, K. T. **Influence of entrained air voids on pore water pressure and volume change of concrete before and during setting**, Materials and Structures, 39, p. 801–808, 2006.

HANEHARA, S.; HIRAO, H.; UCHIKAWA, H. **Relationships between autogenous shrinkage, the microstructure and humidity changes at inner part of hardened cement paste at early age**, Autogenous Shrinkage Concr. FN Spon Lond. 1999, p. 93–104, 1999.

HOLT, E. E. **Early age autogenous shrinkage of concrete.** Technical Research Centre of Finland. VTT Building and Transport, ESPOO 2001, 2001.

HOLT, E. E. **Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages**. Cement and Concrete Research 35, p. 464–472, 2005.

HU, X.; SHI, C.; SHI, Z.; TONG, B.; WANG, D. **Early age shrinkage and heat of hydration of cement-fly ash-slag ternary blends**. Construction and Building Materials, Volume 153, pp. 857-865, 2017.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. **Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste, I. Modelling at the macroscopic scale**. Cement and Concrete Research, 1995.

I

Investimento do governo em infraestrutura no ano passado é o menor em dez anos. **G1**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/02/10/investimento-do-governo-em-infraestrutura-no-ano-passado-e-o-menor-em-dez-anos.ghtml>>. Acesso em: 09 maio. 2019.

J

JAAFRIA, R.; SAMOUHB, H.; ROZIEREA, E.; ALAMA, S. Y.; WISNIEWSKIA, V.; LOUKILI, A. **Experimental and numerical analysis of curling behavior of natural hydraulic lime - cement based mortars**, Cem. Concr. Res. 117, p. 1–15, 2019.

JASICZAKA, J.; SZYMAŃSKIA, P.; NOWOTARSKIA, P. **Wider perspective of testing early shrinkage of concrete modified with admixtures in changeable W/C ratio as innovative solution in civil engineering**. Institute of Structural Engineering at Poznań University of Technology, Poland, 2015.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Autogenous deformation and RH-change in perspective**. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 12, p. 1859 – 1865, 2001.

JOHANSEN, R.; DAHL, P. **Control of plastic shrinkage of cement**. Proceedings of the 18th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, 1993.

JUSTNES, H.; CLEMMENS, F.; DEPUYDT, P.; VAN GEMERT, D.; SELLEVOLD, E. **Correlating the deviation point between external and total chemical shrinkage with setting time and other characteristics of hydrating cement pastes**. International RILEM workshop Shrinkage 2000, At Paris, France, Volume: RILEM proceedings PRO17; “Shrinkage of concrete”, 17 pp, 2000.

K

KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; HESSELBARTH, D. **Effect of the addition of ultrafine cement and shortfiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes**. Cement and Concrete Composites, Volume 26, Issue 5, p. 541-549, 2004.

KAYONDO, M.; COMBRINCK, R.; BOSHOFF, W. P. **State-of-the-art review on plastic cracking of concrete**. *Construction and Building Materials*, 225, 886–899, 2019.

KOVLER, K. **Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage**. *Materials and Structures*, 27, p. 324–330, 1994.

KRONLÖF, A.; LEIVO, M.; SIPARI, P. **Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar**, *Cem. Concr. Res.* 25, p. 1747–1754, 1995.

KWAK, H.-G.; HA, S.; WEISS, W. J. **Experimental and numerical quantification of plastic settlement in fresh cementitious systems**, *J. Mater. Civ. Eng.* 22, p. 951–966, 2010.

L

LE-BIHAN, T.; GEORGIN, J.-F.; MICHEL, M.; AMBROISE, J.; MORESTIN, F. **Measurements and modeling of cement base materials deformation at early age: The case of sulfo-aluminous cement**, *Cem. Concr. Res.* 42, p. 1055–1065, 2012.

LEHNE, J.; PRESTON, F. **Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete**. Chatham House Report, Junho de 2018.

LENART, M.; GRUSZCZYŃSKI, M. **The research of mortars shrinkage made with reclaimed aggregate**, *Procedia Structural Integrity*, 23, p. 113-118, 2019.

LIN, S.-T.; HUANG, R. **Effect of viscosity modifying agent on plastic shrinkage cracking of cementitious composites**, *Materials and Structures*, 43, p. 651–664, 2010.

LIN, S.-T.; HUANG, R.; WENG, T.-L. **Effect of Water Soluble Polymer and Fiber on the Early-Age Shrinkage Cracking of Cementitious Composites**, *J. Mar. Sci. Technol.* 20, p.295–303, 2012.

LOUKILI, A.; CHOPIN, D.; KHELIDJ, A.; TOUZO, J. **A New Approach to Determine Autogenous Shrinkage of Mortar at Early Age Considering Temperature History**. *Cement and Concrete Research*, Fevereiro de 2000.

LURA, P.; JENSEN, O. M. **Volumetric measurement in water bath — an inappropriate method to measure autogenous strain of cement paste**. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, Estados Unidos, 2005.

M

MALTESE, C.; PISTOLESI, C.; LOLLI, A.; BRAVO, A.; CERULLI, T.; SALVIONI, D. **Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain**

stable and durable mortars. Cement and Concrete Research, 35(12), 2244–2251, 2005.

MANGAT, P. S.; AZARI, M. M. **Plastic shrinkage of steel fibre reinforced concrete.** Materials and Structures, 23, 1990.

MELO NETO, A. A., **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada.** Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais,** 3ªed. São Paulo: Pini, 2008.

MESSAN, A.; IENNY, P.; NECTOUX, D. **Free and restrained early-age shrinkage of mortar: Influence of glass fiber, cellulose ether and EVA (ethylene-vinyl acetate),** Cement and Concrete Composites, 33, p. 402–410, 2011.

MIHASHI, H.; LEITE, J. P. B. **State-of-art report on control of cracking in early age concrete.** Journal of advance concrete technology, v. 2, n. 2, p. 143 - 144, 2004.

MINDESS, S.; YOUNG, JF.; DARWIN, D. **Concrete,** Second Edition. Prentice Hall, Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ, 2002.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MORA-RUACHO, J.; GETTU, R.; AGUADO, A. **Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete,** Cem. Concr. Res., 39, p. 141–146, 2009.

N

NABIL, B.; AISSA, A.; AGUIDA, B. I. **Effectiveness of Different Solutions to Reduce Plastic Shrinkage in Hot Climate Concreting,** in: Vol. Two Three Second Int. Conf. Sustain. Constr. Mater. Technol., 2010.

NAWA, T.; HORITA, T. **Autogenous shrinkage of high-performance concrete.** International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures, Sapporo, 2004.

NEMOZ-GAILLARD, M.; NECTOUX, D.; DALLIES, E.; MULLER, D. **Influence of AR glass fibers on the cracking of concrete: Analysis at the very early age by digital image correlation,** in: 23 Int. RILEM Conf. Early Age Crack. Cem. Syst.-EAC01, RILEM Publications, p. 237, 2002.

NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória aditivada.** Tese de doutorado em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, 2008.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Elasticity, Shrinkage and Creep, p. 424-430. London, 2002.

NEWLANDS, M. D.; PAINE, K. A.; VEMURI, N. A.; DHIR, R. K. **A linear test method for determining early-age shrinkage of concrete**, Mag. Concr. Res. 60, p. 747–757, 2008.

O

OLIVEIRA, A. L.; CORRÊA, B. P.; RIBEIRO, I. F. R.; SOUZA, R. A.; CALÇADA, L. M. L. **Influência do uso de aditivo retentor de água à base de éter de celulose nas propriedades das argamassas de assentamento em alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 57-59, jul./set. 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015. **Conheça os novos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/>> . Acessado em: 02/05/2020.

ORR, D.M.F.; HAIGH, G.F. **An apparatus for measuring the shrinkage characteristics of plastic mortars**, Mag. Concr. Res. 23, p. 43–48, 1971.

P

Parte de fachada de shopping cai e atinge cabeça de criança de 1 ano e meio em SP. **G1**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/parte-de-fachada-de-shopping-cai-e-atinge-cabeca-de-crianca-de-1-ano-e-meio-em-sp.ghtml>>. Acesso em: 09 maio. 2019.

PAIVA, H. et al. **Effects of a Water-Retaining Agent on the Rheological Behaviour of a Single Coat Render Mortar**. Cement and Concrete Research, v. 36, n. 7, p. 1257-1262, 2006.

PATURAL, L.; MARCHAL, P.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P.; RUOT, B.; DEVÈS, O. **Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars**. Cement and Concrete Research, 41(1), 46–55, 2011.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. **A Design Science Research Methodology for Information Systems Research**. Journal of Management Information Systems, vol. 24, pg. 45–77, 2008.

PEI, H.; LI, Z.; ZHANG, B.; HONGYAN, M. **Multipoint measurement of early age shrinkage in low w/c ratio mortars by using fiber Bragg gratings**. Department of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, China, 2014.

PÉRA, J. & AMBROISE, J. **New applications of calcium sulfoaluminate cement**. Cement and Concrete Research, 34(4), 671–676, 2004.

POWERS, T. C. **The thermodynamics of volume change and creep.** *Matériaux et Constructions*, 1(6), 487–507, 1968.

POWERS, T. C. **Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste.** *Journal of the American Ceramic Society*, 41(1), 1–6, 1958.

Q

QI, C.; WEISS, J.; OLEK, J. **Assessing the settlement of fresh concrete using a non-contact laser profiling approach,** in: *Int. Conf. Constr. Mater. ConMat05*, 2005.

QI, C.; WEISS, J.; OLEK, J. **Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function,** *Materials and Structures*, 36, p. 386–395, 2003.

R

RADOCEA, A. **A Study on the Mechanism of Plastic Shrinkage of Cement-based Materials,** Thesis for the degree of Doctor of Engineering from Chalmers Technical University, Gothenburg, Sweden, 1992.

RAVINA, D. **Early longitudinal dimensional changes of fresh fly ash mortar exposed to drying conditions,** *Cem. Concr. Res.* 16 p. 902–910, 1986.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projeto de experimentos.** Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

RUIZ-RIPOLL, L.; BARRAGÁN, B., E.; MORO, S.; TURMO, J. **Digital Imaging Methodology for Measuring Early Shrinkage Cracking in Concrete,** Department of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech, Spain, 2013.

S

SANJUÁN, M. A.; MORAGUES, A. **A testing method for measuring plastic shrinkage in polypropylene fibre reinforced mortars,** *Mater. Lett.* 21, p. 239–246, 1994.

SAYAHY, F.; EMBORG, M.; HEDLUND, H. **Plastic Shrinkage Cracking in Concrete: State of the Art.** *Nordic Concrete Research.* 2014/3. 95-110, 2014.

SEGAT, G. T. **Manifestações patológicas observadas em revestimentos de argamassa: estudo de caso em conjunto habitacional popular na cidade de Caxias do Sul (RS).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Profissionalizante). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SHAO, Y.; MIRMIRAN, A. **Control of plastic shrinkage cracking of concrete with carbon fiberreinforced polymer grids,** *J. Mater. Civ. Eng.* 19, p. 441–444, 2007.

SHEN, H. R.; SHE, Y. X.; GAO, P. W. **The influence of polypropylene fiber on the performance of concrete pavement**, in: Appl. Mech. Mater., Trans Tech Publ, p. 1099–1103, 2012.

SILVA, N., G., D. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Consumo, Produção e Valores de Materiais de Construção**. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>>. Acessado em 10/03/2019.

SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, M. **A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete**, Cement and Concrete Composites, 29, p. 575–581, 2007.

SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, M. **Experimental methodology to study plastic shrinkage cracks in high strength concrete**, Meas. Monit. Model. Concr. Prop., p. 291–296, 2006.

SLOWIK, V.; SCHLATTNER, E.; KLINK, T. **Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings**. Cement and Concrete Composites, Leipzig University of Applied Sciences, Leipzig, Alemanha, 2004.

T

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S.; KASAI, T. **Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste**. Cement and Concrete Research, Vol. 25, N. 2, pp. 288-292, 1994.

TE Connectivity. Linear Position Sensors – LVDT/LVIT. Disponível em: <<https://www.te.com/usa-en/products/sensors/position-sensors/linear-position-sensors-lvdt-lvit.html?tab=pgp-story>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

TESA. Electronic Length Measuring Equipment. Disponível em: <<https://tesatechnology.com/en-gb/downloads/>> Acesso em: 15 jul. 2020.

THE BUILDING COST INFORMATION SERVICE – BCIS. **Report: Economic Significance of Maintenance Report 2016**. Disponível em: <<https://www.rics.org/eu/products/data-products/facilities-management/report-economic-significance-of-maintenance-report-2016/>>. Acesso em: 09 maio. 2019.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini, 1989.

TOLÊDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; SANJUÁN, M. A.; ENGLAND, G. L. **Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres**, *Cem. Concr. Res.* 27, p. 537–546, 2005.

TOLÊDO FILHO, R. D.; SANJUÁN, M. A. **Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age**, *Cem. Concr. Res.* 29, p. 1597–1604, 1999.

U

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. **Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan**. *Structural Engineering International*, v. 4, p. 359-366, 2007.

V

VALLADARES, P.; VASCONCELLOS, M.; SERIO, L. **Capacidade de Inovação: Revisão Sistemática da Literatura**. *RAC*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 5, art. 3, pp. 598-626, 2014.

VEIGA, M. R. **Influence of application conditions on the cracking susceptibility of renderings**. *Concrete Science and Engineering*, Vol. 2, p. 134-140, 2000.

W

WONG, A.C.; CHILDS, P.A.; BERNDT, R.; MACKEN, T.; PENG, G.-D; GOWRIPALAN, N. **Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors**, *Cement and Concrete Composites*, 29, p. 490–497, 2007.

WONGTANAKITCHAROEN, T.; NAAMAN, A. F. **Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers**. *Materials and Structures*, v. 40, n. 3, p. 289-300, 2007.

WU, L.; FARZADNIA, N.; SHI, C.; ZHANG, Z.; WANG, H. **Autogenous shrinkage of high performance concrete A review**. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, China, 2017.

Y

YAN, L.; YAN-HUI, G. **Study on new test method for concrete cracking resistance under constraint condition**. *Journal of Building Materials*, 2011.

APÊNDICE 1 – TABELAS DETALHADAS DOS TRAÇOS ADOTADOS PELA PRESENTE PESQUISA

A descrição detalhada dos traços adotados no programa experimental da presente pesquisa pode ser observada nas tabelas a seguir.

TABELA DE TRAÇOS DE ARGAMASSA DE CIMENTO ADOTADOS, SUAS PROPORÇÕES E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Composição/ Relação/ Índice	Constituinte/ Relação	Traços de argamassa de cimento		
		1:3	1:4	1:6
Composição em volume	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Areia	3,000	4,000	6,000
	Água	0,699	0,876	1,229
Composição em massa	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Areia	3,113	4,151	6,227
	Água	0,699	0,876	1,229
Relações entre constituintes da argamassa (em massa)	Água/Aglomerante	0,699	0,876	1,229
	Agregados/Total	0,647	0,689	0,736
	Aglomerantes/Agregados	0,321	0,241	0,161
	Aglomerantes/Total	0,208	0,166	0,118
	Água/Total	0,145	0,145	0,145
	Pasta/Total	0,353	0,311	0,264
	Água/Materiais Secos	0,170	0,170	0,170
Índice de Consistência (NBR 13276)		259 mm	243 mm	223 mm

Fonte: o autor (2021).

TABELA DE TRAÇOS DE ARGAMASSA MISTA ADOTADOS, SUAS PROPORÇÕES E ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Composição/ Relação/ Índice	Constituinte/ Relação	Traços de argamassa mista		
		1:1:6	Cal 45	Cal 60
Composição em volume	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Cal	1,000	1,889	3,500
	Areia	6,000	7,600	10,500
	Água	1,301	1,648	2,277
Composição em massa	Cimento	1,000	1,000	1,000
	Cal	0,429	0,810	1,500
	Areia	6,227	7,887	10,897
	Água	1,301	1,648	2,277
Relações entre constituintes da argamassa (em massa)	Água/Cimento	1,301	1,648	2,277
	Água/Aglomerantes	0,911	0,911	0,911
	Cal/Total	0,048	0,071	0,096
	Cal/Aglomerantes	0,300	0,447	0,600
	Agregados/Total	0,695	0,695	0,695
	Aglomerantes/Agregados	0,229	0,229	0,229
	Aglomerantes/Total	0,159	0,159	0,159
	Água/Total	0,145	0,145	0,145
	Pasta/Total	0,305	0,305	0,305
	Água/Materiais Secos	0,170	0,170	0,170
Índice de Consistência (NBR 13276)		233	218	194

Fonte: o autor (2021).

APÊNDICE 2 – GRÁFICOS DE RETRAÇÃO INICIAL DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

Nesse apêndice, são apresentados os resultados de todos os ensaios realizados utilizando o método proposto nesse trabalho.

As informações apresentadas são as curvas de retração total de cada amostra, R1 e R2, visto que a maioria dos ensaios foram realizados com duas amostras. Entretanto, durante um período em que houve falta de relógios comparadores, alguns ensaios foram realizados com apenas uma amostra e, conseqüentemente, alguns gráficos apresentam apenas a curva de retração total de uma amostra. Para melhor compreender as condições de temperatura e umidade relativas da câmara seca utilizada, as curvas de retração foram justapostas contra a variação de temperatura e umidade relativa ambiente e os limites propostos pela NBR 15261 ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 5\%$). Curvas em vermelho são curvas de retração descartadas na análise estatística por não terem apresentado deslocamento em uma ou ambas as extremidades da amostra.

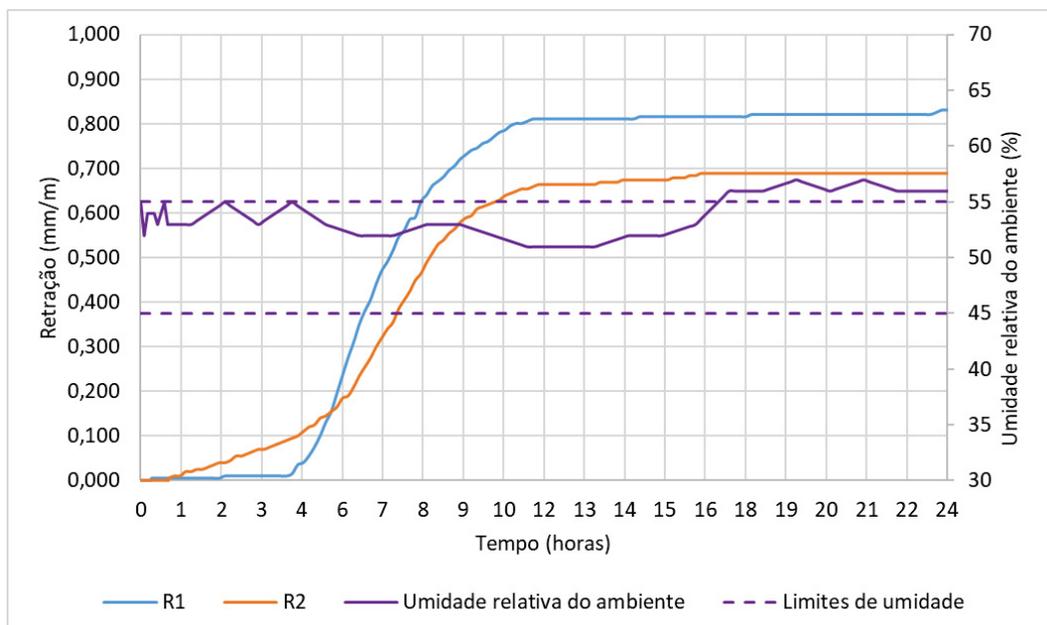
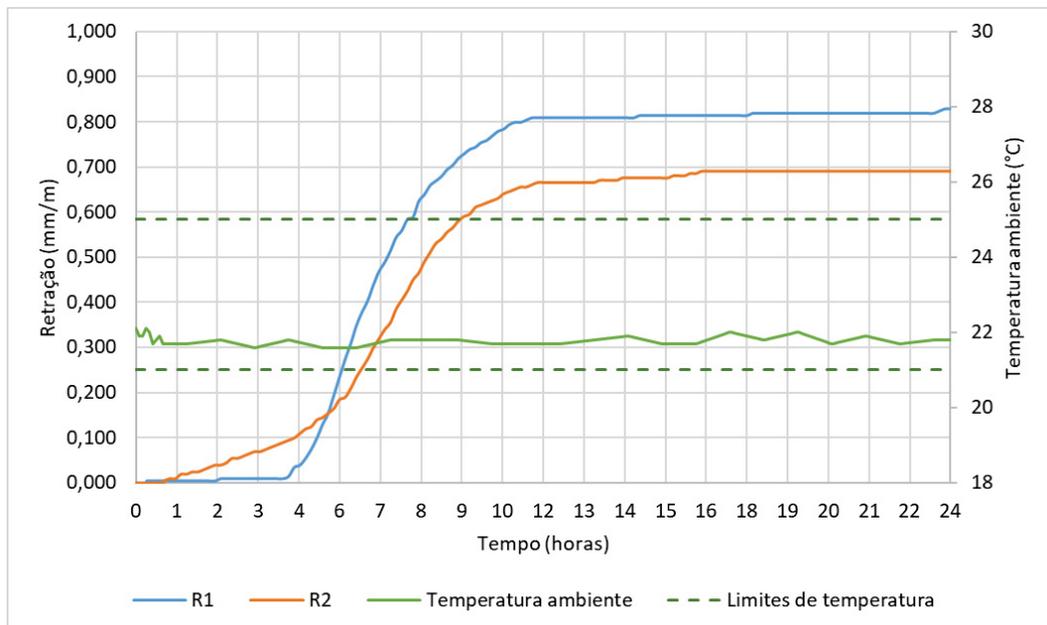
Acompanhando os gráficos, também são apresentados os seguintes dados:

- Traço e tipo de exposição;
- Porcentagem de água evaporada após 24 horas de hidratação;
- Quantidade de tempo, em horas, que a retração demorou para atingir 90% da retração máxima (T90);
- Quantidade de tempo, em horas, que a retração demorou para atingir 10% da retração máxima (T10);
- As temperaturas máxima, mínima e média registradas na câmara seca e seu desvio padrão;
- As porcentagens de umidade relativa máxima, mínima e média registradas na câmara seca e seu desvio padrão;
- A porcentagem de tempo, das 24 horas do ensaio, em que as variáveis ambientais temperatura e umidade relativa estiveram fora dos limites propostos pela NBR 15261.

Traços de argamassa mista expostos ao ar

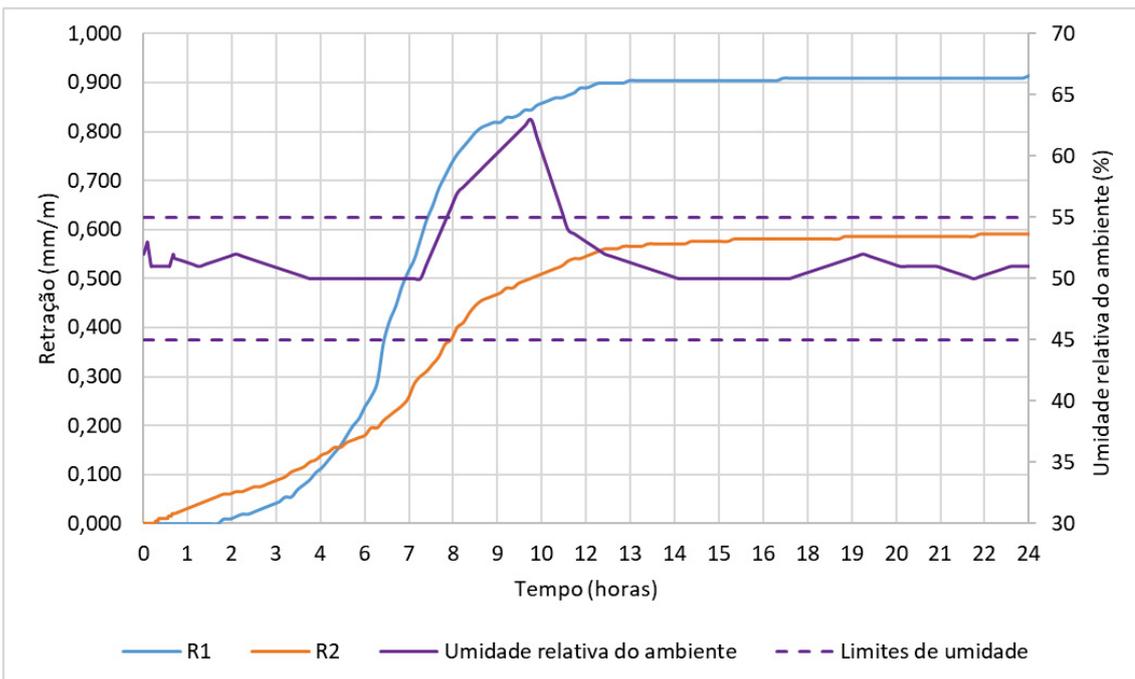
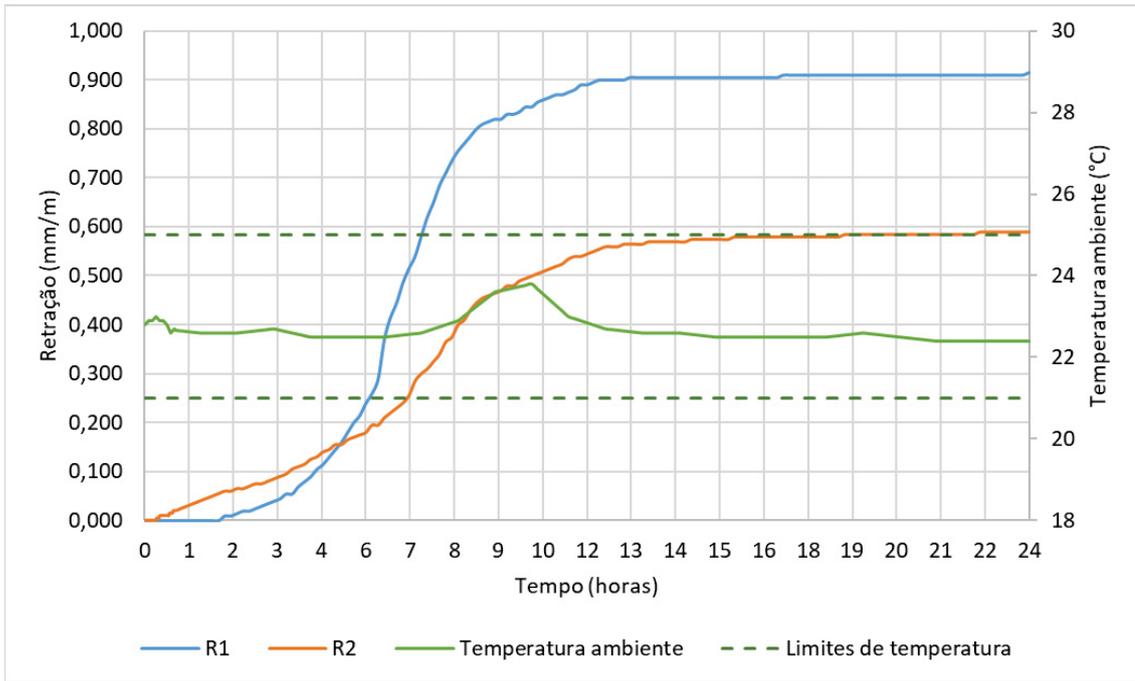
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
Cal 60	Simples	1	0,830 mm	25,31%	10:01 h	5:11 h
Cal 60	Simples	2	0,690 mm	25,58%	10:17 h	3:15 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	25,2 °C	25 %
Mínima	22,6 °C	23 %
Média	24,0 °C	24 %
Desvio padrão	0,72 °C	0,72 %
Tempo fora do limite	1%	1%



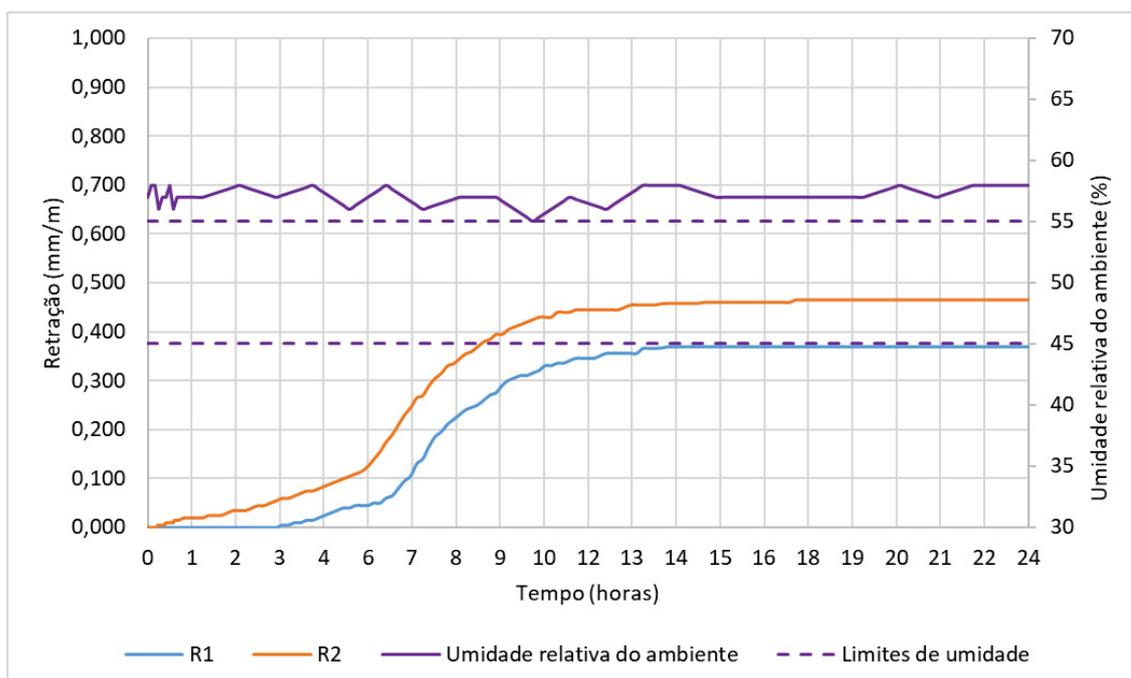
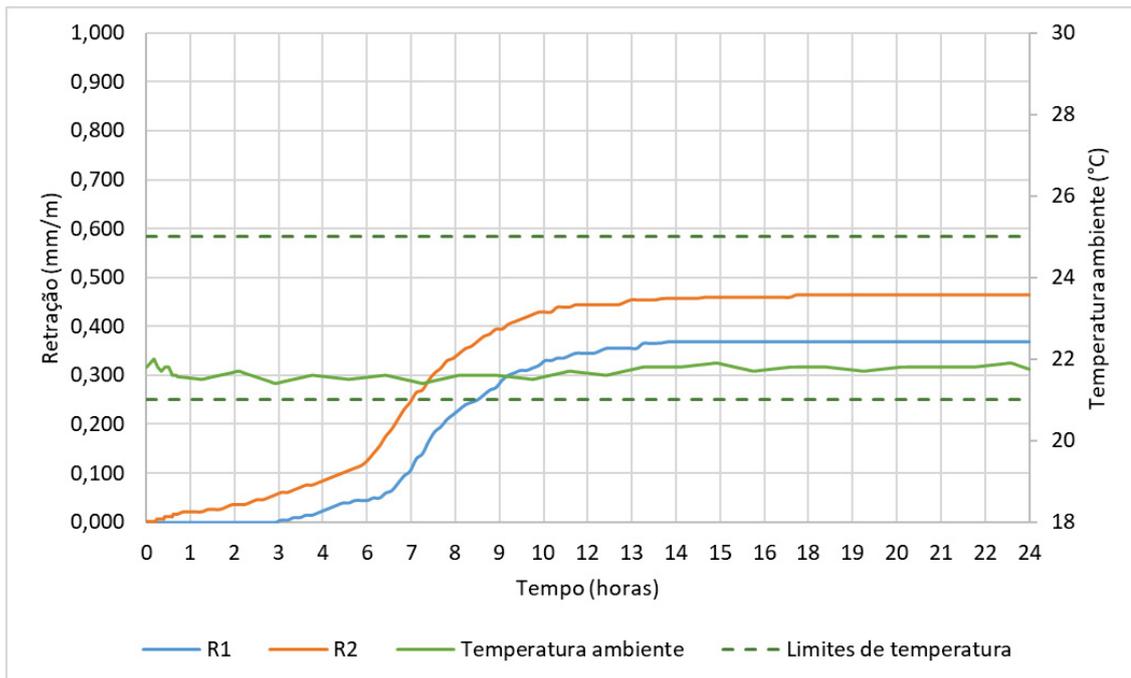
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
Cal 60	Simples	1	0,915 mm	24,52%	9:48	4:21
Cal 60	Simples	2	0,590 mm	24,89%	11:11	2:07

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	23,8 °C	63 %
Mínima	22,4 °C	50 %
Média	22,7 °C	52 %
Desvio padrão	0,30 °C	2,74 %
Tempo fora do limite	0%	10%



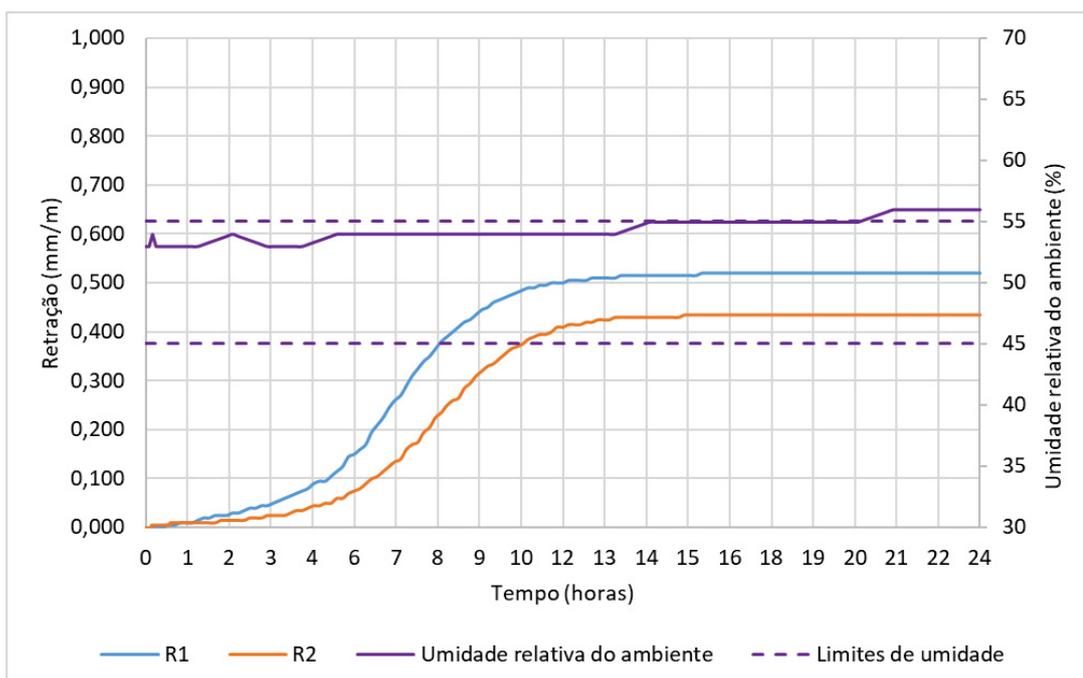
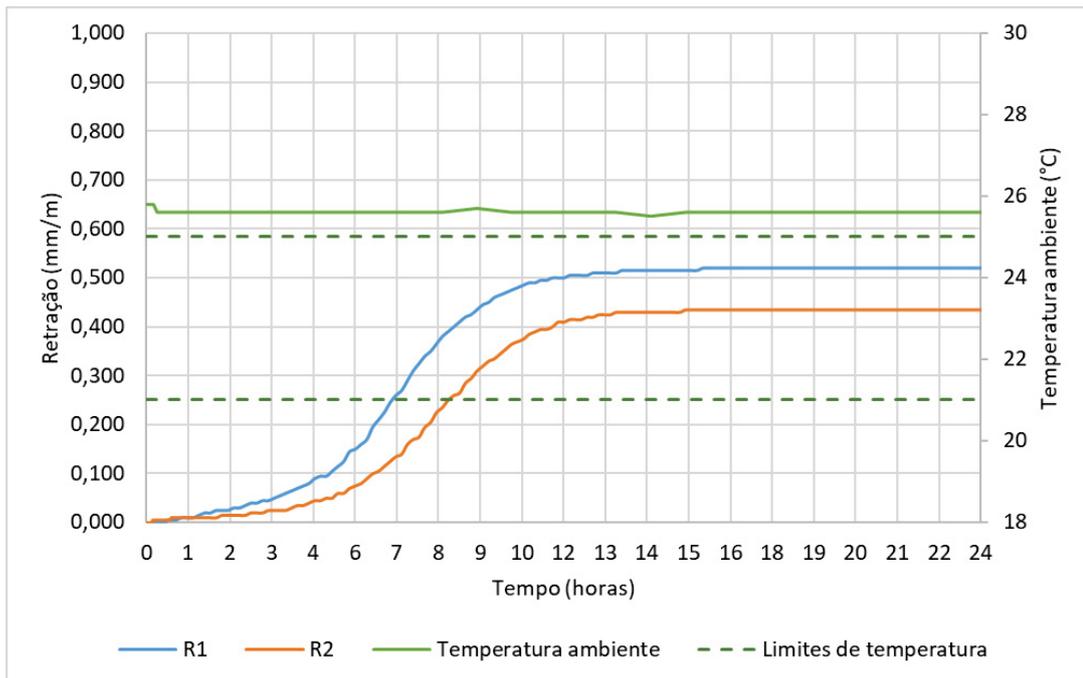
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
Cal 45	Simples	1	0,465 mm	25,47%	10:58	5:03
Cal 45	Simples	2	0,368 mm	23,77%	10:13	3:19

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	22,0 °C	58 %
Mínima	21,4 °C	55 %
Média	21,7 °C	57 %
Desvio padrão	0,14 °C	0,62 %
Tempo fora do limite	0%	99%



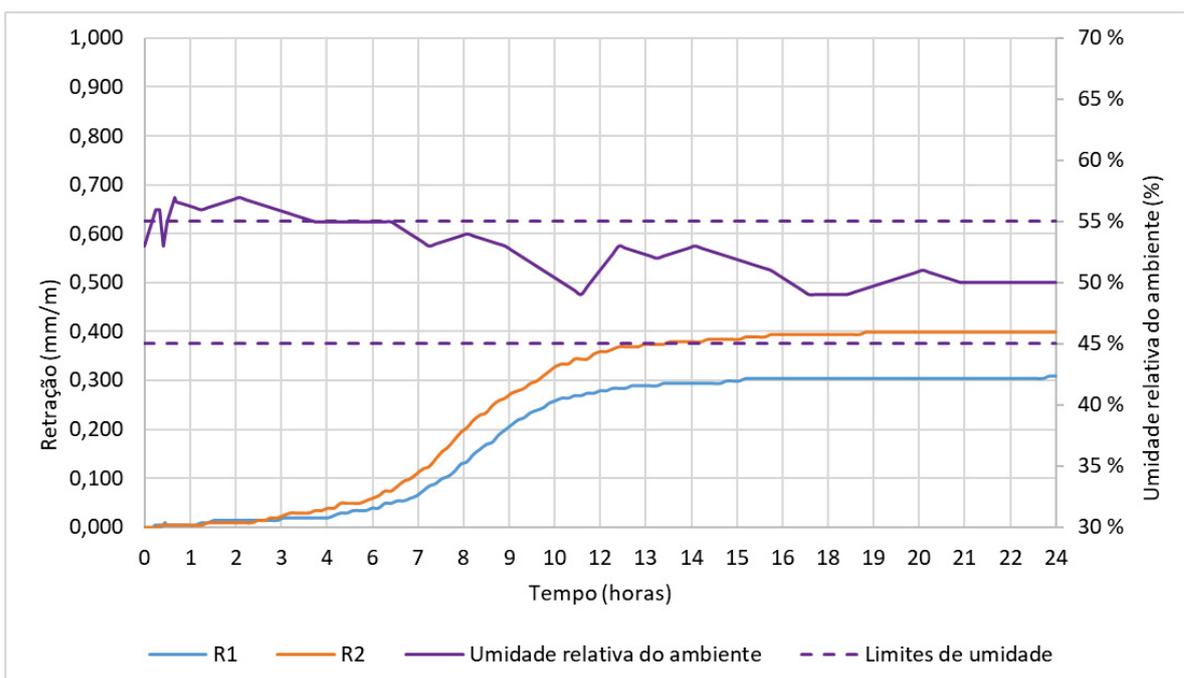
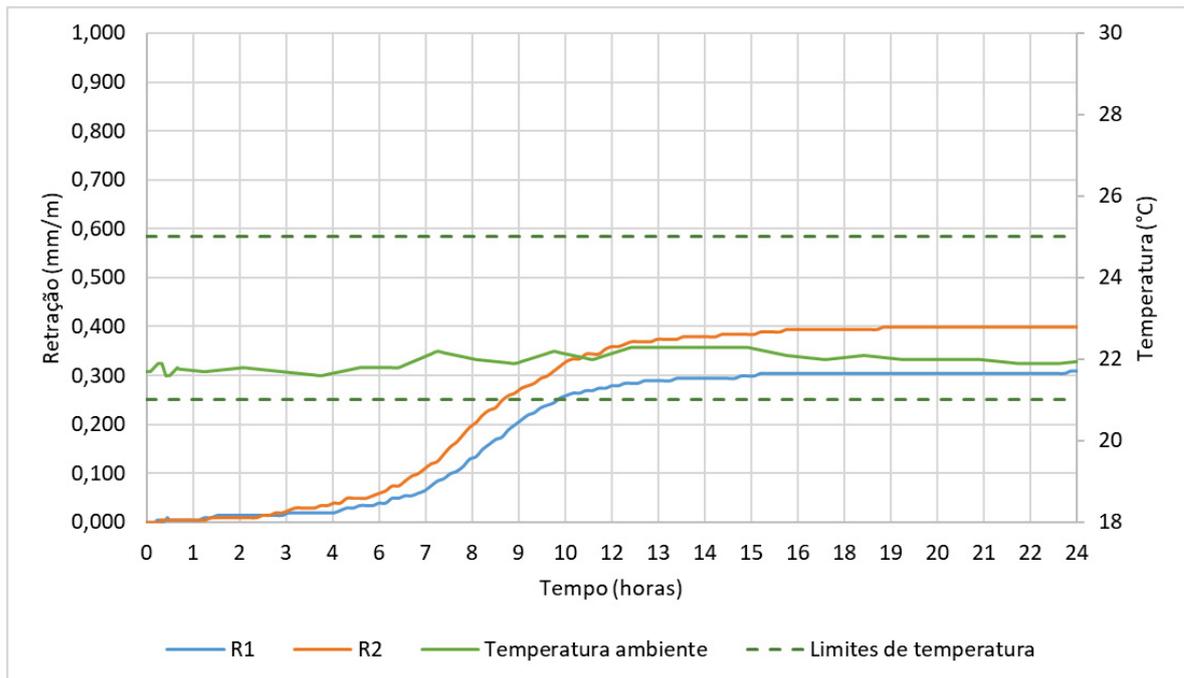
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
Cal 45	Simplex	1	0,520 mm	24,53%	10:12	3:48
Cal 45	Simplex	2	0,435 mm	23,97%	11:11	4:49

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	25,8 °C	56 %
Mínima	25,5 °C	53 %
Média	25,6 °C	54 %
Desvio padrão	0,06 °C	0,95 %
Tempo fora do limite	100%	11%



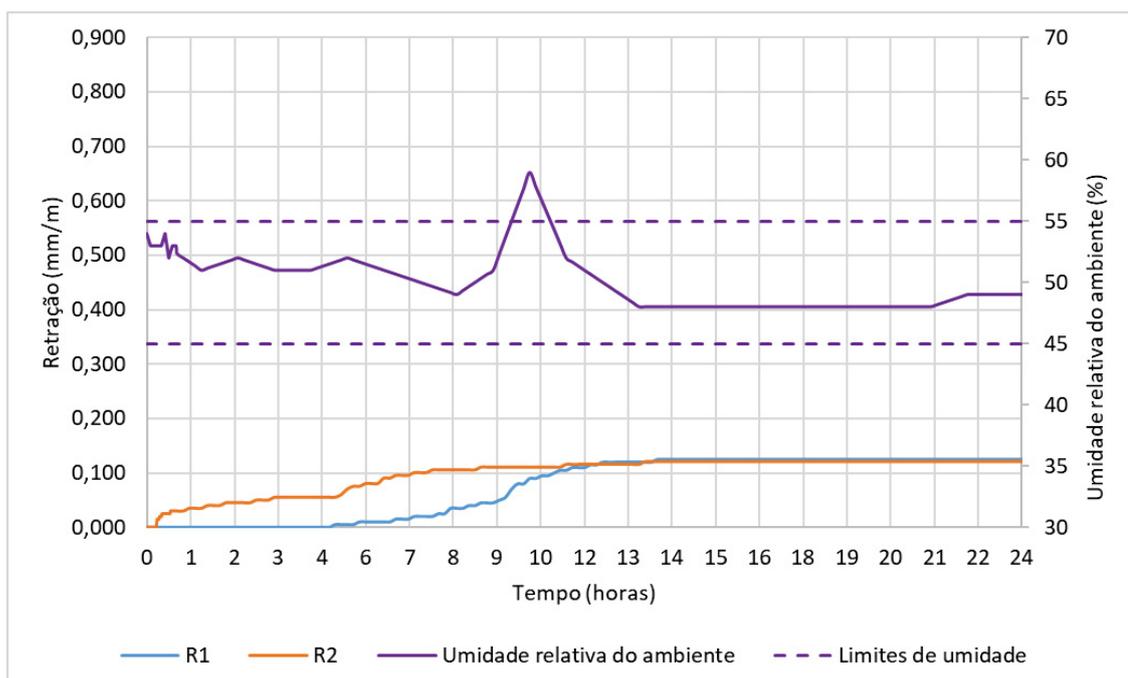
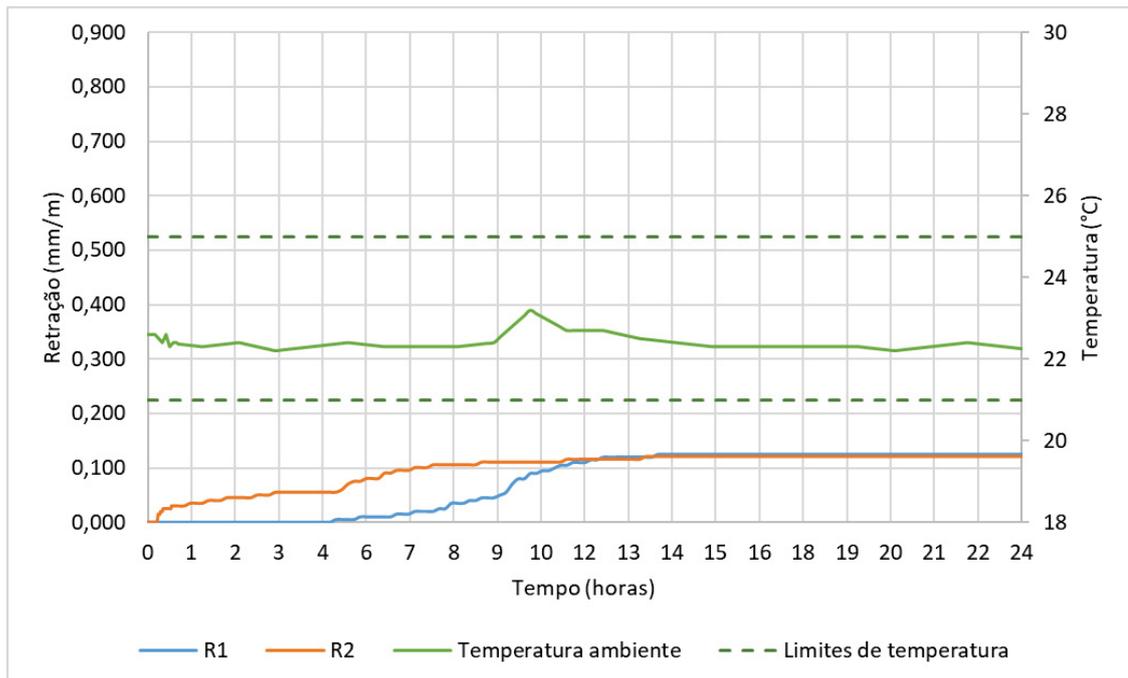
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:1:6	Simples	1	0,310 mm	20,91%	11:53	5:29
1:1:6	Simples	2	0,400 mm	20,53%	11:50	5:08

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	22,3 °C	57 %
Mínima	21,6 °C	49 %
Média	21,9 °C	53 %
Desvio padrão	0,20 °C	2,44 %
Tempo fora do limite	0%	25%



Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:1:6	Simples	1	0,125 mm	22,06%	12:01	6:44
1:1:6	Simples	2	0,120 mm	21,92%	9:09	0:18

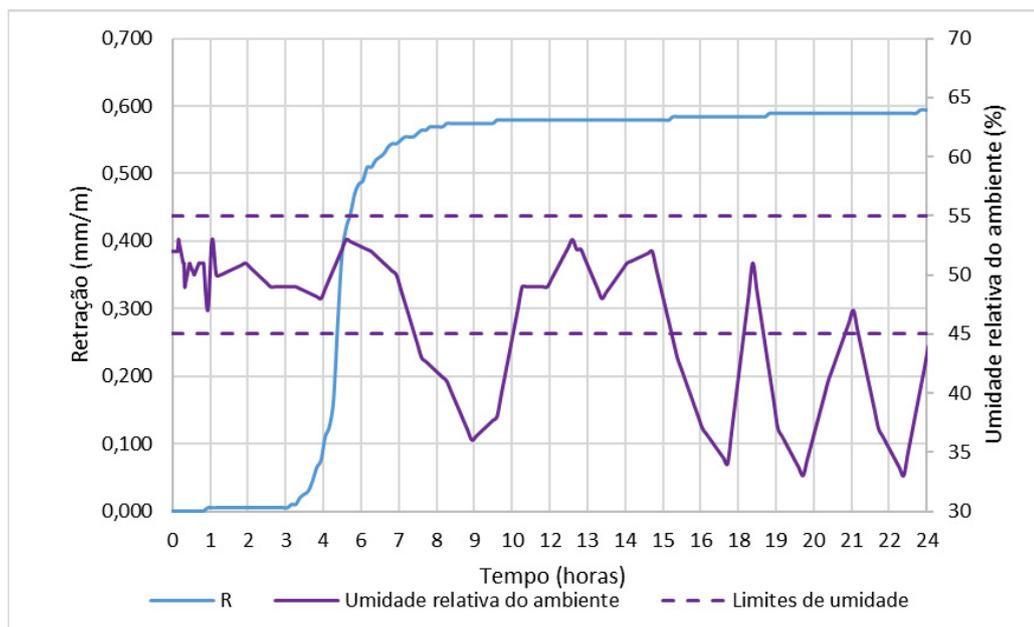
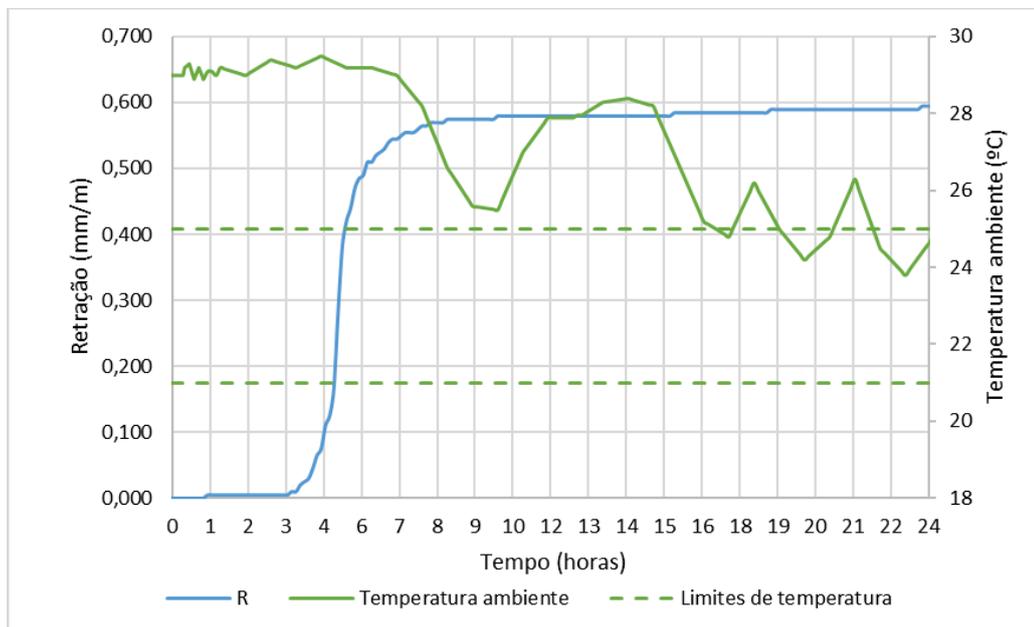
Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	23,2 °C	59 %
Mínima	22,2 °C	48 %
Média	22,4 °C	51 %
Desvio padrão	0,18 °C	2,37 %
Tempo fora do limite	0%	3%



Traços de argamassa de cimento expostos ao ar

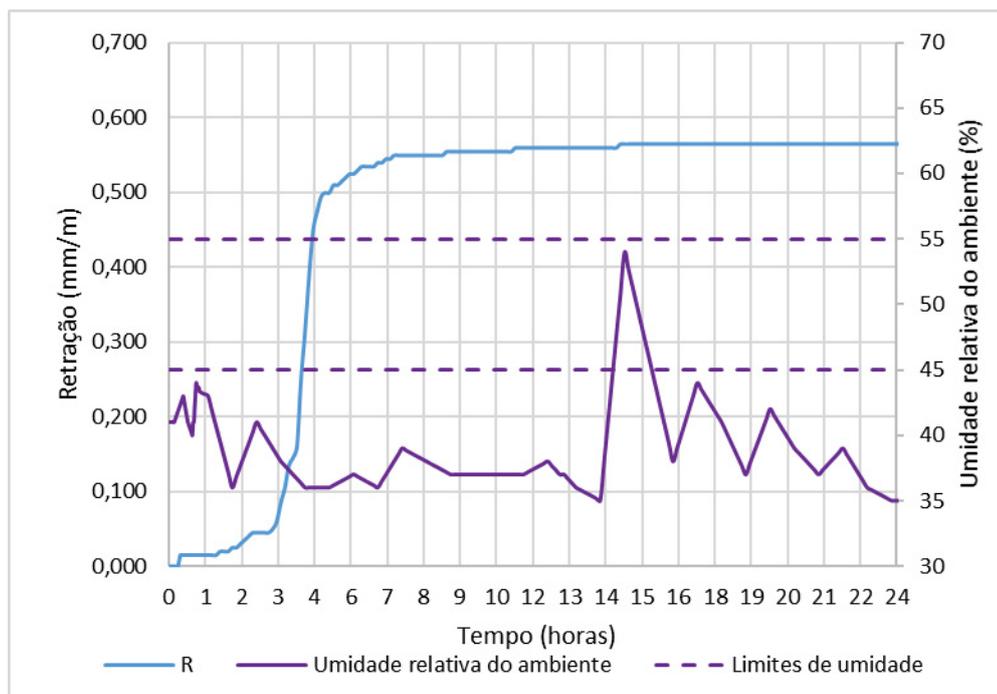
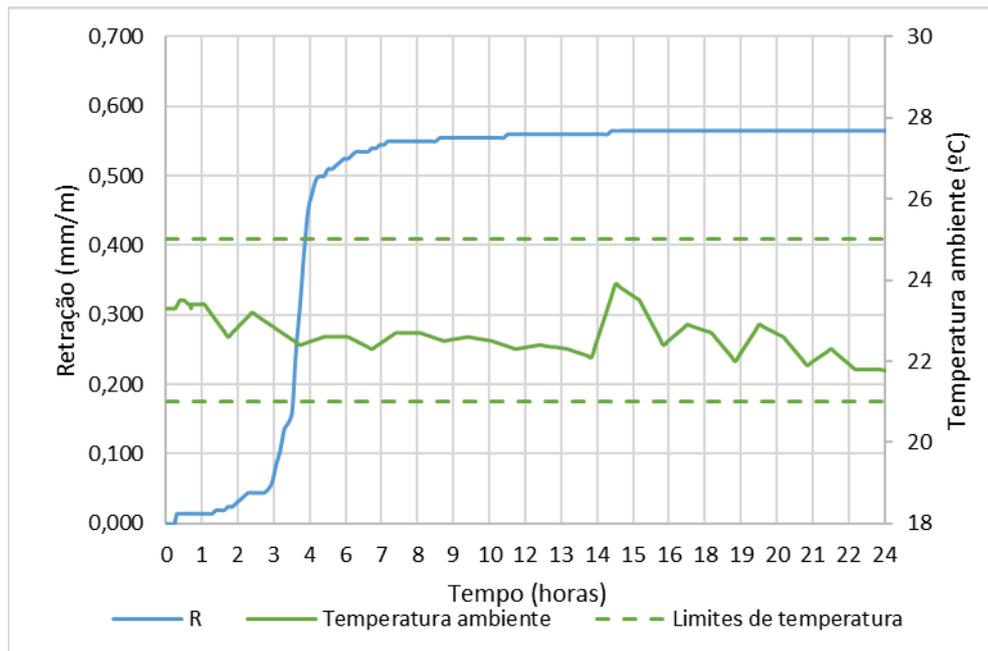
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Simplex	0,595 mm	14,51%	6:40 h	4:25 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	29,5 °C	53 %
Mínima	23,8 °C	33 %
Média	27,4 °C	46 %
Desvio padrão	1,81 °C	5,98 %
Tempo fora do limite	86%	36%



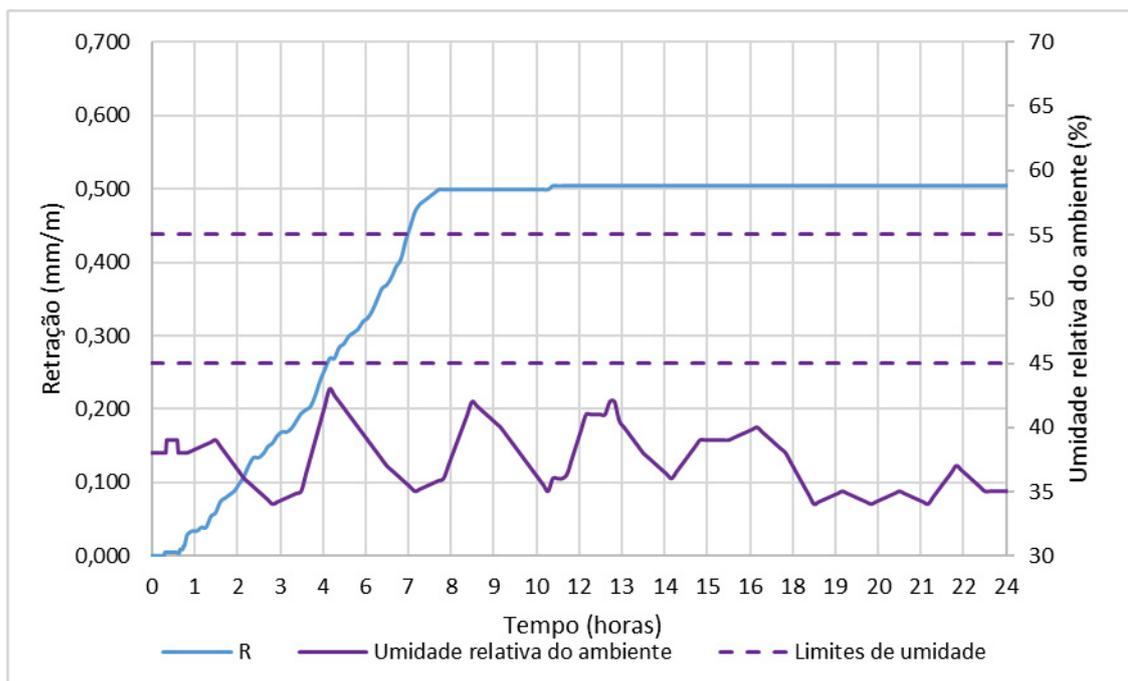
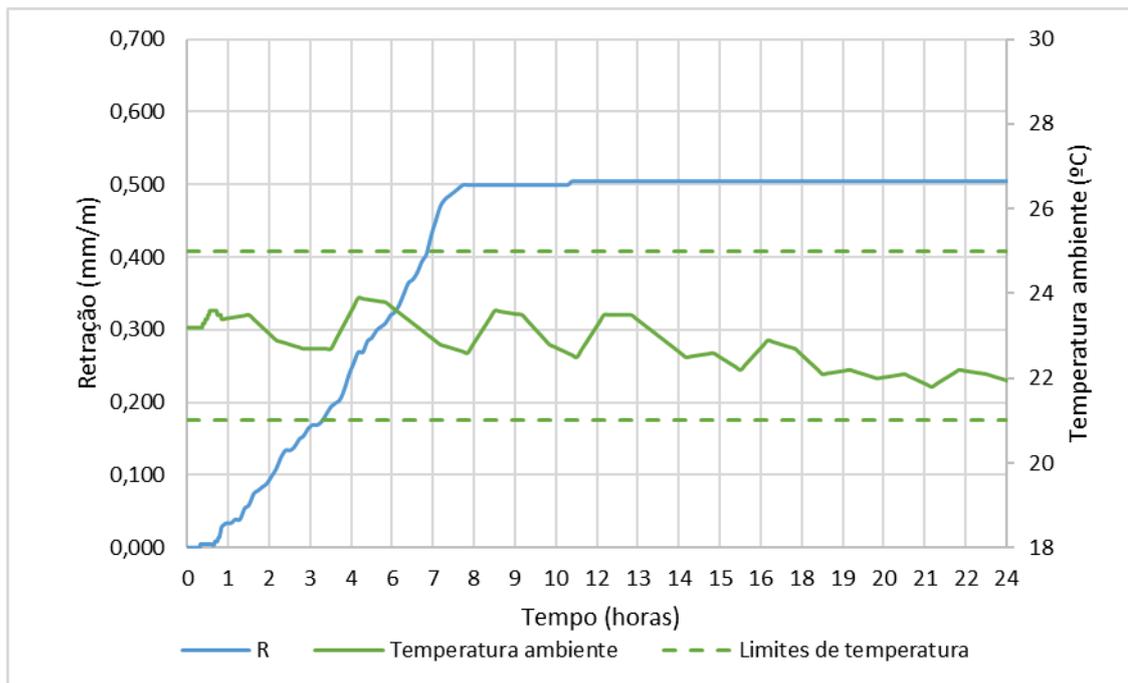
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Simplex	0,565 mm	14,29%	3:52 h	2:00 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	23,9 °C	54 %
Mínima	21,1 °C	33 %
Média	22,3 °C	38 %
Desvio padrão	0,50 °C	3,31 %
Tempo fora do limite	0%	96%



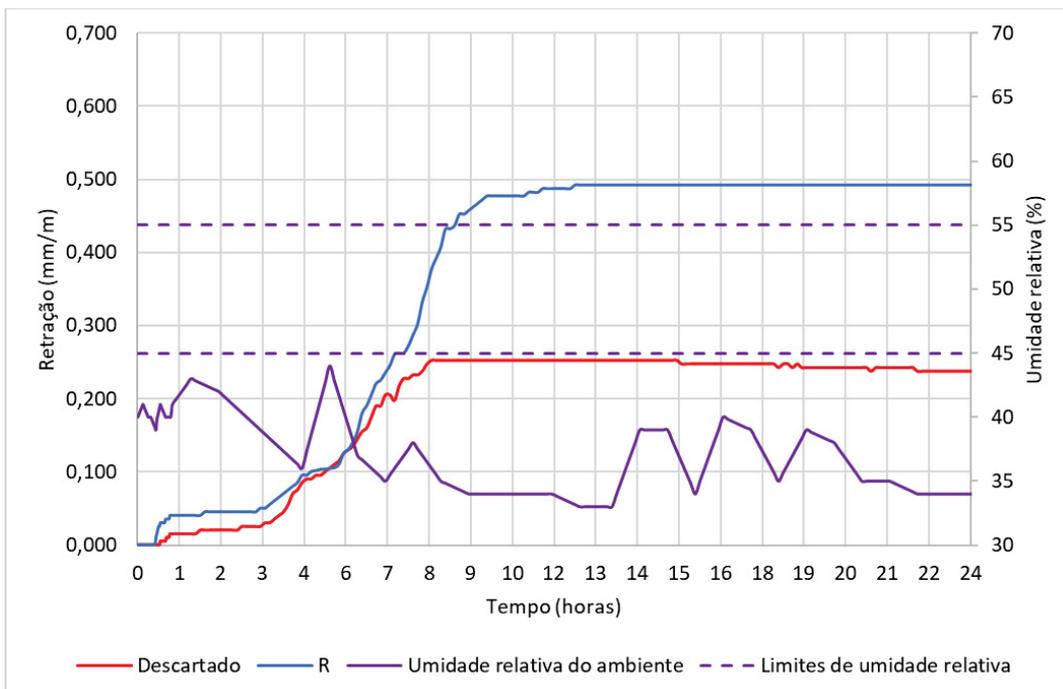
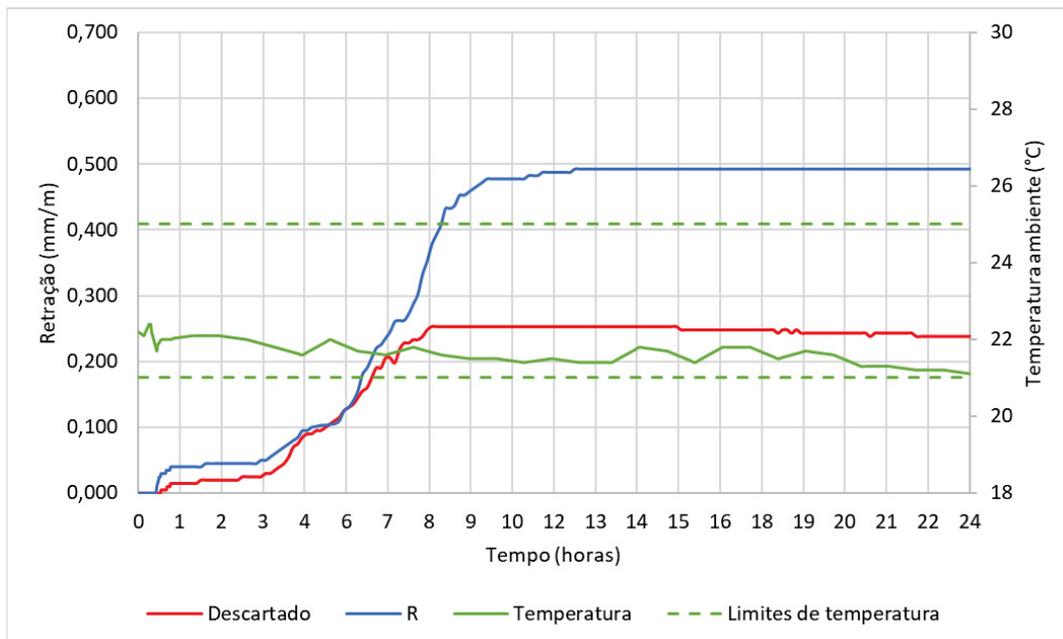
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Simples	0,504 mm	13,82%	7:16 h	1:32 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	26,5 °C	55 %
Mínima	21,8 °C	34 %
Média	23,2 °C	40 %
Desvio padrão	0,56 °C	2,16 %
Tempo fora do limite	0%	100%



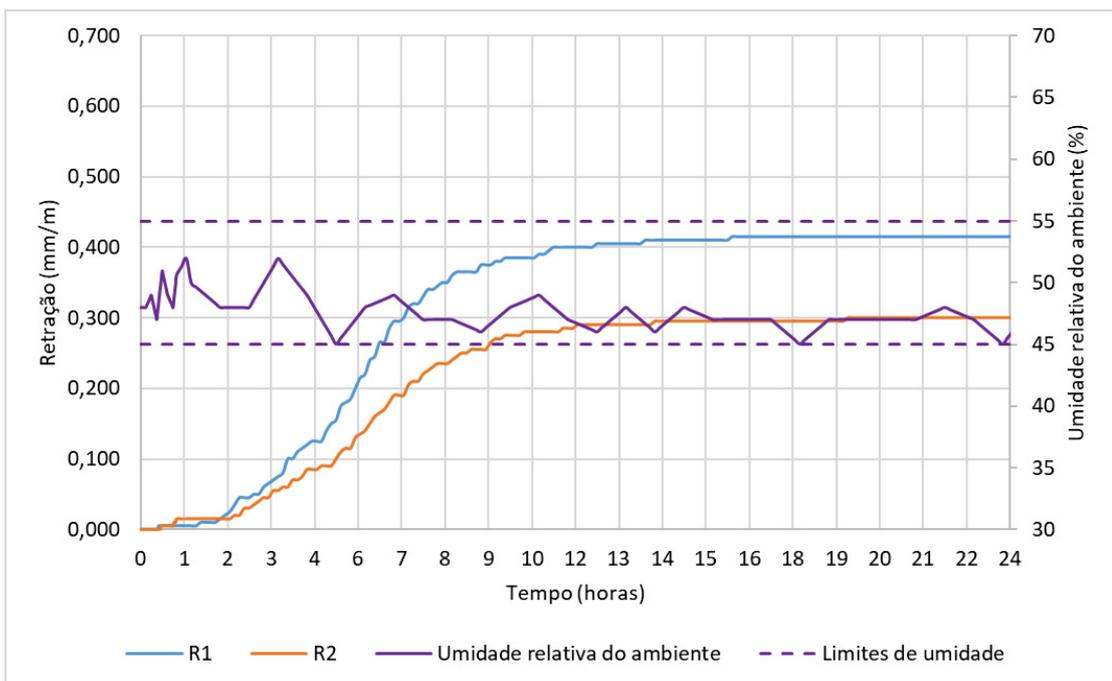
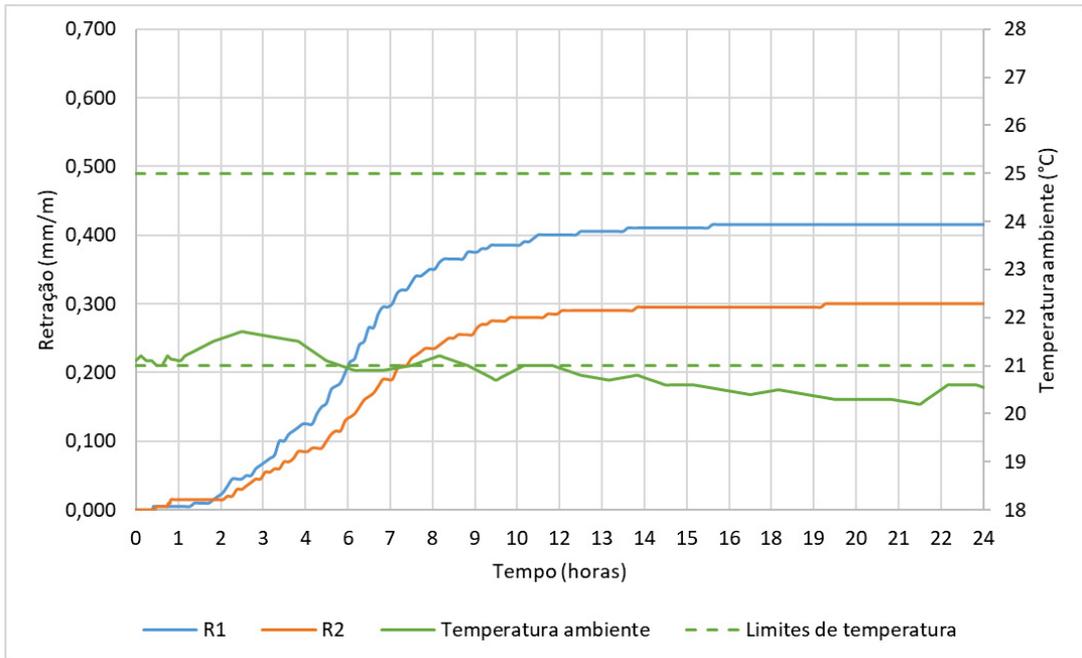
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Simplex	0,492 mm	15,28%	9:05 h	3:20 h
1:3	Simplex	0,255 mm	15,20%	7:20 h	2:48 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	29,5 °C	53 %
Mínima	23,8 °C	33 %
Média	27,4 °C	46 %
Desvio padrão	1,81 °C	5,98 %
Tempo fora do limite	86%	36%



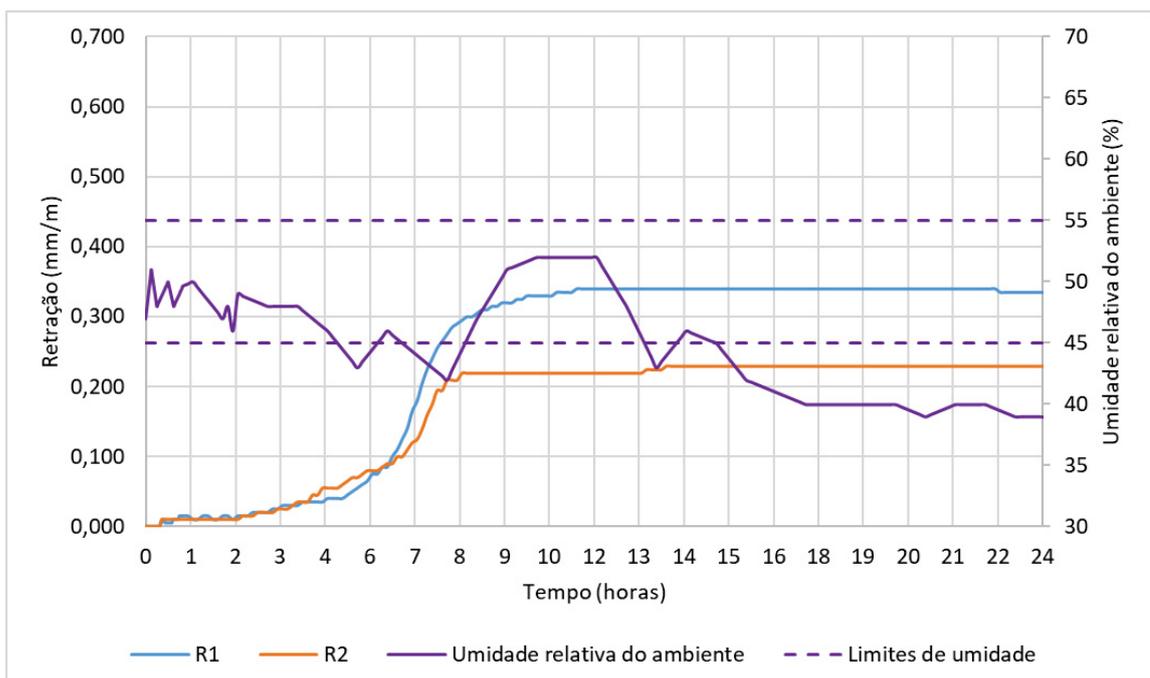
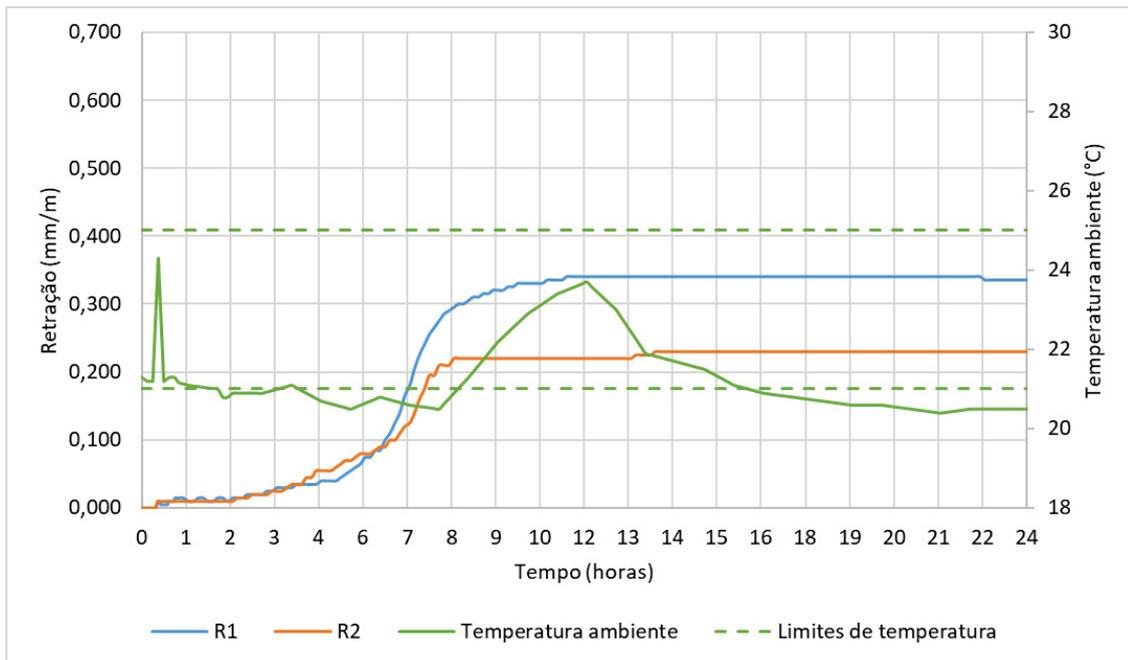
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Simplex	1	0,415 mm	16,36%	9:13 h	2:33 h
1:4	Simplex	2	0,300 mm	16,50%	9:53 h	2:57 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	21,7 °C	52 %
Mínima	20,2 °C	45 %
Média	20,9 °C	48 %
Desvio padrão	0,38 °C	0,38 %
Tempo fora do limite	55%	0%



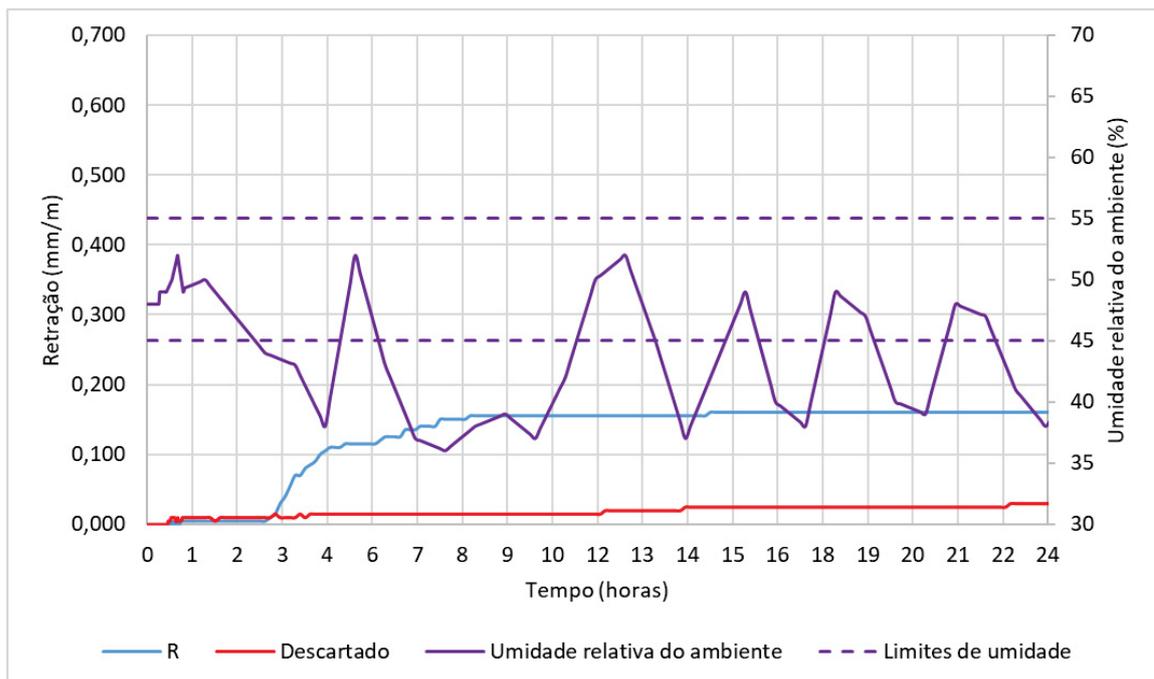
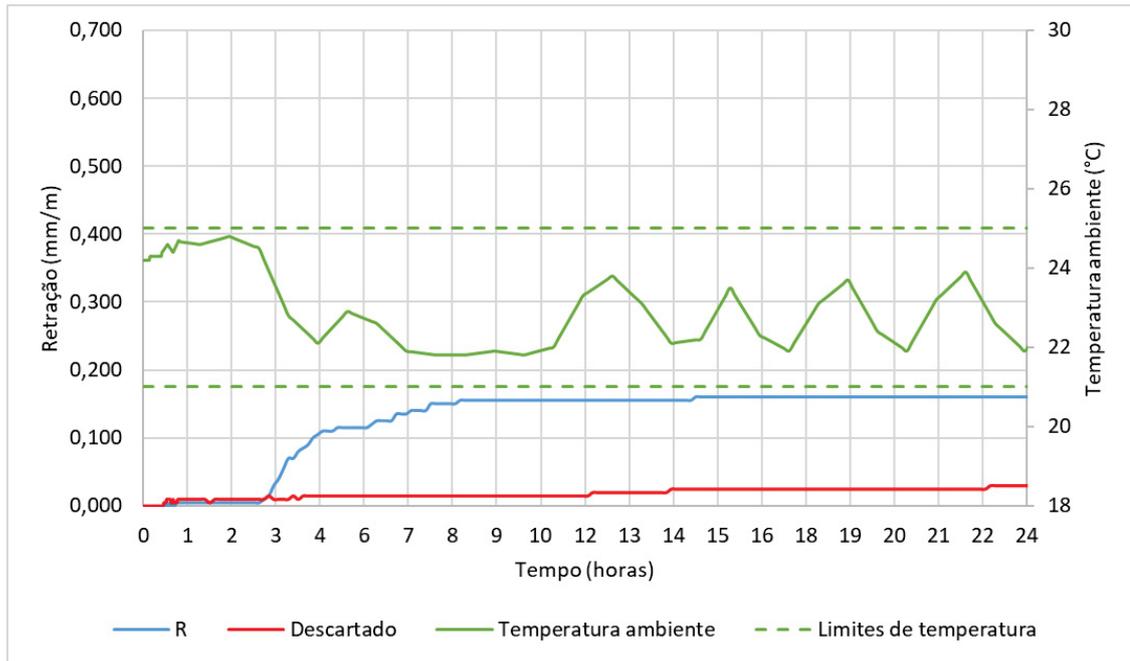
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Simplex	1	0,340 mm	15,96%	8:41 h	4:01 h
1:4	Simplex	2	0,230 mm	15,95%	7:53 h	3:21 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	24,3 °C	52 %
Mínima	20,4 °C	39 %
Média	21,3 °C	45 %
Desvio padrão	0,92 °C	0,92 %
Tempo fora do limite	47%	43%



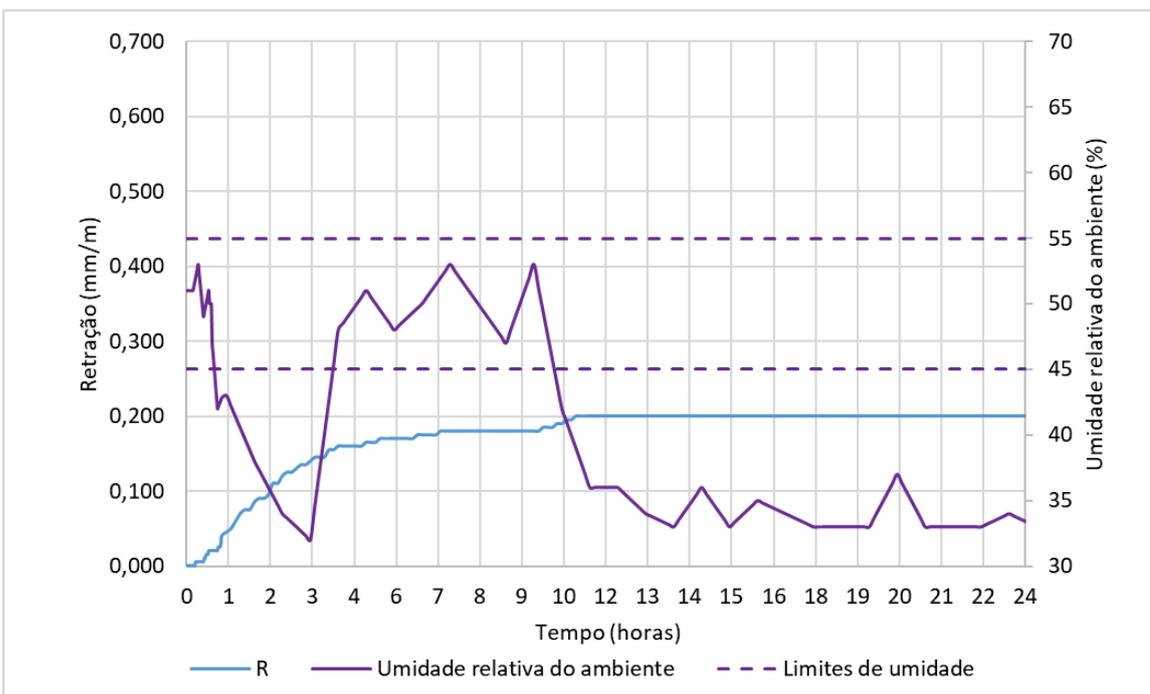
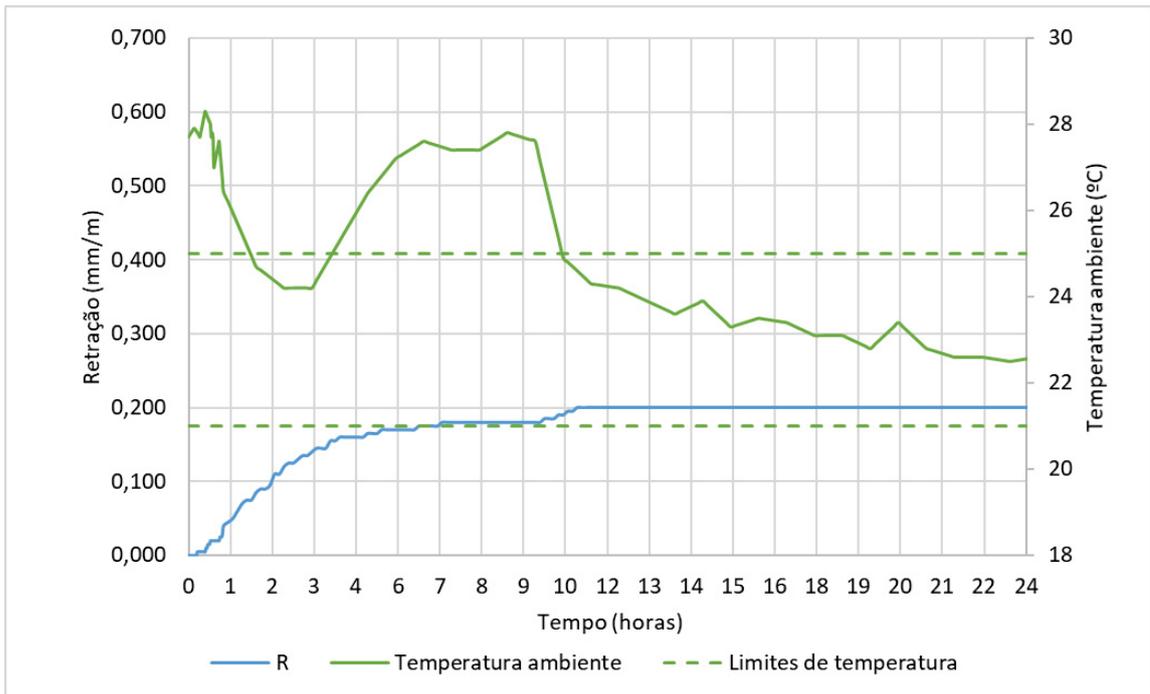
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Simplex	1	0,030 mm	19,60%	22:54 h	0:34 h
1:6	Simplex	2	0,160 mm	19,77%	7:42 h	3:26 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	24,8 °C	52 %
Mínima	21,8 °C	36 %
Média	23,1 °C	44 %
Desvio padrão	1,00 °C	1,00 %
Tempo fora do limite	0%	50%



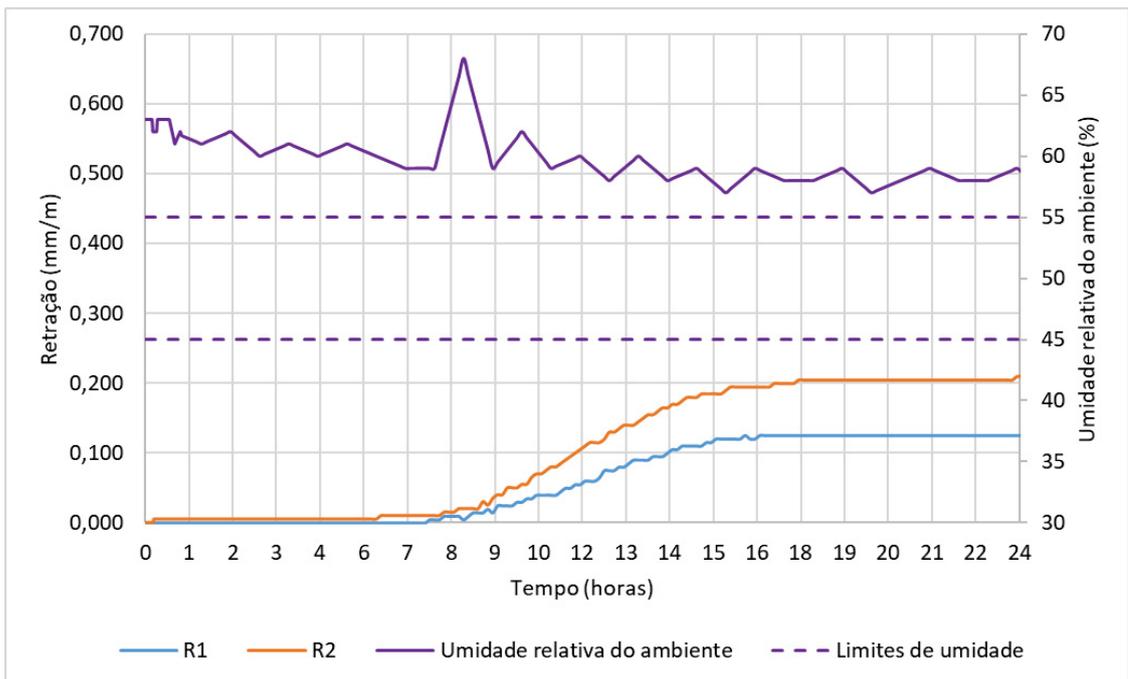
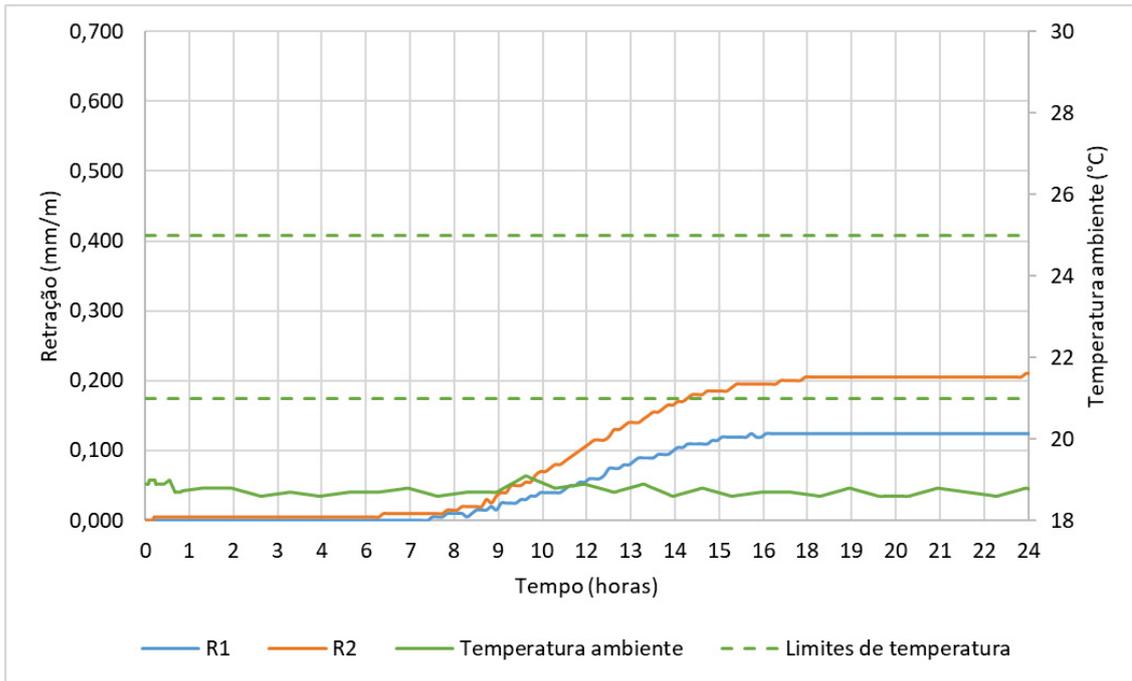
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Simples	0,200 mm	21,75%	4:35 h	0:37 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	28,3 °C	53 %
Mínima	22,5 °C	32 %
Média	25,2 °C	41 %
Desvio padrão	1,99 °C	7,56 %
Tempo fora do limite	44%	63%



Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Simplex	1	0,125 mm	17,78%	14:38 h	8:38 h
1:6	Simplex	2	0,210 mm	17,61%	15:10 h	9:10 h

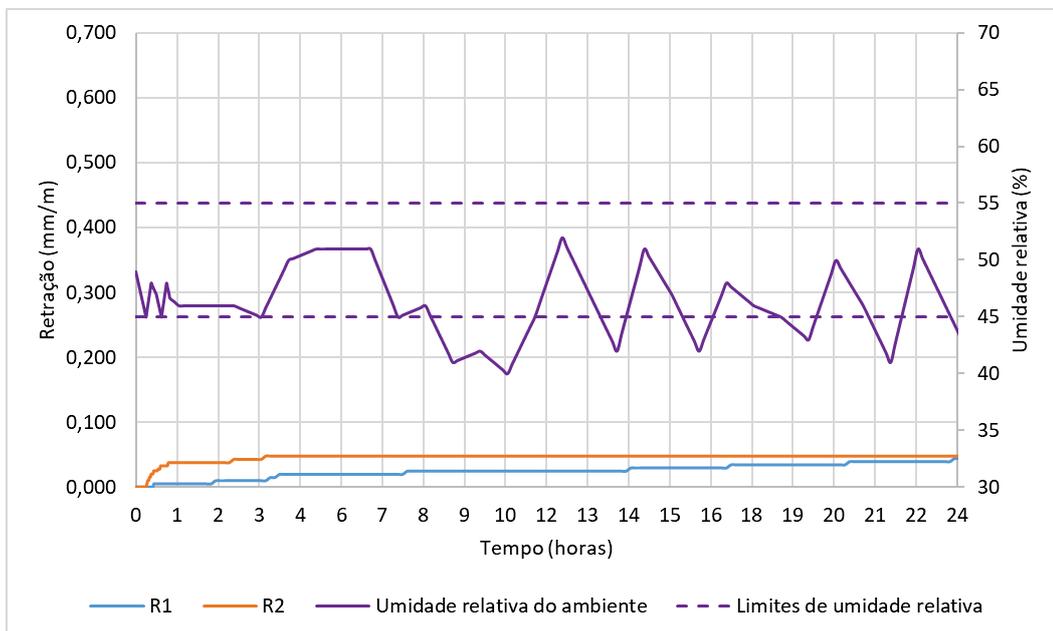
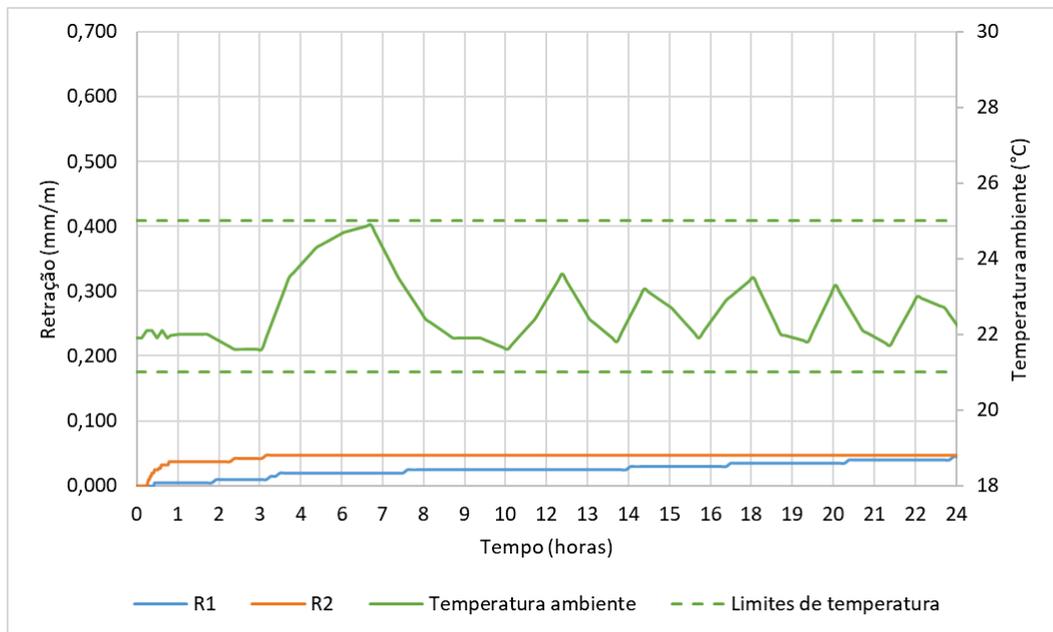
Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	19,1 °C	68 %
Mínima	18,6 °C	57 %
Média	18,8 °C	60 %
Desvio padrão	0,11 °C	0,11 %
Tempo fora do limite	100%	100%



Traços de argamassa de cimento selados por filme PVC

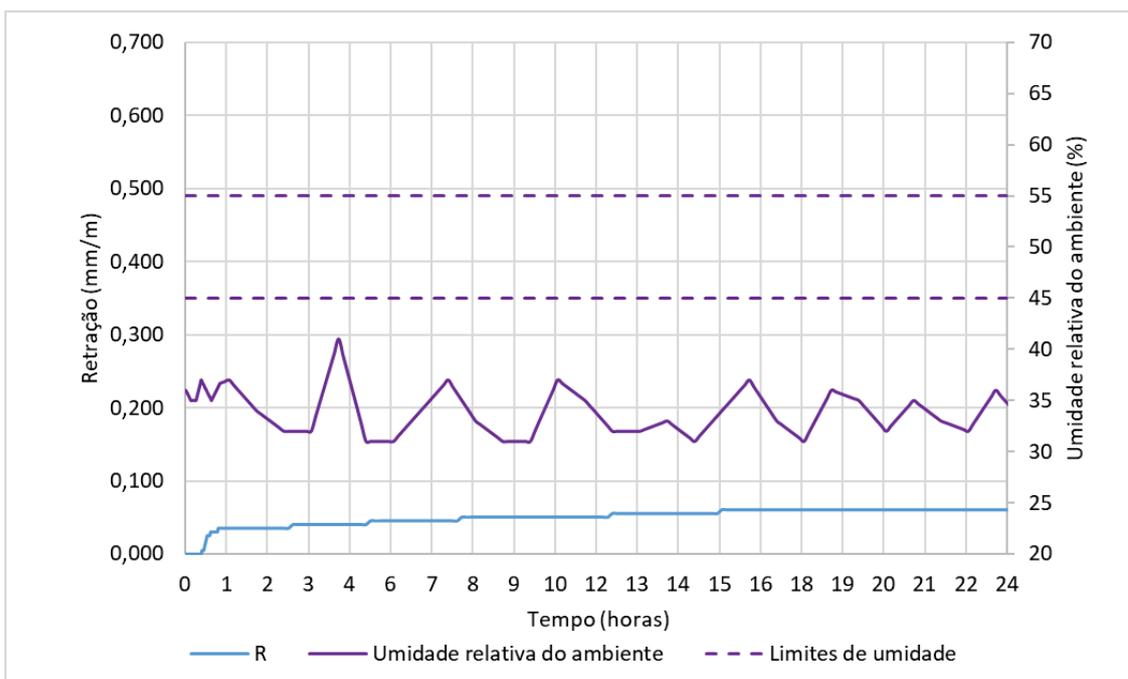
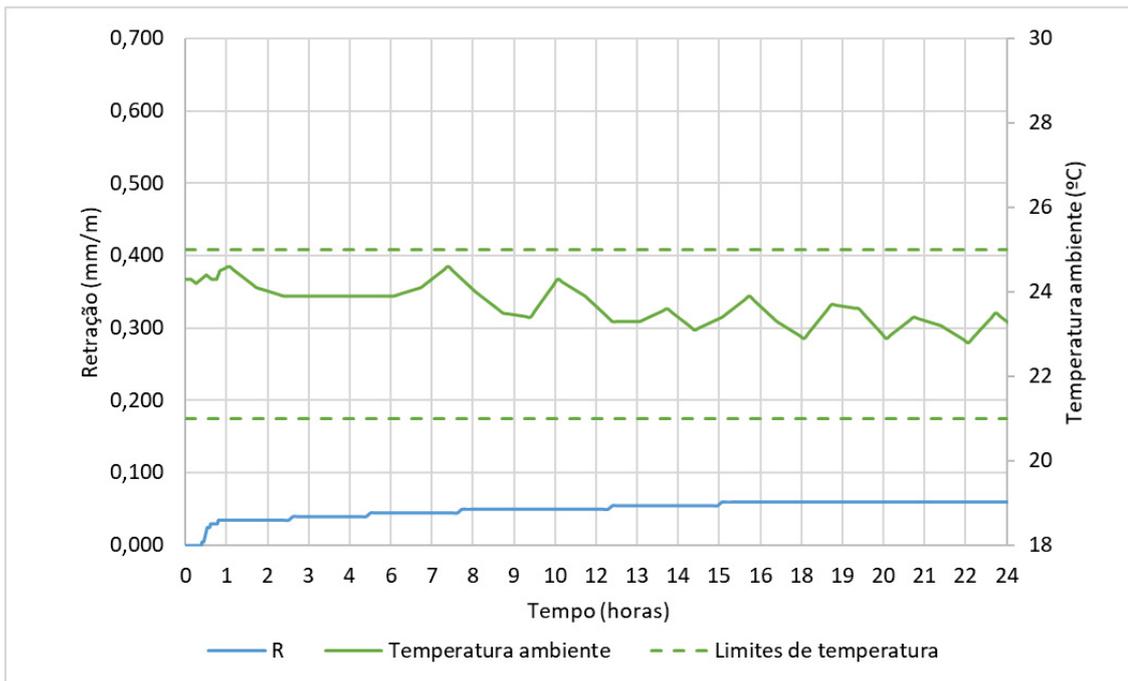
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Selado	1	0,045 mm	3,42%	14:19 h	0:19 h
1:3	Selado	2	0,048 mm	3,01%	1:10 h	0:11 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	24,9 °C	52 %
Mínima	21,6 °C	40 %
Média	22,5 °C	46 %
Desvio padrão	0,81 °C	0,81 %
Tempo fora do limite	0%	23%



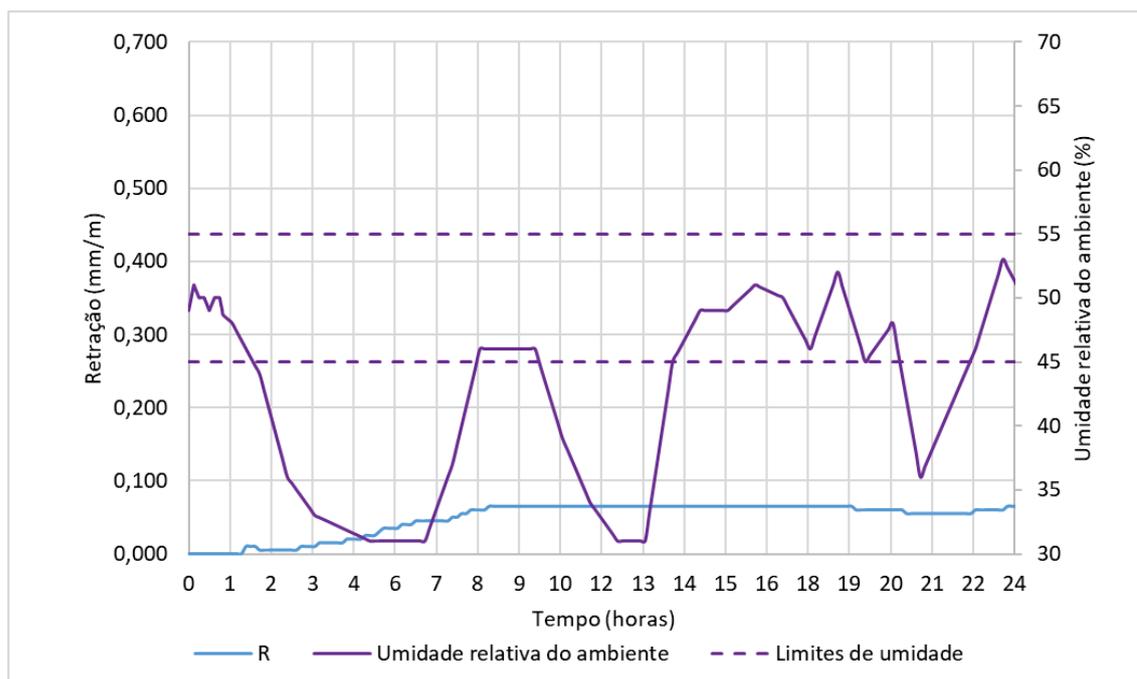
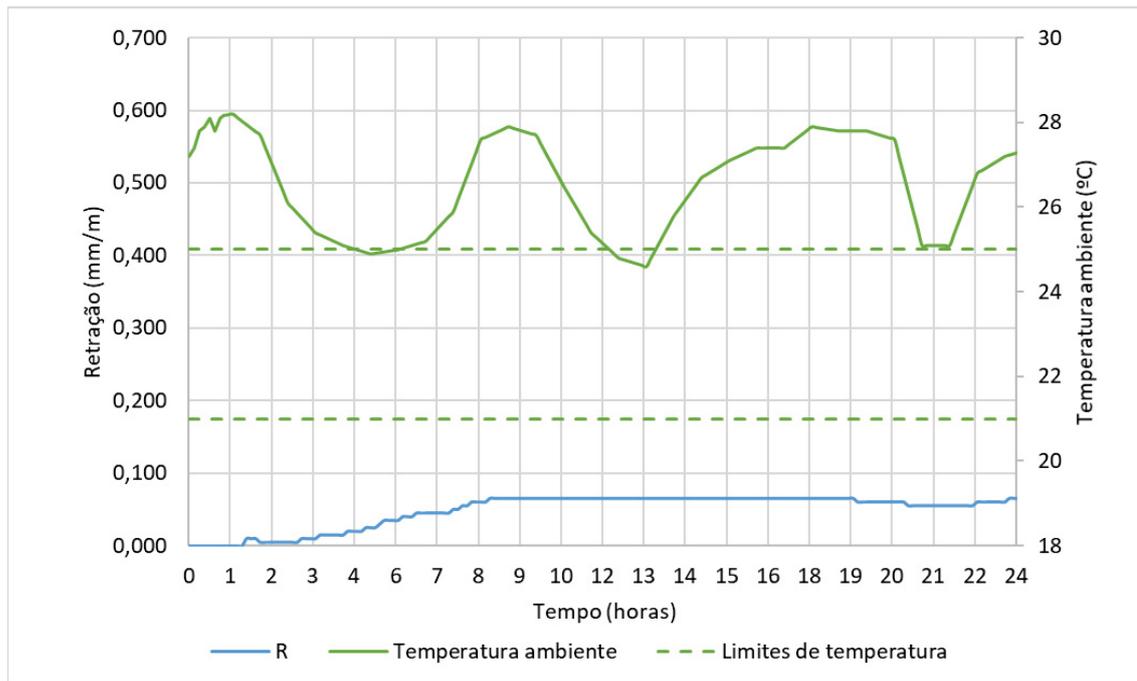
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Selado	0,060 mm	2,00%	7:44 h	0:20 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	24,6 °C	41 %
Mínima	22,8 °C	31 %
Média	23,8 °C	34 %
Desvio padrão	0,46 °C	1,95 %
Tempo fora do limite	0%	100%



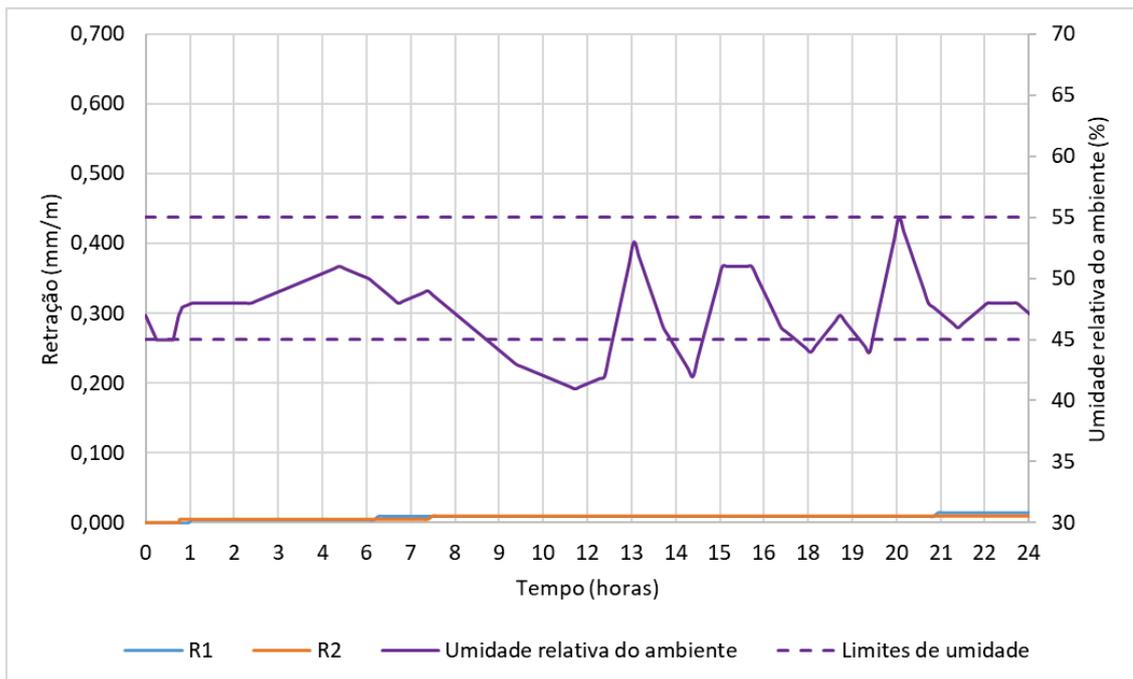
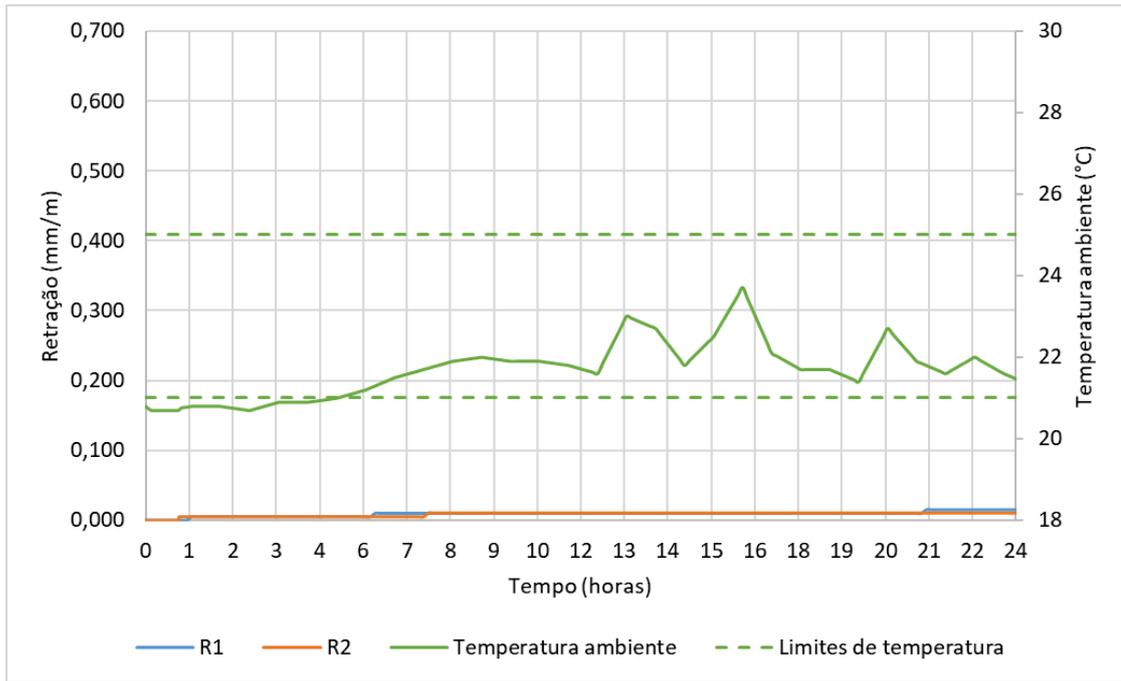
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Selado	0,065 mm	3,76%	5:02 h	1:59 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	28,2 °C	53 %
Mínima	24,6 °C	31 %
Média	26,7 °C	43 %
Desvio padrão	1,15 °C	7,15 %
Tempo fora do limite	90%	43%



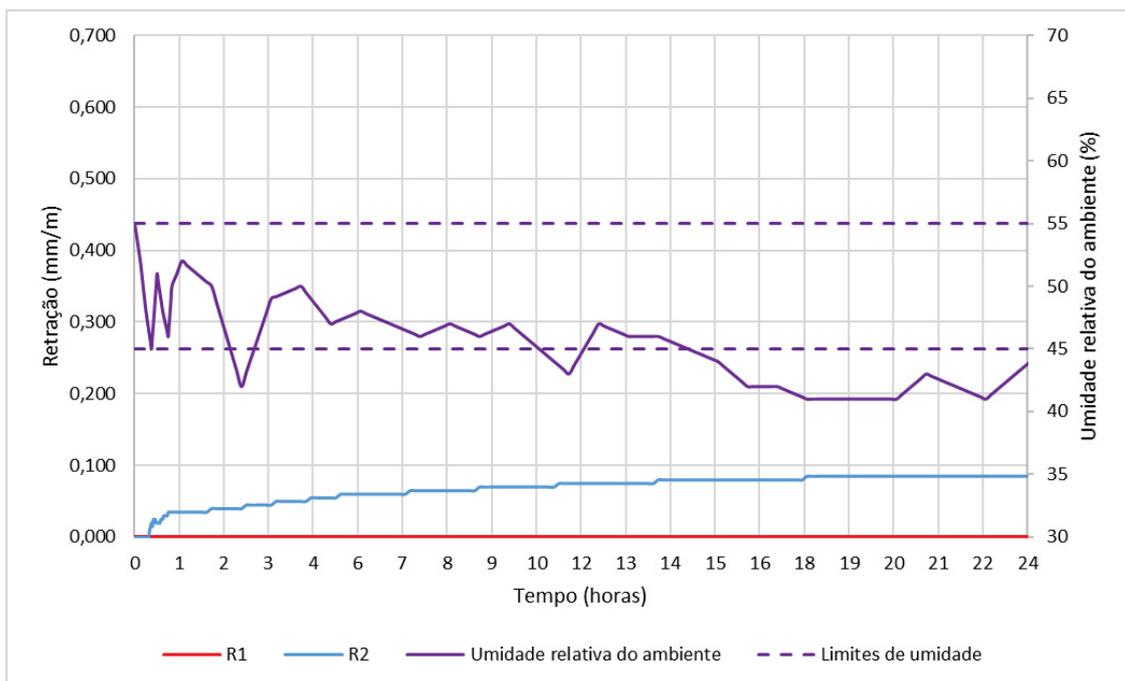
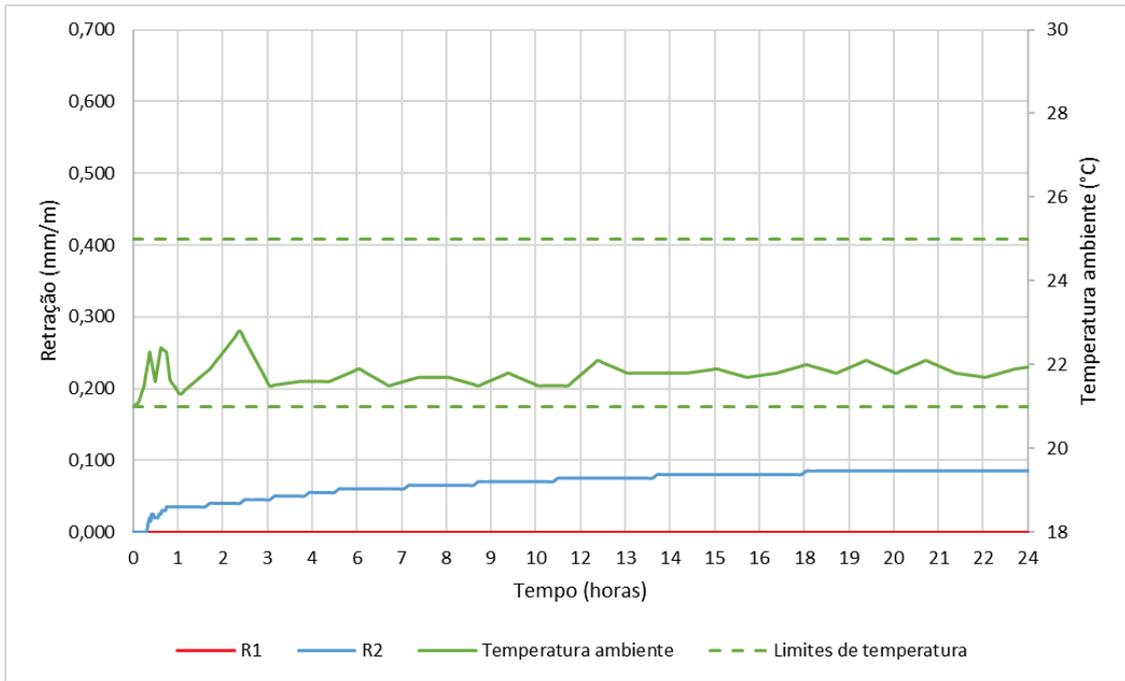
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Selado	1	0,015 mm	4,03%	12:53 h	0:41 h
1:4	Selado	2	0,010 mm	3,93%	4:18 h	0:36 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	23,7 °C	55 %
Mínima	20,7 °C	41 %
Média	21,6 °C	47 %
Desvio padrão	0,71 °C	0,71 %
Tempo fora do limite	34%	17%



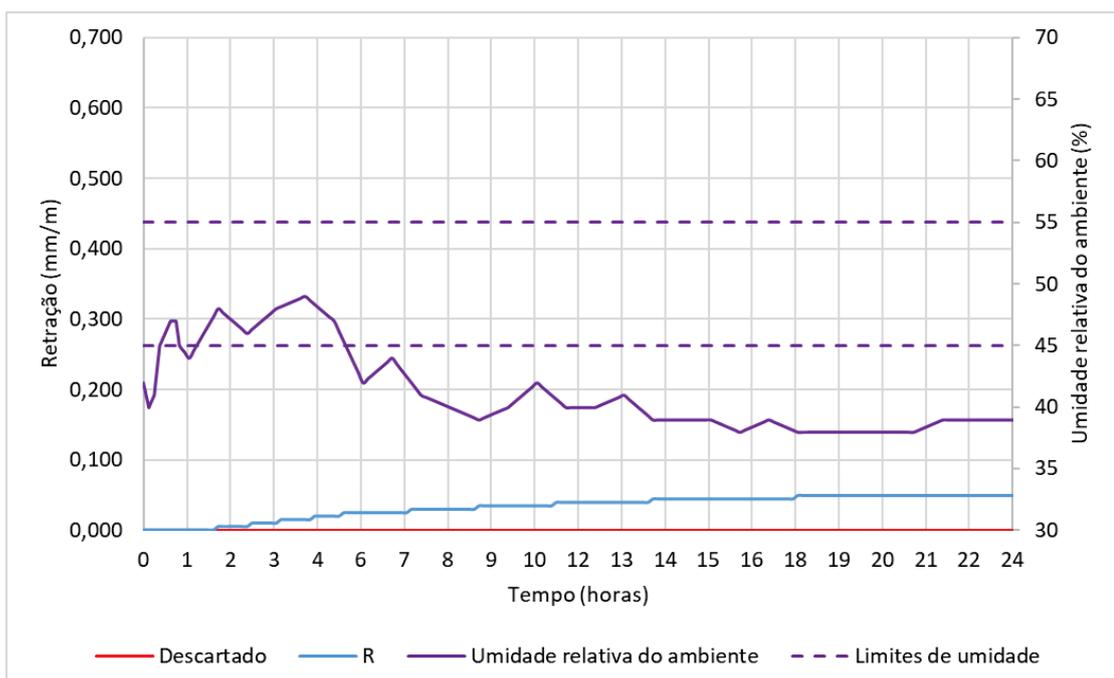
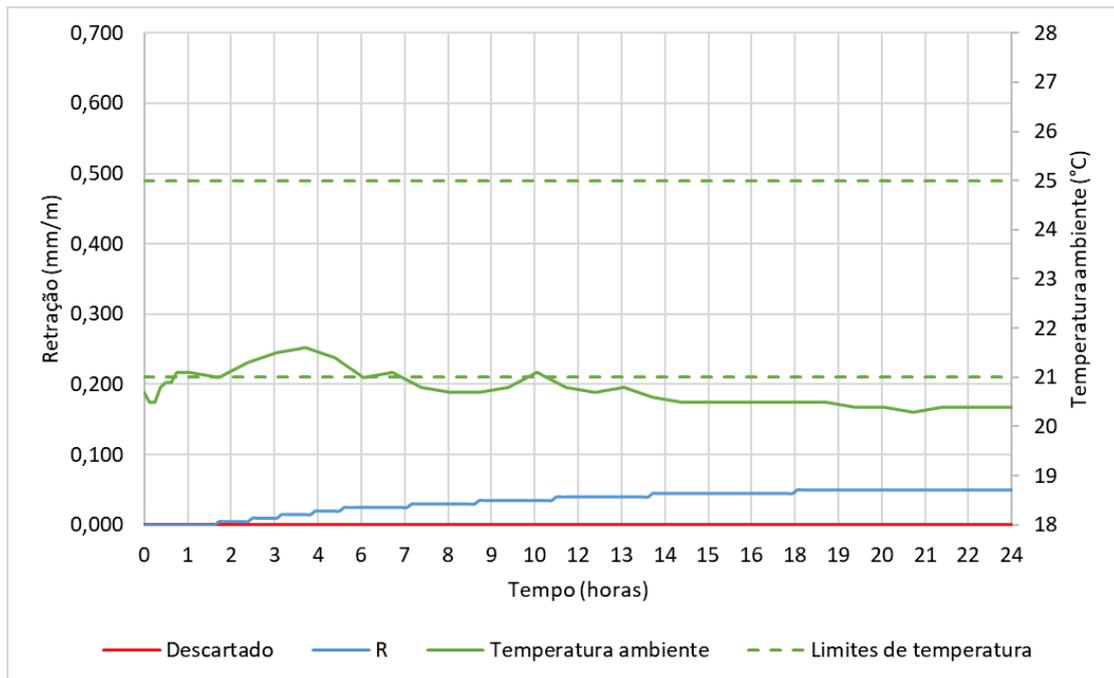
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Selado	1	0,000 mm	3,50%	0:00 h	0:00 h
1:4	Selado	2	0,085 mm	3,93%	8:02 h	0:14 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	22,8 °C	55 %
Mínima	21,0 °C	41 %
Média	21,8 °C	46 %
Desvio padrão	0,81 °C	0,81 %
Tempo fora do limite	0%	38%



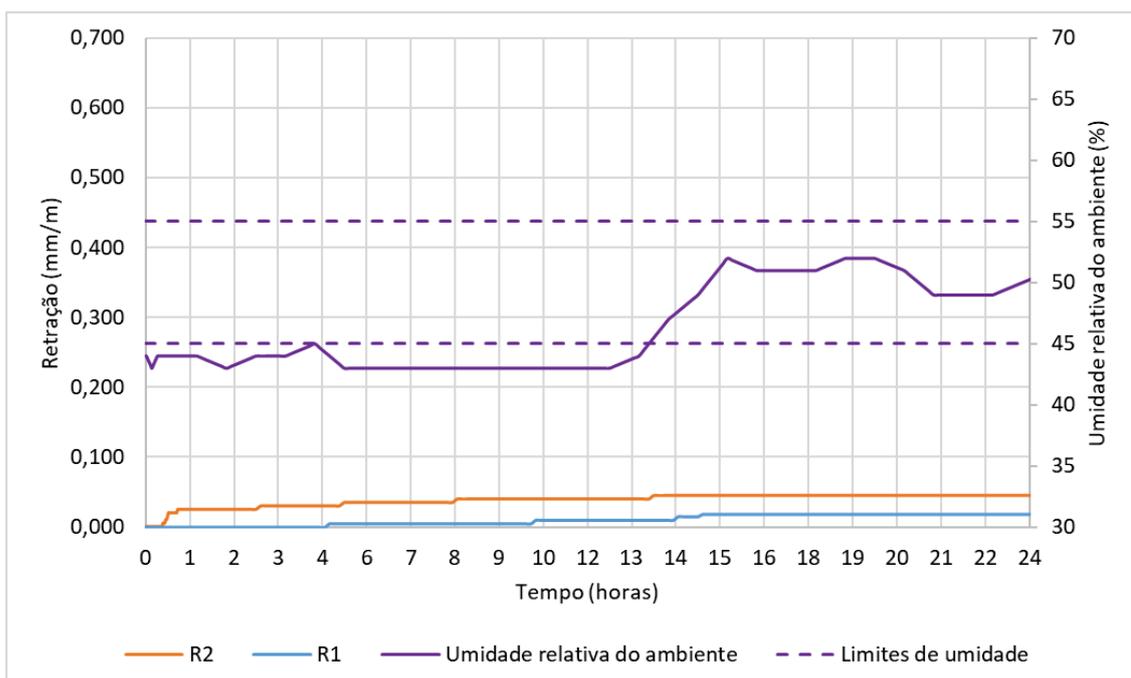
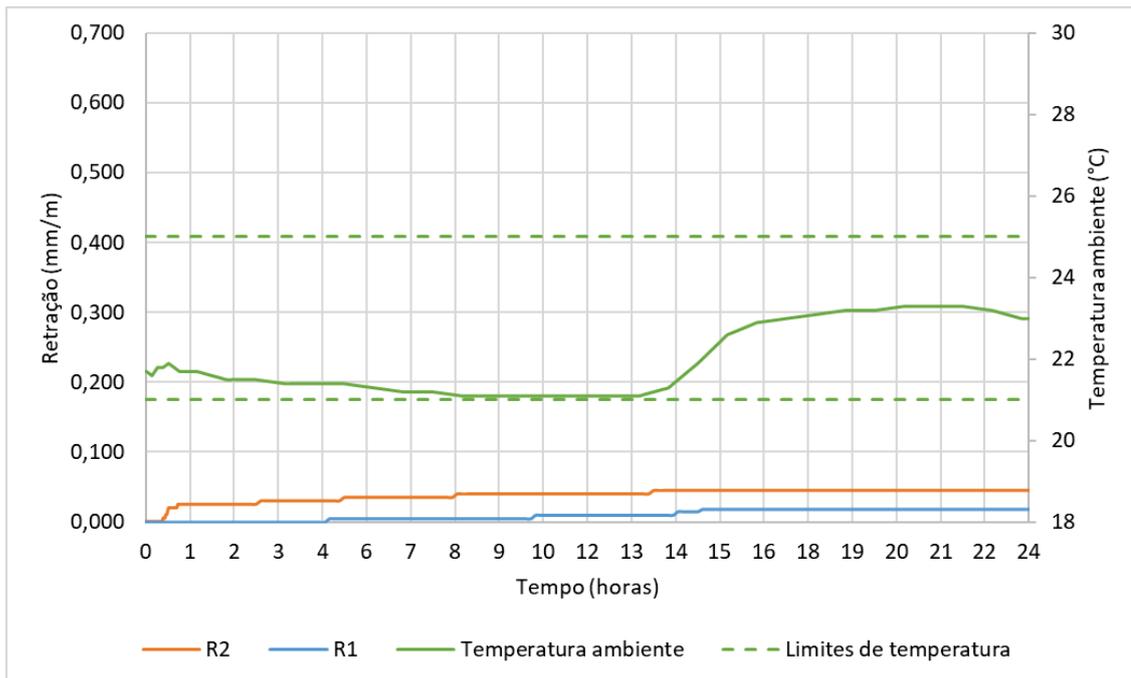
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Selado	0,000 mm	2,99%	0:00 h	0:00 h
1:4	Selado	0,050 mm	3,65%	10:36 h	1:14 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	21,6 °C	22 %
Mínima	20,3 °C	20 %
Média	20,8 °C	21 %
Desvio padrão	0,33 °C	0,33 %
Tempo fora do limite	72%	72%



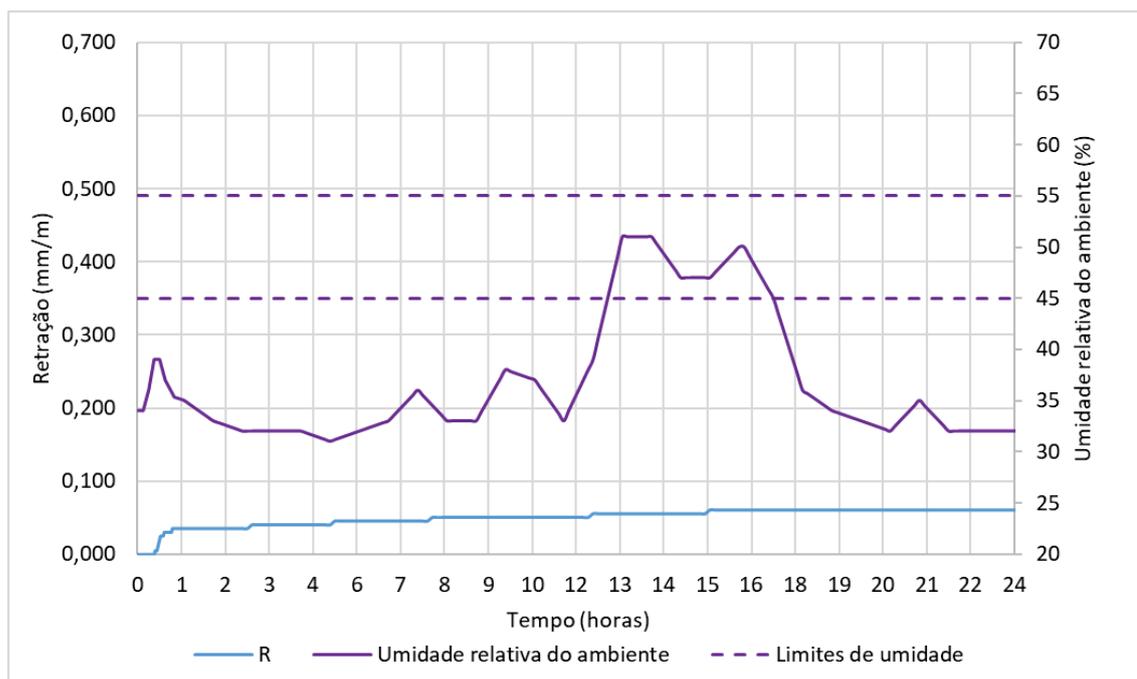
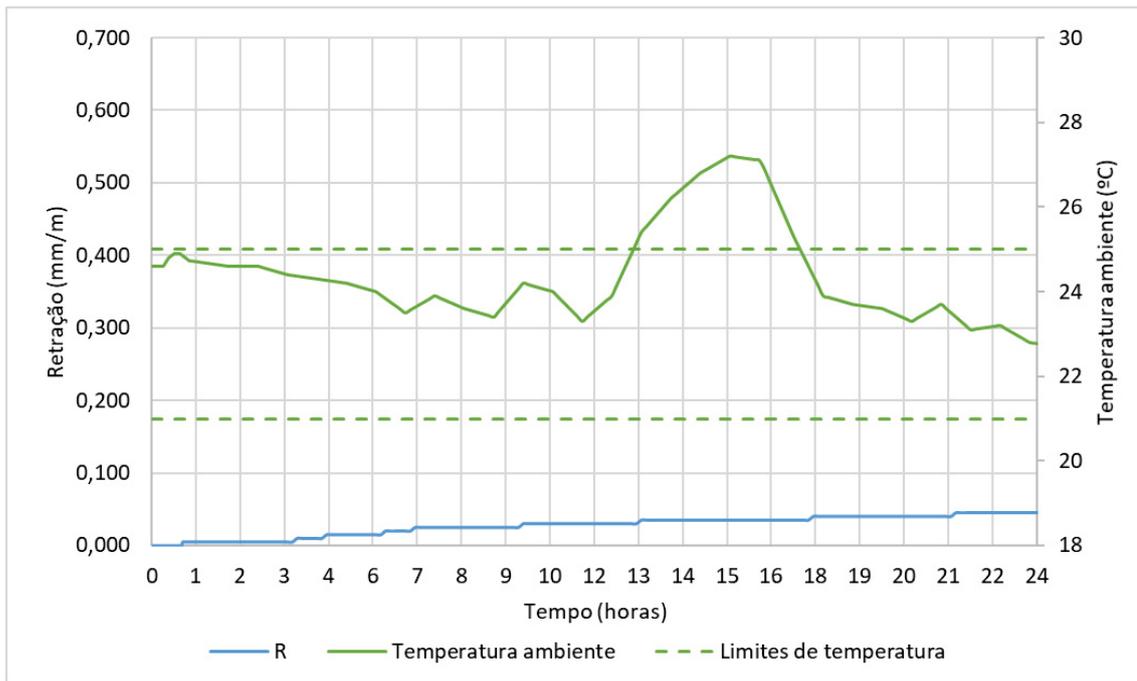
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Selado	1	0,045 mm	4,40%	8:22 h	2:25 h
1:6	Selado	2	0,018 mm	4,81%	4:37 h	0:18 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	23,3 °C	52 %
Mínima	21,1 °C	43 %
Média	21,9 °C	46 %
Desvio padrão	0,81 °C	0,81 %
Tempo fora do limite	0%	63%



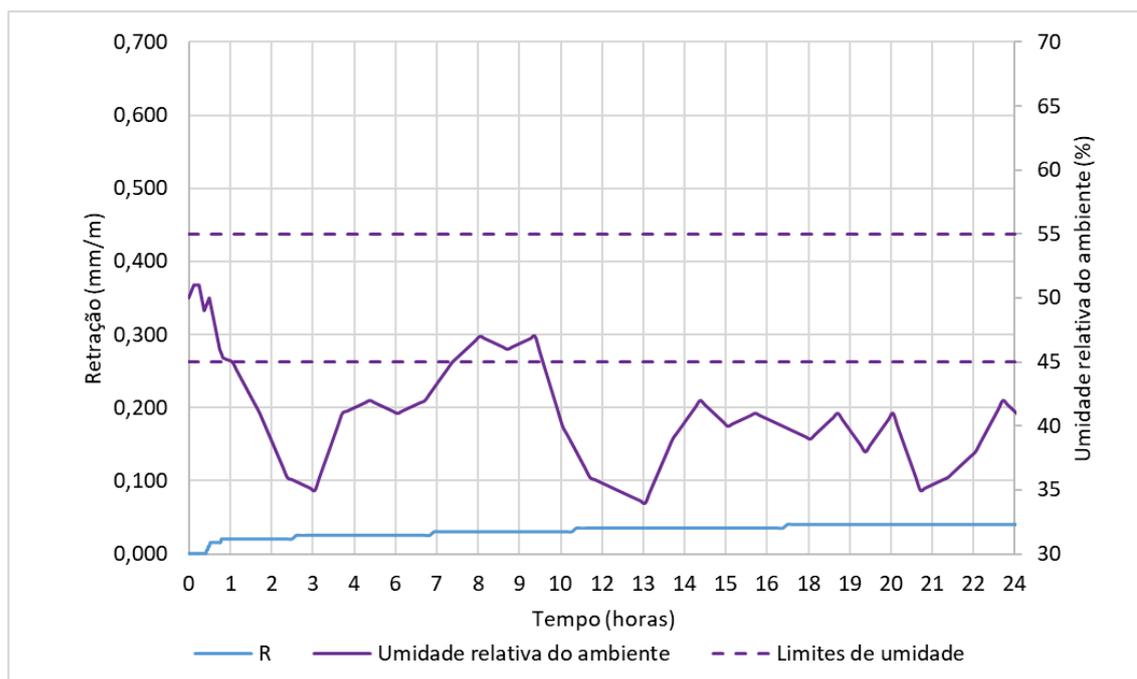
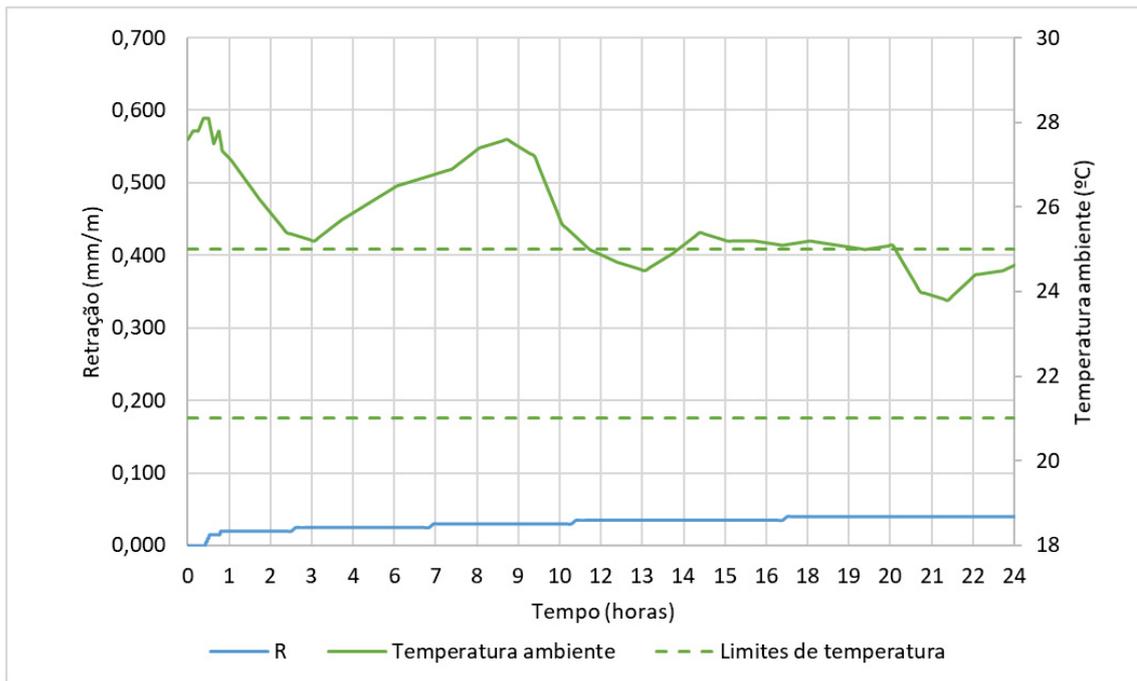
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Selado	0,045 mm	5,66%	11:02 h	0:32 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	27,2 °C	51 %
Mínima	22,8 °C	31 %
Média	24,4 °C	37 %
Desvio padrão	1,05 °C	5,72 %
Tempo fora do limite	16%	84%



Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Selado	0,040 mm	5,52%	10:47	0:20

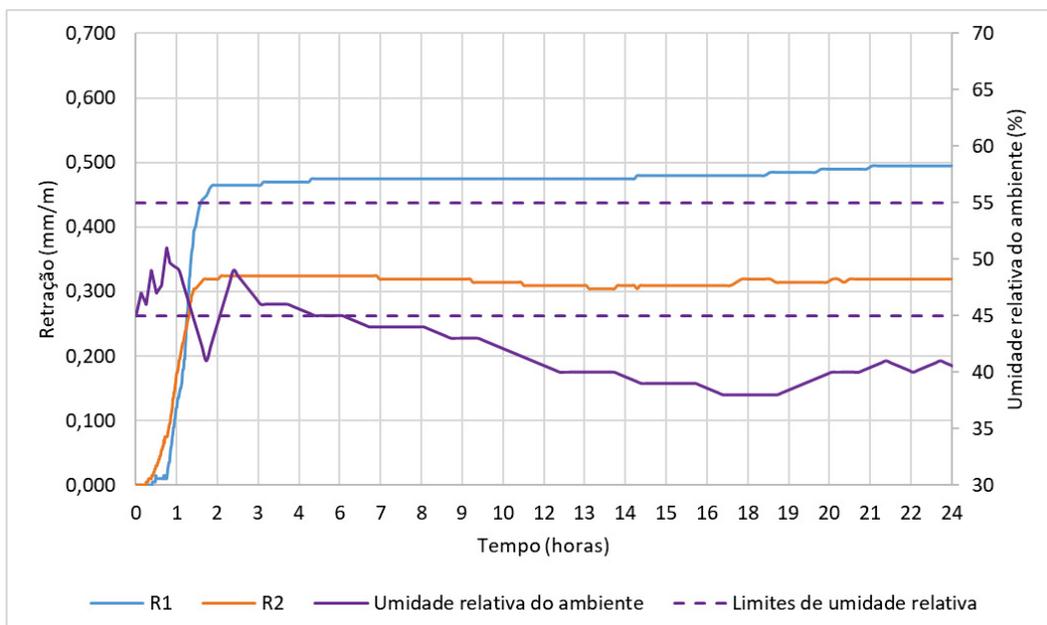
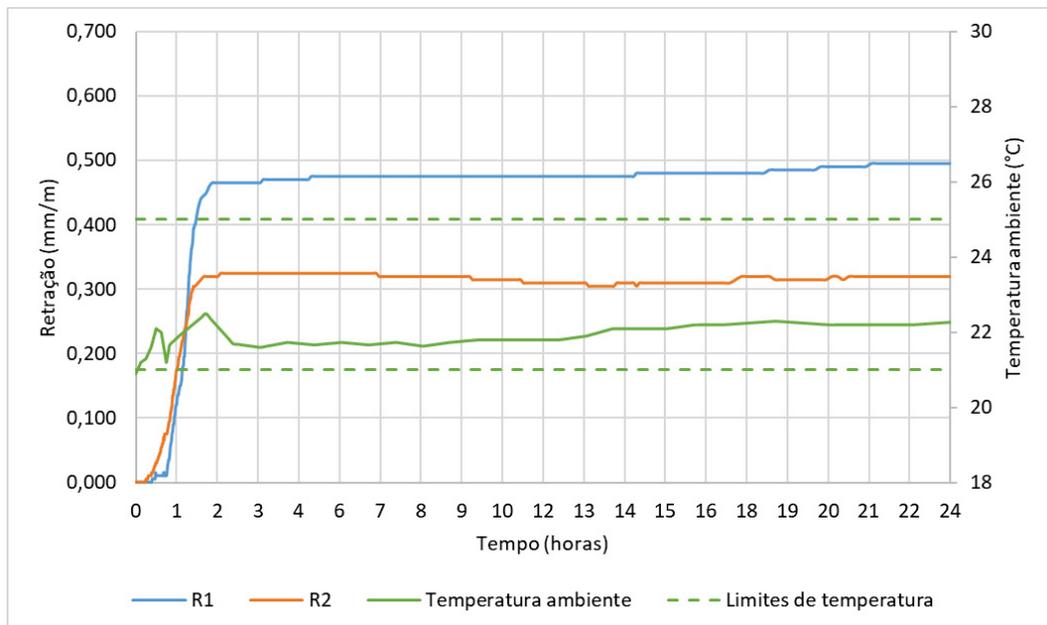
Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	28,2 °C	51 %
Mínima	23,8 °C	34 %
Média	26,0 °C	42 %
Desvio padrão	1,27 °C	4,74 %
Tempo fora do limite	78%	71%



Traços de cimento expostos ao vento de 5m/s

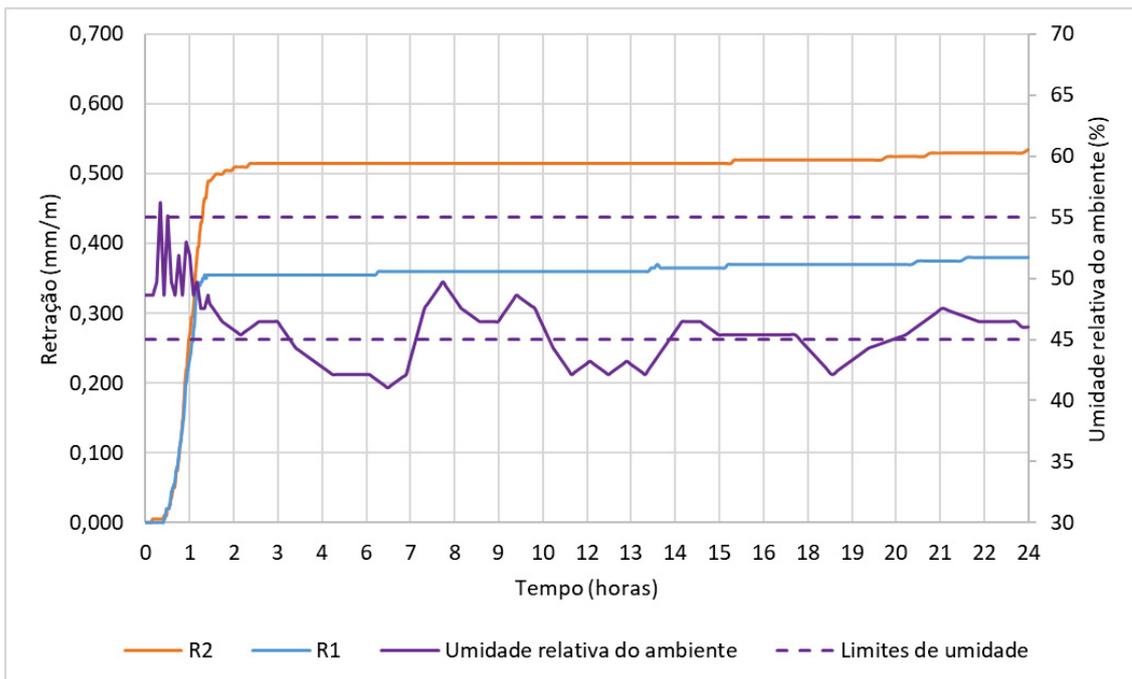
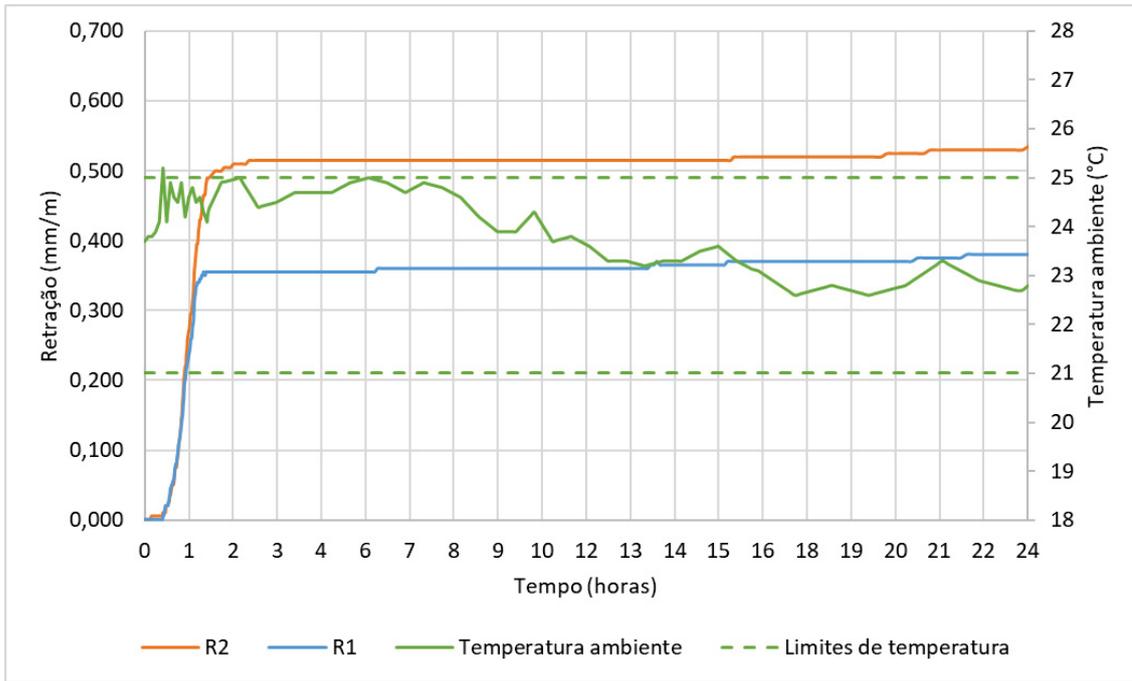
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Vento	1	0,495 mm	17,66%	1:37 h	0:57 h
1:3	Vento	2	0,325 mm	16,63%	1:31 h	0:35 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	25,3 °C	55 %
Mínima	20,9 °C	38 %
Média	22,3 °C	44 %
Desvio padrão	0,89 °C	4,62 %
Tempo fora do limite	3%	57%



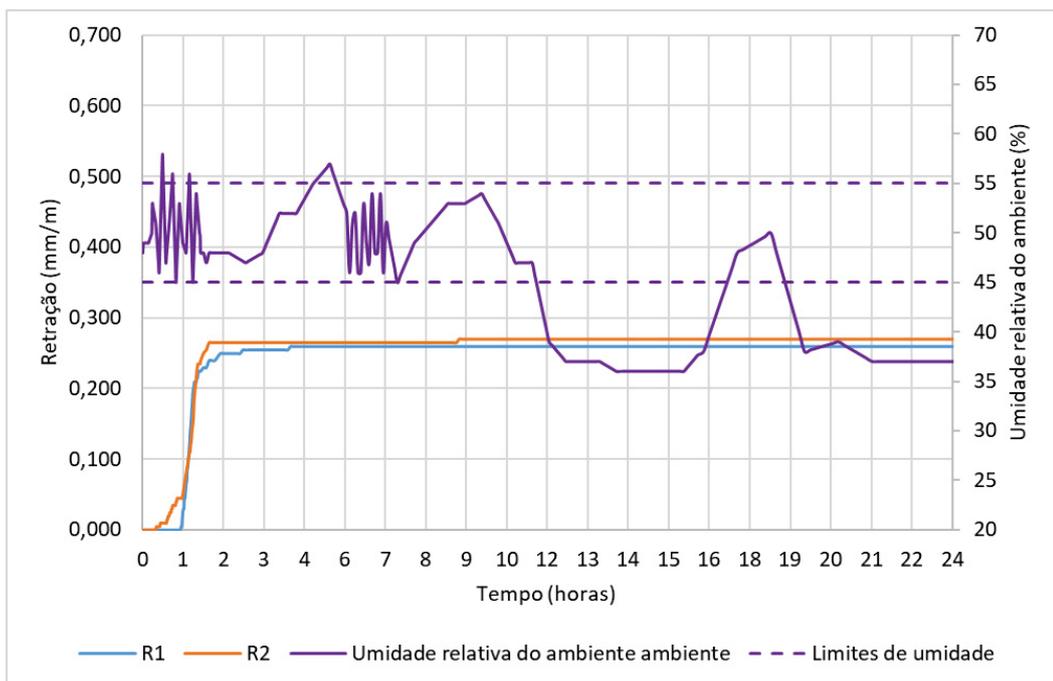
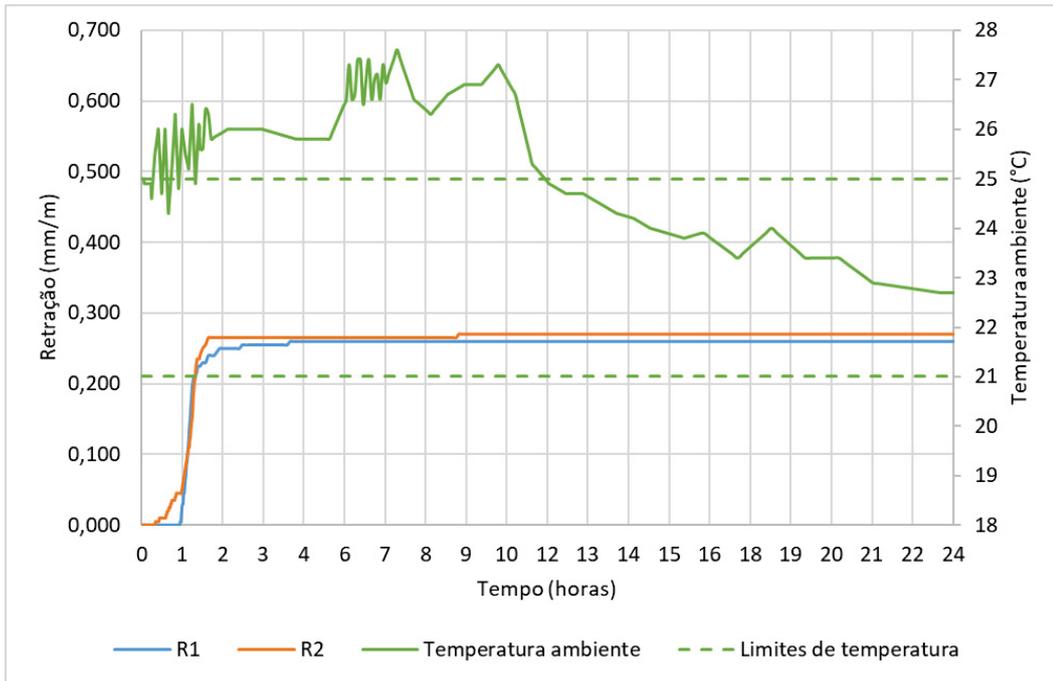
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:3	Vento	1	0,535 mm	16,393%	1:20 h	0:39 h
1:3	Vento	2	0,380 mm	16,128%	1:38 h	0:44 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	25,2 °C	25 %
Mínima	22,6 °C	23 %
Média	24,0 °C	24 %
Desvio padrão	0,72 °C	0,72 %
Tempo fora do limite	1%	28,1%



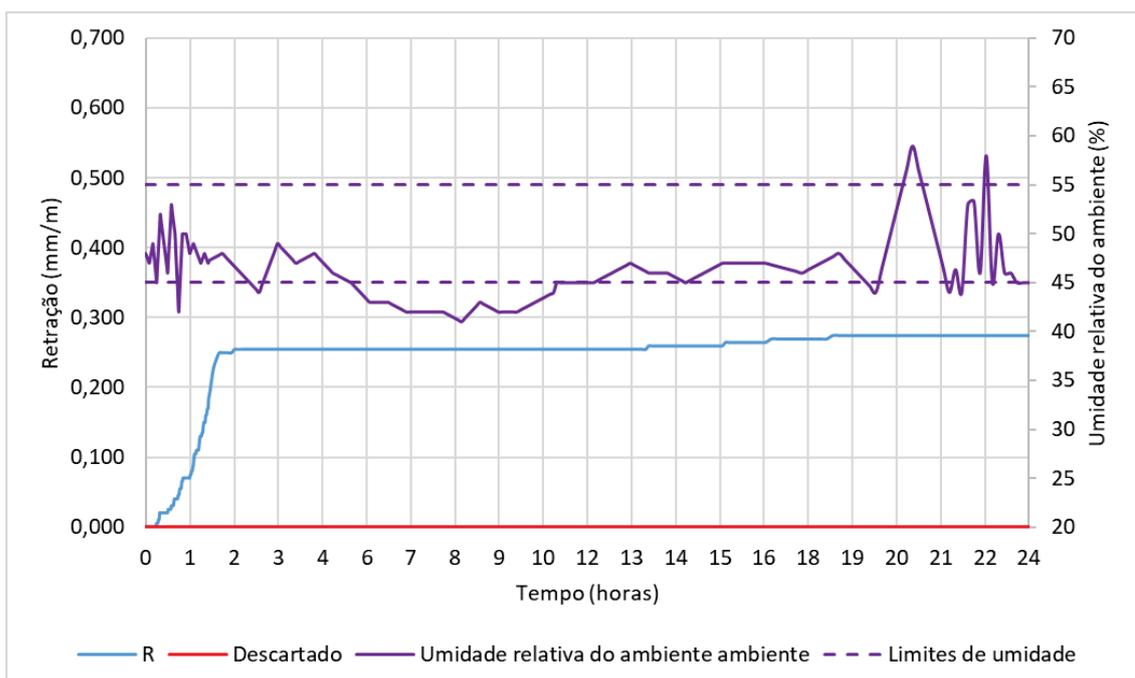
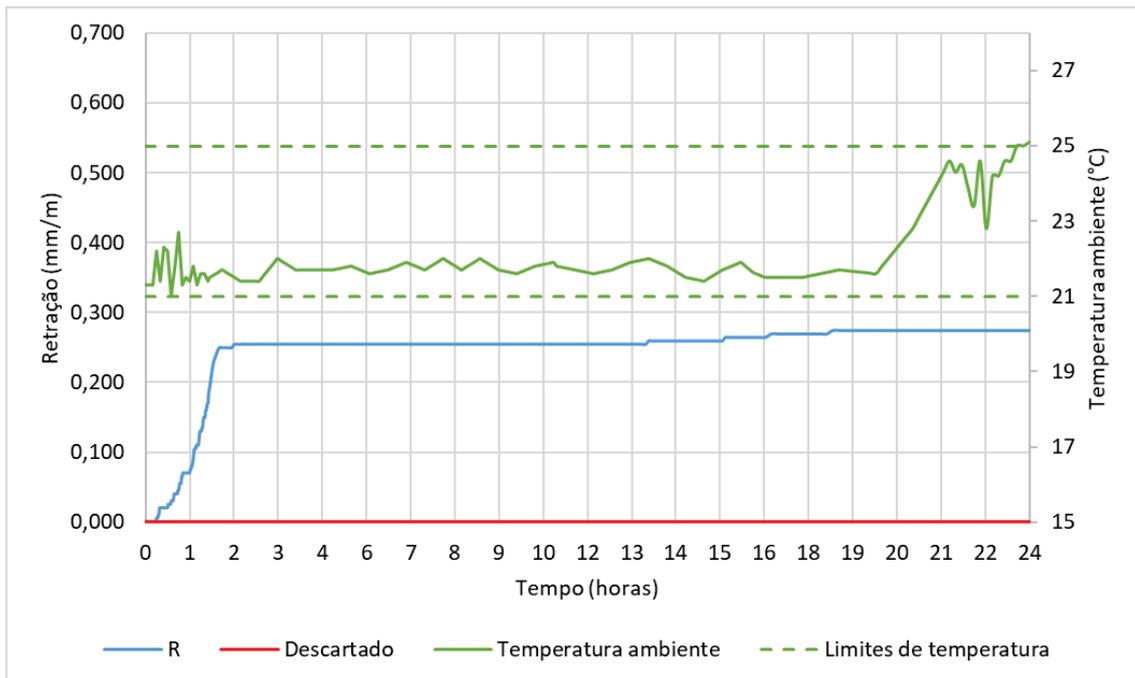
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Vento	1	0,270 mm	19,686%	1:52	0:50
1:4	Vento	2	0,260 mm	19,201%	2:50	0:30

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	27,6 °C	58 %
Mínima	22,7 °C	36 %
Média	25,3 °C	47 %
Desvio padrão	1,20 °C	6,34 %
Tempo fora do limite	59%	24%



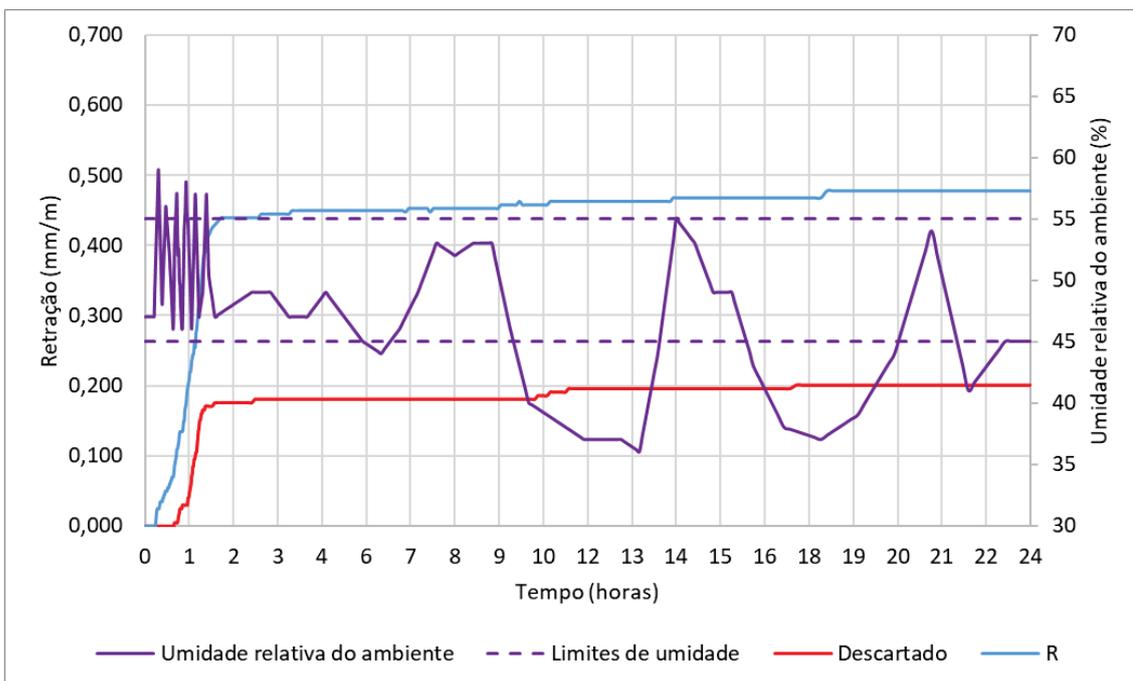
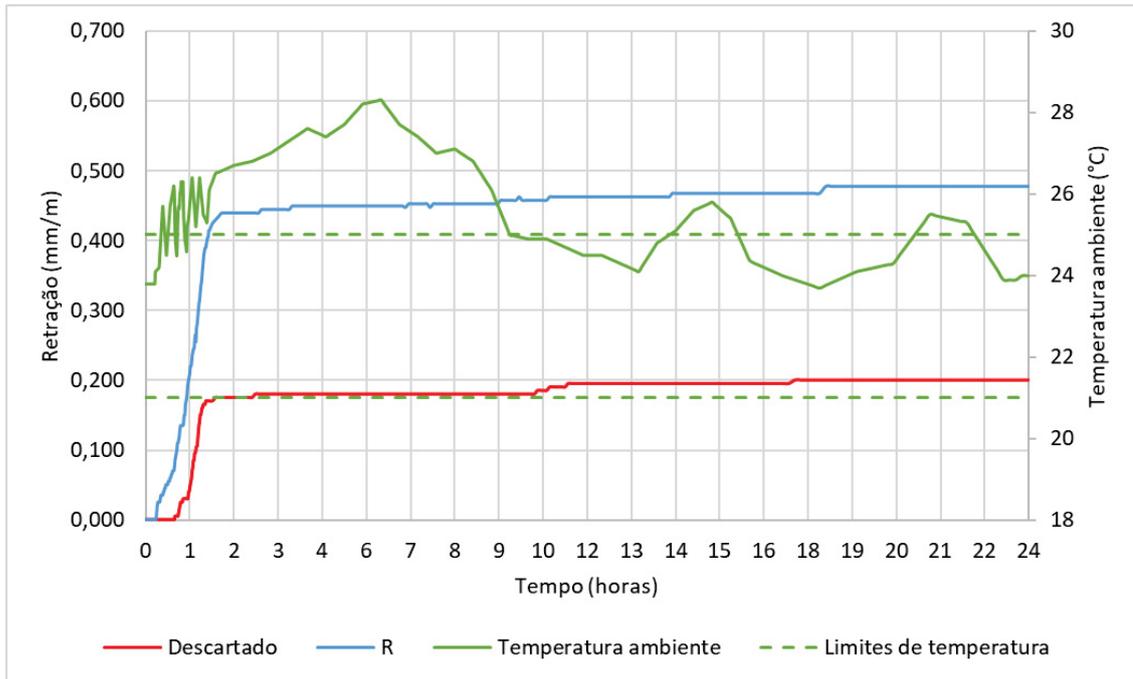
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Vento	0,000 mm	18,514%	1:52	0:20
1:4	Vento	0,275 mm	19,201%	1:55	0:38

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	25,1 °C	59 %
Mínima	21,0 °C	41 %
Média	21,8 °C	46 %
Desvio padrão	0,65 °C	2,88 %
Tempo fora do limite	0%	23%



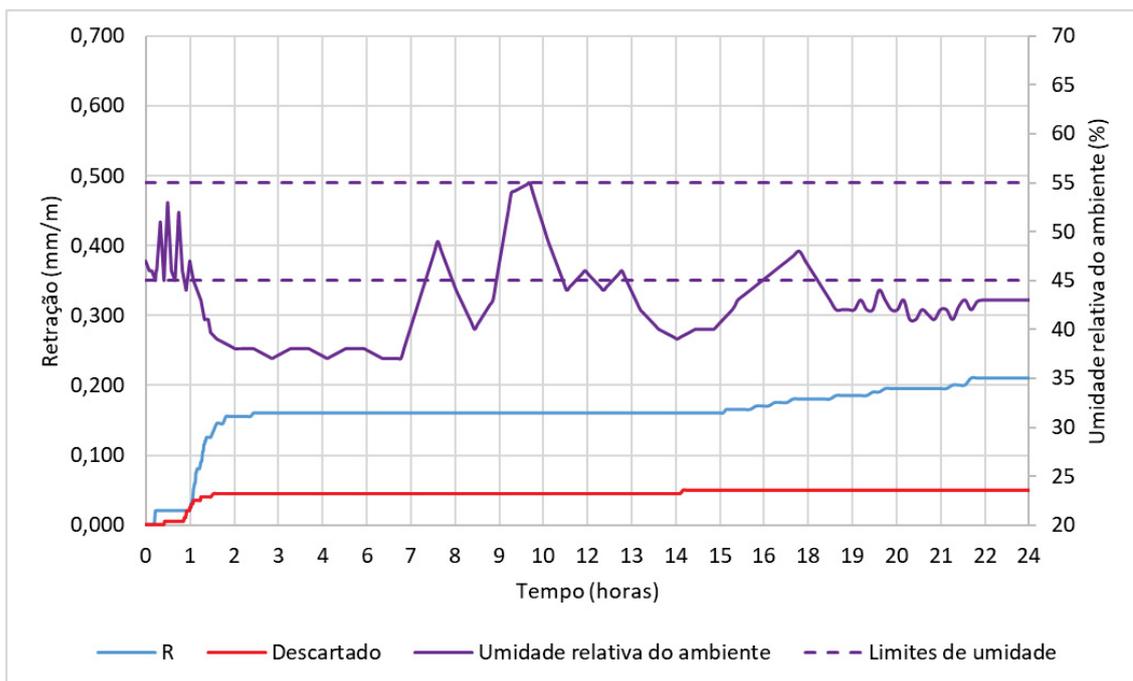
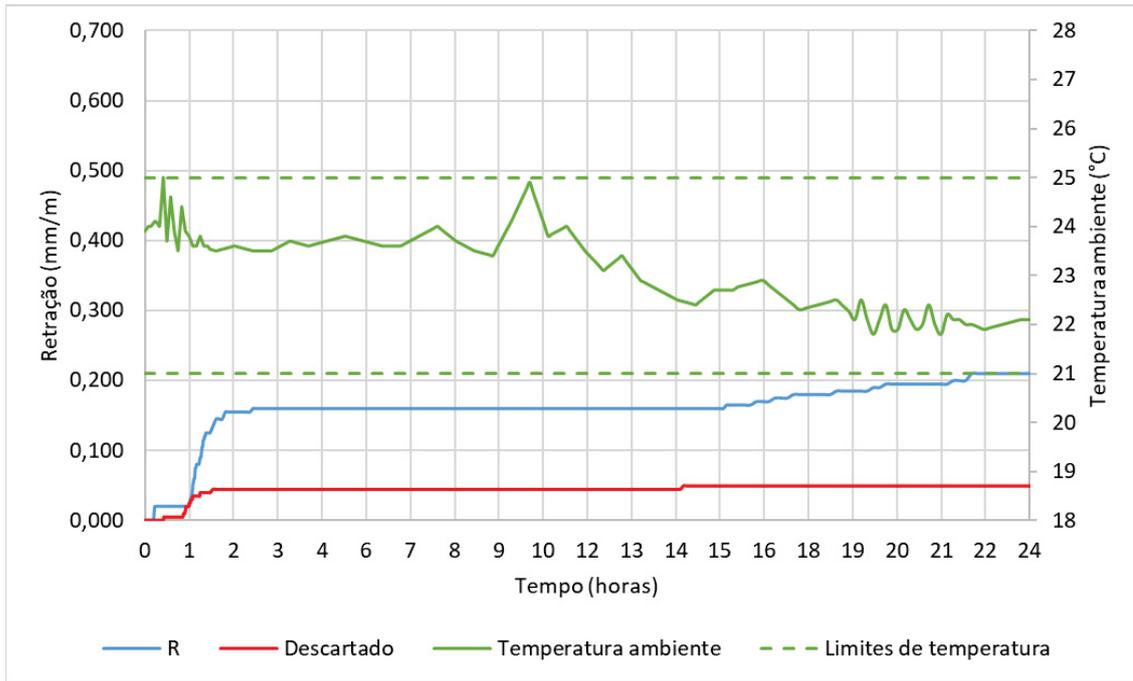
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:4	Vento	0,200 mm	19,823%	24:03	0:53
1:4	Vento	0,478 mm	20,758%	1:49	0:30

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	28,3 °C	59 %
Mínima	23,7 °C	36 %
Média	25,6 °C	47 %
Desvio padrão	1,25 °C	5,51 %
Tempo fora do limite	60%	21%



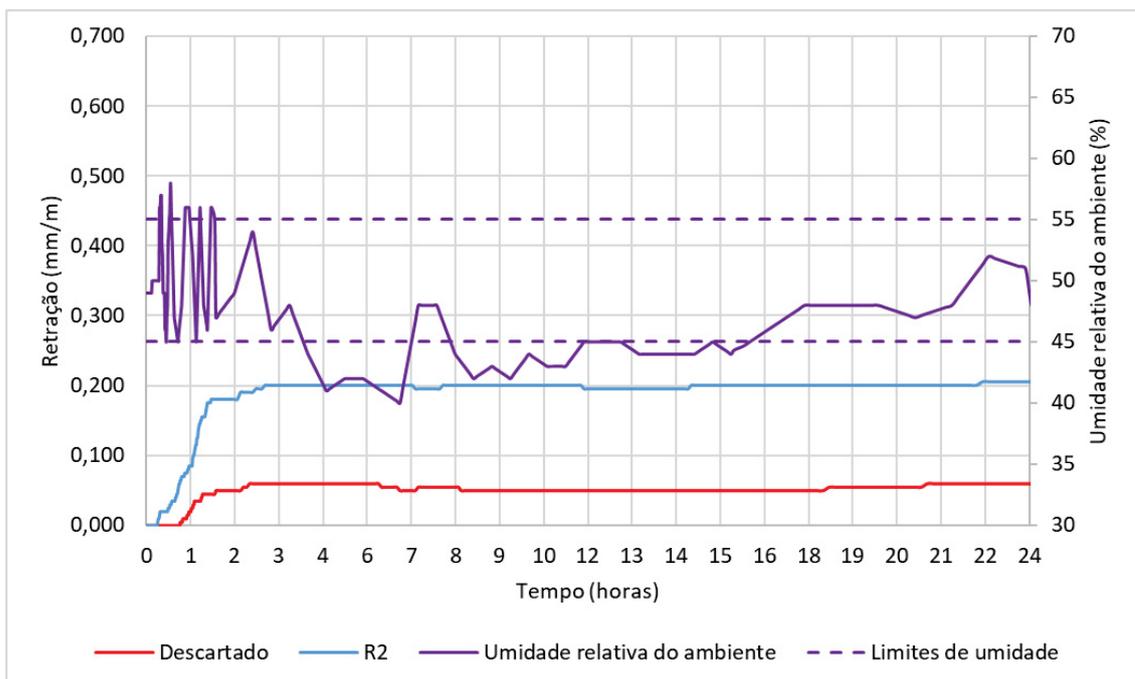
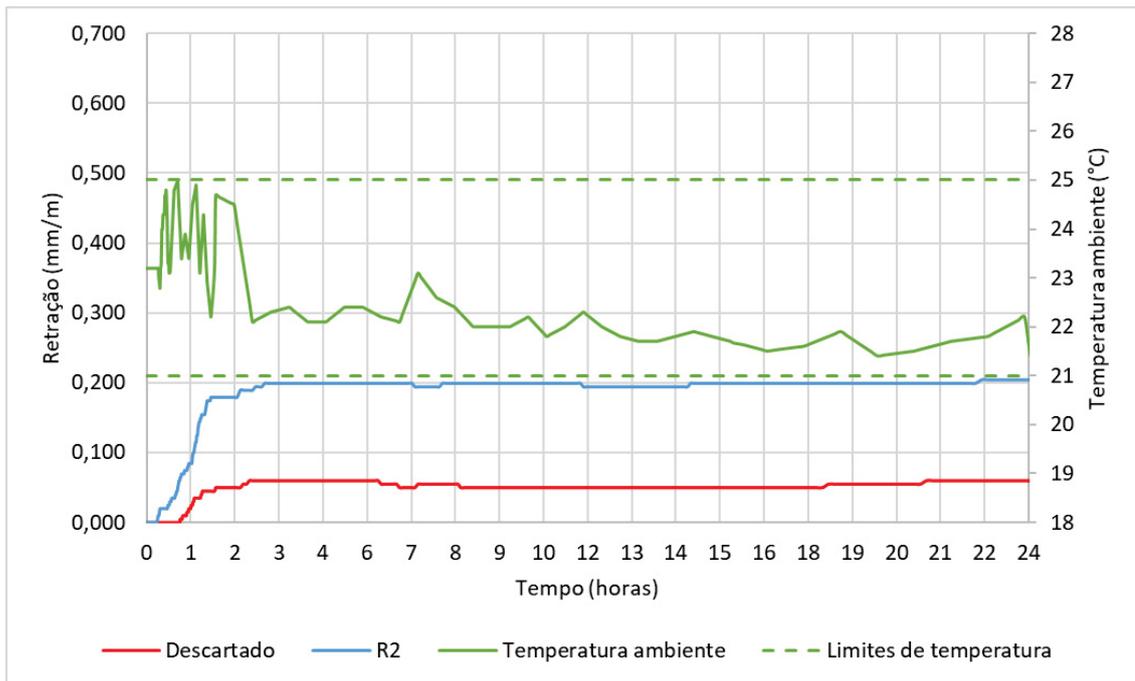
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Vento	0,050 mm	24,287%	2:25 h	1:00 h
1:6	Vento	0,210 mm	23,967%	1:58 h	1:10 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	25,0 °C	55 %
Mínima	21,8 °C	37 %
Média	23,5 °C	43 %
Desvio padrão	0,69 °C	4,22 %
Tempo fora do limite	0%	61%



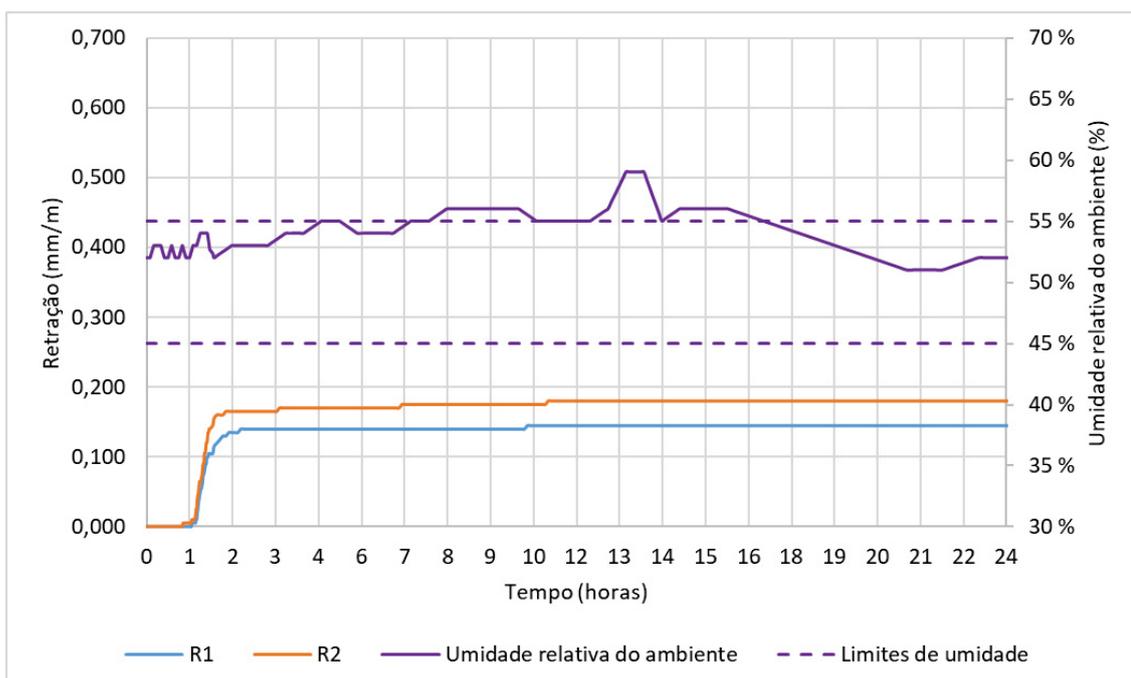
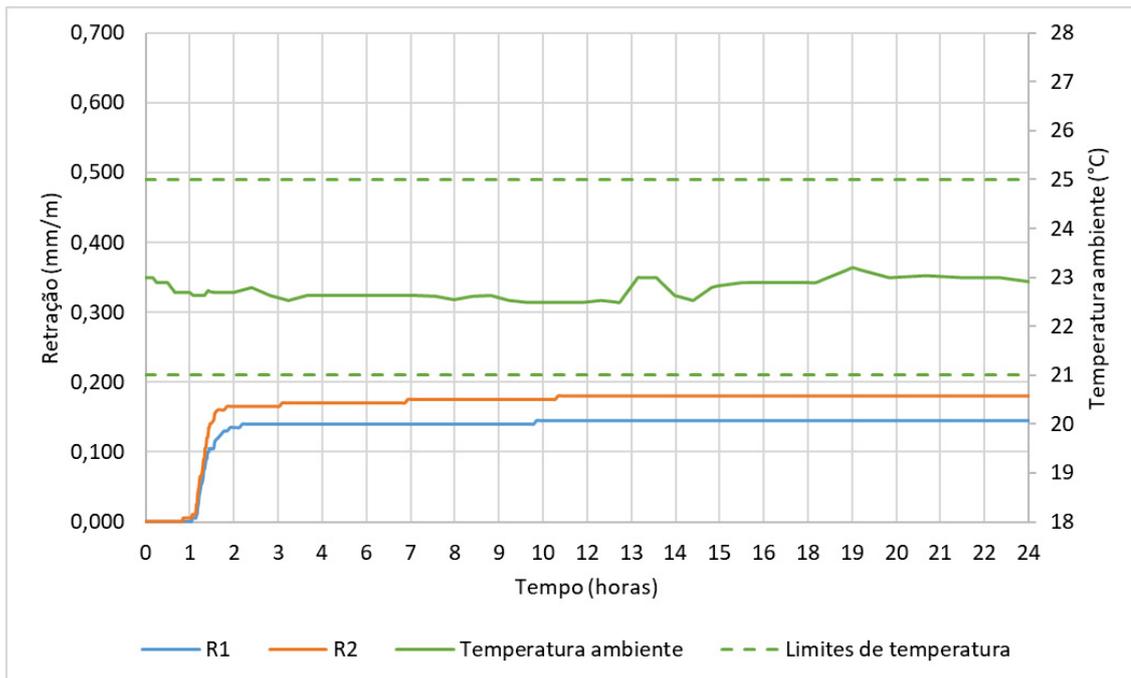
Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Vento	0,060 mm	24,933%	2:05 h	0:57 h
1:6	Vento	0,205 mm	24,821%	1:44 h	0:36 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	25,0 °C	58 %
Mínima	21,4 °C	40 %
Média	22,6 °C	47 %
Desvio padrão	0,98 °C	4,03 %
Tempo fora do limite	0%	30%



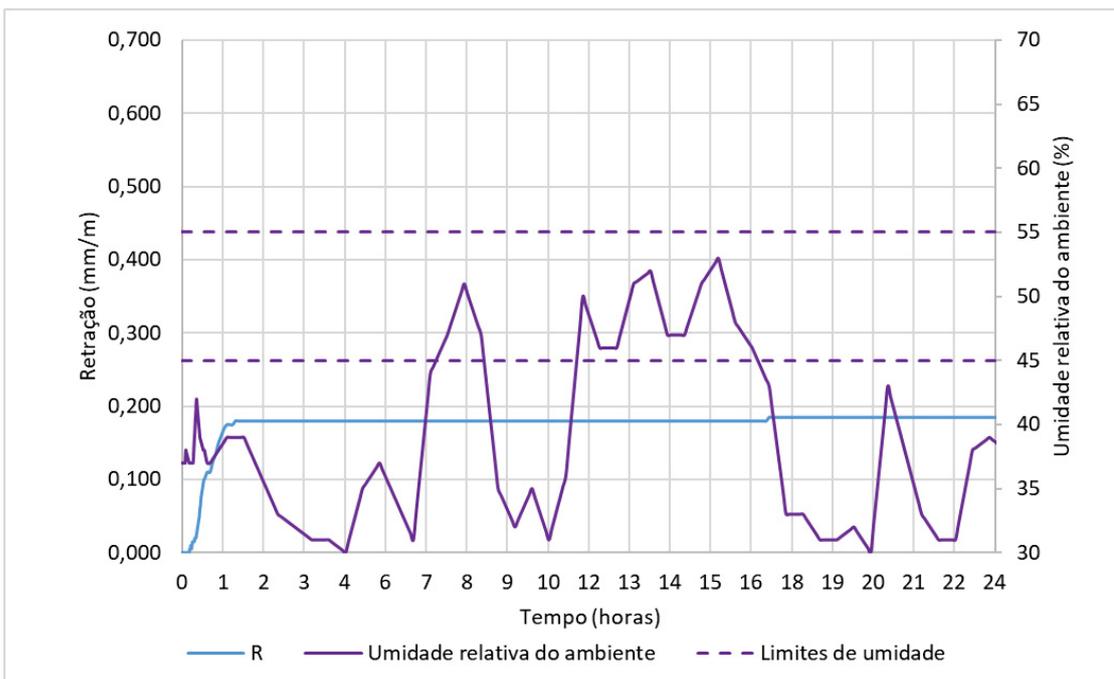
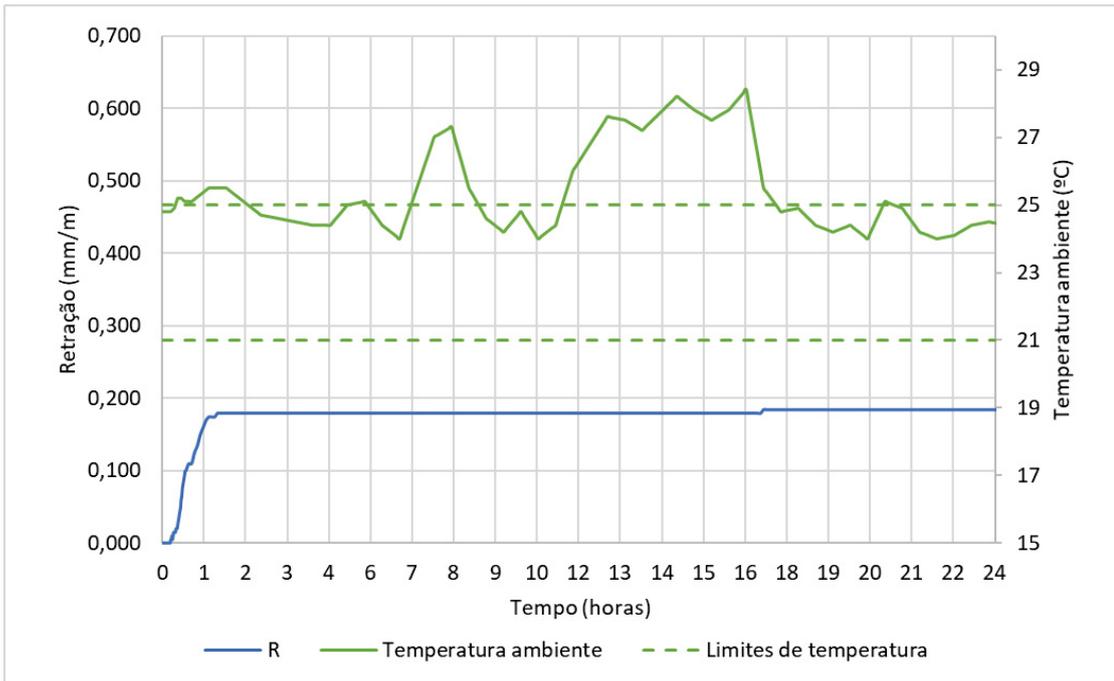
Traço	Exposição	R	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Vento	1	0,145 mm	23,92%	1:59 h	1:25 h
1:6	Vento	2	0,180 mm	24,34%	2:05 h	1:23 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	23,5 °C	59 %
Mínima	22,4 °C	51 %
Média	22,7 °C	54 %
Desvio padrão	0,18 °C	1,76 %
Tempo fora do limite	0%	24%



Traço	Exposição	Retração máxima	Perda de massa após 24h	Tempo 90	Tempo 10
1:6	Vento	0,185 mm	25,40%	1:45 h	0:35 h

Dado	Temperatura ambiente	Umidade relativa
Máxima	28,2 °C	52 %
Mínima	24,0 °C	30 %
Média	25,4 °C	39 %
Desvio padrão	1,14 °C	6,36 %
Tempo fora do limite	52%	72%



APÊNDICE 3 – RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Nesse apêndice se expõem, em detalhes, o método e os resultados obtidos pela revisão sistemática sobre os artigos da amostra.

Método aplicado na revisão sistemática

A revisão sistemática responde a uma pergunta claramente formulada utilizando métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes, além de coletar e analisar dados de estudos incluídos na revisão (Clarke & Horton, 2001). Adotando essa metodologia, se propõe a seguinte pergunta geral: “quais são os métodos, equipamentos e diferentes tecnologias empregados na mensuração da retração plástica em materiais cimentícios?”. Portanto, foi adotado como critério de seleção de estudos a condição do estudo ter desenvolvido um novo método de mensuração ou proposto uma variação de um método existente. Os termos de busca ou “Palavras-chave” escolhidos e seus respectivos resultados estão expostos na TABELA 43:

TABELA 43 – RESULTADOS DOS TERMOS DE BUSCA

Termos de Busca		<i>"Early-age shrinkage measurements in mortar" or "plastic shrinkage measurements in mortar"</i>	<i>"Early-age shrinkage measurements in concrete" or "plastic shrinkage measurements in concrete"</i>
Fonte	Science Direct	3.132	6.154
	Periódicos	1.769	5.815
	Google Scholar	13.300	49.301
	Scopus	50	86

Fonte: o autor (2019).

Diante do expressivo retorno de resultados e seguindo a próxima etapa da revisão sistemática, que é ler o título do estudo, logo um padrão foi identificado. Primeiro, muitas vezes o objetivo central do estudo não é criar um novo método, sendo o novo método ou variação de método existente um resultado colateral do objetivo principal. Segundo, muitos estudos que mensuram retração plástica utilizam métodos

já existentes. Portanto, seguindo a metodologia de “bola de neve”⁹ (2008 apud Valladares *et. al.*, 2014), as referências bibliográficas dos artigos encontrados foram analisadas. Assim, pode-se encontrar os criadores dos métodos e observar as variações entre eles.

Portanto, em vez de seguir os passos clássicos da revisão sistemática, novos passos foram adotados.

Primeiro, um apanhado geral de estudos baseado na relevância de seus títulos, sendo selecionados 126 artigos. A seguir, uma leitura prévia da seção experimental dos artigos, o que levou à exclusão de 90 artigos – cujos métodos eram repetições de métodos existentes – e na inclusão de 28 novos artigos, o que resultou em 64 estudos. Desses 64, foram excluídos: repetições, estudos com variações insignificantes de método, em idiomas que não fossem inglês ou português, e estudos aos quais não se obteve acesso (os quais foram mencionados em artigos e dissertações como métodos originais). Tais métodos de seleção resultaram em 48 artigos diferentes e finais datados entre 1967 e 2018.

Com o propósito de organizar sistematicamente as informações extraídas dos estudos, foi adotado o método 5W1H. Essa ferramenta de qualidade permite a categorização e organização fazendo as mesmas perguntas para diversas fontes. As perguntas adotadas são as apresentadas na TABELA 44:

TABELA 44 – PERGUNTAS 5W1H

WHO	Quem é o autor do estudo?	Responsável/Autor
WHERE	O ambiente do ensaio é controlado?	Variáveis ambientais
WHEN	Quanto tempo dura o ensaio?	Duração
WHAT	O que foi mensurado?	Medidas
WHY	Qual foi o objetivo do estudo?	Objetivo
HOW	Qual método foi utilizado?	Instrumentação, tecnologia, molde, restrição de movimento, leitura

Fonte: o autor (2019).

Vale salientar que a amostra enfocou artigos, desconsiderando métodos propostos em dissertações e teses.

⁹ RIDLEY, D. **The literature review: a step-by-step guide for students**. London: Sage, 2008.

Who and where: quem é o autor do estudo e onde foi realizado?

A primeira das perguntas adotadas dentro do sistema 5W1H se preocupa com o responsável por desenvolver o método ou a variação do método. Portanto, o autor ou autores do estudo. A lista dos autores pode ser observada na TABELA 54.

A segunda, procura identificar se o experimento foi conduzido em um ambiente controlado, e, se sim, quais variáveis eram controláveis: temperatura, vento e umidade (TABELA 45). Sabe-se que essas variáveis possuem impacto direto e indireto na maioria dos mecanismos que regem o comportamento da retração plástica. Portanto, procede que quase metade dos estudos encontrados (49%) possuíam controle total sobre essas variáveis. Por vezes, utilizaram câmaras, túneis de vento, umidificadores, ares-condicionados etc.

TABELA 45 – VARIÁVEIS DE CONTROLE AMBIENTAL

Variáveis controláveis	Frequência	Frequência (%)
Temperatura, umidade e vento	24	49,0%
Sem controle	15	30,6%
Temperatura e vento	2	4,1%
Temperatura e umidade	4	8,2%
Vento	2	4,1%
Temperatura	1	2,0%
Umidade	1	2,0%

Fonte: o autor (2019).

When: quanto tempo dura o ensaio?

Como descrito na seção da fundamentação teórica, a retração plástica ocorre nas primeiras 24h após o primeiro contato do cimento anidro com a água. Mais de 74% dos estudos propuseram métodos com duração até 24h. Porém, muitos dos estudos encontrados não se detiveram nessas primeiras horas, aplicando seus métodos até 320h. Nesses casos, a concepção do método proposto era de tal forma que a leitura por grandes períodos de tempo se tornava simples e cômoda e não havia porque interrompe-la. A TABELA 46 expõe os tempos adotados por estudo.

TABELA 46 – DURAÇÃO DOS MÉTODOS PROPOSTOS

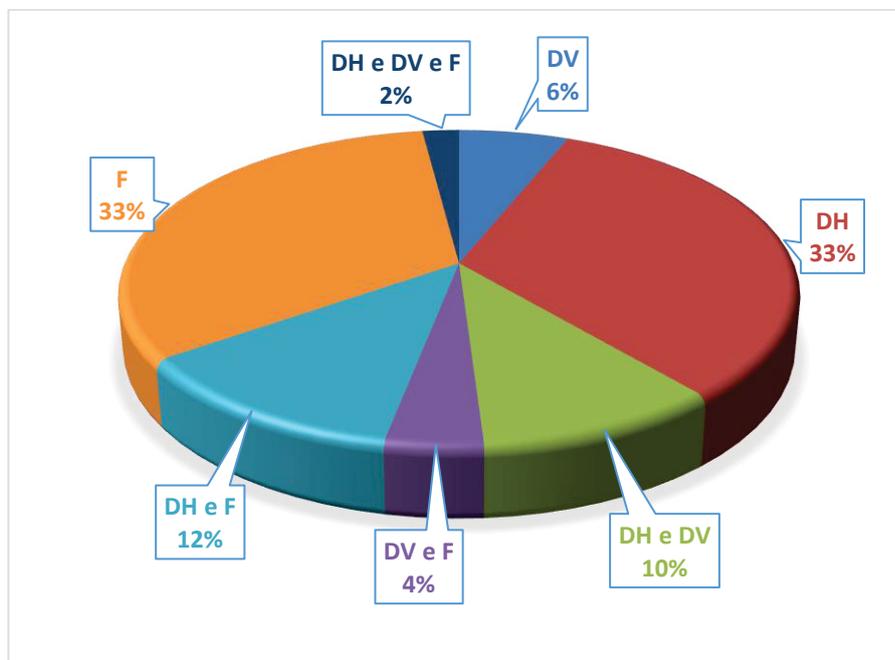
Responsável	Duração	Responsável	Duração
Ghoddousi & Javid <i>et. al.</i> (2010)	1,33 - 2h	Messan <i>et. al.</i> (2010)	24h
Kovler (1994).		Combrinck & Boshoff (2014)	
Kwak <i>et al.</i> (2010)	3,5h	Banthia & Gupta (2009)	
Tolêdo Filho, Sanjuán (1999)		Nemoz-Gaillard <i>et. al.</i> (2002)	
Qi <i>et al.</i> (2005)	4h	Johansen & Dahl (1993)	
Ravina (1986)		Lin <i>et. al.</i> (2012)	
Cromarty & Bryden (1967)		Yan & Yan-Hui (2011)	
Qi <i>et al.</i> (2003)		Lin & Huang (2010)	
Mora-Ruacho <i>et. al.</i> (2009)		Sivakumar & Santhanam (2006)	
Boshoff & Combrinck (2013)		Sivakumar & Santhanam (2007)	
Holmes (1992 apud Branch <i>et. al.</i> , 2002)	5h	Shen <i>et. al.</i> (2012)	
Shao & Mirmiran (2007)		CARB (2009)	
Sanjuán, Moragues (1994)	6h	Banthia <i>et. al.</i> (1993)	30h
Orr & Haigh (1971)		Kauffman <i>et. al.</i> (2004)	
Kronlöf <i>et. al.</i> (1995)	9 - 10h	Slowik <i>et. al.</i> (2004)	
Newlands <i>et. al.</i> (2008)		Baron (1971 apud Brüll <i>et al.</i> , 1980)	
Hammer & Fosså (2006)	18h	Banthia <i>et. al.</i> (1996)	48h
Ruiz-Ripoll <i>et. al.</i> (2013)	20 - 23h	Dzayea <i>et. al.</i> (2018)	66 - 72h
Banthia & Gupta (2007)		Le-Bihan <i>et. al.</i> (2012)	
Nabil <i>et. al.</i> (2010)		Hanehara <i>et. al.</i> (1999)	
Mangat & Azari (1990)	24h	Wong <i>et. al.</i> (2007)	168h
Bastos <i>et. al.</i> (2001)		Pei <i>et. al.</i> (2014)	
Al-Amoudi <i>et. al.</i> (2007)		Bao <i>et. al.</i> (2015)	
		Jasiczaka <i>et al.</i> (2015)	
			320h

Fonte: o autor (2019).

What: o que foi mensurado?

O presente trabalho enfocou os métodos que tinham como objetivo principal determinar a retração plástica através de um ou mais dos três seguintes princípios: deslocamentos horizontais (DH), deslocamentos verticais (DV) e caracterização de fissuração (F). Foi encontrado que a abordagem por DH é a mais comum, aparecendo em 57,1% dos estudos. Em seguida, as caracterizações de F, 49%. Por último, a menos frequente, DV com 18,4%. A grande diferença entre as abordagens DH e DV possivelmente corrobora o argumento de Newlands *et. al.* (2008), no qual afirmam que medições lineares horizontais são suficientes para descrever o fenômeno da retração plástica e são mais significativas do que as verticais. O GRÁFICO 41 expõe a proporção de estudos e as abordagens adotadas.

GRÁFICO 41 – PROPORÇÃO DE ABORDAGENS ADOTADAS PARA INTERPRETAR A RETRAÇÃO PLÁSTICA



Legenda: deslocamentos horizontais (DH), deslocamentos verticais (DV) e caracterização de fissuramento (F). Fonte: o autor (2019).

As medidas retiradas de um método podem representar diretamente a retração ou elas podem fornecer dados para determinar a retração através de um modelo matemático e/ou físico. Nesta etapa, também procurou-se determinar o que realmente foi fisicamente medido dentro do método proposto, independente de se ele representa diretamente ou não a retração. Também, como mencionado na seção 2.2, se o estudo mediu taxa de evaporação, exsudação e poro pressão, elas foram gravadas na sistematização. A TABELA 47 expõe as medidas encontradas e sua frequência absoluta de aparição.

TABELA 47 – MEDIDAS E SUAS FREQUÊNCIAS NOS ESTUDOS

(continua)

Medida	Frequência	Frequência (%)
Deslocamentos verticais	8	6,6%
Deslocamentos horizontais	14	11,6%
Dimensões de fissuras	24	19,8%
Localização longitudinal de fissuras	2	1,7%
Desenvolvimento de fissuras	20	16,5%

(conclusão)

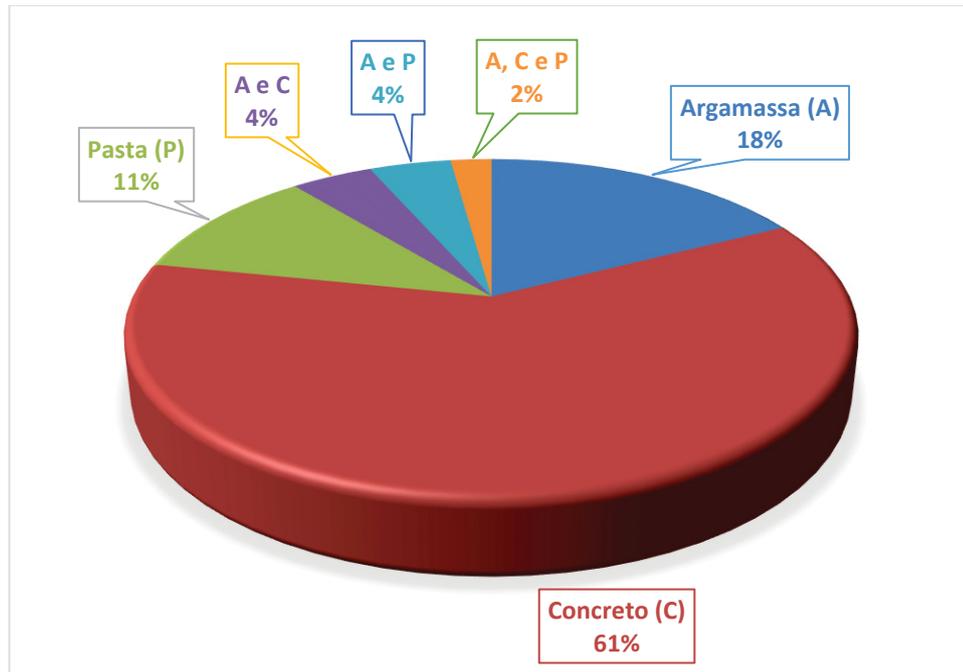
Medida	Frequência	Frequência (%)
Mapeamento de fissuras	2	1,7%
Fissuramento interno	1	0,8%
Evaporação	5	4,1%
Pressão capilar	5	4,1%
Temperatura da amostra	9	7,4%
Umidade interna da amostra	1	0,8%
Quantidade de fissuras	16	13,2%
Massa da amostra	9	7,4%
Massa da água exudada	1	0,8%
Voltagem	1	0,8%
Comprimento de Onda	3	2,5%

Fonte: o autor (2019).

Nesta seção também se fez a pergunta: em que material cimentício foi medido? Três respostas apareceram: concretos, argamassas e pastas cimentíceas. Em muitos estudos apareceram diversas variações de cimentos e adições físicas, porém incluir esse detalhamento fugia do escopo do critério de escolha proposto.

Concreto aparece em 63,3% dos estudos, muito mais do que os outros materiais: 26,5% para argamassas e 16,3% para pastas cimentícias. Esse dado oferta subsídio ao argumento de que mais estudos de retração precisam ser realizados em argamassas e suas variações, visto que sua importância e frequência de emprego em obras tradicionais da construção civil é comparável ao concreto. O GRÁFICO 42 expõe a frequência dos materiais estudados.

GRÁFICO 42 – FREQUÊNCIA DE MATERIAL



Legenda: Argamassa (A), concreto (C) e pasta cimentícia (P). Fonte: o autor (2019).

Why: qual o objetivo do estudo?

O critério de escolha dos estudos foi: estudos que propuseram um método de mensuração de retração plástica novo ou alguma variação de um método existente. Porém, não foi em todos os casos que essa proposta era o objetivo central do estudo. Também, como explanado na seção 2, a variação volumétrica durante o período em que ocorre a retração plástica é influenciada por outros tipos de retração e variáveis. Dessa forma, alguns métodos encontrados objetivaram estudar outras retrações além da plástica. Portanto, foram elencados os seguintes objetivos:

- a) Proposta de novo método de mensuração de retração plástica;
- b) Proposta de variação de método de mensuração de retração plástica existente ou combinação de métodos;
- c) Averiguar o efeito de uma adição física ao traço de argamassa, ou cimento especial, sobre a retração plástica;
- d) Averiguar o efeito de uma adição química ao traço de argamassa sobre a retração plástica;
- e) Testar os efeitos de uma condição ambiental específica sobre a retração plástica;

- f) Isolar os efeitos da retração química;
- g) Isolar os efeitos da dilatação térmica;

A proporção de objetivos, sem considerar a combinação de objetivos em um mesmo estudo, encontrada na amostra de métodos selecionados pode ser observada na TABELA 48:

TABELA 48 – OBJETIVOS

Objetivo	Frequência	Frequência (%)
Novo método	26	35,6%
Varição de método existente ou combinação	17	23,3%
Efeito de adição física	23	31,5%
Efeito de adição química	3	4,1%
Condição ambiental específica	1	1,4%
Isolar efeito da retração química	2	2,7%
Isolar efeito da dilatação térmica	1	1,4%

Fonte: o autor (2019).

How: qual foi o método empregado?

Para definir o método empregado, é necessário definir qual foi a tecnologia e instrumentação utilizada, o material e formato do molde, as restrições de movimento impostas e o formato da leitura adotada. Os tópicos a seguir apresentam o que foi encontrado em relação a esses fatores.

Instrumentação e tecnologia

a) Elementos rígidos

Os elementos rígidos inseridos durante a moldagem – como barras, pinos e pregos metálicos – podem servir dois propósitos. O primeiro seria transmitir variações dimensionais para equipamentos de medição. Essa técnica já foi negativamente criticada por inserir influências não controláveis no comportamento da retração e por necessitar de uma boa conexão entre a matriz cimentícia e o corpo rígido, o que não é algo que a amostra em suas primeiras idades de hidratação é muito capaz de fornecer (Le-Bihan *et. al.*, 2012; Ghourchian, 2018). Porém, essa é uma técnica muito

utilizada para registrar variações dimensionais, aparecendo na maioria dos métodos que utilizam as abordagens dos deslocamentos horizontais e verticais.

O segundo propósito dessa tecnologia seria o de induzir fissuramentos (vide página 188).

b) Relógio comparador

Relógio comparador é um instrumento para mensurar variações dimensionais pontuais com alta precisão (0,001mm). Seu uso dentro do estudo da retração plástica não é frequente. Uma variação digital foi encontrada em apenas um método: Ravina (1986).

c) Transdutores

Aqui se apresentam os equipamentos chamados transdutores, que foram utilizados nos métodos. Transdutores são aquelas partes de uma cadeia de medição que transformam uma magnitude física num sinal elétrico (PCE, 2015).

O LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) é um transdutor usado para medir deslocamentos lineares. É um equipamento amplamente utilizado dentro dos métodos analisados. Diferentemente do relógio comparador mecânico, ele oferta a facilidade de poder ser conectado a um sistema computacional por ser eletrônico. Orr & Haigh (1971) e Cromarty & Bryden (1967) utilizaram um micrometro acoplado ao LVDT para movimentações controladas sobre a amostra. A FIGURA 37 expõe um LVDT comum. Esse será o equipamento adotado no presente trabalho.

FIGURA 37 – LVDT COMERCIAL



Fonte: TE Connectivity (2019).

Extensômetros são sensores que alteram sua resistência sempre que seu corpo for esticado, deformado ou comprimido (Autocore Robotica, 2019). Quando inseridos em uma amostra, eles acompanham a deformação da matriz que, por consequência, muda sua resistência elétrica. Isso permite que eles mensurem deformações longitudinais. Na FIGURA 38 está exposto um extensômetro comercial comum.

FIGURA 38 – EXTENSÔMETRO



Fonte: Autocore Robotica (2019).

Potenciômetros são resistores capazes de medir precisamente corrente elétrica. Jasiczaka *et. al.* (2015) utilizaram esse equipamento para associar a mudança na corrente elétrica que flui através dos sensores colocados dentro da amostra com mudanças de comprimento.

Sensores de pressão são transdutores capazes de acompanhar mudanças de pressão. Geralmente, um transdutor de pressão consiste em duas partes: um material elástico que se deforma sob a aplicação de pressão e uma parte elétrica que detecta essa deformação (Citissystems, 2018). São frequentemente utilizados para determinar a pressão capilar interna das amostras.

d) Laser

Em diversos estudos, a tecnologia dos lasers foi utilizada para detectar movimentações na casa do décimo milésimo de milímetro ($10\mu\text{m}$). A mensuração segue princípios básicos de ótica em todos os estudos, o que muda é o material utilizado como refletor ou absorvedor. Pode ser uma simples superfície refletora sob a amostra (prato refletor, papel alumínio), ou um sensor semiconductor cerâmico de óxido de metal (Ceramic Metal-Oxide Semiconductor - CMOS) preso ao aparelho do laser, ou os dois, como no caso de Kwak *et. al.* (2010). A maioria dos lasers foram utilizados de maneira estacionária, com exceção de Qi *et. al.* (2005), que montaram o equipamento em uma mesa móvel que permitiu leituras sistemáticas sobre uma dada superfície.

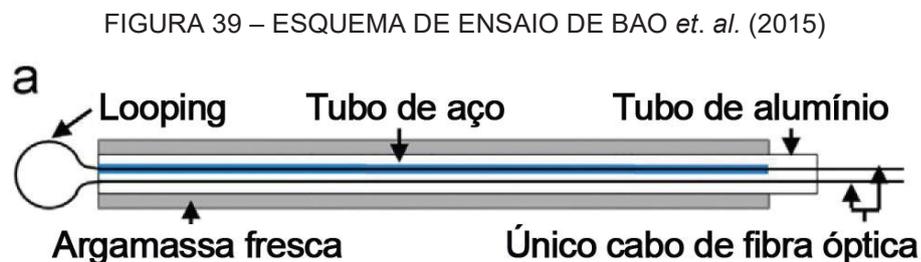
e) Fibra ótica

A fibra ótica é um filamento de plástico extrudido que permite a fácil transmissão de pulsos de luz codificados. Ela já foi utilizada na mensuração da retração plástica utilizando duas técnicas diferentes: Fiber Bragg Grating e PPP-BOTDA.

Fiber Bragg grating (FBG) é uma tecnologia que consiste na inscrição no núcleo de uma fibra ótica especial através da variação sistemática do índice de refração de uma fonte ultravioleta (UV) intensa e visível. Para medir deformações reais devido às tensões de retração através dessa tecnologia, a compensação de temperatura é essencial. Para isso Slowik *et. al.* (2004) utilizaram um par termoelétrico para acompanhar o desenvolvimento da temperatura da amostra enquanto Pei *et. al.* (2014) usaram sensores de temperatura FBG. A técnica FBG já foi criticada por não

ser muito eficiente para estudos de idade precoce de materiais cimentícios, pois a mistura geralmente não é rígida o suficiente para transferir a tensão para a fibra neste estágio (Wong *et. al.*, 2007).

Visando mensurar simultaneamente a distribuição de deformações e o fissuramento induzidos pela retração na matriz de argamassa, Bao *et. al.* (2015) desenvolveram um ensaio chamado PPP-BOTDA (*Pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis/ Análise do domínio do tempo óptico Brillouin pré-bomba de pulso*). O ensaio consiste na passagem de dois pulsos de luz lançados em tempos e frequências diferentes em uma fibra inserida em uma amostra de argamassa (FIGURA 39).



Fonte: Bao *et. al.* (2015).

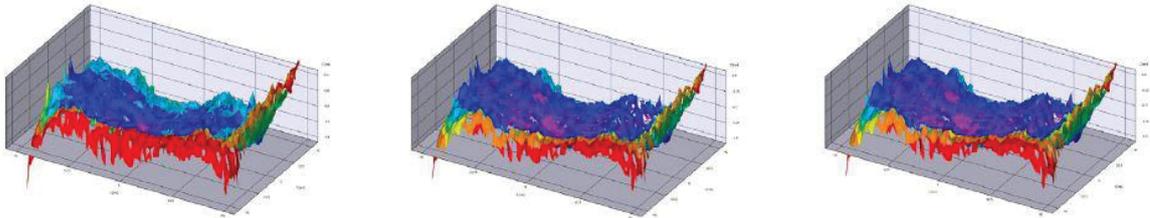
A medição do ensaio ocorre quando o espectro da luz atinge seu pico, o que ocorre quando a diferença de frequência das ondas coincide com a frequência de Brillouin da fibra (Bao *et. al.*, 2015). Essa técnica permite, através da distribuição de deformações medidas, identificar a localização e a magnitude de abertura de fissuras.

f) Correlação de Imagens Digitais

A correlação de imagens digitais (*Digital Image Correlation – DIC*) dentro do estudo da retração plástica é uma tecnologia que envolve o acompanhamento da hidratação por fotografias que são depois processadas por um software para revelar diversas informações. É uma técnica atualmente capaz de mensurar deslocamentos horizontais e verticais e caracterizar o desenvolvimento do fissuramento. De acordo com Dzayee *et. al.* (2019), a DIC se destaca em comparação às medições clássicas com transdutores LVDT, uma vez que ela não requer contato com a amostra e a análise – com a tecnologia atual – pode ser tridimensional. No intuito de demonstrar o

potencial atual da DIC, a FIGURA 40 mostra a representação 3D da superfície das amostras estudadas por Dzaye *et. al.* (2019).

FIGURA 40 – RESULTADO DA DIC TRIDIMENSIONAL



Fonte: Autocore Robotica (2019).

g) Instrumentos utilizados na caracterização de fissuras

Microscópios são equipamentos dotados de lupas com alta capacidade de magnificação. Versões de microscópios manuais são frequentemente utilizados para a caracterização de fissuras. Microscópios acompanhados por paquímetros acoplados foram utilizados por Banthia *et. al.* (1993, 1996) e Banthia & Gupta (2007, 2009) para mensurar fissuras.

Câmeras podem ser utilizadas junto à tecnologia DIC ou para um acompanhamento qualitativo de fissuras.

Fissurômetros são réguas com linhas de diversas larguras que, por comparação, auxiliam na determinação da dimensão de abertura de fissuras.

Cordas de barbante ou algodão são presas ao longo da linha de fissuras para determinar seus comprimentos.

A TABELA 49 expõe a frequência de uso de cada um dos instrumentos e tecnologias descritas de uma maneira geral em relação à amostra de métodos selecionados.

TABELA 49 – TECNOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

(continua)

Tecnologia e instrumentação	Frequência	Frequência (%)
Elementos rígidos para transmitir deslocamentos	13	15%
Elementos rígidos para induzir fissuramento	6	7%
Relógios mecânicos de precisão	1	1%
LVDT	13	15%

(continua)

Tecnologia e instrumentação	Frequência	Frequência (%)
Laser (prato refletor simples)	3	4%
Laser (sensor CMOS)	2	2%
Laser	2	2%
Fibra ótica (Fiber Bragg Grating para deslocamentos)	3	4%
Fibra ótica (Fiber Bragg Grating para temperatura)	2	2%
Fibra ótica (PPP-BOTDA)	1	1%
DIC	7	8%
Câmera	9	11%
Potenciômetro	1	1%
Extensômetros	5	6%
Microscópio ou lente de aumento	5	6%
Microscópio com paquímetro	4	5%
Fissurômetro	5	6%
Corda	3	4%

Fonte: o autor (2021).

Em relação à instrumentação, destacam-se o LVDT, os elementos rígidos para transmitir deslocamentos e as câmeras.

Moldes e restrição de movimento

Um importante fator a ser considerado no estudo da retração plástica é a condição de deformações da amostra. Quando o material cimentício, no início da hidratação, está em uma superfície sem limitações e tem movimento livre, ele não fatura, mas se a movimentação volumétrica do material for contida, ele se torna suscetível à rachaduras. Isso ocorre porque que o material cimentício ainda não desenvolveu resistência suficiente para suportar a força motriz induzida pelas restrições (Ghoddousi & Javid, 2010; Mindess *et. al.*, 2002).

Portanto, em casos onde o objetivo é mensurar deslocamentos, os métodos propostos procuram minimizar o atrito entre a amostra e o molde, utilizando materiais como: teflon, óleos desmoldantes, polietileno e até mercúrio, no caso de Cromarty & Bryden (1967) e Orr & Haigh (1971). Slowik *et. al.* (2004) utilizaram um molde de policloreto de vinil, um material esponjoso muito flexível, com o intuito de que a baixa rigidez do molde permitisse a livre movimentação da amostra. Portanto, foi considerado relevante o levantamento do material utilizado para confeccionar os moldes. A TABELA 50 demonstra a proporção dos materiais dos moldes.

TABELA 50 – MATERIAIS DOS MOLDES

Material do molde	Frequência	Frequência (%)
Madeira	3	7,3%
Metal	23	56,1%
Concreto	6	14,6%
Plástico ou Acrílico	8	19,5%
Esponjoso	1	2,4%

Fonte: o autor (2019).

Usando o mesmo princípio, se o objetivo do método é caracterizar o fissuramento, o molde pode ser concebido de tal forma que propicie esse fissuramento. Isso pode ser pelo formato das suas paredes – restrição de contorno – , como é o caso do método *Dumbell* (Haltere) de Yan & Yan-Hui (2011). Portanto, o formato do molde também foi gravado (TABELA 51).

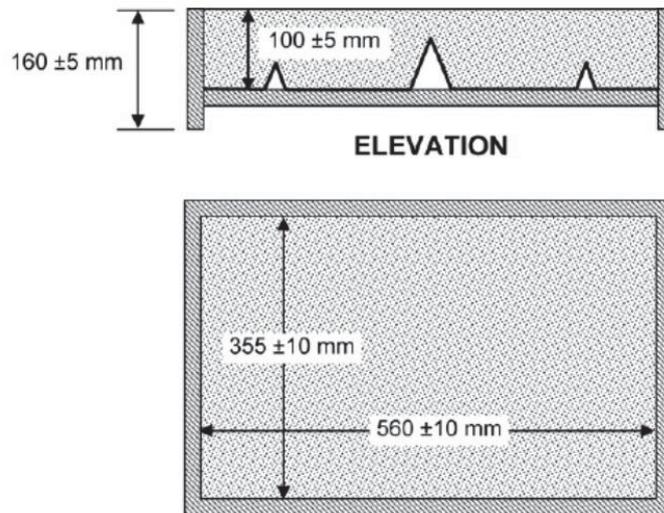
TABELA 51 – FORMATOS DOS MOLDES

Formato do Molde	Frequência	Frequência (%)
Cônico	1	2,1%
Cilíndrico	7	14,6%
Paralelepípedo	34	70,8%
Prismático	1	2,1%
Anelar	3	6,3%
Cúbico	1	2,1%
"Dumbbell"	1	2,1%

Fonte: o autor (2021).

Também, fissuras podem ser induzidas devido a profundidades diferenciais dos moldes. Esse é o princípio básico da ASTM C1576-13 (FIGURA 41). Como é um método normatizado, foram incluídos no presente estudo aqueles métodos que ofertaram alguma variação dessa norma.

FIGURA 41 – MOLDE ASTM C1576-13 COM PROFUNDIDADES DIFERENCIAIS INDUTORAS DE FISSURRAÇÃO



Fonte: ASTM C1576-13 (ASTM, 2013).

No caso da norma chinesa GBT 50082-2009, nenhuma variação foi encontrada, portanto ela mesma foi incluída na sistematização. A restrição também pode ocorrer entre a interação da amostra com o seu substrato, como é o caso do bloco cerâmico de Bastos (2001). Portanto, foi gravada qual foi a fonte de restrição nos métodos que utilizaram esse princípio (TABELA 52).

TABELA 52 – FONTE DE RESTRIÇÃO

Restrição	Frequência	Frequência (%)
Por elemento rígido (barras metálicas)	5	13,2%
Por elemento rígido (parafusos metálicos)	7	18,4%
Pelo substrato	13	34,2%
Pelo formato do molde	13	34,2%

Fonte: o autor (2021).

Leitura

Por último, foi considerado relevante discretizar a forma que as leituras do experimento foram executadas. Foram identificadas as seguintes formas de leitura: pontual, longitudinal, planimétrica, tridimensional e de fissura. Foi considerado que as diversas formas de caracterização de fissuras foram bem classificadas nas medidas (TABELA 49). A TABELA 53 expõe as porcentagens de leituras realizadas. É

interessante notar que a leitura pontual aparece em 58% das amostras de estudos, possivelmente aumentando a credibilidade da escolha por essa abordagem.

TABELA 53 – LEITURAS

Leitura	Frequência	Frequência (%)
Longitudinal	3	6%
Pontual	22	46%
Planimétrica	3	6%
Pontual e Tridimensional	1	2%
Pontual e de fissuras	3	6%
Pontual e longitudinal	2	4%
De fissuras	14	29%

Fonte: o autor (2021).

Tabulação dos Resultados

Aqui é apresentada a compilação tabulada, em ordem cronológica, dos resultados encontrados pela revisão sistemática (TABELA 54), utilizando a legenda exposta na TABELA 55, que foi desenvolvida após a leitura de todos os artigos e a aplicação das perguntas 5W1H. A discussão sobre os resultados já foi apresentada na subseção 2.2.

TABELA 54 – RESULTADOS DE REVISÃO SISTEMÁTICA DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO PLÁSTICA

(continua)

Autor/ Autores	Duração	Ambiente	Medidas	Material	Objetivo	Tecnologia	Molde/Restrições	Leitura
Cromarty & Bryden (1967)	4h	1a	2b	3c	4a	5a1 5c1	6b4 6a2	7a
Orr & Haigh (1971)	6h	1a 1b	2b 2f	3a 3c	4b	5a1 5c1	6b4 6a2	7a
Baron (1971 apud Brüll <i>et al.</i> , 1980)	48h	-	2b 2f	3a 3b 3c	4a	5a1 5c1	6a3	7a
Ravina (1986)	4h	1a 1b 1c	2b	3a	4c	5b 5a1	6b2 6a3	7a
Mangat & Azari (1990)	24h	-	2b	3b	4b 4c	5j 5d1	6b2 6a2	7a
Holmes (1992 apud Branch <i>et. al.</i> , 2002)	5h	1c	2b	3b	4a	5a1 5c1	6a3	7a
Johansen & Dahl (1993)	20~24h	1a 1b 1c	2f 2h 2c1 2c3 2i	3b	4a	5a2 5j	6a5 6b2	7e
Banitha <i>et. al.</i> (1993)	24h	1a 1b 1c	2h 2c1 2c3	3b	4a 4c	5k	6a3 6b2 6c2	7e
Kovler (1994).	2h	-	2b	3b	4a	5a1 5c1	6a3	7a
Sanjuán & Moragues (1994)	6h	1a 1c	2b	3a	4a 4c	5a1 5a2 5i	6b2 6a3	7a
Kronlöf <i>et. al.</i> (1995)	9h	1a 1b 1c	2b 2a 2i 2e	3a	4a	5c1	6a3 6b1	7a
Banitha <i>et. al.</i> (1996)	48h	1a 1b 1c	2h 2c1 2c3	3b	4a 4c	5k	6a3 6b3 6c4	7e
Hanehara <i>et. al.</i> (1999)	168h	-	2b 2g	3c	4a	5i	-	7b
Tolêdo Filho & Sanjuán (1999)	3,5h	1a 1c	2b 2c1 2c3	3a	4a 4c	5a1 6c1 5i	6b3 6a5	7a
Bastos <i>et. al.</i> (2001)	24h	-	2b	3a	4b	5c1 5a1	6a3 6b3 6c4	7a
Nemoz-Gaillard <i>et. al.</i> (2002)	24h	1a 1b 1c	2b 2f 2h 2c1 2c3 2c4	3b	4a 4c	5f 5g	6a3	7c
Qi <i>et al.</i> (2003)	4h	-	2a 2d 2h 2c1 2c3 2i	3b	4c	5d1 5f 5g	6a2 6b2	7a
Kauffman <i>et. al.</i> (2004)	30h	1a 1b	2a 2f	3c	4c	5d1	6a1	7a
Slowik <i>et. al.</i> (2004)	30h	-	2b 2f 2i 2l	3c	4a	5e1	6b5 6a3	7a
Qi <i>et al.</i> (2005)	4h	-	2a	3b	4a	5d2	6a3 6b1 6c1	7b
Hammer & Fossá (2006)	18h	1a 1b 1c	2b 2a 2i 2e	3b	4b	5a1 5c1	6a3 6b2	7a
Sivakumar & Santhanam (2006)	24h	1a 1b 1c	2h 2c1	3b	4b 4c	5a2 5g	6a3 6b2 6c4 6c2	7e
Al-Arnoudi <i>et. al.</i> (2007)	24h	1d	2b	3b	4e 4c	5a1 5c1	6b1 6a3	7a
Wong <i>et. al.</i> (2007)	168h	1a 1b 1c	2b 2f 2l	3b	4b 4c	5e2 5e1	6b2 6a3	7a
Banitha & Gupta (2007)	22h	1a 1b 1c	2b 2h 2c1 2c3	3b	4b 4c	5i 5k	6a3 6b3 6c4	7a 7e

(conclusão)

Autor/ Autores	Duração	Ambiente	Medidas	Material	Objetivo	Tecnologia	Molde/Restrições	Leitura
Shao & Mirmiran (2007)	5h	1c	2c1	3b	4b 4c	5j	6a3 6b2 6c4	7e
Sivakumar & Santhanam (2007)	24h	1a 1b 1c	2h 2c1 2c3	3b	4b 4c	5a2 5g	6a3 6b2 6c4 6c2	7e
Newlands et. al. (2008)	10h	1a 1b 1c	2b	3b	4a	5a1 5c1	6b2 6a4	7a
Mora-Ruacho et. al. (2009)	4h	1a 1b 1c	2b 2d 2e 2f 2c1 2c3 2i	3b	4d	5c1 5a2	6a3 6b2 6c4 6c2	7a
Banathia & Gupta (2009)	24h	1a 1b 1c	2b 2d 2f 2h 2c1 2c3 2i	3a 3c	4b 4c	5i 5k	6a3 6b3 6c4	7b 7e
CARB (2009)	24h	1a 1b 1c	2h 2c1 2c3	3b	4a	5m 5j	6a3 6b2 6c4	7e
Kwak et al. (2010)	3,5h	-	2a	3a	4a 4f 4g	5d2	6b4 6a2 6c1	7a
Messan et. al. (2010)	24h	-	2b	3a	4a 4c	5f 5g	6a5 6b4	7c
Lin & Huang (2010)	24h	1a 1b 1c	2d 2c1 2c3 2i	3c	4b 4d	5m 5l	6a3 6b2 6c2	7e
Nabil et. al. (2010)	23h	1a 1b 1c	2d 2h 2c1 2c3 2i	3b	4d	5j 5l	6a3 6b3 6c4	7e
Ghoddousi & Javid et. al. (2010)	1,33h	1a 1b 1c	2b 2a 2h 2c1 2i 2e	3b	4a 4c	5a1 5d3	6a3	7a
Giroto et. al. (2011)	-	1a 1b 1c	2b 2a	3a 3b	4a	5d3	6a3 6b4	7a
Yan & Yan-Hui (2011)	24h	-	2c1 2c3	3b	4a	5l	6a6 6b2 6c4	7e
Giroto et. al. (2011)	-	1a 1b 1c	2h 2c1 2c3	3a 3b	4a	5f 5g	6a3 6b2 6c4	7e
Le-Bihan et. al. (2012)	72h	1b	2b 2a	3a	4a 4c	5f 5g	6a3 6b2	7d
Lin et. al. (2012)	24h	1a 1b 1c	2c1 2c3	3b	4b 4c	5m 5l	6a3 6b2 6c2	7e
Shen et. al. (2012)	24h	-	2h 2c1 2c3	3b	4b 4c	-	6a3 6b2 6c2	7e
Ruiz-Ripoll et. al. (2013)	20h	1a 1b 1c	2f 2h 2c1 2c3 2c4	3b	4b 4c	5f 5g	6a3 6b2 6c1	7c
Boshoff & Combrinck (2013)	4h	1a 1b 1c	2h 2c1 2j	3b	4b 4c	-	6a3 6b2 6c4 6c1	7e
Combrinck & Boshoff (2014)	24h	-	2a 2c5	3b	4a	5a2 5l 5c1	6a3 6b4 6c1	7a 7e
Pei et. al. (2014)	168h	-	2b 2f 2c1 2c2 2c3 2l	3a	4b	5e2 5e1	6a2	7a 7b
Jasiczaka et al. (2015)	320h	1a 1b 1c	2b 2f 2k	3b	4a 4f	5h	6b4 6a3	7b
Bao et. al. (2015)	168h	1a 1b	2b 2f 2c1 2c2 2c3 2l	3a	4a	5e3	6b4 6a2	7a 7b
Dzayeya et. al. (2018)	66,67h	1a 1b	2b 2a 2e	3a	4b	5f 5c1 5g	6a6 6b2	7a 7d

Fonte: o autor (2021).

TABELA 55 – LEGENDA 5W1H

(continua)

LEGENDA 5W1H	WHO (Autor)	
	-	Autor/Responsável
	WHEN (tempo de ensaio)	
	-	Tempo
	WHERE (variáveis controláveis do ambiente)	
	1a	Temperatura
	1b	Umidade
	1c	Vento
	1d	Externo (fora de laboratório)
	WHAT (Medidas)	
	2a	Deslocamentos verticais
	2b	Deslocamentos horizontais
	2c1	Dimensões de fissuras
	2c2	Localização longitudinal de fissuras
	2c3	Desenvolvimento de fissuras
	2c4	Mapeamento de fissuras
	2c5	Fissuramento interno
	2d	Evaporação
	2e	Pressão capilar
	2f	Temperatura da amostra
	2g	Umidade interna da amostra
	2h	Quantidade de fissuras
	2i	Massa da amostra
	2j	Massa da água exudada
	2k	Voltagem
	2l	Comprimento de Onda
	WHAT (Material)	
	3a	Argamassa
	3b	Concreto
	3c	Pastas cimentícias
	WHY (Objetivo)	
	4a	Novo método
	4b	Variação de método existente
	4c	Efeito de adição física
	4d	Efeito de adição química
	4e	Condição ambiental específica
	4f	Retração química
	4g	Isolar dilatação térmica
	HOW (Equipamento)	
	5a1	Elementos rígidos para transmitir deslocamentos
	5a2	Elementos rígidos para induzir fissuramento
	5b	Relógios mecânicos de precisão

LEGENDA 5W1H	5c1	LVDT	
	5d1	Laser (prato refletor simples)	
	5d2	Laser (sensor CMOS)	
	5d3	Laser	
	5e1	Fibra ótica (Fiber Bragg grating para deslocamentos)	
	5e2	Fibra ótica (Fiber Bragg grating para temperatura)	
	5e3	Fibra ótica (PPP-BOTDA)	
	5f	DIC	
	5g	Câmera	
	5h	Potenciômetro	
	5i	Extesômetros	
	5j	Microscópio ou lente de aumento	
	5k	Microscópio com vernier	
	5l	Fissurômetro	
	5m	Corda	
	HOW (Molde e Restrições)		
	6a1	Moldes cônicos	
	6a2	Moldes cilíndricos	
	6a3	Moldes paralelepípedicos	
	6a4	Moldes prismáticos	
	6a5	Moldes anelares	
	6a6	Moldes cúbicos	
	6a6	Molde "Dumbbell"	
	6b1	Molde de Madeira	
	6b2	Molde de Metal	
	6b3	Molde de Concreto	
	6b4	Molde de Plástico ou Acrílico	
	6b5	Molde esponjoso	
	6c1	Restrição por elemento rígido (barras metálicas)	
	6c2	Restrição por elemento rígido (parafusos metálicos)	
	6c4	Restrição pelo substrato	
	6c4	Restrição pelo formato do molde	
	HOW (Leitura)		
	7a	Pontual	
	7b	Longitudinal	
	7c	Planimétrica	
	7d	Tridimensional	
7e	De fissuras		

Fonte: o autor (2021)