

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE AGENTES HIDROFUGANTES NAS
CARACTERÍSTICAS DE TELHAS ONDULADAS DE FIBROCIMENTO SEM
AMIANTO**

Tassiane de Paula Pinheiro Coelho

São Carlos-SP
2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE AGENTES HIDROFUGANTES NAS
CARACTERÍSTICAS DE TELHAS ONDULADAS DE FIBROCIMENTO SEM
AMIANTO**

Tassiane de Paula Pinheiro Coelho

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRA EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAS

Orientador: Prof. Dr. Márcio Raymundo Morelli

Agência Financiadora: CNPq – Processo: 170533/2018-2

São Carlos-SP
2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus e a Nossa Senhora de Fátima por iluminarem minha trajetória e aos meus familiares, amigos e companheiro pelo carinho e apoio.

VITAE DO CANDIDATO

Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade de Franca – UNIFRAN, Franca/SP (2015).



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Tassiane de Paula Pinheiro Coelho, realizada em 22/07/2019:

Prof. Dr. Anselmo Ortega Boschi
UFSCar

Prof. Dr. João Baptista Baldo
UFSCar

Prof. Dr. Diego Fernandes Neris
UFPR

Prof. Dr. Márcio Raymundo Morelli
UFSCar

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Márcio Raymundo Morelli e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dr. Anselmo Ortega Boschi

AGRADECIMENTOS

À Deus por minha vida, família e amigos

Aos meus pais, irmãos, avós e tios, Daniela Paula, Cláudio César, Tamires, Thiago, Auta, Marcos, Zélia, José, Márcia, Adriano, Renata, Lorena, Lucas e Thales pelo incentivo e amor incondicional.

Ao meu companheiro Leonardo pelo carinho e incentivo nesta jornada.

Ao meu professor de graduação Diego pelo incentivo a seguir carreira acadêmica.

Ao meu orientador Márcio Raymundo Morelli pelo incentivo, carinho, aprendizado e empenho dedicado ao meu trabalho.

Aos meus amigos Guilherme, Jhonata e Milli pela presença e apoio no decorrer da dissertação.

Ao grupo de técnicos do CCDM, LCE e principalmente LAFSCer.

Ao Gustavo Rocha pelos materiais doados.

Gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

RESUMO

O fibrocimento é um material de grande aplicabilidade no ramo da construção civil, devido as suas características, versatilidade e baixo custo, que o torna um elemento acessível. As telhas onduladas de fibrocimento são exemplos de alguns produtos derivados dessa classe de material, além de objeto de estudo desse trabalho, estas, são de matriz cimentícia, comumente de cimento Portland, reforçadas com fibras, que atualmente em substituição ao amianto, são vegetais e/ou sintéticas. Entretanto, um dos principais defeitos que esse produto apresenta está relacionado à permeabilidade à água, podendo ser tolerável o aparecimento de umidade na face inferior da telha, desde que não cause manchamento nem o gotejamento. É importante ressaltar que materiais porosos podem apresentar uma significativa capacidade de absorção de água como função da estrutura, quantidade e dimensões de poros, e as telhas de fibrocimento, além da porosidade inerente do produto, possuem vazios nas regiões de baixa aderência da interface fibra/matriz, devido ao caráter hidrofóbico das fibras. Nesse estudo buscou-se gerar contribuições sobre o efeito de agentes hidrofugantes, em telhas previamente processadas, de forma a minimizar a permeabilidade à água, reduzindo sua acessibilidade pelos vazios da interface fibra/matriz, em substituição às alternativas comerciais de tratamentos por impermeabilizações e pinturas superficiais. A metodologia foi baseada em análises das características de telhas de fibrocimento sem amianto avaliando a absorção de água, porosidade aparente, distribuição do tamanho de poros, resistência mecânica à flexão, permeabilidade à água sem e com fluxo contínuo e análise microestrutural de amostras tratadas por imersão em soluções aquosas de hidrofugantes antes e após ensaio de envelhecimento acelerado. Os resultados mostraram que banhos de imersão com agentes hidrofugantes à base de silicones, com siloxano e silano com resina acrílica copolimerizada são eficazes, minimizam o manchamento e a formação de gotas, e que esse método de tratamento pode ser aplicado industrialmente.

Palavras-chave: fibrocimento; telhas; hidrofugantes; banho de imersão.

ABSTRACT

**EVALUATION OF THE EFFECT OF WATER REPELLENT AGENTS ON THE
CHARACTERISTICS OF ROOF TILES CORRUGATED FIBER CEMENT
WITHOUT ASBESTOS**

The fiber cement is a material of great applicability in the branch of the civil construction, due to its characteristics, versatility and low cost, that makes it an accessible element. Fiber cement corrugated tiles are examples of some products derived from this class of material. Besides being the object of study of this work, these are of cement-based matrix, commonly Portland cement, reinforced with fibers, which currently replace asbestos, are vegetables and / or synthetic. However, one of the main defects that this product presents is related to water permeability, and the appearance of moisture on the underside of the tile may be tolerated, as long as it does not cause too much staining or the formation of water droplets. It is important to note that porous materials may have a significant water absorption capacity as a function of pore structure, quantity and pore size, and the fiber cement tiles, as well as the inherent porosity of the product, have voids in the low-adhesion regions of the fiber interface / matrix, due to the hydrophobic character of the fibers. This study aimed to generate contributions on the effect of water repellent agents on previously processed tiles in order to minimize water permeability, reducing their accessibility through the voids of the fiber / matrix interface, replacing the commercial alternatives of waterproofing and paints treatments surface. The methodology was based on analyzes of the characteristics of asbestos-free fibre cement tiles, evaluating water absorption, apparent porosity, pore size distribution, flexural strength, permeability to water without and with continuous flow and microstructural analysis of samples treated by immersion in aqueous solutions of water repellents before and after accelerated aging test. The results have shown that immersion baths with silicone based hydrophobizing agents with siloxane and silane with copolymerized acrylic resin mixture are effective, minimize staining and droplet formation, and that such a treatment method can be applied industrially.

Keywords: fibre-cement; roof tile; *hydrophobizing* agents; immersion bath.

PUBLICAÇÕES

COELHO, T. P. P.; MORELLI, M. R., “Avaliação do Efeito de Agentes Hidrofugantes na Permeabilidade de Telhas Onduladas de Fibrocimento sem Amianto, submetido a Revista Ambiente Construído, 2019.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xxix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo Geral.....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	7
3.1 Cimento Portland.....	7
3.2 Fibras.....	18
3.2.1 Fibras Poliméricas.....	20
3.2.2 Fibras Naturais.....	23
3.3 Fibrocimento.....	27
3.4 Telhas.....	35
3.4.1 Telhas de Fibrocimento sem Amianto.....	35
3.5 Hidrofugantes.....	43
3.6 Carbonatação.....	49
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1 Materiais.....	57
4.2 Métodos.....	60
4.2.1 Preparo do Corpos.....	60
4.2.2 Soluções.....	60
4.2.3 Banhos de Imersão.....	62
4.2.4 Permeabilidade.....	63

4.2.4.1 Permeabilidade com auxílio de cachimbos.....	63
4.2.4.2 Permeabilidade de indução à chuva.....	64
4.3 Caracterização.....	65
4.4 Ensaio de Envelhecimento.....	69
4.5 Infraestrutura.....	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.1 Profundidade de Solução.....	73
5.2 Análise de Permeabilidade.....	74
5.2.1 Método Fotográfico: Absorção de Água Deionizada.....	76
5.2.2 Método Fotográfico: Absorção de Água Deionizada com Adição de Azul de Metileno.....	98
5.3 Caracterização.....	113
5.3.1 Absorção de Água.....	114
5.3.2 Porosidade Aparente.....	114
5.3.3 Resistência Mecânica à Flexão a Três Pontos.....	115
5.3.4 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.....	117
5.4 Permeabilidade à água: Influência da Temperatura.....	119
5.5 Permeabilidade: Indução à Chuva.....	136
5.6 Caracterização Microestrutural.....	141
5.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	142
5.6.2 Microscopia Confocal.....	144
5.7 Teste de Envelhecimento Acelerado.....	148
5.7.1 Envelhecimento Acelerado Ultravioleta.....	149
5.7.2 Envelhecimento Acelerado Imersão e Secagem.....	151
5.8 Ensaio e Caracterização Finais.....	154
5.8.1 Permeabilidade.....	154
5.8.2 Absorção de Água e Porosidade Aparente.....	156
5.8.3 Resistência Mecânica à Flexão a Três Pontos.....	158
5.8.4 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	159
6 CONCLUSÕES.....	165
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	167
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	169

ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
Tabela 3.1 – Cimento Portland produzidos no Brasil e suas composições.....	13
Tabela 3.2 – Principais compostos químicos constituintes do Cimento Portland CPII, antes e após hidratação.....	17
Tabela 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas de fibras vegetais e PP....	26
Tabela 4.1 – Características dimensionais de telhas onduladas de fibrocimento comercializadas.....	58
Tabela 4.2 – Características técnicas de telhas onduladas de fibrocimento comercializadas.....	58
Tabela 4.3 – Formulação das soluções para os banhos de imersão.....	61
Tabela 5.1 – Análise de quantificação do elemento cromo obtida por espectroscopia de raios X por energia dispersa (EDS) após absorção por diferentes tempos de imersão.....	74
Tabela 5.2 – Ensaio de permeabilidade à água: tempo de absorção.....	75
Tabela 5.3 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de AA, PA, MRF e permeabilidade à água com adição de metileno.....	117
Tabela 5.4 – Renomeação dos corpos de provas de telhas onduladas de fibrocimento tratadas com soluções de hidrofugantes.....	120
Tabela 5.5 – Análise química elementar obtida por EDS nos pontos analisados A e B da figura 5.85c.....	160
Tabela 5.6 - Análise química elementar obtida por EDS no ponto A da figura 5.87d.....	162

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1 – Esquemática do processo de fabricação do cimento Portland.....	9
Figura 3.2 – Imagens de moinhos utilizados na fabricação de cimento Portland.....	10
Figura 3.3 – Exemplo de nomenclatura mais comum do cimento Portland.	11
Figura 3.4 – Exemplos de alguns tipos de cimento Portland ensacados prontos para a comercialização.....	11
Figura 3.5 – Exemplo de cimentos Portland e alguns componentes.....	12
Figura 3.6 – Morfologias típicas de (A) Etringita (C ₆ ASH ₃ 2); (B) Hidróxido de Cálcio (CH).....	17
Figura 3.7 – Matriz cimentícia com reforço de fibra atuando como pontes de transferência de tensões	19
Figura 3.8 – Matriz cimentícia, disposição das fibras atuando como reforço.....	20
Figura 3.9 - Interface matriz com fibra de polipropileno: vazios na região de baixa aderência.....	22
Figura 3.10 – Mero do PVA (a); Grupo funcional hidroxila (b).....	23
Figura 3.11 – Esquema de estrutura de uma célula vegetal.....	24
Figura 3.12 – Método Magnani para produção de caixa d'água.....	27
Figura 3.13 – Amostra de material de placa de fibrocimento.....	29
Figura 3.14 – Fachada de placas cimentícias.....	30
Figura 3.15 – Telhas onduladas de fibrocimento sem amianto.....	31
Figura 3.16 – Tipos de amianto: (a) amianto branco; (b) amianto azul; (c) amianto marrom.....	31
Figura 3.17 - Aspectos das fibras de amianto: (A) e (B) fibras isoladas; (C) presentes sobre o mineral mica muscovita.....	33

Figura 3.18 – Tipos de telhas: (a) Cerâmica; (b) Concreto; (c) galvanizada; (d) metálica do tipo gravilhada; (e) policarbonato; (f) Shingle; (g) vidro; (h) translúcida; (i) fibrocimento.....	35
Figura 3.19 – Manchas em telhados de diferentes materiais e diferentes locais: (a) cerâmica, cidade de Blumenau/SC, (b) fibrocimento, cidade de Campos de Jordão/SP e (c) concreto, cidade São Paulo/SP.....	36
Figura 3.20 – (a) Delaminação (B) Manchamento na face inferior em telha ondulada de fibrocimento sem amianto nacional com fibras de PVA, sem prensagem e curadas ao ar.....	39
Figura 3.21 - Montagem das estruturas de cobertura para inspeção termográfica e temperatura superficial.....	40
Figura 3.22 – Amostras de telhas onduladas de fibrocimento: (A) telha nova; (B) telha carbonatada; (C) telha com presença de fungos.....	41
Figura 3.23 – Ângulo de contato, (a) Material de tensão superficial maior do que da água, resultando em menor ângulo de contato, (b) Material de tensão superficial menor do que da água, resultando em maior ângulo de contato.....	43
Figura 3.24 – Atuação de hidrofugantes na superfície: (a) Modificador de tensão superficial das paredes dos poros, (b) Bloqueador dos poros, (c) Formador de película superficial.....	45
Figura 3.25 – Estrutura química: (a) Silano; (b) Siloxano; (c) Metil-Siliconato.....	46
Figura 3.26 – Processo de adesão de um silano a um substrato silicoso...	47
Figura 3.27 – Absorção capilar de água: (a) Superfície sem tratamento; (b) Superfície com tratamento hidrofóbico.....	48
Figura 4.1 - Fluxograma da Metodologia: principais etapas utilizadas no desenvolvimento experimental.....	54
Figura 4.2 – Método Hatschek para produção de telhas onduladas.....	57

Figura 4.3 – Corpo de prova com dimensões em cm de 30 x15 x0,5 obtido do corte de telha de fibrocimento ondulada, sem tratamentos e com 30 dias de idade.....	60
Figura 4.4 - Viscosímetro Brookfield e respectivo multiplicador (conversor de % de torque em viscosidade cP).....	61
Figura 4.5 - Banho de imersão dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento em solução de hidrofugantes.....	62
Figura 4.6 – Cachimbos de vidro com escala em mililitros, localizados na parte côncava e convexa do corpo de prova: (A) água deionizada; (B) água deionizada com adição de azul de metileno.....	64
Figura 4.7 - (A) Estrutura esquemática; (B) experimental para o ensaio de permeabilidade com indução de chuva em telhas onduladas de fibrocimento.....	65
Figura 4.8 – (A) Máquina Instron modelo 5200; (B) carga atuando em um corpo de prova de telha ondulada de fibrocimento.....	67
Figura 4.9 - (A) Porosímetro de Mercúrio/ American Instrument Co., modelo 5-7118; (B) detalhe da coluna de Hg.....	67
Figura 4.10 – Microscópios utilizados durante as análises microestruturais e química elementar dos corpos de provas: (A) Confocal; (B) MEV FEI Inspect S 50; (C) MEV Philips XL-30 TMP.....	68
Figura 4.11 – Equipamento LCP 215: envelhecimento por radiação ultravioleta utilizado para verificar a durabilidade da ação de hidrofugantes aplicados em telhas onduladas de fibrocimento.....	69
Figura 4.12 - Ciclo de envelhecimento por imersão e secagem de amostras de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas.....	70
Figura 5.1 – Microscopia Eletrônica de Varredura na espessura da amostra pós banho com soluções de hidrofugantes contendo óxido de cromo. (a) banho de imersão em seis minutos; (b) banho de imersão em um minuto e trinta segundos.....	74

Figura 5.2 – Corpo de prova S0 (sem banho com solução de hidrofugante) (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	76
Figura 5.3 – Corpo de prova S1: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	77
Figura 5.4 – Corpo de prova S2: (a) face inferior antes da permeabilidade; (b, c) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	78
Figura 5.5 – Corpo de prova S3: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	79
Figura 5.6 – Corpo de prova S4: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade	80
Figura 5.7 – Corpo de prova S5: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	81
Figura 5.8 – Corpo de prova S6: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	82

Figura 5.9 – Corpo de prova S7: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	83
Figura 5.10 – Corpo de prova S8: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	84
Figura 5.11 – Corpo de prova S9: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	85
Figura 5.12 – Corpo de prova S10: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	86
Figura 5.13 – Corpo de prova S11: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	87
Figura 5.14 – Corpo de prova S12: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	88
Figura 5.15 – Corpo de prova S13: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	89

Figura 5.16 – Corpo de prova S14: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	90
Figura 5.17 – Corpo de prova S15: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	91
Figura 5.18 – Corpo de prova S16: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	92
Figura 5.19 – Corpo de prova S17: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	93
Figura 5.20 – Corpo de prova S18: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	94
Figura 5.21 – Corpo de prova S19: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	95
Figura 5.22 – Corpo de prova S20: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	96

Figura 5.23 – Corpo de prova S21: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	97
Figura 5.24 – Corpo de prova S0: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	98
Figura 5.25 – Corpo de prova S1: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	99
Figura 5.26 – Corpo de prova S2: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	100
Figura 5.27 – Corpo de prova S3: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	100
Figura 5.28 – Corpo de prova S4: (a, b) sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade.....	101
Figura 5.29 – Corpo de prova S5: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	101
Figura 5.30 – Corpo de prova S6: (a, b) sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade.....	102
Figura 5.31 – Corpo de prova S7: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	102
Figura 5.32 – Corpo de prova S8: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	103
Figura 5.33 – Corpo de prova S9: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	104

Figura 5.34 – Corpo de prova S10: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	104
Figura 5.35 – Corpo de prova S11: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	105
Figura 5.36 – Corpo de prova S12: (a, b) sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade.....	106
Figura 5.37 – Corpo de prova S13: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	106
Figura 5.38 – Corpo de prova S14: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	107
Figura 5.39 – Corpo de prova S15: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	108
Figura 5.40 – Corpo de prova S16: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	108
Figura 5.41 – Corpo de prova S17: (a, b) sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade.....	109
Figura 5.42 – Corpo de prova S18 face inferior, superfície convexa, após tempo final de permeabilidade.....	110
Figura 5.43 – Corpo de prova S19: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	110
Figura 5.44 – Corpo de prova S20: (a, b) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	111
Figura 5.45 – Corpo de prova S21: (a, b) sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade.....	112
Figura 5.46 – Absorção de água (%) de corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento.....	114

Figura 5.47 - Porosidade Aparente (%) de corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento.....	115
Figura 5.48 – Resistência mecânica à flexão a três pontos.....	116
Figura 5.49 – Distribuição dos tamanhos dos poros obtida por porosimetria de Hg de corpos de prova representativos de telhas de fibrocimento tratadas por solução de hidrofugantes.....	118
Figura 5.50 - Corpo de prova S5 B: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	121
Figura 5.51 - Corpo de prova S5 C: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c) face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	122
Figura 5.52 - Corpo de prova S5 D: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa), após tempo final de permeabilidade.....	123
Figura 5.53 - Corpo de prova S10 B: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	124
Figura 5.54 - Corpo de prova S10 C: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	125
Figura 5.55 - Corpo de prova S10 D: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d, e) sequencialmente face inferior e superior/superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	126

Figura 5.56 - Corpo de prova S13 B: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c) face inferior após tempo final de permeabilidade.....	127
Figura 5.57 - Corpo de prova S13 C: (a, b) sequencialmente face inferior antes do ensaio de permeabilidade e face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	128
Figura 5.58 - Corpo de prova S13 D: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d, e) sequencialmente face inferior e superior/superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	129
Figura 5.59 - Corpo de prova S14 B: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	130
Figura 5.60 - Corpo de prova S14 C: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	131
Figura 5.61 - Corpo de prova S14 D: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	132
Figura 5.62 - Corpo de prova S21 B: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	133
Figura 5.63 - Corpo de prova S21C: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	134

Figura 5.64 - Corpo de prova S21D: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade.....	135
Figura 5.65 - Face inferior dos corpos de provas proveniente do ensaio de permeabilidade com indução à chuva, após o tempo final de permeabilidade:(a, b, c) sequencialmente correspondentes aos corpos de provas S0, S5, S10.....	137
Figura 5.66 - Face inferior dos corpos de provas proveniente do ensaio de permeabilidade à indução de chuva, após o tempo final de permeabilidade: (a, b, c) sequencialmente correspondentes aos corpos de provas S13, S14, S21.....	138
Figura 5.67 - Gráfico da classificação qualitativa dos corpos de provas à temperatura de 25°C (ambiente) antes dos banhos de imersão em soluções de hidrofugantes, em função dos resultados (em réplica) dos ensaios de permeabilidade.....	139
Figura 5.68 - Gráfico da classificação qualitativa dos corpos de provas tratados à temperatura de 70°C antes dos banhos de imersão em soluções de hidrofugantes, em função dos resultados (em réplica) dos ensaios de permeabilidade.....	140
Figura 5.69 - Micrografias obtidas por Microscopia eletrônica de Varredura das superfícies de fratura de amostras de telhas onduladas de fibrocimento sem e após banhos de imersão em soluções de hidrofugantes: sequencialmente, esquerda para direita (a, b, c) representam o corpo de prova S0 (sem hidrofugação); (d, e, f) representam o corpo de prova S5.....	142
Figura 5.70 - Micrografias obtidas por Microscopia eletrônica de Varredura das superfícies de fratura de amostras de telhas onduladas de fibrocimento após banhos de imersão em soluções de hidrofugantes: sequencialmente, esquerda para direita (a, b, c) representam o corpo de prova S13; (d, e, f) representam o corpo de prova S14.....	143

Figura 5.71 - Micrografias obtidas por Microscopia Confocal da superfície de amostra de telha ondulada de fibrocimento: sequencialmente (a,b,c) corpo de prova S0 (sem hidrofugação).....	144
Figura 5.72 - Micrografias obtidas por Microscopia Confocal de amostra de telha ondulada de fibrocimento após banho de imersão em solução de hidrofugante: sequencialmente (a, b, c, d) corpo de prova S5.....	145
Figura 5.73 - Micrografias obtidas por Microscopia Confocal de amostra de telha ondulada de fibrocimento após banho de imersão em solução de hidrofugante, sequencialmente corpo de prova S13: (a, b) região central; (c, d) região central direcionada para região da borda esquerda.....	146
Figura 5.74 - Micrografias obtidas por Microscopia Confocal de amostra de telha ondulada de fibrocimento após banho de imersão em solução de hidrofugante, sequencialmente corpo de prova S14: (a) região central; (b) borda esquerda; (c, d) borda direita.....	147
Figura 5.75 - Amostras de telhas onduladas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado por ultravioleta: (a, b) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S0; (c, d) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S5.....	149
Figura 5.76 - Amostras de telhas onduladas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado por ultravioleta: (a, b) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S13; (c, d) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S14.....	151
Figura 5.77 - Corpos de provas do ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem: (a, b) respectivamente faces superior e inferior do corpo de prova S0 antes do ensaio; (c, d) respectivamente faces inferior e superior do corpo de prova S0 após o ensaio; (e, f) respectivamente faces superior e inferior do corpo de prova S5 antes do ensaio; (g, h) respectivamente faces inferior e superior do corpo de prova S5 após o ensaio.....	152

Figura 5.78 - Corpos de provas do ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem: (a, b) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S14 antes do ensaio; (c, d) respectivamente face inferior e superior do corpo de prova S14 após o ensaio; (e, f) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S13 antes do ensaio; (g, h) respectivamente face inferior e superior do corpo de prova S13 após o ensaio.....	153
Figura 5.79 - Comparação em relação ao ensaio de permeabilidade à água dos corpos de provas: (a, b, c, d) respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 sem sofrer envelhecimento acelerado; (e, f, g, h) respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta.....	154
Figura 5.80 - Comparação em relação ao ensaio de permeabilidade à água dos corpos de provas: (a, b, c, d) respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 sem ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem; (e, f, g, h) respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 após o envelhecimento acelerado por imersão e secagem.....	155
Figura 5.81 - Absorção de água (%) dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas selecionados, antes e após os ensaios de envelhecimento por radiação ultravioleta e por imersão em água e secagem (cíclico).....	157
Figura 5.82 - Porosidade Aparente (%) dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas selecionados, antes e após os ensaios de envelhecimento por radiação ultravioleta e por imersão em água e secagem (cíclico).....	157

Figura 5.83 - Resistência Mecânica à flexão a três pontos dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas selecionados, antes e após os ensaios de envelhecimento por radiação ultravioleta e por imersão em água e secagem (cíclico).....	158
Figura 5.84 - Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S0 (sem hidrofugação) após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta.....	159
Figura 5.85 - Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S5 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta.....	160
Figura 5.86 - Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S13 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta: (a) detalhes das fibras; (b) detalhes da interface fibra/matriz.....	161
Figura 5.87 - Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S14 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta: (a,b,c,d) detalhes microestruturais, fibras, vazios, interface fibra/matriz cimentícia e fase cristalina etringita (C6ASH32).....	162

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PP	Polipropileno
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NTF	Nova Tecnologia de Fibrocimento

1 INTRODUÇÃO

O setor de construção civil apresenta constante evolução e progresso, mutuamente, concede aos desafios relacionados ao meio ambiente possíveis soluções para reduzir o uso de recursos naturais, como substituições adequadas, principalmente por recursos recicláveis, redução na geração de resíduos e entre outros aspectos.

Normalmente os materiais de construção civil passam por deterioração devido a diversos fatores, em relação aos elementos com a função de cobrir e/ou proteger, em específico as telhas, estas que estão expostas em ambientes com poluição, radiação solar e chuvas [1].

Em alguns países, principalmente os desenvolvidos, há escassez de materiais para a construção de telhados, e em alguns casos, materiais locais são utilizados, como exemplos, folhas de palmeiras, gramas, palhas e outros, porém estes tipos requerem resistência e manutenção, o que não os tornam atrativos [1].

Alguns materiais como chapas constituídas de cimento e asbesto ou amianto crisotila ($3\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) substituíram os materiais tradicionais, mas o amianto, fibra mineral, não é uma opção a ser considerada na construção, devido a ocasionar preocupantes danos à saúde, como associação a doenças respiratórias e ser reconhecidamente cancerígeno. Deve-se aprimorar a substituição do amianto por outros materiais alternativos desde que submetidos à avaliação científica definida como inofensiva, priorizando a saúde [2,3].

Os telhados executados com telhas cerâmicas, são considerados adequados e usuais, e por sua vez apresentam algumas vantagens em comparação aos que são executados por telhas de fibrocimento, como exemplo, reúnem características técnicas e conforto térmico, no entanto, por serem mais econômicas, telhas de fibrocimento se destacam [1].

No final do século XIX, Ludwing Hatschek [4] iniciou a produção de fibrocimento, fundamentado no processo de produção de papel, foi aperfeiçoado e recebeu o nome de processo Hatschek, dispondo como objetivo, a produção placas de fibrocimento.

O fibrocimento apresenta várias aplicações e versatilidade, além de um elemento construtivo acessível, pertinente e de baixo custo, também traz consigo resistência, proveniente de fibras que são incorporadas, de forma que o compósito, no ramo da construção civil, deriva produtos como placas, telhas, caixa d'água, painéis, entre outros [5].

As telhas de fibrocimento são de matriz cimentícia, tipicamente de cimento Portland, reforçadas com fibras, vistas como uma alternativa às telhas cerâmicas [6]. Atualmente, em substituição ao amianto, utilizam-se diversos tipos de fibras vegetais e/ou sintéticas com a intenção de se obter o reforço da matriz cimentícia, de forma que esses materiais compósitos possam ser de fácil acesso, baixo custo e baixo consumo de energia, buscando construções mais sustentáveis. Vale ressaltar, no entanto, que o cimento, constituinte de maior proporção em massa no fibrocimento é o maior responsável pelos danos ao meio ambiente pelo efeito estufa [7].

As telhas são expostas durante ao longo de sua vida útil aos principais agentes naturais de deterioração, como eflorescência, carbonatação e desenvolvimento de fungos. A eflorescência induz o prejuízo de desempenho mecânico das telhas, pois está associada à lixiviação e impregnação de alguns compostos. A carbonatação é ocasionada por uma reação química entre o dióxido de carbono presente na atmosfera e os componentes cimentícios. Já o desenvolvimento de fungos é resultante dos tipos de agregados associados ao cimento e também o meio no qual o produto está localizado (insolação) [8, 9].

Dentre esses principais defeitos que as telhas de fibrocimento apresentam, independentemente do tipo de fibra utilizado na sua manufatura, destaca-se o desenvolvimento de fungos e outros agentes biológicos (prejudiciais à saúde) que podem originar camadas escuras que modificam a coloração inicial da superfície, apesar de não promoverem a degradação física delas [6].

Associada a esse tipo de patologia biológica está a permeabilidade desses materiais. Em relação à permeabilidade de telhas de fibrocimento, é considerado tolerável segundo a NBR 7581 o aparecimento de umidade na superfície inferior da telha (manchas de umidade na face oposta à ação da água), mas não poderá haver formação de gotas de água [10].

É importante ressaltar que os materiais porosos apresentam uma significativa capacidade de absorção de água, devido a alguns fatores, como a estrutura, quantidade e dimensões de poros, molhabilidade da superfície, entre outros [11].

As telhas não devem apresentar fissuras e delaminações que provoquem vazamentos, ou porosidade aberta (poros interconectados) que permitam a passagem da água. Esses caminhos normalmente ocorrem devido à pobre adesão na interface das fibras vegetais e/ou sintéticas com a matriz cimentícia (zona de transição fibra/matriz chamada de interface vazia), diferentemente da interface que se tem quando o amianto (fibra mineral) é utilizado [12, 13].

Tipos de fibras podem influenciar tanto na permeabilidade à água como na absorção de água dos compósitos cimentícios, exemplo, telhas de fibrocimento de fibras sintéticas apresentam características de hidrofobicidade (repelência à água), o que pode refletir na absorção de água das telhas, quando comparadas a aquelas que utilizam fibras de celulose, que por sua vez apresentam teores de absorção de água superiores, devido ao caráter hidrofílico (afinidade por moléculas de água) da celulose [14].

Atualmente existe a possibilidade de reduzir e/ou evitar a passagem de água pelos canais (poros abertos, interconectados, vazios de interface fibra/matrizes) nesses tipos de materiais. O uso de agente da categoria hidrofóbica, como os hidrofugantes, que atuam como bloqueadores de poros, modificadores da tensão superficial das paredes dos poros e também formam uma película superficial [15].

Diante disso, a permeabilidade à água é vista como um problema em telhas, neste caso, telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, que podem gerar manchas ou até mesmo formação de gota, o que além de influenciar na estética de uma construção civil, pode gerar infiltrações, o que afetará o restante da obra, influenciando na capacidade de ser prejudicial à saúde provocando a formação de mofo, o qual é nocivo à saúde.

A necessidade de atender as pesquisas, estudos e contribuir ao padrão industrial tornou-se essencial melhorias na qualidade associada ao preço acessível. Esse tipo de produto é essencial às muitas moradias, onde os maiores

consumidores são os de baixa renda, e os que desejam obras financeiramente econômicas.

Nesse âmbito, com este estudo pretendeu-se gerar contribuições sobre o efeito de agentes da categoria hidrofóbica, os hidrofugantes, em telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, previamente processadas, de forma a minimizar a permeabilidade à água, reduzindo sua acessibilidade através da interface fibra/matriz e formação de gotas, em substituição às alternativas comerciais como impermeabilizações e pinturas superficiais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver uma solução contendo hidrofugantes, aplicada através de um banho, imediatamente após a conformação do produto, telha ondulada de fibrocimento sem amianto, que permita atender os requisitos da NBR 7581, ou seja, avaliar a influência de agentes da categoria hidrofóbicos, os hidrofugantes, nas características físicas de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, visando minimizar a permeação à água, por meio de tamponamento interno dos vazios, poros abertos e interfaces fibra/matriz vazias, responsáveis pela permeabilidade.

2.2 Objetivos Específicos

Para analisar a ação dos agentes hidrofugantes nas características das matrizes de fibrocimentos (telhas do tipo onduladas), buscou-se:

- Caracterizar telhas de fibrocimento conforme processadas e comercializadas;
- Selecionar o melhor agente hidrofugante, orgânico ou inorgânico, considerando a efetividade na redução da permeabilidade e ao requisito de ser utilizado em solução, visando a sua aplicação pela técnica de imersão (acesso ao interior do material) de telhas já conformadas;
- Avaliar a profundidade de penetração da solução do agente hidrofugante em função da espessura da telha, viscosidade da solução e tempo de imersão;
- Avaliar alterações da absorção de água e porosidade aparente das telhas pós-imersão;
- Avaliar possíveis alterações (significativas ou não) na resistência mecânica à flexão das telhas pós-imersão;

- Observar a ocorrência ou não de modificações microestruturais, após impregnação pelo agente hidrofugante, com foco nas interfaces fibra/matriz.
- Submeter ao envelhecimento acelerado os corpos de provas impregnados, para observar possíveis e significativas alterações na permeabilidade, correlacionadas à durabilidade do tratamento por imersão com hidrofugante.

Dessa forma, procurou-se propor uma solução para a melhoria da qualidade das telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, baseado na redução da permeabilidade por um tratamento de imersão em agentes hidrofugantes, de tal forma a dificultar ou bloquear os caminhos preferenciais pelos quais, na presença contínua, a água penetra e percorre, em contrapartida aos tratamentos superficiais comercialmente realizados (impermeabilização e/ou pintura) que requerem periódica manutenção.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Cimento Portland

A matriz do fibrocimento convencional é composta predominantemente por calcário em pó, cimento Portland e adição pozolânica. Algumas indústrias adotam a adição de *filler* à base de calcário pulverizado na composição do fibrocimento, levando a redução de teor de cimento na mistura sem que resulte no produto final o comprometimento de desempenho mecânico, ofertando um menor custo na produção do fibrocimento [16].

No quesito de melhorar durabilidade e propriedade mecânica do fibrocimento, a sílica ativa, o metacaulim e a cinza volante, ou seja, materiais pozolânicos, são empregados para resultar nestas melhorias. Esses materiais têm por definição [16,17]:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias.

Em relação a porosidade do fibrocimento, uma simples variação no teor de matérias-primas relacionada a matriz cimentícia, irá implicar em variações do empacotamento das partículas, que por sua vez, influencia na porosidade do mesmo. Uma vez que os poros se comportam como concentradores de tensão, algumas propriedades da matriz cimentícia são influenciadas diretamente pela fração de poros [18].

Para compreender melhor a atuação adequada a cada tipo de cimento Portland, é adequado o estudo das características da composição do mesmo, ou seja, suas principais matérias-primas, o clínquer e as adições [19].

As adições de elementos no cimento variam de um para outro, além de serem responsáveis pela diferença em cada tipo de cimento voltado a sua composição e principalmente aplicação. Os elementos adicionados são escória de alto forno (“subproduto do tratamento de minério de ferro alto-forno”), materiais carbonáticos (“materiais finamente divididos constituídos em sua maior

parte de carbonato de cálcio”), gesso e materiais pozolânicos; cada um exerce funções diferente, conseqüentemente aplicações diferentes [19-21]

O clínquer está presente em qualquer tipo de cimento Portland, suas matérias-primas principais são a argila e o calcário. É caracterizado como ligante hidráulico resistente, isto é, devido a capacidade de desenvolver reação química em presença de água, ou seja, inicialmente torna-se pastoso em seguida endurece, traz consigo durabilidade e elevada resistência [19].

O cimento Portland tem por definição de um pó fino que sob ação da água apresenta propriedade ligantes, endurece e tonar-se resistente, e também não se decompõe mesmo quando é imposto a nova ação da água. O nome dado a este tipo de cimento, tem associação a Ilha Britânica de Portland, pois sua solidez é comparável as das rochas dessa ilha, assim foi patenteado por Joseph Aspdin em 1824 o nome do produto cimento Portland [22].

É importante realçar que o cimento Portland é um produto acessível, com relação adequada de custo benefício, principal material utilizado na construção civil, tem por caracterização como pó fino com propriedades aglutinantes ou ligantes. Aglomerantes, que sob atuação da água endurece, e mesmo após isso, quando submetido a atuação da água novamente, não se decompõe [23].

Este tipo de cimento, também tem por definição por alguns autores como: “aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer Portland (mistura de calcário e argila), gesso e adições normalizados finamente moídos”. O termo aglomerante, é dado por ter a finalidade de unir materiais, e o termo hidráulico por reagir, no sentido de hidratar ao se misturar com água [19, 23, 24].

O processo de fabricação do cimento Portland está representado esquematicamente na Figura 3.1 [23].



Figura 3.1 – Esquematização do processo de fabricação do cimento Portland.
Adaptado de [25].

Etapas do processo de fabricação do cimento:

- i)* Extração do calcário e argila, e posterior britagem do calcário, para reduzir as dimensões adequadas ao processamento industrial
- ii)* Depósito, onde a argila e o calcário são estocados separadamente, também nesta etapa ocorre uma pré-homogeneização.
- iii)* Dosagem: moinhos de cru, onde a mistura de calcário e argila passam por moinhos de bolas, rolos ou barras (Figura 3.2).
- vi)* Silos de Homogeneização, silos verticais de grande porte através de gravidade e por processos pneumáticos, executa-se a homogeneização. É necessário a homogeneização da mistura crua, chamada de farinha, devidamente com finura adequada e dosada, para que permita a harmonização, ou seja, combinação dos elementos que formam o clínquer.
- v)* Primeiro ocorre um pré-aquecimento: a farinha é introduzida ao forno, passando por pré-calcinadores, equipamentos que aproveitam dos gases provenientes do forno, cujo calor, assim, induz o aquecimento inicial do material. A farinha é calcinada até 1450°C, resultando no clínquer.

vi) Resfriador, como o próprio nome diz, tem a finalidade de promover a redução da temperatura, especificamente a 80°C, nesta etapa que a clínquerização se completa, ocorre a estabilidade química dos compostos, início da pega, calor de hidratação e resistência mecânica nas primeiras idades.

vii) Depósito de Clínquer, armazenamento do clínquer em silos.

viii) Adições, etapa em que se adiciona o gesso, calcário, escória e pozolana, dando a origem a alguns tipos de cimento Portland. Estes elementos, são estocados separadamente antes de entrarem no moinho de cimento.

ix) Moinho de cimento, moagem final em que o clínquer adicionado ao gesso, e/ou outras adições, dão origem ao cimento.

x) Silos de cimento, o cimento resultante da etapa anterior é transportado para os silos, onde é estocado, e após isso finaliza-se com ensaio de qualidade, seguido o produto para etapa final, a expedição.

xi) Expedição, etapa final do processo de fabricação do cimento Portland, podendo ser feita a remessa do cimento ao consumidor em sacos ou a granel.



(A)

(B)

Figura 3.2 – Imagens de moinhos utilizados na fabricação de cimento Portland: **(A)** moinho de bolas; **(B)** moinho de rolos [24].

Atualmente há uma diversidade de aplicações e tipos do cimento Portland, apesar de ser um cimento usual de maneira geral, alguns apresentam determinadas características que influenciam diretamente no desempenho e aplicação do produto [23].

É importante ressaltar a nomenclatura da comercialização ensacada dos tipos de cimento Portland, abordados nas Figuras 3.3 e 3.4, pois, suas características são diferentes, conseqüentemente nomenclaturas diferentes e adequados para um tipo específico de uso.

CP II - E - 32

Figura 3.3 – Exemplo de nomenclatura mais comum do cimento Portland [25].

Onde,

- a) CP: Nomeia Cimento Portland, ou seja, iniciais de Cimento tipo Portland.
- b) Tipo do cimento: I Portland comum, II Portland Composto, III Alto-Forno, IV Pozolânico e V Alta Resistência Inicial (ARI).
- c) Adição: E Escória de Alto-Forno, F *Filler* e Z Material Pozolânico.
- d) Resistência: resistência de compressão mínima em MPa, que o cimento deve apresentar aos 28 dias, podendo ser 25MPa, 32 MPa ou 40MPa.



Figura 3.4 – Exemplos de alguns tipos de cimento Portland ensacados prontos para a comercialização [26].

Na Figura 3.5 está representada imagens de alguns dos tipos de cimento Portland, com foco em suas diferenças visuais.

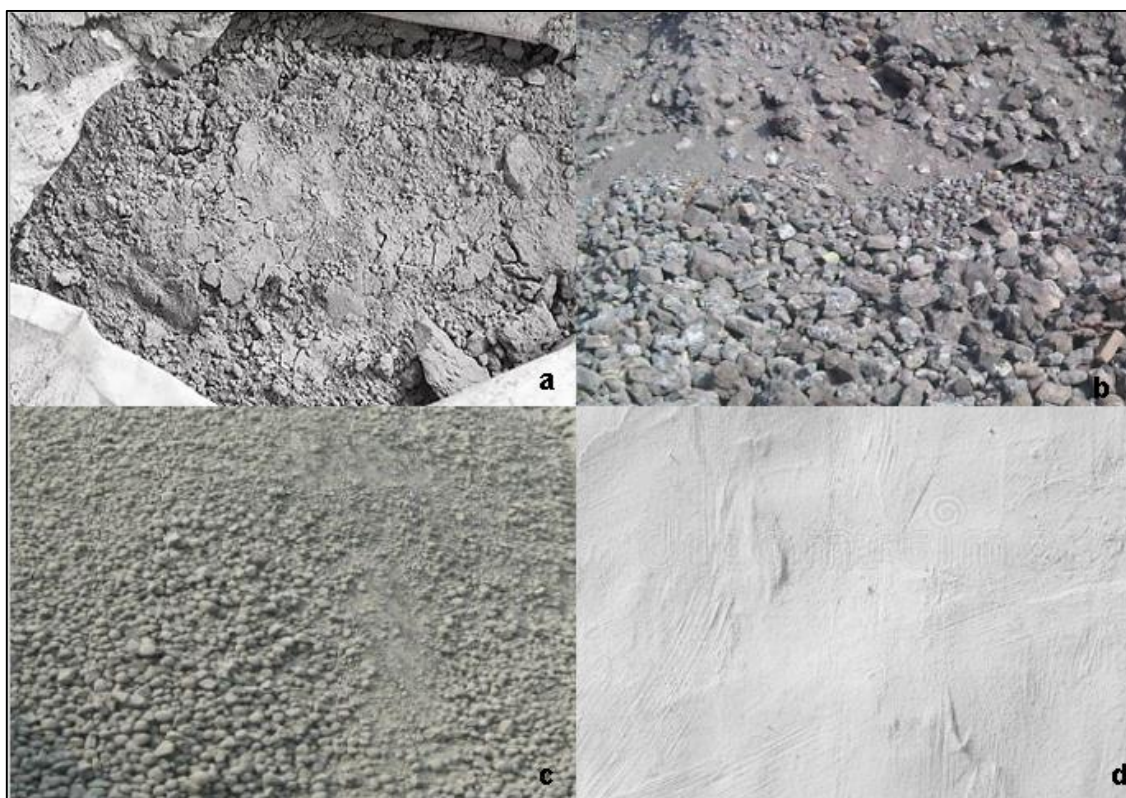


Figura 3.5 – Exemplo de cimentos Portland e alguns componentes: **(a)** Cimento Portland comum; **(b)** Escória; **(c)** Cimento Portland Pozolânico; **(d)** Cimento Portland Branco para Acabamento [28].

No Brasil são produzidos vários tipos de cimento Portland, que apresentam determinadas características e propriedades que influenciam diretamente na estrutura em que são aplicados; exemplificações são apresentadas na Tabela 3.1 para melhor entendimento [23, 27].

Tabela 3.1 – Cimento Portland produzidos no Brasil e suas composições [27].

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição % em massa			
		Clínquer + Gesso	Material Carbonático	Escória Granulada de Alto-Forno	Material Pozolânico
Comum	CP I	100			
Com adição	CP I-S	99-95			1-5
Composto E	CP II-E	94-56	0-10	6-34	
Composto Z	CP II-Z	94-76	0-10		6-14
Composto F	CP II-F	94-90	6-10		
Alto-forno	CP III	65-25	0-5	35-70	
Pozolânico	CP IV	85-45	0-5		15-50
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5		
Resistentes a Sulfatos	CP -RS	nº1	5		
Resistentes a Sulfatos	CP -RS	nº2		60-70	
Resistentes a Sulfatos	CP -RS	nº3			25-40
Baixo Calor Hidratação	CP -BC	nº4			
Branco Estrutural	CP -B25	100-75	0-25		
	CP -B32	100-75	0-25		
	CP -B40	100-75	0-25		
Branco não Estrutural	CP B	74-50	26-50		
NOTA: CP-RS, quaisquer dos cinco tipos básicos.					
nº1	CP -RS, teor de C3A do clínquer é de 8%				
nº2	CP -RS, cimento do tipo alto-forno				
nº3	CP-RS, cimento do tipo pozolânico				
nº4	Em geral até 260J/g aos 3 dias de hidratação e até 300J/g aos 7 dias de hidratação				

Fonte: Adaptado de [23, 27]

As descrições, características e aplicabilidade dos vários tipos de cimentos produzidos no Brasil (Tabela 3.1) são apresentadas a seguir [23, 27]:

i) CP I - Cimento Portland comum, considerado com maior escala de consumo, ou seja, está empregado em várias obras de construção civil, este tipo de cimento não apresenta adição de elementos além do gesso (finalidade de retardar a pega), tornou-se o cimento base para os outros tipos de cimentos, pois, pode ser aplicado na maioria das situações, a partir disso, pode desenvolver outros, com objetivos específicos, ou seja, atuar em outras situações conferindo uma qualidade a mais no cimento. O cimento Portland comum é abordado na NBR 5732, e apresenta classe de resistência 25MPa.

ii) CP I-S - Cimento Portland comum com adição, a composição é intermediária entre o CP-I e adições de material pozolânico, não ultrapassando 5% da composição em massa, este tipo de material, propõe menor permeabilidade a este tipo de cimento. O cimento Portland comum com adição é também abordado na NBR 5732, e apresenta classe de resistência 25MPa.

iii) CP II-E - Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno, abordado na NBR 11578, com classe de resistência de 25, 32 e 40 MPa.

Este tipo de cimento é utilizado em situações que estruturas possam resistir ao ataque de sulfatos, como os encontrados nas redes de esgotos de água servida ou industriais, alguns solos e na água do mar. É constituído por escória granulada de alto forno, não ultrapassando 34% da composição em massa.

iv) CP II-Z - Cimento Portland composto com pozolana, abordado na NBR 11578, com classe de resistência de 25, 32 e 40 MPa. É utilizado em obras subterrâneas, obras marítimas e industriais, é constituído por material pozolânico, não ultrapassando 14% da composição em massa, garantindo assim uma maior durabilidade e impermeabilidade ao concreto composto por este tipo de cimento.

v) CP II-F - Cimento Portland composto com *filler*, abordado na NBR 11578, com classe de resistência de 25, 32 e 40 MPa. É utilizado em argamassas de revestimentos, preparo de argamassa de assentamento, estruturas de concreto armado, pavimentos de concreto, pisos, solo-cimento, entre outros. É constituído por material carbonático, não ultrapassando 10% da composição em massa, garantindo assim que as argamassas e até mesmo o concreto torne-se mais trabalháveis.

vi) CP III - Cimento Portland de alto forno, abordado na NBR 5735, com classe de resistência de 25, 32 e 40 MPa. O uso de escória granulada de alto forno é visto como alternativa para diminuir o consumo energético durante o processo de fabricação do cimento, é constituído por escória granulada de alto forno, não ultrapassando 70% da composição em massa, conferindo maior durabilidade, impermeabilidade e resistência a sulfatos.

vii) CP IV - Cimento Portland pozolânico, abordado na NBR 5736, com classe de resistência de 25 e 32MPa. Os materiais pozolânicos apresentam propriedades aglomerantes, justamente a esta propriedade são utilizados e conjunto com o clínquer. Este tipo de cimento composto por material pozolânico, não ultrapassa 50% da composição em massa, conferindo em comparação ao concreto produzido com o cimento Portland comum, maior durabilidade, impermeabilidade e resistência mecânica à compressão à longo prazo.

viii) CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial, abordado na NBR 5733, com classe de resistência de 26MPa. Este tipo de cimento é baseado no CP I, não ultrapassando 5% da composição em massa de material carbonático, além disso, outra diferença como o próprio nome diz, em atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação, isto é, devido a dosagem de matérias-primas (argila e calcário) na produção do clínquer e também uma moagem mais fina do cimento.

ix) CP-RS - Cimento Portland resistente a sulfatos é aquele que atribui resistência aos meios agressivos sulfatados, como água do mar, redes de esgotos e ambientes industriais. Este é abordado na NBR 5737, com classe de resistência de 25, 32 e 40MPa, utilizado em obras de pavimentos, concreto protendido, recuperação estrutural e elementos pré-moldados de concreto.

x) CP-BC - Cimento Portland de baixo calor de hidratação, abordado na NBR 13116, com classe de resistência de 25, 32 e 40MPa, recebe este nome pelo fato de ser um cimento com taxa lenta de evolução de calor, o que influencia na redução de aparecimento de fissuras de origem térmicas, causado pelo calor desenvolvido durante a hidratação do cimento. O CP-BC gera 260J/g aos 3 dias de hidratação e até 300J/g aos 7 dias de hidratação, este tipo de cimento é aplicado em grandes estruturas de concreto.

xi) CP-B - Cimento Portland branco, abordado na NBR 12989, com classe de resistência de 25, 32 e 40MPa para o estrutural, no caso o não estrutural não tem indicação de classe. Este tipo de cimento é subdividido em duas aplicações, cimento Portland estrutural e o cimento Portland não estrutural, o que diferenciam são suas composições, e o que os diferenciam dos demais está na sua coloração, a cor branca, proveniente das matérias-primas com baixo teor de óxido de manganês e óxido de ferro, além da utilização de caulim no lugar da argila. O não estrutural atua em rejuntamento cerâmico e estrutural é utilizado para fins arquitetônicos.

Dentre estes tipos de cimentos, o que se desempenha para a produção de fibrocimento aplicado em telhas, caixa d'água, cumeeira e placas cimentícias impermeabilizantes é o Cimento Portland composto com *filler*, CP II – F, e também o Cimento Portland composto com escória de alto-forno CP II - E. Ressaltando que o cimento Portland é o ingrediente de maior proporção na massa do material fibrocimento, podendo chegar a 75% em massa, porém, não é o único material utilizado, como o próprio nome tem por definição, a adição de fibras é fundamental, além de outros componentes minoritários orgânicos e inorgânicos, auxiliares no processo de conformação [29, 30].

O grau de finura, as adições e quantidades dos compostos químicos responsáveis pelas características finais dos cimentos, diferem de tipo para tipo.

A classe dos cimentos CP II é constituída em proporções variáveis, mas majoritárias, por compostos químicos como silicatos e aluminatos de cálcio (Tabela 3.2), que por meio de reações químicas complexas (hidratação) são responsáveis pelo início de pega (mudança do estado fluido para um estado rígido) e endurecimento da pasta de cimento, isto é, o aumento de resistência de da pasta de cimento após a pega.

Tabela 3.2 – Principais compostos químicos constituintes do cimento Portland CP II, antes e após hidratação

Composto	Abreviação
<i>In natura</i>	
Silicato Tricálcico	C ₃ S
Silicato de Cálcio	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	C ₃ A
Ferroaluminato Tetracálcico	C ₄ AF
<i>Após Hidratação</i>	
Etringita	C ₆ ASH ₃₂
Silicatos de Cálcio Hidratados	C-S-H
Hidróxido de Cálcio	CH

C=CaO; S=Si₂O; A=Al₂O₃; F=Fe₂O₃; H=H₂O

Fonte: [26].

O fenômeno de pega que resulta minutos após a hidratação do cimento, ocorre devido a hidratação dos aluminatos C₃A e C₄AF que leva à formação de etringitas C₆ASH₃₂, de morfologia é acicular. Já a hidratação dos silicatos C₃S e C₂S ocorre horas após o início da hidratação do cimento e resulta em silicatos de cálcio hidratados C-S-H de composição química variada e hidróxido de cálcio CH, cristais prismáticos, que vão ocupar os espaços da água e das partículas em dissolução. Esses silicatos e aluminatos hidratados (Figura 3.6) começam a criar ligações interpartículas levando ao endurecimento progressivo do material [26].

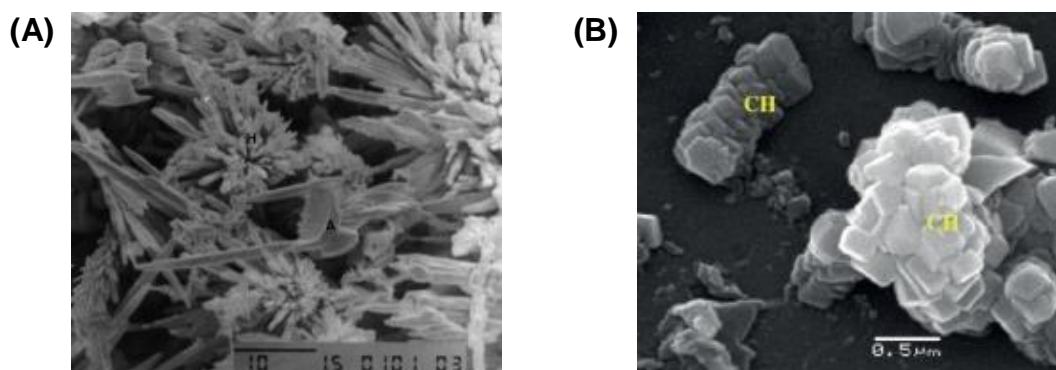


Figura 3.6 – Morfologias típicas de **(A)** Etringita (C₆ASH₃₂); **(B)** Hidróxido de Cálcio (CH) [26].

Vale ressaltar que os fenômenos de pega e hidratação do cimento sofrem a influência de outras adições, como plastificantes, aditivos especiais (formadores de bolhas, por exemplo) e sobretudo, agregados miúdos e graúdos na preparação de concretos. No fibrocimento haverão as fibras que necessitam ser dispersas e envolvidas por esses compostos em reação, isto é, em uma microestrutura em evolução. As fibras poderão interferir em função das suas características físicas, tais como, as dimensões (razão de aspecto) e químicas, se orgânicas ou inorgânicas, hidrofóbicas ou hidrofílicas. Nesse sentido, não só a dosagem, como no caso das argamassas e concretos é importante, mas também a seleção das fibras a serem utilizadas.

3.2 Fibras

Para a formação do compósito fibrocimento, há uma diversidade de fibras sendo estudadas e utilizadas em substituição à fibra mineral de amianto, anteriormente utilizadas, pois o pó de amianto é considerado um elemento prejudicial à saúde, em decorrência de ser carcinogênico, apresenta a capacidade de filtrar microrganismos e outras substâncias nocivas [12, 13].

Para Mano [31] as fibras têm por definição como elemento com relação comprimento e diâmetro (fator forma) elevado, além do termo geral corpo flexível, pequeno, cilíndrico e com seção transversal reduzida.

É importante refletir nos tipos de fibras que atuam no fibrocimento, com base natural ou artificial, diante disso, um exemplo de possíveis alternativas de substituição são fibras sintéticas (as mais empregadas são de base polimérica, como PVA, PP, PAN) e fibras vegetais (na maioria das vezes apresentam inferioridade na durabilidade do compósito), aplicadas isoladas ou ambas em conjunto [12, 13].

Alguns dos principais problemas relacionados a esta combinação de matriz cimentícia e fibras, está relacionada a aderência entre elas, pois influenciam diretamente na propagação de defeitos, devido as características de resistência, padrões de ruptura e deformação. Uma boa compatibilidade entre estes

elementos (fibra e matriz cimentícia), ou seja, uma alta aderência, ampliaria a dispersão do reforço do compósito e redução no tamanho das fissuras, isto é, devido à maior possibilidade de dissipação de energia entre a interface do reforço com a matriz, que possibilita a redução na propagação dos defeitos. É adequado dizer que para melhores resultados do produto em si, é necessário que haja um bom desempenho na interface fibra/matriz [32].

Neste quesito, a finalidade das fibras é de reforçar o compósito cimentício, minimizando a concentração de tensão, atuando como pontes de transferência de tensão (Figura 3.7), principalmente nas extremidades das fissuras, levando a uma significativa redução na velocidade da propagação das mesmas [33].

De forma geral, as fibras utilizadas em matrizes cimentícias podem auxiliar no reforço do compósito, porém com algumas dependências, como a disposição, dispersão e orientação dentro da matriz. As fibras podem atuar: a) no aumento da resistência ao impacto; (b) no desempenho da ductilidade pós-pico de resistência; (c) na eliminação da fissura ocasionada pela retração da matriz; (d) na resistência à tração na região de pré-fissuramento [34-36].

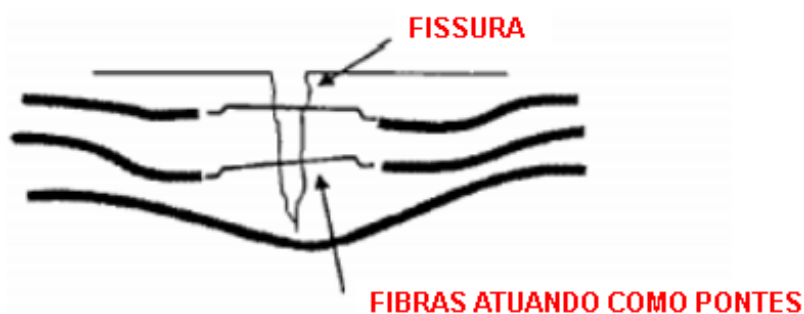


Figura 3.7 – Matriz cimentícia com reforço de fibra atuando como pontes de transferência de tensões [33].

Dessa forma, é importante ser considerada no fibrocimento a compatibilidade física, geométrica e química entre a matriz cimentícia e as fibras. A Figura 3.8 ilustra a incompatibilidade geométrica, e nesse caso, as fibras não atuam diretamente e de forma adequada como bloqueadoras das fissuras.

Em outros casos, a incompatibilidade química pode levar a deterioração das propriedades do compósito e fibra, fenômeno que ocorre com fibras naturais

pouco resistentes a ambiente alcalino. A incompatibilidade física pode causar perda de trabalhabilidade do compósito, pois algumas fibras absorvem água, resultando em variação de volume, comprometendo a aderência entre fibra/matriz [32].

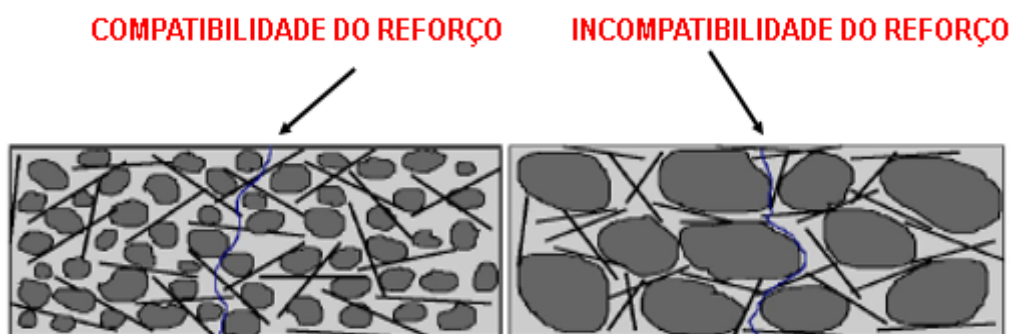


Figura 3.8 – Matriz cimentícia, disposição das fibras atuando como reforço [32].

Visto o quão importante é o reforço da fibra na matriz, é considerável salientar o comprimento das fibras, pois este quesito afeta na facilidade de extração das fibras à matriz cimentícia, assim, a tensão de cisalhamento superficial é relacionada ao comprimento do esforço. Para que a fibra permaneça inserida na matriz cimentícia, esta tensão superficial deve atender o parâmetro de ser menor ou igual a tensão limite relacionada ao comprimento da fibra, ou seja, o comprimento limite para uma dada tensão superficial aplicada, caso contrário, a fibra será extraída da matriz [32].

3.2.1 Fibras poliméricas

Várias fibras sintéticas são vistas como adequadas e substitutas potenciais para o amianto, como exemplo são as fibras de acrílico, vinil, poliéster, polivinil-álcool (PVA), poliacrilonitrila (PAN), polipropileno (PP), entre outras [13,37].

Para Canevaloro Jr. [38], fibras poliméricas tem por definição como termoplásticos que satisfazem a condição geométrica $L / D > 100$, onde o comprimento (L) deve ser no mínimo 100 vezes maior que o diâmetro (D). Além

disso, há uma condição de orientação: as cadeias poliméricas devem estar posicionadas paralelamente ao sentido longitudinal (direção do eixo maior).

Muitos estudos têm sido direcionados para a durabilidade das fibras poliméricas, pois os compósitos cimentícios são fortemente alcalinos o que dificulta a resistência química, causando a deterioração delas na composição. As fibras de polipropileno são as mais comumente utilizadas em fibrocimento por exibirem alta resistência a ambientes alcalinos [37, 39].

Alguns experimentos envolvendo fibras de polipropileno em compósitos com matriz cimentícia trazem consigo informações de alta ductilidade, alta resistência, alta durabilidade, e principalmente preços baixos, tudo isso devido às propriedades das fibras de polipropileno, que é um tipo de fibra sintética de baixo módulo de elasticidade [39].

Alguma das dificuldades no uso de polipropileno em matriz cimentícia está relacionada à hidrofobicidade proveniente das fibras, termo que se aplica a superfícies hidrofóbicas, as quais apresentam repelência a água [40].

O polipropileno é um material não polar, portanto não há afinidade por inorgânicos e macromoléculas polares. A hidrofobicidade gera interfaces fibra/matriz com vazios, uma vez que as fibras não se aderem à matriz cimentícia, causando uma redução da durabilidade do compósito. Por essa razão as propriedades de ligação das fibras com a matriz devem ser melhoradas, principalmente para o uso de aplicações envolvendo ação da água [40].

Apesar das fibras de polipropileno serem hidrofóbicas, elas não são condutoras, possuem baixa densidade, apresentam boas propriedades em isolamento, são termoplásticas quimicamente inertes e principalmente de ampla disponibilidade a baixo custo [41].

Bezerra [21] em seu estudo sobre compósitos de matriz cimento Portland reforçado com fibras sintéticas ilustrou vazios existentes nas interfaces fibra/matriz para diversos tipos de fibras. A Figura 3.9 apresenta a imagem de uma dessas regiões para fibras de polipropileno.

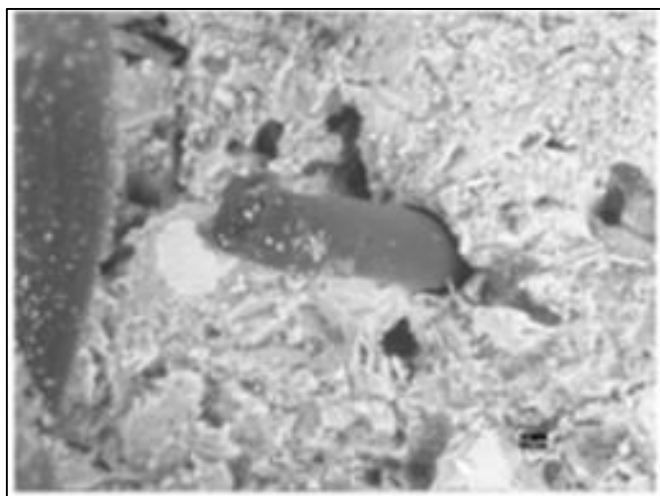


Figura 3.9 – Interface matriz com fibra de polipropileno: vazios na região de baixa aderência [21].

Dessa forma, para os compósitos com fibras de polipropileno, a relação água/cimento deve ser a mais baixa possível para que se consiga alta resistência, porém a trabalhabilidade é menor quando esta relação é baixa. Uma forma de melhoria seria a utilização de pó de látex (*styrene butadiene latex polymer*), que traz consigo a característica de impermeabilidade. Quando em solução, por ser um líquido que contém principalmente partículas orgânicas revestido com surfactante, atua na estabilização das partículas e retarda a solidificação. Assim, com baixa relação água/cimento a trabalhabilidade é aumentada pela formação de um filme durante a hidratação, o qual irá tamponar os vazios da interface fibra/matriz, resultando em uma permeabilidade menor e aumento de adesão e tração [42, 43]. No entanto, possui elevado custo para uso em telhas de fibrocimento.

Outro exemplo de fibra aplicada a matriz cimentícia é o poliacetato de vinila ou poli (álcool vinílico) – PVA. Sua estrutura química é basicamente simples com grupos hidroxilas laterais (Figura 3.10). O PVA é produzido pela polimerização do vinil acetato, é um polímero sintético, insolúvel, porém após sofrer hidrólise, torna-se solúvel [44]. As fibras de poliacetato de vinila (PVA), por possuírem caráter hidrofílico, garantem maior grau de adesão das fibras à matriz cimentícia, no entanto, pelo elevado custo são destinadas à alguns tipos de argamassa e concreto de alto desempenho [45].

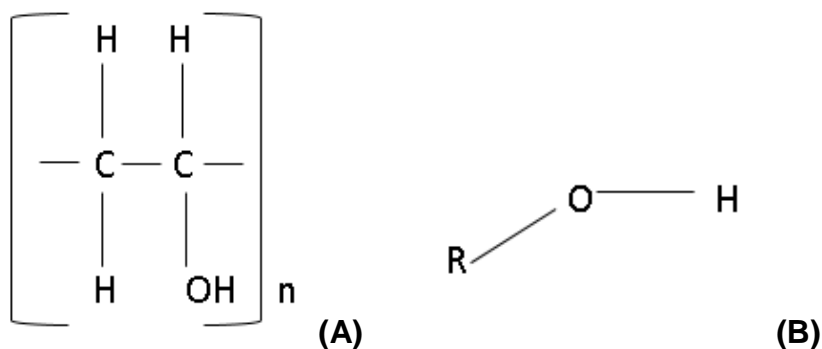


Figura 3.10 – Mero do PVA (A); Grupo funcional hidroxila (B) [44, 46]

3.2.2 Fibras Naturais

Fibras naturais apresentam diferentes origens, seja animal, mineral ou de origem vegetal. O conceito de fibra natural é dado por “aquelas fibras encontradas na natureza e utilizadas no estado *in natura*, ou após algum tipo de tratamento” [47]

As fibras apresentam em sua composição a celulose, hemicelulose e lignina, é importante ter por definição que estas substâncias são cadeias poliméricas que vão desde curtas, como é o caso da lignina, até longas, como é o caso da celulose [48].

A hemicelulose e a lignina amorfa apresentam grau de polimerização variando entre 50 e 200, nelas está aglomerada a celulose que possuem o grau de polimerização da ordem de 25.000 (Figura 3.11). O grau de polimerização influencia na solubilidade ao meio aquoso e alcalino, pois o grau de polimerização menor tende a ser mais solúvel, como no caso da lignina, que apresenta o menor grau de polimerização, pode levar a perda de resistência mecânica por decomposição quando imposta como reforço [48]

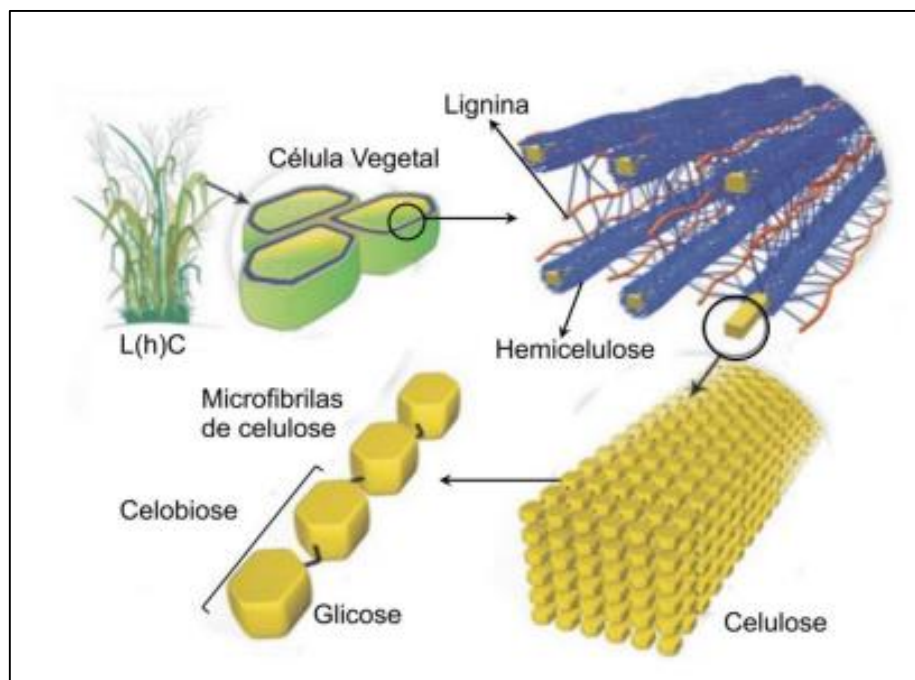


Figura 3.11 – Esquema de estrutura de uma célula vegetal [49].

Para compreender a questão de durabilidade das fibras é necessário definir alguns conceitos:

- Celulose, material orgânico, polímero linear formado por até 15.000 unidades repetidas de D-glucose; tal unidade contém grupos hidroxila que constitui interações do tipo ligações de hidrogênio intermolecular e intramolecular. Devido a estas ligações de hidrogênio há uma forte habilidade da celulose formar cristais que as tornam completamente insolúvel em água e na maioria dos solventes orgânicos [50].

- Hemicelulose, polissacarídeo com cadeias ramificadas de açúcares, sua composição é variável, dependendo da espécie considerada pode diferenciar no preenchimento do material da parede celular da fibra vegetal como elemento de reserva e sustentação em até 35% [50, 51].

- Lignina, assim como a hemicelulose, também preenche os espaços entre as fibras de celulose. Em relação aos componentes da parede celular a lignina atua como ligante entre eles. Possui interação física com a celulose e interação parcial com a hemicelulose, podendo ser classificada como polifenol devido a sua estrutura não uniforme e altamente complexa, além de ser um material hidrofóbico com estrutura tridimensional e altamente ramificada [50, 52].

Em busca de desenvolvimento de outras opções de fibras relacionadas a estes compósitos cimentícios, as fibras vegetais também são vistas como outra forma de alternativa, por serem também de baixo custo. Porém sua durabilidade está relacionada à presença de ambiente alcalino, o que causa uma redução do tempo de vida útil do compósito. Fibras naturais são heterogêneas e seu coeficiente de variação relacionado a algumas propriedades pode chegar até 50%.

O reforço com fibras vegetais aparenta maior viabilidade econômica e técnica em comparações com outros materiais. Alguns compósitos com reforços de fibra de coco, polpa de eucalipto ou eucalipto combinado com fibras de sisal indicam desempenho mecânico e físico adequados, principalmente em relação ao aumento de ductilidade, resistência a compressão superior a 20MPa e módulo de ruptura superior a 3MPa [12].

No entanto, vale ressaltar novamente que no quesito durabilidade de fibras vegetais, estas são facilmente afetadas pela temperatura e umidade do ambiente, mas principalmente ao meio alcalino que estão imersas, devido à decomposição da hemicelulose e da lignina. Como exemplo desse fato, fibras de sisal e de coco diminuem até 50% da resistência a tração se imersas em solução saturada de hidróxido de cálcio (\sim pH12) por 28 dias [12].

A decomposição da hemicelulose e lignina, são vistas como principal causadoras de degradação das fibras vegetais em meio alcalino, pois ocorre a interrupção das ligações entre células fibrosas, ou seja, assim as fibras perdem a sua capacidade de reforço, pois decompõem-se (fracionam-se) em partes menores [53].

Alguns exemplos de fibras aplicadas a matriz cimentícia, utilizadas no Brasil estão apresentados na Tabela 3.3, juntamente com suas propriedades físicas e mecânicas, dados das fibras de polipropileno também são apresentados para comparação. É importante salientar a classificação das fibras vegetais: provenientes da semente, caule, folha, fruto, talo e raiz [54, 55].

Tabela 3.3 – Propriedades físicas e mecânicas de fibras vegetais e PP

Propriedades Físicas e Mecânicas de Fibras Vegetais e de Polipropileno					
Propriedades	Densidade (kg/m ³)	Absorção de Água (%)	Alongamento Ruptura (%)	Tração (MPa)	Módulo Young (GPa)
Sisal	1370	110,0	4,3	458	15,2
Coco	1177	93,8	15-40	131-175	4-13
Malva	1409	182,2	5,2	160	17,4
Jornal	1200-1500	400 14	na ^a	300-500	10-40
Bambu	1158	145	3,2	575	28,8
Piaçava	1054	34,4-108	6,0	143	5,6
Algodão	1500-1600		7-8	287-597	
Rami			3,6-3,8	400-938	
Juta	1300		1,5-1,8	393-773	
Curuá	1400		4,2	890-4200	
Polipropileno	913		22,3-26,0	250	2,0

na^a: Informação não avaliada.

Fonte: [12,56].

Alguns exemplos de fibras produzidas a partir do caule são de bambu, cana de açúcar, juta, linho e cânhamo; as obtidas pela semente são as fibras de algodão; as provenientes das folhas são a de sisal, piaçava, abacá e curuá; do fruto é o coco; as fibras oriundas do talo ou tronco vegetal são as de rami, com destaque para aplicação na indústria têxtil; e por fim fibras provenientes da raiz são as de zacatão [54, 55, 57].

Esses exemplos de fibras apresentados na Tabela 3.3 despertam a curiosidade e possibilidade para muitos estudos referentes a aplicações em fibrocimento, sobretudo, quando combinadas com fibras sintéticas, de forma a conciliar características de ambos os grupos.

3.3 Fibrocimento

O fibrocimento apresenta versatilidade e aplicabilidade no ramo da construção civil, desde placas de fechamento *light steel frame* até fechamento de coberturas, isto é, devido a adição de fibras de base vegetal ou poliméricas ou ambas em conjunto à matriz cimentícia, conferindo resistência mecânica ao compósito [29].

A definição de fibrocimento, dada anteriormente a um material compósito de matriz cimentícia (em que o cimento Portland atua como ligante) reforçado com fibras, referia-se sobretudo, a fibras de amianto. Porém, após a proibição do uso de amianto, tornou-se usual a expressão fibrocimento sem amianto [58].

Esta nova categoria passou a ter por definição: “Produto resultante da mistura homogênea de cimento Portland, agregados, adições ou aditivos com reforço de fibras, fios ou filamentos, com exceção de fibras de amianto” [59].

O fibrocimento, doravante já conhecido por não ter amianto em sua composição, ainda é um material cimentício muito utilizado na produção de caixas d’água e telhas, pelos processos Magnani (Figura 3.12), que utiliza uma massa consistente e caixas da água são formadas pela rotação de um molde, e processo Hatschek, respectivamente [13].



Figura 3.12 – Método Magnani para produção de caixa d’água [13].

O processo Hatscheck empregado na fabricação de telhas onduladas, telhas corrugadas, telhas estruturais, placas planas e onduladas, entre outros, constitui de algumas etapas, como a suspensão bem diluída de fibras, cimento e aditivos, misturadas em um tanque. A mistura passa por cilindros rotatórios que ali captam a massa por sucção, removendo a água e formando mantas, que assim, são depositadas umas às outras por várias camadas, formando as placas cimentícias, que são conformadas ainda no estado fresco, por exemplo, prensadas sobre matrizes metálicas onduladas para copiar o *design* [13].

É importante salientar que além desses métodos, existem outros processos aplicados a produção de produtos de fibrocimento, como o processo por extrusão e o processo Mazza, utilizado na fabricação de tubos, sendo uma modificação do processo Hatschek, onde as mantas são enroladas, ao invés da disposição longitudinal [60, 61].

Assim, com a produção de componentes leves, tornou-se comum no ramo da construção civil o consumo por materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras, pois este tipo de material possui algumas características relevantes, como isolamento térmico-acústico, desempenho mecânico, principalmente em absorção de impacto e de energia, tornando esta classe de material técnica e economicamente viável [12].

Frazão et al. [62] estudaram compósitos de cimento e concreto conciliando as características do fibrocimento. Abordaram o desenvolvimento de painéis do tipo sanduíche, com origem de compósito de cimento mais fibra de sisal e um núcleo de concreto leve reforçado com fibras de polipropileno. Neste estudo foi avaliado o comportamento mecânico separadamente, pois foram utilizados dois comprimentos diferentes de fibras de sisal, fibras curtas e fibras longas, no fibrocimento. Fibras de polipropileno e agregados leves foram utilizadas na formação do núcleo do painel, o concreto leve, para que assim refletissem na melhoria da resistência à tração pós trincamento e na capacidade de absorção de energia, além de levar a redução na densidade do mesmo. Foi observado que o painel composto por fibras longas de sisal juntamente ao núcleo de concreto leve reforçado com fibras de polipropileno, forneceu capacidade de cisalhamento, maior capacidade de flexão e maior ductilidade [62].

Estes tipos de painéis estão cada vez mais sendo inseridos no mercado, principalmente na área de soluções de construções, por apresentar várias aplicações industriais e também devido as suas principais características: alta resistência à flexão e rigidez; leve e baixa condutividade térmica e acústica; alta resistência ao impacto [62].

Outro tipo de produto da classe do fibrocimento são as placas cimentícias Nova Tecnologia de Fibrocimento - NTF (Figura 3.13). Elas são baseadas no conceito de apelo ecológico, isto é, conscientização ambiental. Possuem características específicas, destacando-se a grande estabilidade dimensional, resistência aos esforços mecânicos, e principalmente, resistência à ação de umidade, o que as tornam com dupla utilidade, tanto para ambiente externo como para interno. São adaptáveis a qualquer tipo de projeto e alternativas para a redução no consumo de madeira e/ou aço na estrutura. Ainda apresentam bons isolamentos térmico e acústico [63, 64].



Figura 3.13 – Amostra de material de placa de fibrocimento [64].

Placas cimentícias impermeabilizantes apresentam diversidade de aplicação, praticidade, conforto pelo isolamento térmico e acústico, resistência mecânica, são resistentes ao fogo, leveza que permite redução nas fundações e proteção contra micro-organismos. Um exemplo de aplicação está ilustrado na Figura 3.14, que exhibe um modelo de fachada produzido por este tipo de material [65].



Figura 3.14 – Fachada de placas cimentícias [65].

Entretanto, apesar dos benefícios e requinte que as placas podem propiciar, um dos principais materiais que possuem importante papel na construção de habitação social em nosso país são as telhas onduladas de fibrocimento, pois são elementos construtivos de baixo custo [6].

Em um estudo de caso ocorrido no município de Vargem Grande Paulista-SP, foi observado que as telhas onduladas de fibrocimento predominam o mercado, em decorrência principalmente da sua acessibilidade econômica, pois com o passar do tempo os materiais vão evoluindo, devido à industrialização, e tendem a uma maior produtividade a menor custo. Exemplo disso são as novas alternativas de substituição que o mercado propõe, tijolos de barro por bloco de concreto ou blocos cerâmicos, e em destaque, as telhas cerâmicas substituídas por telhas de fibrocimento [66].

Telhas onduladas de fibrocimento (Figura 3.15) são versáteis e possuem a facilidade de montagem, além de econômicas, apresentam a aparência harmoniosa em obras de construção e diversidade de aplicações. A sua aplicação atende a norma ABNT NBR 7196, que se refere aos requisitos exigíveis para os projetos e execuções de coberturas, fechamentos laterais com telhas onduladas, estruturais de fibrocimento de telhas onduladas e estruturais de fibrocimento sem amianto [64, 67].



Figura 3.15 – Telhas onduladas de fibrocimento sem amianto [64].

No Brasil o fibrocimento conquistou o seu espaço desde o século XX (1938), em específicas telhas onduladas de fibrocimento, porém com agregado fibroso amianto [68, 69].

O amianto, fibra mineral, é encontrado em duas tipologias principais, crisotila ($3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e anfibólio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{O} \cdot \text{SiO}_2$), respectivamente amianto branco, azul ou marrom (Figura 3.16). É importante lembrar que o amianto anfibólico foi proibido no Brasil por Lei Federal desde 1995 [13, 69].



(A)



(B)



(C)

Figura 3.16 – Tipos de amianto: **(A)** amianto branco/ Crisotila ($3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$); **(B)** amianto azul; **(C)** amianto marrom/ anfibólio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{O} \cdot \text{SiO}_2$) [70].

Algumas características que este tipo de fibra propõe ao compósito cimentício são a incombustibilidade e estabilidade química, não sofre oxidação nem decomposição, e em comparação aos outros tipos de fibras apresenta boa adesão a matriz cimentícia [69].

O primeiro país a banir na produção de fibrocimento com amianto, foi a França, causando uma grande mudança no comércio mundial em meados de 1996/1997, assim, levou a redução de exportação, importação e produção, praticamente em todos os países. Em 2005 como indeferido pela Comunidade Econômica Europeia, de forma geral, este tipo de comércio de amianto, voltou-se para países mais pobres, com exceção da China [71].

No Brasil, segundo a Lei 9.055 de 1995 [72], deu-se início a proibição do uso do amianto, vedando em todo território nacional a extração, industrialização, produção, comercialização e utilização do asbesto marrom, amianto azul, e diversos minerais que pertencem ao grupo dos anfibólios, assim também, são vedados os produtos compostos por estas substâncias minerais.

No estudo de engenharia de segurança do trabalho, é importante salientar a saúde do trabalhador exposto a este tipo de fibra, que como citado, apresenta grandes riscos, principalmente respiratórios, por ser de origem cancerígena. O programa VISAT-AMIANTO, responsável por vigilância no trabalho, apresenta como objetivo propor ações de controle ao risco sanitário nos locais de trabalho que utilizam matéria-prima fibras de amianto, programa aplicado no Estado de São Paulo, conta com o auxílio da Lei 12.684 [73]. Este tipo de programa visa intervenções em indústrias que utilizam este tipo de matéria-prima, estabelecimento que negociam estes tipos de produtos e também o enfoque da não utilização em construções ou reformas com esta matéria-prima.

Vale ressaltar que a Lei 12.684: “Proíbe” o uso, no Estado de São Paulo, de produtos, materiais ou artefatos que contenham quaisquer tipos de amianto ou asbesto ou outros minerais que, acidentalmente, tenham fibras de amianto na sua composição” [74].

A Figura 3.17 ilustra as características morfológicas das fibras de amianto isolada e presentes em outro mineral (asbesto sobre mica muscovita).

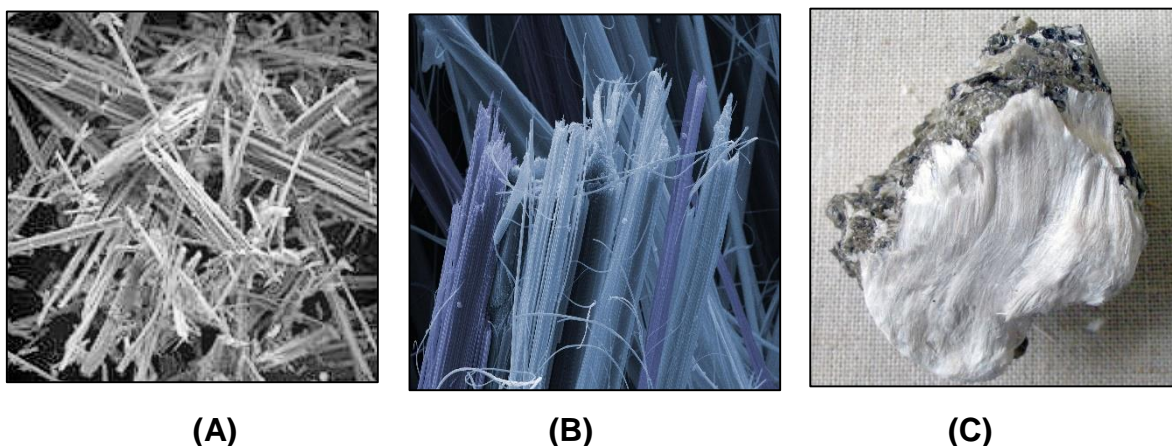


Figura 3.17 – Aspectos das fibras de amianto: **(A)** e **(B)** fibras isoladas; **(C)** presentes sobre o mineral mica muscovita [70].

Diante disso, a procura por soluções alternativas para substituir fibras de amianto foi grande, e particularmente no Brasil esse interesse em desenvolver fibras que apresentariam a capacidade de substituir a fibra amianto na produção de fibrocimento, tornou-se ainda mais necessário e atrativo, visto a aplicação em estruturas (moradias) mais econômicas.

Além dessa ação trazer a ideia de ecologicamente correto, resulta no benefício a saúde, voltada também para a engenharia de segurança do trabalho, que preza em garantir a segurança e saúde do trabalhador no ambiente de trabalho, quer na exploração ou industrialização do material [29, 75, 76].

Dentre a grande variedade de doenças relacionadas a esse material destacam-se:

i Asbestose, pode levar à morte por insuficiência respiratória, caracterizada pela fibrose do tecido muscular.

ii Câncer do Pulmão, asbestos pode se juntar a outros fatores que contribuem na origem desse tipo de tumor.

iii Placas Pleurais, pode causar dificuldades respiratórias, devido a deposição do asbesto nos pulmões e na membrana que recobre a parede do tórax.

iv Mesotelioma, câncer na pleura.

Assim, tendo em vista que a adição de fibras em compósitos com base cimentícia traz benefícios como menor fragilidade, maior resistência à tração, aumento na capacidade de absorção de energia e resistência à rachadura, fibras vegetais e sintéticas passaram a ser alvo de pesquisas [77, 78]. Nesses estudos, a principal consideração foi que a propagação de fissuras está relacionada às ligações entre fibras e o composto cimentício, pois a capacidade de absorção de energia é determinada por este tipo de ligação e com isso, a adesão das fibras afeta esta capacidade em absorver a energia na interface durante a propagação de fissuras, isto é, além das características intrínsecas das fibras, a aderência delas à matriz cimentícia é crucial [79].

Com relação às fibras vegetais, estudos relataram que elas sofrem degradação ao serem incorporadas em materiais cimentícios, devido à interação como meio alcalino, proveniente do cimento [80], e a contínua busca por outros tipos de fibras substitutas ao amianto, propiciou o desenvolvimento e utilização de fibras sintéticas, que de forma sustentável acaba por reciclar produtos derivados do plástico como o polipropileno [77]. Nesse caso, a baixa aderência (compatibilidade) fibra/matriz passou a ser um desafio a ser vencido.

Para melhorar este efeito de falta de compatibilidade com a matriz, buscou-se adequados tratamentos químicos. Um tratamento superficial das fibras com soluções químicas e melhor relação água e cimento, resulta em uma melhoria na hidrofília da superfície das fibras, e conseqüentemente, melhor resistência mecânica do compósito [80, 81].

Além da influência do tipo de fibra aplicado a matriz cimentícia, é importante salientar o cimento Portland, afinal, é o ingrediente de maior proporção na massa do fibrocimento. Quando aplicado em telhas onduladas de fibrocimento, por exemplo, além da resistência mecânica necessária, o cimento tem uma influência estética, pois faz com que as mesmas apresentem aspecto superficial variável, que pode ser explicado pelas diferentes origens e variações típicas de matérias-primas utilizadas na produção do cimento; é usual apresentar na cor cinza claro a cinza escuro, ou cinza esverdeado [29].

Essa variabilidade de coloração pode ainda ser influenciada por manchamento, devido à umidade e permeação de água.

3.4 Telhas

A definição de telhas é dada por materiais de construção civil com a finalidade de realizar coberturas de elementos habitacionais. Atualmente existe uma variedade de tipos de telhas (Figura 3.18): cerâmicas; concreto; galvanizadas; metálicas (gravilhada); PET; policarbonato; PVC; *Shingle*; termoacústica; vidro; translúcidas e por fim fibrocimento [82].



Figura 3.18 – Tipos de telhas: **(A)** Cerâmica; **(B)** Concreto; **(C)** Galvanizada; **(D)** Metálica do tipo gravilhada; **(E)** Policarbonato; **(F)** *Shingle*; **(G)** Vidro; **(H)** Translúcida; **(I)** Fibrocimento [82].

3.4.1 Telhas de Fibrocimento sem amianto

Dentre os tipos de telhas cada uma apresenta suas vantagens e desvantagens, uma simples comparação entre telhas onduladas de fibrocimento sem amianto e telhas cerâmicas, pode ser direcionada para aspectos financeiro,

pois telhas de fibrocimento se destacam pela sua economia e são tipos de telhas destinadas a população baixa renda, conhecidas como telhas populares [1].

As telhas onduladas de fibrocimento sem amianto surgiram com a finalidade de substituir telhas de amianto. São resistentes, duráveis e leves, nesse caso, devido a leveza, refletem na economia no conjunto da obra por não exigir estrutura muito reforçada na construção do telhado em si, além de apresentarem a facilidade de serem instaladas com inclinação mínima (15%). Porém telhas onduladas de fibrocimento tem como desvantagem a absorção ao calor, além de outra desvantagem comum na maioria dessas telhas que está relacionada à absorção a água, que muitas vezes ocasiona o manchamento.

Por ser o telhado a última etapa da construção, ele revela a estética e arquitetura da casa, com isso o manchamento deve ser evitado para não comprometer a visão da construção finalizada [82].

Na verdade, todos os tipos de telhas estão sujeitos ao manchamento, função do ambiente em que estão situadas, porém, são mais evidentes em telhas de fibrocimento devido às características desse material (elevada absorção de água e permeação).

Alguns exemplos de telhas com esse tipo de problema estão ilustrados na Figura 3.19, diferentes tipos de materiais, em diferentes regiões, e sem proteção contra a presença de água (chuva) contínua que causa a proliferação de microrganismos [11].

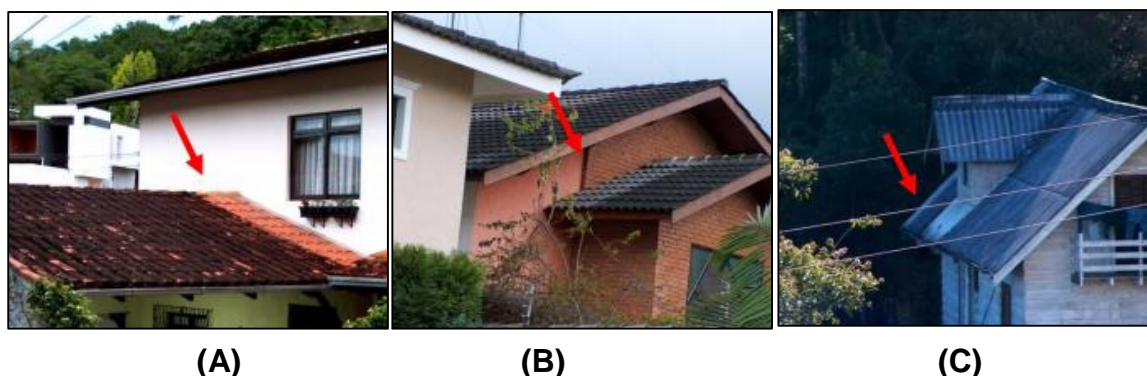


Figura 3.19 – Manchas em telhados de diferentes materiais e diferentes locais: **(A)** Cerâmica, cidade de Blumenau/SC; **(B)** Fibrocimento, cidade de Campos de Jordão/SP; **(C)** Concreto, cidade São Paulo/SP [11]

É importante salientar a normatização para telhas de fibrocimento, cujas normas aplicadas que mais se destacam são [83]:

- ABNT NBR 15210 -1 intitulada por “Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios. Parte 1 Classificação e requisitos”. Esta norma prescreve os requisitos para aceitação das telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, com comprimento maior que 0,9m, e de seus acessórios.
- ABNT NBR 15210 – 2 intitulada por “Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios. Parte 2 Ensaios”. Esta norma estabelece métodos de ensaio a serem utilizados para verificação das características dos materiais especificados pela ABNT NBR 15210 – 1. Esta norma é de suma importância para este trabalho em si, por implicar nos ensaios de permeabilidade e ensaios de imersão e secagem, os quais são um dos objetivos proposto da dissertação.
- ABNT NBR 15210 – 3 intitulada por “Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios. Parte 3 Amostragem e inspeção”. Esta norma estabelece os procedimentos de formação de lotes, amostragem e inspeção dos produtos especificados pela NBR 15210-1, de maneira a determinar sua conformidade com os requisitos nela exigidos, também estabelece os procedimentos que se aplicam aos ensaios de flexão prescritos na NBR 15210 - 2 e por fim esta NBR não se aplica ao estabelecimento do sistema de qualidade do produtor.

Os autores Henriques et.al [14] abordaram um estudo relevante para o tema telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, intitulado por “avaliação da viabilidade técnica de produção de telhas de fibrocimento usando fibras alternativas”. As fibras apontadas como alternativas para substituição do amianto foram lona vinílica e lodo primário do tratamento de efluentes da indústria de celulose, além disso, uma parte do cimento Portland do fibrocimento em si, foi substituído por lama abrasiva. A composição base para o fibrocimento neste trabalho foi de 45% de água, 33% de cimento Portland e 11% de lama abrasiva, com isso iniciou-se as composições de estudo: a primeira contendo 11% de fibra de celulose e a segunda contendo 11% de lona vinílica. As telhas foram produzidas em formato tipo onda pequena com dimensões de 20 cm x 20 cm, foram feitas triplicatas para cada ensaio.

Para observar a qualidade, foram submetidas a ensaios mecânico de flexão e físicos (permeabilidade, absorção de água e empenamento). Em relação a permeabilidade, a telha composta com lona vinílica apresentou superioridade comparada a composta por fibra de celulose, ilustrando apenas manchamento e não gotejamento. Isto deve-se a associação a presença do PVC atuando como impermeabilizante, já no caso da telha da primeira composição (celulose), ocorreu manchamento na primeira etapa e gotejamento/vazamento nas duas restantes, devido a característica hidrofílica da celulose, aderindo maior absorção de água e umidade para telha. No quesito absorção de água, ambas as composições ultrapassaram o limite imposto pela NBR 7581 (menor ou igual a 37%). No ensaio de flexão a telha composta com lona vinílica apresentou superioridade. Por conclusão os autores relataram que diante das análises feitas, telha composta com lona vinílica comparada a composta por lodo primário da indústria de fibra de celulose apresentou superioridade nos resultados de desempenho nos ensaios, porém ambas não permitem atingir as recomendações das normas [14].

Em relação ao desenvolvimento tecnológico para a produção de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, os autores Holmer Jr. et al. [84] relataram desempenho de componentes (adições) e durabilidade analisando propriedades mecânicas, físicas e microestruturais. O principal objetivo do estudo desses autores, foi propor novas substituições do amianto em fibrocimento no Brasil, produzindo telhas por meio do processo Hatschek adaptado, atuando em cimento Portland CP – I (com adições minerais à matriz cimentícia – sílica e matacaulim) reforçados com fibras de celulose associados a fibras plásticas. Diante das formulações, caracterizações e ensaios, pode se concluir que a junção de fibras celulósicas de eucalipto e pinus em proporção adequada, resultou em melhoria significativa da tenacidade do compósito e na resistência à flexão. O refino da polpa celulósica de pinus foi de extrema importância para reter o material cimentício durante a etapa de drenagem de água na produção por processo Hatschek, melhorando assim a compacidade do fibrocimento obtido e homogeneidade.

Por fim, as telhas onduladas de fibrocimento sem amianto comerciais reforçadas com fibras de PVA (produzidas sem prensagem e curadas ao ar), analisadas para comparação, apresentaram problemas relacionados a delaminações e permeabilidade

Ainda neste mesmo estudo, foi relatado uma comparação sob o ponto de vista de permeabilidade. A comparação envolveu telhas onduladas de fibrocimento sem amianto comercial do Brasil, telhas da Itália (telha ondulada e outra de perfil Veneza) e da África do Sul.

A Figura 3.20a ilustra a delaminação da telha comercial nacional, que ocorreu devido ao corte a úmido, assim que a parte superior da telha entrou em contato com a serra, promovendo leve compressão [84]. Essa delaminação foi vista como um problema do processo de conformação e não da composição das telhas. Com relação à permeabilidade, seguindo a NBR 7581, as telhas brasileiras e africanas apresentaram manchas (Figura 3.20b), já as telhas italianas não apresentaram [84].

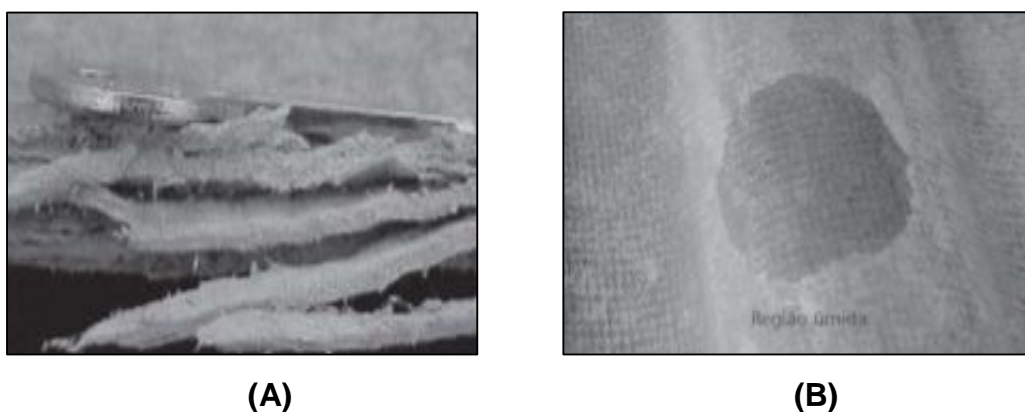


Figura 3.20 – **(A)** Delaminação; **(B)** Manchamento na face inferior em telha ondulada de fibrocimento sem amianto nacional com fibras de PVA, sem prensagem e curadas ao ar [84].

O aparecimento de mancha indica a passagem de água pela espessura da telha, observado na Figura 3.20b, porém não causou a formação de gotas, ou seja, gotejamento/vazamento [84]. Além da permeabilidade, foi observado também nesse estudo, que as telhas produzidas na Itália, possuem elevada tenacidade à fratura e resistência à ruptura superior comparada as demais.

Para os autores as telhas provenientes da Itália foram produzidas com fibras de PVA e prensadas, já as telhas fabricadas no Brasil foram moldadas com fibras de PVA, mas sem prensagem, e por fim os produtos da África do Sul, segundo as informações disponibilizadas pelo fabricante, não continham fibras de PVA e provavelmente moldadas por autoclave (desempenho análogo ao produto brasileiro). Diante disso, a conclusão dos pesquisadores é sobre a importância da prensagem no aumento na resistência mecânica [84].

Em outro estudo, Coelho [5] analisou a durabilidade de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto pós envelhecimento, visando o efeito do envelhecimento natural dessas no desempenho térmico.

Avaliou as variáveis do envelhecimento natural, temperatura superficial e absorvância solar. Para isso, foi preciso a montagem de uma estrutura com uma cobertura para analisar a termografia e a temperatura superficial das telhas (Figura 3.21).



Figura 3.21 – Montagem das estruturas de cobertura para inspeção termográfica e temperatura superficial [5].

Na Figura 3.22 são apresentadas as imagens superficiais dos três tipos de telhas utilizadas no estudo.



Figura 3.22 - Amostras de telhas onduladas de fibrocimento: **(A)** telha nova; **(B)** telha carbonatada; **(C)** telha com presença de fungos [5].

Analisou-se a medição da refletância à radiação solar utilizando um espectrofotômetro com esfera integradora nas amostras pós 36 meses de envelhecimento natural comparando com as telhas novas pós 28 dias de cura. Após seis meses, a etapa de análises de temperatura superficial e termografia de infravermelho, mostrou que as telhas novas comparadas às carbonatadas envelhecidas de 36 meses, apresentaram maiores valores médios de temperatura superficial e maiores de absorvância solar, clareando a superfície devido a deposição de sais nas telhas. Porém as telhas com fungos apresentaram aumento na temperatura superficial e nos valores de absorvância, que é devido ao escurecimento causado pela deposição de matéria orgânica. Com isso, concluiu-se que o envelhecimento natural interfere significativamente no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, sendo que, a situação mais crítica é a presença de fungos, que impacta em aumento das temperaturas superficiais [5].

Um estudo realizado por Roriz [85] considerou a refrigeração evaporativa por aspersão de água em telhas onduladas de fibrocimento na cidade de São Carlos/SP, com a finalidade de reduzir o ganho de calor em edificações.

O autor desenvolveu um modelo teórico baseado em equações de mecânica dos fluidos aplicadas em cálculos iterativos dos fluxos de calor sobre a superfície de controle, neste caso considerada a superfície superior da telha, envolvendo ambas superfícies côncava e convexa [85].

Para o desenvolvimento experimental, baseou-se nas condições climáticas locais, e temperaturas superficiais monitoradas da face superior e inferior de duas telhas, uma sob aspersão de água e outra mantida seca. Os resultados obtidos foram que o modelo teórico apresentou aproximação satisfatória com os dados medidos, obtendo coeficiente de correlação (0,99) entre temperaturas estimadas e medidas, e um desvio padrão de 0,35 °C [85].

Apesar do fibrocimento produzido com a adição de fibras orgânicas estar crescendo no mercado brasileiro, particularmente quando este material é aplicado à produção de telhas onduladas, ele também induz a problemas estáticos que são fissuras nas bordas de telhas.

Normalmente as fissuras ocorrem nas pilhas de estocagem durante a secagem dos componentes e podem estar relacionadas à retração por secagem desses compósitos cimentícios. Estudos relatam que as causas de fissuração no fibrocimento são provenientes das tensões desenvolvidas por gradientes de umidade dentro do componente fibrocimento [86-88].

Apesar da grande comercialização de telhas onduladas de fibrocimentos e vários desafios a serem vencidos, a permeação à água ainda é o mais relevante, e o objetivo principal desse trabalho.

Nesse sentido, alguns relatos têm sido direcionados à avaliação da atuação de hidrofugantes. A utilização de hidrofugantes é vista como um possível mecanismo para este problema, pois de acordo com Maranhão [11], para reduzir o surgimento de manchas nos materiais de construção porosos a hidrofugação é uma alternativa adequada, pois atua alterando as propriedades superficiais, tais como rugosidade, tensão superficial, capacidade térmica, sucção capilar entre outras.

3.5 Hidrofugantes

A água exerce influência nas propriedades térmicas e acústicas dos materiais de construção porosos, reduzindo o desempenho e provocando a aceleração do crescimento de microrganismos e eflorescência. Isso é devido à baixa tensão superficial (73mN/m) comparada aos materiais cerâmicos queimados (superior a 500mN/m), resultando em baixo ângulo de contato (Figura 3.23), que por sua vez, caracteriza o comportamento hidrofóbico; quanto menor a tensão superficial do material em comparação a da água, maior será o ângulo de contato [89].

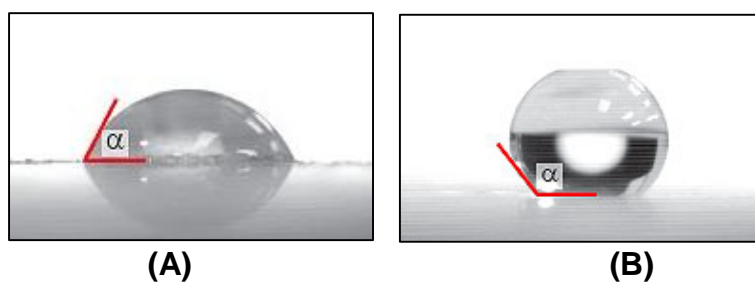


Figura 3.23 – Ângulo de contato, **(A)** Material de tensão superficial maior do que que da água, resultando em menor ângulo de contato; **(B)** Material de tensão superficial menor do que da água, resultando em maior ângulo de contato.

Quanto ao papel da água é importante ressaltar que a cinética e capacidade de absorção de água em materiais porosos que depende da quantidade, estrutura, dimensões de poros e molhabilidade da superfície. Quanto maior for as dimensões dos poros, maior a conectividade entres os poros de um material, implicará em maior capacidade de absorção de água. Em relação a molhabilidade, esta apresenta ligação com energia livre de superfície e é caracterizada pelo ângulo de contato resultante entre água e sólido, assim, maior molhabilidade é determinada por reduções no ângulo de contato [11,90].

É importante entender que para classificar uma superfície hidrofóbica, considera-se que este ângulo de contato seja superior a 90° e superfície hidrofílica quando for inferior a 90°. Esta relação implica na tensão superficial, quanto maior tensão superficial em comparação a água, menor o ângulo de

contato, apresentando assim características hidrofílicas, como no caso de materiais porosos, os cerâmicos, enquanto os polímeros apresentam características hidrofóbicas, em relação a menor tensão superficial do que a água, resultando em maior ângulo de contato [11].

Em um estudo sobre a aplicação de revestimentos hidrofóbicos em superfície de telhas cerâmicas, observou-se que o mesmo proporcionou alto ângulo de contato, sem alterar a aparência superficial da telha. Foi verificado que este tipo de revestimento apresentou maior resistência à aplicação de soluções ácidas em comparação a soluções alcalinas, mas que em certos corpos de provas a aplicação dessas soluções em telhas já revestidas não obteve sucesso, devido à baixa temperatura (70 °C) em comparação as demais (100 - 130°C), o que levou as soluções de testes não se conectarem à superfície, demonstrando a influência da temperatura no desempenho do revestimento [91].

Os hidrofugantes apresentam boa repelência à água, e cada vez mais são utilizados na construção civil, reduzindo a tensão superficial e a aptidão à água desses materiais. No Brasil, os hidrofugantes mais comercializados são à base de silicone, tais como os silanos, siloxanos, siliconatose (mistura de silanos / siloxanos). Esses componentes à base de silicone conseguem recobrir a superfície dos poros (tensão superficial inferior a 24 mN/m) e assim reduzem: forças capilares, a penetração de água e os efeitos de condensação, melhorando a adesão com elevada durabilidade. A forma mais usual de aplicação é pós-produção, seja por spray, pintura ou banhos de imersão, pois o que influencia estas características no material é a profundidade de penetração no substrato, além da vantagem de não alterar, de maneira drástica os métodos de processamento [89].

A marca líder mundialmente reconhecida em impermeabilizantes é a Sika®. O produto comercial Sika hidrofugante, silicone à base de água, apresenta características específicas segundo o fabricante [92]:

Impregnação hidrorrepelente, à base de uma emulsão de silano e siloxano, dispersa em água, que protege as superfícies contra infiltrações causadas pela água das chuvas, evitando eflorescências, manchas e o escurecimento do rejuntamento.

Os hidrofugantes à base de silicone apresentam elevada repelência à água e alto potencial de compatibilidade com a matriz cimentícia. Alguns estudos

indicaram que teor de 10% de hidrofugante substituindo a água, reduz taxas de absorção de água na mistura cimentícia, redução no tempo de trabalhabilidade e aumento do calor de hidratação [93].

Além destes hidrofugantes, no Brasil também existem outros que são ideais para aplicação pós-tratamento: os dispersos em água e à base de acrílicos, poliuretanos e derivados de silicones, os dois primeiros agem formando uma película enquanto os outros agem modificando a tensão superficial dos poros [94].

O uso mais comum de hidrofugantes pode ser por mistura ou por pós-tratamento. Alguns exemplos das formas de atuações desses compostos estão ilustrados esquematicamente na Figura 3.24 [15].

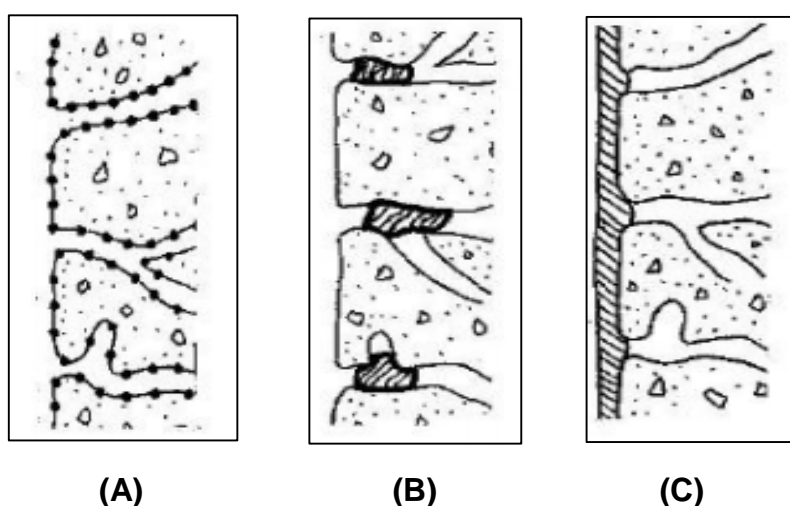


Figura 3.24 – Atuação de hidrofugantes na superfície: **(A)** Modificador de tensão superficial das paredes dos poros; **(B)** Bloqueador dos poros; **(C)** Formador de película superficial [15].

O porquê de os silicones serem utilizados como materiais hidrofugantes é dado pela sua parte inorgânica ter uma boa estabilidade aos agentes de degradação. Os radicais apolares possuem elevada repelência a água e conseguem boa adesão química a diferentes substratos.

Diante disso, é visto que diversos tipos de radicais a base de silicone são usados em hidrofugantes. Os usuais para materiais porosos são o octil e o metil

e os principais produtos à base de silicone, utilizados na construção civil como hidrofugantes, são o silano, siloxano e o metil-siliconato [11, 15].

A Figura 3.25 ilustra a estrutura química do silano, siloxano, e o metil-siliconato:

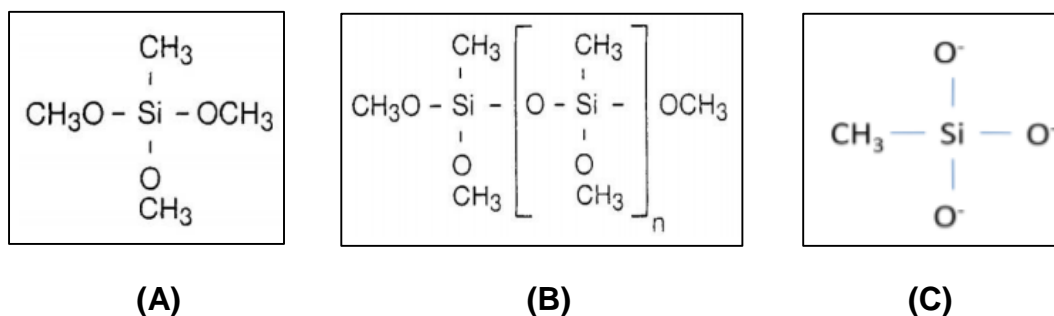


Figura 3.25 – Estrutura química: **(A)** Silano; **(B)** Siloxano; **(C)** Metil-Siliconato [95].

Os silanos apresentam monômeros trifuncionais, com três grupos alcoxi e uma ligação radical apolar (influencia na hidrorepelência); são os mais simples dos silicones [96]

Os siloxanos exibem estruturas bifuncionais e trifuncionais onde cadeias de 3 a 8 átomos de Silício são ligadas a elas [96].

Metil-siliconato oriundo de solução metil-silano com a adição de metal alcalino, com finalidade de aumentar a estabilidade e solubilidade (refletem no custo final), é um produto destinado a aplicação de baixo valor agregado e em escala industrial, adequado a telhas cerâmicas e em destaque telhas de fibrocimento [11, 95].

Em relação a ocorrência de adesão dos silicones a um substrato inorgânico, é necessário que uma sequência de reações, como condensação e hidrólise aconteça, como listrado na Figura 3.26. Como consequência, forma-se uma ligação forte de caráter iônico e ocorre o alinhamento dos radicais orgânico, devido à baixa energia de rotação entre o silício Si e o carbono C [97].

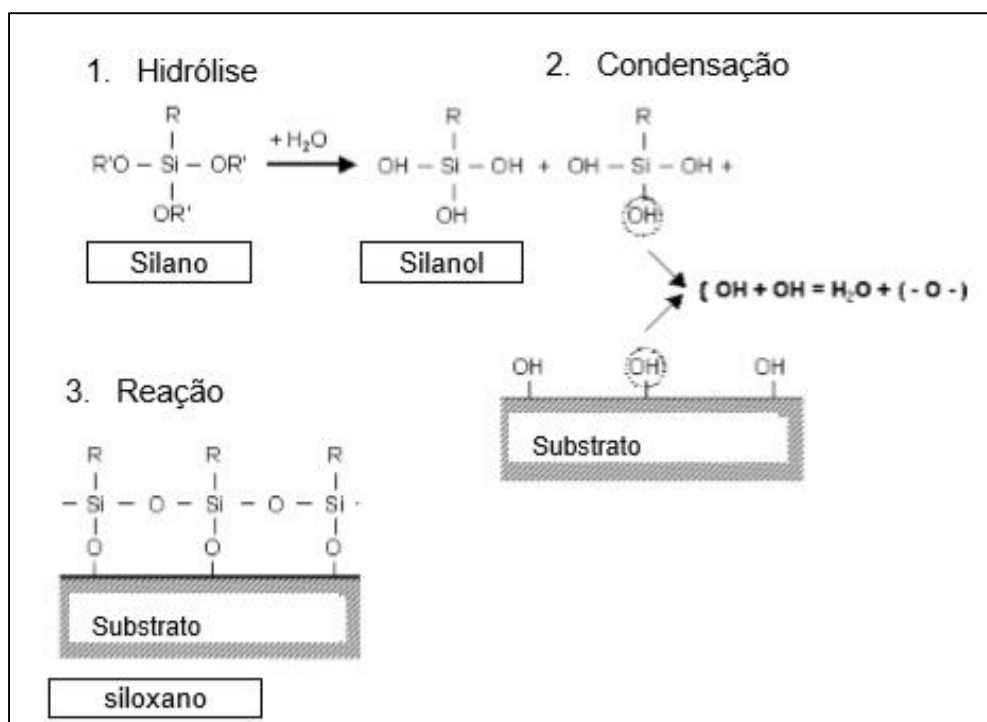


Figura 3.26 – Processo de adesão de um silano a um substrato silicoso [15]. Onde, OR': grupo alcoxi; R: radical orgânico.

É importante salientar também a grande influência da porosidade aberta na permeabilidade das telhas de fibrocimento. Não só os vazios existentes pela falta de adesão das fibras orgânicas à matriz inorgânica (cimento Portland) são responsáveis pela permeação à água e manchamento, mas também a excessiva absorção de água relacionada à porosidade aberta e poros interconectados do material que pode estar associado principalmente ao método que o produto foi processado e empacotamento dos seus constituintes [15].

Efeitos higroscópicos são intensificados por ações capilares (Figura 3.27), decorrente de poros com raios entre $0,1 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$, cuja influência é o transporte natural da água ao material (absorção). Materiais de construção, como é o caso da telha de fibrocimento, se tratados por hidrorrepelentes baseados em compostos organo-siliconados podem minimizar essas ações. Na situação de aplicação de revestimentos que formam um filme na superfície, como por exemplo, as resinas acrílicas, as emulsões de silicone preservam a capacidade de o material respirar (não fecham os poros), mas ao mesmo tempo

a água não penetra nos capilares, pois um líquido polar não consegue molhar nem interagir com os poros siliconizados que se tornaram hidrofóbicos e repelentes [98].

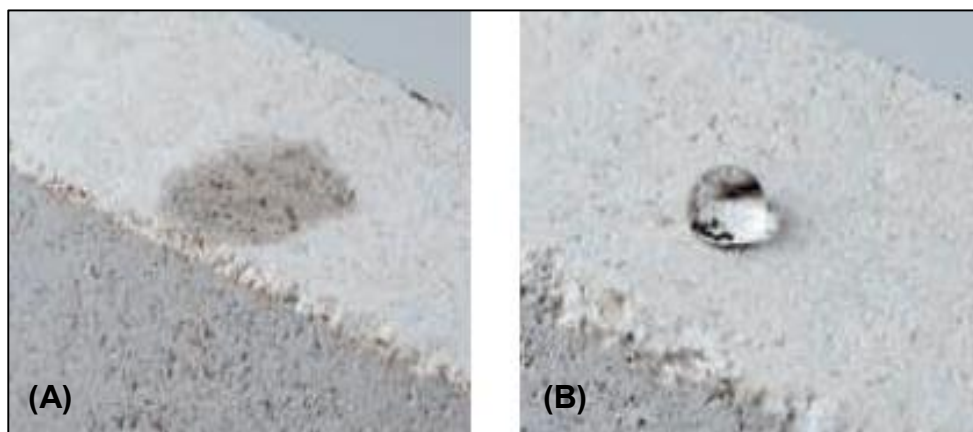


Figura 3.27 – Absorção capilar de água: **(A)** Superfície sem tratamento; **(B)** Superfície com tratamento hidrofóbico [98].

A Figura 3.26a ilustra um material poroso que está absorvendo a água e a Figura 3.26b ilustra a ação de impregnação hidrofóbica: a água não é absorvida, formando uma gotícula, com leve escorregamento sob a superfície do produto poroso.

Maranhão [11] propôs um método para reduzir manchas causadas pela deposição de poluentes atmosféricos e proliferação de organismos nas vedações externas (telhados e fachadas) dos edifícios. O método proposto se aplica a materiais de construção silicosos e porosos como placas de granito, argamassas de revestimentos, telhas cerâmicas e telhas onduladas de fibrocimento sem amianto. O objetivo principal é sobrepor uma camada hidrofóbica por uma hidrofílica na superfície do material, com a intenção de influenciar nas propriedades superficiais. Os materiais utilizados para o estudo, foram: (a) semicondutor a base de dióxido de titânio foto-ativado, que quando incidido por radiação ultravioleta, apresenta atividade fotocatalítica (oxidante e hidrofílica); (b) hidrofugante à base de octil-silicone que apresenta maior durabilidade e elevada repelência à água.

O experimento foi baseado em três etapas: (i) ângulo de contato, com análise e tratamento de imagens; (ii) microscopia eletrônica de varredura (MEV) e (iii) espectroscopia de infravermelhos por Transformada de Fourier (FTIR). A realidade de uma camada hidrofílica instantaneamente precedida por uma camada hidrofóbica, levou a minimizar a ação da água presente no interior dos materiais de construção, refletindo assim na redução do crescimento de microorganismos, também levou à redução de deposição de poluentes atmosféricos, devida a elevada tensão superficial das superfícies hidrofílicas [11].

Em síntese, baseado nessas considerações, esse projeto propôs investigar agentes hidrofugantes, para atuarem na permeabilidade de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, compostas conjuntamente de fibras naturais e sintéticas, de forma que possam inibir ou reduzir a penetração de água nos vazios resultantes da baixa adesão entre a matriz cimentícia e as fibras, e que causa manchamento e/ou gotejamento.

3.6 Carbonatação

Em relação ao material de base cimentícia e o meio ambiente, alguns pontos devem ser considerados, como por exemplo a captação ou reabsorção de CO_2 presente na atmosfera pois, com o passar do tempo, o cimento absorve o CO_2 atmosférico. Esse processo é denominado carbonatação, vista como uma propriedade intrínseca do concreto com base no cimento Portland [99].

A carbonatação age como a difusão do CO_2 presente na atmosfera, através dos poros insaturados da matriz cimentícia, formando o ácido carbônico (H_2CO_3) resultante da dissolução do CO_2 na fase aquosa presente nos poros. O ácido carbônico - H_2CO_3 , se dissocia em íons de CO_3^{3-} e HCO_3^- , juntamente com a dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que libera íons de OH^- e Ca^{2+} , que por fim se precipitam formando o CaCO_3 carbonato de cálcio [100].

Resumindo, entende-se por carbonatação uma reação entre os materiais de base cimentícia ao dióxido de carbono (exposto na atmosférica), ou seja, um processo físico-químico natural, o qual libera carbonato de cálcio, formando camadas periféricas em telhas de fibrocimento, a qual leva a uma alternância na coloração, redução de porosidade e reforça a superfície do mesmo. Assim como a carbonatação, a poluição presente no ar, também influencia no fibrocimento, levando à manifestação biológica dos compostos de fibrocimento que resulta na proliferação de fungos [101-103].

Entende-se por eflorescência o fenômeno resultante da penetração de líquidos na base cimentícia que dilui sais solúveis que migram para o meio externo, leva ao clareamento da superfície, aumento de porosidade e permeabilidade, redução na resistência mecânica e danifica a visão estética das telhas, pois a coloração varia conforme a orientação da construção frente à presença da umidade. [101]

A eflorescência pode ocorrer, por exemplo, quando a água carrega a “Cal Livre”, mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, para determinados pontos que reagem com o gás carbônico atmosférico conforme a Reação 1. A cura “Cal Livre” é uma reação de carbonatação [104].



Pizzol [99] em um dos seus trabalhos relacionados ao fibrocimento, abordou a carbonatação acelerada, como nova tecnologia de cura para o fibrocimento sem amianto. O objetivo de seu estudo foi apresentar o impacto da carbonatação acelerada na microestrutura, nas propriedades mecânicas e químicas do fibrocimento reforçado com fibras sintéticas e polpa de celulose. Para análise experimental utilizou microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e análise termogravimétrica. A utilização dessa tecnologia consistia em reduzir prematuramente a alcalinidade da matriz cimentícia, que por sua vez, influencia diretamente no reforço de fibras como no caso de fibras de celulose. Os resultados foram que tal tecnologia levou ao aumento da densidade aparente, reduziu a porosidade aparente e a absorção à água, tendo em vista que o

carbonato de cálcio formado é precipitado nas estruturas dos poros da matriz cimentícia, preenchendo os vazios existentes, assim reduzindo a penetração de água. Em adição a isso, o desempenho mecânico foi melhorado, consequência da melhoria da interface entre fibras de celulose e a matriz cimentícia. Diante desses resultados positivos, a carbonatação acelerada pode ser vista como procedimento eficaz para reduzir a degradação de fibras de celulose, melhorando assim propriedades físicas e mecânicas, além de ser uma forma de utilizar e captar o CO₂ [99].

Neste âmbito, considerando os aspectos envolvidos em fibrocimento, particularmente em telhas onduladas, essa dissertação está direcionada para a avaliação da influência de agentes hidrofugantes como metodologia para prevenir ou minimizar a permeação da água que causa manchamento e formação de gotas (gotejamento).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as etapas de realização do plano de trabalho experimental da dissertação, com o principal objetivo de seguir o passo de aplicar aos banhos de imersão, vários agentes hidrofugantes disponíveis no mercado. A abordagem se dá na linha de pesquisa do desenvolvimento tecnológico, com a intenção de minimizar a permeabilidade à água de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto já conformadas, melhorando a qualidade das telhas das indústrias nacionais.

As telhas onduladas de fibrocimento sem amianto foram disponibilizadas pela empresa localizada na cidade de Leme/SP. A empresa atua no ramo da construção civil há mais de 40 anos, produzindo placas cimentícias, caixas d'água, forros, portas sanfonadas de PVC, tanques de polietileno, cisternas, telhas cerâmicas e telhas de fibrocimento [64].

Os materiais disponibilizados foram de dois lotes, porém apesar de não serem do mesmo lote, o processo de produção atendeu a mesma composição e os mesmos critérios. O tratamento das telhas foi realizado no Laboratório de Formulação e Síntese Cerâmica – LaFSCer do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos – SP (UFSCar).

Na Figura 4.1 está disposto um fluxograma de etapas da metodologia, onde se titula alguns tópicos que foram necessários para a concretização do desenvolvimento do projeto experimental.

É importante salientar que o estudo avaliou principalmente o efeito de banhos de imersão em telhas já conformadas industrialmente, com a intenção de não alterar o processamento e os parâmetros usuais de produção da empresa fornecedora das telhas onduladas de fibrocimento sem amianto. Essa escolha baseou-se no fato de ter amostras representativas, sem nenhum tratamento e todas com 30 dias de idade, frente à opção de aquisição de telhas novas comerciais com idades desconhecidas. Buscou-se assim amenizar os efeitos que essas podem ter sofrido sob condições climáticas naturais com o passar do tempo e evitar a utilização de telhas que de alguma forma poderiam já terem sido tratadas.

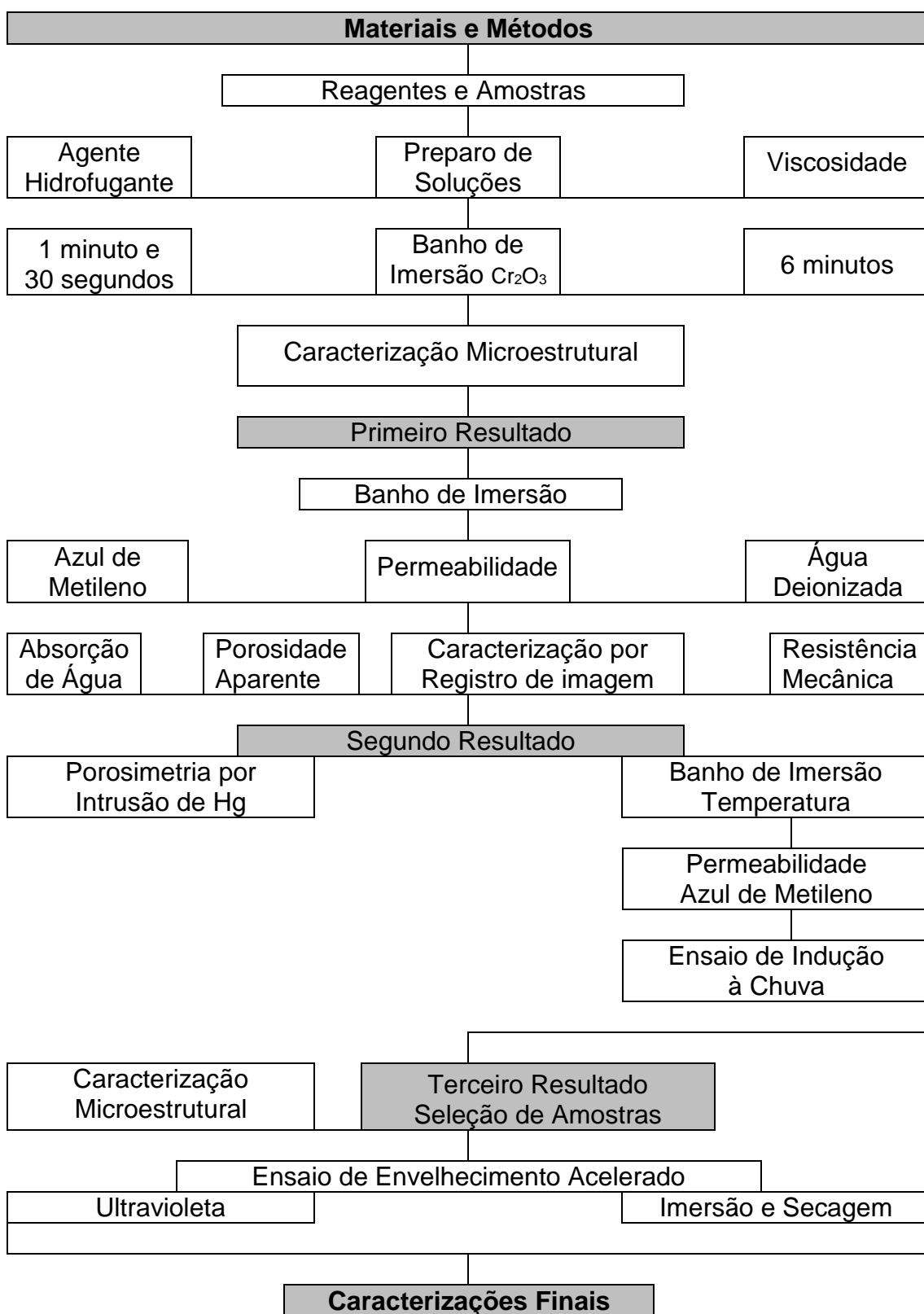


Figura 4.1 – Fluxograma da Metodologia: principais etapas utilizadas no desenvolvimento experimental [autoria própria].

A primeira etapa estabelecida foi a obtenção dos reagentes para o preparo das soluções. Foram preparadas 21 soluções, variando-se os teores de reagentes e água deionizada; avaliou-se a viscosidade das mesmas. Além disso, nesta fase, adquiriu-se telhas onduladas de fibrocimento sem amianto de espessura de 5mm, que foram submetidas a cortes, com auxílio de serra diamantada, obtendo-se assim corpos de provas com 15 cm de largura x 30 cm de comprimento.

Alguns dos corpos de provas foram sujeitos aos banhos de imersão, com detalhe no tempo de imersão, aplicados em 1 minuto e 30 segundos e tempo de 6 minutos. Alguns banhos foram realizados com hidrofugante adicionados de 10% em massa de óxido de cromo verde (Cr_2O_3), partículas submicrométricas ($100\% < 1 \mu\text{m}$) com o objetivo de se caracterizar microestruturalmente a penetração da solução em função do tempo de imersão, isto é, banhos de 1 minuto e 30 segundos e de 6 minutos. Adotou-se esse padrão experimental dado o fato de que a observação por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e mapeamento químico por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) não distinguiria a penetração de hidrofugantes, pois a maioria dos hidrofugantes avaliados tem na sua constituição íons silício e a matriz cimentícia fundamentalmente íons cálcio e silício. Outros pigmentos, como por exemplo óxido de ferro (Fe_2O_3) também poderiam mascarar as observações por estarem presentes na matriz cimentícia (ferroaluminato de cálcio). Dessa forma, obteve-se o “Primeiro Resultado Geral” referente ao tempo de imersão.

Após observar um padrão de tempo adequado para os banhos de imersão, todos os corpos de provas foram submetidos aos banhos com diferentes soluções (hidrofugantes) sem a adição de cromo, pois já se havia observado anteriormente o quanto de solução penetrou no material em si para os dois tempos de imersão avaliados. Conseqüentemente, foram feitos ensaios e análises de permeabilidade com base no procedimento da NBR 7581. A esse procedimento, permeabilidade à água, que utiliza água deionizada, também foi realizado uma vertente com soluções adicionadas de azul de metileno para melhor visualização da absorção de água (manchamento) e melhor qualidade no registro de imagens.

Em seguida os corpos de provas foram secos e submetidos à caracterização por análise de absorção de água e porosidade aparente pelo método de imersão em água baseado no Princípio de Arquimedes. Foi avaliado também resistência mecânica à flexão a três pontos. Dessa forma obteve-se o “Segundo Resultado Geral”, e seguindo os resultados foram separadas telhas por um critério de classificação em telhas inferiores, intermediárias e superiores, ou seja, as de piores resultados, resultados razoáveis e melhores resultados, respectivamente. Estas foram submetidas a análise de distribuição de tamanho de poros por porosimetria por intrusão de Mercúrio (Hg). Vale ressaltar que essas denominações não se aplicam à qualidade das telhas em si, mas ao efeito que os banhos de imersão causaram na estrutura e conseqüentemente refletiram na permeabilidade, efeito insignificante, aceitável ou positivo.

Assim, definindo o tempo de imersão, a adequação dos banhos com as características físicas e mecânicas das telhas, novos ensaios de permeabilidade à água foram realizados (com adição de azul de metileno). Esses ensaios foram em corpos de prova que estavam mantidos a 25°C para facilidade de realizar o plano experimental e corpos de prova mantidos a 70°C antes do banho para chegar próximo ao padrão de processamento industrial, pois 70°C foi adotada por ser a temperatura de secagem industrial que as telhas sofrem após conformação. Não tem o intuito de causar efeito na matriz cimentícia, mas, industrialmente, é uma medida para acelerar e aumentar a produção, segundo o fabricante (fornecedor).

Os lotes de corpos de prova das telhas denominadas como inferiores, intermediárias e superiores, na verdade, contendo os hidrofugantes responsáveis por essa classificação, foram submetidos ao ensaio de permeabilidade à água (ensaio “dinâmico”) de forma a se induzir a ocorrência de chuva, onde a água apresenta fluxo contínuo. Para isto, foi efetuada em uma estrutura adequada, onde se utilizou uma bomba de retorno para poder produzir movimento de água, semelhante a chuva. Paralelamente, a permeabilidade foi avaliada de forma “estacionária” com o auxílio de cachimbo de vidro, onde a água não apresenta movimentação (flui lentamente).

Assim, definiu-se o “Terceiro Resultado Geral”. Desses resultados foram selecionadas amostras para caracterização de microestrutura, e aquelas nas quais foi aplicado o ensaio de envelhecimento, tanto o acelerado por imersão e secagem, como o acelerado por luz ultravioleta, com o auxílio do equipamento LCP. 215 disponibilizado pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais – CCDM – UFSCar.

Por fim, as telhas que obtiveram uma eficiência de forma inferior, intermediária e superior, após o ensaio de envelhecimento, foram submetidas novamente as caracterizações para que de forma comparativa se possa verificar o efeito do envelhecimento nas telhas previamente tratadas com hidrofugantes.

4.1 Materiais

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, os principais materiais que foram utilizados como base de estudo foram as telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, disponibilizadas pela empresa local (Leme/SP), e alguns reagentes.

É importante ressaltar que o processo utilizado pela empresa para a produção de telha ondulada é o método de Hatschek, esquematicamente ilustrado na Figura 4.2 [12]. Algumas informações disponibilizadas pela empresa foram que o cimento utilizado é o Cimento Portland (CP II-E 40 RS) e as fibras empregadas foram celulósicas, sendo nacional e outra importada (*eucalyptus* e de algodão), demais agregados como fio de polipropileno e fibras de PVA.

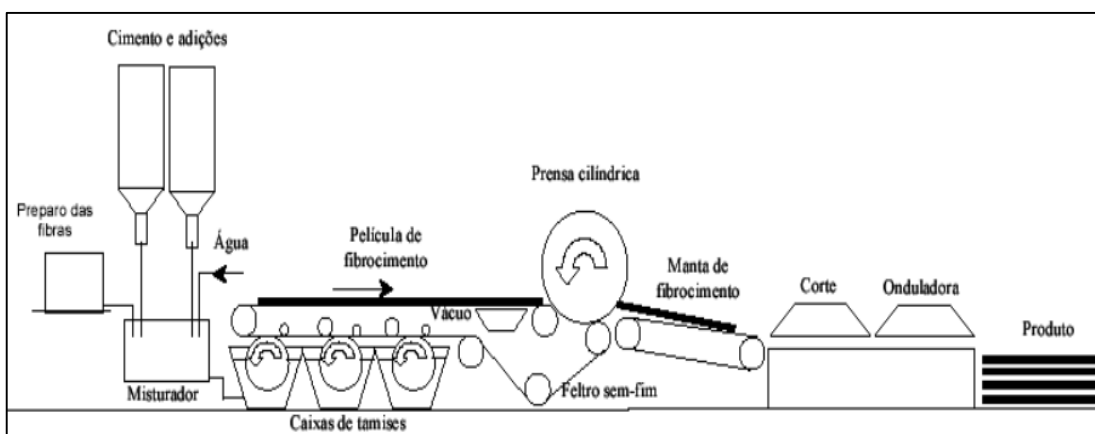


Figura 4.2 – Método Hatschek para produção de telhas onduladas de fibrocimento [12].

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam características dimensionais das telhas que forneceram corpos de prova para esse estudo, a empresa que disponibilizou as telhas e algumas informações de suas características trabalha com três tipos de espessuras, 5mm, 6mm e 8mm. Para esse estudo foram utilizadas telhas de 5mm de espessura por serem as que mais destacam na economia do mercado, neste caso, apontado pela empresa.

Tabela 4.1 – Características dimensionais de telhas onduladas de fibrocimento de 5mm comercializadas

Tipo 1	Tipo 2
Largura Total de 1100mm	Largura Total de 920mm
Largura útil de 1050mm	Largura útil de 870mm

Fonte: Adaptado de [64].

Tabela 4.2 – Características Técnicas de telhas onduladas de fibrocimento comercializadas

Tipo 1			
Comprimento (mm)	Área (m ²)	Área útil (m ²)	Peso (kg) e=5mm
1220	1,342	1,134	14
Tipo 2			
Comprimento (mm)	Área (m ²)	Área útil (m ²)	Peso (kg) e=5mm
1220	1,122	0,940	12

Fonte: Adaptado de [64].

Os principais reagentes, como agentes hidrofugantes e possíveis promotores de tamponamento utilizados isoladamente e/ou em misturas foram:

- i) Silicato de Sódio: foi utilizado com relação SiO₂ /Na₂O em massa 3,3.
- ii) Silicato de Potássio: Este silicato de potássio apresenta em proporção em massa: 12,75% de K₂O, 27% de SiO₂ e 60,25% de H₂O, é um material muito viscoso, 400 a 600 cP à 25°C.

- iii) Silano (estruturas Si-H): neste trabalho foi aplicado uma emulsão de silano de óleo em água, 52,5% em massa dos princípios ativos (alcóxi silano). Este reagente apresenta a cor branca, leitoso, pH entre 5-9, e com densidade de 0,95g/ml.
- iv) Siloxano (estruturas Si-O-Si): este reagente é uma emulsão de silano-siloxano, algumas características disponibilizadas são: substratos alcalinos, pH levemente alcalino a 12, 40% em massa dos princípios ativos.
- v) Resina acrílica copolimerizada à base d'água: é um copolímero de alta elongação, formulação com zero VOC (compostos orgânicos voláteis), livre de APEO (alquilfenol etoxilados) e formaldeídos.
- vi) Bicarbonato de sódio, solúvel em água: fórmula química NaHCO_3 , massa molar de aproximadamente 84 g/mol, densidade de 2,2g/cm³.
- vii) Sílica Coloidal, SiO_2 : suspensão em água (50% em massa), peso molecular de 60,09 g/mol, aspecto forma líquido cor turvo, pH de 9-10,5 a 25°C, densidade relativa de 1,4 g/cm³ a 20°C.
- viii) Polidimetilsiloxano: com grupos aminoalquílicos (emulsão em água).

Para realizar a primeira etapa de banho foi utilizado óxido de cromo (Cr_2O_3), pó na cor verde, e para analisar a permeabilidade com foco no manchamento, foi utilizado o azul de metileno $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, da marca Synth com peso molecular de 373,90 g/mol.

4.2 Métodos

4.2.1 Preparação dos corpos de prova

A partir de telhas de espessuras de 5 mm foram seccionados corpos de provas (15 cm de largura por 30 cm de comprimento) para os banhos de imersão, respeitando a estrutura côncava e convexa das telhas (Figura 4.3). Essa rota de impermeabilização por impregnação foi escolhida pois, a adição prévia de um agente hidrofugante à massa de fibrocimento, dependendo da sua composição, pode interferir na conformação das telhas (moldagem pelo Método Hatschek) e/ou na hidratação do cimento, influenciando diretamente nas características do produto final.

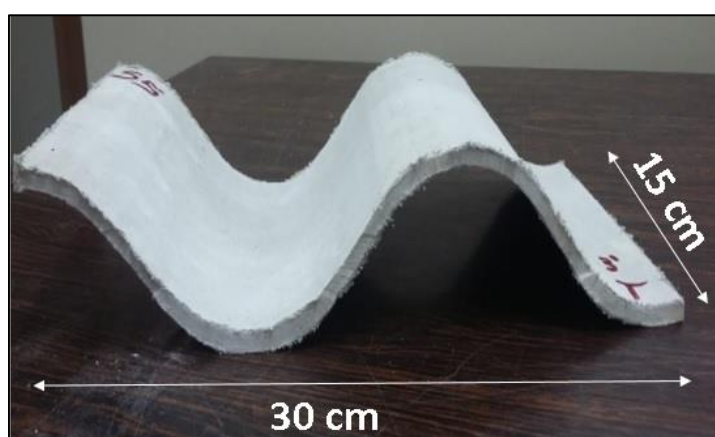


Figura 4.3 – Corpo de prova com dimensões em cm de 30 x15 x0,5 obtido do corte de telha de fibrocimento ondulado, sem tratamentos e com 30 dias de idade [autoria própria].

4.2.2 Soluções

As soluções foram preparadas com diferentes concentrações, partindo de 1% do volume total da solução, a base de todas as soluções foi a água

deionizada, e assim também foram avaliadas em relação à viscosidade de cada solução aplicada ao banho de imersão. Os detalhes de cada solução estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Formulação das soluções para os banhos de imersão (% em massa).

Composição		η (cP) *
Solução 1	0,5% Resina acrílica + 0,25% Siloxano + 0,25% Silano	4,5
Solução 2	0,5% Resina acrílica + 0,5% Siloxano	6,0
Solução 3	0,75% Resina acrílica + 0,25% Siloxano	5,5
Solução 4	0,5% Resina acrílica + 0,5% Silano	6,0
Solução 5	0,75% Resina acrílica + 0,25% Silano	5,5
Solução 6	1% Silano	5,0
Solução 7	0,33% S.Coloidal + 0,33% Polidim. + 0,33% Siloxano	6,0
Solução 8	0,33% S.Coloidal + 0,33% Polidim. + 0,33% Silano	6,0
Solução 9	0,5% S.Coloidal + 0,5% Polidim.	6,0
Solução 10	0,5% S.Coloidal + 0,5% Silano	5,5
Solução 11	0,8% Polidim. + 0,2% Bicarbonato de Sódio	6,5
Solução 12	0,25% Resina acrílica + 0,75% Siloxano	6,0
Solução 13	0,25% Resina acrílica + 0,75% Silano	6,0
Solução 14	1% Siloxano	6,0
Solução 15	1% Polidimetilsiloxano	4,5
Solução 16	1% Sílica Coloidal	6,0
Solução 17	1% Resina acrílica	6,0
Solução 18	0,5% S.Coloidal + 0,5% Siloxano	5,5
Solução 19	1% Silicato de Sódio	6,5
Solução 20	1% Silicato de Potássio	5,5
Solução 21	1% Sika	5,0

* viscosidade determinada experimentalmente

Fonte: [autoria própria].

Para a medição da viscosidade utilizou-se o Viscosímetro Brookfield, ilustrado na Figura 4.4. Spindle 1 foi utilizado na velocidade rotacional de 60rpm e fator multiplicador igual a 1. Assim, foram obtidos os valores de viscosidade em centipoises (cPs) de cada solução apresentados na Tabela 4.3.

Spindle	RPM			
	6	12	30	60
1	10	5	2	1
2	50	25	10	5
3	200	100	40	20
4	1000	500	200	100

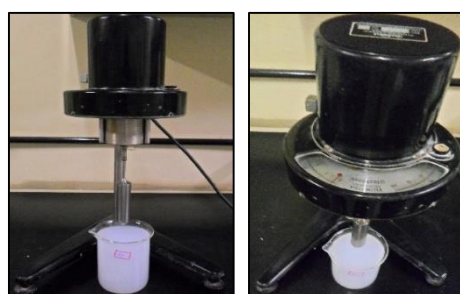


Figura 4.4 – Viscosímetro Brookfield e respectivo multiplicador (conversor de % de torque em viscosidade cP) [autoria própria].

4.2.3 Banhos de imersão

Esta etapa ocorre após o preparo de 21 soluções descritas na Tabela 4.3. O banho de imersão consiste, de maneira simples, na colocação dos corpos de provas proveniente de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto nas soluções de hidrofugantes (Figura 4.5).

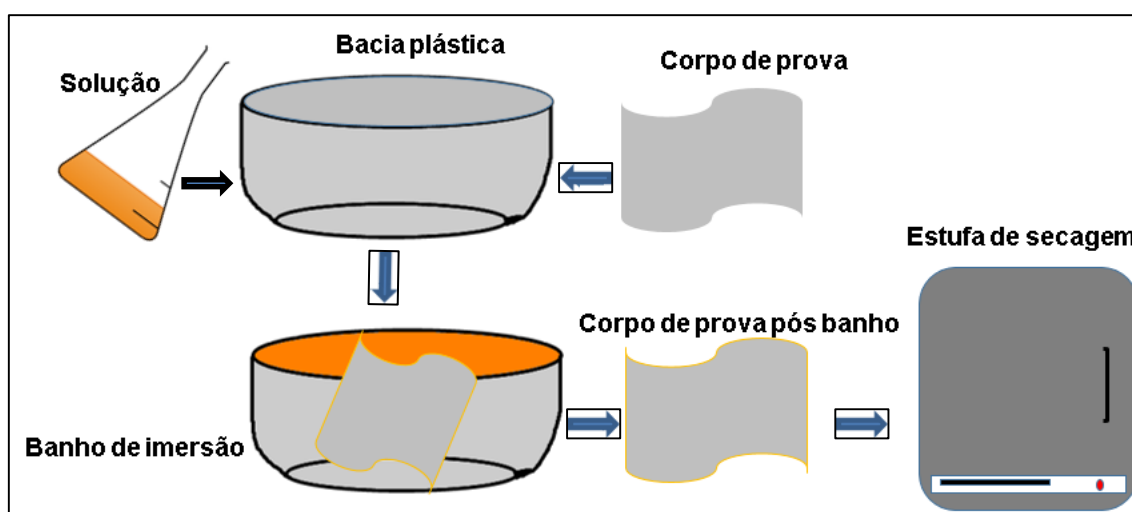


Figura 4.5 – Banho de imersão dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento em solução de hidrofugantes [autoria própria].

Os banhos dos corpos de provas ocorreram inicialmente com diferentes durações e com a adição do óxido de cromo, com intenção de observar o quanto penetrou a solução com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios X por energia dispersiva, para se obter um padrão de tempo de imersão aplicável no total de corpos de provas. Os tempos de imersão analisados foram de 1 min e 30 s, que segundo o produtor é um tempo utilizado industrialmente para aplicação de banhos com agentes fungicidas (tempo estabelecido para a produção) e 6 min, procurando-se aumentar 4 vezes mais o tempo de imersão e exposição do material às soluções com hidrofugantes.

Estabelecido o tempo de imersão, o banho com solução sem adição de cromo foi realizado em todos os corpos de prova. Em seguida, após a etapa de imersão, estes foram secos em estufa de secagem (marca Quimis modelo Q317b12) a 110°C por 24 horas.

No fluxograma representado na Figura 4.1, sobre a metodologia geral utilizada, é demarcada a etapa em que ocorreram alguns banhos em corpos de provas variando a temperatura dos mesmos. Isto foi possível com o auxílio da mesma estufa de secagem. Os corpos de provas foram submetidos a uma temperatura de 70°C por 24 horas e após este período, imediatamente ao serem retirados da estufa, foram imersos nos banhos com as soluções contendo os hidrofugantes, seguindo sempre o mesmo tempo padrão.

4.2.4 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi baseado na NBR 7581 com adição de novas etapas e substituição de alguns equipamentos. A norma considera o ensaio de permeabilidade à água pelo período de 24 horas, porém, alguns corpos de provas necessitaram mais tempo para a absorção de água e além disso, teve a variante de também se analisar soluções com azul de metileno (0,005g/ml), com a intenção de focar no manchamento. Lembrando que a NBR 7581 aborda que é aceitável o manchamento na face inferior, porém não é tolerável ao manchamento na face superior e nem ao gotejamento.

4.2.4.1 Permeabilidade com auxílio de cachimbos

A Figura 4.6 apresenta o dispositivo utilizado para o ensaio de permeabilidade, que basicamente consiste de cachimbos de vidro (similares a provetas graduadas em mililitros para melhor precisão dos resultados), contendo água, que são fixados sobre as amostras para que ocorra a absorção. Vale ressaltar que também foram utilizados cachimbos contendo água com azul de metileno, para garantir melhor nitidez do manchamento. Analisou-se duas áreas nos corpos de provas, parte côncava e convexa, para observar se teria alguma diferença na absorção de água.

Em relação ao ensaio de permeabilidade, teve-se como foco a observação do manchamento, por meio de método fotográfico, registrando as imagens das manchas e ressaltando sempre a parte inferior dos corpos de provas; em alguns casos foram necessários ao registro fotográfico na parte superior também.

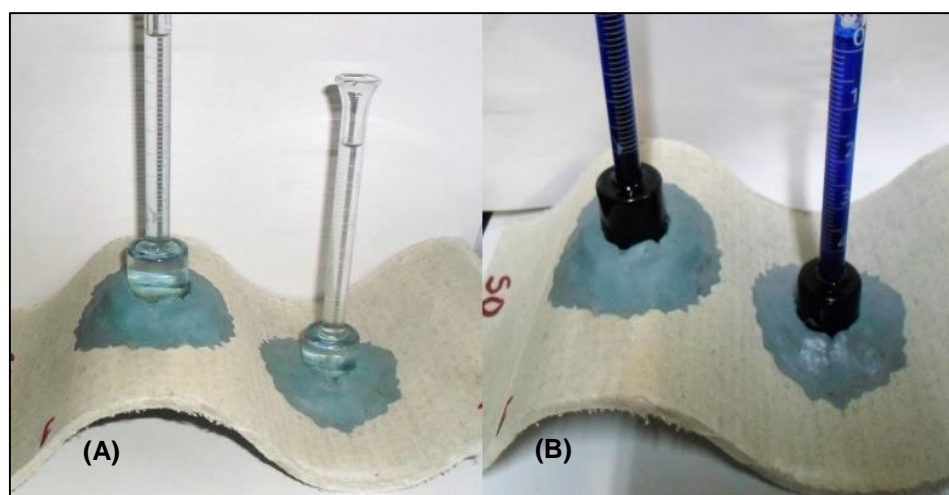


Figura 4.6 – Cachimbos de vidro com escala em mililitros, localizados na parte côncava e convexa do corpo de prova: **(A)** água deionizada; **(B)** água deionizada com adição de azul de metileno [autoria própria].

4.2.4.2 Permeabilidade de indução à chuva

Em relação ao ensaio de permeabilidade que induz à chuva, simulação de constante movimentação da água, ou seja, aplicação contínua, este está esquematicamente ilustrado na Figura 4.7.

Abordou-se uma situação de 3 dias consecutivos de chuva em comparação a permeabilidade com o auxílio dos cachimbos de vidro, onde a água a ser absorvida não apresenta movimentação, isto é, um sistema sem perturbações, mantendo-se contínuo em sua condição de fluir e ser absorvido pela porosidade dos corpos de prova.

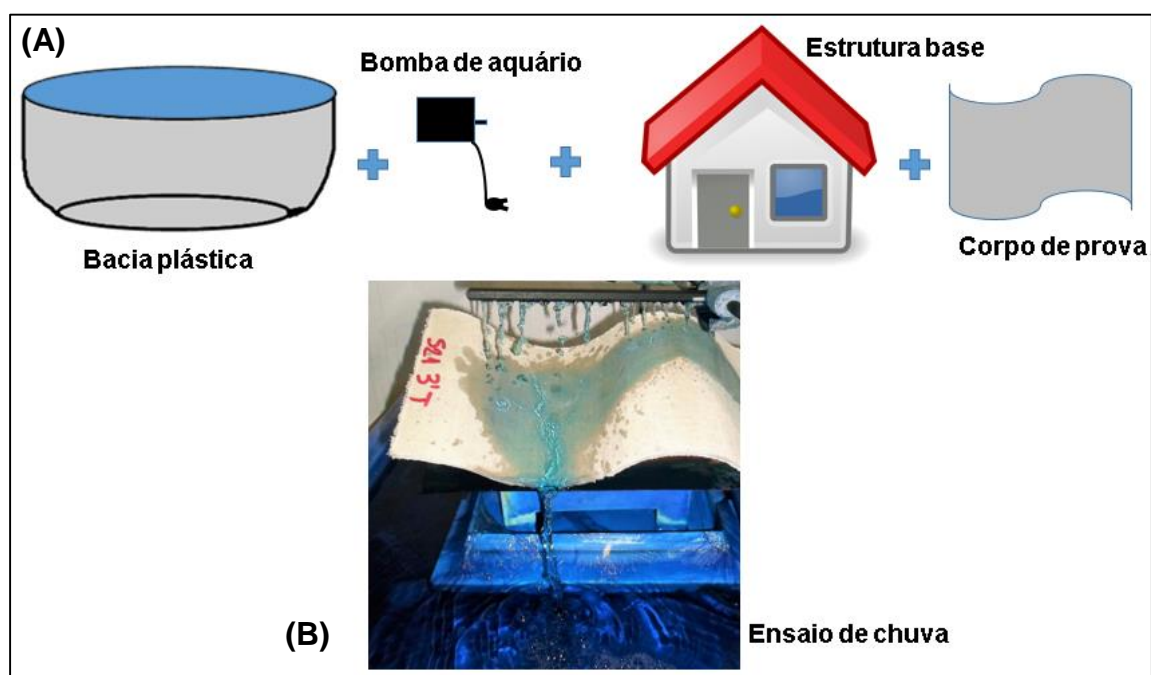


Figura 4.7 – **(A)** Estrutura esquemática; **(B)** experimental para o ensaio de permeabilidade com indução de chuva em telhas onduladas de fibrocimento [autoria própria].

4.3 Caracterização

O método fotográfico para caracterização indireta da permeabilidade consiste de uma coluna com água suspensa na superfície superior da telha e o acompanhamento por imagens da superfície inferior e alguns casos superior, para observar a evolução de manchas, com o tempo de exposição à água.

Os corpos de provas foram também caracterizados por:

1) Absorção de Água (%) e Porosidade Aparente (%)

Em relação às medidas de absorção de água e de porosidade aparente, as análises foram realizadas usando a técnica de imersão em água baseada no Princípio de Arquimedes, conforme as Equações 4.1 e 4.2.

Os corpos-de-prova secos em estufa a 110°C (massa seca - M_s) foram submersos em água, por 24 horas, à temperatura ambiente. Posteriormente foram medidas então a massa imersa M_i (com o corpo de prova suspenso dentro da água) e a massa úmida M_u (enxugando levemente sua superfície para retirada do excesso de água) [105].

- Absorção de água

$$\%AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4.1)$$

- Porosidade aparente

$$\%PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (4.2)$$

II) Resistência Mecânica à Flexão a Três Pontos

Possíveis alterações nas características mecânicas das telhas de fibrocimento em função dos banhos de imersão em soluções de agentes hidrofugantes foram avaliadas por meio de medidas do módulo de resistência à flexão, calculado segundo a Equação 4.3

$$MRF = \frac{3}{2} \frac{PL}{bh^2} 0,098066 \text{ Mpa} \quad (4.3)$$

onde:

- P = carga de ruptura (kgf);
- L = distância entre os apoios (cm);
- b = largura do corpo de prova (cm);
- h = altura (espessura) do corpo de prova (cm).

As amostras foram extraídas dos corpos de provas de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto impregnadas com agentes hidrofóbicos, os hidrofugantes, nas dimensões de 2 cm de largura por 7 cm de comprimento.

Para realizar o ensaio de resistência mecânica à flexão a três pontos, foi utilizada uma Máquina Instron modelo 5200; imagem apresentada na Figura 4.8.

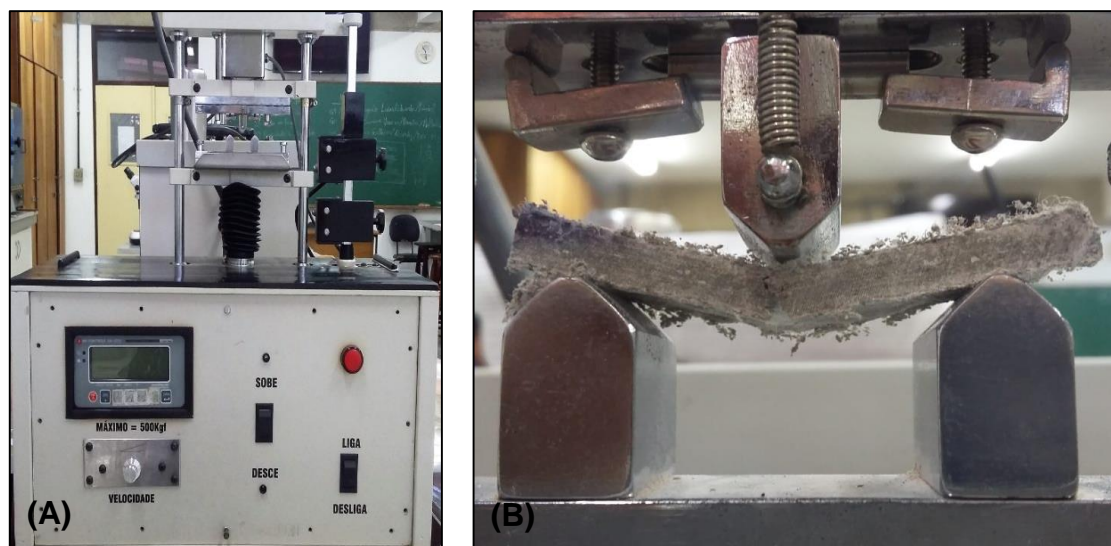


Figura 4.8 – (A) Máquina Instron modelo 5200; (B) carga atuando em um corpo de prova de telha ondulada de fibrocimento [autoria própria].

III) Distribuição do Tamanho de Poros

A distribuição de tamanho de poros foi avaliada por porosimetria por intrusão de Mercúrio (Hg), lembrando que a análise foi realizada a partir do “Segundo Resultado Geral”. Utilizou-se um porosímetro da American Instrument Co., modelo 5-7118 (faixa de 0 a 5000 Psi), ilustrado na Figura 4.9.

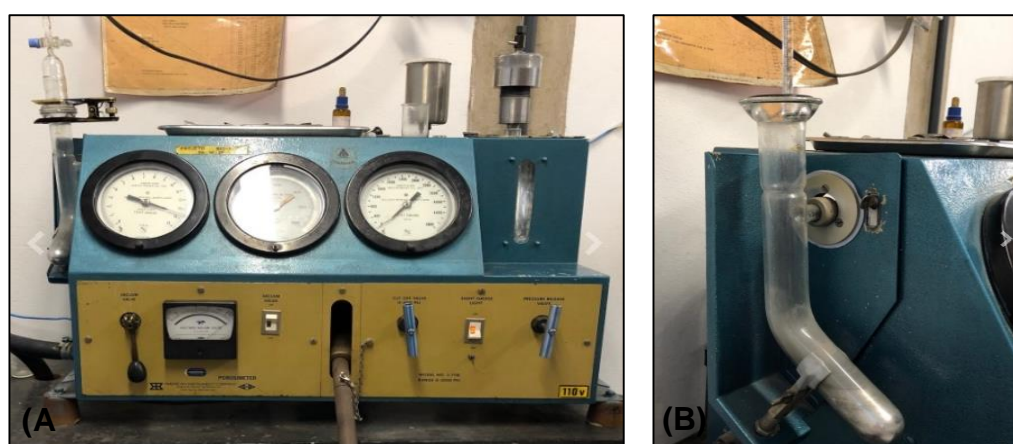


Figura 4.9 – (A) Porosímetro de Mercúrio - American Instrument Co., modelo 5-7118; (B) detalhe da coluna de Hg [autoria própria].

IV) Microscopia

As análises microestruturais foram realizadas com o objetivo principal de se observar as interfaces fibra/matriz e detalhes da morfologia dos poros (isolados e/ou interconectados). As análises realizadas por: (a) Microscopia Confocal de Fluorescência por Varredura a Laser em um microscópio Olympus LEXT OLS 4000; (b) Microscopia Eletrônica de Varredura, em microscópios FEI Inspect S 50 com sistema EBSD e Philips XL-30 TMP (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Microscópios utilizados durante as análises microestruturais e química elementar dos corpos de provas: **(A)** Confocal; **(B)** MEV FEI Inspect S 50; **(C)** MEV Philips XL-30 TMP [106].

4.4 Ensaio de envelhecimento

Este tipo de ensaio tem a finalidade de prever resultados com o tempo de utilização do material e a ocorrência de defeitos durante à exposição e intempéries climáticas (auxilia na prevenção de que ocorram riscos), uma vez que o produto acaba por ser exposto ao mercado consumidor imediatamente após a fabricação (demanda comercial), e está sujeito a variações com o tempo de utilização.

Diante disso, para se obter resultados sobre o comportamento dos corpos de prova hidrofugados, alguns corpos de provas dos grupos de resultados classificados como inferiores, intermediários e superiores, passaram pelo ensaio de envelhecimento com a intenção de se avaliar a durabilidade das amostras de telhas tratadas representativas de cada caso.

Foram esquematizados dois testes de envelhecimento com o objetivo de se obter resultados comparativos e aumentar o número de opções de tratamentos com os hidrofugantes, tendo em vista a durabilidade do material. Ambos por envelhecimento acelerado: um com o auxílio do equipamento LCP 215 disponibilizado pelo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar (Figura 4.11), envelhecimento por radiação ultravioleta, e o outro teste por imersão e secagem sequenciais, que envolveu a imersão dos corpos de prova em água deionizada por 18 horas, seguido de secagem por 6 horas em estufa a 100°C repetidamente (Figura 4.12).



Figura 4.11 – Equipamento LCP 215: envelhecimento por radiação ultravioleta utilizado para verificar a durabilidade da ação de hidrofugantes aplicados em telhas onduladas de fibrocimento [107].

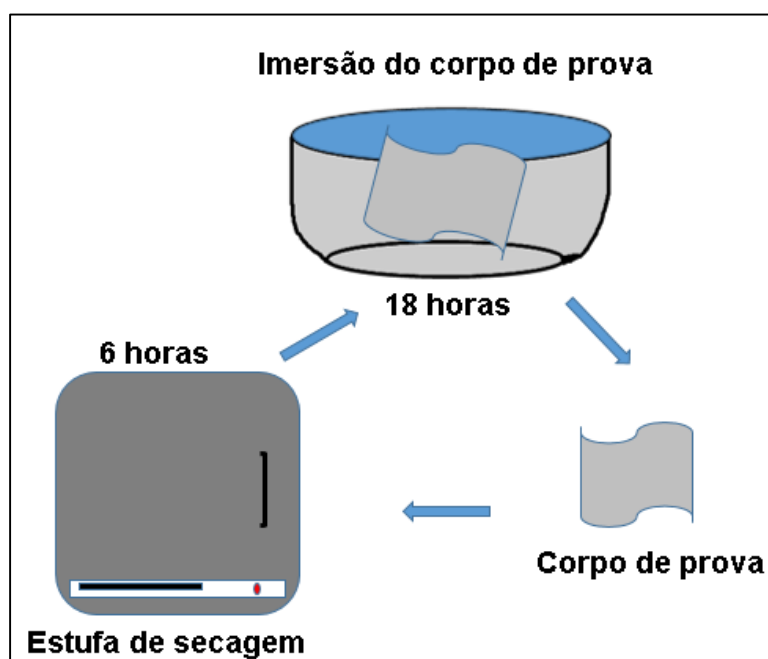


Figura 4.12 - Ciclo de envelhecimento por imersão e secagem de amostras de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas [autoria própria].

O ensaio envelhecimento por radiação ultravioleta reproduz os efeitos de intemperismo quando materiais são expostos a umidade como chuva ou orvalho e luz solar direta ou indireta, com a finalidade de analisar possíveis alterações nas propriedades do material. Tempo total de ensaio em horas foi de 1000 horas (1 ciclo) o que equivale a uma simulação de aproximadamente 1 ano do corpo de prova, a energia que atuou foi de 49591,3 KJ/m².

O ciclo de envelhecimento por imersão, ilustrado na Figura 4.12, pode implicar em alterações no desempenho do fibrocimento, como alteração favorável a hidratação e carbonatação da matriz cimentícia, porém, podem oferecer alterações desfavoráveis relacionadas a degradação das fibras de celulose e da zona de interface [5].

Nesse ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem a contagem foi diferente comparado ao envelhecimento por radiação ultravioleta, pois o tempo total de ensaio em horas foi de 1200 horas o que equivale a 50 ciclos, cada ciclo representa 24 horas, que também equivale a simulação de aproximadamente 1 ano do corpo de prova.

4.5 Infraestrutura

O Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar disponibilizou uma infraestrutura hábil para a preparação e caracterização das amostras deste trabalho. As principais necessidades e equipamentos foram atendidas, tais como: serras diamantadas, vidrarias, balanças, viscosímetro, porosímetro de Hg, máquina de ensaios universal Instron, microscópios ótico e eletrônicos de varredura (Laboratório de Caracterização Estrutural), Envelhecimento acelerado (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais) dentre outros.

Demais bens de consumo também se encontraram disponíveis para a realização do experimento no Laboratório de Formulação e Síntese Cerâmica (LAFSCer), e telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, objeto de estudo, foram fornecidas gentilmente pela empresa localizada em Leme/SP.

Desta forma, a metodologia empregada buscou atender os seguintes requisitos: *(i)* o agente hidrofugante foi utilizado em solução para a imersão das telhas onduladas de fibrocimento sem amianto na fase pós-produção, ao invés de ser adicionado à composição da massa a ser conformada; *(ii)* a seleção do agente hidrofugante foi baseada na sua capacidade de tamponamento dos vazios fibra/matriz e da porosidade aberta e interconectada (superfície superior-interior) para evitar o caminho da água e, conseqüentemente, inibir o surgimento de manchas; *(iii)* o agente melhor hidrofugante buscado foi o de menor custo para aplicação industrial ou de melhor relação custo/benefício. Embora não tenha sido feita uma análise financeira foi realizada uma especulação de preços dos aditivos no mercado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos em cada ensaio são apresentados neste capítulo, segundo o fluxograma representado na Figura 4.1 referente a metodologia adotada para a realização da pesquisa; os resultados seguem a mesma sequência.

5.1 Profundidade de solução

O primeiro resultado obtido foi a avaliação, por meio de microscopia eletrônica de varredura, da profundidade de penetração da solução com hidrofugante. Para chegar tal resultado foi necessário adicionar às soluções de estudo o óxido de cromo (partículas submicrométricas) durante a etapa de banho de imersão, com a finalidade de obter o “tingimento” no corpo de prova e a possibilidade de se detectar o íon cromo no interior dos poros do material.

A Figura 5.1 representa a microestrutura de dois corpos de provas, porém de mesma amostra (S12), ou seja, banhada em tempos diferentes. A região analisada foi a espessura da amostra e é importante salientar a diferença no tempo de duração do banho utilizado, isto é, 1 minuto e 30 segundos e 6 minutos, para que assim se estabelecesse um tempo padrão.

Tabela 5.1 apresenta a análise química elementar (semiquantitativa) obtida por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS). A quantificação do elemento cromo (Cr) é indicada nos pontos demarcados na Figura 5.1.

Diante disso, pode se observar que quanto maior for a duração no ensaio de banho de imersão, maior penetração é alcançada, com isso foi determinado o primeiro resultado, o tempo padrão adequado para etapa de imersão em seis minutos. Esse tempo era esperado por permitir maior tempo de absorção pela estrutura do material, embora a saturação também pudesse ocorrer em tempos

menores devido a espessura fina das amostras de telhas onduladas de fibrocimento (5 mm)

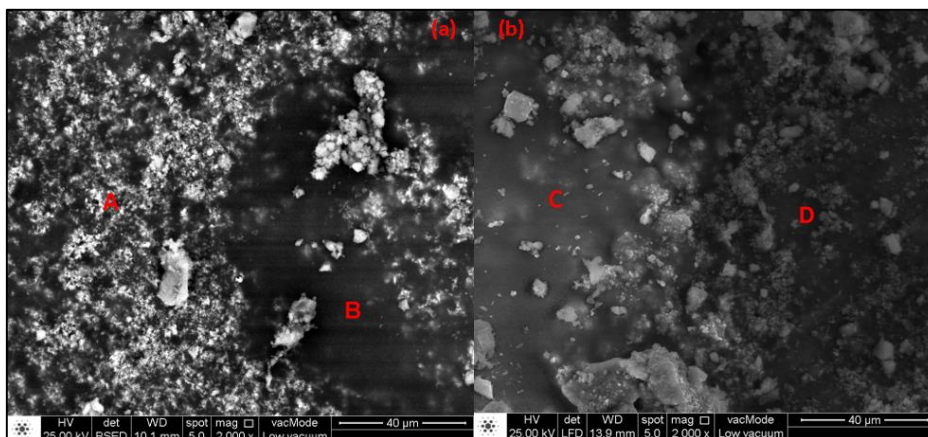


Figura 5.1 – Microscopia Eletrônica de Varredura na espessura da amostra pós banho com soluções de hidrofugantes contendo óxido de cromo. **(a)** banho de imersão em seis minutos; **(b)** banho de imersão em um minuto e trinta segundos [autoria própria].

Tabela 5.1 – Análise de quantificação do elemento Cromo obtida por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) após absorção por diferentes tempos de imersão.

Pontos	Tempo	% Massa	At%
A Figura 5.1(a)	6 min	25,46	10,39
B Figura 5.1(a)	6 min	10,35	3,43
C Figura 5.1(b)	1 min 30 s	12,82	4,24
D Figura 5.1(b)	1 min 30 s	6,51	2,61

Fonte: [autoria própria].

5.2 Análise de permeabilidade

Esta etapa foi realizada por meio do método fotográfico, com registro de imagens, das superfícies inferior e superior do corpo de prova, para observar o a região do manchamento após absorção de água. Essa etapa foi realizada com dois procedimentos: absorção de água deionizada e absorção de água adicionada com adição de azul de metileno, buscando-se melhor delinear a região manchada.

Observou-se o período de absorção por região, ou seja, análise de absorção lenta, intermediária e/ou rápida, diferenciando de forma comparativa as superfícies côncava quanto a convexa

O tempo de absorção de água está apresentado na Tabela 5.2, que indica o tempo que cada corpo de prova absorveu 25 ml, lembrando que o nome dado a cada corpo de prova é referente ao nome da solução com hidrofugante que o mesmo foi banhado.

Tabela 5.2 – Ensaio de permeabilidade à água: tempo de absorção

Corpo de Prova (Solução Hidrofugante)	Tempo de Absorção (Horas – Dias)
SO – “telha sem banho”	24h – 1dia
S1	528h – 22 dias
S2	144h - 6 dias
S3	192h – 8 dias
S4	216h – 9 dias
S5	768h – 32 dias
S6	360h – 15 dias
S7	72h – 3 dias
S8	96h – 4 dias
S9	120h – 5 dias
S10	96h – 4 dias
S11	120h – 5 dias
S12	120h – 5 dias
S13	360h – 15 dias
S14	120h – 5 dias
S15	120h – 5 dias
S16	72h – 3 dias
S17	96h – 4 dias
S18	96h – 4 dias
S19	192h – 8 dias
S20	168h – 7 dias
S21	240h – 10dias

Fonte: [autoria própria].

É importante salientar que de maneira comparativa entre os corpos de provas, observou-se que a absorção ocorreu de forma mais rápida pela superfície convexa da estrutura da telha. Este comportamento pode ter correlação com a processo de conformação do material, forma de distribuição das fibras nas regiões côncava e convexa e, conseqüentemente, na estrutura dos poros.

5.2.1 Método Fotográfico: Absorção de Água Deionizada

Como mencionado na metodologia, o ensaio de permeabilidade foi baseado na NBR 5642, alterando apenas o fato de que os corpos de provas de estudo necessitaram mais de 24 horas (tempo previsto na NBR 5642) para absorver 25 ml de água deionizada. Diante disso, a Figura 5.2 ilustra as superfícies antes e após o teste de permeabilidade, tanto na face superior como a inferior do corpo de prova S0 (sem banho com solução de hidrofugante); pode-se ainda observar além de manchas que ocorreu gotejamento.

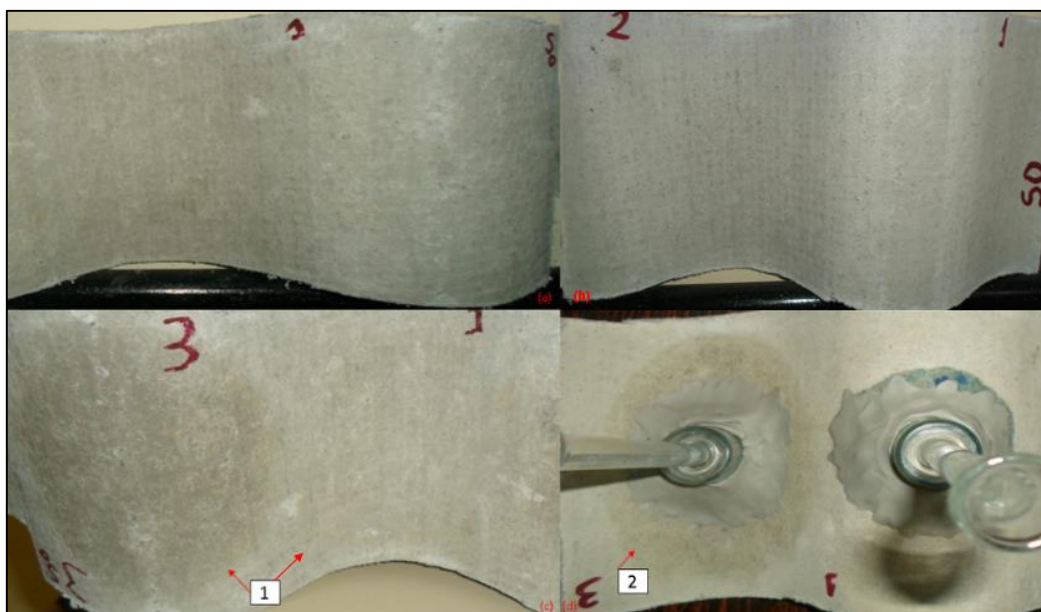


Figura 5.2 – Corpo de prova S0 (sem banho com solução de hidrofugante) **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Como ilustrado (Figura 5.2) o corpo de prova S0 denominado aquele que não recebeu nenhum tratamento específico (telha *in natura*) foi visto que o tempo de absorção foi 24 horas (1 dia), absorção menos lenta comparados aos outros corpos de provas (Tabela 5.2), e apresentou manchas de umidade na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.2c seta 1), e face superior na superfície côncava (Figura 5.2d seta 2), porém manchas na face superior não são permitidas segundo a NBR7581. Além disso no decorrer dessa etapa de permeabilidade foi observado a formação de gota de água, ou seja, a passagem de água da face superior à inferior, o que também não é permitido segundo a NBR7581.

A Figura 5.3 ilustra etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S1, o qual apresentou um tempo de absorção de 528 horas (22 dias).

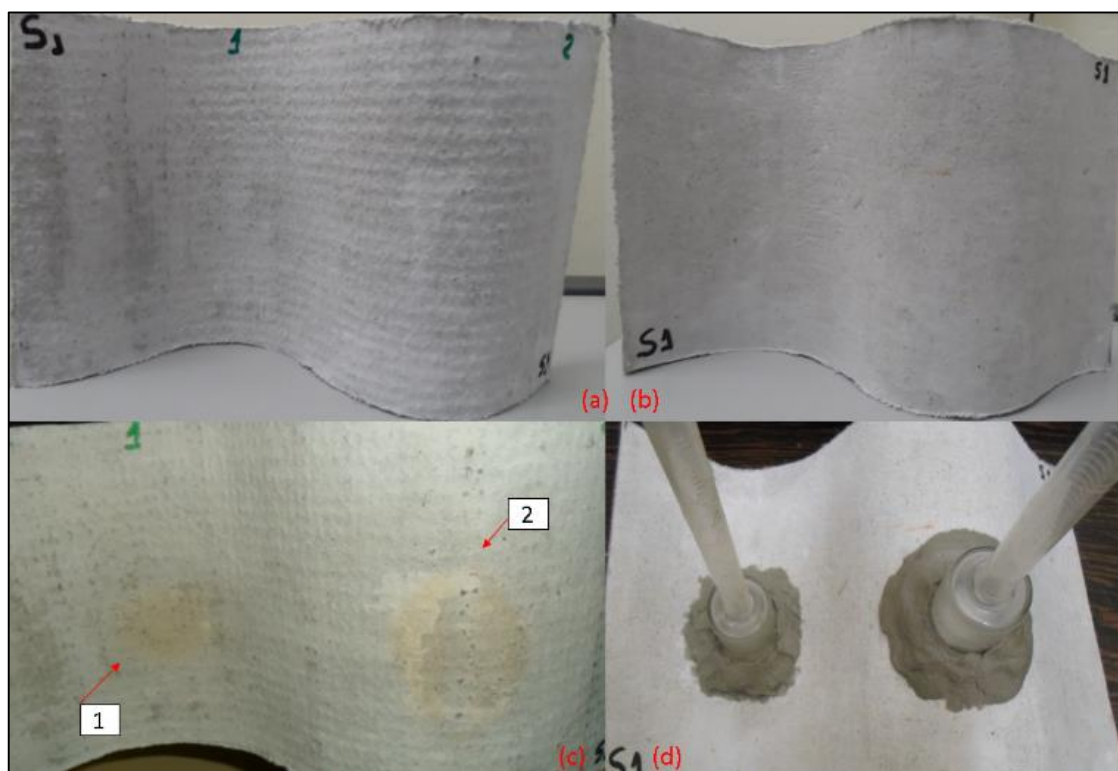


Figura 5.3 – Corpo de prova S1: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

O corpo de prova S1 apresentou pequenas manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.3c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.

A Figura 5.4 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S2, o qual recebeu tratamento banho de imersão, mencionado na Tabela 4.3. Pode ser observado que o tempo de absorção foi referente a 144 horas (6 dias).

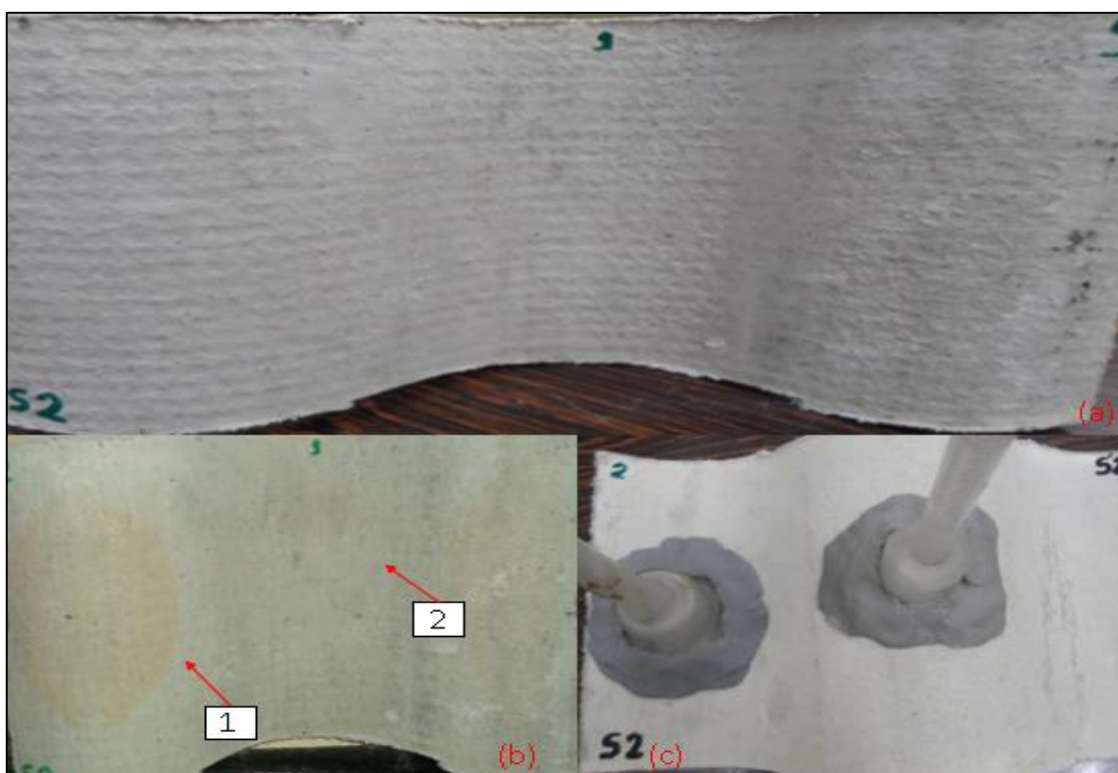


Figura 5.4 – Corpo de prova S2: **(a)** face inferior antes da permeabilidade; **(b, c)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S2 apresentou manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.4b setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior, ou a formação de gota de água.

A Figura 5.5 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S3, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 192 horas (8 dias) como abordado na Tabela 5.2.

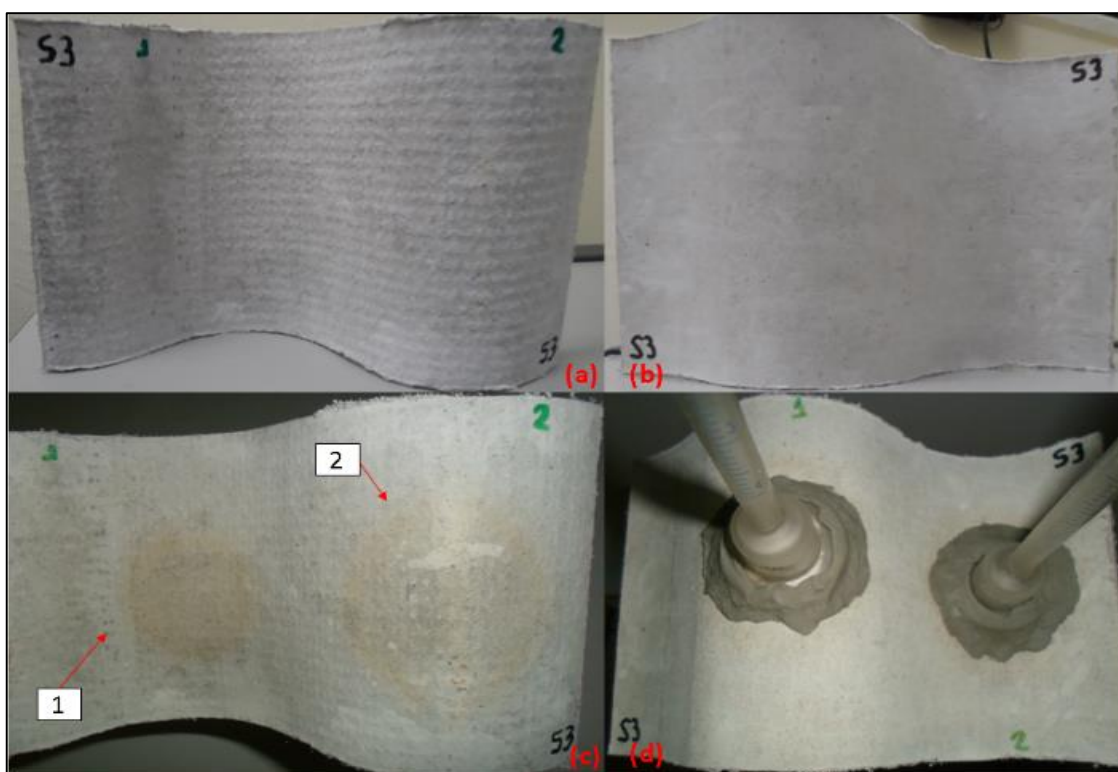


Figura 5.5 – Corpo de prova S3: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S3 apresentou manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada, nítida, na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.5c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior, nem na superfície côncava e/ou convexa, nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.6 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S4, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 216 horas (9 dias) como abordado na Tabela 5.2.

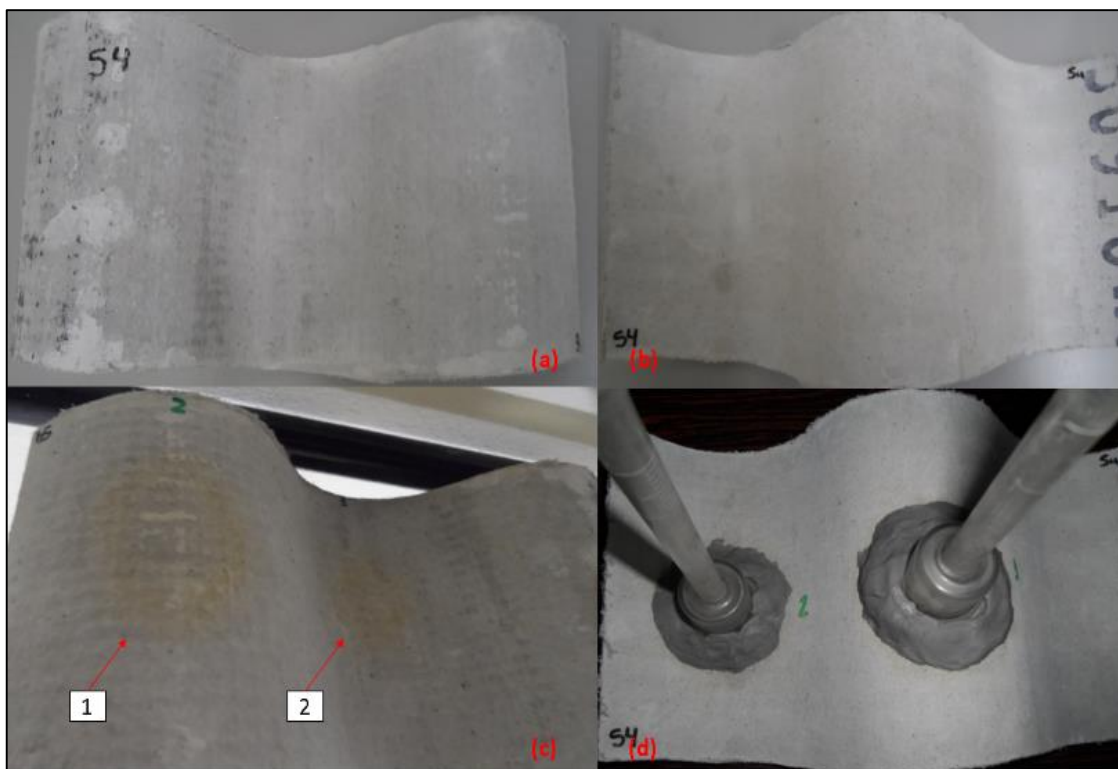


Figura 5.6 – Corpo de prova S4: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S4 apresentou manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.6c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior, nem nas superfícies côncava e/ou convexa, nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.7 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S5, cujo o tempo de absorção foi referente a 768 horas (32 dias), absorção mais lenta comparados aos tempos de absorção dos outros corpos de provas, como abordado na Tabela 5.2.

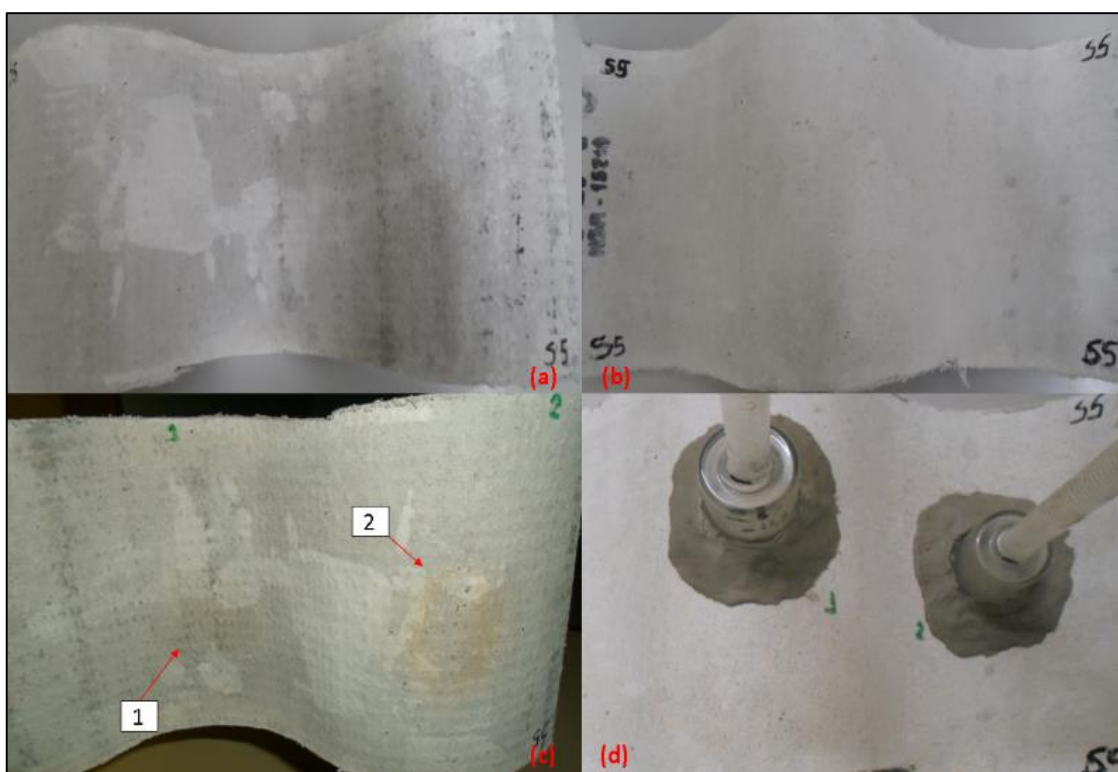


Figura 5.7 – Corpo de prova S5: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S5 apresentou poucas manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior na parte côncava e convexa (Figura 5.7c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.

A Figura 5.8 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S6, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 360 horas (15 dias) como abordado na Tabela 5.2.

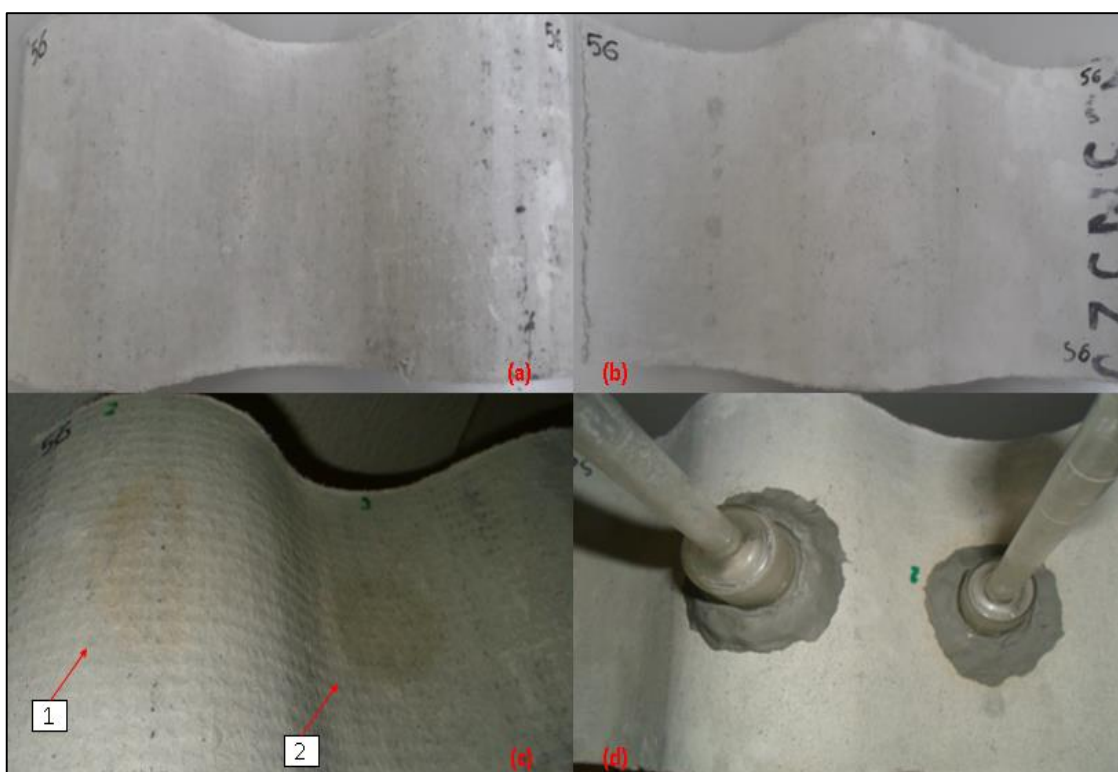


Figura 5.8 – Corpo de prova S6: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S6 apresentou manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.8c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.

A Figura 5.9 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S7, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 72 horas (3 dias) como abordado na Tabela 5.2.

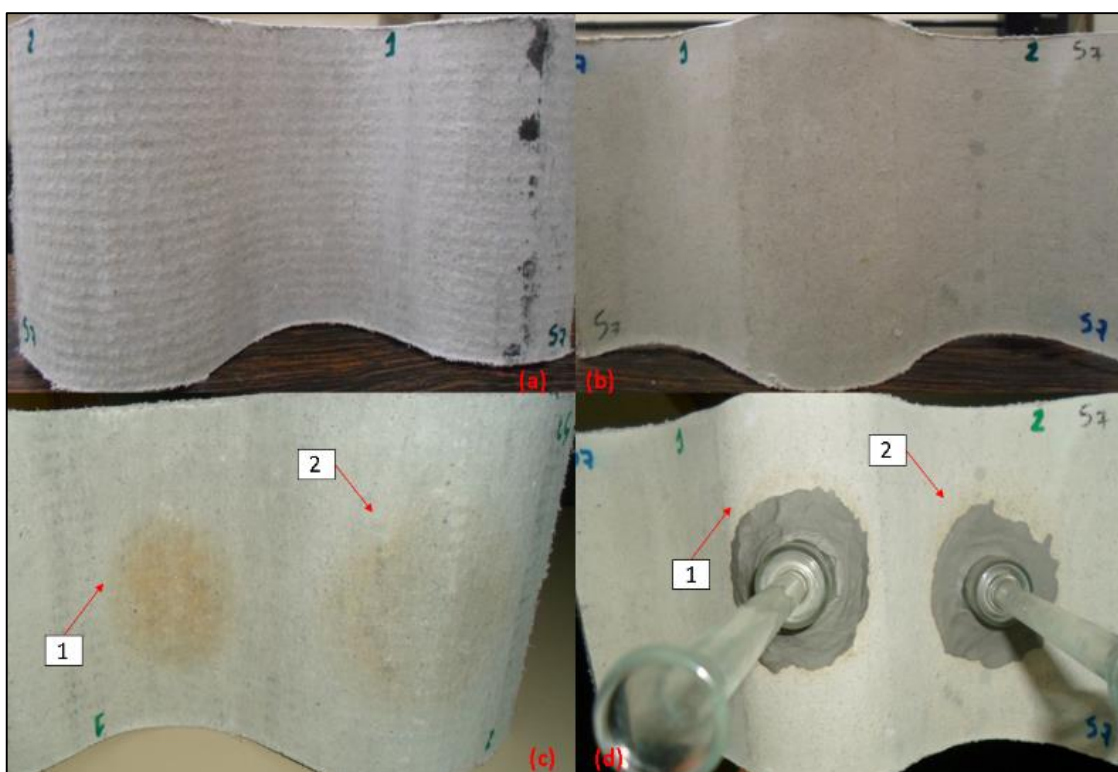


Figura 5.9 – Corpo de prova S7: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S7 apresentou manchas de umidade, com coloração amarelada, nítida, generalizada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.9c setas 1 e 2), e na face superior nas superfícies convexa e côncava (Figura 5.9d setas 1 e 2). Ressalta-se que manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, mas não indicou a formação de gota de água.

A Figura 5.10 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S8, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 96 horas (4 dias) como abordado na Tabela 5.2.

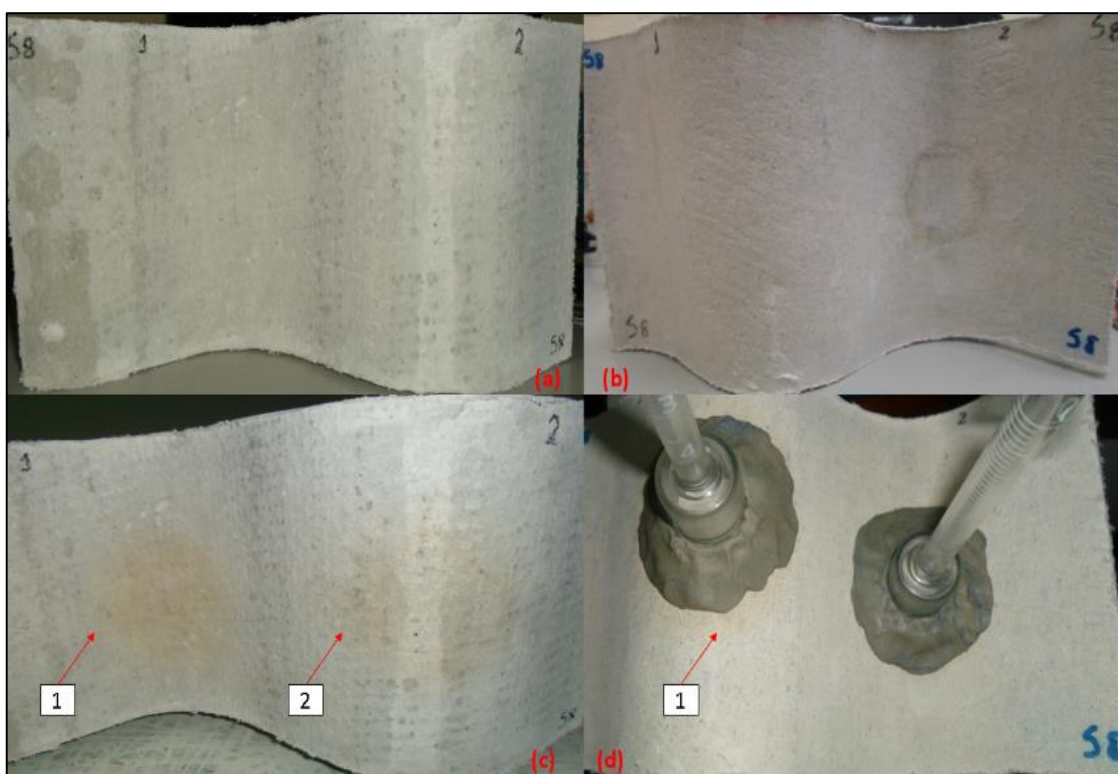


Figura 5.10 – Corpo de prova S8: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S8 apresentou manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.10c setas 1 e 2), e também evidenciada na face superior na superfície convexa (Figura 5.10d seta 1), porém manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, além disso não indicou a formação de gota de água.

A Figura 5.11 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S9, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 120 horas (5 dias) como abordado na Tabela 5.2.

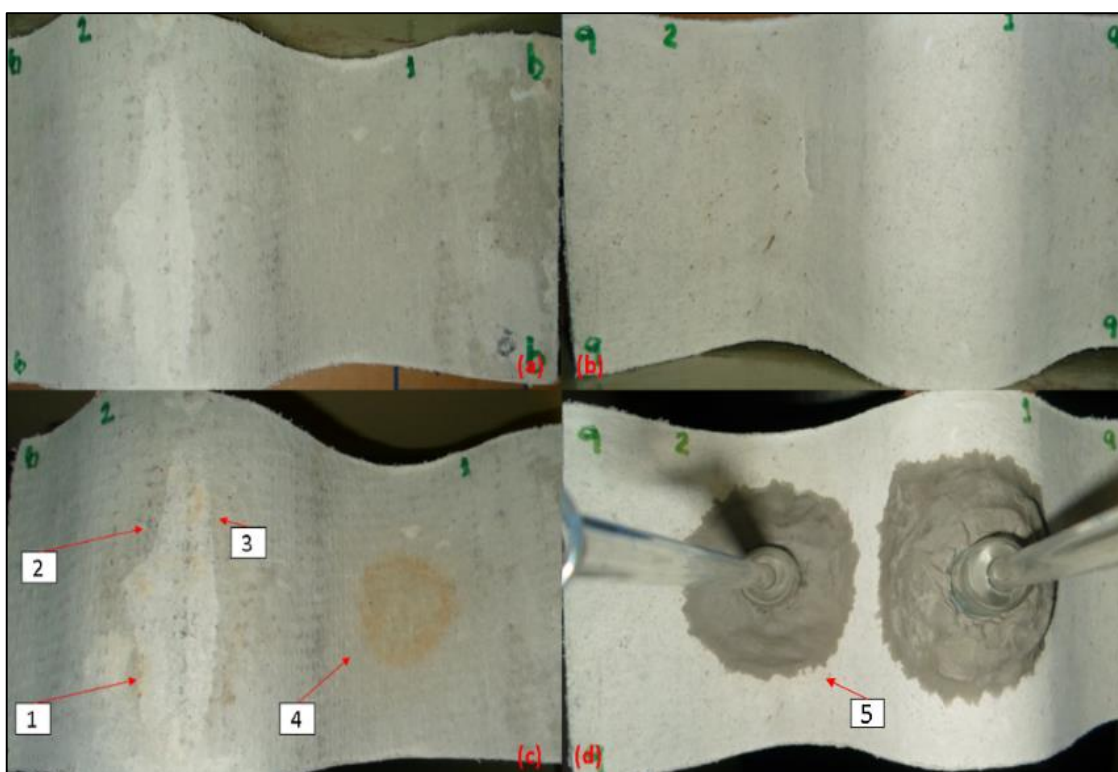


Figura 5.11 – Corpo de prova S9: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S9 apresentou manchas de umidade, com coloração amarelada na face inferior na superfície côncava (Figura 5.11c seta 4), bastante acentuada, e também na face inferior superfície convexa outras manchas de absorção Figura 5.11c setas 1, 2 e 3). Quanto à face superior, também apresentou manchas na superfície côncava (Figura 5.11d seta 5), porém manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, mas não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.12 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S10, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 96 horas (4 dias) como abordado na Tabela 5.2.

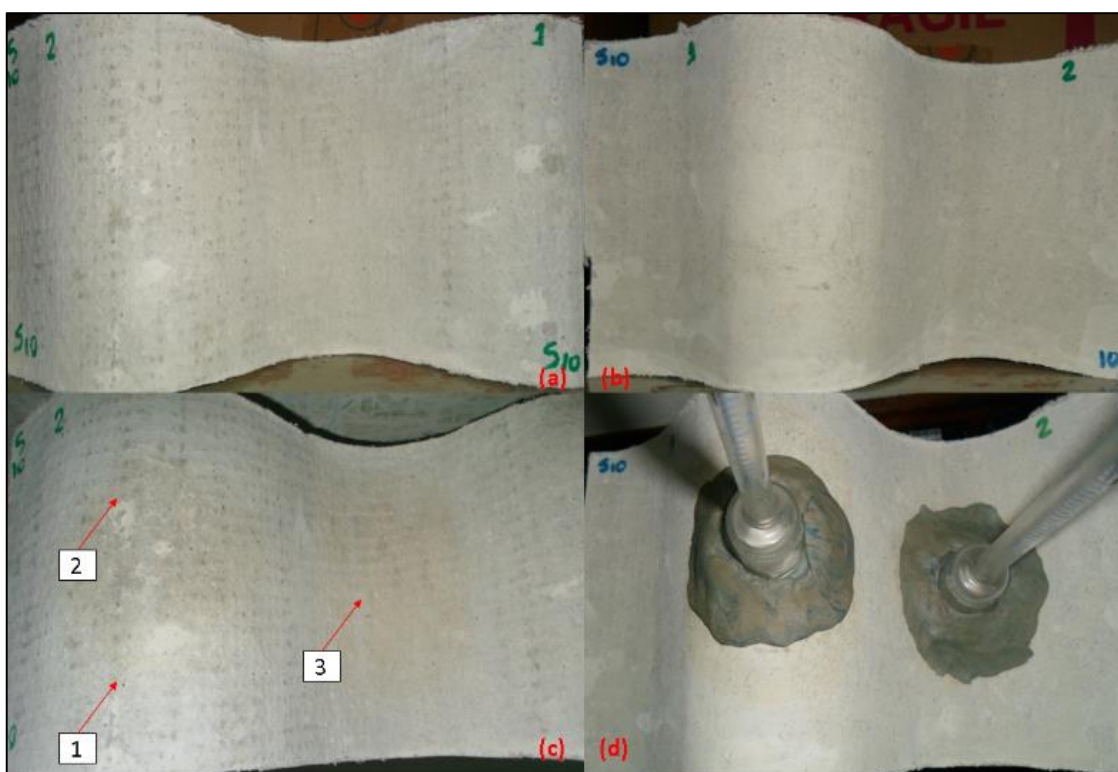


Figura 5.12 – Corpo de prova S10: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S10 apresentou manchas de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.12c setas 1, 2 e 3), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.

A Figura 5.13 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S11, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 120 horas (5 dias) como abordado na Tabela 5.2.

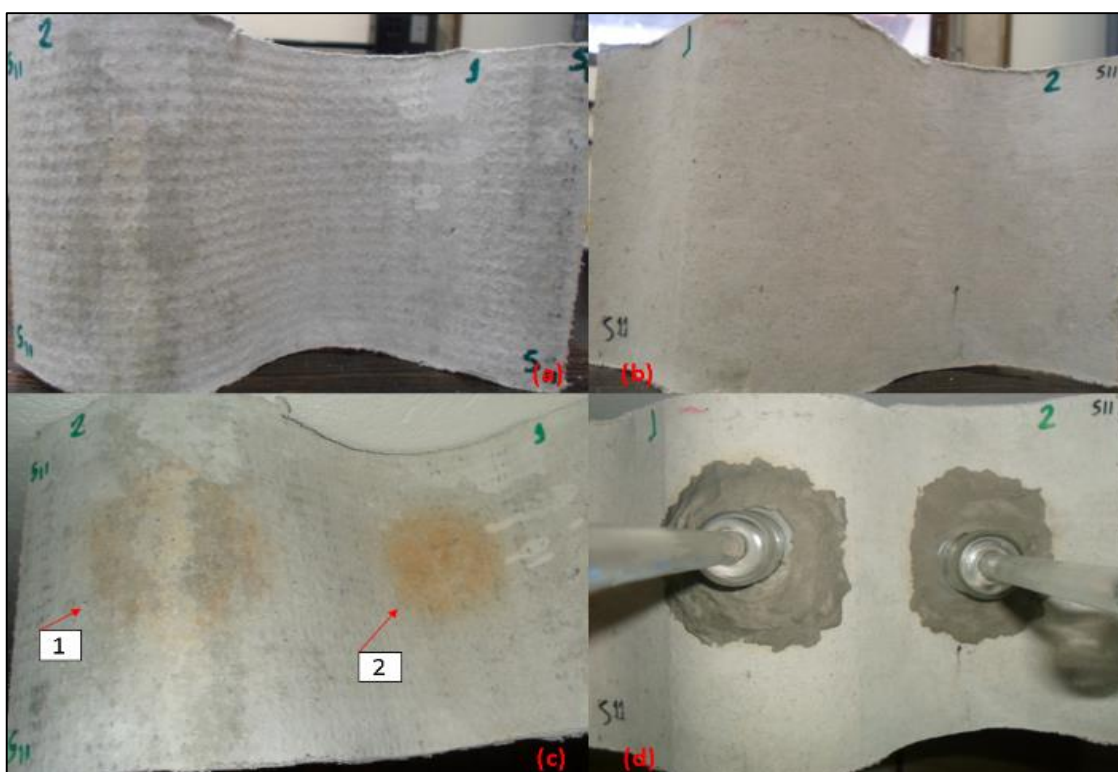


Figura 5.13 – Corpo de prova S11: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S11 apresentou manchas de umidade, com coloração pouco amarelada, nítida, na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.13c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior e também não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.14 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S12, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 120 horas (5 dias) como abordado na Tabela 5.2.

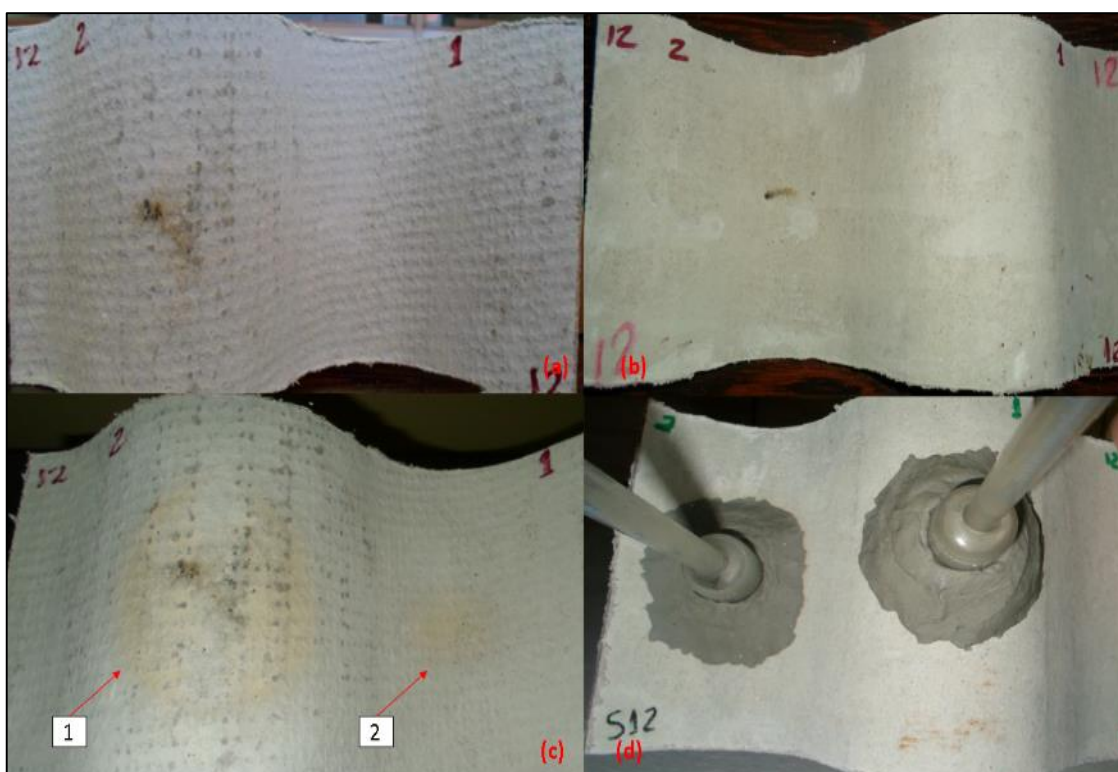


Figura 5.14 – Corpo de prova S12: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S12 apresentou manchas de umidade, com coloração pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.14c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior e também não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.15 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S13, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 360 horas (15 dias) como abordado na Tabela 5.2.

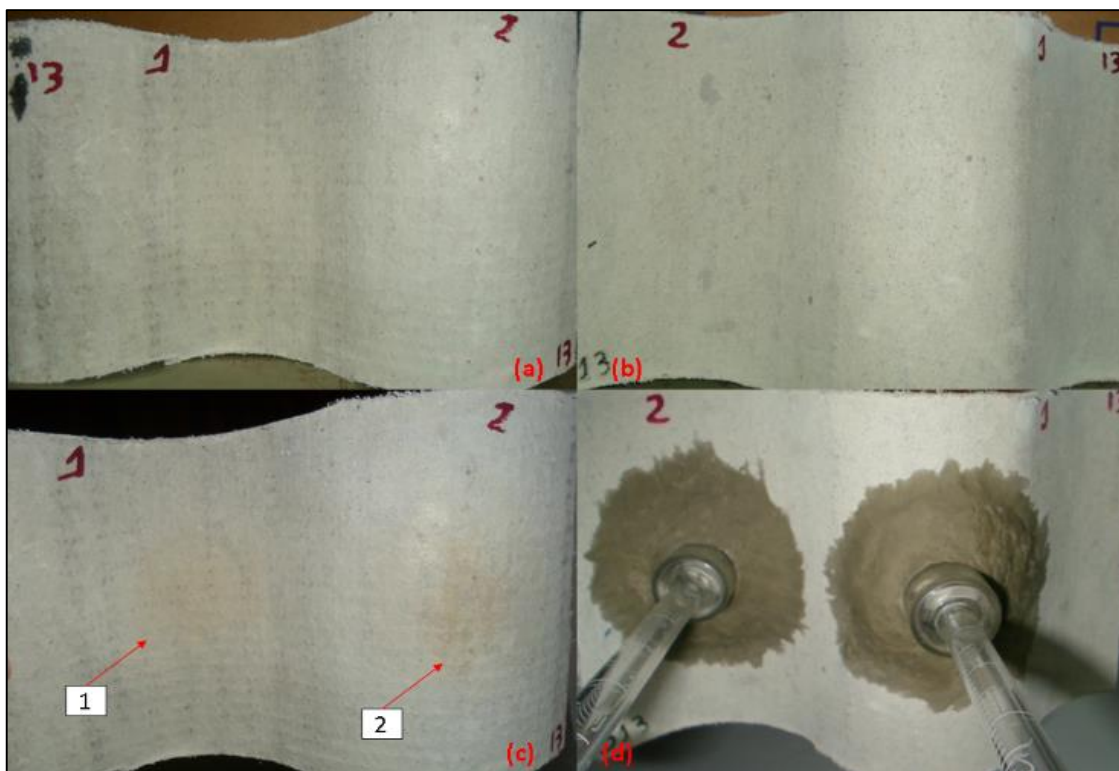


Figura 5.15 – Corpo de prova S13: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S13 apresentou pequenas manchas de umidade, com coloração pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.15c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.16 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S14, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 120 horas (5 dias) como abordado na Tabela 5.2.

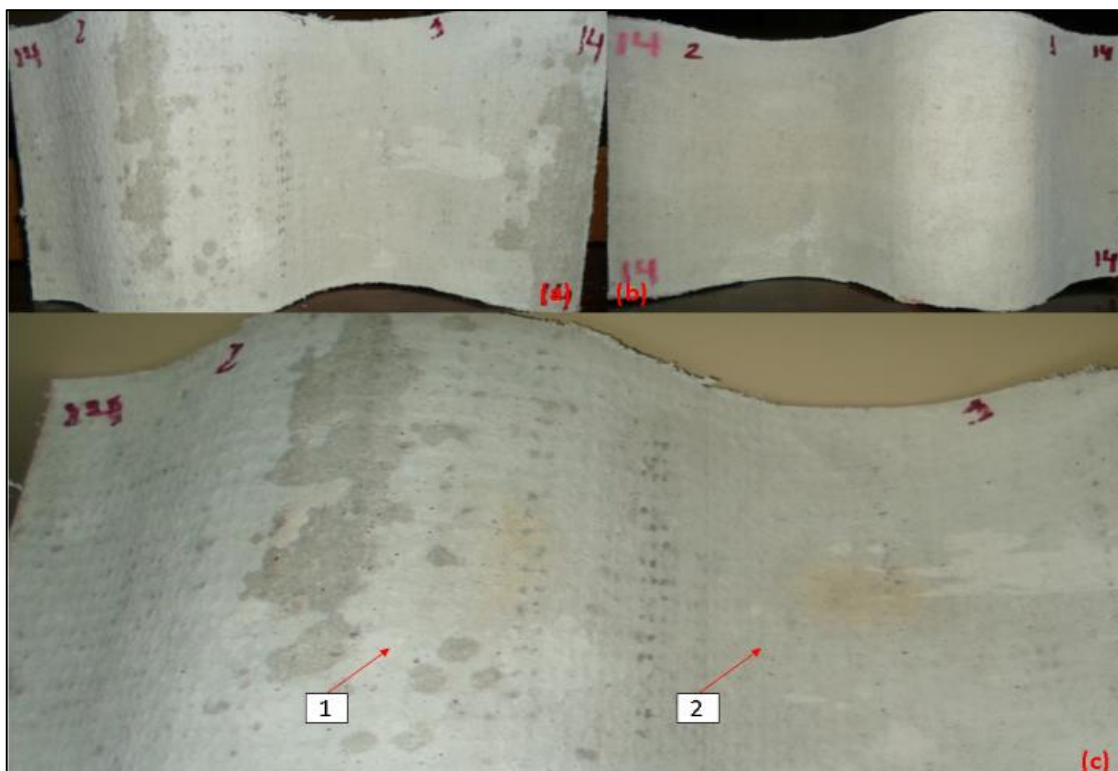


Figura 5.16 – Corpo de prova S14: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S14 apresentou pequenas mancha de umidade, com coloração pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.16c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior e nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.17 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S15, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 120 horas (5 dias) como abordado na Tabela 5.2.

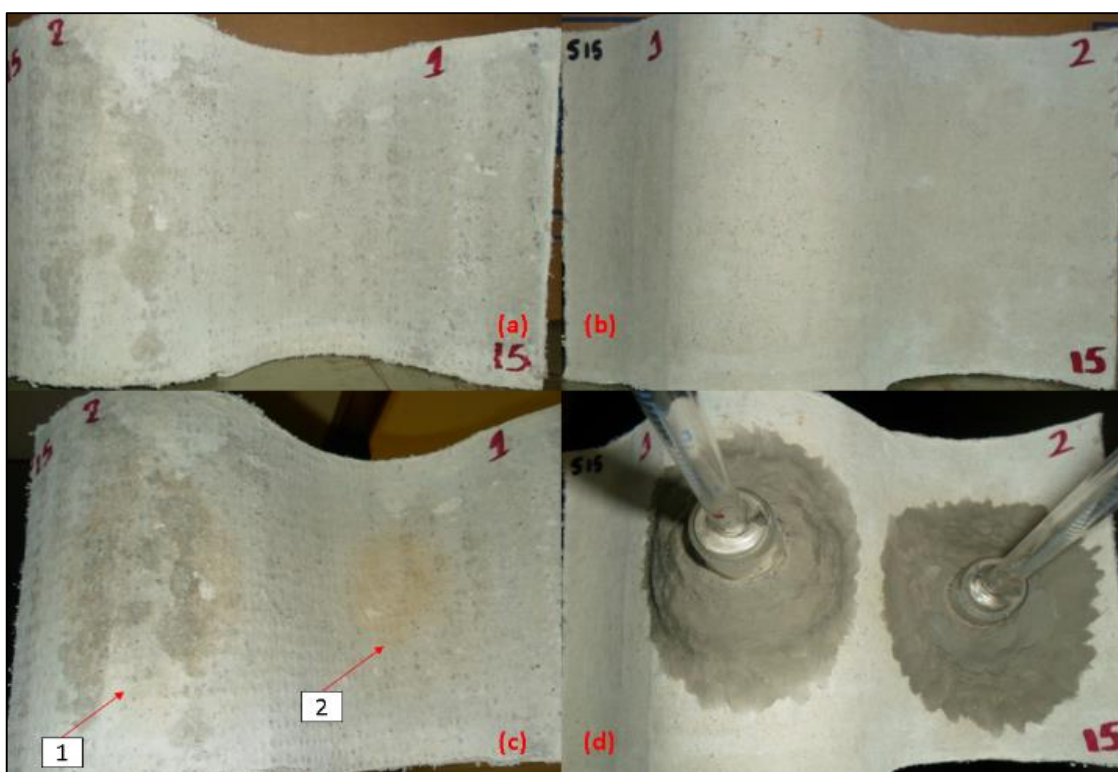


Figura 5.17 – Corpo de prova S15: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S15 apresentou manchas de umidade, com coloração pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.17c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.18 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S16, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 72 horas (3 dias) como abordado na Tabela 5.2.

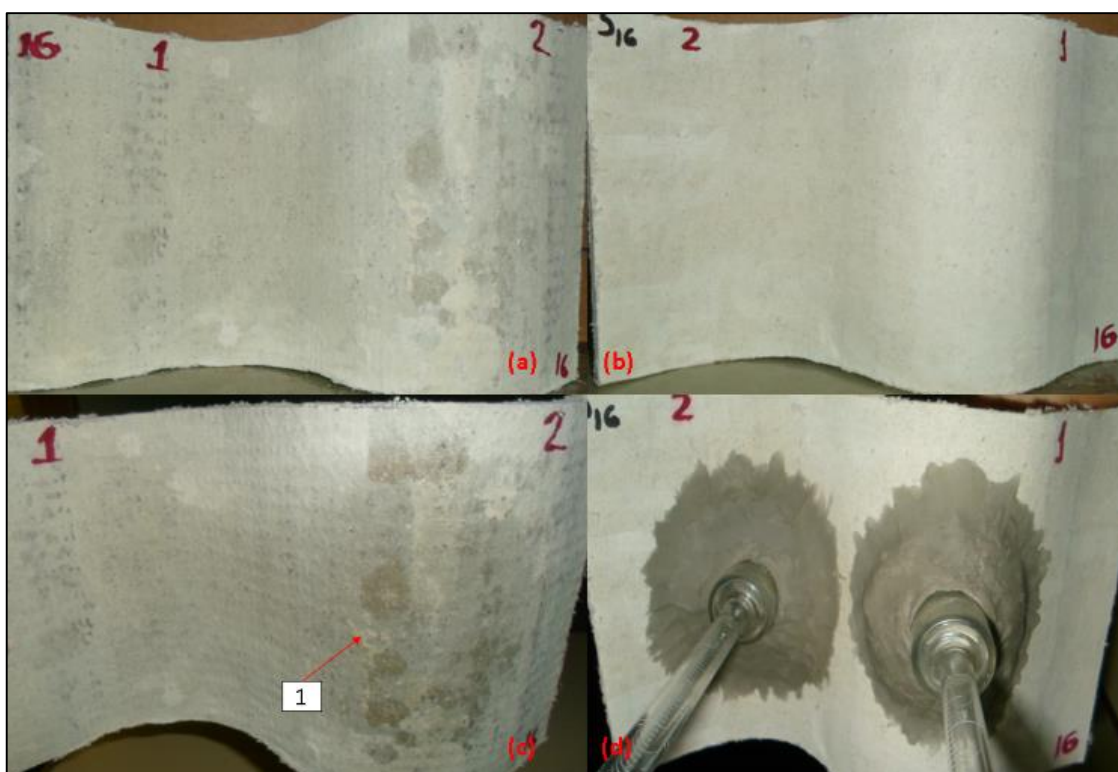


Figura 5.18 – Corpo de prova S16: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S16 apresentou mancha de umidade na face inferior na superfície côncava (Figura 5.18c seta 1), porém não foi evidenciado manchas na superfície convexa nem ocorrência de manchas na face superior ou a formação de gota de água.

A Figura 5.19 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S17, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 96 horas (4 dias) como abordado na Tabela 5.2.

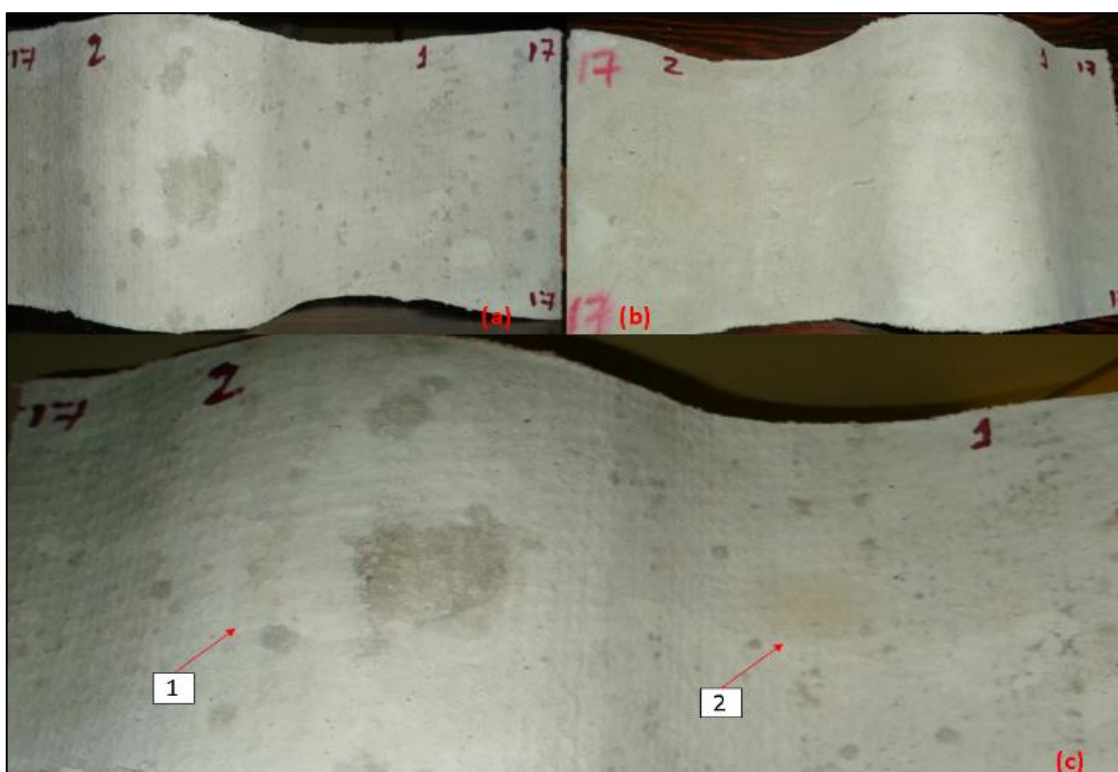


Figura 5.19 – Corpo de prova S17: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S17 apresentou mancha de umidade na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.19c setas 1 e 2), porém mais discretas comparativamente aos outros corpos de prova, não indicou manchas na face superior e nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.20 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S18, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 96 horas (4 dias) como abordado na Tabela 5.2.

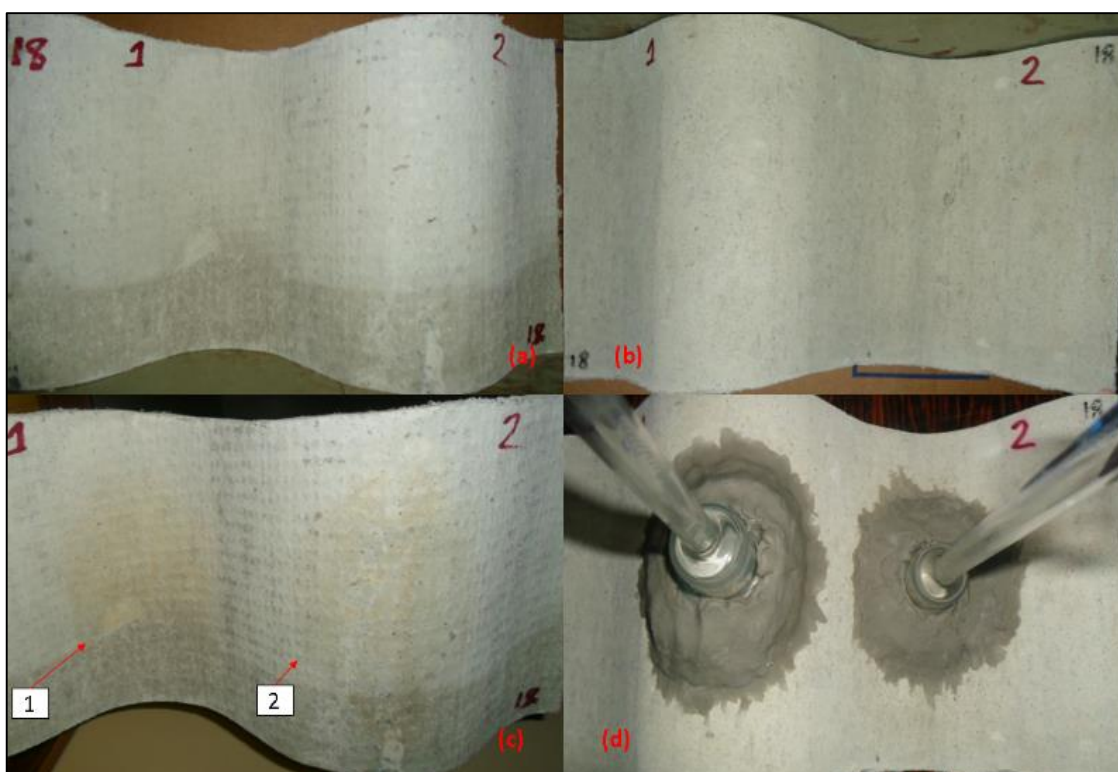


Figura 5.20 – Corpo de prova S18: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S18 apresentou mancha de umidade, com coloração um pouco amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.20c setas 1 e 2), porém não indicou manchas na face superior e nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.21 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S19, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 192 horas (8 dias) como abordado na Tabela 5.2.

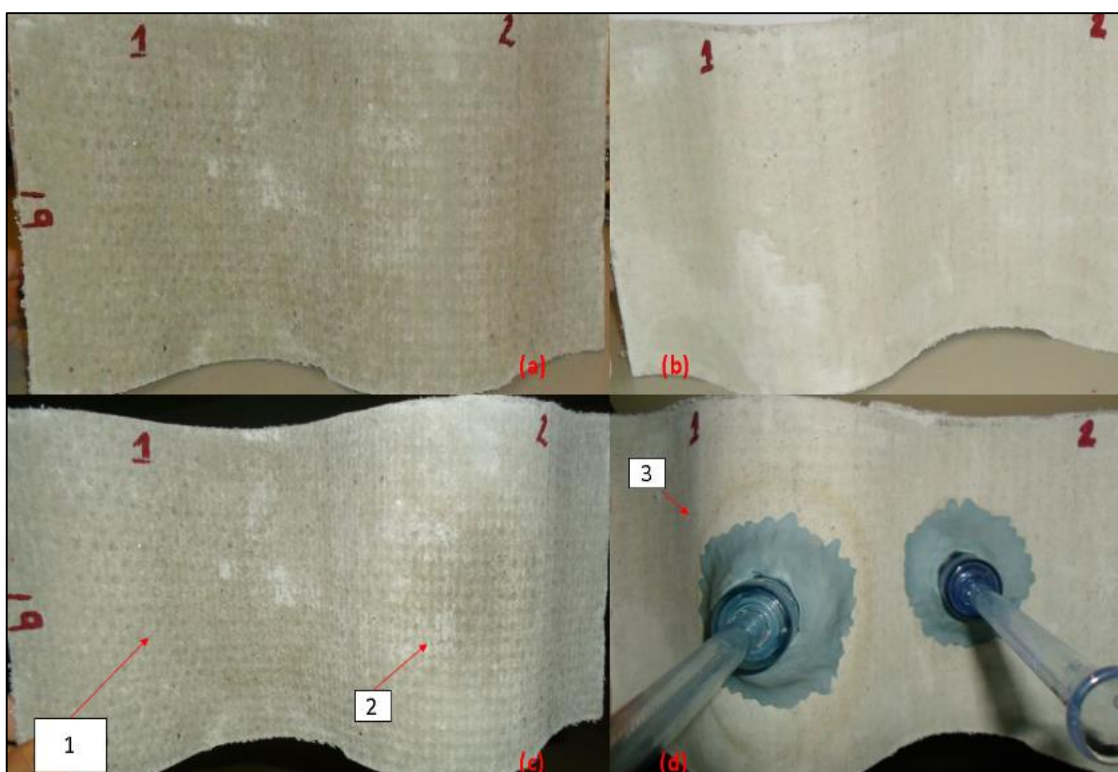


Figura 5.21 – Corpo de prova S19: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S19 apresentou mancha de umidade na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.21c setas 1 e 2). Apresentou também mancha de umidade de coloração amarela na face superior na superfície convexa (Figura 5.21d seta 3), lembrando que manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581. Além disso, foi evidente a formação de gota de água, o que também não é permitido de acordo com NBR7581.

A Figura 5.22 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S20, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 168 horas (7 dias) como abordado na Tabela 5.2.

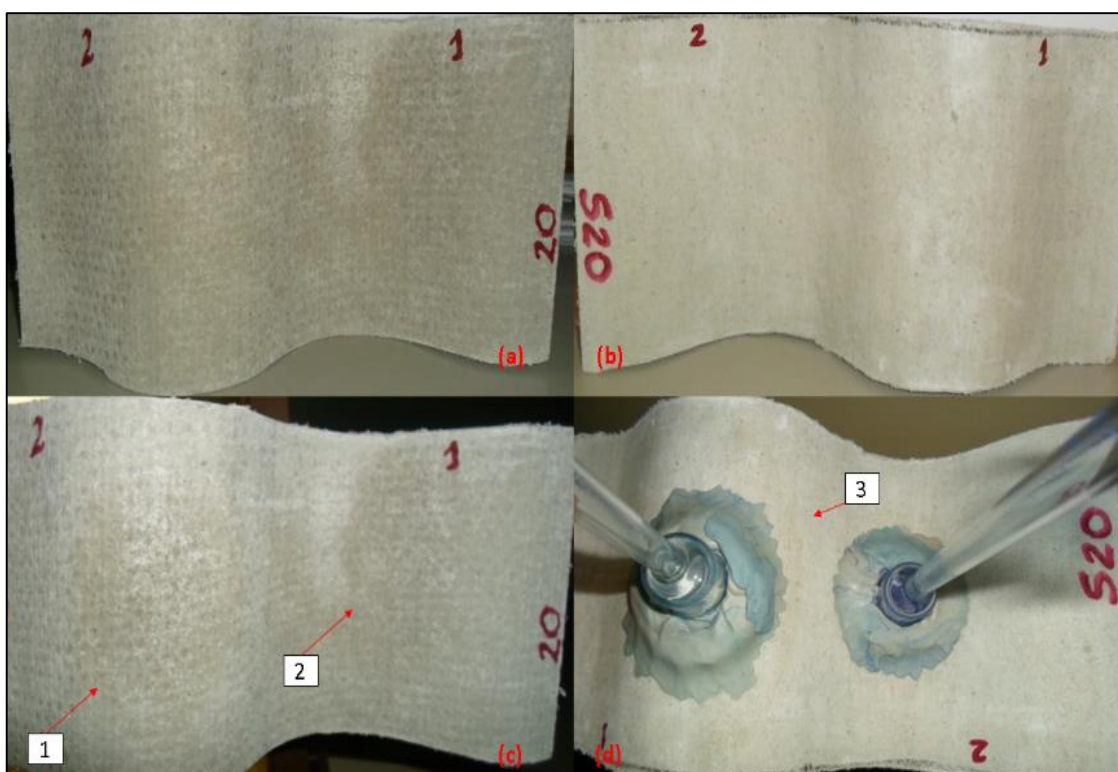


Figura 5.22 – Corpo de prova S20: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S20 apresentou mancha de umidade, de coloração levemente amarelada, na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.22c setas 1 e 2). Apresentou também mancha de umidade na face superior na superfície convexa (Figura 5.22d seta 3), e esses tipos de manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581. Esse corpo de prova S20 ainda apresentou a formação de gota de água, o que também não é permitido de acordo com NBR7581.

A Figura 5.23 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S21, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, e também foi visto que o tempo de absorção foi referente a 240 horas (10 dias) como abordado na Tabela 5.2.

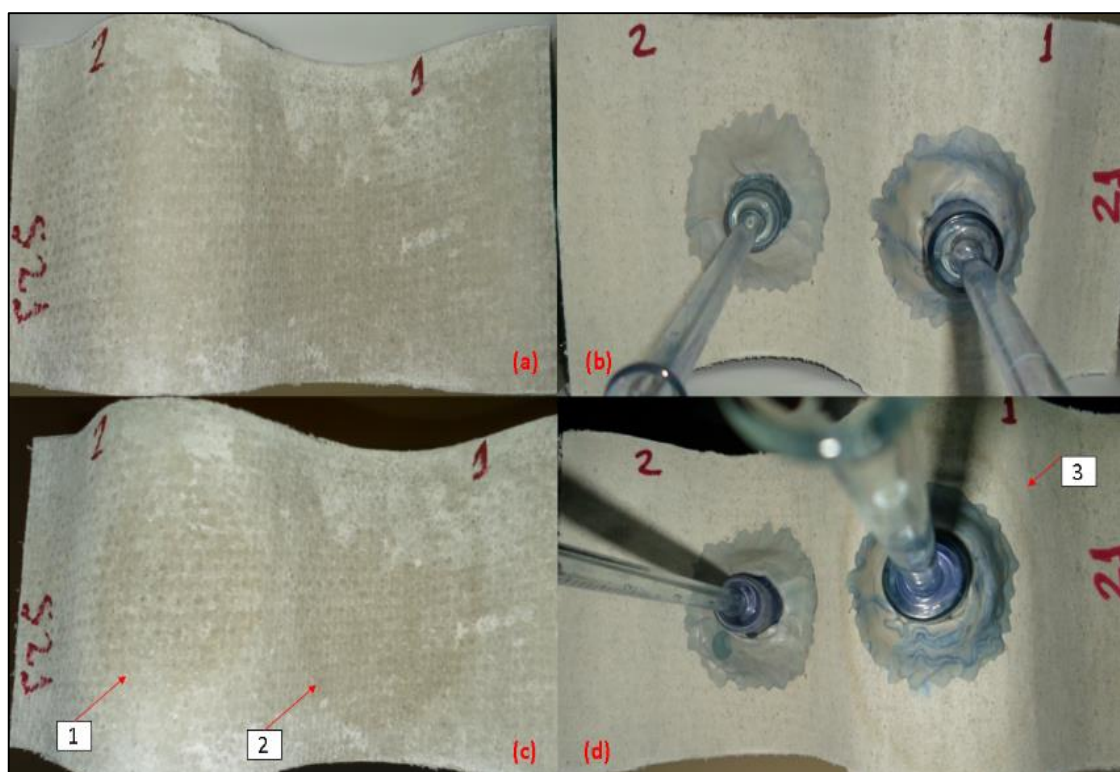


Figura 5.23 – Corpo de prova S21: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes da permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S21 apresentou mancha de umidade de coloração levemente amarelada na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.23c setas 1 e 2). Apresentou também mancha de umidade na face superior na superfície convexa (Figura 5.23d seta 3), que não são permitidas baseando na NBR7581, além disso indicou a formação de gota de água, o que também não é permitido de acordo com NBR7581.

5.2.2 Método Fotográfico: Absorção de Água Deionizada com Adição de Azul de Metileno

Como mencionado na metodologia, o ensaio de permeabilidade foi baseado na NBR5642, alterando o fato de que alguns corpos de provas de estudo necessitaram mais de 24 horas (tempo previsto na NBR 5642) para absorver os 25 ml, e lembrando que este ensaio não aborda observações a permeabilidade de água deionizada com adição de azul de metileno. No entanto, essa variação foi realizada com o intuito de melhor evidenciar as manchas após absorção.

A Figura 5.24 ilustra manchamentos tanto na face superior como na inferior do corpo de prova S0, que não recebeu nenhum tratamento específico como banho de imersão (telha *in natura*). E em alguns casos ocorreram o gotejamento.

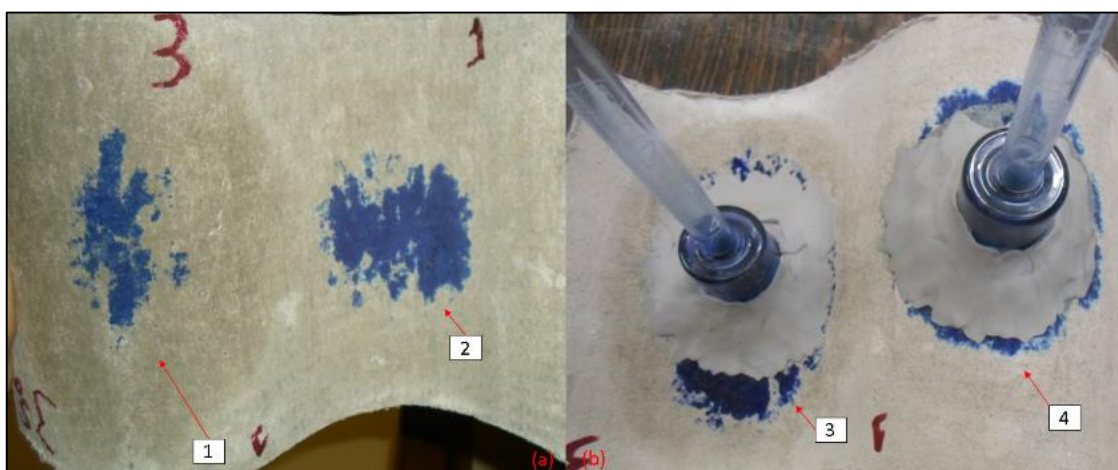


Figura 5.24 – Corpo de prova S0: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

O corpo de prova S0, sem banho em solução com hidrofugantes, apresentou manchas relativamente grandes na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.24a setas 1 e 2), e também na superior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.24b setas 3 e 4). Lembra-se que manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, além disso no decorrer dessa etapa de permeabilidade foi observado a formação de gota de água, ou

seja, a passagem de água de superfície superior a inferior, o que também não é permitido segundo a NBR7581.

A Figura 5.25 ilustra etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S1, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.



Figura 5.25 – Corpo de prova S1: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova S1 apresentou pequenas manchas discretas na face inferior na superfície convexa (Figura 5.25a seta 1), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.

A Figura 5.26 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S2, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S2 apresentou manchas na face inferior na superfície convexa (Figura 5.26a seta 1), indicou manchas na face superior na parte côncava (Figura 5.26b seta 2); manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581. Não houve a formação de gota de água.

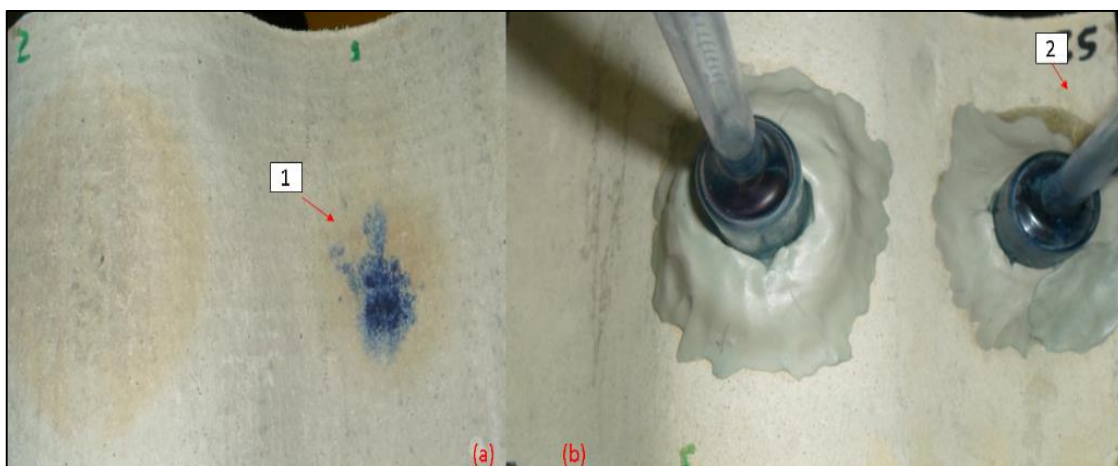


Figura 5.26 – Corpo de prova S2: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.27 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S3, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S3 apresentou pequenas manchas na face inferior na superfície convexa (Figura 5.27a seta 1), porém não indicou manchas na face superior e não houve a formação de gota de água.

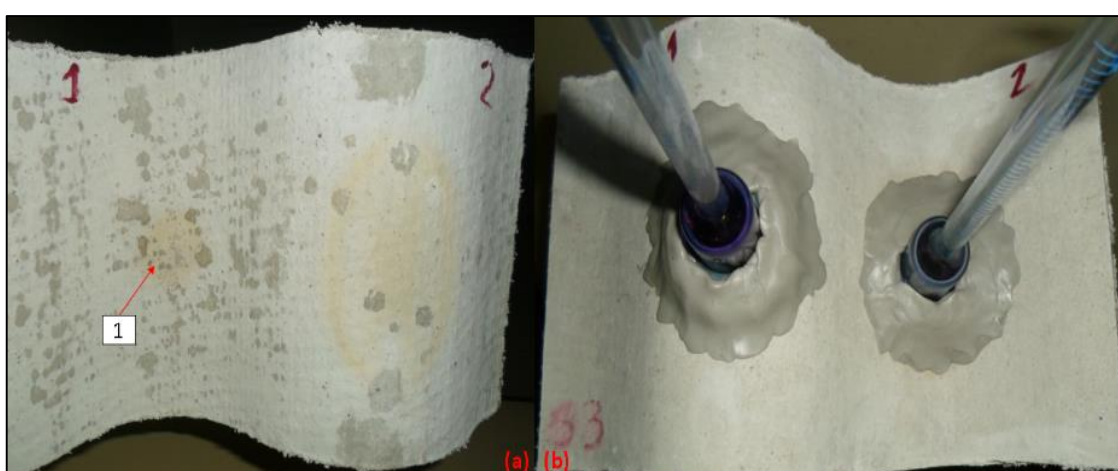


Figura 5.27 – Corpo de prova S3: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.28 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S4, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3. Este corpo de prova S4 apresentou manchas na face inferior na superfície convexa (Figura 5.28a seta 1), porém não houveram manchas na face superior nem tampouco a formação de gota de água.

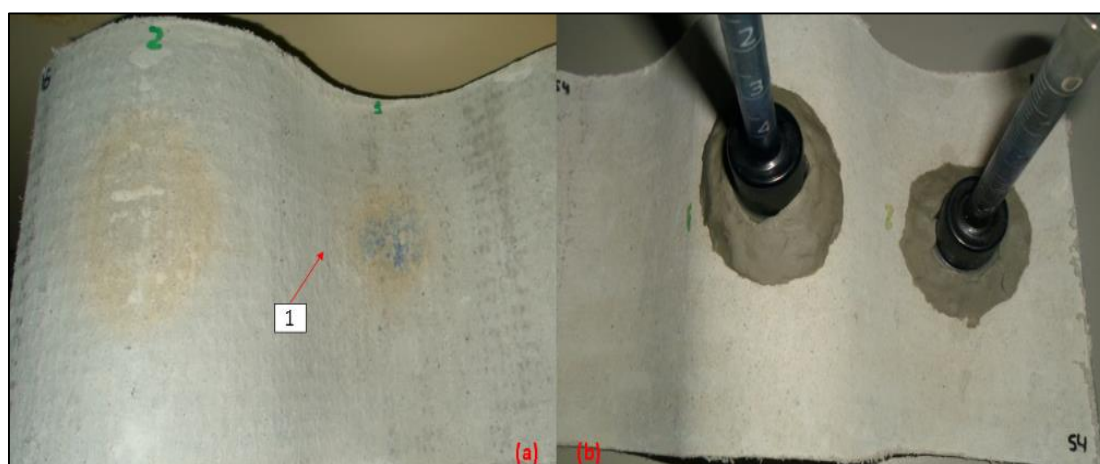


Figura 5.28 – Corpo de prova S4: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.29 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S5, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3. Este corpo de prova não apresentou manchas na face inferior, nem na face superior e não houve a formação de gota de água.

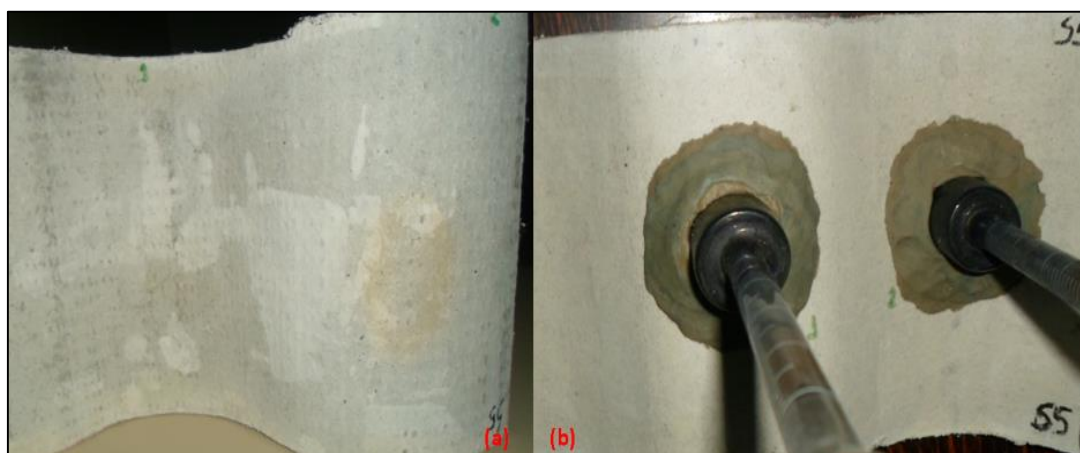


Figura 5.29 – Corpo de prova S5: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.30 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S6, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3. Este corpo de prova não apresentou manchas na face inferior, na face superior e nem a formação de gota de água.



Figura 5.30 – Corpo de prova S6: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.31 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S7, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3. Este corpo de prova apresentou manchas na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.31a setas 1, 2 e 3). Não houveram manchas na face superior e nem a formação de gota de água.

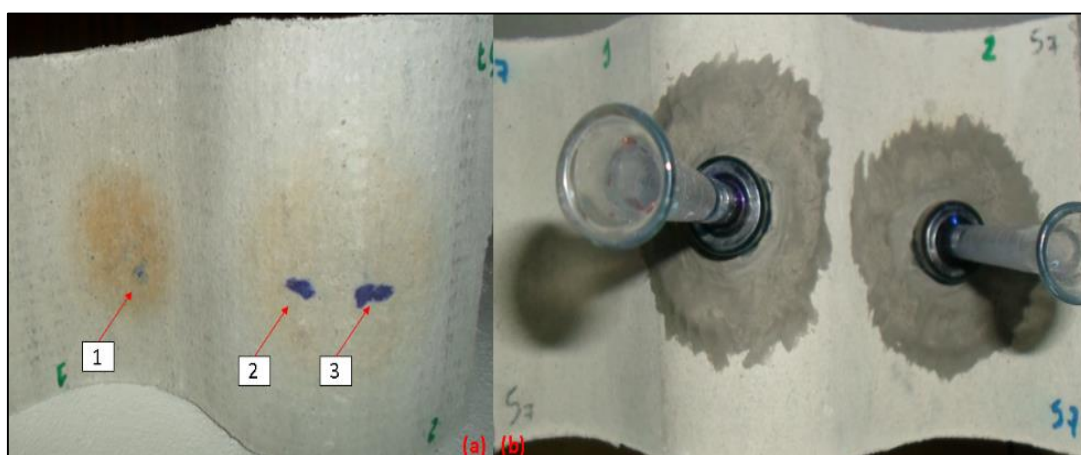


Figura 5.31 – Corpo de prova S7: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.32 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S8, qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, este corpo de prova apresentou na face inferior na superfície convexa (Figura 5.32a setas 1, 2 e 3), não houve indicação da formação de mancha na face superior e nem a formação de gota de água.

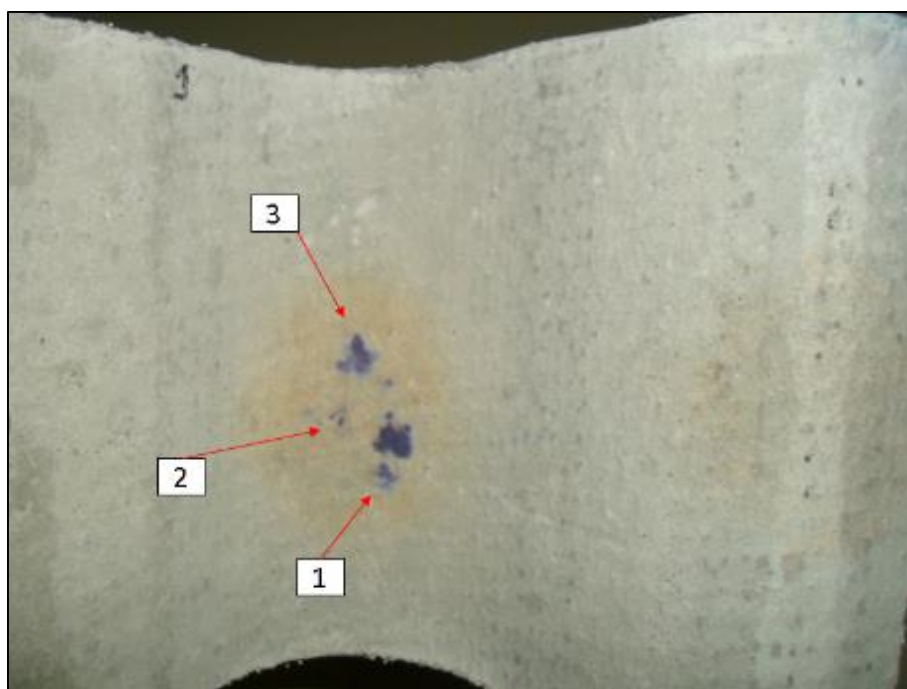


Figura 5.32 – Corpo de prova S8: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.33 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S9, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3. Este corpo de prova apresentou manchas na face inferior na superfície côncava (Figura 5.33 seta 1), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.

A Figura 5.34 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S10, qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3. Este corpo de prova apresentou pequenas manchas na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.34 setas 1, 2 e 3). Não houveram manchas na face superior nem a formação de gota de água

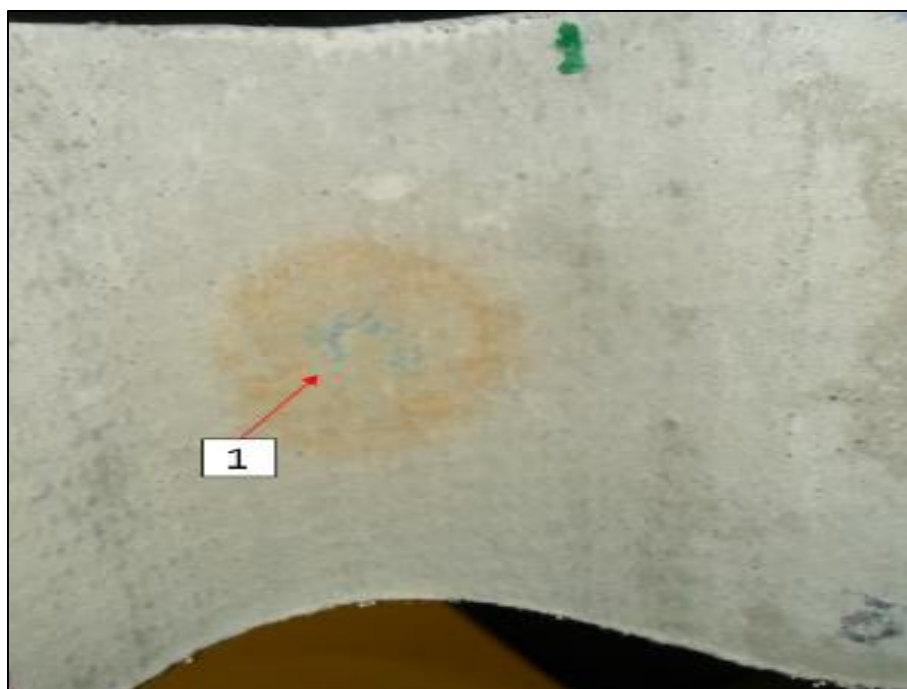


Figura 5.33 – Corpo de prova S9: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

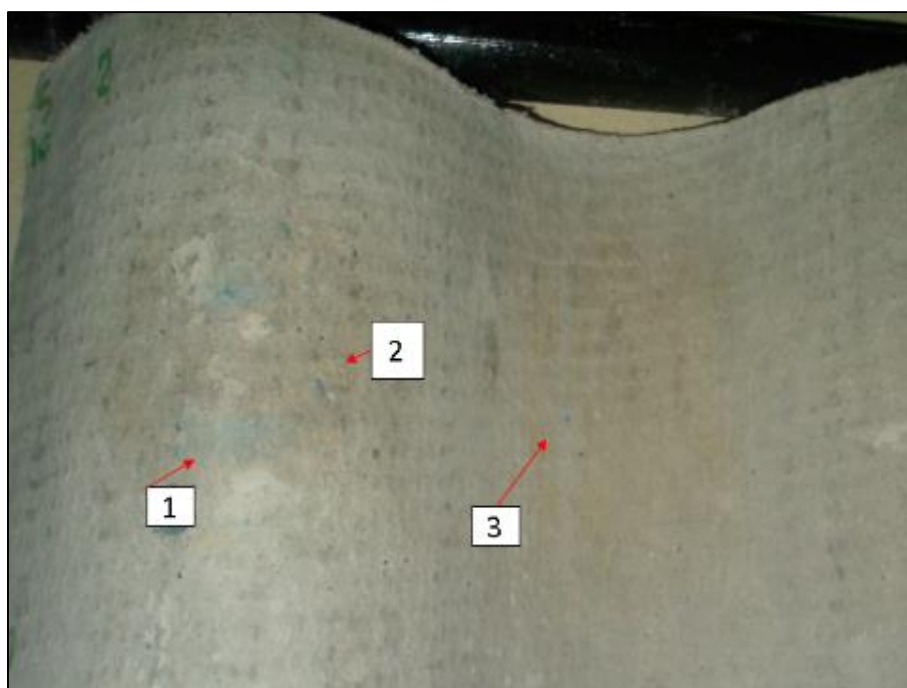


Figura 5.34 – Corpo de prova S10: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.35 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S11, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S11 apresentou manchas na face inferior na superfície convexa (Figura 5.35 seta 1), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.

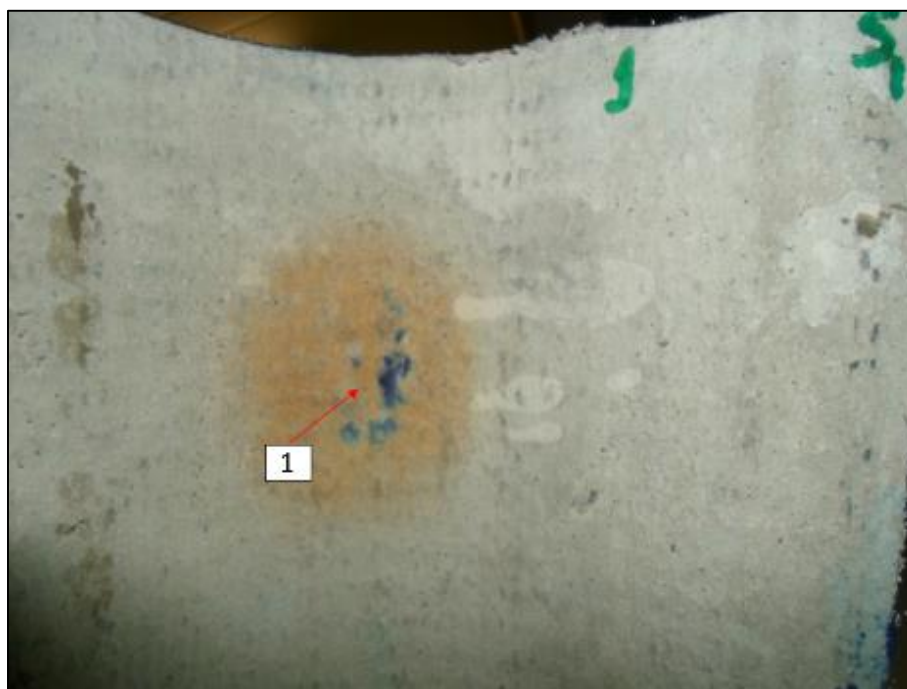


Figura 5.35 – Corpo de prova S11: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.36 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S12, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S12 apresentou pequenas manchas na face inferior na superfície côncava (Figura 5.36 seta 1), porém não indicou manchas na face superior ou a formação de gota de água.



Figura 5.36 – Corpo de prova S12: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.37 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S13, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S13 não apresentou manchas na face inferior, nem superior e não indicou a formação de gota de água.



Figura 5.37 – Corpo de prova S13: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.38 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S14, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S14 não apresentou manchas na face inferior, nem superior e não indicou a formação de gota de água.

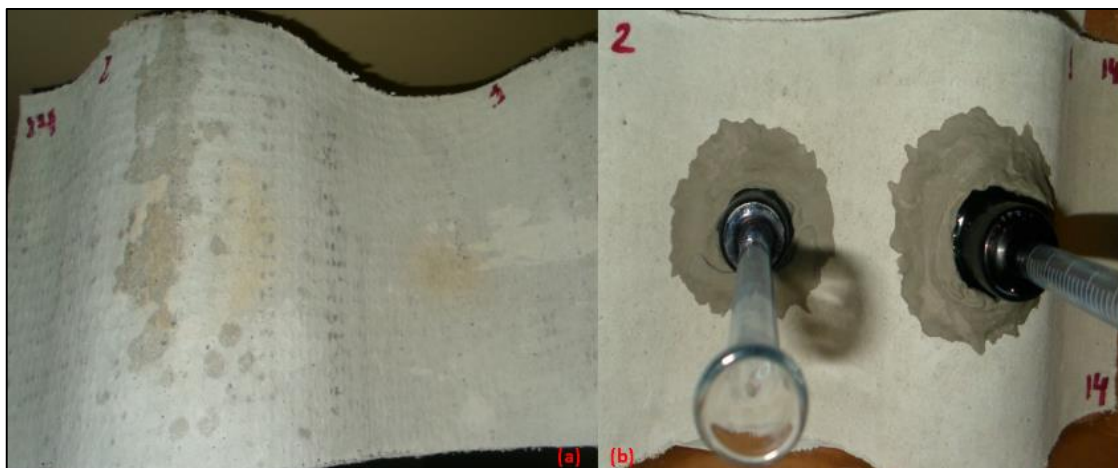


Figura 5.38 – Corpo de prova S14: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.39 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S15, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S15 apresentou manchas na face inferior na superfície convexa (Figura 5.39 seta 1), porém não indicou manchas na face superior e não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.40 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S16, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S16 apresentou mancha na face inferior na superfície convexa (Figura 5.40 seta 1), porém não indicou manchas na face superior e não houve a formação de gota de água.

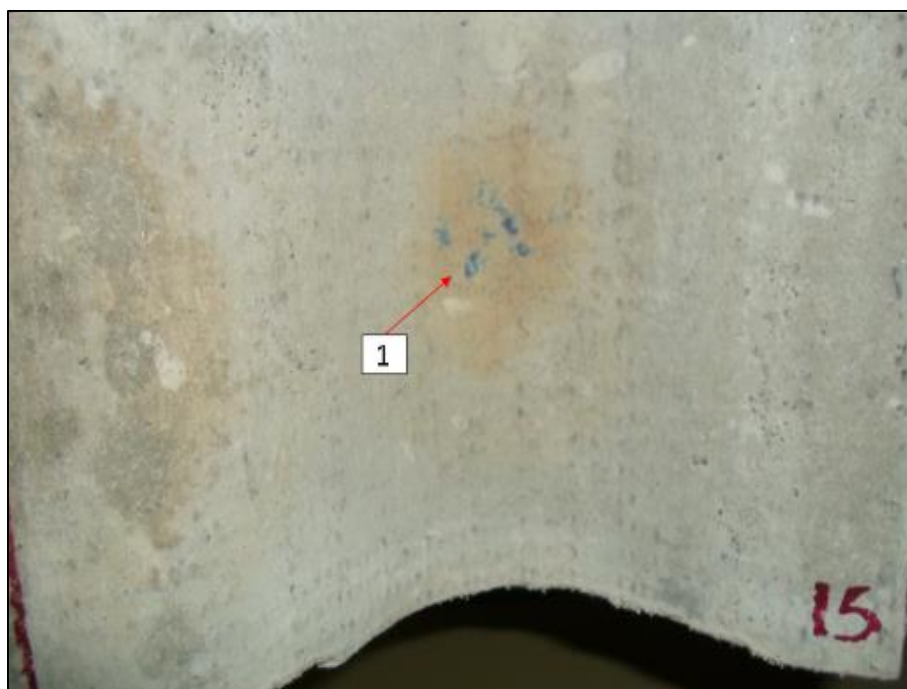


Figura 5.39 – Corpo de prova S15: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

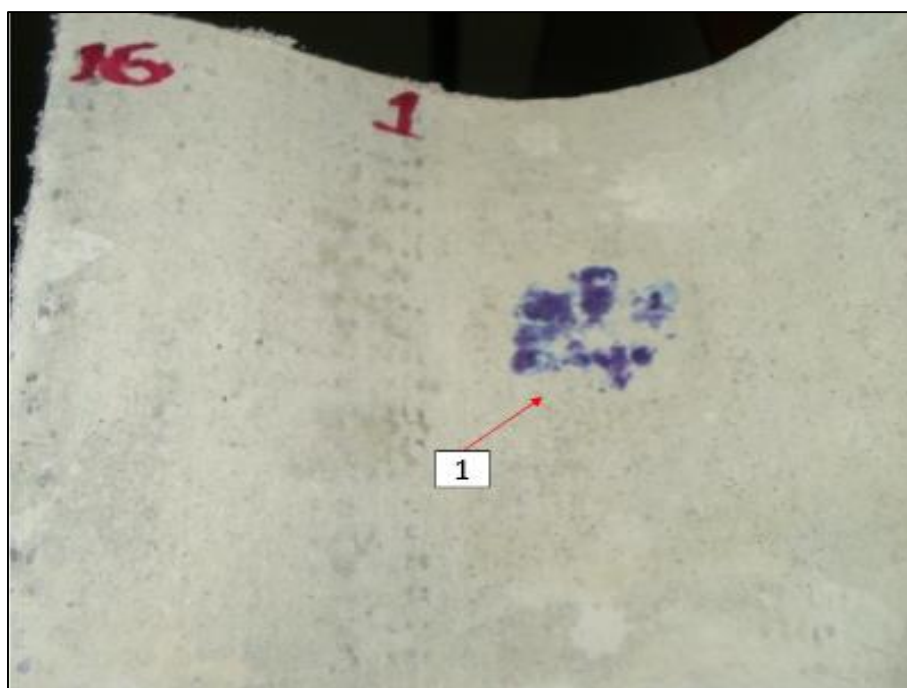


Figura 5.40 – Corpo de prova S16: face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.41 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S17, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S17 não apresentou mancha na face inferior, nem face superior e também não indicou a formação de gota de água.

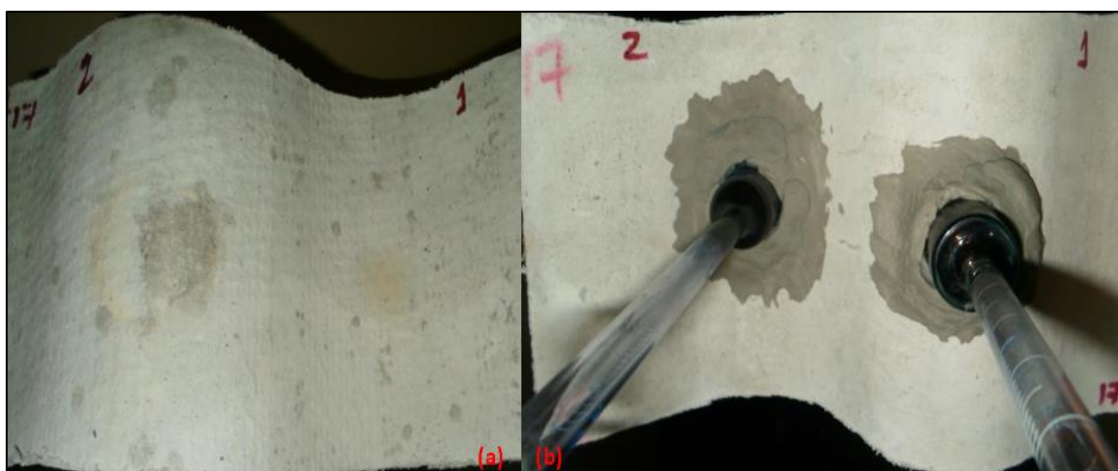


Figura 5.41 – Corpo de prova S17: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.42 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S18, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S18 apresentou mancha na face inferior na superfície convexa (Figura 5.42 seta 1), porém não indicou manchas na face superior nem houve a formação de gota de água.

A Figura 5.43 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S19, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S19 apresentou pequena mancha na face inferior na superfície côncava (Figura 5.43a seta 1), mancha na face superior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.43b setas 2 e 3). Ressalta-se novamente que manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581. Além disso, houve a formação de gota de água, o que também não é permitido de acordo com NBR7581.

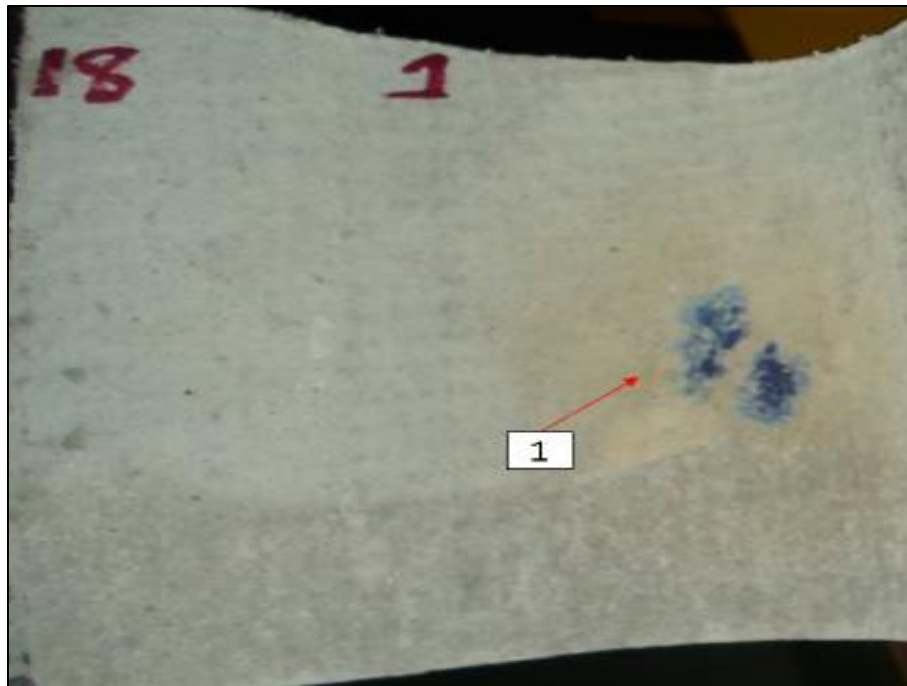


Figura 5.42 – Corpo de prova S18 face inferior, superfície convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

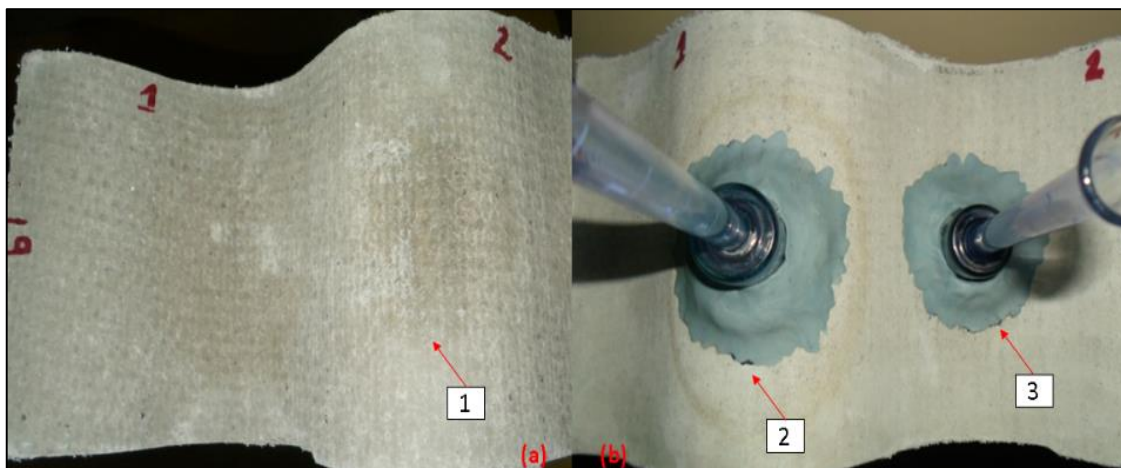


Figura 5.43 – Corpo de prova S19: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.44 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S20, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S20 apresentou mancha na face inferior na superfície convexa (Figura 5.44a seta 1), mancha na face superior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.44b setas 2 e 3). Essas manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581. Neste caso, também houve a formação de gota de água, o que não é permitido de acordo com NBR7581.

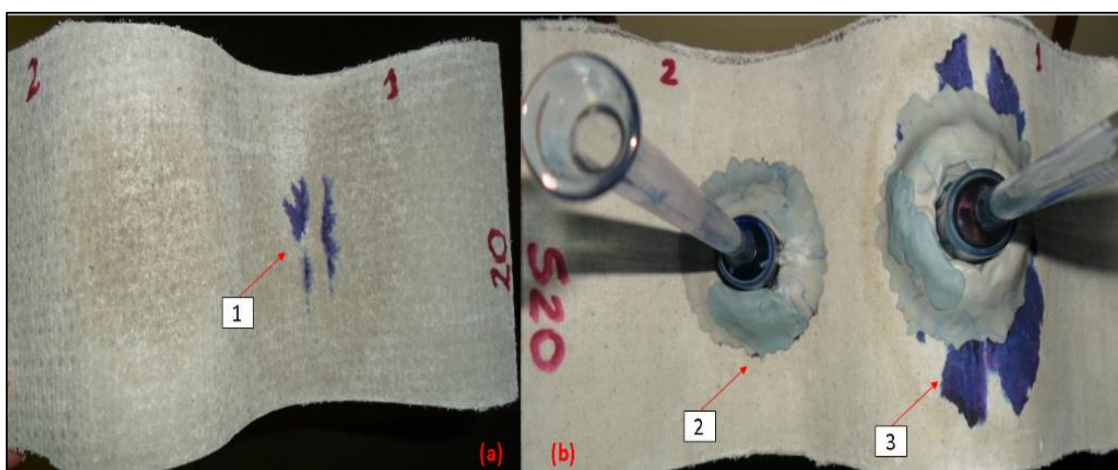


Figura 5.44 – Corpo de prova S20: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.45 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S21, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

Este corpo de prova S21 apresentou pequena mancha, discreta, na face inferior na superfície côncava (Figura 5.45a seta 1). Também apresentou mancha na face superior na superfície convexa (Figura 5.45b seta 2) além da formação de gotas. Essas manchas na superfície superior e a formação de gotas (gotejamento) não são aceitas na normalização NBR7581.

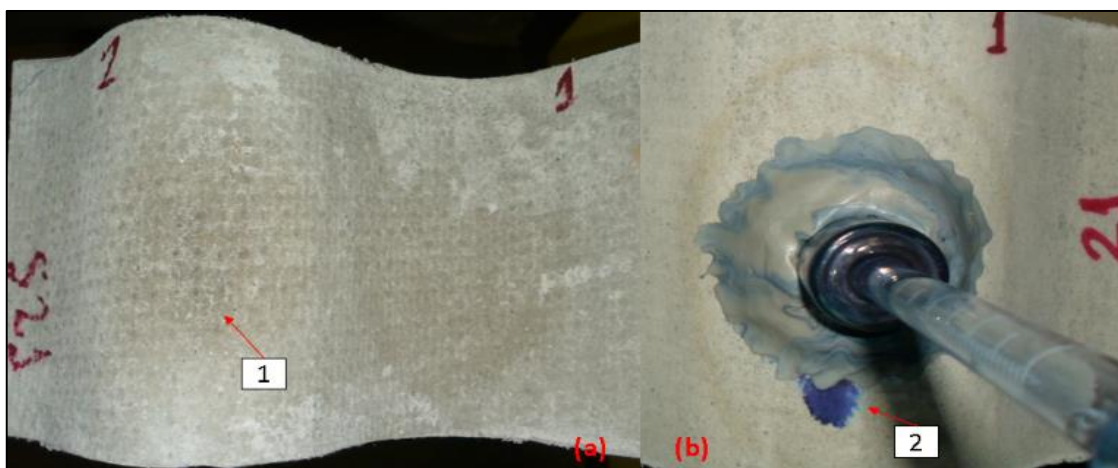


Figura 5.45 – Corpo de prova S21: (a, b) sequencialmente face inferior e superior após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Diante desses resultados de permeabilidade, ainda que qualitativos, aproximadamente 82% dos corpos de prova desta etapa de análise a permeabilidade (equivalente a 18 amostras) absorveram a água deionizada em menor ou igual a 10 dias de ensaio. Além disso pode-se observar que dentre esta porcentagem, 55% (equivalendo 12 amostras) apresentaram manchas de apenas na face inferior, variando coloração entre elas, como mancha de umidade, mancha amarelada ou mancha pouca amarelada.

Em alguns casos ocorreu o gotejamento e 27% (equivalente 6 amostras) apresentaram mancha na face inferior e mancha de marcação de umidade na face superior na parte convexa do corpo de prova. Apenas 18% (equivalendo 4 amostras) dos corpos de provas analisados nesta etapa de permeabilidade absorveram a água deionizada em um período superior a 10 dias de ensaio, e dentre isso, foi observado que esses 18% dos corpos de prova apresentaram manchas na face inferior com coloração pouco amarelada e não apresentaram mancha na face superior ou gotejamento.

Assim, foi visto que corpos de provas que tiveram maior tempo em absorção a água deionizada, no ensaio de permeabilidade, apresentaram poucas manchas de absorção na face inferior com coloração pouco amarelada. Em relação à face superior não apresentam qualquer marcação de absorção e por fim não apresentaram a formação de gota de água, ou seja, menos susceptíveis ao gotejamento.

Na etapa de permeabilidade a absorção à água deionizada com adição de azul de metileno, foi visto que o pior caso foi do corpo de prova S0, aquele que não recebeu o ensaio de banho de imersão, o mesmo apresentou gotejamento o que não é permitido de acordo com a NBR7581, e apresentou as maiores manchas com coloração azul na face inferior e superior, comparado ao restante dos corpos de provas. Vale ressaltar, que esse resultado corrobora com o resultado obtido no ensaio com água deionizada sem azul de metileno, pois esse componente só teve a função de realçar as manchas, evidenciando melhor o perfil do manchamento.

Diante disso, estes fatos podem apresentar a possibilidade que a etapa de banhos de imersão com algumas soluções de hidrofugantes tenha favorecido o atraso à absorção de água, minimizando a absorção, e por consequência menor manchamento nas faces superior e inferior, e menor possibilidade da ocorrência de gotejamento.

5.3 Caracterização

A caracterização se concluiu por meio de algumas etapas: a primeira consiste em três tipos de ensaios: ensaio de absorção de água, porosidade aparente pelo método de imersão em água baseado no Princípio de Arquimedes, segundo as equações 4.1 e 4.2 e ensaio de resistência mecânica à flexão a três pontos (equação 4.3).

A finalidade dessa primeira etapa foi buscar correlações entre as características dos corpos de prova, a influência dos banhos de imersão. Vale lembrar que os corpos de prova representativos dos banhos de imersão com soluções hidrofugantes foram secos em estufa à 110°C por 24 horas antes dessas análises.

A segunda etapa se caracterizou pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (Hg) buscando-se observar a influência da distribuição de tamanho de poros no comportamento do material frente a absorção de soluções e permeabilidade.

5.3.1 Absorção de água

Em relação a absorção de água, segundo a NBR7581, o limite máximo aceito para telhas onduladas de fibrocimento sem amianto é o percentual igual ou menor a 37%.

Para este tipo de análise, foram determinadas 4 amostras por corpo de prova, para obter maior precisão nos resultados, com isso, a Figura 5.46 representa o percentual mediano relacionado a absorção de água de cada corpo de prova.

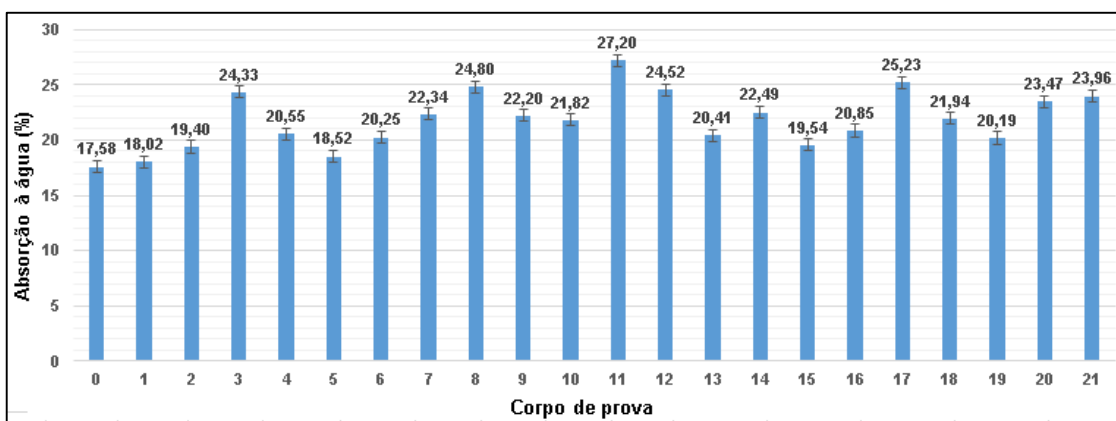


Figura 5.46 – Absorção de água (%) de corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento [autoria própria].

Como visto na Figura 5.46, todos os valores médios de absorção de água dos corpos de provas estão dentro do limite permitido de acordo com a NBR7581, menores do que 37%. Comparativamente entre eles, o corpo de prova S11 apresentou maior percentual (27,20%). Comparativamente entre a média geral dos resultados (23%), os corpos de provas S3, S8, S12, S17, S20 e S21 apresentaram valores superiores de absorção de água.

5.3.2 Porosidade aparente

Em relação a porosidade aparente, para este tipo de análise, foram determinadas 4 amostras por corpo de prova, para obter maior precisão nos resultados, com isso, a Figura 5.47 apresenta o percentual mediano relacionado a porosidade aparente.

No ensaio de porosidade aparente, pode-se observar que o corpo de prova que apresentou maior absorção de água (S11), também apresentou maior porosidade aparente (40,01%). Comparativamente entre os corpos de prova, uma média adequada dos valores obtidos para todos os corpos de prova seria uma porosidade aparente de 36%, nesse caso, os valores obtidos para os corpos de prova S3, S8, S12, S17, e S21 apresentaram valores que superam a média geral.

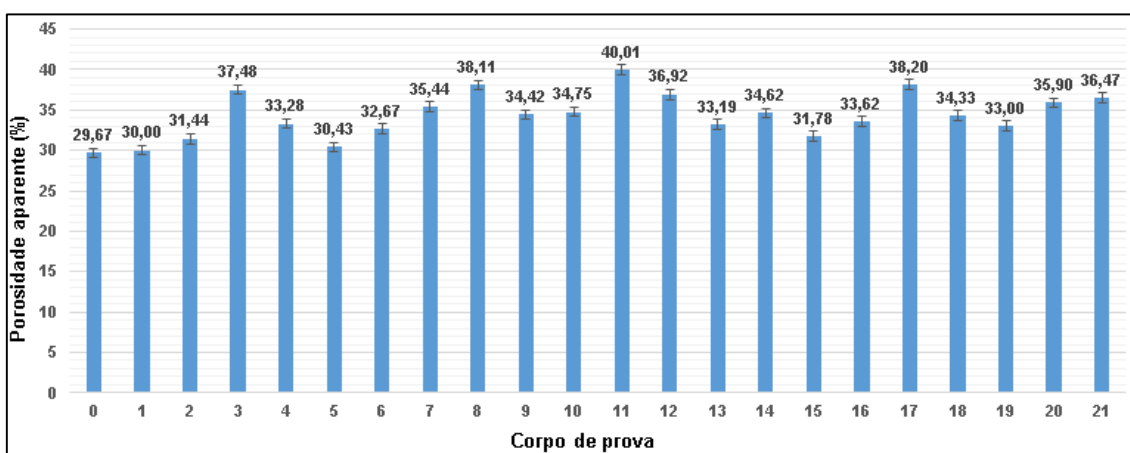


Figura 5.47 – Porosidade Aparente (%) de corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento [autoria própria].

É possível observar que, com exceção do corpo de prova S20, os corpos de prova com maior porosidade aparente (S3, S8, S12, S17 e S21) estão em coerência com os que apresentaram maior absorção de água, indicando uma similaridade entre eles em termos de porosidade aberta e/ou interconectada.

5.3.3 Resistência mecânica à flexão a três pontos

Para a avaliação da resistência mecânica à flexão a três pontos foram utilizadas 4 amostras por corpo de prova, para se obter maior precisão nos resultados por meio de um valor médio e os respectivos desvios padrão. A Figura 5.48 apresenta os valores obtidos para cada corpo de prova, isto é, diferentes banhos em soluções com hidrofugantes.

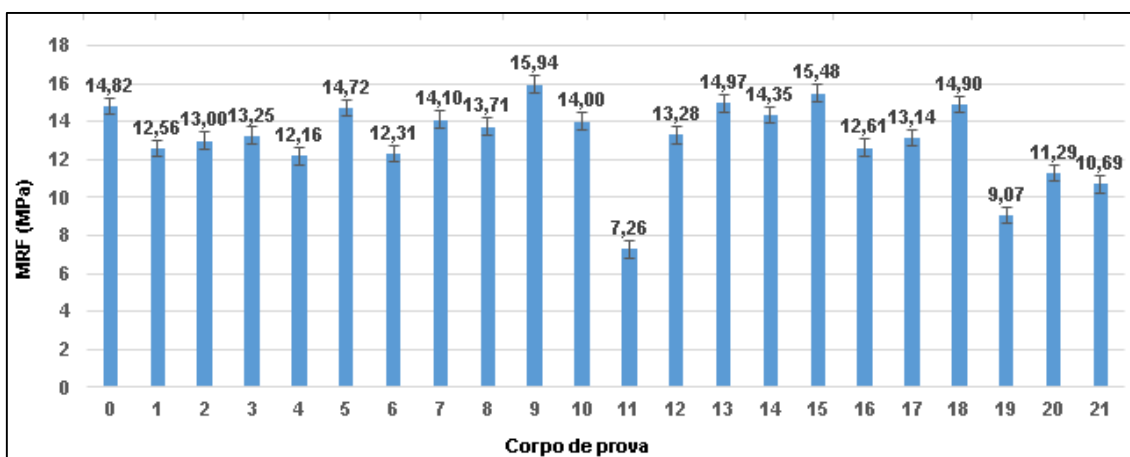


Figura 5.48 – Resistência mecânica à flexão a três pontos [autoria própria].

No ensaio de resistência mecânica à flexão a três pontos pode-se observar a relação de que quanto maior o percentual de absorção de água e porosidade aparente, menor seriam esperados os valores de resistência mecânica à flexão a três pontos. Esse comportamento se confirmou, haja visto, por exemplo o corpo de prova S11 que apresentou maior percentual em absorção de água (27,20%) e porosidade aparente (40,01%) foi o de menor resistência de 7,26 MPa. De certa forma, esses resultados podem ser indicativos de que não houve uma influência das soluções de hidrofugantes nas características física e mecânica do fibrocimento, e sim, provavelmente, uma modificação química dos poros e vazios da interface matriz/cimento.

Com o objetivo de se pré-selecionar as soluções de hidrofugantes mais promissoras, procurou-se correlacionar os resultados da caracterização física e mecânica (melhores resultados, superiores a 14 MPa) com os comportamentos durante os ensaios de permeabilidade. Utilizou-se da permeabilidade à água com azul de metileno, que demarcou o manchamento e/ou gotejamento de forma mais evidente. Dessa forma, constitui-se 3 grupos de corpos de prova, classificados como amostragem pior, que apresentou manchamentos nas faces inferior e superior, além de gotejamento; amostragem intermediária que apresentou manchamento somente na face inferior e amostragem melhor (ideal ou adequada) sem manchamentos nem formação de gotas. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.3.

De acordo com a Tabela 5.3, podemos observar que o corpo de prova S0 sem tratamento de hidrofugação, apresentou o gotejamento, o que não é permitido segundo a NBR7581, porém para análise de estudo é visto como resultado comparativo, por ser corpo de prova padrão, ou seja, aquele que não passou pelo o ensaio de banho de imersão.

Tabela 5.3 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de AA, PA, MRF e permeabilidade à água com adição de metileno.

Corpo de Prova (Solução Hidrofugante)	AA (%)	PA (%)	MRF (Mpa)	Permeabilidade (Qualitativa)
S0	17,57	29,66	14,82	M/G
S5	18,51	30,42	14,72	Não Houve M/G
S7	22,34	35,43	14,1	M (inferior)
S9	22,2	34,42	15,93	M (inferior)
S10	21,8	34,75	14	M (inferior)
S13	20,4	33,19	14,96	Não Houve M/G
S14	22,4	33,19	14,96	Não Houve M/G
S15	19,5	31,77	15,47	M (inferior)
S18	21,93	34,32	14,89	M (inferior)

M: manchamento na face inferior; G: gotejamento.

Fonte: [autoria própria].

Assim, por meio dessa classificação, obteve-se o “Segundo Resultado Geral”, e dessa forma, selecionou-se corpos de prova para análises mais específicas, dentre eles foram escolhidos S0 (*padrão in natura*), S5, S10, S13, S14 e por fim o corpo de prova S21, também visto de maneira comparativa, por se tratar do corpo de prova que passou pela etapa de imersão a solução comercial presente no mercado.

5.3.4 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (Hg)

Esta etapa se aplicou-se a partir do segundo resultado com os corpos de prova pré-definidos: S0, S5, S10, S13, S14 e S21, com a finalidade de observar a distribuição dos tamanhos dos poros (Figura 5.49).

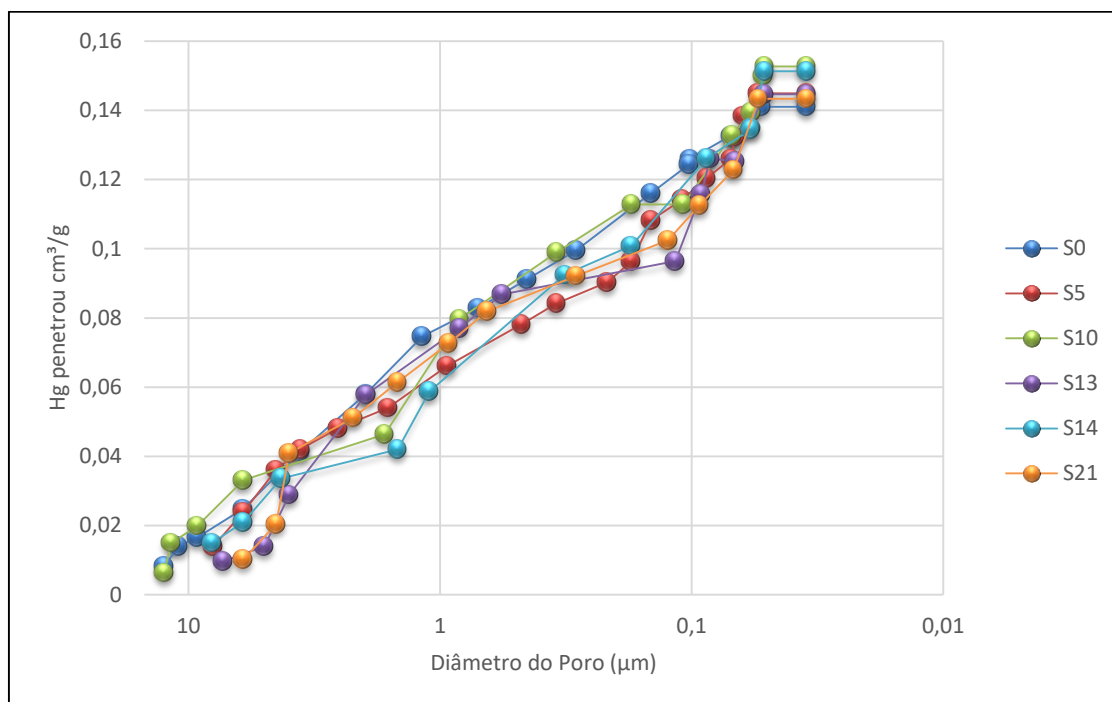


Figura 5.49 – Distribuição dos tamanhos dos poros obtida por porosimetria de Hg de corpos de prova representativos de telhas de fibrocimento tratadas por solução de hidrofugantes [autoria própria].

De acordo com a Figura 5.49 pode se observar o tamanho dos poros de cada corpo de prova, visto que:

- O corpo de prova S0 apresenta 80% do diâmetro dos poros entre 10,91 μm e 0,10 μm
- O corpo de prova S5 apresenta 80% do diâmetro dos poros entre 7,95 μm e 0,06 μm
- O corpo de prova S10 apresenta 80% do diâmetro dos poros entre 11,67 μm e 0,05 μm
- O corpo de prova S13 apresenta 80% do diâmetro dos poros entre 5 μm e 0,08 μm
- O corpo de prova S14 apresenta 80% do diâmetro dos poros entre 8,04 μm e 0,05 μm
- O corpo de prova S21 apresenta 80% do diâmetro dos poros entre 4,41 μm e 0,06 μm

Dos resultados da distribuição de tamanho de poros não se pode observar grandes variações.: 67% dos corpos de provas impostos a este ensaio apresentam diâmetros menores ou igual a 8,04 μm , e 33% apresentaram diâmetros maiores que 10 μm , que segundo os autores Mehta e Monteiro [108], poros com diâmetros maiores do que 10 μm são denominados poros grandes, característicos de matriz cimentícia pouca hidratada e de matrizes com defeitos de moldagem.

Após esta etapa, foram repetidos os ensaios de banho de imersão variando a temperatura dos corpos (temperatura ambiente e temperatura de 70°C), posteriormente submetidos as análises de permeabilidade à água deionizada com adição de azul de metileno tanto nos ensaios por cachimbos de vidro, como o de indução de chuva.

5.4 Permeabilidade à Água: Influência da Temperatura.

Os corpos de prova selecionados no “Segundo Resultado Geral” foram submetidos a novos banhos (exceto o corpo de prova S0 que já demonstrou o pior comportamento), respeitando-se o mesmo padrão de tempo de imersão (6 minutos), porém corpos tratados em diferentes temperaturas (25 e 70°C) antes da aplicação do banho de solução com hidrofugantes. Esse procedimento acabou por analisar em replica os corpos de prova.

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de permeabilidade à água com adição de metileno, pelo método que utiliza o cachimbo de vidro (Figura 4.6), e por indução a chuva (Figura 4.7). Para facilitar o estudo estes corpos de provas foram renomeados, segundo a Tabela 5.4.

Em relação a permeabilidade com o uso de cachimbo foi aplicado o mesmo tempo limite de absorção a cada corpo de prova explícito na Tabela 5.2, porém em alguns casos, alguns corpos de prova levaram mais tempo ou até mesmo menos tempo em absorver o volume de 25 ml. Levando este fato em consideração, pode-se inferir que os corpos de prova apresentam heterogeneidades entre si e que, certamente, interferem no comportamento da permeabilidade.

Tabela 5.4 – Renomeação dos corpos de provas de telhas onduladas de fibrocimento tratadas com soluções de hidrofugantes.

Corpo de Prova (Solução Hidrofugante)	Renomeação	Solução
S5	S5 A	0,25% silano + 0,75 resina acrílica
Replica S5 (25°C)	S5 B	
S5 com temperatura (70°C)	S5 C	
Replica S5 com temperatura (70°C)	S5 D	
S10	S10 A	0,5% sílica coloidal + 0,5% silano
Replica S10 (25°C)	S10 B	
S10 com temperatura (70°C)	S10 C	
Replica S10 com temperatura (70°C)	S10 D	
S13	S13 A	0,25% resina acrílica + 0,75% silano
Replica S13 (25°C)	S13 B	
S13 com temperatura (70°C)	S13 C	
Replica S13 com temperatura (70°C)	S13 D	
S14	S14 A	1% siloxano
Replica S14 (25°C)	S14 B	
S14 com temperatura (70°C)	S14 C	
Replica S14 com temperatura (70°C)	S14 D	
S21	S21 A	1% comercial Sika
Replica S21 (25°C)	S21 B	
S21 com temperatura (70°C)	S21 C	
Replica S21 com temperatura (70°C)	S21 D	

Fonte: [autoria própria].

A Figura 5.50 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S5 B, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3. O tempo de absorção total deste corpo de prova foi de 792 horas, ou seja, 33 dias; levou mais tempo comparado ao primeiro ensaio (S5).

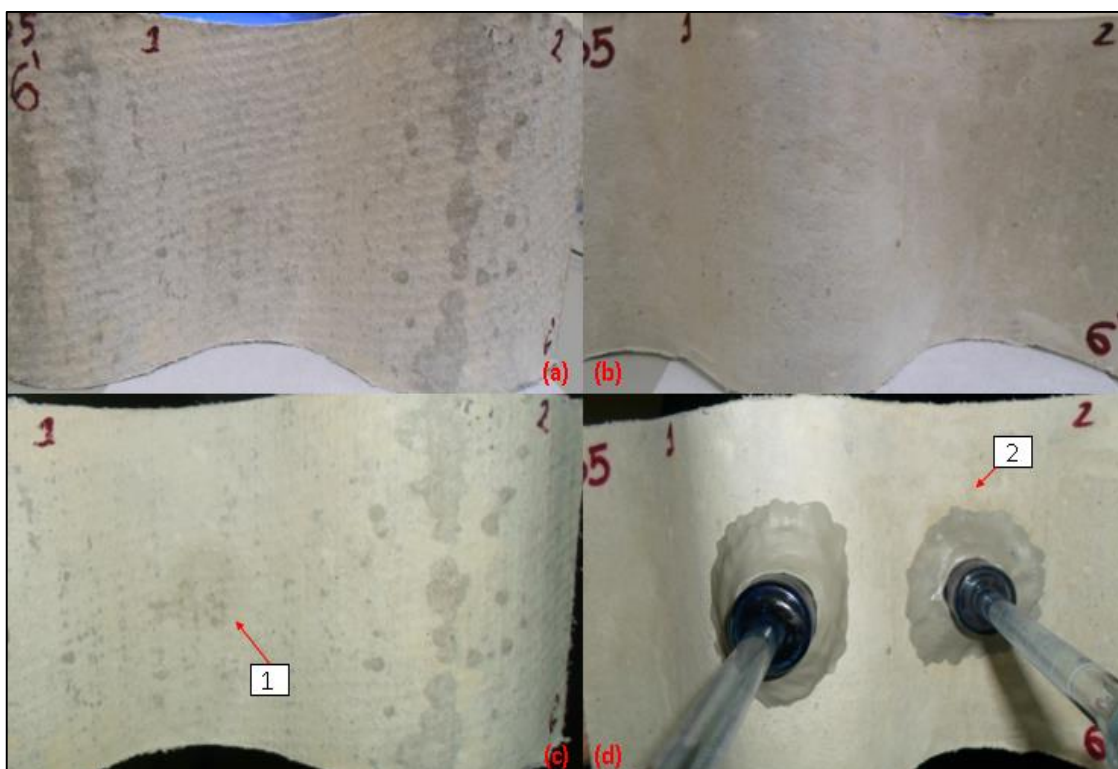


Figura 5.50 – Corpo de prova S5 B: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Apresentou mancha na face inferior na superfície convexa (Figura 5. 50c seta 1), pequena mancha de umidade na face superior na superfície côncava (Figura 5.50d seta 2), e manchas na face superior, não permitidas na NBR7581, porém não indicou a formação de gota de água.

A Figura 5.51 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S5 C, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova S5 C foi de 792 horas, ou seja, 33 dias; levou mais tempo comparado ao primeiro ensaio S5 (25°C).

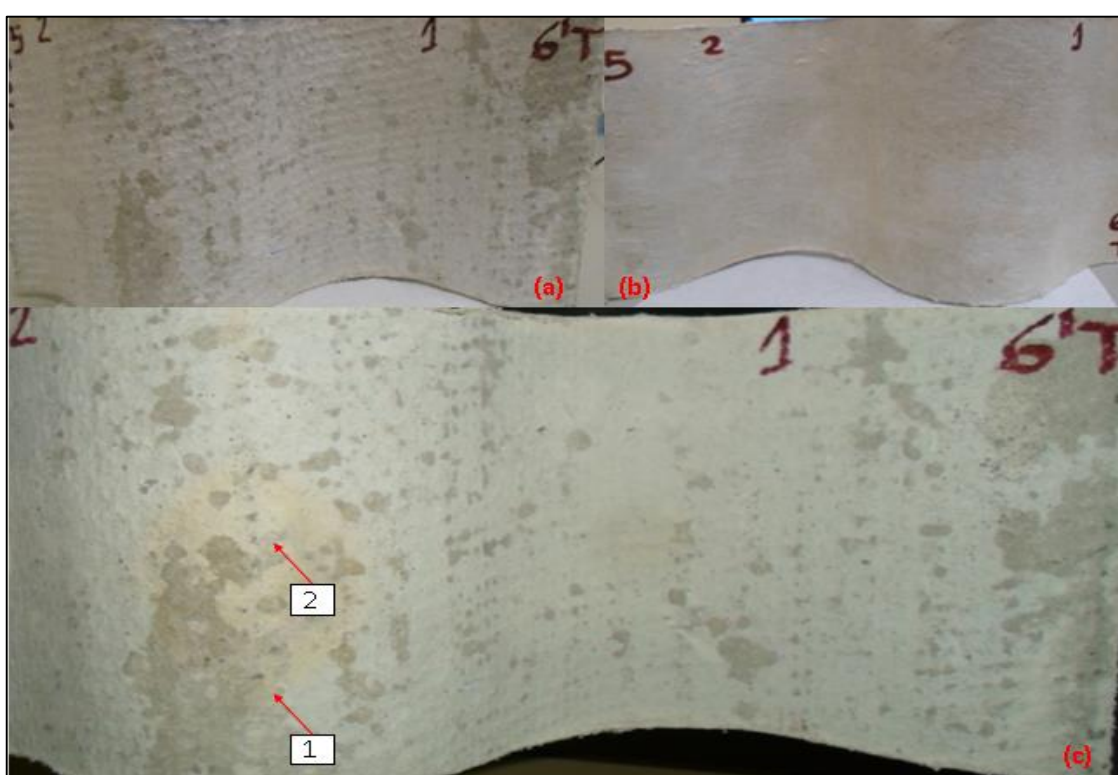


Figura 5.51 – Corpo de prova S5 C: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c)** face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Apresentou mancha na face inferior na superfície côncava (Figura 5.51c setas 1 e 2), mas não apresentou manchas na face superior e não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.52 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S5 D, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova S5 D foi de 312 horas, ou seja, 13 dias, levou menos tempo comparado ao primeiro ensaio S5 (25°C).

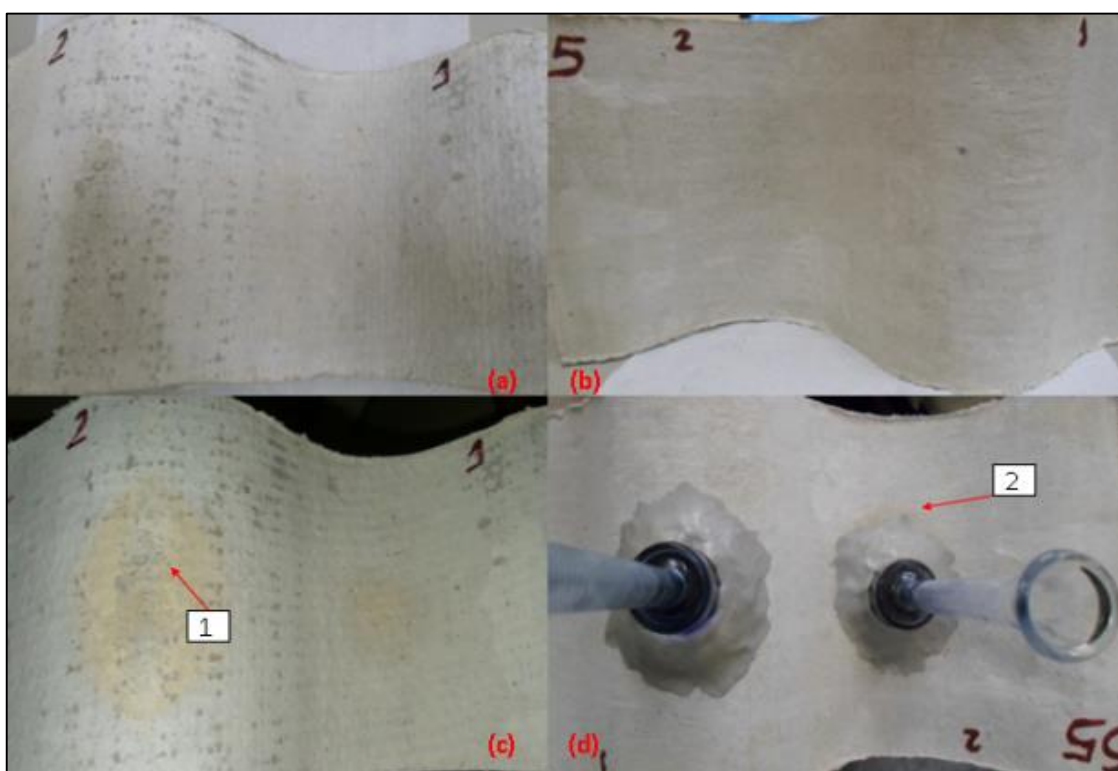


Figura 5.52 – Corpo de prova S5 D: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa), após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Apresentou mancha na face inferior na superfície côncava (Figura 5.52c seta 1), pequena mancha de umidade na face superior na superfície côncava (Figura 5.52d seta 2), porém manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, além disso não indicou a formação de gota de água.

A Figura 5.53 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S10 B, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

O tempo de absorção total deste corpo de prova S10 B foi de 96 horas, ou seja, 4 dias, mesmo tempo comparado ao primeiro ensaio S10.

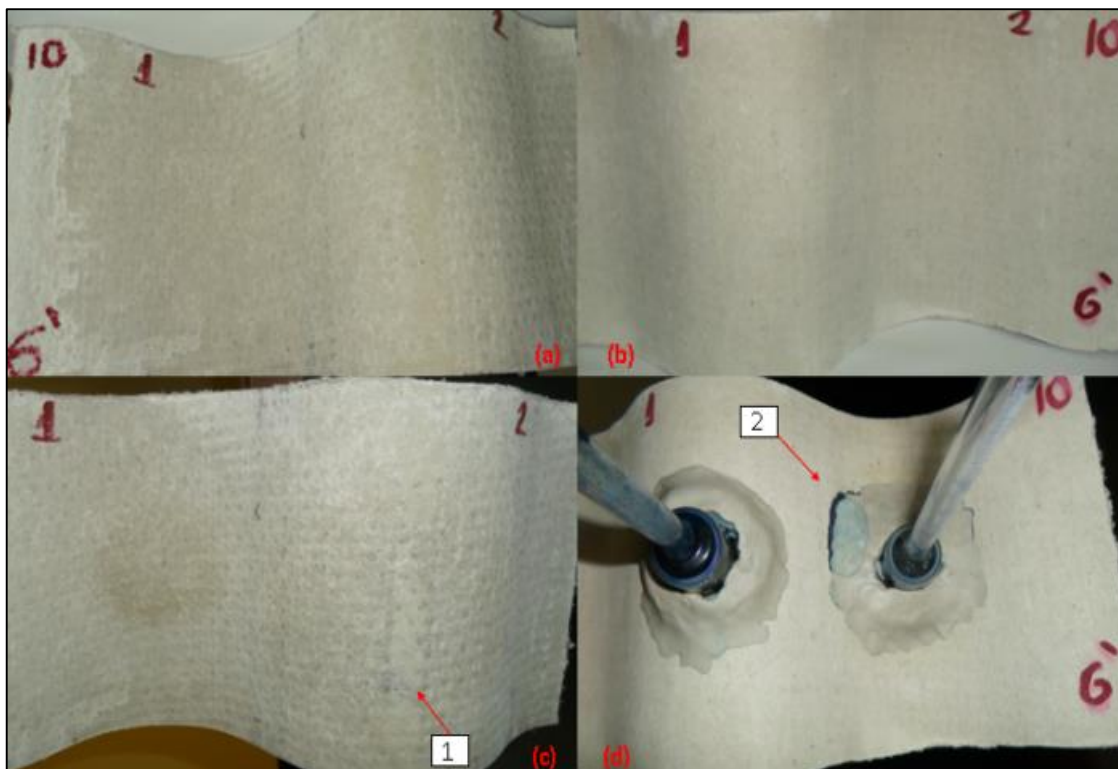


Figura 5.53 – Corpo de prova S10 B: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Apresentou mancha na face inferior na superfície côncava (Figura 5.53c seta 1), mancha na face superior na superfície côncava (Figura 5.53d seta 2), lembrando que manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, mas não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.54 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S10 C, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova S10 C foi de 96 horas, ou seja, 4 dias, mesmo tempo comparado ao primeiro ensaio S10 (25°C).

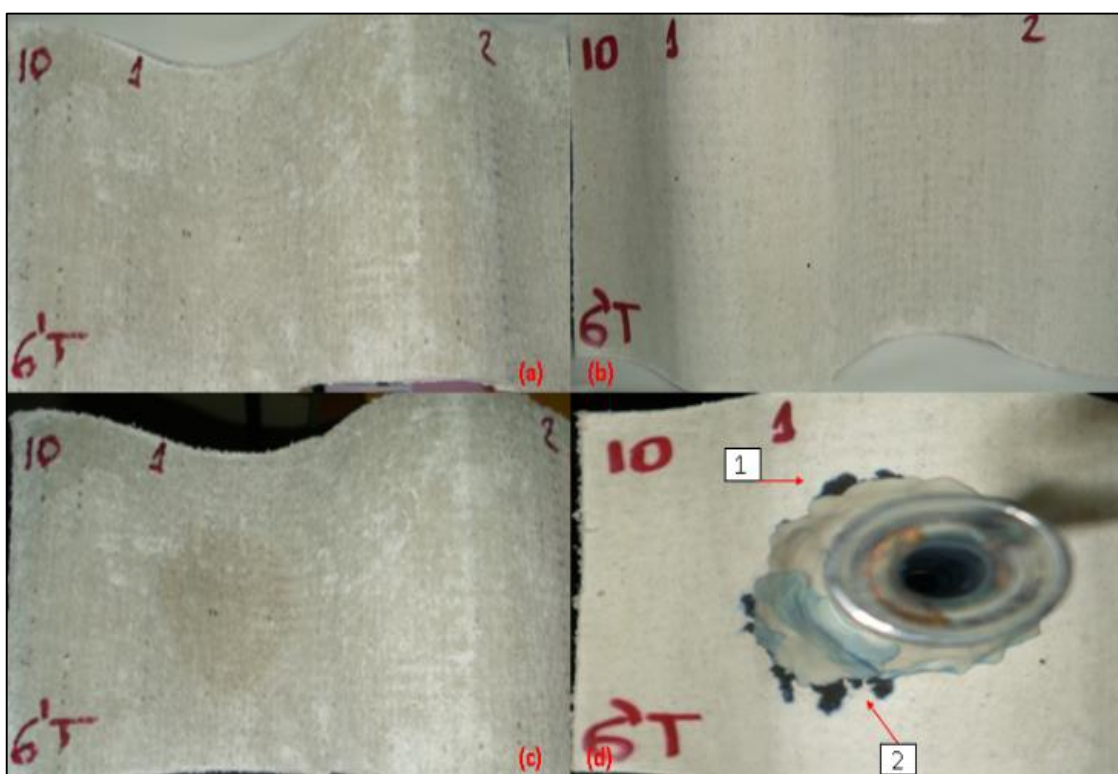


Figura 5.54 – Corpo de prova S10 C: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Este corpo de prova apresentou mancha na face superior na superfície convexa (Figura 5.54d setas 1 e 2), manchas na face superior que não são permitidas baseando na NBR7581, porém não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.55 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S10 D, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova S10 D foi de 96 horas, ou seja, 4 dias, mesmo tempo comparado ao primeiro ensaio S10 (25°C).

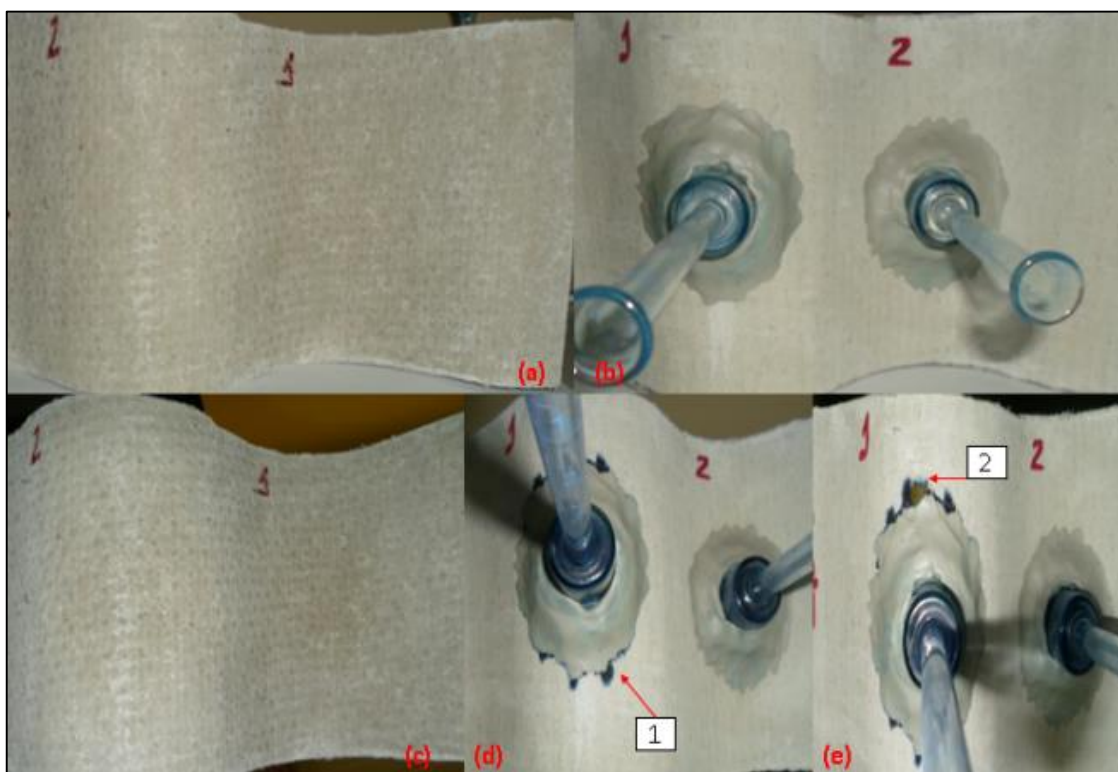


Figura 5.55 – Corpo de prova S10 D: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d, e)** sequencialmente face inferior e superior/superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Apresentou mancha na face superior, superfície convexa (Figura 5.55d seta 1) e (Figura 5.55e seta 2), e manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, porém não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.56 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S13 B, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

O tempo de absorção total deste corpo de prova S13 B foi de 2616 horas, ou seja, 109 dias; levou mais tempo comparado ao primeiro ensaio S13. Não apresentou manchas na face inferior nem manchas na face superior, além disso não indicou a formação de gota de água.



Figura 5.56 – Corpo de prova S13 B: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c) face inferior após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.57 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S13 C, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C),

O tempo de absorção total deste corpo de prova S13 C foi de 2600 horas, ou seja, 108 dias, mais tempo comparado ao primeiro ensaio S13 (25°C). Não apresentou manchas na face inferior nem tampouco na face superior, além disso não indicou a formação de gota de água.

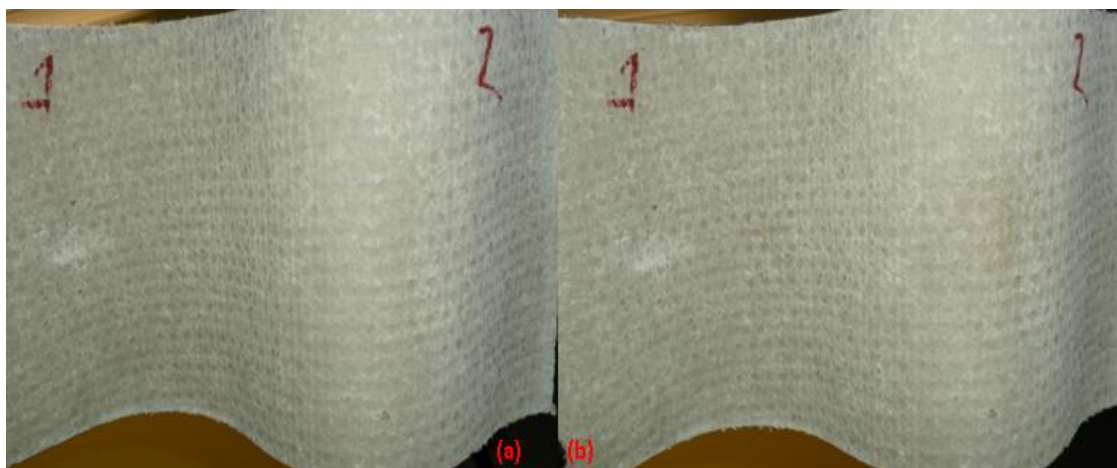


Figura 5.57 – Corpo de prova S13 C: **(a, b)** sequencialmente face inferior antes do ensaio de permeabilidade e face inferior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.58 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S13 D, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova S13 D foi de 168 horas, ou seja, 7 dias; levou menos tempo comparado ao primeiro ensaio S13 (25°C). Não apresentou manchas na face inferior, mas indicou na face superior na superfície convexa (Figura 5.58d seta 1 e Figura 5.58e seta 2). Mais uma vez relembrando, manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581. No entanto, não houve a formação de gota de água.

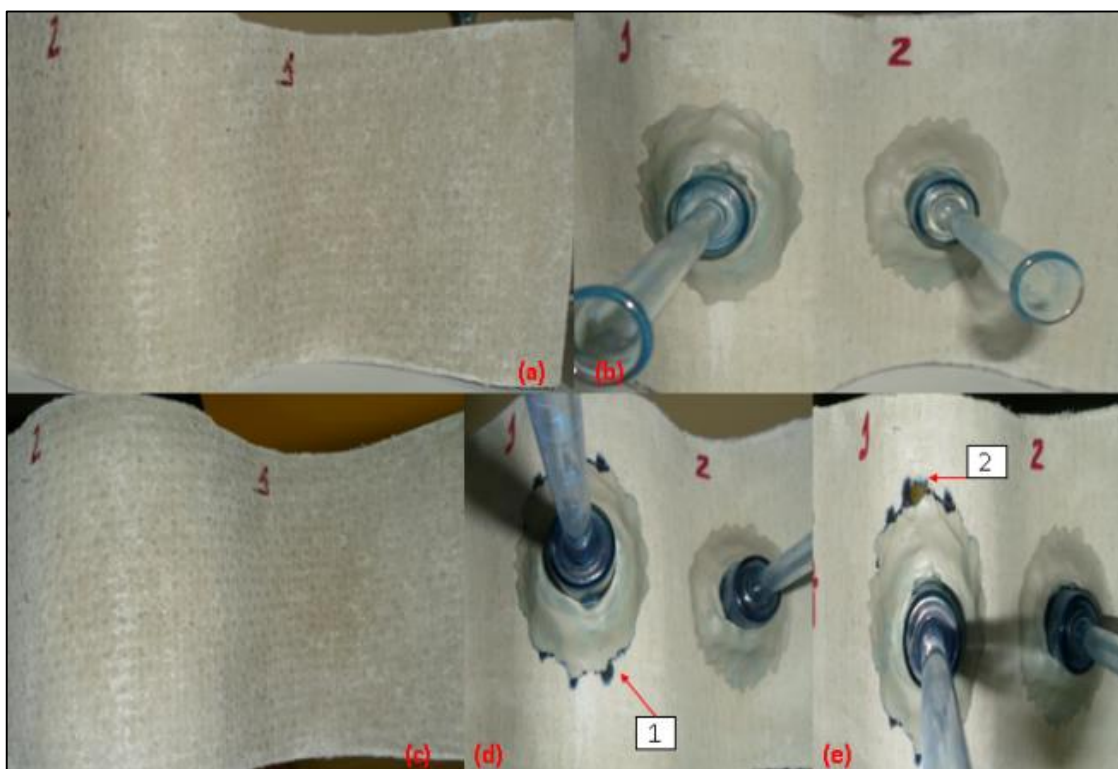


Figura 5.58 – Corpo de prova S13 D: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d, e)** sequencialmente face inferior e superior/superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.59 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S14 B, qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

O tempo de absorção total deste corpo de prova S14 B foi de 120 horas, ou seja, 5 dias, mesmo tempo comparado ao primeiro ensaio S14. Não apresentou manchas na face inferior, mas apresentou manchas na face superior na superfície convexa (Figura 5.59d seta 1), que não são permitidas baseando na NBR7581. Contudo não houve formação de gota de água.

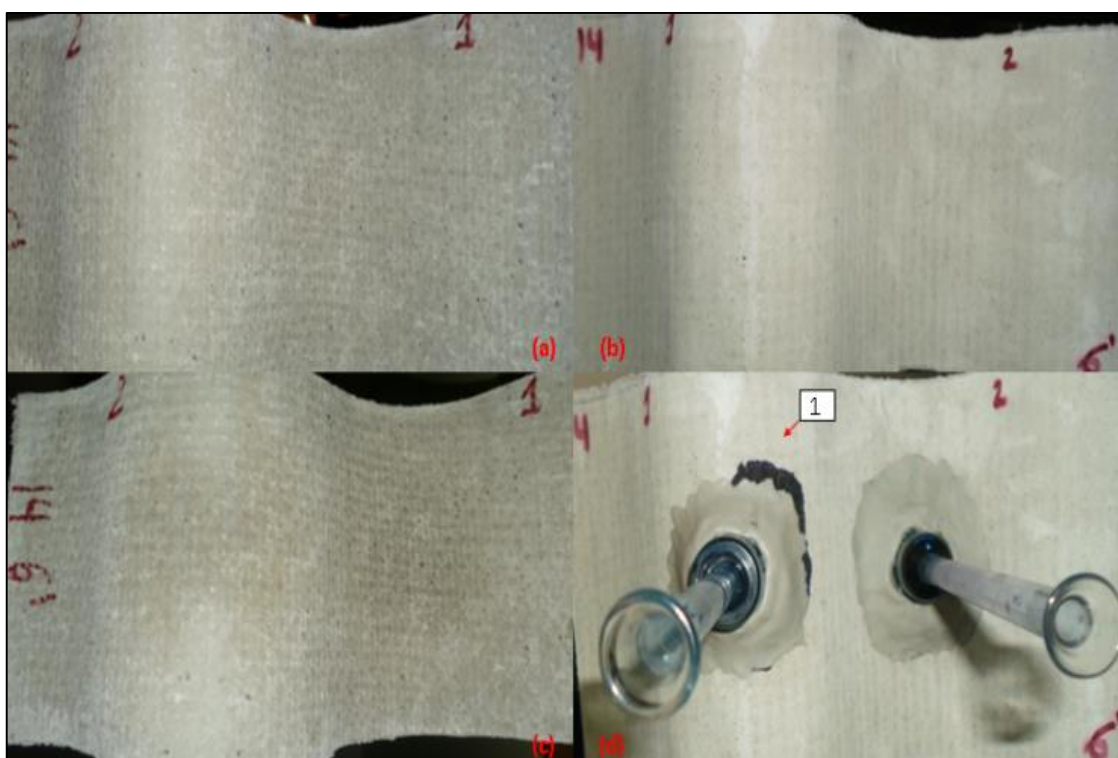


Figura 5.59 – Corpo de prova S14 B: (a, b) sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; (c, d) sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Nota: Vale ressaltar que em vários ensaios de permeabilidade à água com soluções de azul de metileno, muitas imagens, induzem ao fato de que na região do cachimbo houve vazamento devido à má fixação desse elemento. Os cachimbos foram fixados com massa plástica própria para calafetação e as manchas ao redor só surgiram ao longo do tempo de absorção da solução pelo material.

A Figura 5.60 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S14 C, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova foi de 120 horas, ou seja, 5 dias, mesmo tempo comparado ao primeiro ensaio S14 (25°C). Não apresentou manchas na face inferior, mas indicou na face superior na superfície côncava (Figura 5.60d seta 1). Essas manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, porém não indicou a formação de gota de água.

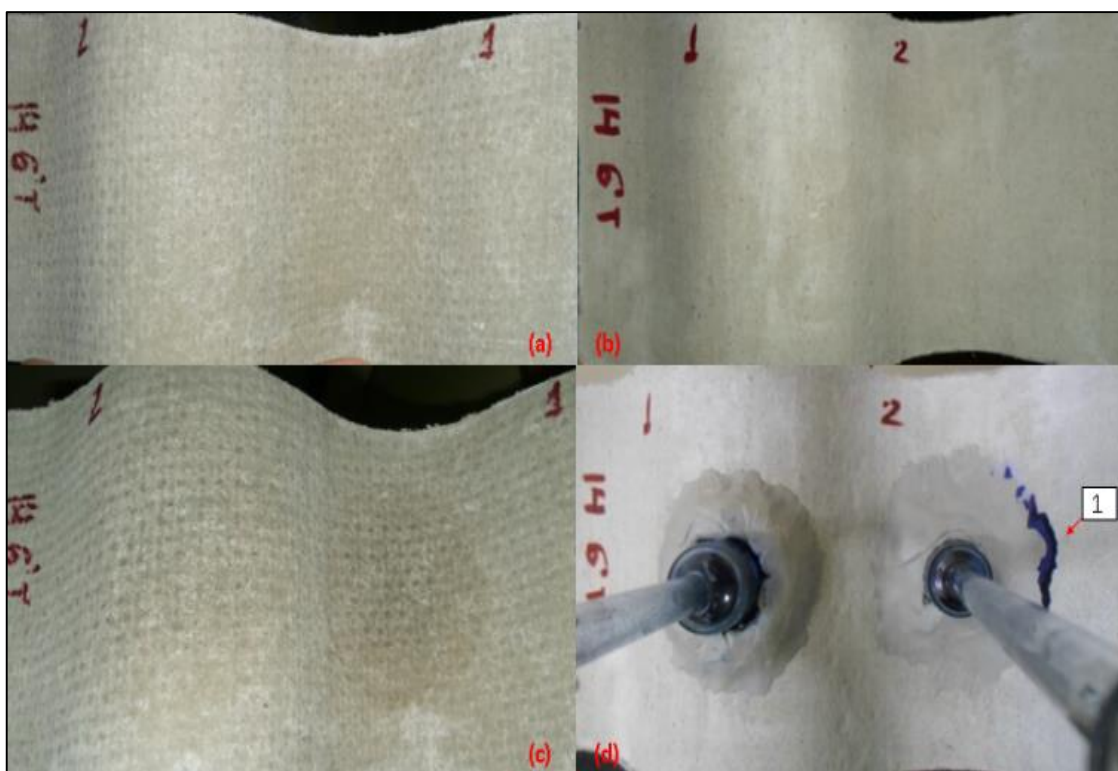


Figura 5.60 – Corpo de prova S14 C: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.61 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S14 D, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova foi de 120 horas, ou seja, 5 dias, mesmo tempo comparado ao primeiro ensaio S14 (25°C).

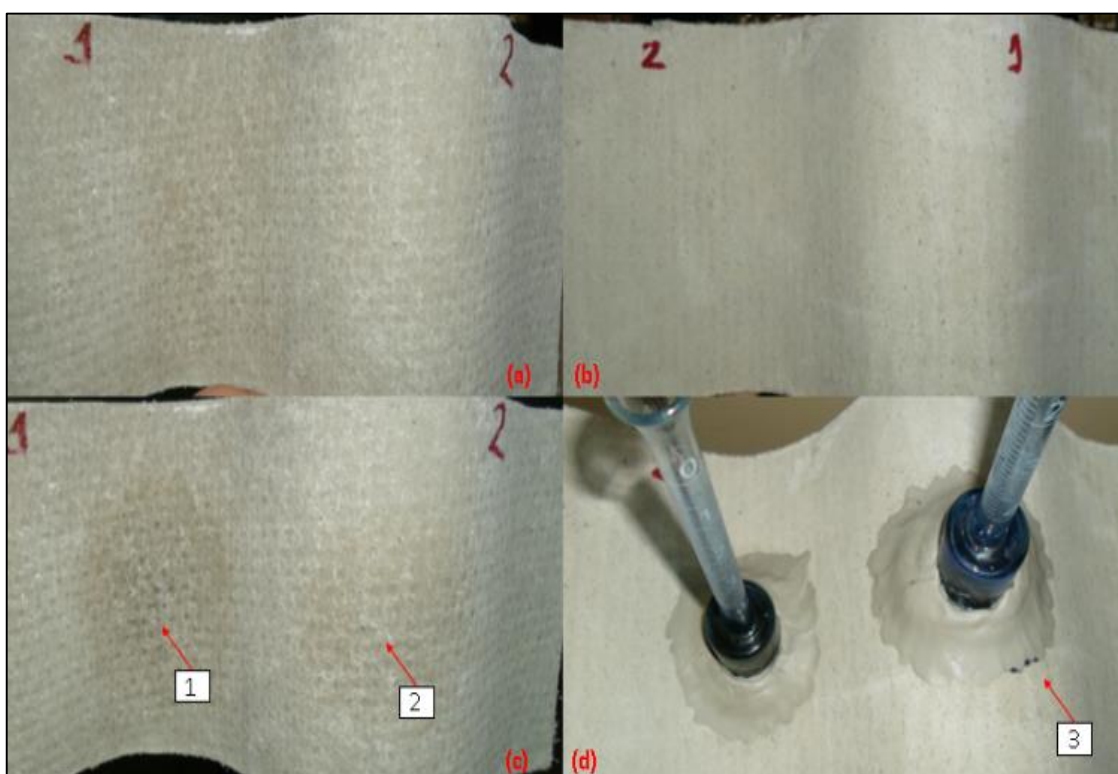


Figura 5.61 – Corpo de prova S14 D: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Apresentou pequena mancha na face inferior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.61c setas 1 e 2), pequenas manchas na face superior na superfície convexa (Figura 5.61d seta 3), mas, mesmo sendo manchas pequenas, na face superior não são permitidas baseando na NBR7581, entretanto não indicou a formação de gota de água.

A Figura 5.62 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S21 B, qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3.

O tempo de absorção total deste corpo de prova S21 B foi de 72 horas, ou seja, 3 dias; levou menos tempo comparado ao primeiro ensaio S21. Não apresentou mancha na face inferior, mas apresentou manchas na face superior nas superfícies convexa e côncava (Figura 5.62d seta 1 e 2). Essas manchas na face superior não são permitidas baseando na NBR7581. Neste corpo de prova ainda houve a ocorrência da formação de gota de água, o que também não é permitido baseado na mesma norma NBR7581.

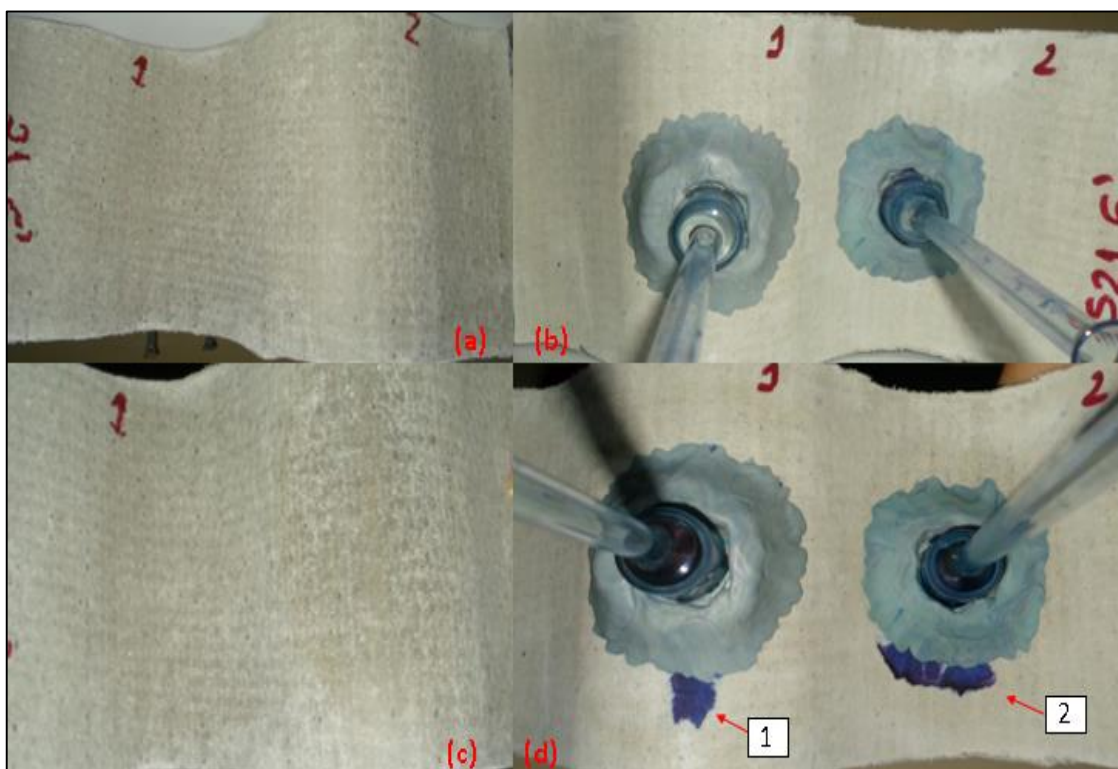


Figura 5.62 – Corpo de prova S21 B: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.63 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S21 C, o qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova foi de 48 horas, ou seja, 2 dias, mesmo tempo comparado ao primeiro ensaio S21 (25°C). Não apresentou mancha na face inferior, mas apresentou manchas na face superior nas superfícies côncava e convexa (Figura 5.63d setas 1, 2, 3 e 4) Essas manchas de absorção não são permitidas baseando na NBR7581. Em adição a isso, ainda houve a ocorrência de formação de gota de água, o que também não permitido segundo a mesma norma NBR7581.

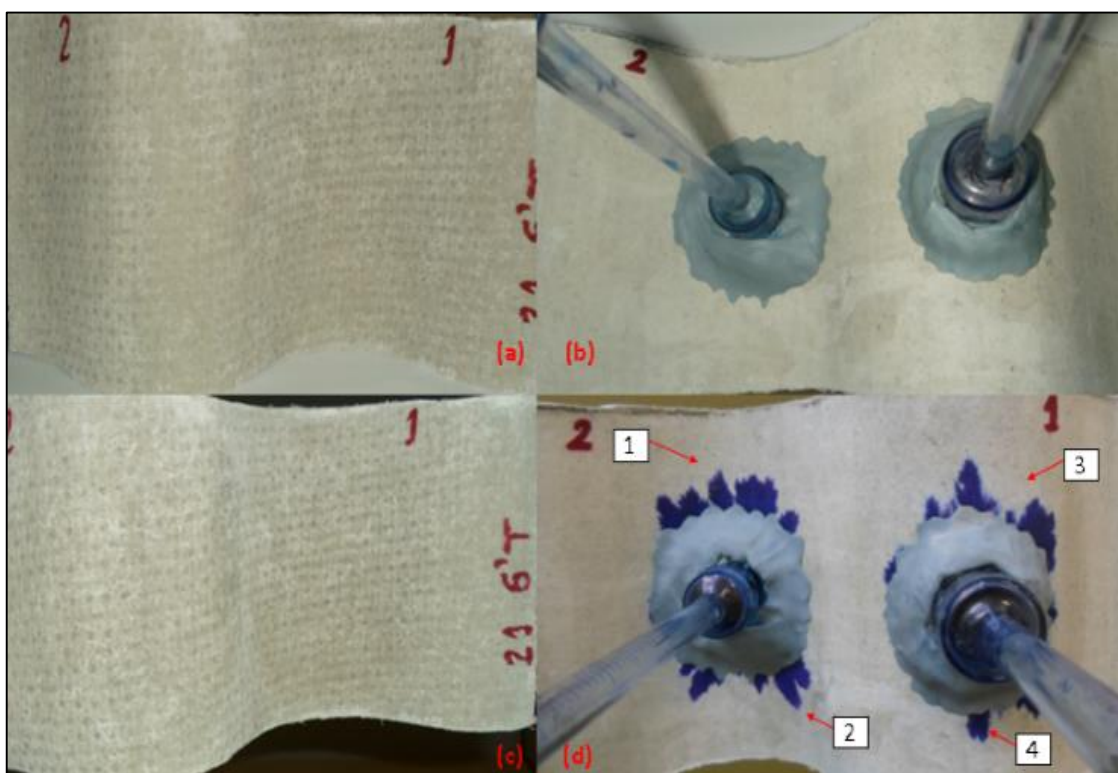


Figura 5.63 – Corpo de prova S21C: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

A Figura 5.64 ilustra as etapas do ensaio de permeabilidade (método fotográfico) do corpo de prova S21 D, qual recebeu tratamento banho de imersão mencionado na Tabela 4.3, porém com a adição de temperatura no corpo de prova (70°C).

O tempo de absorção total deste corpo de prova foi de 96 horas, ou seja, 4 dias, levando assim mais tempo comprado ao primeiro ensaio S21 D (25°C).

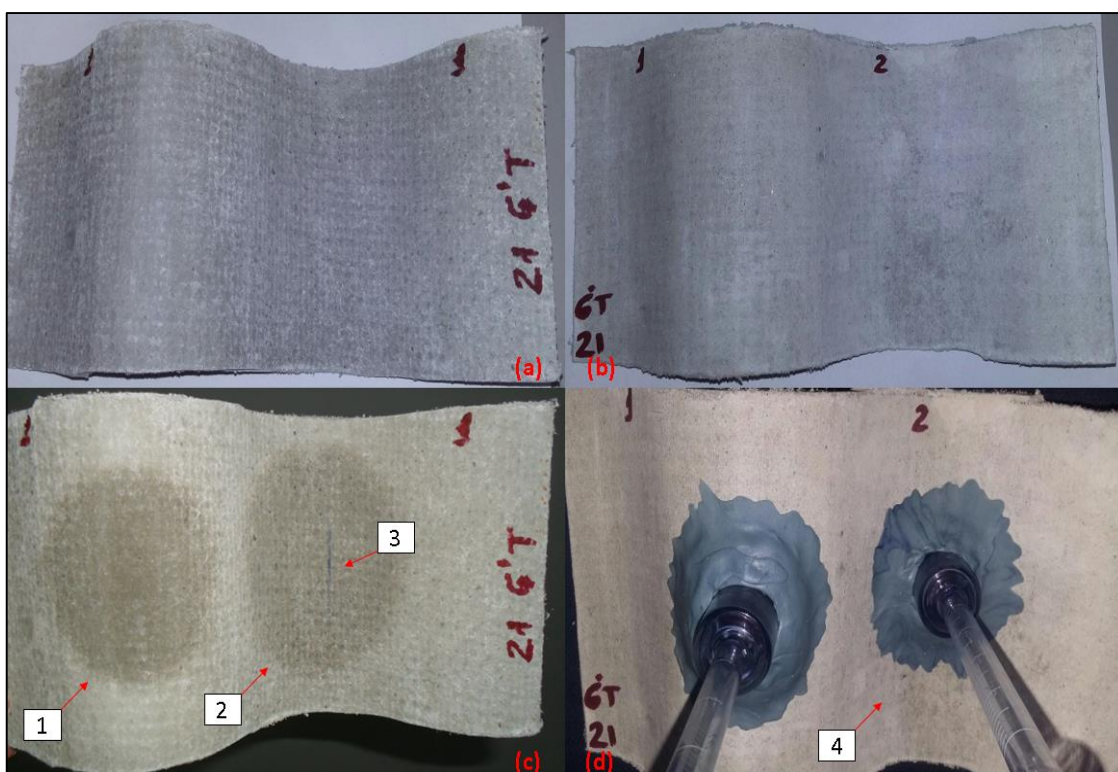


Figura 5.64 – Corpo de prova S21D: **(a, b)** sequencialmente face inferior e superior antes do ensaio de permeabilidade; **(c, d)** sequencialmente face inferior e superior, superfícies côncava e convexa, após tempo final de permeabilidade [autoria própria].

Apresentou mancha de umidade na face inferior nas superfícies côncava e conca (Figura 5.64c setas 1, 2 e 3), além de mancha na face superior na superfície convexa (Figura 5.64d seta 3). Embora de pequeno tamanho, mancha na face superior não é permitida baseando na NBR7581. Esse corpo de prova S21 D também apresentou gotejamento intenso, não permitido também segundo a NBR7581.

5.5 Permeabilidade: Indução à Chuva

Novos corpos de prova selecionados após o “Segundo Resultado Geral” também foram submetidos ao ensaio de permeabilidade que simula chuva por período de 3 dias (72 horas), com a finalidade de observar a ocorrência de manchamento com a situação da água em movimento (ensaio “dinâmico”), ou seja, fluxo contínuo, para que assim se obtivesse dados comparativos com os resultados de permeabilidade observados no ensaio com o auxílio de cachimbo (ensaio “estacionário”). Algumas imagens deste estudo estão representadas na Figura 5.65 e Figura 5.66.

É importante salientar que neste tipo de ensaio as bordas inferiores e superiores são susceptíveis a um manchamento mais forte, devido a estrutura do ensaio que causa o escoamento do azul de metileno.

Assim, no caso dos escoamentos, as manchas não foram consideradas. Considerou-se como manchas advindo da permeabilidade, as regiões próximas a região central e que não estavam conectadas com as regiões de escoamento.

A Figura 5.65a representa o corpo de prova S0 (sem tratamento de hidrofugação) após o ensaio de permeabilidade (método fotográfico) com indução de chuva. Apresentou mancha na face inferior na superfície côncava (Figura 5.65a seta 1) e mancha na face inferior na superfície convexa, próxima à borda, porém distante da zona do escoamento do azul de metileno (Figura 5.65a seta 2), mas não indicou a formação de gota de água.

No caso do corpo de prova S10 representado na Figura 5.65b, este apresentou mancha na face inferior superfície convexa, próxima à borda inferior (Figura 5.65b seta 3), mas não indicou a formação de gota de água.

A Figura 5.65c ilustra o corpo de prova S5. Este apresentou mancha na face inferior na superfície convexa, contudo, praticamente na região do escoamento, e neste caso não deve ser considerado como um corpo de prova permeável (Figura 5.65c seta 4). Não houve a formação de gota de água.

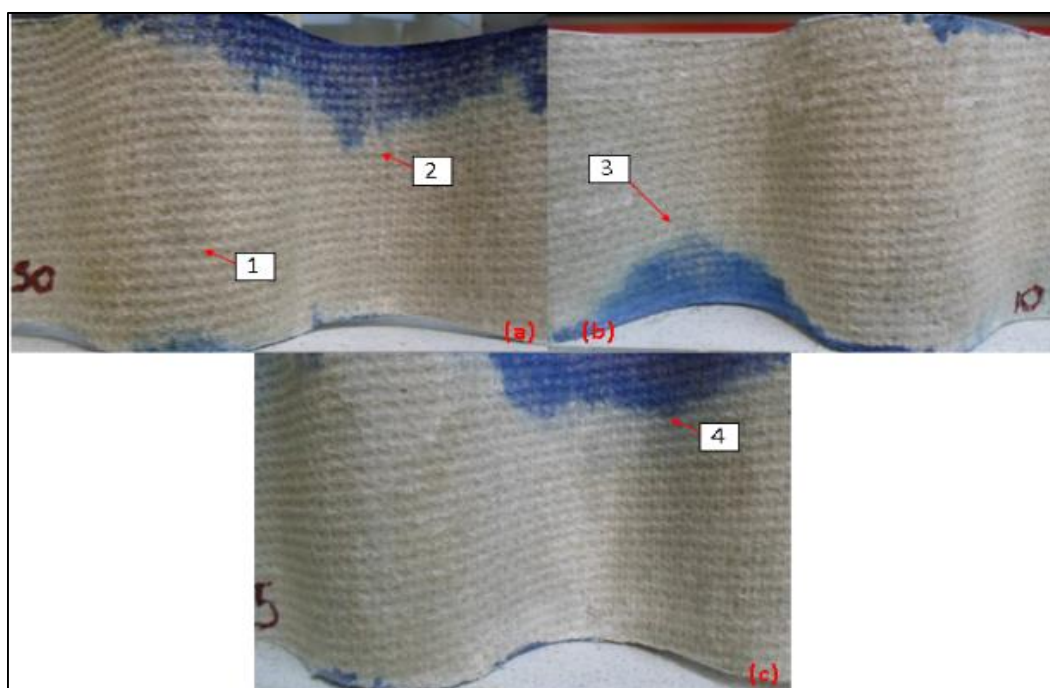


Figura 5.65 – Face inferior dos corpos de provas proveniente do ensaio de permeabilidade com indução à chuva, após o tempo final de permeabilidade: **(a, b, c)** sequencialmente correspondentes aos corpos de provas S0, S5, S10 [autoria própria].

A Figura 5.66a representa o corpo de prova S13 também após o ensaio de permeabilidade (método fotográfico) com indução à chuva. Este corpo de prova S13 apresentou mancha apenas nas bordas superiores (Figura 5.66a seta 1) que não foram consideradas por não migrarem para a parte côncava e/ou convexa. Não houve formação de gota de água.

No caso do corpo de prova S14 representado na Figura 5.66b, este apresentou mancha na superfície inferior na superfície convexa, proveniente da borda (Figura 5.66b seta 2), mas demonstra uma situação de escoamento e não foi considerada mancha devido à permeabilidade. Neste caso também não houve a formação de gota de água.

A Figura 5.66c ilustra o corpo de prova S21, que após o ensaio apresentou mancha na face inferior na superfície côncava (Figura 5.66c seta 4) e na superfície convexa (Figura 5.66c seta 5). Apresentou também mancha na borda lateral direita (Figura 5.66c seta 6), porém esta não foi considerada, pois

aparenta ter sido causada pelo escorrimento, diferente das outras de ocorrência na região central. Não foi observada a formação de gota de água.

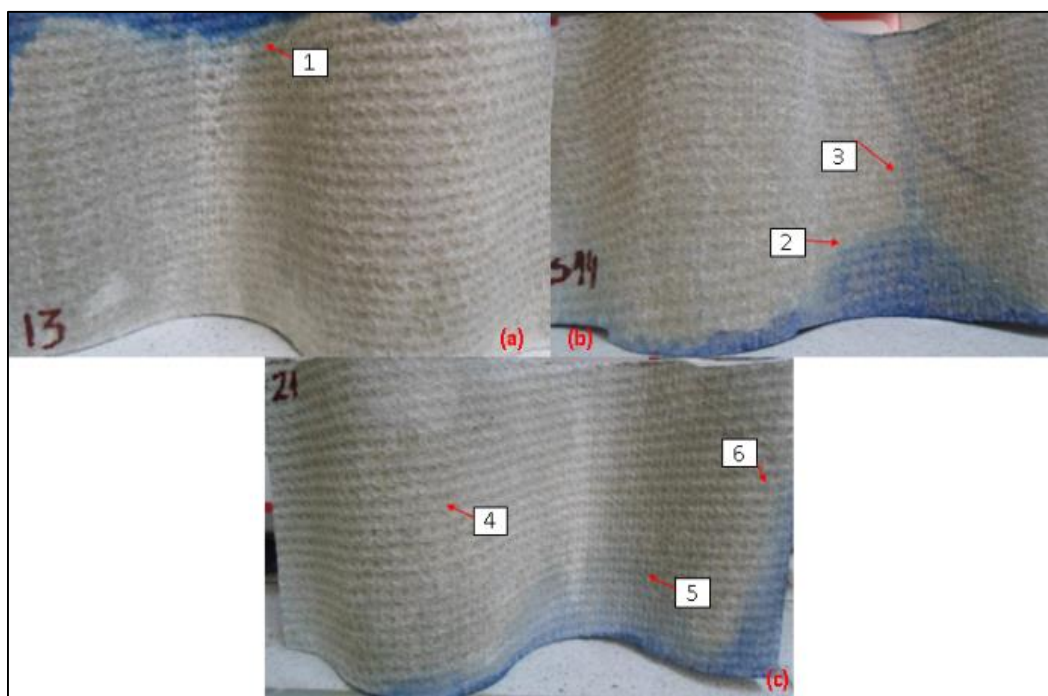


Figura 5.66 – Face inferior dos corpos de provas proveniente do ensaio de permeabilidade à indução de chuva, após o tempo final de permeabilidade: **(a, b, c)** sequencialmente correspondentes aos corpos de provas S13, S14, S21 [autoria própria].

Para sintetizar os resultados após os ensaios de permeabilidade por cachimbo e indução à chuva, fez considerações sobre situações críticas e não críticas, baseando na NBR7581. Para isso, foram consideradas situações críticas em ordem crescente como:

- (a) manchas na face superior;
- (b) mancha na face superior e inferior para o mesmo corpo de prova;
- (c) gotejamento;
- (d) mancha na face superior e gotejamento para o mesmo corpo de prova;
- (e) mancha na face inferior, superior e gotejamento para o mesmo corpo de prova, situação mais crítica.

De maneira comparativa, da mesma forma baseando na NBR7581, as situações não consideradas críticas em ordem crescente são:

- (a) sem manchas ou gotejamento;
- (b) mancha na face inferior.

Assim, a Figura 5.67 apresenta comparativamente a classificação qualitativa dos corpos de prova que foram se destacando durante o estudo.

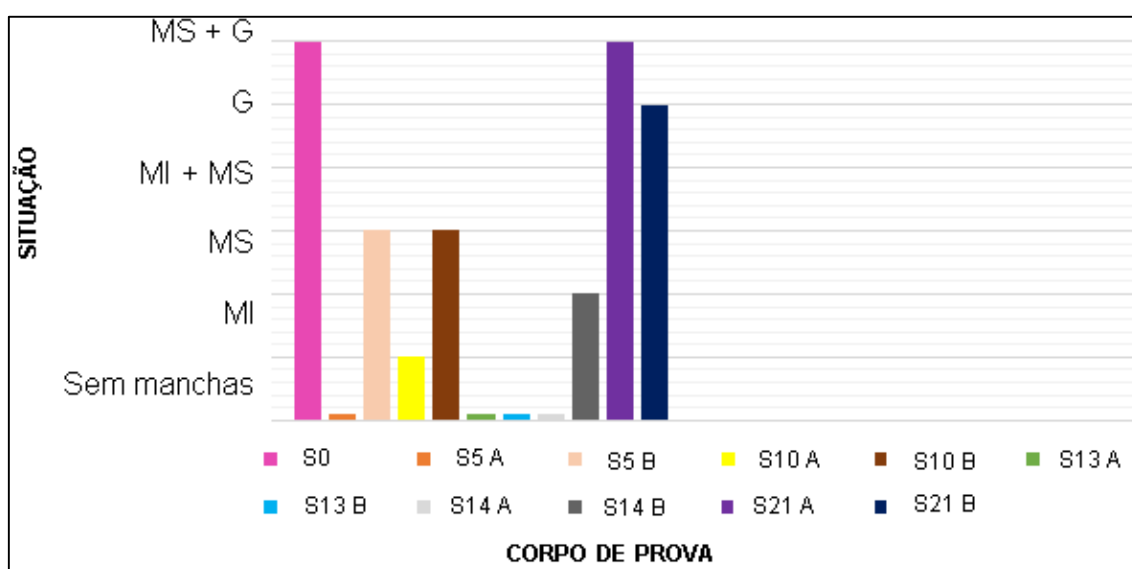


Figura 5.67 – Gráfico da classificação qualitativa dos corpos de provas à temperatura de 25°C (ambiente) antes dos banhos de imersão em soluções de hidrofugantes, em função dos resultados (em réplica) dos ensaios de permeabilidade. MS: mancha na face superior; MI: mancha na face inferior; G: gotejamento [autoria própria].

Da Figura 5.67, que representa os quatro corpos de prova selecionados dentre os 21 corpos de prova iniciais, sendo dois de referência, isto é, S0 (sem tratamento) e S21 (hidrofugante comercial), pode se observar que o melhor comportamento recai sobre o corpo de prova S13, que manteve em duas análises o mesmo resultado. Já os corpos de prova S5, S10 e S14 apresentaram resultados distintos em réplica, resultado que pode estar relacionado à heterogeneidade dos materiais (defeitos de processamento) e não propriamente à ação dos hidrofugantes. Os corpos de provas S0 e S21 foram os classificados como críticos (pior comportamento frente à permeabilidade)

Também foram analisados os casos em que os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico (70°C) antes dos banhos de imersão nas soluções de hidrofugantes.

Os resultados comparativos após os ensaios de permeabilidade (em réplica) são apresentados na Figura 5.68 lembrando que neste caso, exceto o corpo de prova S0 não foi analisado, como mencionado anteriormente, pois este não participa da etapa de banho de imersão.

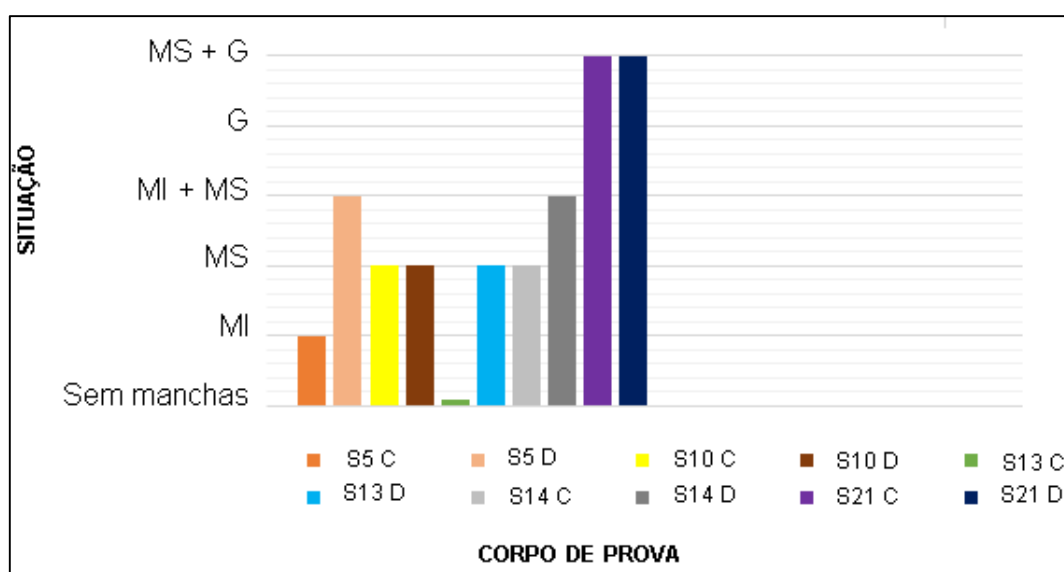


Figura 5.68 – Gráfico da classificação qualitativa dos corpos de provas tratados à temperatura de 70°C antes dos banhos de imersão em soluções de hidrofugantes, em função dos resultados (em réplica) dos ensaios de permeabilidade. MS: mancha na face superior; MI: mancha na face inferior; G: gotejamento [autoria própria].

Dos resultados da classificação qualitativa apresentados na Figura 5.68, referente ao tratamento térmico dos corpos de prova antes do banho de imersão, pode-se observar que o pior comportamento recai novamente ao corpo de prova S21, que já havia apresentado a situação crítica nos ensaios de permeabilidade com os corpos de prova à temperatura ambiente (25°) antes da hidrofugação.

Ainda o melhor comportamento, recai novamente no corpo de prova S13, corroborando com o melhor comportamento no ensaio de permeabilidade após

indução à chuva, fluxo contínuo (3 dias de água em movimento sobre o material), uma vez que já não havia apresentado nenhum tipo de mancha ou gotejamento.

Diante dos resultados, pode-se de maneira geral observar que os corpos de prova tratados à 70°C foram mais susceptíveis a apresentar manchamentos. Este fato pode estar associado à interrupção do processo de hidratação que a matriz cimentícia sofre ao longo do tempo, em comparação com os resultados obtidos para os corpos de prova mantidos à 25°C, cuja microestrutura pode ainda ser modificada pelas fases hidratadas.

Também pode-se observar que o ensaio de permeabilidade por cachimbo (regime “estacionário”) causa maior manchamento, sobretudo na face superior, comparado ao ensaio de permeabilidade por fluxo contínuo (regime “dinâmico”). Possivelmente a coluna do cachimbo, que fornece a água para a absorção, permite que ela seja absorvida de forma contínua (contato direto), comparada à situação em que ela está em movimento, simulando os pingos de chuva, e escorrendo pela superfície do material.

Após então mais essa análise qualitativa, frente aos resultados obtidos, com as considerações de temperaturas dos corpos de prova previamente ao banho de imersão (“Terceiro Resultados Geral”), selecionou-se os corpos de prova S0, S5, S13 e S14, aplicando o conceito de comparação:

- comportamento quanto à permeabilidade: ruim ou inferior (S0);
- comportamento quanto à permeabilidade: intermediária ou aceitável (S5, S14);
- comportamento quanto à permeabilidade: melhor ou superior (S13).

Ressalta-se melhor ou superior, não significa impermeável, mas que não apresentou mancha e nem gotejamento dentro das condições experimentais utilizadas.

5.6 Caracterização Microestrutural

Esta etapa se deu a partir do “Terceiro Resultado Geral”, como definido anteriormente, buscando-se analisar a interface fibra/matriz dos corpos selecionados, com o auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura na região da espessura da amostra dos corpos de prova e Microscopia Confocal na região da superfície superior.

5.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

As microestruturas das amostras dos corpos de prova selecionados S0, S5, S13 e S14 são apresentadas na Figura 5.69 e na Figura 5.70.

É importante salientar que as regiões de análises da espessura foram a de fratura da matriz e região central do corpo.

Na Figura 5.69a (aumento de 50x – 1mm), que representa o corpo de S0, foi observada delaminação no corpo total da amostra (separação entre as camadas que compõe o material). Na Figura 5.69b (aumento de 100x 500µm) da mesma região, destaca o reforço das fibras e os vazios ao redor delas e por fim, a Figura 5.69c (aumento de 500x – 100µm) apresenta fissuras e poros da matriz. Na Figura 5.69d (aumento de 50x – 1mm), que representa o corpo de S5, foi observada pequena delaminação próxima às bordas (separação entre as camadas que compõe o material). Na Figura 5.69e (aumento de 200x – 400µm) pode-se observar as fibras e vazios próximas às bordas e por fim, a Figura 5.69f (aumento de 500x – 100µm) apresenta uma região de poros na matriz cimentícia.

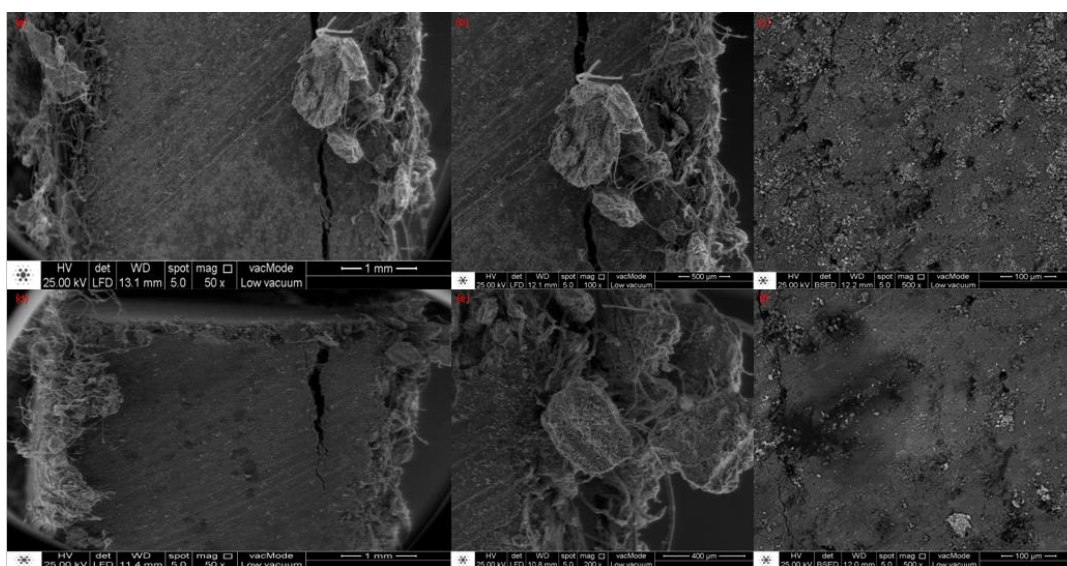


Figura 5.69 – Micrografias obtidas por Microscopia eletrônica de Varredura das superfícies de fratura de amostras de telhas onduladas de fibrocimento sem e após banhos de imersão em soluções de hidrofugantes: sequencialmente, esquerda para direita **(a, b, c)** representam o corpo de prova S0 (sem hidrofugação); **(d, e, f)** representam o corpo de prova S5 [autoria própria].

Na Figura 5.70a (aumento de 50x – 1mm), que representa o corpo de S13, foram observadas delaminações (separação entre as camadas que compõe o produto) no corpo total da amostra. A Figura 5.70b (aumento de 200x – 400µm) apresenta a superfície de fratura da matriz cimentícia com o reforço de fibras, onde se observa incrustações da matriz cimentícia nas fibras, arrancamento das fibras na matriz e vazios existentes possivelmente proporcionado durante a fratura e por fim, a figura 5.70c (aumento de 500x – 100µm) apresenta poros de na matriz cimentícia. Na Figura 5.70d (aumento de 75x – 200µm), que representa o corpo de S14, foram observadas pequenas fissuras, de forma generalizada. A Figura 5.70e (aumento de 160x – 200µm) apresenta a existência de vários vazios entre a fibra e matriz cimentícia, além de poros irregulares, aparentemente interconectados e por fim, a Figura 5.70f (aumento de 150x – 200µm) apresenta outros detalhes das fibras, vazios e poros na matriz cimentícia.

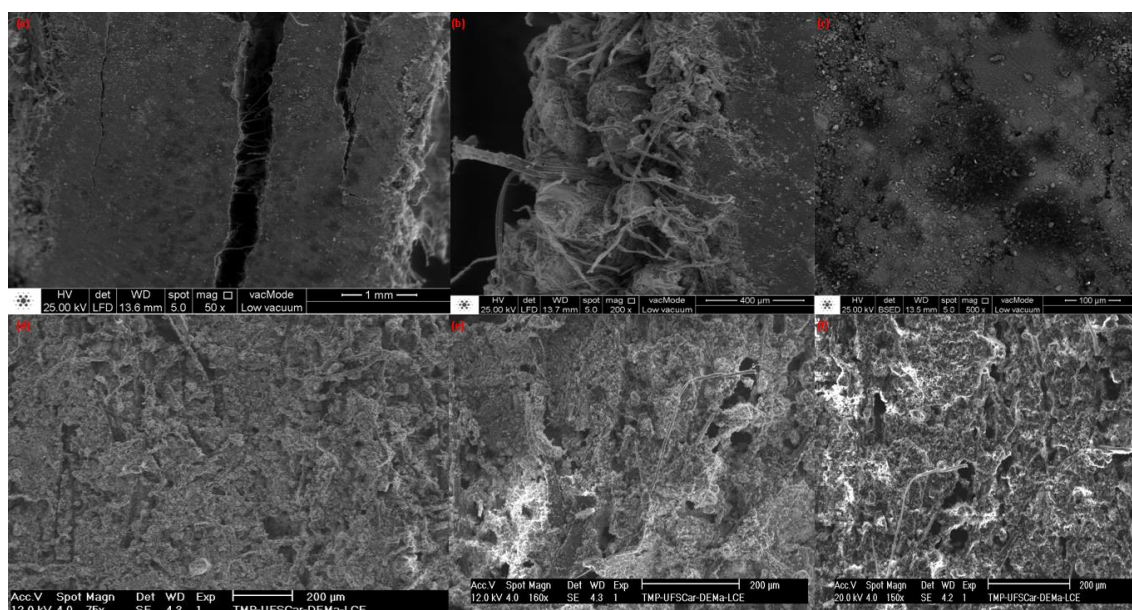


Figura 5.70 – Micrografias obtidas por Microscopia eletrônica de Varredura das superfícies de fratura de amostras de telhas onduladas de fibrocimento após banhos de imersão em soluções de hidrofugantes: sequencialmente, esquerda para direita **(a, b, c)** representam o corpo de prova S13; **(d, e, f)** representam o corpo de prova S14 [autoria própria].

5.6.2 Microscopia Confocal

Como mencionado os corpos selecionados referentes ao “Terceiro Resultado Geral” foram os corpos de prova S0, S5, S13 e S14, cujas superfícies analisadas por Microscopia Confocal são apresentadas nas Figuras 5.71 a Figura 5.74.

É importante salientar que as amostras das regiões de análises da superfície superior foram região central do corpo de prova, borda direita e borda esquerda.

Na Figura 5.71, que apresenta análise do corpo S0, pode ser observado de maneira geral a porosidade do material (poros regulares arredondados e irregulares), diferentes tipos de fibras expostas e sobretudo, vazios nas interfaces fibra/matriz.



Figura 5.71 – Micrografias obtidas por Microscopia Confocal da superfície de amostra de telha ondulada de fibrocimento: sequencialmente **(a,b,c)** corpo de prova S0 (sem hidrofugação) [autoria própria].

Na Figura 5.72a (aumento de 20x – 200 μ m), que apresenta a região central do corpo de prova S5, foi observado fibras expostas à matriz cimentícia, existências de vazios e poros de forma regulares arredondados. Na Figura 5.72b (aumento de 20x – 200 μ m) que apresenta a região da borda esquerda, foi observado trinca e existência de vazios. Na Figura 5.72c e Figura 5.72d (aumento de 20x – 200 μ m), que apresentam a região borda direita, foi observado o tamponamento parcial de alguns poros, porém apresenta a existência de vazios na interface fibra/matriz.

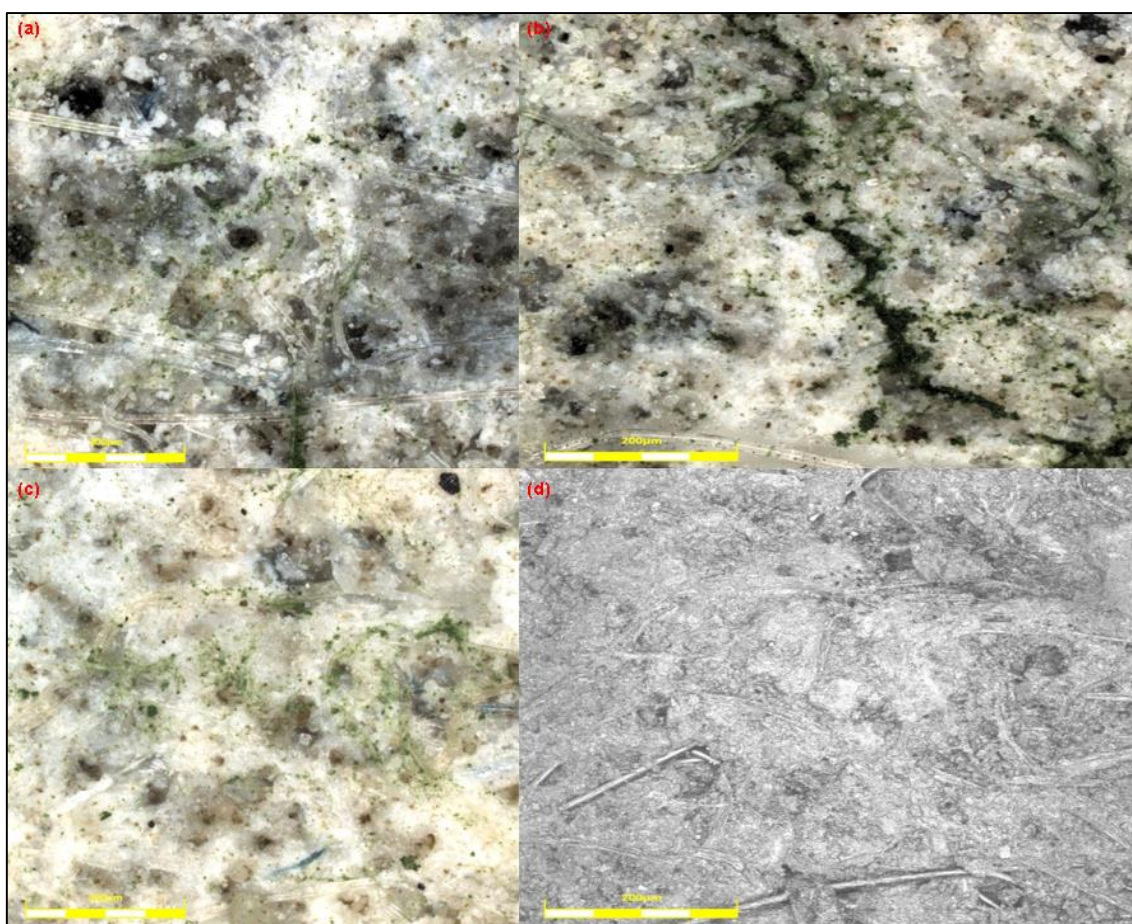


Figura 5.72 – Micrografias obtidas por Microscopia Confocal de amostra de telha ondulada de fibrocimento após banho de imersão em solução de hidrofugante: sequencialmente **(a, b, c, d)** corpo de prova S5 [autoria própria].

Na Figura 5.73a (aumento de 20x – 200 μ m), que apresenta a região central do corpo de prova S13, foi observado, existências de vazios e alguns poros de forma regulares arredondados. A Figura 5.73b (aumento de 20x – 200 μ m) apresenta a mesma região analisada na Figura 5.73a, porém com outra coloração (escala de cinza), e assim pode-se observar melhor o tamponamento parcial de alguns poros, e evidenciar mais vazios nas interfaces fibra/matriz. A Figura 5.73c e Figura 5.73d (aumento de 20x – 200 μ m), apresentam a mesma região da borda esquerda da região central, foi observado também a existência de poros e o tamponamento parcial de alguns poros, especialmente na imagem com escala de cinza.

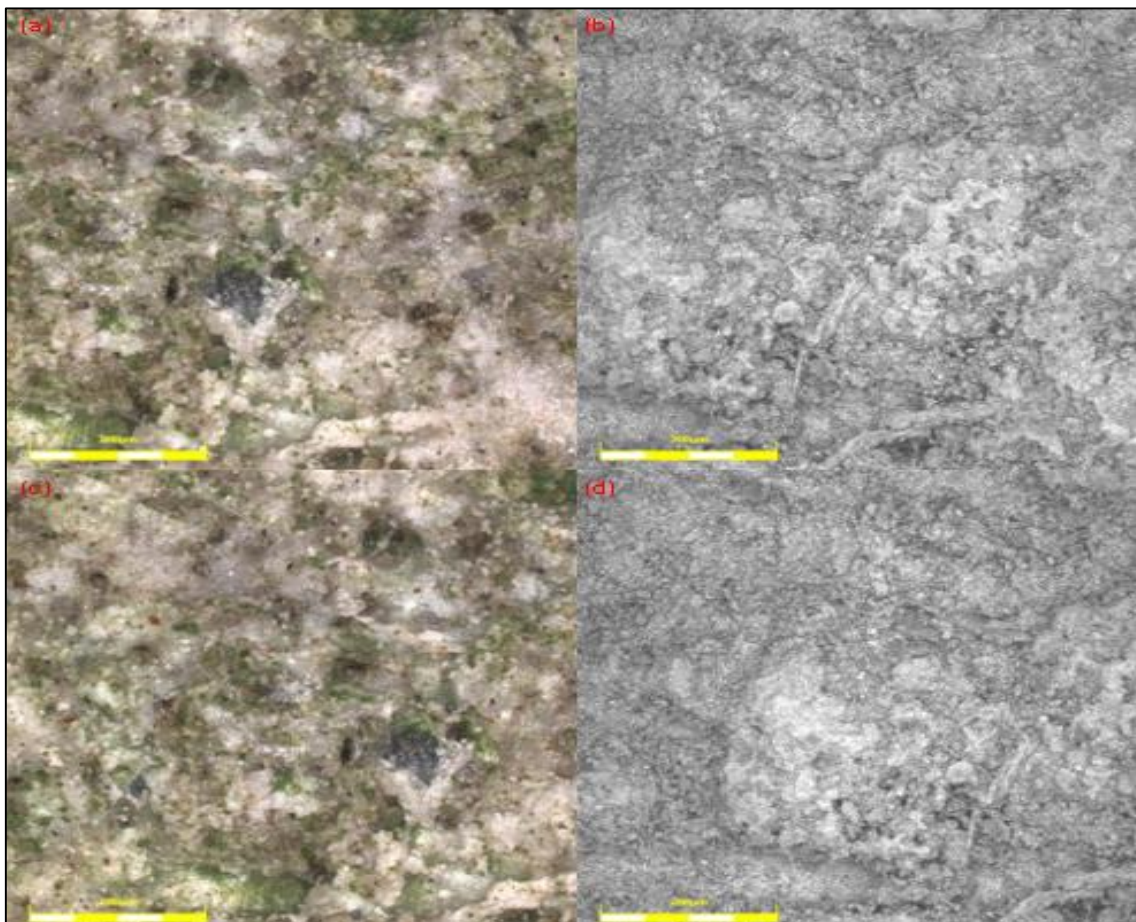


Figura 5.73 – Micrografias obtidas por Microscopia Confocal de amostra de telha ondulada de fibrocimento após banho de imersão em solução de hidrofugante, sequencialmente corpo de prova S13: **(a, b)** região central; **(c, d)** região central direcionada para região da borda esquerda [autoria própria].

Na Figura 5.74a (aumento de 20x – 200 μ m), que apresenta a região central do corpo de prova e na Figura 5.74b (aumento de 20x – 200 μ m), representa a região da borda esquerda do corpo de prova S14, foi observado em ambas a existência de vazios na interface fibra/matriz e também a exposição das fibras.

Na Figura 5.74c (aumento de 20x – 200 μ m), que apresenta a região da borda direita, foram observados poros com forma regular arredonda. A Figura 5.74d (aumento de 20x – 200 μ m), que também representa a mesma região da borda direita do corpo de prova, também revela a ocorrência de vazios na interface fibra/matriz.

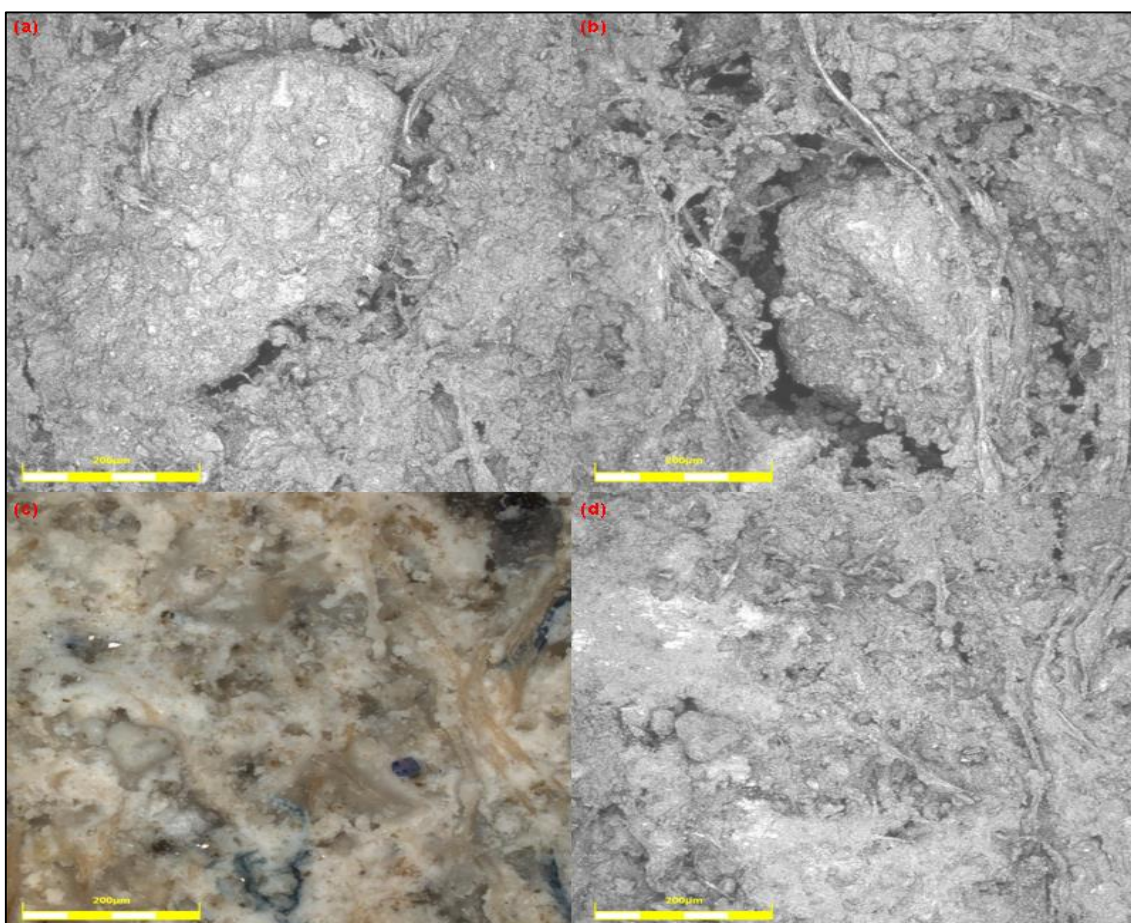


Figura 5.74 – Micrografias obtidas por Microscopia Confocal de amostra de telha ondulada de fibrocimento após banho de imersão em solução de hidrofugante, sequencialmente corpo de prova S14: **(a)** região central; **(b)** borda esquerda; **(c, d)** borda direita [autoria própria].

Diante dessas análises, pode-se de maneira geral, confirmar a existência de vazios na interface fibra/matriz em todas amostras, características praticamente inerentes ao fibrocimento devido à falta de aderência das fibras vegetais e sintéticas à matriz cimentícia.

Outro fato interessante é a morfologia dos poros, muitas vezes regulares e outras irregulares, provavelmente devido ao fato de estarem interconectados. Isto está de acordo com os resultados da distribuição de tamanho de poros (Figura 5.49) que mostrou distribuições com tamanhos variados, não bimodais, porém também não curvas não contínuas de tamanhos (pontos discretos um do outro).

Em relação às delaminações observadas, elas podem estar associadas ao processamento, ou seja, o método de conformação do produto em si, produção de camadas sobre camadas, pobre aderência entre elas e/ou evidenciadas durante a fratura das amostras.

Os corpos de provas S5 e S13 apresentaram possíveis tamponamento dos poros nas observações por Microscopia Confocal durante os ensaios experimentais propriamente ditos, ao se alterar o alinhamento e foco das lentes e as imagens mostram superfícies mais “compactadas”, isto é, mais lisas.

Ambos os corpos de prova, que também diferem nos melhores comportamentos quanto à permeabilidade, continham na composição das soluções hidrofugantes o componente silano. Esse composto, segundo a literatura melhora a adesão das (adensamento) das fibras à matriz, pois influenciar na redução do caráter hidrofílico delas, causando um melhor adensamento [11, 15].

5.7 Teste de envelhecimento acelerado

Esta etapa se aplica a partir do “Terceiro Resultado Geral”, segundo o fluxograma representado na Figura 4.1, e constou em dois tipos diferentes de envelhecimento acelerado, visando analisar a durabilidade dos corpos de prova que foram submetidos à imersão em soluções aquosas com hidrofugantes (tratamento de hidrofugação).

5.7.1 Envelhecimento Acelerado por Radiação Ultravioleta

É importante salientar o tempo de ensaio e a superfície atuante. Neste ensaio aplicou-se apenas 1 ciclo, o que equivale 1000 horas, e simula situações de 1 ano de envelhecimento do corpo de prova; as faces dos corpos de prova foram observadas, e assim, os resultados obtidos neste ensaio estão expostos na Figura 5.75 para os corpos de prova S0 e S5 e na Figura 5.76 para os corpos de prova S13 e S14, todos previamente selecionados.

A Figura 5.75a e Figura 5.75b representam respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S0 após o ensaio de envelhecimento acelerado por ultravioleta. A face superior apresentou manchamento disperso com coloração amarelada (Figura 5.75a seta 1) e mais acentuado comparativamente ao manchamento observado na superfície inferior.

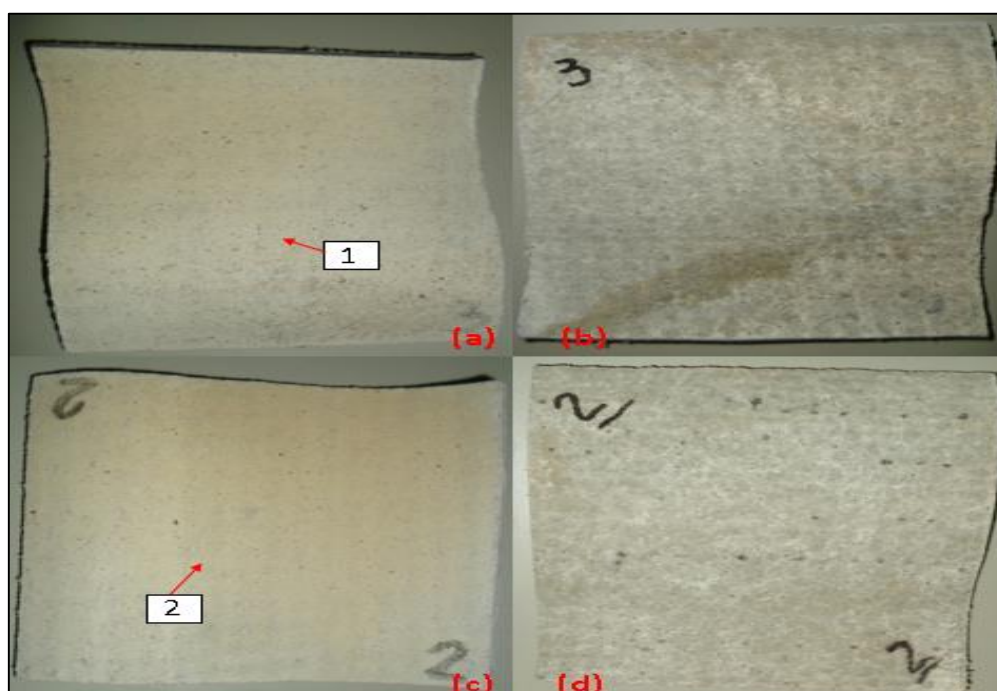


Figura 5.75 – Amostras de telhas onduladas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado por ultravioleta: **(a, b)** respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S0; **(c, d)** respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S5 [autoria própria].

Vale ressaltar que o corpo de prova SO não recebeu banho de imersão com solução de hidrofugante. A coloração amarela (mancha) pode estar associada à deterioração da matriz cimentícia e das fibras que compõem a telha de fibrocimento.

A Figura 5.75c e a Figura 5.75d apresentam respectivamente a face superior e inferior do corpo de prova S5 após o ensaio de envelhecimento acelerado ultravioleta. Este corpo de prova apresentou mancha amarelada e concentrada na face superior, na região da borda superior e central do corpo de prova (Figura 5.75c seta 2). Este manchamento pode estar associado à deterioração da matriz cimentícia e das fibras que compõem a telha de fibrocimento, além da degradação do hidrofugante utilizado no banho de imersão (impregnação), lembrando que esse corpo de prova foi submetido à hidrofugação antes do ensaio de envelhecimento.

Já considerando as imagens da Figura 5.76a e da Figura 5.76b que representam respectivamente a face superior e inferior do corpo de prova S13 após o ensaio de envelhecimento acelerado ultravioleta, pode-se observar que este corpo de prova apresentou na face superior mancha pequena, pouco dispersa com coloração amarelada (Figura 5.76a seta 1) comparada à superfície inferior (alterações pouco significativas).

A Figura 5.76c e a Figura 5.76d representam respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S14 após o ensaio de envelhecimento acelerado ultravioleta. Este apresentou na face superior mancha de coloração amarela localizada em toda a região do corpo de prova (Figura 5.76c seta 2), bem como na face inferior, embora nesse caso o manchamento (amarelado) não foi tão acentuado.

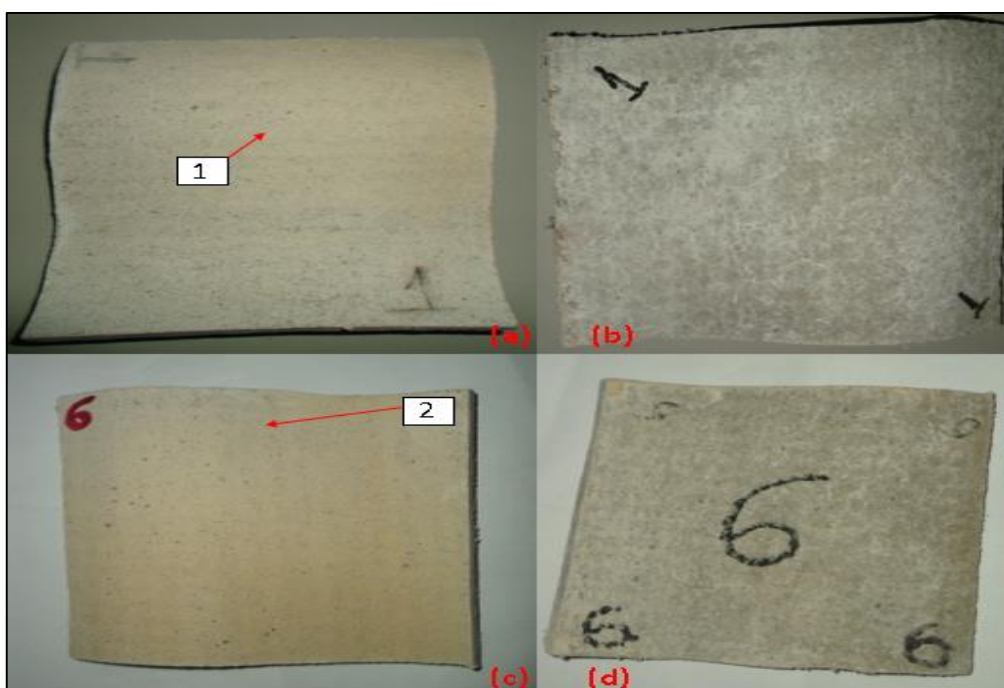


Figura 5.76 – Amostras de telhas onduladas de fibrocimento após o ensaio de envelhecimento acelerado por ultravioleta: **(a, b)** respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S13; **(c, d)** respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S14 [autoria própria].

Diante disso, pode-se observar que os corpos de provas S5 e S14 apresentaram manchas maiores e mais concentradas em todas as regiões do corpo de prova, comparativamente ao corpo de prova S0 (sem hidrofugação) e ao corpo de prova S13 que apresentaram comportamento similares.

Vale lembrar que o corpo de prova S5 teve um teor elevado de resina acrílica na solução hidrofugante comparado ao corpo S13, e o corpo S14 uma solução de siloxano, compostos que podem ter contribuído para manchamento.

5.7.2 Envelhecimento Acelerado por Ciclos de Imersão em Água e Secagem

É importante salientar o tempo de ensaio e superfície atuante, neste ensaio: aplicou-se 50 ciclos o que equivale 1200 horas, ou seja, cada ciclo constitui

24 horas, simulando situações de aproximadamente 1 ano de durabilidade do corpo de prova. As faces superior e inferior foram analisadas. Os resultados são apresentados nas imagens da Figura 5.77 e da Figura 5.78.

A Figura 5.77c e a Figura 5.77d representam respectivamente a face inferior e face superior do corpo de prova S0 após o ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem. Ambas as faces apresentaram escurecimento do corpo de prova, comparativamente às faces antes do ensaio (Figura 5.77a e Figura 5.77b).

Já a Figura 5.77g e a Figura 5.77h, representam respectivamente as faces inferior e superior do corpo de prova S5 após o ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem. Também pode ser observado um escurecimento em ambas as faces, comparativamente à coloração antes do ensaio (Figura 5.77e e Figura 5.77f), comportamento similar ao corpo de prova S0 (sem hidrofugação).

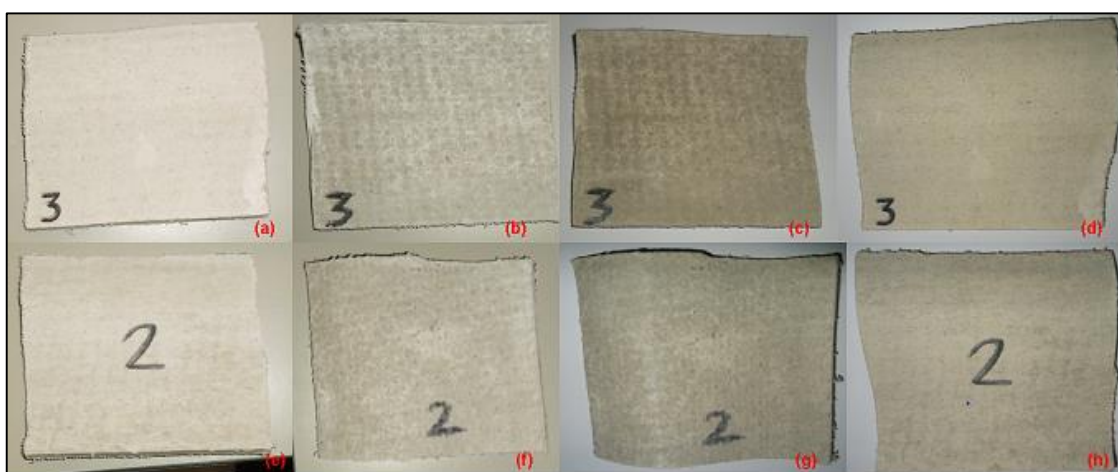


Figura 5.77 – Corpos de provas do ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem: **(a, b)** respectivamente faces superior e inferior do corpo de prova S0 antes do ensaio; **(c, d)** respectivamente faces inferior e superior do corpo de prova S0 após o ensaio; **(e, f)** respectivamente faces superior e inferior do corpo de prova S5 antes do ensaio; **(g, h)** respectivamente faces inferior e superior do corpo de prova S5 após o ensaio [autoria própria].

As Figuras 5.78c e 5.78d representam respectivamente as faces inferior e superior do corpo de prova S14 após o ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem. Ambas as faces apresentaram escurecimento do corpo de prova, comparado às faces antes do ensaio (Figura 5.78a e Figura 5.78b).

Já a Figura 5.78g e a Figura 5.78h, que representam respectivamente as faces inferior e superior do corpo de prova S13 após o ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem, apresentaram em ambas as faces o escurecimento do corpo de prova, comparativamente aos corpos de prova antes do ensaio (Figura 5.78e e Figura 5.78f).

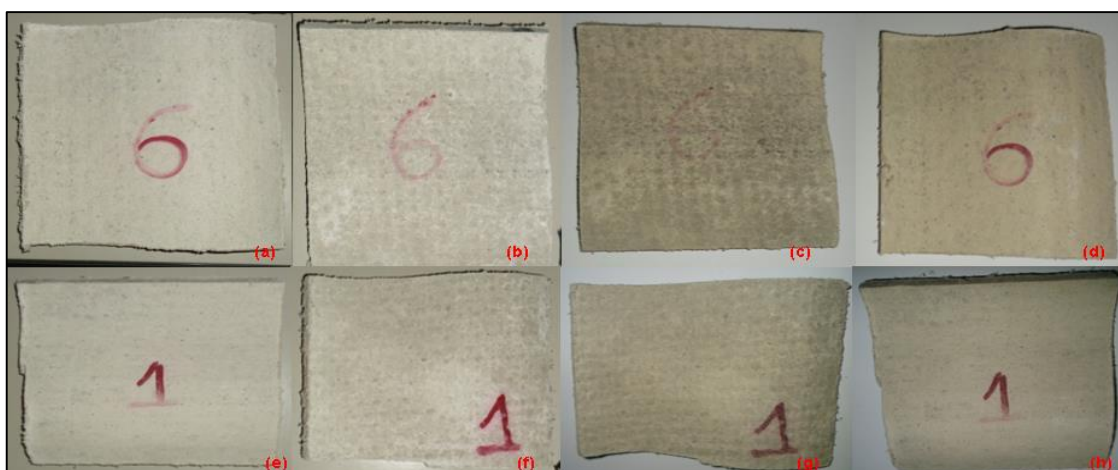


Figura 5.78 - Corpos de provas do ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem: (a, b) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S14 antes do ensaio; (c, d) respectivamente face inferior e superior do corpo de prova S14 após o ensaio; (e, f) respectivamente face superior e inferior do corpo de prova S13 antes do ensaio; (g, h) respectivamente face inferior e superior do corpo de prova S13 após o ensaio [autoria própria].

Esse tipo de escurecimento das faces dos corpos de prova, incluindo o corpo de prova sem hidrofugação, deve estar associado à deterioração das fibras vegetais e sintéticas, que compõem o material.

5.8 Ensaio e Caracterizações Finais

5.8.1 Permeabilidade

Para maior precisão de resultados e análises significativas relacionadas à permeação à água, realizou-se no ensaio de permeabilidade utilizando cachimbo e água deionizada (25 mL) após o envelhecimento acelerado dos corpos de prova. Neste caso, adotou-se o procedimento exato da norma NBR - 7581, a qual indica este tipo de ensaio por período de 24 horas. Os resultados são apresentados na Figura 5.79 e na Figura 5.80.

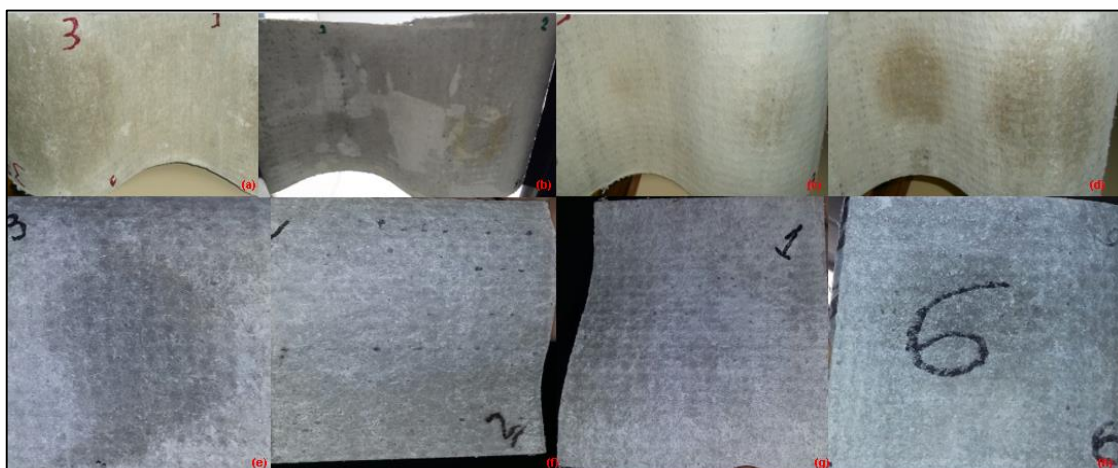


Figura 5.79 – Comparação em relação ao ensaio de permeabilidade à água dos corpos de provas: **(a, b, c, d)** respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 sem sofrer envelhecimento acelerado; **(e, f, g, h)** respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta [autoria própria].

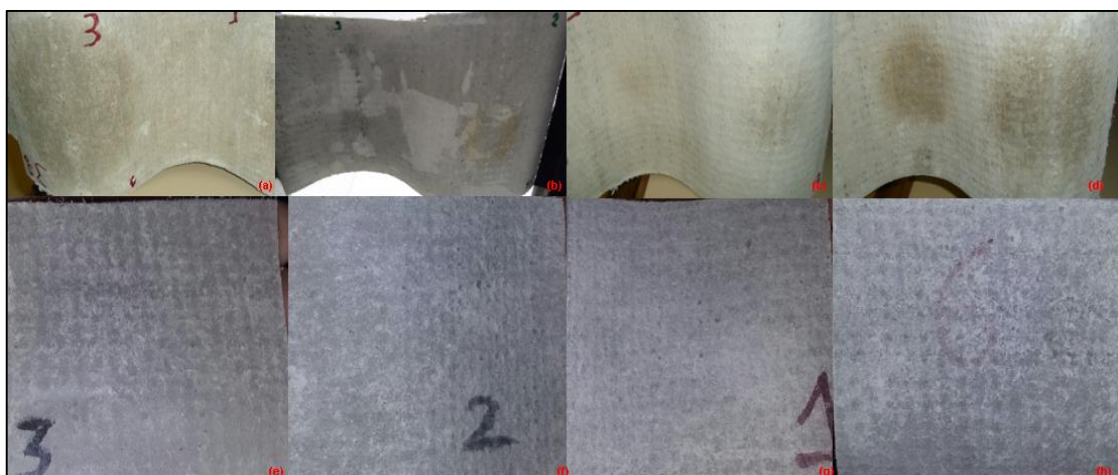


Figura 5.80 – Comparação em relação ao ensaio de permeabilidade à água dos corpos de provas: **(a, b, c, d)** respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 sem ensaio de envelhecimento acelerado por imersão e secagem; **(e, f, g, h)** respectivamente face inferior após 24h de ensaio de permeabilidade dos corpos S0, S5, S13 e S14 após o envelhecimento acelerado por imersão e secagem [autoria própria].

De forma comparativa, pode-se observar que todos os corpos de prova apresentaram manchamento antes e após o ensaio de envelhecimento por radiação ultravioleta. Vale ressaltar, no entanto, que o corpo de prova S0 apresentou gotejamento, o que não é permitido segundo a NBR7581.

De forma semelhante e comparativa também é importante deixar claro que após o ensaio de envelhecimento acelerado por imersão em água e secagem, todos os corpos de prova apresentaram manchamento devido à permeabilidade à água. Neste caso, não só o corpo de prova S0, mas também o corpo S14, apresentaram gotejamento.

Assim, com o procedimento indicado pela norma, permeabilidade no período de 24hs, não é evidente se houve ou não degradação severa do material, exceto pelo corpo de prova S14 que passou a apresentar gotejamento após o envelhecimento cíclico imersão-secagem; vale lembrar que neste caso a solução hidrofugante utilizada foi de siloxano, que pode ter degradado. Essa composição

já havia demonstrado baixa resistência no envelhecimento por radiação ultravioleta, causando completo amarelamento nas faces do corpo de prova.

5.8.2 Absorção de água e porosidade aparente

A absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova selecionados também foram analisadas após o ensaio de envelhecimento acelerado. Os resultados são apresentados na Figura 5.81 e na Figura 5.82, respectivamente.

Por meio dos resultados das análises de absorção de água e porosidade aparente, pode-se observar claramente o efeito do envelhecimento na durabilidade dos materiais. Para todos os corpos de prova analisados, que representam indiretamente soluções hidrofugantes aplicadas nas amostras de telhas onduladas de fibrocimento por imersão, houve um aumento nos valores de absorção de água e de porosidade após ambos os ensaios de envelhecimento. No entanto, efeito do envelhecimento por imersão em água e secagem, cíclico, foi mais drástico que o efeito causado pelo envelhecimento por radiação ultravioleta, afetando (degradando) de alguma maneira a microestrutura das amostras de telhas.

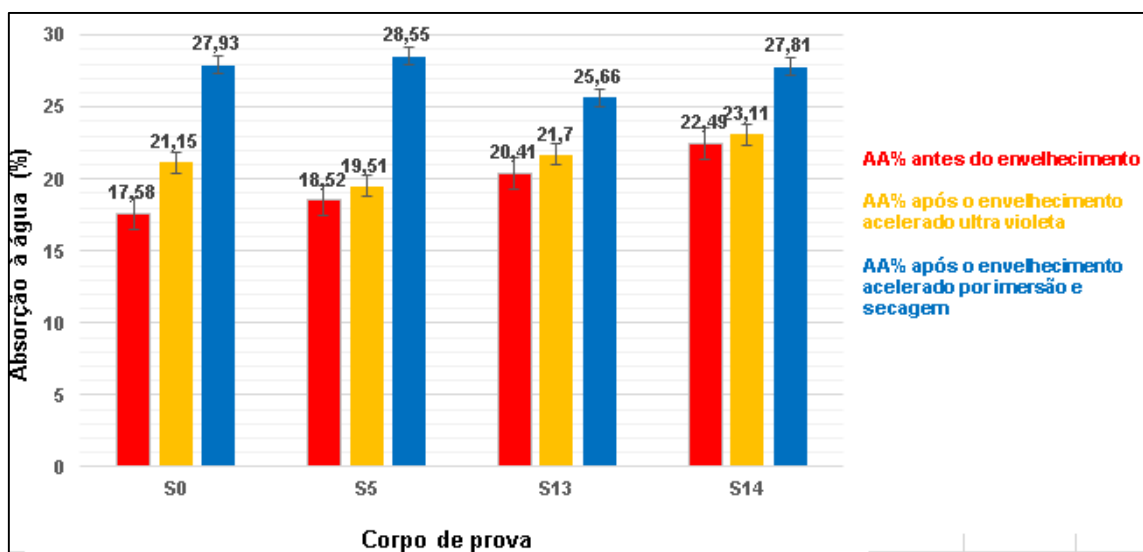


Figura 5.81 – Absorção de água (%) dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas selecionados, antes e após os ensaios de envelhecimento por radiação ultravioleta e por imersão em água e secagem (cíclico) [autoria própria].

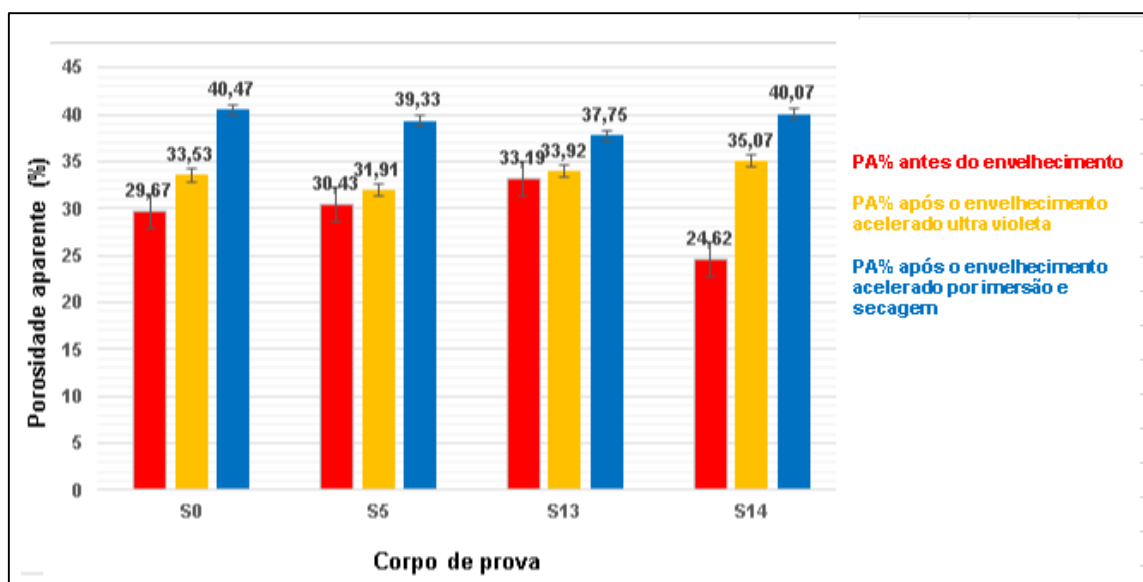


Figura 5.82 – Porosidade Aparente (%) dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas selecionados, antes e após os ensaios de envelhecimento por radiação ultravioleta e por imersão em água e secagem (cíclico) [autoria própria].

5.8.3 Resistência Mecânica à Flexão a Três Pontos

A resistência mecânica à flexão a três pontos dos corpos de prova selecionados também foi avaliada após o ensaio de envelhecimento acelerado. Os resultados são apresentados na Figura 5.83, e é possível observar novamente os efeitos causados por ambos ensaios de envelhecimento na microestrutura dos materiais. Acompanhando os resultados referentes à absorção de água e porosidade aparente, o ensaio por imersão em água e secagem, foi o mais drástico e acentuado, sobretudo, no corpo de prova S14 (siloxano).

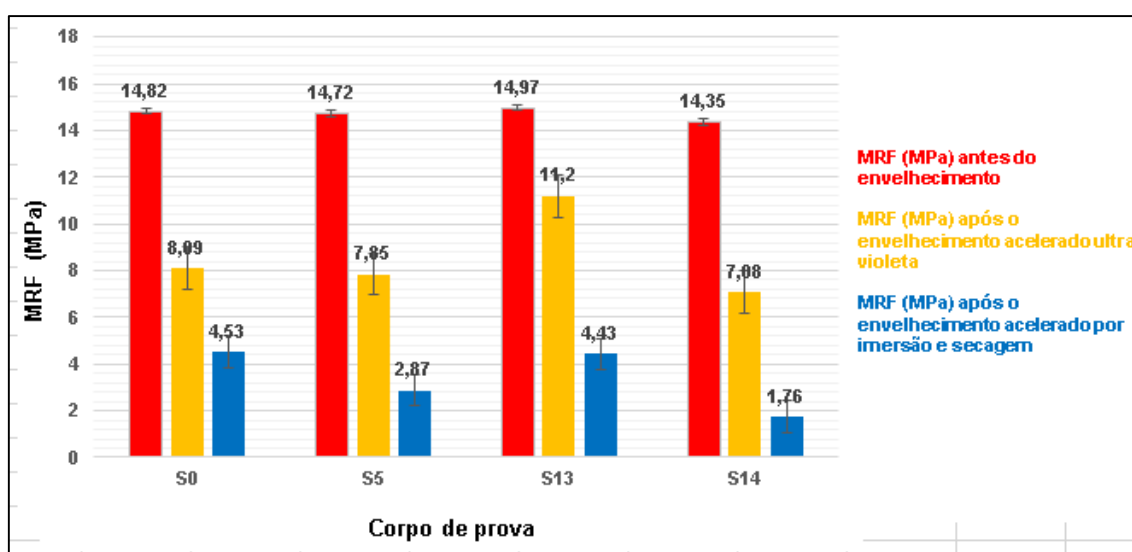


Figura 5.83 – Resistência Mecânica à flexão a três pontos dos corpos de prova de telhas onduladas de fibrocimento hidrofugadas selecionados, antes e após os ensaios de envelhecimento por radiação ultravioleta e por imersão em água e secagem (cíclico) [autoria própria].

5.8.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

As microestruturas dos corpos de prova selecionados também foram analisadas após o ensaio de envelhecimento acelerado.

Para esta etapa foram analisadas apenas os corpos de prova após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta, por simular, isto é, se aproximarem mais das condições climáticas de empresa de telhas onduladas de fibrocimento, apesar do efeito desse envelhecimento ter sido mais brando ao material comparado com o envelhecimento por imersão seguido de secagem.

As micrografias obtidas são apresentadas nas imagens da Figura 5.84 a Figura 5.87. É importante salientar que a região analisada, em cada caso, foi a face, com foco na interface fibra/matriz, com a finalidade de observar a existência de vazios, poros interconectados ou a existência de trincas de superfície causadas pelo envelhecimento.

Na Figura 5.84a, correspondente ao corpo de prova S0, pode-se observar as fibras expostas à matriz cimentícia, demonstrando o arrancamento delas pela falta de aderência além de fissuras. Figura 5.84b e Figura 5.84c mostram vazios (poros) e fissuras ao redor. Análises por EDS só apontaram majoritariamente elementos cálcio e silício como era de se esperar na matriz cimentícia.

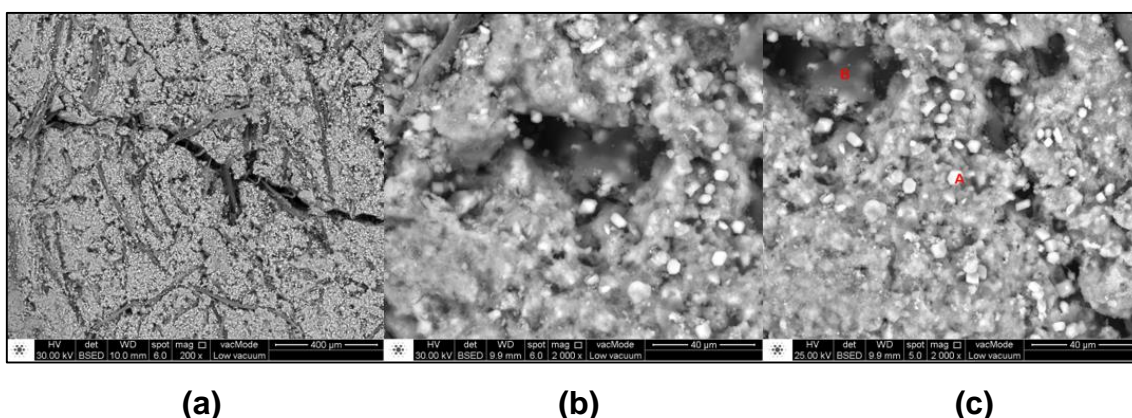


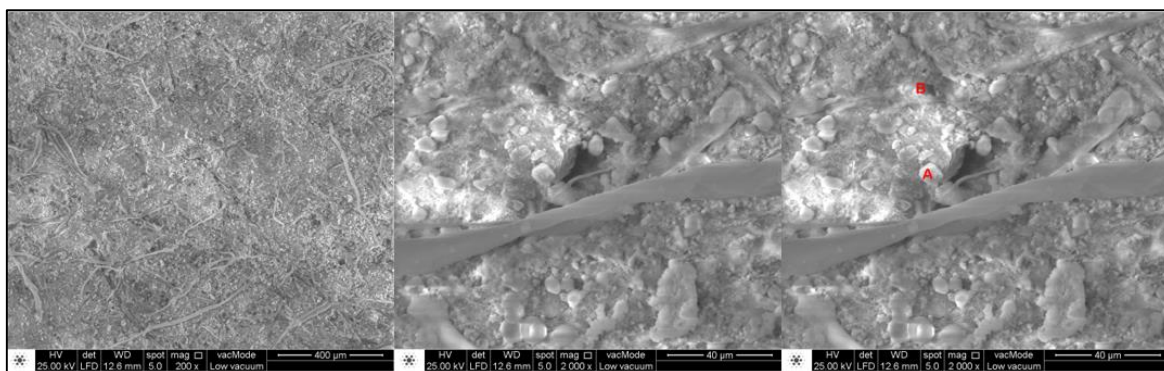
Figura 5.84 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S0 (sem hidrofugação) após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta [autoria própria].

Na Figura 5.85a, correspondente ao corpo de prova S5, pode se observar as fibras soltas exposta à matriz cimentícia (falta de aderência na interface) e a Figura 5.85b mostra a formação de pequenos vazios próximos as fibras. Análise química elementar por EDS na região clara (Figura 5.85c) está apresentada na Tabela 5.5 e, possivelmente, refere-se a presença de CaO não reagido ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ resultante do processo de hidratação do cimento.

Tabela 5.5 – Análise química elementar obtida por EDS nos pontos analisados A e B da Figura 5.85c.

Ponto A			Ponto B		
Elementos	% Massa	At%	Elementos	% Massa	At%
O	48,01	59,45	O	47,84	59,44
Ca	36,1	17,84	Ca	36,24	17,97
C	12,07	19,91	C	11,72	19,4
Si	1,92	1,35	Si	1,47	1,04

Fonte: [autoria própria].



(a)

(b)

(c)

Figura 5.85 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S5 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta [autoria própria].

Na Figura 5.86, correspondente ao corpo de prova S13, apesar de ter sido o melhor caso analisado em todos os ensaios, pode-se observar as fibras exposta à matriz cimentícia (Figura 5.86a), e a falta de aderência na interface fibra/matriz que leva à formação de pequenos vazios (Figura 5.86b), similar aos resultados reportados na literatura (Figura 3.9) [21].

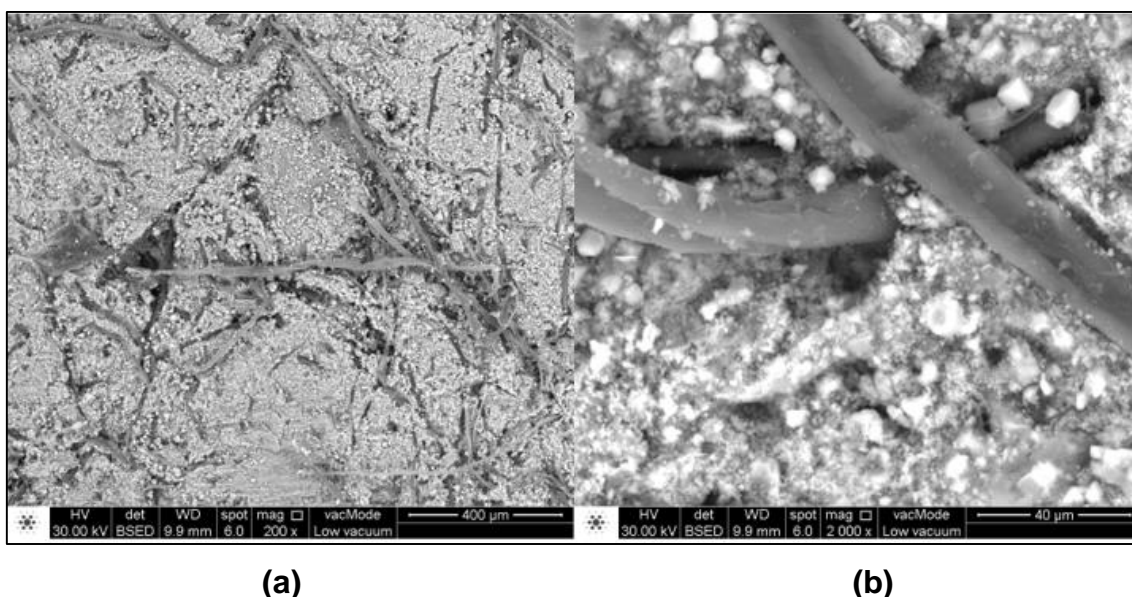


Figura 5.86 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S13 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta: **(a)** detalhes das fibras; **(b)** detalhes da interface fibra/matriz [autoria própria].

Na Figura 5.87, correspondente ao corpo de prova S14, pode-se observar na Figura 5.87a e Figura 5.87b que as fibras estão soltas da matriz cimentícia, a existência de vazios, arrancamento e quebra das fibras, possivelmente ocorridos durante a fratura do material. As imagens da Figura 5.87c e Figura 5.87d, no entanto, ilustram a formação das agulhas de etringita (C_6ASH_{32}) desenvolvidas nos vazios dos poros. A análise química obtida por EDS no ponto claro da Figura 5.87d, ponto A (Tabela 5.6), possivelmente se refere à presença de CaO não reagido ou $Ca(OH)_2$ resultante do processo de hidratação do cimento.

Tabela 5.6 – Análise química elementar obtida por EDS no ponto A (Figura 5.87d).

Ponto A (Figura 5.87)		
Elementos	% Massa	At%
O	49,25	60,80
Ca	36,3	17,89
C	11,79	19,38
Si	1,49	1,05

Fonte: [autoria própria].

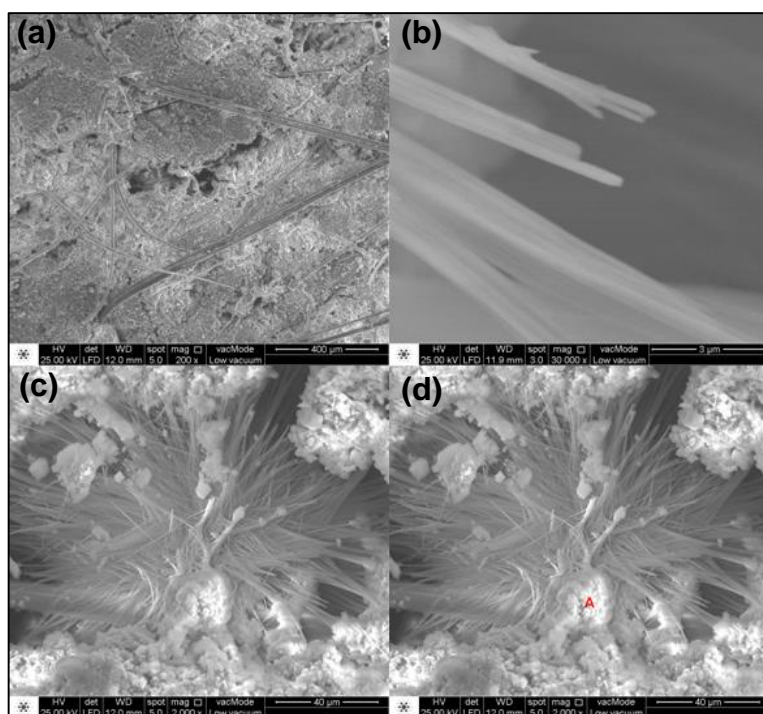


Figura 5.87 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra do corpo de prova S14 após o ensaio de envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta: **(a,b,c,d)** detalhes microestruturais, fibras, vazios, interface fibra/matriz cimentícia e fase cristalina etringita (C_6ASH_32) [autoria própria].

Dessa forma, ao longo do desenvolvimento experimental deste trabalho, pôde-se, passo a passo, ir selecionando as melhores soluções hidrofugantes aplicadas a telhas onduladas de fibrocimento. Levou-se sempre em consideração a heterogeneidade microestrutural, e as variações entre os

resultados das caracterizações realizadas de amostra a amostra, mesmo sabendo a procedência de um mesmo lote de fabricação.

Essas heterogeneidades podem ser devido às composições complexas da massa (cimento, fibras vegetais, fibras sintéticas, aditivos inorgânicos controladores da reologia) e do próprio processamento em si.

No entanto, a seleção das soluções hidrofugantes basearam-se sempre na reprodutibilidade dos resultados, feitos nos ensaios em réplica e valores médios com seus respectivos desvios.

6 CONCLUSÃO

Telhas onduladas de fibrocimento sem amianto são materiais versáteis, se destacam no mercado pela sua economia, porém apresentam problemas relacionados a infiltração que podem originar manchas em suas faces e gotejamento de água. Neste sentido, este trabalho buscou gerar contribuições para que esses problemas possam ser minimizados. Isso se deu utilizando a técnica de imersão em soluções com hidrofugantes, com o objetivo de reduzir o comportamento hidrofóbico das fibras (vegetais e sintética) que estão presentes no material, e que são responsáveis pela baixa aderência fibra/matriz que resultam em vazios.

Nas condições e procedimentos adotados nesse estudo pode-se concluir que:

- O tratamento de hidrofugação permitiu que uma telha que não atendia as exigências da NBR 7581 atendesse as exigências;
- Além de atender os requisitos da NBR 7581, os banhos proporcionaram melhorias das propriedades;
- Um tratamento de hidrofugação realmente se faz necessário, dado que telhas como processadas exibem manchamentos nas faces superior e inferior, nas superfícies côncava e convexa, além de exibirem gotejamentos (comportamento apresentado pelas amostras *in natura* (S0);
- Tempos de banhos de imersão em soluções hidrofugantes em períodos maiores são vistos como potencialmente adequados por permitirem maior penetração (absorção) das soluções no material.
- A adição de íons metálicos no banho de imersão, favorecem a inspeção (caracterização) da penetração dos hidrofugantes no interior do material e podem resultar em efeitos estéticos que diminuem a visibilidade de manchamento caso ocorram, nesse caso, coloração verde proporcionada pela adição de óxido de cromo (Cr_2O_3);

- A análise de permeabilidade à água segundo a metodologia da norma NBR7581 que utiliza cachimbo (coluna de água) fixado à face superior da amostra, é mais eficaz do que a análise por água em movimento (corrente);
- O uso de azul de metileno como agente colorífico da água do ensaio de permeabilidade, permite a visualização mais precisa dos manchamentos frente à água deionizada sem adição;
- Soluções na concentração de 1% em massa de hidrofugantes baseadas em siloxano, silano com resina acrílica copolimerizada à base d'água são bastante promissoras para evitar manchamento e/ou gotejamento, inclusive após envelhecimento (maior durabilidade), e em comparação a outro produto comercial disponível no mercado para a mesma finalidade.

Desta forma, esse estudo mostrou, por meio dos resultados de análises quantitativa, qualitativa e comparativa que a etapa de banho de imersão de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, é viável e pode ser aplicada industrialmente, sem prejuízo à produção, pois banhos com agentes fungicidas já são realizados pelos grandes produtores.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do estudo realizado pode-se observar alguns pontos que merecem uma investigação mais minuciosa. Dentre eles destacam-se:

- Avaliar a eficácia de soluções aquosas com hidrofugantes mais concentradas, isto é, superiores a 1% em massa de agente hidrofugantes;
- Avaliar a existência e eficácia de outros agentes comerciais por esse método de imersão na solução, uma vez que muitos são disponíveis para serem adicionados a massa (normalmente argamassas e concretos), porém isto pode interferir no processo de conformação;
- Avaliar a eficácia dos agentes hidrofugantes de melhor performance nesse estudo (silano e silano com resina acrílica copolimerizada à base d'água) em ambientes salinos (regiões litorâneas);
- Avaliar o efeito de íons cromóforos nas soluções hidrofugantes de forma a proporcionarem efeitos estéticos que minimizam a observação de manchamento, ou seja, produção de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto coloridas, um anseio desse setor produtivo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Darsana, P; Ruby, A; Anu, J; Arakkal, J; Binuraj P. R; Jithin, S. Development of Coir-Fibre Cement Composite Roofing Tiles. **Procedia Technology**, v. 24, p. 169-178, 2016.

[2] Brasil. Projeto de Lei nº 6.615, 1º parágrafo, 1º artigo, de 2016. Proíbe, em todo o território nacional, a extração, produção, industrialização, utilização e comercialização do amianto, bem como de produtos ou subprodutos derivados dessa substância. **Coleção de Leis da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2016.

[3] Brasil. Decreto 126 do P.L 6.715, 2º parágrafo, 10º artigo, de 22 de maio de 1991. Substituição do amianto ou de certos tipos de amianto ou de certos produtos que contenham amianto por outros materiais ou produtos, ou, então, o uso de tecnologias alternativas desde que submetidas à avaliação científica pela autoridade competente e definidas como inofensivas ou menos perigosas. **Coleção de Leis da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1991.

[4] Ikai, S; Reichert, J.R; Rodrigues, A.V; Zampieri, V.A. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 171-180, fev. 2010.

[5] Coelho, T. C.C. **Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto**. 2017.189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil área de Construção). Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2017.

[6] Coelho, T. C. C; Gomes. C. E. M; Dornelles, K. A. Desempenho térmico e absorvância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v.17, n.1, p. 147-161, jan/mar. 2017

- [7] Silva, F. A.; Nikhilesh, C.; Toledo, F. R. D. Mechanical Behavior of Natural Sisal Fibers. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, s.l. v.4, 2010.
- [8] Dias, C. M. R.; Cincotto, M. A.; Savastano Junior, H.; John V. M. Envelhecimento de longo prazo de telhas onduladas de fibrocimento - O efeito da carbonatação, lixiviação e chuva ácida. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 255–265, 2008.
- [9] Sagués, A. A.; Moreno, E. I.; Morris, W.; Andrade, C. **Carbonation in Concrete and Effect on Steel Corrosion**. 1997. 255f. Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, 1995.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7581**: Telha ondulada de fibrocimento. Rio de Janeiro, 1992.
- [11] Maranhão, F. L. **Método para redução de manchas nas vedações externas de edifícios**. 2009. 107f. Tese (Doutorado em Engenharia). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [12] Savastano Junior, H; Agopyan, V; Nolasco, A. M; Pimentel, L. L. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction & Building Materials**, v.13, p. 433-438. ago. 1999.
- [13] Artigas, L. V. **Fibrocimento**. Seminário materiais de construção civil III, 2013, Paraná: Universidade Federal do Paraná – setor de tecnologia, 2013.
- [14] Henriques, J. D. O; Rambalducci, R. G; Pin, T. C; Frechian, V. V; Puget, F. P. Avaliação da viabilidade técnica de produção de telha de fibrocimento usando fibras alternativas. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química** - Florianópolis, SC, p.1-8, 2014.
- [15] Kus, H. **Long - term performance of water repellants on rendered autoclaved aerated concrete**. 2002. 89f. Tese (Doutorado em Engenharia), Department of Engineering, University of Gävle, 2002.
- [16] Dias, C. M. R. **Fibrocimento com gradação funcional**. 2011. 156f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- [18] Oliveira, I. R; Studart, A. R; Pileggi, R. G; Pandolfelli, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico, **Fazendo Arte Editorial**, São Paulo, SP, p. 224, 2000, ISBN 85-86425-15-x.
- [19] Associação Brasileira de Cimento Portland. **Boletim Técnico: guia básico de utilização do cimento Portland**. 7ed. São Paulo, SP, p. 28, dez.202, ISBN 85-87024-23-x.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1990.
- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5735**: Cimento Portland de Alto forno. Rio de Janeiro, 1990.
- [22] Cimento Portland: conheça os tipos, vantagens de cada um e saiba usar. **AEC – arquitetura, engenharia e construção**. Boletim de informações. Disponível em:< <http://blogaecweb.com.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- [23] Pereira, A. C; Kloster, C. S; Sobrinho, J. L. S; Lanini, T. L. S; Rigon, U. M. M. **Cimento Portland**, Universidade do Estado do Mato Grosso, Sinop, MT, p. 19, 2013.
- [24] Martins, A; Mercadé, S. R; Aoki, J; Madi, F; Marcondes, C. G; Neves, I.F. **Cimento**. Cimento Itambé, Curitiba, PR, p. 20, 2010.
- [25] Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado. Cimento Mauá. 2017. Disponível em:< <https://cimentomaua.com.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- [26] Cimento Itambé. Disponível em:<<https://www.cimentoitambe.com.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- [27] Pereira, C. **Tipos de cimentos: características e especificações**. Escola de engenharia, 2019. Disponível em:< <https://www.escolaengenharia.com.br/>>. Acesso em: 18 mar. 2019.

- [28] Lucena, A. **Conheça todos os tipos de cimento Portland**. Engenharia 360. 2018. Disponível em: < <https://engenharia360.com/>>. Acesso em: 18 mar. 2019.
- [29] Savastano Junior, H; Santos, S. F. **Produtos de fibrocimento**. Instituto brasileiro do concreto – IBRACON. Materiais de construção civil, Ed: Geraldo C. Isaia, s.d., cap. 31.
- [30] E-book Catálogo de produtos CRH. Disponível em:< www.crhbrasil.com.br>. Acesso em: 18 mar. 2019.
- [31] Mano, E. **Introdução a polímeros**, 2edição. São Paulo, brasil: editora Edgard Blucher LTDA, p. 208, 1999.
- [32] Araújo, C. T. F. **Estudo do comportamento de juntas de argamassa reforçadas com fibras de polipropileno**. 2005. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2005.
- [33] Guimarães, D. **Pisos industriais em concreto: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos**. 2010. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.
- [34] Naaman, A. E. New fiber technology: cement, ceramic and polymeric composites. **Concrete International**. v. 20, n. 7, 57-62, jul. 1998.
- [35] Gonilho-Pereira, C., Faria, P. Fangueiro, R., Vinagre, P. and A.Martins. Cement based fiber – reinforced mortar: the fiber influence on the mortar performance. **XI Congresso Luso Moçambicano Engenharia**, p. 2-3, ago. 2011.
- [36] Jevtić, D; Zakić, D; Savić, A. Modeling of properties of fiber reinforced cement composites. **Facta Universitatis**, series: Architecture and Civil Engineering, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Serbia. v. 6, n. 2, p. 165-172, 2008, DOI: 10.2298/FUACE0802165J.

- [37] Takahashi, T. Tsurunga, Y. Kondo, T. Fabrication of highly isotactic polypropylene fibers to substitute asbestos in reinforced cement composites and analysis of the fiber formation mechanism. **Applied Polymer Science**. p. 981-988, jul. 2013.
- [38] Canevaloro Jr, S. V. **Ciência dos polímeros – um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. Ed.2 – revista e ampliada. São Paulo, Brasil: Artliber, p. 278, 2006.
- [39] Zhang, P; Qingfu, L; Haiyang, Z. Combined effect of polypropylene Fiber and silica fume on mechanical properties of concrete composite containing fly ash. **Reinforced Plastics and Composites**, v. 30, n. 16, p. 1350-1358, 2011.
- [40] Won, J. P; Lim, D. H; Park, C. G. Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete. **Concrete Research**, v. 58, n. 6, p. 401-410, mai. 2015.
- [41] Hisham A; Maddah. Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. **American Journal of Polymer Science**, v. 6, n. 1, p. 1-11, 2016, DOI: 10.5923/j.ajps.20160601.01.
- [42] Won, J. P; Kim, J. H; Lee, S. W; Park, C. G. Durability of low-heat, ultra rapid-hardening, latex-modified polymer concrete. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, Smithers Rapra Technology**. v. 15, n. 2, p. 91-102, may. 2009, DOI: 10.1177/147776060902500201.
- [43] Won, J. P; Kim, C. G; Park, J. W; Kang, H; Kim, Y. Shrinkage cracking of styrene butadiene polymeric emulsion-modified concrete using rapid-hardening cement. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 112, n. 4, may. 2009, DOI: 10.1002/app.29733
- [44] Silva, A. L. M. F. **Influência de aditivo polimérico no comportamento mecânico e reológico das argamassas produzidas com rejeitos industriais**. 2015. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

- [45] Bezerra, E. M. **Compósitos de matriz cimento Portland reforçados com fibras sintéticas de PVA/ PP/ PAN**. 2005. 123f. Tese (Doutorado de Engenharia Aeronáutica e Mecânica – área física e química dos materiais aeroespaciais), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.
- [46] Khan Academy. **Grupos Funcionais**. Disponível em:< <https://pt.khanacademy.org/>>. Acesso em: 20 mai. 2018.
- [47] Savastano Junior., H; Agopyan, V. Transition zone studeis of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement and Concrete Composites.**, v.21, n. 1, p. 49-57, mar.1999.
- [48] Domone, P; Illston, J. M. Construction materials: their nature and behaviour. Ed. 4, **Libray of Congress Cataloging –in – Publication Data**, 2010, ISBN: 0-203-92757-5.
- [49] Santos, F. A; Queiróz, J. H; Colodette, J. L; Fernandes, S. A; Guimarães, V. M; Rezendes, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v.35, n. 5, jan. 2012, ISBN: 1004-1010.
- [50] Silva, R.; Haraguchi, S. K.; Muniz, E. C.; Rubira, A. F.; Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v.32, n. 3, abr. 2009, ISBN: 661 – 671.
- [51] Ogeda, T. L.; Petri, D. F. S.; Hidrólise enzimática de biomassa. **Química Nova**, v.33, n. 7, jul. 2010, ISBN: 1549-1558.
- [52] Boerjan W.; Ralph J.; Baucher M. Lignin Biosynthesis. **Annual Review Plant Biology**.v.54, p.519-546, jun. 2003, ISBN: 519-546.
- [53] Agopyan, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. 1991. Tese (Doutorado Livre-Docência), Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1991.
- [54] Picanço, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 2005. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

- [55] Silva, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos laminados com fibras vegetais**. 2011. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de São João del Rei, Minas Gerais, São João del Rei, 2011.
- [56] De Paoli, M. A. **Substituição de fibra de vidro por fibras vegetais**. In: 6º Seminário das Comissões Técnicas da ABPol, 2002.
- [57] Savastano Junior., H. **Fibras vegetais para construção civil: a fibra de coco**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, n.4, p. 1-16, 1986.
- [58] Brasil. Lei nº 9.055 de 1 de junho de 1995. Disciplina a extração, industrialização, utilização, comercialização e transporte do amianto e dos produtos que o contenham, bem como das fibras naturais e artificiais, de qualquer origem, utilizadas para o mesmo fim e dá outras providências. **Coleção de Leis da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1995
- [59] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15210-1**: Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios; Parte 1 – Classificação e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- [60] Mendes, R. F. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com polpas celulósicas modificadas com silanos**. 2014. 158f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Lavras, 2014.
- [61] Oliveira, A. B. **Melhoria do processo Hatschek, por meio de tratamento de dados históricos, para fabricação de telhas onduladas**. 2010. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [62] Frazão, C; Barros, J; Toledo Filho, R; Ferreira, S; Gonçalves, D. Development of sandwich panels combining sisal fiber-cement composites and fiber-reinforced lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.86, p. 206-223, fev. 2018.

[63] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15498**: Placa de fibrocimento sem amianto - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

[64] Infibra. **Produtos de fibrocimento**. Disponível em: < <https://infibra.com.br/>>. Acesso em: 07 de jul. 2018.

[65] Brasilit Saint-Gobain. **Placas cimentícias**. Disponível em: < <https://brasilit.com.br/>>. Acesso em: 07 jul. 2018.

[66] Balthazar, R. D. S. **A permanência da autoconstrução: um estudo de sua prática no Município de Vargem Grande Paulista**. 2012. 147f. Dissertação (Mestrado em Área de concentração: Habitat). Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

[67] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7196**: Folha de telha ondulada de fibrocimento - procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

[68] Savastano Junior., H; Santos, S. F. Produtos de Fibrocimento. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo:Geraldo C. Isaia, IBRACON, 2010.

[69] Comissão nacional dos trabalhadores do amianto - CNTA. **O Amianto no Brasil**. 2010. Disponível em: <<http://www.cnta.org.br/?op=oamianto>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

[70] Shriver, D. F; Atkins, P. W. **Amianto**. Química Inorgânica, Bookman, 4ªEd., 2008. Disponível em: < <http://qnint.sbq.org.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

[71] Câmara dos deputados. **Amianto**. Relatório do Grupo de Trabalho da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara dos Deputados destinado à análise das implicações do uso do amianto no Brasil. Brasília, 87f. 2010. Disponível em: < <https://www.camara.leg.br/>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

[72] Brasil. Projeto de Lei nº 9.055, Disciplina a extração, industrialização, utilização, comercialização e transporte do asbesto/amianto e dos produtos que o contenham, bem como das fibras naturais e artificiais, de qualquer origem, utilizadas para o mesmo fim e dá outras providências. **Coleção de Leis da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1995.

[73] Centro de Vigilância Sanitária. **Trabalhador exposto ao amianto**. Disponível em: < www.cvs.saude.sp.gov.br>. Acesso em 22 ago. 2018.

[74] Brasil. Projeto de Lei nº 12.684, proíbe o uso, no Estado de São Paulo de produtos, materiais ou artefatos que contenham, quaisquer tipos de amianto ou asbesto ou outros minerais que, acidentalmente, tenham fibras de amianto em sua composição. **Coleção de Leis da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2007.

[75] Unidade 1 pós EaD Universidade de Franca – UNIFRAN. **Ambiente e doenças do trabalho**. Slide aula. 2016.

[76] Medicina e Engenharia de Segurança do Trabalho. **Ações contra o uso do amianto**. 2018. Disponível em: < <https://www.ocupacional.com.br>>. Acesso em 23 ago. 2018.

[77] Paes, J. C. D. **O fibrocimento e a construção sustentável no Brasil**. AEC – arquitetura, engenharia e construção. Disponível em:< <http://blogaecweb.com.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

[78] Bentur, A; Mindess, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Library of Congress Cataloging in Publication Data. 2ª Ed. P. 625, 2006.

[79] Dubey, A. Fibre Reinforced Concrete: **Characterization of flexural toughness and some studies on fibre-matrix bond–slip interaction**. 1999. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de engenharia civil, Universidade da Colúmbia Britânica, Colúmbia, 1999.

[80] Juarez. C; Fajardo. G; Valdez, P. Caracterisation microstructurale des fibres naturelles pour des matériaux composites a base de ciment. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v.36, p. 449-462, mar. 2019.

[81] Sujivorakul, C. **Development of high performance fiber -reinforced cement composites using twisted polygonal steel fibers**. 2002. 324f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de engenharia civil, University of Michigan, Michigan, 2002.

[82] Tipos de telhas. **Decorfácil**. Disponível em:< <https://www.decorfacil.com/>>. Acesso em 23 ago. 2018.

[83] Associação de Normas Brasileira. **Notícias: telhas onduladas de fibrocimento sem amianto**. Disponível em: < <http://www.abnt.org.br/noticias/>>. Acesso em 23 ago. 2018.

[84] Savastano Junior., H; Agopyan, V; John, V. M. **Tecnologia para o desenvolvimento de telhas de fibrocimento** – CIM –CEL. Coletânea Habitare. Inovação Tecnológica na Construção Habitacional. 1ªEd. Porto Alegre, v.6, p. 14-39, 2006.

[85] Roriz, V. F. **Refrigeração evaporativa por aspersão em telhas de fibrocimento: estudo teórico e experimental**. 2008. 171f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

[86] Akers, S. A. S.; Garrett, G. G. Observations and predictions of fracture in asbestos cement composites. **Journal of Materials Science**, v. 18, n. 7, p. 2209-2214, 1983.

[87] Akers, S. A. S.; Partl, M. Hygral and thermal expansion/shrinkage properties of asbestos: free fibre cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 12, n. 1, p. 19-27, 1990.

[88] Giordano, B. L; Souza, R. B; John, V. M. Influência do ligante na retração por secagem em fibrocimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.9, n.4, p.7-16, out/dez. 2009. ISSN: 1678-8621.

[89] Maranhão. F. L; Loh, K. O uso de hidrofugantes em materiais de construção porosos. **Techne, Tecnologia da Construção**, São Paulo, v.155, p.4-7, fev. 2010.

- [90] Luiz, A. P.; Riberiro, S; Pandolfelli, V. Artigo revisão: Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. **Cerâmica**, v.54, n. 330, p. 174-183, 2008, ISSN: 0366-6913.
- [91] Tunali, A; Selli, N. T. Industrial plant application of hydrophobic coating on tile surface. **Polymers & Polymer Composites**, v.20, n.3, p. 157-159, mar. 2013
- [92] Sika Brasil. **Impermeabilizantes**. Disponível em:< <https://bra.sika.com/>>. Acesso em: 08 jul. 2018.
- [93] Maranhão, F. L; John, V. M; Cincotto, M. A; Pileggi, R. J. **Influência do tipo de cimento nas propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas hidrofugadas com produtos à base de silicone**. APFAC, 2^o Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, 2007.
- [94] McGettigan, E. Factors affecting the selection of water-repellent treatments. **The Journal of Preservation Technology**, v.26, n.4, p. 22-26, 1995.
- [95] Selley, D; Maranhão, F. L; Loh, K; Jhon, V. M. Silicone water repellents for (frc) Fibre-cement boards. In: 10th **International inorganic-bonded fiber composites conference**, Universidade de São Paulo, São Paulo, v.1, p. 14-24, 2006.
- [96] Mayers, H. The chemistry and properties of silicone resins: network formers (in paints and renders). **Pigment & resin technology**, v. 27, n.6, p. 364-373, 1998.
- [97] Charola, E. Water-repellent treatments for building stones: a practical overview. **Apt bulletin**, v.26, n. 2/3, p 10-17, 1995.
- [98] Silres. **Impregnação Hidrofóbica**. Disponível em: < <https://www.wacker.com> >. Acesso em 13 jul. 2018.
- [99] Pizzol, V. D. **Carbonatação acelerada: nova tecnologia de cura para o fibrocimento sem amianto**. 2013. 60f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Lavras, 2013.

[100] Peter, M. A.; Muntean, A.; Meier Bohm, M. Competition of several carbonation reactions in concrete: a parametric study. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.28, n12, p.1385-1393, 2008.

[101] Glasser, F. P; Marchand, J; Samson, E. Durability of concrete: Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. **Cement and Concrete Research**, v.38, n.2, p. 226-246, fev. 2008.

[102] Tasca, M. **Estudo da Carbonatação natural de concreto com pozolonas: monitoriamento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

[103] Almeida, A. E. F. S; Tonoli, G. H. D; Santos, S. F; Savastano Júnior. H. Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas. **Ambiente Construído**, v.10, n.4, p.233-246, out./dez. 2010.

[104] Poggiali, F. S. J. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. 2009. 81f. Monografia (especialização em Construção Civil). Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

[105] American Society for Testing and Materials. **ASTM C20-00**: Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water, 2010.

[106] Laboratório de Caracterização Estrutural – LCE. **Microscopia Confocal**. Disponível em:<<http://lce-dema.ufscar.br>> Acesso em 04 jun. 2019.

[107] Centro de caracterização e desenvolvimento de materiais. **Envelhecimento Ultravioleta**. Disponível em:< <http://ccdm.ufscar.br>> Acesso em 04 jun. 2019.

[108] Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. Pini, São Paulo, 1994.