JULIE ANNE BRAUN DOS SANTOS

**Desenvolvimento de metodologia para avaliação da transferência de fissuras
em sistemas de impermeabilização aderidos**

São Paulo

2021

JULIE ANNE BRAUN DOS SANTOS

**Desenvolvimento de metodologia para avaliação da transferência de fissuras
em sistemas de impermeabilização aderidos**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador: Prof.^a Dra. Renata Monte

São Paulo

2021

JULIE ANNE BRAUN DOS SANTOS

**Desenvolvimento de metodologia para avaliação da transferência de fissuras
em sistemas de impermeabilização aderidos**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração: Inovação na
Construção Civil

Orientador: Prof.^a Dra. Renata Monte

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 08 de outubro de 2021

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

dos Santos, Julie Anne Braun

Desenvolvimento de metodologia para avaliação da transferência de fissuras em sistemas de impermeabilização aderidos / J. A. B. dos Santos -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

177 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Impermeabilização 2. Crack Bridging 3. Transferência de fissuras 4.Correlação de Imagem Digital 5. Durabilidade. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Para esta dedicação tomo emprestada as palavras de Johann Bach:

“Soli Deo gloria”

(Apenas a Deus seja toda a glória)

AGRADECIMENTOS

Ao primeiro engenheiro do mundo, o Criador, não só dedico, mas como também agradeço, pois do começo ao fim desta jornada nada mais fiz do que tentar compreender sua verdade por trás da ciência.

Meu coração está repleto de agradecimentos a todos que participaram da minha jornada para cumprir esta etapa em minha carreira.

À minha orientadora professora Dra. Renata Monte, por ter confiado em minha proposta de pesquisa e aceitado o desafio de trabalhar um tema tão pouco explorado como a impermeabilização. Ao longo destes quase três anos de mestrado aprendi com ela importantes virtudes da pesquisa científica, tais como a observação, o questionamento e a visão crítica, sejam elas aplicadas as normas, sejam aplicadas às bibliografias. Como um mestre conduz seu discípulo, ela me conduziu nesta trajetória. Apontando erros, elogiando acertos e abrindo novas possibilidades a cada ensaio em laboratório, a cada revisão de artigos e textos. Agradeço o seu apoio, incentivo, e ainda por estar sempre disponível.

À professora Dra. Mércia Bottura pela força e motivação na direção da docência, por compartilhar comigo o espaço em sua sala de aula e por conceder a minha primeira oportunidade de lecionar o tema de sistemas de impermeabilização em uma turma de pós-graduação.

Ao professor Dr. Antônio Figueiredo, um exemplo de mestre, agradeço por compartilhar seu conhecimento, experiências e histórias repletas de importantes reflexões, que além de proporcionar um desenvolvimento acadêmico, conduzem o estudante a um movimento transcendente de aprendizado.

Ao professor MSc. Firmino Siqueira, pelas reflexões e conversas sobre os problemas da impermeabilização, das quais nasceu a ideia que levou ao tema deste trabalho. Não poderia deixar de agradecer pela sua disponibilidade, e claro, pela confiança ao me emprestar seus preciosos e raros livros de impermeabilização, que me ajudaram muito na busca por referências bibliográficas.

Aos professores Dr. Ubiraci Souza, Dr. Hermes Fajersztajn, Dr. Francisco Cardoso e Dr. Luiz Sérgio Franco pela oportunidade de aprendizado sobre a didática e ensino em sala de aula, durante o programa PAE.

Aos professores Dr. Fabiano Côrrea, Dr.^a Flávia de Souza, Dr. Sérgio Leal e à Dr.^a Brenda Leite, meu agradecimento pelo ensino durante as disciplinas cursadas. E aos professores da FAU o Dr. José Baravelli e a Dr.^a Cláudia Oliveira pelas oportunidades de estar com eles em sala de aula compartilhando o conhecimento da disciplina de impermeabilização com seus alunos.

Ao professor Dr. Flávio Maranhão pelo apoio durante a pesquisa, com sugestões de melhorias em meu desenvolvimento acadêmico e também no suporte em trabalhos experimentais.

Aos professores Dr. Vanderley John e Dr. Julio César Souza, por terem aceitado o convite para participar do exame de qualificação e defesa deste trabalho. Agradeço pela leitura atenciosa e as sugestões de melhorias. Com certeza os seus apontamentos e palavras contribuíram para o êxito deste trabalho.

À Professora Msc. Tereza Magalhães, minha orientadora no trabalho de conclusão de curso na graduação, por suas palavras de incentivo.

Ao colega de mestrado Eng. Felipe Santos por toda a ajuda durante o período de desenvolvimento da metodologia de ensaio. Muito obrigada pela paciência, disponibilidade de tempo e por estar junto no avanço do conhecimento da técnica DIC. Certamente, sem sua contribuição este trabalho não teria tido o mesmo avanço. Muito obrigada Felipe!

Um enorme agradecimento ao Arq. Izaías Júnior e à Eng.^a Maressa Menezes por tê-lo indicado para colaborar com as moldagens das amostras. Obrigada Izaías, por sua enorme contribuição, conhecimento técnico e prático ao me ajudar com a “mão na massa” no laboratório. Agradeço também a empresa Vedacit pela liberação de seu funcionário para colaborar neste trabalho.

Aos técnicos do laboratório de materiais Hall Tecnológico por estarem sempre prontos para ajudar, e por todo o suporte com os equipamentos e materiais durante o desenvolvimento dos experimentos.

À Eliany Funari, secretária do Programa de Pós-graduação, pelo excelente atendimento e por estar sempre disponível a ajudar com os procedimentos e documentos burocráticos do mestrado.

Ao arq. Jacques Monet, com seu jeito francês de valorizar a história, questionar o mundo e lutar pelo que é verdadeiro, conduziu-me ao conhecimento prático da impermeabilização e me concedeu a oportunidade de crescimento profissional neste segmento. Merci beaucoup mon chère ami!

Ao Eng. André Fornasaro meu agradecimento pelas conversas construtivas e por me ensinar um pouquinho do universo dos ensaios eletrônicos de estanqueidade. Conseguiu me provar, em campo, que o ensaio Holiday Detector realmente encontra os vazamentos!

À Arq.^a Cirene Tofanetto pelo apoio e por transmitir sua experiência na impermeabilização. Não poderia deixar de agradecer a oportunidade da visita técnica à fábrica da VIAPOL, onde pude conhecer os processos de fabricação dos materiais de impermeabilização.

À Eng.^a Maria Amélia Silveira, grande referência e inspiração do seguimento da impermeabilização, muito obrigada pelos ensinamentos e pelas palavras de incentivo.

Ao Eng. Flávio Martins (MC Bauchemie), Eng. Lucas Lisboa (MC Bauchemie) e ao Eng. Anderson Oliveira (SIKA) pelo suporte, tirando dúvidas sobre os materiais, e pelas contribuições para o desenvolvimento dos experimentos.

Ao Eng. José Miguel Morgado, por ter me recebido no Instituto Brasileiro de Impermeabilização e pelo apoio na difusão dos resultados deste trabalho junto ao IBI.

Ao amigo José Atanásio (Zelão), técnico em impermeabilização da UFMG, tenho muita gratidão pelas orientações, dicas e críticas construtivas.

Aos colegas e amigos de curso Eng. Ronney Agra, Eng. Marcio Paixão, Eng. Renan Andrade, Eng. Max Junginguer, Eng.^a Naguisa Tokudome, Eng. Marco Antonio G. Junior, Eng. Thiago Marum e Arq.^a Cristiana Mariotto pelos trabalhos que desenvolvemos na pós-graduação, e pelas conversas construtivas pelos corredores e nos cafés.

À Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) pelo incentivo à qualificação concedido durante os três últimos meses de afastamento para concluir o mestrado. E

aos colegas e amigos da equipe de trabalho, pela força e pelos momentos de café para tirar o estresse: Eng. Paulo Zippert, Eng.^a Indira Bessa, Eng. Fábio Pains, Eng. Helder Cunha, Eng.^a Thaís Cabral, Eng.^a Juliana Shiratori, Eng^o Felipe Gomes, Eng^o Fábio Ferraz, Téc. Kessy e Téc José Evanir. Agradeço também a minha chefe, Eng^a Rita de Cássia, por seu apoio ao me escrever a carta de recomendação profissional, logo no início do mestrado.

Aos meus queridos pais, pela motivação e pelas orações, às minhas irmãs e minha querida sobrinha Nicolle, por serem a alegria da minha vida!

À May (minha shitzu), companheira da escrita solitária.

Ao meu amado esposo, que ao longo de toda esta trajetória, com muito amor, me compreendeu e ajudou a aprimorar minhas habilidades com a gestão do tempo e da leitura, sendo meu coaching de desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional. Muito obrigada mon chère!

Newton teria descoberto a gravitação se a atenção que ele dava ao real não o tivesse prevenido e predisposto a notar que as maçãs caem como os universos? Observando e escutando, farão seu e adequarão às suas necessidades o que tiverem adquirido. As grandes descobertas resumem-se a reflexões sobre fatos comuns a todos.”

Sertillanges (1965)

RESUMO

Membranas impermeabilizantes aderidas são frequentemente sujeitas ao surgimento de fissuras provenientes do substrato, podendo ocasionar a perda de estanqueidade do sistema. Por isso, o estudo do comportamento destes materiais quando o substrato fissa, conhecido como Crack Bridging Ability (CBA), mostra-se relevante. Um ensaio que simule tal situação permite avaliar a abertura máxima de fissura que o material impermeabilizante resiste sem fissurar e consequente desempenho do sistema de impermeabilização. O presente trabalho teve por objetivo desenvolver uma metodologia de ensaio para avaliação da transferência de fissuras de um substrato de concreto para sistemas de impermeabilização aderidos. O estudo avaliou três materiais impermeabilizantes com características mecânicas distintas: membrana de acrilatos puros, manta asfáltica pré-fabricada e membrana de base cimentícia com polímeros. Por meio de um programa experimental foram realizadas análises do comportamento dos materiais aderido em substrato de concreto e das propriedades mecânicas de tração, alongamento e módulo de elasticidade. Ensaio de resistência de aderência também foram feitos, antes e após os ensaios CBA. A metodologia desenvolvida utilizou a análise por correlação de imagens digitais 2D (DIC), que possibilitou a identificação do surgimento de fissuras de forma fácil e precisa. Outro diferencial da técnica DIC nestas análises foi o acompanhamento dos deslocamentos na superfície impermeabilizada com o uso de extensômetros virtuais, uma vez que a instalação de extensômetros físicos é difícil. A possibilidade de correlacionar o comportamento mecânico dos materiais com a capacidade do sistema de impermeabilização absorver as deformações do substrato pode auxiliar os projetistas na especificação dos materiais mais adequados às solicitações do substrato ou os fabricantes no desenvolvimento de materiais mais adequados. Essa metodologia possibilita a definição de critérios quantitativos de desempenho para os sistemas de impermeabilização aderidos quanto a transferência de fissuras e tais critérios podem ser adotados na norma de desempenho.

Palavras-Chave: Sistemas de Impermeabilização. *Crack Bridging*. Transferência de fissuras. Correlação por Imagem Digital (DIC 2D).

ABSTRACT

Adhered waterproofing membranes are often subject to cracks that appearing from the substrate and may cause the loss of tightness. Therefore, the study of the behavior of these materials when the substrate cracks, known as Crack Bridging Ability (CBA), is relevant. A test that simulates this situation allows the evaluation of the maximum crack opening that the waterproofing material resists without cracking and the consequent performance of the waterproofing system. The present work aimed to develop a test methodology to evaluate the transfer of cracks in a concrete substrate for bonded waterproofing systems. The study evaluated three waterproofing materials with different mechanical characteristics: acrylic membrane, pre-fabricated asphalt sheet, and cement-based membrane with polymers. Through an experimental program, were analyzed the mechanical properties of the materials and the CBA behavior of these materials adhered to a concrete substrate. The adhesion strength after and before CBA tests were also measured. The developed methodology uses digital image correlation (DIC), which made it possible to identify the appearance of cracks easily and accurately. Another differential of the DIC technique is the possibility of monitoring displacements in the waterproofed surface using virtual strain gauges since the installation of physical ones is difficult. The possibility of correlating the mechanical behavior of the materials with the waterproofing system's ability to absorb substrate deformations can assist designers to specify the most suitable material for the substrate requests or manufacturers in developing more suitable materials. This methodology makes it possible to define quantitative performance criteria for the adhered waterproofing systems in terms of CBA and such criteria can be adopted in the performance standard.

Kewwords: Waterproofing systems. Crack bridging. Digital Image Correlation (DIC 2D).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1- Transferência de fissuras para o sistema de poliuréia (a) corte da camada de impermeabilização para verificação (b) observação da fissura no substrato	25
Figura 2.1- Exemplo de sistema de piso e seus elementos segundo a norma de desempenho.....	39
Figura 2.2- Representação de elemento estanque (a) e elemento não estanque com manifestações patológicas como fissuras e perda de aderência da camada impermeável (b)	43
Figura 2.3- Visão holística das famílias de materiais aplicados à impermeabilização	46
Figura 2.4- Comportamento tensão-deformação dos polímeros	49
Figura 2.5- Curvas tensão por deformação para diferentes comportamentos dos polímeros.....	62
Figura 2.6- Curva tensão por deformação para material que enquadra na lei de Hooke, com limite de proporcionalidade definido	63
Figura 2.7- Curva tensão por deformação para material que não se enquadra na lei de Hooke, sem limite de proporcionalidade definido	63
Figura 2.8 (a) e (b)- Teste de estanqueidade com lâmina d'água em piscina impermeabilizada com sistema de manta asfáltica	64
Figura 2.9- Falha na emenda visualizada após teste de estanqueidade em sistema de impermeabilização com manta asfáltica.....	65
Figura 2.10- Ensaio eletrônico com Holiday Detector em manta asfáltica	66
Figura 2.11- Ensaio eletrônico com uso do EFVM	66
Figura 2.12 (a) - (e)- Representação genérica da composição do corpo de prova e das formas de ruptura no sistema de impermeabilização	68
Figura 2.13- Seção lateral do sistema, modelo de transferência da fissura da camada mais interna (substrato) para a mais externa (membrana).....	74
Figura 2.14- Seção frontal da interface membrana e substrato, evolução da transferência de tensões e abertura de fissura com o tempo.....	75

Figura 2.15- Curva tensão por deformação típica do fenômeno crack bridging, dividida em 4 estágios: (I) aumento de tensão para romper o concreto, (II) ruptura do concreto, (III) queda de tensão e alongamento da membrana, (IV) ruptura da membrana definindo a abertura de fissura (CBA)	79
Figura 2.16- Vista superior (a) e lateral (b) do dispositivo para ensaio de aptidão de fissuras (método IPT)	82
Figura 2.17 - Exemplos de modelos de corpos de prova em pesquisas anteriores ..	83
Figura 2.18- Configurações de corpo de prova cúbico de concreto em ensaio de tração indireta, (a) ensaio WST e (b) ensaio Montevideo.	86
Figura 2.19- Objeto antes e depois da deformação para DIC 2D.....	90
Figura 2.20- Exemplo do princípio da técnica DIC em ensaio mecânico de tração. Um padrão de pontos é aplicado no corpo de prova (a), a imagem após a deformação é capturada (b) e a comparação do deslocamento entre a imagem anterior e a subsequente é feita	92
Figura 3.1- Etapas do programa experimental	93
Figura 3.2- Moldagem dos panos de membrana de acrilatos puros pra preparo dos corpos de prova.....	97
Figura 3.3- Membrana de acrilatos puros em cura ambiente	97
Figura 3.4- Modelo I de corpo de prova para ensaio de tração. Dimensões: W- Largura da seção estreita, 6 mm; WO- Largura total, 26 mm; L- Comprimento da seção estreita, 33 mm; LO- Comprimento total, 115 mm; T- Espessura (variável), $4 \pm 0,02$ mm (manta asfáltica), $4 \pm 0,12$ mm (argamassa polimérica) e $0,91 \pm 0,02$ (membrana acrílica). ..	98
Figura 3.5- Corte dos panos em máquina manual de bancada.....	98
Figura 3.6- Corpos de prova cortados em formato haltere (Gravata).....	98
Figura 3.7- Borracha natural, NB 1087, espessura 3 mm, usada para criação de molde	99
Figura 3.8- Corte do molde de borracha em dispositivo de corte de aço padronizado	99

Figura 3.9- Processos de moldagem dos corpos de prova de argamassa polimérica: (a) mistura do componente A e B em misturador mecânico de bancada; (b.1) e (b.2) aplicação da argamassa no molde de borracha; (c) cura dos corpos de prova ao ar durante 3 dias; (d.1) desforma dos corpos de prova no terceiro dia após a moldagem e (d.2) término da cura do material (28 dias).....	100
Figura 3.10- Conformação dos corpos de prova de manta asfáltica com uso de dispositivo de corte de gravata.....	101
Figura 3.11- Ensaio de tração em corpo de prova de membrana de acrilatos puros	102
Figura 3.12- Exemplo de diagrama tensão por deformação para a manta asfáltica com estruturante no eixo longitudinal (a) e transversal (b), os valores selecionados para o cálculo de resistência à tração e alongamento na carga máxima e na ruptura são aqueles indicado com um “x”.....	104
Figura 3.13- Exemplo de diagrama tensão por deformação para a argamassa polimérica, indicado com um “x” os pontos adotados para o cálculo de resistência à tração e alongamento na carga máxima e na ruptura	105
Figura 3.14-Exemplo de diagrama tensão por deformação para a membrana de acrilatos puros, indicado com um “x” os pontos adotados para o cálculo de resistência à tração e alongamento na carga máxima e na ruptura	105
Figura 3.15- Preparação de superfície com aplicação de tinta spray cor branca	106
Figura 3.16- Preparação de superfície com tinta spray base água em manta asfáltica	106
Figura 3.17- Criação de padrão de pontos na região central do corpo de prova com uso de caneta hidrográfica	107
Figura 3.18- Corpo de prova preparado para ensaio	107
Figura 3.19- Procedimento de ensaio de tração com filmagem com câmera digital para processamento pela Técnica DIC	107
Figura 3.20- Processamento de imagem digital (DIC) em software GOM: (a) vista do mapeamento de tensões no corpo de prova; (b) vista da imagem com extensômetro	

medindo a deformação do corpo de prova com indicação da área da possível ruptura	108
Figura 3.21- Diagrama esquemático tensão por deformação para cálculo do módulo secante, para materiais de comportamento não linear, e módulo tangente, para materiais com comportamento linear	109
Figura 3.22- Exemplo para forma de cálculo do módulo tangente para corpo de prova de argamassa polimérica.	110
Figura 3.23- Forma de cálculo do módulo secante para manta asfáltica, representação da curva tensão por deformação com estruturante no eixo longitudinal	111
Figura 3.24- Forma de cálculo do módulo secante os corpos de prova de membrana de acrilatos puros	111
Figura 3.25- Remoção de óleo desmoldante e material aderido na placa (a), limpeza com uso de água sob pressão (b) e fechamento dos poros aparentes com pasta de cimento e aditivo promotor de aderência (c)	113
Figura 3.26- Aplicação das camadas de membrana impermeabilizante	115
Figura 3.27- Verificação da espessura de filme úmido com uso de medidor tipo pente	115
Figura 3.28- Corte da manta asfáltica com uso de estilete	115
Figura 3.29- Aderência da manta asfáltica com uso de maçarico manual portátil....	115
Figura 3.30- Corte das placas com auxílio de serra copo diamantada.....	116
Figura 3.31- Limpeza do substrato com jato de ar comprimido.....	116
Figura 3.32- Medição do diâmetro de cada corpo de prova com auxílio de paquímetro	116
Figura 3.33- Pastilhas metálicas aderidas ao substrato	116
Figura 3.34- Configuração do corpo de prova de concreto para ensaio crack bridging.	118
Figura 3.35- Controle de massa do componente A (a) e B da argamassa polimérica (b).....	119
Figura 3.36- Pesagem do pincel antes e após aplicação	120

Figura 3.37- Corpo de prova de argamassa polimérica em processo de cura	120
Figura 3.38- Imprimação do substrato com primer asfáltico base água	120
Figura 3.39- Aplicação da manta asfáltica com uso de maçarico manual.....	120
Figura 3.40- Remoção da fita adesiva com membrana após a formação de filme seco	121
Figura 3.41- Medição da espessura de filme seco com auxílio de um micrômetro .	121
Figura 3.42- Aplicação da tinta spray branca	122
Figura 3.43- Marcação da malha de pontos com carimbo	122
Figura 3.44- Disposição do LVDT na face do substrato	123
Figura 3.45- Filmagem do ensaio com câmera digital Nikon D5300 posicionada em tripé	123
Figura 3.46- Exemplo de processamento de corpo de prova no software GOM com inserção de 3 extensômetros virtuais na superfície analisada	124
Figura 4.1- Curvas médias de tensão por deformação para os corpos de prova e gráfico expandido indicando diferença nos comportamentos e inclinações das curvas, e formação de patamar de escoamento e estricção na manta asfáltica- eixo longitudinal	125
Figura 4.2- Curva Tensão por Deformação específica para obtenção do módulo de elasticidade para Argamassa Polimérica (a), membrana de acrilatos puros (b), manta asfáltica com estruturante no eixo longitudinal (c) e para a manta asfáltica com estruturante no eixo transversal (d).....	128
Figura 4.3- Comparação entre as curvas médias de tensão por deformação específica para os diferentes materiais	128
Figura 4.4- Resultados do ensaio de resistência de aderência antes do CB e após o ensaio CB. Os resultados individuais dos corpos de prova podem ser consultados no Apêndice C e Apêndice D.	130
Figura 4.5 Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Argamassa Polimérica CP 1, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a direita.	134

Figura 4.6-Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Argamassa Polimérica CP 2, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a direita	135
Figura 4.7- Membrana de Acrilatos Puros CP1, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a direita. Extensômetro 2 utilizado como referência para obtenção do CBA.	136
Figura 4.8- Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Membrana de Acrilatos Puros CP2, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a esquerda.....	137
Figura 4.9- Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Manta Asfáltica CP1, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a esquerda.	138
Figura 4.10- Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Manta Asfáltica CP2, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a esquerda.	139
Figura 4.11- Evolução da aplicação de carga no substrato e os respectivos deslocamentos no substrato, medido com LVDT, e na superfície impermeabilizada, medido com extensômetro virtual-DIC para a argamassa polimérica (CP1).	140
Figura 4.12 - Evolução da aplicação de carga no tempo e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a argamassa polimérica (CP2).	141
Figura 4.13- Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a membrana de acrilatos puros (CP1).	142
Figura 4.14- Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a membrana de acrilatos puros (CP2).	143
Figura 4.15 - Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a manta asfáltica (CP1), imagem expandida da abertura de fissura.....	144

Figura 4.16- Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a manta asfáltica (CP2), imagem expandida da abertura de fissura.....	145
Figura 4.17 - Curva de deslocamento do substrato no tempo obtida pelo LVDT para os três sistemas de impermeabilização.....	147
Figura 4.18- Comportamento dos três sistemas de impermeabilização frente a deformação do substrato, comparação de deslocamento obtida pelo extensômetro virtual (DIC)	147
Figura 4.19- Correlação entre os deslocamentos do substrato (LVDT) e da membrana (DIC).....	148

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Polipropileno Atático
ASTM	American Society for Testing Materials
CB	Crack Bridging
CBA	Crack Bridging Ability
CB-22	Comitê Brasileiro-22
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CP	Corpo de Prova
DIC	Digital Image Correlation
DIN	Deutsches Institut für Normung
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
EFVM	Electric Field Vector Mapping
EN	European Norms
EPDM	Etileno Propileno Dieno Monômero
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Etil Vinil Acetato
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO	International Organization for Standardization
kN	Kilo Newton
kPa	Kilo Pascal
LMCC	no Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
m.c.a	Metros de Coluna D'água
μm	Micrometros
MAP	Membrana de Acrilatos Puros
MM	Milímetros
MP	Megapixel
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
NRCA	National Roofing Contractors Association
PET	Polietileno Tereftalato
PEBD	Polietileno Baixa Densidade
PMMA	Poli(Metacrilato de Metila)
PVC	Policloreto de Vinila
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
ROI	Region of Interest
RPM	Rotações Por Minuto

SBR	Copolímero de Butadieno e Estireno)
Tg	Temperatura de transição vítrea
Tm	Temperatura de fusão
TPO	Thermoplastic Polyolefin
UEATC	Union Européenne pour l'Agrément Technique dans la Construction
UR	Umidade Relativa
USP	Universidade de São Paulo
WST	Wedge Splitting Test

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	25
1.2	OBJETIVOS	28
1.3	METODOLOGIA DA PESQUISA	29
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2	REVISÃO DA LITERATURA	31
2.1	IMPERMEABILIZAÇÃO: HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DOS MATERIAIS	31
2.2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	35
2.2.1	<i>Impermeabilização</i>	35
2.2.2	<i>Sistema de Impermeabilização</i>	37
2.2.3	<i>Diferença entre mantas e membranas</i>	40
2.2.4	<i>Estanqueidade e impermeabilidade</i>	42
2.3	FAMÍLIAS DE MATERIAIS PARA IMPERMEABILIZAÇÃO	45
2.3.1	<i>Polímeros</i>	47
2.3.1.1	Exemplos de polímeros na impermeabilização	52
2.3.2	<i>Compósitos</i>	56
2.3.2.1	Exemplos de materiais compósitos para impermeabilização	57
2.4	MÉTODOS DE ENSAIO PARA MATERIAIS E SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO	59
2.4.1	<i>Ensaio de resistência à tração</i>	59
2.4.2	<i>Ensaio de estanqueidade</i>	64
2.4.3	<i>Aderência do sistema impermeabilizante ao substrato</i>	66
2.4.4	<i>Crack Bridging</i>	69
2.4.4.1	Fissuração como mecanismo de transporte de massa	69
2.4.4.2	Transferência de fissura - <i>Crack Bridging</i>	72
2.4.4.3	Evolução de pesquisas no tema	73
2.4.4.4	Referências normativas para ensaios em laboratório	80
2.4.4.5	Desafios do ensaio	82
2.5	ANÁLISE POR CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (DIC)	88
2.5.1	<i>Princípios gerais da técnica DIC</i>	88
2.5.2	<i>Captação das imagens digitais</i>	90
2.5.3	<i>Processamento das imagens</i>	92
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	93

3.1	MATERIAIS	94
3.1.1	<i>Argamassa polimérica</i>	94
3.1.2	<i>Membrana de acrilatos puros</i>	95
3.1.3	<i>Manta asfáltica</i>	95
3.2	MÉTODOS DE ENSAIO	96
3.2.1	<i>Ensaio de caracterização dos materiais de impermeabilização</i>	96
3.2.1.1	Moldagem e preparação dos corpos de prova	96
3.2.1.2	Procedimentos de ensaio	102
3.2.1.2.1	Determinação da resistência à tração e alongamento	102
3.2.1.2.2	Determinação do módulo de elasticidade com a técnica DIC	106
3.2.2	<i>Ensaio de desempenho dos sistemas de impermeabilização aderidos</i>	112
3.2.2.1	Resistência de aderência	112
3.2.2.1.1	Preparação do substrato	112
3.2.2.1.2	Aplicação dos materiais	113
3.2.2.1.3	Preparo das placas para ensaio	116
3.2.2.1.4	Procedimento de ensaio	117
3.2.2.2	Transferência de fissura – <i>Crack Bridging</i>	117
3.2.2.2.1	Definição do substrato	118
3.2.2.2.2	Aplicação dos materiais	119
3.2.2.2.3	Preparação de superfície	121
3.2.2.2.4	Procedimento de ensaio	122
3.2.2.2.5	Processamento de imagem digital- DIC	123
4	RESULTADOS E ANÁLISES	125
4.1.1	<i>Resistência à tração e alongamento</i>	125
4.1.2	<i>Módulo de Elasticidade</i>	127
4.2	ENSAIOS DE DESEMPENHO	130
4.2.1	<i>Resistência de aderência</i>	130
4.2.2	<i>Crack Bridging</i>	133
4.2.2.1	Identificação da abertura de fissura na membrana	133
4.2.2.2	Correlação da abertura de fissura no substrato e na camada impermeabilizada	140
4.2.2.3	Relação entre as propriedades mecânicas e o CBA	148
5	CONCLUSÕES	150
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	150

5.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	151
5.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	153
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
	APÊNDICE A- DIMENSÕES E SEÇÃO MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO, ALONGAMENTO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	169
	APÊNDICE B- RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ALONGAMENTO	171
	APÊNDICE C- RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA EM PLACA DE SUBSTRATO PADRÃO- REFERÊNCIA DE VALOR ANTES DO ENSAIO CRACK BRIDGING	173
	APÊNDICE D- RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA - APÓS DO ENSAIO CRACK BRIDGING	175
	APÊNDICE E- PLANILHA DE CONTROLE DE MASSA DE APLICAÇÃO DE MATERIAIS (ENSAIO CRACK BRIDGING)	176

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa

Os sistemas de impermeabilização têm a função de proteger e conservar a integridade das construções contra ações deletérias dos fluídos, com destaque a água (KUBAL, 2008, p. 33). A estanqueidade destes sistemas atinge tal finalidade quando são alinhados critérios técnicos de projeto, como a seleção de materiais tendo em vista o tipo de substrato, e a correta execução (SRIRAVINDRARAJAH; TRAN, 2018).

A norma de desempenho ABNT NBR 15575-5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a) aborda a estanqueidade à água como um fator relevante ao requisito da habitabilidade. Para adequação a esta norma e atendimento ao requisito, os sistemas de impermeabilização adotados devem trabalhar juntamente com as estruturas, de forma a resistir às deformações impostas. Porém, uma das mais frequentes falhas nesses sistemas é a perda da característica de suportar as fissuras transmitidas pelo substrato (JAEGERMANN; PUTERMAN, 1987).

A Figura 1.1 mostra o fenômeno de transferência de esforços de uma laje de concreto armado para o sistema de impermeabilização composto por membrana de poliuréia.

Figura 1.1- Transferência de fissuras para o sistema de poliuréia (a) corte da camada de impermeabilização para verificação (b) observação da fissura no substrato

Fonte: Imagens feitas por Siqueira (2018)

A Figura 1.1 a e b representam o que potencialmente pode ocorrer em sistemas de impermeabilização. É possível observar, por meio do recorte feito no sistema (Figura 1.1b), que a abertura de fissura localizada na laje é similar àquela visível na membrana. A camada impermeável aderida, com limitada capacidade de absorver as

deformações impostas, culminou em processo de fissuração. É perceptível nesta situação uma falha que poderá acarretar posteriores manifestações patológicas.

É esperado o surgimento deste tipo de falha diante dos efeitos de abertura e fechamento das microfissuras no substrato. Este movimento impõe deformações que podem levar o material à ruptura. Por isso, a camada impermeabilizante deve ser suficientemente projetada a partir da composição dos seus materiais constituintes (PIRONDI, 1988, p. 224).

A avaliação da capacidade de um sistema impermeabilizante acompanhar a fissuração do substrato é importante para o processo de diferenciação de comportamentos dos diversos sistemas quando em uso. De acordo com (PICCHI, 1986, p. 174) “os requisitos de desempenho são atendidos como as condições qualitativas às quais um produto deve atender, quando submetido às condições de exposição”. As situações as quais as estruturas e os sistemas de impermeabilização aderidos podem ser submetidos devem, portanto, ser levantadas, testadas e analisadas para que sejam estabelecidos parâmetros de desempenho.

Antecipar as respostas de um material quando exposto às condições de uso não é evidente, requer o conhecimento de sua microestrutura, acompanhado de observações, experimentos e modelos de comportamento desenvolvidos a partir de pesquisas experimentais e simulações teóricas (HELENE, 2014, p. 7 e 8). As atuais normas brasileiras que indicam metodologias de ensaio para impermeabilização são aplicadas para os materiais de forma isolada, sem considerar as condições de uso. Desta forma, estas normas se restringem principalmente a colaborar para a indústria quanto ao controle de qualidade do material para aprovação ou reprovação de lotes a serem liberados.

Os ensaios de desempenho, no entanto, buscam aproximar a realidade as quais os materiais são ou poderão ser expostos. A vista disso, há a possibilidade da simulação do comportamento do sistema no meio ao qual será inserido.

Um método de ensaio que vem sendo adotado para medir a capacidade de um sistema de impermeabilização para acomodar a fissuração do substrato é denominado *crack bridging*. Esse ensaio, ainda não normatizado no Brasil, é instruído por várias normas e guias internacionais, dentre os quais se destacam a norma americana ASTM C1305 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS,

2016a) e a norma europeia EN 1062-7 (EUROPEAN STANDARD, 2004). Ambas indicam procedimentos de ensaio para simular o comportamento de membranas impermeabilizantes aderidas em substratos de concreto ou argamassas, e para obtenção da abertura de fissura (*crack bridging ability*).

Em pesquisas anteriores, a simulação da transferência de fissuras do substrato para a membrana impermeabilizante foi feita por meio de ensaios mecânicos de tração direta. As metodologias contemplam a aplicação dos esforços de forma concentrada em um entalhe feito antes do ensaio (DELUCCHI et al., 2002; DELUCCHI; CERISOLA, 2005; JAEGERMANN; PUTERMAN, 1987; WALDVOGEL et al., 2020b) ou por meio de carregamento prévio no corpo de prova, de forma a causar esforços de flexão, para indução da fissura (DELUCCHI; BARBUCCI; CERISOLA, 2004; DELUCCHI; CERISOLA, 2012).

Os ensaios de tração direta para materiais frágeis, tais como os substratos cimentícios, são complexos dada a forma de ruptura abrupta que pode ocorrer. Por isso, torna-se interessante a abordagem de procedimentos de ensaios indiretos de avaliação da tração. Dentre esses, o WST (*Wedge Splitting Test*) ou método da cunha é difundido por propagar fissuras de forma estável (BRÜHWILER; WITTMANN, 1990; SEGURA-CASTILLO; MONTE; FIGUEIREDO, 2018).

Os ensaios de *crack bridging* apresentam a complexidade do acompanhamento das fissuras, principalmente diante da dificuldade de instrumentalizar a camada impermeabilizada. Embora o uso de imagens feitas com auxílio de microscópios ópticos e câmeras digitais durante o ensaio sejam feitos, ainda há limitações devido ao processo de análise visual do momento de surgimento da primeira fissura na membrana. Desta forma, o processamento dessas imagens por meio da análise por correlação de imagem digital (*Digital Image Correlation* - DIC) representa um avanço nos estudos de *crack bridging*.

A aplicação do DIC dentro da metodologia experimental é sugerida por Waldvogel et al. (2020b). Para estes autores, esta técnica possibilita o monitoramento das deformações, obtenção de dados de abertura de fissura, assim como a observação da forma de transferência de tensões próxima à área fissurada.

Neste contexto, a presente dissertação propõe uma metodologia para avaliar experimentalmente o comportamento de sistemas de impermeabilização aderidos,

quanto à capacidade de suportar as fissuras provenientes do substrato. A metodologia contempla um ensaio mecânico de tração indireta aplicado ao sistema, substrato e camada impermeável, conjugado com a análise por correlação de imagem digital em duas dimensões (DIC-2D). Com esses resultados será possível contribuir para o estabelecimento de parâmetros quantitativos quanto à capacidade da camada impermeável de absorver esforços oriundos do substrato. Além disso, os parâmetros poderão subsidiar uma seleção mais adequada dos materiais em função da magnitude das solicitações do substrato. Espera-se ainda que os resultados da pesquisa possam colaborar para uma futura normatização brasileira do ensaio *crack bridging*.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é desenvolver uma metodologia de ensaio para avaliação da transferência de fissuras de um substrato de concreto para sistemas de impermeabilização aderidos.

Para alcançar este objetivo geral é necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os materiais para impermeabilização quanto à suas propriedades mecânicas, quais sejam resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade;
- Verificar o potencial da técnica DIC como ferramenta para medir a deformação dos materiais de impermeabilização durante o ensaio de tração;
- Caracterizar a resistência de aderência dos materiais impermeabilizantes no substrato de concreto;
- Levantar o estado da arte dos métodos de ensaio para avaliação da transferência de fissuras (*crack bridging*);
- Desenvolver uma metodologia para avaliar a transferência de fissuras do substrato para os sistemas de impermeabilização aderidos com uso da correlação por análise de imagem digital 2D (DIC);

- Comparar o comportamento dos diferentes sistemas de impermeabilização aderidos ao substrato de concreto com a metodologia desenvolvida.

1.3 Metodologia da pesquisa

Para alcançar os objetivos propostos no trabalho foi adotada uma metodologia de pesquisa experimental. As etapas deste processo foram compostas por revisão bibliográfica e por um programa experimental em laboratório.

A revisão da literatura permeia os tipos de materiais usuais no mercado brasileiro, as configurações dos sistemas de impermeabilização, assim como os processos de produção, e por fim os ensaios de desempenho desses sistemas. Esta etapa foi realizada a partir do levantamento de bibliografias nacionais e internacionais.

No programa experimental, dividido em duas partes, foram avaliados o comportamento dos materiais e dos sistemas aplicados por meio de ensaios em laboratório. A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais de impermeabilização quanto às propriedades mecânicas de resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade. A segunda etapa consistiu na realização de ensaios de desempenho: resistência de aderência à tração e resistência à transferência de fissuras provenientes do substrato para a camada de impermeabilização (denominado *crack bridging*).

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos compostos por: Introdução, revisão bibliográfica, programa experimental, resultados e análises, e conclusões.

No capítulo 1 é apresentada uma introdução com a contextualização e motivações para realização da pesquisa no tema. Além disso, o objetivo geral e os objetivos específicos são expostos, bem como a forma como o trabalho foi organizado.

O capítulo 2 aborda a revisão da literatura referente ao tema do trabalho. Os conceitos fundamentais sobre impermeabilização são apresentados, bem como as características e o comportamento básico dos principais materiais utilizados como

camada impermeabilizante. O capítulo apresenta também uma revisão sobre os métodos de ensaio para avaliar o desempenho dos sistemas de impermeabilização.

No capítulo 3 é detalhado o programa experimental realizado, descrevendo os materiais e métodos aplicados para a caracterização dos materiais e para a avaliação de desempenho dos sistemas.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos a partir do programa experimental realizado. As análises permitiram diferenciar o comportamento dos materiais de impermeabilização nos ensaios de caracterização mecânica e avaliar criticamente a metodologia de ensaio *crack bridging* proposta.

Por fim, no capítulo 5 são expressas as conclusões gerais e específicas que pretendem responder aos objetivos propostos, e indicadas sugestões de futuras pesquisas no tema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Impermeabilização: histórico do desenvolvimento dos materiais

Grande parte dos materiais de construção como rocha, solo, madeira, argila, papel, cal e o cimento Portland, são intrinsecamente caracterizados como hidrofílicos (MICHAELS, 1963, p. 339). Nestes materiais, a variação da umidade do meio ou diretamente em contato pode alterar consideravelmente as propriedades mecânicas, térmicas e químicas.

Além das características inerentes ao material, a humanidade teve que enfrentar o poder destrutivo da água em suas primeiras obras. O receio de inundações e excesso de chuva foram registradas pelo livro de Gênesis (MICHAELS, 1963, p. 339), sendo na ocasião citado o betume como matéria prima primordial para integridade do grande navio construído por Noé (BIBLIA SAGRADA, 1611, p. Genesis, 6,14).

Ainda no mundo antigo, os jardins suspensos da Babilônia tornaram-se um arquétipo para o projeto de impermeabilização, devido a sua característica de antever problemas modernos da água nas construções há cerca de vinte e sete séculos atrás (HENSHELL, 2000, p. 4 e 5). Os jardins contemplavam detalhes de sobreposição, como degraus de um anfiteatro, com plantas e flores tropicais de pequeno porte e também árvores frutíferas e palmeiras (FERREIRA, 2014, p. 87), que eram regadas por um aqueduto que recebia água bombeada do rio Eufrates¹. O que seria um desafio arquitetônico para os telhados verdes dos dias atuais, manter as lajes dos jardins estanques à umidade do solo consistiu em um robusto sistema construtivo com os materiais disponíveis na região.

O sistema aplicado sobre a cobertura era composto por uma camada de junco e betume, sobre a qual foi instalado uma camada de blocos cerâmicos queimados assentados com argamassa e a terceira e última camada de chumbo (SICULUS, 1933). A vida útil desta construção foi de aproximadamente 475 anos, tendo sua ruína, juntamente com a cidade, após incêndios e invasões por volta do ano 125 a.C (FERREIRA, 2014, p. 86).

¹ Fundação Atlas Virtual da Pré-História, <http://www.historia.avph.com.br/babilonia.php>

Saindo do mundo antigo para o início da idade contemporânea, a técnica da impermeabilização tal como a conhecemos teve parte de suas origens na indústria têxtil, na busca de desenvolver tecidos menos absorventes ou repelentes à água. Neste segmento, a partir de 1791 começou a ser explorada a borracha natural, utilizada com a finalidade impermeabilizante (LISTER, 1963, p. 298).

Na metade do séc. XIX, o sistema de impermeabilização consagrado era o chamado *“built-up coal tar pitch membranes”*, que era constituído de camadas de algodão, tecido cru ou feltro orgânico intercalado com betume ou alcatrão de hulha (carvão) aplicado a quente (HENSHELL, 2000, p. 5).

No Brasil, o desenvolvimento do setor da impermeabilização ocorreu de forma lenta e gradual com a importação de materiais. Os materiais asfálticos aplicados a quente, assim como as emulsões e soluções asfálticas entraram no Brasil na década após o final da primeira guerra mundial, pela empresa Light (INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 2018a, p. 33). Este material era amplamente utilizado na década de 1930 e perdurou por quase 50 anos (PIRONDI, 1988, p. 126 a 128).

Já os impermeabilizantes cimentícios eram utilizados no início do século XX como uma alternativa mais prática para execução. Este material era composto por uma matriz cimentícia com partículas finas de ferro (HENSHELL, 2000, p. 6). A propriedade mais importante era obtida pela hidrólise metálica, processo no qual ocorria a oxidação da superfície do ferro em presença da água de hidratação do cimento. Essa oxidação resulta aumento de volume nas partículas de ferro, em múltiplas vezes o volume destas não oxidadas, que preenche a porosidade da matriz cimentícia, formando um sólido coeso e resistente à penetração de água.

Até 1940, os impermeabilizantes a base de material betuminoso eram os mais utilizados no mundo. Porém, no cenário mundial a partir desta época houve um divisor de águas na indústria, a segunda guerra. Não obstante o desenvolvimento de materiais também ter relação com os fatores bélicos mundiais, os modelos de construção também tiveram que se adequar a estes cenários.

Henshell (2000, p. 2) aponta que após a segunda guerra mundial houve um crescimento na demanda e na exigência por qualidade da impermeabilização nas construções devido a um fator: a necessidade do uso dos espaços localizados no subsolo. Um dos fatores que corroborou para isso foi a expansão da climatização

artificial que possibilitou adequar os ambientes confinados e sem janelas. Desta forma, a tendência ao aproveitamento do subsolo para expandir as plantas de equipamentos eletrônicos, mecânicos e audiovisuais para áreas comerciais e estacionamentos eclodiu a necessidade de contenções e lajes de subsolo estanques.

No Brasil, diante da evolução da arquitetura de concreto armado, a qual possibilita grandes vãos e formas geométricas diversas, começaram a entrar no mercado, trazidos pela empresa Dupont, os materiais a base de borrachas de policloropreno (Neoprene) e de polietileno cloro sulfonado (Hypalon), os quais seriam aplicados em obras do arquiteto Oscar Niemeyer (INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 2018a, p. 15). Enquanto a evolução dos materiais ocorria no cenário internacional, as empresas brasileiras apenas os importavam. Foi a partir de 1950 que a indústria deu um passo inicial para a produção nacional, mesma década da inauguração de refinarias de petróleo no país (INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 2018a, p. 15).

A membrana betuminosa, modificada com polímeros auto aderida, foi desenvolvida com a necessidade de melhorar o controle de qualidade dos materiais para impermeabilização, aumentar a produtividade na execução e garantir maior segurança na aplicação. Este desenvolvimento foi feito por W.R.Grace por volta de 1960 (HENSHELL, 2000, p. 106). O material era composto por betume envolto em uma das faces por polietileno de alta densidade (HDPE) patenteado como Bithuthene®.

A partir de 1990, o tradicional sistema de camadas de tecido com betume quente moldado in loco entrou em declínio devido os impactos ambientais (HENSHELL, 2000, p. 7). Este material quando aquecido libera solventes voláteis, VOC (*volatile organic compound*), e potencialmente fumaça carcinogênica.

Diante deste cenário, a inovação de materiais de menor impacto ambiental foi necessária, e assim surgiram as membranas líquidas, sistemas aplicados a frio com base água em substituição à base solvente. Neste período, o desenvolvimento de composições químicas de borracha sintética foi alavancado.

Assim como as membranas betuminosas aplicadas a quente foram substituídas pelas membranas aplicadas a frio, os materiais cimentícios também tiveram desenvolvimento. O que conhecemos atualmente como cristalizantes, com a finalidade de colmatar os poros e capilares, substituiu as finas partículas de ferro e

alumínio da matriz cimentícia. As mantas betuminosas pré-fabricadas começaram a ser modificadas por polímeros SBR e polipropileno atático (APP) com reforço estrutural de fibra de vidro e não tecidos de poliéster (HENSHELL, 2000, p. 8).

Na busca de aprimorar os processos químicos e composições, juntamente com as borrachas sintéticas de policloropreno (Neoprene) e polietileno tratado com dióxido de enxofre e cloro (*Hypalon*) vieram o copolímero de isobutileno e isopreno (butil), o cloreto de polivinila (PVC), o isocianato modificado com poliéster (poliuretano) (LISTER, 1963, p. 308 a 313).

Como resultado do desenvolvimento de materiais e da técnica construtiva houve o processo de normalização. Este foi o produto do conhecimento tecnológico da época, assim como apresentou para o mercado os procedimentos, critérios e diretrizes para o segmento.

No Brasil, o processo de normatização teve início em 1983 com a norma ABNT NBR 8083 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983). Deste período em diante, a comissão de estudos de classificação de materiais e sistemas de impermeabilização, hoje denominada CB-22, trabalhou fortemente para garantir a continuidade do segmento.

Apesar de toda a evolução da indústria química, na fabricação de novos produtos, e da técnica de aplicação dos sistemas, no Brasil, a avaliação de desempenho dos sistemas ficou estagnada até o início dos anos 90, quando houve a publicação da norma ABNT NBR 12171 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). Essa norma versa sobre a avaliação da aderência de sistemas de impermeabilização. Uma avaliação de desempenho importante como a estanqueidade não possui norma própria, sendo procedimento de ensaio descrito na norma de execução de sistemas de impermeabilização ABNT NBR 9574 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008a).

2.2 Conceitos fundamentais

Com base em levantamento de normas técnicas e bibliografias disponíveis foram elencados os principais termos aplicados à impermeabilização. As definições propostas são úteis para melhor compreensão dos assuntos a serem abordados nos próximos itens e capítulos no contexto deste trabalho.

2.2.1 Impermeabilização

O tema impermeabilização tem sido apresentado por vários autores, entidades de classe, e associações normativas nacionais e internacionais desde o final do século XIX, conforme apresentado no histórico (item 2.1). Apesar do termo impermeabilização genericamente remeter à ideia de barreira, contra a água por exemplo, esta é apenas uma das palavras chaves para o tema. Na literatura internacional há duas formas distintas de abordar o elemento que proporciona estanqueidade: *waterproofing* e *dampproofing* (ALLEN; LANO, 2013, p. 72).

De acordo com a norma americana ASTM D1079, que define a terminologia relacionada a coberturas e impermeabilização, o termo *waterproofing* é definido como o tratamento de uma superfície ou estrutura para prevenir a passagem de água na fase líquida sob pressão hidrostática (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018a). Segundo Kubal (2008, p. 12), isto é resultado de uma combinação de materiais ou sistemas que previnem a intrusão da água nos espaços internos da edificação.

Partindo da análise do conceito de *waterproofing*, percebe-se duas funções: a primeira está relacionada ao desempenho dos sistemas construtivos da edificação e a segunda ao conforto e salubridade dos ambientes visando o usuário. O primeiro aspecto da função da impermeabilização é o mais abordado na bibliografia (FILHO, 2008; KUBAL, 2008; PICCHI, 1986), sendo considerada uma técnica dentro da atividade de engenharia que visa preservar a integridade e funcionalidade das estruturas. Para isto, é necessária a compreensão da atuação das forças naturais e dos seus efeitos prejudiciais durante o ciclo de vida da edificação.

O segundo termo aplicado ao elemento construtivo que aporta estanqueidade a uma dada superfície é *dampproofing*. Esta terminologia é originária dos termos em inglês

damp, que significa úmido ou umidade, e *proofing*, que no contexto da construção indica algo que resiste à, à prova de, ou que protege de. De acordo com a norma ASTM D1079 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018a, p. 3), o termo *dampproofing* é definido como o tratamento de uma superfície ou estrutura com a finalidade de impedir a passagem de água na ausência de pressão hidrostática. Desta forma, o termo é aplicado para um componente que seja à prova de umidade ascendente ou vapor, como os hidrofugantes (ALLEN; LANO, 2013, p. 73).

Na literatura americana estes dois termos parecem ser aplicados para a mesma finalidade, ou seja, impermeabilizar. Porém, o primeiro termo descrito indica um material ou sistema que resiste a pressão positiva ou negativa de água, na magnitude de 47,88 kPa (4,88 m.c.a) segundo Henshell (2000, p. 34), como em reservatórios, piscinas e lajes sob pressão. Uma vez que o segundo refere-se a materiais e sistemas que impedem somente o fluxo de umidade ascendente ou vapor por meio dos componentes construtivos como fundações e estruturas confinadas.

De acordo com Frazier (2014), os materiais aplicados contra umidade (sem pressão d'água) são constituídos em sua maioria de asfalto modificado com espessuras de filme seco $\leq 0,25$ mm e não possuem resistência à fissuração do substrato. Ainda segundo o referido autor, aqueles com função de resistir à pressão d'água são constituídos por mantas e membranas de espessuras $\geq 1,00$ mm.

De uma forma geral, a impermeabilização compreende tanto a proteção contra umidade quanto a pressão hidrostática. No Brasil, este termo é único para se referir a estes tratamentos. Em síntese, a impermeabilização no contexto da construção civil é o tratamento de uma superfície para torná-la estanque, quando submetida a pressão de fluídos na fase líquida ou vapor. Para isto são utilizados materiais impermeáveis, adequadamente selecionados, com espessura acima de 1,00 mm.

Considerada como uma técnica dentro da atividade de engenharia (CNAE 43.30-4/01), a impermeabilização, quando corretamente executado, tem a função de prevenir a percolação de água nos poros dos materiais constituintes dos sistemas construtivos (SRIRAVINDRARAJAH; TRAN, 2018). Desta forma, protege as edificações das ações deletérias de agentes agressivos, assim como mantém os ambientes internos isentos de infiltrações e umidade.

2.2.2 Sistema de Impermeabilização

Na literatura norte americana, o sistema de impermeabilização é compreendido como todo o invólucro ou revestimento do edifício (*building envelope*). Segundo Kubal (KUBAL, 2008, p. 1.2), em essência toda a estrutura deve ser revestida da fundação à cobertura para dificultar a entrada de agentes de degradação nos espaços internos, além de proteger os elementos estruturais das intempéries e deteriorações. Como “elementos naturais” o referido autor exemplifica a infiltração de água, transmissão de vapor, calor e fluxo de ar, raios ultravioletas e luz solar excessiva, e ruídos.

Assim, dentre as partes construtivas que requerem desempenho no quesito estanqueidade, para os autores americanos, a barreira contra a água é dividida em *below-grade* e *above-grade* (ALLEN; LANO, 2013; HENSHELL, 2000; KUBAL, 2008). O primeiro termo é relativo aos sistemas implantados abaixo do nível do solo, não expostos a ações de intemperismo como os raios ultravioleta. Já o segundo refere-se a sistemas aplicados acima do nível do solo, expostos ao intemperismo e ataque de poluentes.

No domínio *above-grade* de sistemas de impermeabilização, a *National Roofing Contractors Association* (NRCA) aborda este conceito aplicado a lajes como um sistema de componentes da cobertura que interagem entre si, geralmente constituído por membranas ou mantas, concebidos para resistir às intempéries (NACIONAL ROOFING CONTRACTORS ASSOCIATION, 2007). Segundo a norma de terminologia ASTM D1079 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018a), o sistema de impermeabilização é a conjugação de componentes interdependentes, projetados para evitar a passagem de água sob pressão hidrostática. O conceito apresentado pela referida norma ASTM utiliza o termo “projetados”, indicando a fase de projeto como atividade predecessora à execução.

De forma geral, no Brasil, os sistemas são aplicados nas edificações em duas frentes principais. A primeira na parte denominada infraestrutura, como fundações, estruturas de contenções, reservatório enterrados e lajes sob pressão. A segunda na superestrutura, como as vigas, pilares, lajes, reservatórios elevados e vedações verticais.

Dentro da superestrutura ressaltam-se três elementos que apresentam comportamentos estruturais diversos quais sejam a cobertura, as vedações internas e as vedações externas. Estes três elementos destacam-se dos demais por serem em geral os que são sujeitos a ação da água de forma direta ou indiretamente. Além disso, são elementos submetidos a diferentes níveis de exposição ao meio.

A norma prescritiva ABNT NBR 9575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) apresenta as definições dos componentes e termos relacionados a impermeabilização, assim como apresenta as exigências técnicas de projeto e detalhamentos para a composição de um sistema. As recomendações mínimas a serem atendidas para a etapa posterior, ou seja, a execução do sistema é apresentada na norma ABNT NBR 9574 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008a). Ainda segundo a ABNT NBR 9575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) um sistema de impermeabilização pode ser composto por dez possíveis camadas a serem aplicadas acima do substrato, como mostra o Quadro 2.1.

Substrato	Regularização (horizontal e vertical)
	Imprimação
	Berço
	Impermeável
	Separadora
	Amortecimento
	Drenante
	Proteção térmica
	Proteção mecânica (horizontal e vertical)
	Juntas (retração e anticompressão)

Quadro 2.1- Camadas indicadas na norma ABNT NBR 9575 para composição de um sistema de impermeabilização

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010)

A norma aborda o conceito e especificações para as camadas citadas no Quadro 2.1, contudo é de incumbência do projetista a seleção destas frente a estudos e análises das necessidades do cliente, além das condições e meios aos quais a edificação está

inserida. Desta forma, seguida da análise das variáveis intervenientes no processo de seleção, o projetista define os componentes e quais camadas serão dimensionadas, pois materiais iguais quando aplicados de maneiras distintas podem gerar sistemas de impermeabilização diversos (PICCHI, 1986, p. 35).

A norma de desempenho ABNT NBR 15575-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) indica o sistema de impermeabilização como parte do sistema de piso. Contudo, o sistema de impermeabilização não pode ser considerado apenas como uma linha dentro da representação gráfica de um sistema de piso. Isto porque aquele não é composto apenas pela camada impermeável, mas também pela adição das camadas necessárias como a de preparo do substrato e de proteção (SOUZA, 1997, p. 91).

Como indicado na Figura 2.1, o sistema de impermeabilização, como um subsistema de piso, pode ser composto por diversas camadas.

Figura 2.1- Exemplo de sistema de piso e seus elementos segundo a norma de desempenho

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e detalhes genéricos para cobertura adaptados do Departamento de Planejamento Físico da Universidade Federal de Minas Gerais (2015)

Ultrapassando os conceitos e funções é relevante notar que pensar a integralidade de um sistema de impermeabilização perpassa pelo processo de seleção de materiais e substrato, detalhamentos, compatibilização, instalações, controle tecnológico, qualidade e manutenção (SRIRAVINDRARAJAH; TRAN, 2018). O processo integrado para o sistema de impermeabilização é abordado por Lima et al. (2013) com uma visão estrutural de fluxo de informação, gestão de projeto, aquisição de insumos e execução. Deste modo, o sistema de impermeabilização, em sua maioria invisível devido aos demais sistemas construtivos que o encobrem, revela-se pleno de sutilezas dignas de análises devido a função que ocupa no desempenho e durabilidade da edificação.

No presente trabalho estudo é estudado um sistema de impermeabilização dito incompleto, com destaque para as camadas de substrato, imprimação e impermeável. O propósito da análise composta por apenas estes três componentes deve-se ao fenômeno que se deseja observar: a transferência de fissura do substrato para a camada principal aderida.

2.2.3 Diferença entre mantas e membranas

As mantas e membranas são os elementos aplicados ao sistema de impermeabilização para a formação da camada impermeável. No Brasil, estes termos têm sido erroneamente aplicados, por exemplo pelo uso do termo manta líquida ao invés de membrana, principalmente diante da necessidade das fábricas em tornar seus produtos visíveis ao mercado do varejo.

A seguinte definição é aportada pela ABNT NBR 9575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 5) “manta para impermeabilização: produto impermeável, pré-fabricado, obtido por processos industriais, tais como calandragem ou extensão”. Já as membranas são referenciadas, dentro da mesma norma, como “camada de impermeabilização moldada no local, com características de flexibilidade e com espessura compatível para suportar as movimentações do substrato, podendo ser estruturada ou não” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 5).

Na norma ASTM D1079 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018a) a terminologia é tratada de forma geral como *waterproofing membrane*, do inglês membrana resistente à passagem de água. De acordo com a referida norma, membrana é um material flexível ou semiflexível aplicado em uma cobertura ou em outro local que seja necessário impermeabilização, cuja função primária é a exclusão da água. Desta forma, a norma ASTM esclarece o conceito de forma única para todos os materiais, mantas ou membranas. Entretanto, na literatura internacional é possível encontrar também duas denominações: *liquid applied membrane* e *sheet waterproofing membrane*.

O primeiro termo é definido por Henshell (2000, p. 234) como “um material elastomérico, fluido a temperatura ambiente, que seca ou cura após aplicação para formar uma membrana contínua”. Apesar de serem materiais líquidos, suas propriedades são avaliadas somente após formar um filme curado e totalmente aderido ao substrato (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018b). São caracterizados como monolíticos, ou seja, é possível a formação de membranas contínuas sem a formação de emendas durante a aplicação (SRIRAVINDRARAJAH; TRAN, 2018). Neste grupo os materiais podem ser aplicados com auxílio de rolos, broxas e trinchas ou com uso de equipamentos para aplicação por spray. Dentro desta categoria estão, por exemplo, as membranas acrílicas, argamassas poliméricas e membranas de poliuretano.

O segundo termo, denominado *sheet*², do inglês lâmina ou folha, implica em um material sólido, pré-fabricado e, como o próprio nome sugere, em formato de lâminas contínuas em rolos com dimensões padronizadas no mercado. Tem sido determinada pela precisão na espessura e alta durabilidade. Ao contrário das membranas líquidas, as pré-fabricadas são assinaladas pela exaustiva quantidade de emendas oriundas do processo de instalação (ALLEN; LANO, 2013, p. 665; SRIRAVINDRARAJAH; TRAN, 2018). Neste grupo estão, por exemplo, a manta asfáltica modificada com polímeros, as mantas de PVC, TPO, EPDM, dentre outras. Estas podem ser totalmente aderidas (soldagem autógena ou a quente) ou parcialmente aderidas,

² O site Understand Building Construction possui uma enciclopédia de termos da construção de edifícios que apresenta conceitos referentes a membranas impermeabilizantes (UNDERSTAND BUILDING CONSTRUCTION, [s.d.]).

comumente chamadas flutuantes (termo fusão ou fixação mecânica). O Quadro 2.2 apresenta as diferenças mais relevantes entre as mantas e membranas.

Mantas (instaladas)	Membranas (construídas)

☐ Pré-fabricadas	☐ Moldados in loco (cura)
☐ Sólidos (rolos)	☐ Líquidos (baldes e caixas)
☐ Espessura controlada entre 1 a 5 mm	☐ Espessura variável entre 0,5 mm a 2 mm
☐ Emendas	☐ Sem emendas- monolítico
☐ Aderidos ou flutuantes	☐ Aderidos (necessidade de superfície regular)
☐ Maçarico (soldagem autógena), termofusão, mecânica	☐ Brochas, rolos, pincéis, spray

Quadro 2.2- Aspectos principais nas diferenças entre mantas e membranas.

De forma geral, tanto no Brasil quanto internacionalmente, os materiais aplicados como impermeabilizantes primários são classificados a partir da forma à qual chegam ao canteiro de obras, quais sejam prontos para instalação (mantas ou *sheet*) ou moldados no local (membranas ou *liquid applied*).

No item 2.3 estas categorias de materiais terão maior ênfase na composição química, forma de aplicação, assim como as vantagens e desvantagens do primeiro grupo descrito em detrimento ao segundo.

2.2.4 Estanqueidade e impermeabilidade

A norma ABNT NBR 9575 define estanqueidade como a “propriedade de um elemento (ou de um conjunto de componentes) de impedir a penetração ou passagem de fluidos através de si” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 4). De acordo com a referida norma, a estanqueidade de um sistema de impermeabilização está relacionada a dois fatores: as condições de exposição e a pressão atuante. Portanto, a estanqueidade é determinada por meio da capacidade do sistema em suportar uma

pressão limite quando em utilização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

Segundo Petrucci (1978, p. 82), a estanqueidade é obtida pela aplicação de materiais impermeáveis externa e superficialmente a um dado elemento construtivo (Figura 2.2 a). Ainda segundo o referido autor, os materiais que trabalham internamente ao elemento, como os cristalizantes, aditivos hidrófugos ou impermeabilizantes de massa, podem cooperar para proporcionar ao elemento menor permeabilidade à água, contudo quando da manifestação de fissuras e em pontos de juntas ocorre a ausência da estanqueidade (Figura 2.2 b).

Figura 2.2- Representação de elemento estanque (a) e elemento não estanque com manifestações patológicas como fissuras e perda de aderência da camada impermeável (b)

Dessa forma, os materiais que agem dentro do substrato, como concretos e argamassas, reduzindo os poros capilares são considerados como impermeabilizantes secundários (SRIRAVINDRARAJAH; TRAN, 2018). Por isso, a aplicação de componentes externos para conferir ao elemento a estanqueidade requerida pode ser necessária.

A impermeabilidade, por sua vez, é o critério principal a ser analisado da seleção de um material para compor a camada principal do sistema de impermeabilização (TYE, 1994, p. 37). O termo impermeabilidade está relacionado a propriedade de um

material ser menos permeável a fluidos (PETRUCCI, 1978, p. 82; TYE, 1994, p. 37). Henshell (HENSHELL, 2000, p. 236) apresenta dois aspectos conceituais aplicados ao termo permeabilidade, sendo o primeiro relacionado a capacidade de um meio poroso de conduzir fluidos. O segundo aspecto está relacionado à taxa de vazão de um fluido (líquido ou gás) em movimento por meio de uma barreira em uma unidade de tempo, de área e de gradiente de pressão não padronizada, mas diretamente relacionada à espessura. Bertolini (2014, p. 40) atribui a esta propriedade o termo permeação, o qual é conceituado como o “mecanismo pelo qual um fluido, um gás ou um líquido penetram através dos poros do material, como efeito de um gradiente de pressão”.

De acordo com Tye (TYE, 1994, p. 39) mesmo os materiais poliméricos absorvem umidade, especialmente sob condições de contínuo contato com o meio ambiente e ações da temperatura. Por isto, para o referido autor, um material ou combinações de materiais aplicados para fins de barreira contra água são “virtualmente impermeáveis”.

Petrucci (PETRUCCI, 1978, p. 82) atribui a impermeabilidade como uma característica natural dos materiais de construção, a qual “deve ser protegida contra o aparecimento de fissuras e fendas pelos produtos de estanqueidade”. Os denominados “produtos de estanqueidade” pelo referido autor são materiais aplicados externamente a um elemento para impossibilitar a passagem da água. As características macroscópicas destes devem ser tais como “muito aderentes e ligeiramente penetrantes na superfície a revestir, resistentes a abrasão e quimicamente inertes [...] a aglomerantes e agregados” (PETRUCCI, 1978, p. 82) .

De acordo com Tye (TYE, 1994, p. 40), de maneira simplificada a impermeabilidade é obtida assegurando que o material tenha baixa porosidade, seja pela alta densidade ou por uma espessura substancial, de modo que a superfície interna deste seja relativamente pequena. Como consequência, ainda que o material esteja em contato direto com fluídos, seja por meio da umidade do ar ou acumulados na superfície externa, haverá menor oportunidade para penetração destes.

Um outro requisito para os materiais denominados impermeáveis, segundo Tye (TYE, 1994, p. 40), é serem “relativamente inertes à ação da água ou a um ambiente que contenha quantidades significativas de umidade”. Segundo Kuraman et al. (1994) , a

higroscopicidade, grau de afinidade de um material com a água, também está relacionada com a impermeabilidade.

Assim, a quantidade de umidade absorvida por unidade de área de um material sólido dependerá da temperatura, pressão atmosférica e pressão de vapor ou líquido. Isto posto, pode-se compreender que um material será “impermeável” quanto menor for a taxa de absorção de fluidos em relação a taxa de evaporação superficial deste.

2.3 Famílias de materiais para impermeabilização

A norma NBR 9575 classifica os materiais aplicados aos sistemas de impermeabilização de acordo com a constituição principal da camada impermeável, quais sejam: poliméricos, asfálticos e cimentícios (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) .

Contudo, os dois primeiros, ainda que sejam tratados como materiais distintos, são classificados dentro de um especial ramo da química orgânica, como polímeros. O terceiro, no entanto, apresenta comportamento e propriedades diversas, caracterizando-se como um material rígido, ainda que tenha em sua composição adição de polímeros.

Por isto, como ilustrado na Figura 2.3, é proposta inicialmente uma visão holística dos materiais utilizados para a composição dos sistemas de impermeabilização em duas grandes famílias: os polímeros e os compósitos de matriz cimentícia.

De acordo com Askeland e Wright (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 508), a melhor e mais evidente forma de subdividir os plásticos em categorias é observando o comportamento térmico e mecânico. Assim, a depender da reação destes materiais quando submetidos a variação de temperatura se encaixarão no grupo dos termoplásticos ou dos termofixos (SMITH; HASHEMI, 2012, p. 332).

Os compósitos são aqueles materiais de engenharia formados pela combinação de dois ou mais materiais de diferentes características, que quando atuam em conjunto formam um elemento com propriedades melhores que as suas iniciais (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2020a).

Na Figura 2.3 estes materiais apresentam uma matriz cimentícia e uma fase composta por fibras e/ou polímeros, que atuam visando melhorar suas propriedades. A matriz cimentícia geralmente é uma argamassa, composta por cimento Portland, agregado miúdo e água.

Figura 2.3- Visão holística das famílias de materiais aplicados à impermeabilização

O Quadro 2.3 apresenta os materiais aplicados à impermeabilização utilizados no mercado brasileiro, organizados de acordo com a classificação apresentada na Figura 2.3 e com a respectiva norma brasileira.

Classificação	Estrutura geral	Exemplos de materiais impermeabilizantes	Norma ABNT
Compósitos de matriz cimentícia com adição de polímeros		Argamassa com aditivo impermeabilizante (argamassa impermeável)	NBR 16072:2012
		Argamassa polimérica industrializada para impermeabilização	NBR 11905:2015
Termoplástico	Cadeias lineares flexíveis (Ramificadas ou não)	Membrana de asfalto modificado sem adição de polímero	NBR 9910:2017
		Membrana de emulsão asfáltica	NBR 9685:2005
		Membrana asfáltica para impermeabilização com estrutura aplicada a quente	NBR 13724:2008
		Manta asfáltica	NBR 9952:2014
		Membrana de copolímeros acrílicos	NBR 13321:2008
		Manta de policloreto de vinila (PVC)	NBR 9690:2007
		Manta de poliolefinas termoplásticas (TPO)	
		Manta termoplástica de polietileno de alta densidade (PEAD) e de polietileno linear (PEBDL)	NBR 15352:2006
Termofixo	Rede tridimensional rígida (as cadeias podem ser lineares ou ramificadas)	Membrana de poliuretano bicomponente	NBR 15487:2007
		Membrana de poliuréia	Grupo de trabalho formado (2018)
		Membrana de poliuretano com asfalto	NBR 15414:2006
		Membrana de polímero acrílico com ou sem cimento	NBR 15885:2010
		Membrana epoxídica	NBR 14050:1998
Elastômero	Termoplásticos ou termofixos ligeiramente reticulados, consistem em moléculas com efeito mola importante	Bocal de Etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM) para impermeabilização de descida de água	NBR 15375:2007
		Manta elastomérica de Etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM)	NBR 11797:1992
		Manta de Butil	NBR 9229:1986
		membrana de asfalto elastomérico	NBR 13121:2009
		Membrana elastomérica de isobutileno isopreno (IIR) em solução	NBR 15460:2007

Quadro 2.3- Classificação dos sistemas de impermeabilização utilizados no Brasil-

Fonte: Adaptado de Askeland (2014, p. 509), Callister (2018, p. 507), Mano (2000, p. 65) e ABNT NBR 9575 (2010)

2.3.1 Polímeros

Como explanado no item 2.1 deste trabalho, os materiais poliméricos tem sido aplicados para fins de impermeabilização para proteção da ação deletéria da água e obter elementos estanques desde a idade antiga. Na indústria brasileira, a construção civil é a segunda maior consumidora destes materiais, principalmente de resinas

termoplásticas (BAUER, 2019, p. 438). Como indicado na Figura 2.3, os polímeros podem ser classificados, de forma geral, em termofixos, termoplásticos e elastômeros.

Os polímeros termofixos são compostos por longas cadeias moleculares, lineares ou ramificadas, reticuladas umas às outras em rede tridimensional (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 509). Comumente chamados de termorrígidos, como o próprio termo indica, não podem ser reamolecidos ou remoldados após adquirirem sua forma permanente (BAUER, 2019, p. 441; SMITH; HASHEMI, 2012, p. 332). Isto ocorre devido a intensidade de ligações cruzadas³ covalentes entre as moléculas adjacentes, as quais proporcionam resistência às vibrações e rotação das cadeias durante o processo de aquecimento (CALLISTER, 2018, p. 101). Em um polímero termofixo, o processo de cura ocorre por meio de reações químicas em meio ao calor, a radiação, a pressão ou a agentes catalisadores (BAUER, 2019, p. 441).

Os polímeros termoplásticos são sensíveis à variação da temperatura, pois amolecem tendendo a fluir quando aquecidos ou sob pressão, e enrijecem ao serem resfriados (EBEWELE, 2000, p. 31; SMITH; HASHEMI, 2012, p. 332). Este fenômeno ocorre em um processo reversível e passível de repetição (reciclagem mecânica), a menos que temperatura ultrapasse a de fusão, acarretando em degradação, sendo neste ponto um processo irreversível (BAUER, 2019, p. 440; CALLISTER, 2018, p. 101). Uma membrana de polímero termoplástico tem seu processo de cura pela evaporação do componente volátil, restando apenas o componente sólido para a formação do filme seco.

Os elastômeros, apesar de sua estrutura e comportamento serem próximos aos descritos por termoplásticos, são caracterizados por não se cristalizarem (amorfos) e por apresentarem T_g (transição vítrea) abaixo da temperatura ambiente (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 538; YOUNG et al., 1998, p. 45). Sua deformação elástica é prolongada antes de entrar na fase plástica, pois possuem segmentos de cadeias espiraladas e com elevada mobilidade local. Devido a isto, atingem grandes deformações, entre 200% até 1000% (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 510; EBEWELE, 2000, p. 30; MANO, 2000). Esta mobilidade pode ser limitada ao ser

³ Nos termofixos as ligações cruzadas são bastante elevadas, chegando a representar entre 10% a 50% das unidades repetidas das cadeias (CALLISTER, 2018, p. 101).

introduzidas ligações cruzadas na estrutura, que atuam como ponto de ancoragem entre as cadeias e impede um livre deslizamento entre elas (CANEVAROLO; SEBASTIÃO, 2006, p. 43). Este processo é realizado por meio de reações químicas irreversíveis, em altas temperaturas, chamado vulcanização (YOUNG et al., 1998, p. 45).

Propriedades mecânicas

A Figura 2.4 apresenta o processo de deformação dos polímeros como resposta a imposição de determinada tensão de tração.

Figura 2.4- Comportamento tensão-deformação dos polímeros

Fonte: Adaptado de CALLISTER (2018, p. 194, 246 e 247)

Conforme observado na Figura 2.4, o comportamento de um polímero termofixo, ou termoplástico abaixo da T_g , é indicado pela curva A. Por apresentar baixa ductibilidade, sofre fratura enquanto se deforma elasticamente (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 540; CALLISTER, 2018, p. 194).

O comportamento de um polímero termoplástico acima da T_g , ou amorfo, é representado pela curva B, em que a deformação inicial é elástica, seguida de um patamar de escoamento e ruptura após se deformar plasticamente (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 531; CALLISTER, 2018, p. 194). A curva C apresenta o comportamento de um polímero elastomérico. Este é caracterizado pela deformação plástica não linear, o que é percebido em quase toda extensão da curva tensão por deformação (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 537). Nesta categoria de polímeros as grandes deformações passíveis de recuperação ocorrem em baixos níveis de tensão (EBEWELE, 2000, p. 143).

O diagrama expandido da curva B mostra a deformação macroscópica das moléculas das cadeias quando uma tensão de tração é aplicada, com o desenvolvimento da fase elástica (estágio 1 e 2) e plástica (estágio 3 e 4). A deformação elástica ocorre com o estiramento dos dois blocos de lamelas e material amorfo interlamelar. Com a distorção das ligações covalentes dentro da cadeia, há o alongamento das espirais na direção da força aplicada (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 530). Isto é possível por meio da rotação das cadeias tetraédricas de carbono C-C (YOUNG et al., 1998, p. 39). A deformação plástica acontece quando a tensão excede o limite de escoamento. Dado o desentrelaçamento e o deslizamento das cadeias nesta etapa, a deformação se torna permanente. Durante este estágio (3) os blocos lamelares se separam, com o consequente alinhamento das cadeias, onde ocorre a estricção (redução de seção localizada). A partir deste momento, as forças secundárias (van der Waals) são responsáveis por unir essas cadeias mais intensamente, o que requer tensões mais elevadas para continuar a deformação que levará a ruptura (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 531).

Juntamente com as propriedades mecânicas, alguns conceitos reológicos são interessantes para uma melhor compreensão do comportamento dos materiais impermeabilizantes, principalmente aqueles de base asfáltica. A depender da resposta às tensões externas, os polímeros podem sofrer deformações que são

instantâneas, elásticas, ou mais demoradas, viscosas (BAUER, 2019, p. 443; CASSU; FELISBERTI, 2005). No caso dos viscoelásticos, o comportamento intermediário pode ocorrer. Os efeitos de energias externas (temperatura) e o tempo são considerados fatores determinantes para transições entre o estado elástico e viscoso do polímero (CASSU; FELISBERTI, 2005). O conhecimento das propriedades mecânicas e da temperatura de transição vítrea (T_g) é importante para a definição de uso desta classe de material. A fim de exemplificar, em um rol não exaustivo, o Quadro 2.4 apresenta algumas propriedades dos polímeros termoplásticos.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Tm (°C)	Tg (°C)	Aplicação
Polietileno Baixa densidade (PEBD)	172-282	9,0-14,5	8,3-31,4	100-650	115	-110	Camada separadora
Policloreto de vinila (PVC)	2.410-4.140	40,7-44,8	40,7-51,7	40-80	212	87	Manta termoplástica de PVC
Polipropileno (PP)	1.114-1.555	31,0-37,2	31,00-41,4	100-600	175	-18 a -10	Fibra para argamassa polimérica
Poliestireno (PS)	2.228-3.280	25,0-69-0	35,9-51,7	1,2-2,5	240	100	Camada de isolamento térmico
Poli (metacrilato de metila), PMMA, acrílico	2.240-3.240	53,8-73,1	48,3-72,4	2,0-5,5	160	105	Membranas de PMMA e resinas para argamassas poliméricas
Polietileno tereftalato (PET)	2.760-4.140	59,3	48,3-72,4	30-300	265	69	Estruturante para mantas e membranas
Poliuretano*	3.000-6.000	-	35-71	1300	-	-	Membranas
Elastômeros- Estireno- Butadieno (SBR)	2,0-10,0	-	12,4-20,7	450-500	-	-	Aditivo para membranas e mantas asfálticas
Époxi	2.410	-	27,6-90,0	3,0-6,0	-	-	Membrana epoxidica

Quadro 2.4- Propriedades mecânicas de diferentes polímeros termoplásticos

Fonte: Callister (2018, p. 728, 734 e 758), *Young et al. (YOUNG et al., 1998, p. 351)

2.3.1.1 Exemplos de polímeros na impermeabilização

Resina Acrílica

A resina acrílica é formada pela polimerização do monômero líquido metil metacrilato (MMA) por meio de um mecanismo de radicais livres (EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS., 2010, p. 66). Apesar da formulação ser diferenciada para cada fabricante, em geral, cerca de 50% dos sólidos em volume é composto por resina. Outros componentes como dióxido de titânio (a fim de mitigar a deposição de calcário quando exposta à intempérie), produtos químicos resistentes a fungos e cargas para aumentar o teor de sólidos podem ser inseridos na formulação (KUBAL, 2008, p. 3.29).

Quanto maior o teor de resina acrílica melhor a capacidade do material em formar uma membrana que penetre nos poros e forme uma barreira com alta aderência e repelência à água (KUBAL, 2008, p. 3.14). O termo “repelência” é utilizado pelo autor para indicar que este material não é uma membrana impermeabilizante, mas atua como seladora repelente à água (KUBAL, 2008, p. 3.38). Isto decorre de três fatores: (i) devido à baixa capacidade elastomérica, quando aderidas, são passíveis de menor resistência à transmissão de fissuras, (ii) a adição de sílica nas formulações, o que impacta na redução das suas propriedades elásticas, e (iii) por serem sensíveis à umidade durante o processo de cura podem sofrer o processo de re-emulscionamento (KUBAL, 2008, p. 3.30 e 3.38).

Além de serem permeáveis a gases e vapor d'água (MCKEEN, 2017a), os plásticos acrílicos apresentam absorção superficial de água (PETRUCCI, 1978, p. 407). No mercado brasileiro, as membranas acrílicas são aplicadas para fins impermeabilizantes com as devidas restrições. Neste sentido, a norma NBR 13321 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b) indica os limites máximos para absorção de água de 15%, como indicado no Quadro 2.5. Além disto, são indicadas para superfícies ligeiramente inclinadas (mínimo de 1%), para que não haja acúmulo de água, e áreas não sujeitas a movimentação térmica e tráfego de veículos.

	NBR 13321	ASTM D6083
Alongamento (min.) %	100	100
Resistência à tração ruptura (MPa)	1,5	1,4
Aderência	Não indica	350N/mm
Envelhecimento acelerado por temperatura	Análise qualitativa (não pode ter bolhas e fissuras)	Análise qualitativa (sem fissuras)
Alongamento após envelhecimento acelerado (%)	100	100
Permeabilidade (Pa.s.m²)	Não indica	2.875
Absorção (%)	15	20

Quadro 2.5- Parâmetros normativos para propriedades físicas, mecânicas e desempenho para membranas acrílicas segundo as normas NBR 13321 (corpo de prova em formato gravata) e ASTM D6083 (corpo de prova em formato tira)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 13321 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b) e ASTM D6083 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018b)

Os sistemas constituídos por membrana acrílica podem receber reforço com telas estruturantes, sendo a mais aplicada a composta por poliéster. De acordo com KUBAL (KUBAL, 2008, p. 2.29), este reforço, quando aplicado após a primeira camada (demão) da membrana, pode aumentar a capacidade do sistema em resistir a fissuração proveniente do substrato. Porém, como o sistema é fortemente aderido ao substrato de concreto ou alvenaria a capacidade de movimentação é limitada (KUBAL, 2008, p. 2.29). O Quadro 2.6 indica algumas vantagens e desvantagens do uso das membranas acrílicas.

Vantagens	Desvantagens
Materiais com alto teor de sólidos podem preencher pequenos poros e microfissuras no substrato	Baixa resistência a intempéries
Várias cores disponíveis, compatíveis com outros materiais de revestimento	Pode absorver superficialmente partículas de sujeira durante a fase de cura
Forma uma camada respirável, pois permite a transmissão de vapor	Baixa resistência à transferência de fissuras do substrato
Fácil aplicação	Não resistente a tráfego veicular

Quadro 2.6- Vantagens e desvantagens da membrana de emulsão acrílica segundo KUBAL

Fonte: (KUBAL, 2008, p. 3.15)

As membranas acrílicas são frequentemente aplicadas com rodos, pincéis ou brochas sobre superfícies de concreto, alvenaria e argamassas com a função de reduzir a entrada de água, íons de cloreto e produtos químicos (INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 2018b). Além de serem usadas em sistemas construtivos em edificações, podem ser usadas em obras especiais como superfícies de pontes e concreto arquitetônico (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2013).

Manta asfáltica

O asfalto⁴ é um dos vários tipos de mistura de hidrocarbonetos da classe dos materiais betuminosos, podendo ser de origem natural ou pirogênica, sendo este um subproduto da indústria petroquímica, obtido pela destilação do petróleo entre 300 a 350°C (ABRAHAM, 1920, p. 23; WHITESIDE, 1996). No mercado brasileiro, os processos industriais geram a partir deste material os: cimentos asfálticos de petróleo, asfaltos diluídos, emulsões asfálticas, asfaltos oxidados e aqueles modificados por polímeros (BERNUCCI et al., 2008, p. 41).

Considerado um dos materiais impermeabilizantes mais aplicados, a manta asfáltica é constituída por três relevantes partes: a massa asfáltica, o estruturante e o acabamento (KUBAL, 2008, p. 2.51). Para aprimoramento do comportamento mecânico, é comercialmente aplicada a técnica do estiramento do estruturante. Este processo torna as propriedades do material anisotrópicas, indicando que a depender da direção de aplicação da tensão poderá haver maior ou menor resistência à tração. As tensões atuantes na direção paralela da orientação do estruturante podem aumentar o limite de resistência à tração em duas a cinco vezes. Contudo, tensões aplicadas perpendicularmente à direção do alinhamento podem levar a queda de cerca de 33% a 50% do limite de resistência (CALLISTER, 2018, p. 249).

No mercado americano, as mantas asfálticas são classificadas de acordo com o tipo de polímero adicionado na massa asfáltica, qual seja: polipropileno atático (APP) ou estireno-butadieno-estireno (SBS) (ALLEN; LANO, 2013, p. 666). Também, podem

⁴ A composição química do asfalto é complexa e variável, pois depende da origem do óleo extraído. Sabe-se que os elementos principais constituintes são: carbono (80-87%), hidrogênio (9-11%), oxigênio (2-8%), nitrogênio 0-0,1%, enxofre (0,5-0,7%) e metais (0-0,5%) como ferro, níquel, vanádio e cálcio (YOUNG et al., 1998).

ser classificadas de acordo com o tipo de estruturante: fibra de vidro, poliéster ou a junção de dois estruturantes em uma mesma manta (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016b, 2016c). A norma brasileira NBR 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a) indica a classificação da manta em Tipo I, II e III, porém não especifica qual o tipo de modificação do polímero da massa asfáltica e estruturante que cada tipo pode conter. Por outro lado, são indicados os requisitos para ensaios como resistência à tração e alongamento os quais devem ser atendidos de acordo com cada classe de material, como mostra o Quadro 2.7

Ensaio		Unidade	Tipo			
			I	II	III	IV
1.Espessura (mínimo)		mm	3 mm	3 mm	3 mm	4 mm
2.Resistência à tração e alongamento (longitudinal e transversal)	Tração (mínimo)	N	80	180	400	550
	Alongamento (mínimo)	%	2	2	30	35

Quadro 2.7 Parâmetros para ensaios de resistência à tração e alongamento de mantas asfálticas

Fonte: NBR 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a)

A aplicação da manta asfáltica pode ser por soldagem autógena, com uso de um adesivo ou podem ser autoadesivas. A primeira forma é com o uso de maçarico a gás com um gatilho controlador de chama, com haste de 50 cm e bocal de 2" (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a). Na colagem com adesivo é aplicado o asfalto com adição de polímeros ou oxidado, aquecido a temperatura média de 160 a 180°C. Já as mantas autoadesivas possuem uma das faces colantes quando retirado o filme antiaderente. O Quadro 2.8 indica algumas vantagens e desvantagens da aplicação da manta asfáltica.

Vantagens	Desvantagens
Uniformidade da espessura aplicada	Dificuldade para aplicação em pequenas áreas e locais confinados
Suporta falhas do substrato	Dificuldade de reparo
Aplicável sobre substratos de madeira	A água pode ficar retida debaixo da manta caso não corretamente executada

Quadro 2.8- Vantagens e desvantagens do uso da manta asfáltica

Fonte: Adaptado de Kubal (2008, p. 3.42)

2.3.2 Compósitos

Os compósitos são materiais compostos por mais de uma fase, comumente uma matriz e uma fase dispersa, as quais dentro das proporções projetadas formam um novo material com propriedades físicas e mecânicas aprimoradas, as quais seriam inatingíveis pelas fases individuais (CALLISTER, 2018, p. 566; CHAWLA, 2012, p. 4).

De forma geral, os materiais compósitos podem ser divididos em dois tipos de estrutura com duas fases distintas (VAN GEMERT et al., 2005). Segundo Neville e Brooks (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 4), o primeiro seria o compósito duro, constituído de uma matriz contínua com maior módulo de elasticidade e uma fase com partículas com menor módulo, no qual se enquadrariam os compósitos de matriz cimentícia. O segundo seria um compósito macio com estrutura dividida em partículas de maior módulo dispersas em uma fase matriz de menor módulo (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 4), no qual se enquadrariam os compósitos de matriz polimérica. Dentro do grupo de compósitos de base cimentícia estão os concretos e argamassas com adição de polímeros.

Propriedades mecânicas

A obtenção das propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos geralmente não tem as mesmas configurações de ensaio de tração utilizadas para os polímeros e metais. Segundo Callister (CALLISTER, 2018, p. 189) isto está relacionado a três fatores: (I) dificuldade na moldagem dos corpos de prova na geometria em tira ou halter; (II) dificuldade em alinhar os corpos de prova na garra da máquina de ensaio sem danificá-los e (III) devido a falhas abruptas sem grandes deformações (0,1%) durante o ensaio. Por isso, para argamassas, por exemplo, o ensaio de flexão de prismas é geralmente utilizado.

Devido às fortes ligações covalentes e iônicas, as matrizes cerâmicas apresentam comportamento mecânico rígido, frágil e, portanto, com baixa tensão de ruptura (CHAWLA, 2012, p. 98). Por isso, os materiais cimentícios, como as argamassas, não são resistentes à ação de fissuras que podem ocorrer no substrato (HENSHELL, 2000, p. 2.31). Por outro lado, a adição de polímeros pode melhorar as características de materiais a base de cimento (WALDVOGEL et al., 2020a).

Na modificação de argamassas, devido a presença de polímeros e agentes surfactantes, há a formação de coalescência das partículas de polímero interligadas com os grãos de cimento hidratado, levando a formação de um filme ou membrana contínua (GODOY; BARROS, 1997).

As propriedades mecânicas destas matrizes cimentícias podem ser melhoradas com a dosagem de polímero entre 5% a 30% em massa. O uso de teor abaixo de 5% não é suficiente para aumentar a resistência, assim como acima de 30% pode causar descontinuidade na matriz e diminuir a resistência (GODOY; BARROS, 1997). Assim, a fase dúctil da matriz, proporcionada pelo polímero, apresentam maior resistência à tração e podem prevenir propagação de fissuras advindas do substrato (VAN GEMERT et al., 2005; WALDVOGEL et al., 2020a). Estudos anteriores indicaram o bloqueio da transferência de fissuras de 9 µm em concreto com polímeros (VAN GEMERT et al., 2005) e de cerca de 400 µm em argamassas com adição de polímeros (YU; SUN, 2017).

Juntamente com a composição de polímeros, as matrizes cimentícias podem receber reforços como fibras curtas, fibras contínuas, ou telas (também denominado tecido ou véu) (CHAWLA, 2012, p. 7). O uso de reforços como tela de poliéster e fibras de polipropileno tem sido uma tendência nos sistemas constituídos por argamassas poliméricas no mercado nacional (FILHO, 2020). Desta forma, estes materiais impermeabilizantes apresentam comportamento combinado dos dois componentes: matriz cimentícia dispersa em resinas poliméricas e interface fibra/matriz ou tela/matriz.

2.3.2.1 Exemplos de materiais compósitos para impermeabilização

Para impermeabilização são aplicadas as membranas cimentícias, comumente chamadas de argamassas impermeabilizantes, sendo classificadas no mercado nacional como: argamassa impermeável, regida pela NBR 16072 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012a), e argamassa polimérica industrializada segundo a NBR 11905 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015a). A diferença principal entre os dois materiais está no processo de dosagem e mistura dos componentes, sendo o primeiro feito em obra e o segundo pré-dosado em fábrica.

As argamassas impermeabilizantes são compósitos que consistem em duas fases sólidas: os agregados, dispersos de forma descontínua dentro do material e o aglutinante, sendo este dividido em fase cimentícia e outra fase polimérica (VAN GEMERT et al., 2005). Os principais polímeros adicionados como modificadores das argamassas cimentícias são: emulsões acrílicas, acetato de polivinila (PVA), etil-vinil acetato (EVA), copolímeros de estireno-butadieno (SBR) e borracha de cloroprene (CR) (GODOY; BARROS, 1997; YU; SUN, 2017). Junto aos modificadores também são inseridos aditivos como os surfactantes (estabilizantes), os antiespumantes e os reagentes para indução da polimerização dos monômeros (GODOY; BARROS, 1997).

O princípio da modificação das argamassas com polímeros está no estado fresco da mistura, quando ocorre a hidratação das partículas de cimento e a formação do filme de polímeros por meio da polimerização *in situ* (VAN GEMERT et al., 2005). Após a evaporação da água e da reação de hidratação do cimento, as partículas de polímero são progressivamente ajustadas nos poros capilares da pasta de cimento (GODOY; BARROS, 1997; HENSHELL, 2000, p. 2.25; YU; SUN, 2017). Quando no estado endurecido, há a formação de um compósito com uma fase frágil, composta por materiais de enchimento de agregados de quartzo, partículas de cimento hidratados ou não, e poros de ar incorporados no processo de mistura (VAN GEMERT et al., 2005; WALDVOGEL et al., 2020a). Neste tipo de material, a matriz é frágil e a adição de partículas de monômeros ou copolímeros torna a fase dispersa dútil.

As argamassas impermeabilizantes são amplamente utilizadas em alvenarias e superfícies de concreto, pois formam uma membrana de proteção fortemente aderida a estes substratos tornando o sistema integrado (KUBAL, 2008, p. 3.23). Podem ser aplicadas com brochas, trinchas, rolos ou spray, em camadas uniformes, com espessura recomendada entre 1,5 a 2 mm, aplicadas em demãos cruzadas (KUBAL, 2008, p. 3.27; YU; SUN, 2017). As primeiras camadas aplicadas colaboram para fechamento de poros e vazios no substrato, as demais camadas formam uma membrana contínua e de textura lisa quando finalizada com esponja (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008a; KUBAL, 2008, p. 3.27). O Quadro 2.9 indica algumas vantagens e desvantagens do uso da argamassa impermeabilizante.

Vantagens	Desvantagens
Excelente capacidade de aderência em substratos cimentícios	Capacidade de absorver movimentações do substrato limitadas
Aplicável para áreas de infraestrutura e superestrutura	Dificuldade no controle de aplicação de camadas uniformes
Resistente às intempéries do meio	Necessário mão de obra especializada para aplicação
Pode tampar poros e vazios no substrato	Não é aplicável sobre metais e madeira

Quadro 2.9- Vantagens e desvantagens do uso argamassa impermeabilizante

Fonte: Adaptado de Kubal (2008, p. 3.25)

Como descrito no item 2.3.2.1, a adição de polímeros em argamassas para fins impermeabilizantes aporta melhorias significativas como o aumento da resistência mecânica. Contudo, devido a fase frágil da matriz, a capacidade de absorção de deformações e fissuras do substrato ainda se mostra limitada quando comparada aos materiais elastoméricos (KUBAL, 2008, p. 3.25).

2.4 Métodos de ensaio para materiais e sistemas de impermeabilização

2.4.1 Ensaio de resistência à tração

Com o ensaio de tração são obtidos dados para comparação e conhecimento dos plásticos de engenharia. Os resultados são aplicados, por exemplo, para especificação em projetos ou para o desenvolvimento de novos produtos.

Por ser uma propriedade de engenharia, a resistência à tração é influenciada por variáveis extrínsecas que impactam na resposta do material em reação a aplicação da carga durante o ensaio tais como: a geometria da amostra, o método de preparo, a velocidade, o tipo de garras utilizadas e a forma de medir a deformação (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a; CALLISTER, 2018, p. 190). Consequentemente, para a obtenção de dados de propriedades mecânicas é importante que estes parâmetros sejam padronizados.

Contudo, os dados obtidos por este ensaio não podem ser considerados válidos para comparação com aqueles obtidos em situações diferentes, isto devido ao alto grau de sensibilidade dos polímeros à taxa de deformação, temperatura e ações do meio

ambiente como presença de água, radiação solar e solventes orgânicos (YOUNG et al., 1998, p. 354 e 355). Assim, quando há o propósito de comparar resultados, tais fatores devem ser controlados cuidadosamente em laboratório (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a).

Considerando a necessidade de padronização para caracterização, normas nacionais e internacionais indicam metodologias de ensaio de tração para materiais poliméricos. O Quadro 2.10 indica algumas referências que tratam de materiais aplicados especificamente para impermeabilização ou de forma geral para plásticos termoplásticos, termofixos e borrachas.

Formato	Método de Ensaio	Escopo
Haltere (gravata)	ASTM D638 (2014a) e ISO 527-1 (2012)	Plásticos reforçados ou não, com espessura ≤ 14 mm
	ISO 527-3 (2019)	Mantas e filmes com espessura $\leq 1,00$ mm
	ASTM D412 (2016d)	Borrachas termofixas vulcanizadas e elastômeros termoplásticos
	NBR ISO 37 (2015b)	Borrachas Vulcanizadas ou termoplásticas
	NBR 16548 (2017)	Materiais de impermeabilização
	ASTM D2523 (2019a)	Membranas para cobertura* (amostras feitas em laboratório ou retiradas do campo para ensaio em laboratório)
Retangular (tira)	ASTM D5083	Plásticos termofixos reforçados
	ASTM D882 (2018c)	Mantas e filmes com espessura $\leq 1,00$ mm
	ASTM D2370 (2016e)	Filmes e membranas (<i>organic coatings</i>)
	ASTM D5147 (2018d)	Mantas asfálticas
	NBR 9952 (2014a)	Mantas asfálticas para impermeabilização

Quadro 2.10- Referências normativas que abordam metodologias de ensaio de tração para materiais plásticos de engenharia

Conforme observado no Quadro 2.10, as metodologias de ensaio podem ser divididas em dois grandes grupos a depender da geometria do corpo de prova, qual seja com a seção transversal retangular (tira) ou haltere (gravata). Esta última configuração apresenta maior esbeltez na região central do corpo de prova, o que proporciona a indução das tensões para esta área. Isto proporciona o confinamento das

deformações, passíveis de medição por meio de extensômetros, além de mitigar a possibilidade de ruptura nas extremidades do corpo de prova (CALLISTER, 2018, p. 172).

O Quadro 2.11 mostra a diferença de geometria, quantidade de corpos de prova e condições de ensaio para os materiais impermeabilizantes segundo as normas NBR 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a) e NBR 16548 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). Em caso de materiais com estruturante de característica anisotrópica é indicado ensaiar a mesma quantidade de corpo de prova no eixo longitudinal e no eixo transversal.

Material	Dimensões (mm)	Quantidade (unid.)	Velocidade (mm/min)	UR (%)	T (°C)
Mantas, membranas asfálticas e membrana de polímeros acrílicos sem cimento	Formato retangular: 50 x 300	9	100 ± 5	50 ± 5	23 ± 2
Membrana acrílica e membrana de poliuretano	Reduzido (R): 75 x 12,5	5	R: 200 ± 20	Não indica	23 ± 2
	Funcional (F): 100 x 11		500 ± 50		
	Internacional (I): 115 x 26				

Quadro 2.11- Referência de formatos e condições de ensaio de tração para materiais impermeabilizantes, segundo a NBR 9952 e NBR 16548.

A curva tensão por deformação obtida no ensaio de tração indica pontos considerados como referência para análise do comportamento do polímero. A Figura 2.5 mostra três curvas de tensão por deformação para materiais poliméricos indicando os pontos considerados como tensão de resistência à tração e alongamento em determinado estágio.

Na curva 1, o ponto A indica a resistência à tração e alongamento na ruptura. Na curva 2, a tensão e o alongamento no escoamento são considerados no ponto B, pois apresenta o momento em que há aumento de deformação sem aumento de tensão. Na mesma curva, o ponto C indica a tensão de ruptura e o alongamento na ruptura. O ponto D na curva 3 indica a tensão e alongamento no escoamento do material e o ponto E indica a resistência à tração e alongamento na ruptura.

Figura 2.5- Curvas tensão por deformação para diferentes comportamentos dos polímeros

Fonte: Adaptado da norma ASTM D638 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a)

Para materiais que se enquadram na lei de Hooke, o módulo de elasticidade é calculado como sendo a razão entre a tensão (nominal) e a deformação (específica) dentro do limite de proporcionalidade elástica do material (Figura 2.6). Contudo, alguns materiais plásticos se desviam da lei de Hooke por não apresentarem linearidade na fase elástica. Neste caso, a observação de um limite entre a fase elástica e a plástica podem não ser sempre evidentes. Para estes materiais, a norma ASTM D668 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a) indica o cálculo do módulo secante, como indicado na Figura 2.7. Neste caso, o módulo é obtido traçando uma reta tangente à curva no ponto de inclinação máxima da curva (ponto de inflexão K'). Uma reta secante a curva, como um *offset*, é feita para indicar o limite elástico do material ($B'-G'$) e obtenção do módulo a partir de um determinado ponto dentro deste trecho.

Observa-se que uma correção do ponto inicial é feita no início da curva, para materiais que seguem ou não a lei de Hooke. Esta correção é feita pois estes valores iniciais nem sempre correspondem ao comportamento do material (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a).

Figura 2.6- Curva tensão por deformação para material que enquadra na lei de Hooke, com limite de proporcionalidade definido

Fonte: Adaptado de ASTM D638 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a)

Figura 2.7- Curva tensão por deformação para material que não se enquadra na lei de Hooke, sem limite de proporcionalidade definido

Fonte: Adaptado de ASTM D638 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a)

A norma ASTM D883 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2020b) indica classificações, de forma genérica, para os materiais plásticos a depender dos valores do módulo de elasticidade obtidos por ensaios de flexão ou de tração.

Classificação	Módulo de elasticidade (MPa)
Plástico flexível	≤ 70
Plástico semi-rígido	$70 \leq E \leq 700$
Plástico rígido	≥ 700

Quadro 2.12- Classificação dos materiais plásticos de acordo com o módulo de elasticidade

Fonte: Adaptado de ASTM D883 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2020b)

Para materiais como as mantas asfálticas, o ponto de alongamento na ruptura não é bem definido. Isto ocorre devido a característica viscoelástica do asfalto que suporta grandes deformações a baixos níveis de tensão e dos diferentes picos que podem ocorrer na curva devido a resistência do estruturante. Por isso, a norma ASTM D5147 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018d) indica que para o

cálculo do alongamento na ruptura é tomado com referência a deformação, medida na curva, em que a carga diminui em 5% do valor da carga máxima, que ocorre após o pico de carregamento máximo ser atingido.

2.4.2 Ensaio de estanqueidade

A norma de desempenho prevê como critério de aceitabilidade do sistema de impermeabilização o teste de estanqueidade com lâmina d'água (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a, p. 25). Neste ensaio, a camada impermeável é submetida a uma lâmina de água de, no máximo, 100 mm durante 72 horas (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1998; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008a). Ao término deste período, uma análise visual é feita para detecção de falhas que propiciem a infiltração de fluídos.

Apesar de ser um ensaio consagrado, apresenta como desvantagens o consumo de água para o ensaio, a sobrecarga na estrutura devido ao peso da água, como ilustrado na Figura 2.8 a e b.

Figura 2.8 (a) e (b)- Teste de estanqueidade com lâmina d'água em piscina impermeabilizada com sistema de manta asfáltica

Outra desvantagem que pode ser apontada do tradicional teste com a lâmina d'água consiste no risco da não visualização dos pontos de falha apenas com observação visual, sendo substancial a experiência do fiscal de impermeabilização na análise (Figura 2.9).

Figura 2.9- Falha na emenda visualizada após teste de estanqueidade em sistema de impermeabilização com manta asfáltica

Fonte: Fornasaro (2019)

O teste de estanqueidade com equipamentos eletrônicos vem sendo utilizado na Alemanha desde os anos 90, e começou a ter avanços no Brasil no início dos anos 2000⁵. Duas tecnologias podem ser utilizadas: o *Holiday Detector* e o Mapeamento Vetorial de Campo Elétrico (*Electric Field Vector Mapping-EFVM*).

A tecnologia *Holiday Detector* (Figura 2.10), é composta por um gerador de pulsos autoalimentado por uma bateria, e dois terminais, sendo um conectado a um ponto de aterramento, geralmente na estrutura do prédio, e o outro, conectado a um eletrodo, o qual é utilizado para a varredura da superfície impermeabilizada.

Na tecnologia EFVM (Figura 2.11), um equipamento gerador de pulsos elétricos é conectado a um terminal de aterramento na estrutura, e conectado a um circuito elétrico provisório, cujos cabos são posicionados acima da camada impermeável, sobre todo o perímetro a ser ensaiado. Quando o gerador é acionado, um campo elétrico na região de estudo é formado. Com o auxílio de duas sondas em formato de bastão, conectadas a um medidor de corrente direcional, o operador do ensaio faz a

⁵A empresa ILD Brasil faz parte do grupo multinacional ILD®- International Leak Detection, que trouxe a tecnologia de teste de estanqueidade pelo mapeamento por campo vetorial. Fonte: <http://www.ildbrasil.com.br/ild-brasil>.

varredura da área onde há possíveis falhas no sistema de impermeabilização (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014b, 2019b).

Figura 2.10- Ensaio eletrônico com Holiday Detector em manta asfáltica

Figura 2.11- Ensaio eletrônico com uso do EFVM

Fonte: Fornasaro (2021)

O princípio das duas técnicas se baseia na propriedade isolante dos materiais impermeabilizantes, que além de não permitirem a passagem de água, também não permitem a passagem de corrente elétrica. Desta forma, uma vez que haja falha na camada impermeável poderá haver fuga de corrente elétrica, no caso da tecnologia EFVM, ou a formação de um arco voltaico, quando aplicada a tecnologia *Holiday Detector*. Nesta última, o fechamento do arco voltaico ocorre pela diferença de potencial entre o eletrodo energizado, acima da camada impermeável, e a estrutura de apoio desta camada, que geralmente é em concreto armado ou estrutura metálica (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014b).

2.4.3 Aderência do sistema impermeabilizante ao substrato

Em impermeabilização, a aderência de um sistema está relacionada com a interação entre as camadas constituintes do sistema e com o meio em que o sistema está exposto (FRANCKE; PIEKARCZUK, 2020). Em geral, é composta pela aplicação do

material impermeabilizante, imprimação para fechamento de poros e regularização da superfície, da parte externa para a interna do substrato, respectivamente. O Quadro 2.13 exemplifica normas que apresentam procedimentos de ensaio para a verificação da aderência da camada impermeável ao substrato.

Referência	Descrição	Aplicação
ASTM D5295 (2018c)	Standard Guide for Preparation of Concrete Surfaces for Adhered (Bonded) Membrane Waterproofing Systems	Preparo de substratos de concreto para aderência de membranas
ASTM D7234 (2019b)	Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion	Aderência de membranas em substratos de concreto
ASTM D4541 (2017)	Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion	Aderência de membranas em substratos metálicos
NBR 12171 (2021c)	Aderência aplicável em camada impermeabilizante — Método de ensaio	Mantas e membranas aderidas em substrato cimentício

Quadro 2.13- Referências normativas para ensaios de resistência de aderência para sistemas de impermeabilização

Como indicado no quadro acima, o método de ensaio para resistência de aderência em sistemas de impermeabilização no Brasil é apresentado na norma NBR 12171 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b). Esta norma indica dois métodos distintos, sendo o primeiro para mantas (método A) e o segundo para membranas (método B). A diferença consiste no procedimento para aplicação dos materiais na placa de substrato padrão e na análise da forma de ruptura das camadas.

Formas de ruptura

A ruptura do corpo de prova pode ocorrer de formas diversas àquela entre a interface do substrato e o sistema impermeabilizante. Durante o processo de transferência do esforço de tração, a parte menos resistente ao longo das camadas do sistema tenderá a romper. A ruptura pode ocorrer de três formas principais: adesiva, coesiva e no substrato.

A forma adesiva (A) está relacionada à aderência entre o substrato e o sistema impermeabilizante. Esta forma de ruptura está relacionada com a rugosidade e porosidade do substrato, assim como a espessura do sistema. Para materiais que são aplicados em camadas, a força necessária para o destacamento do substrato é menor à medida que ocorre aumento da espessura do sistema (SINGH et al., 2018). A ruptura no substrato (S) ocorre quando o sistema é destacado inteiramente, sem que nenhuma parte deste se desfaça. Isto indica que a carga necessária para separar as camadas do sistema é maior que obtida no ensaio. A Figura 2.12 (a -e) apresenta, de forma genérica, as possíveis configurações de forma de ruptura em sistemas de impermeabilização aderidos.

Figura 2.12 (a) - (e)- Representação genérica da composição do corpo de prova e das formas de ruptura no sistema de impermeabilização

Como mostrado na Figura 2.12 (c) e (d), a forma de ruptura coesiva (C) está associada com a ligação entre as camadas do sistema impermeabilizante. Este processo pode ser do tipo ruptura de camada (C_c) ou de interfaces (C_i). A primeira é assim

denominada quando o esforço mecânico aplicado rompe as ligações internas do material. Quando a quebra de ligação ocorre entre as superfícies de materiais ocorre a ruptura de interface. Isto posto, no presente trabalho foi estabelecida as configurações passíveis de ocorrer durante o processo de ruptura, conforme apresentado no Quadro 2.14.

Forma de ruptura		Membranas	Mantas
Substrato (S)		Substrato	Substrato
Adesiva (A)		Substrato/membrana	Substrato/manta
Coesiva (C)	Ruptura entre camadas C(c)	Primer	Primer
		Membrana	Manta
		Adesivo	Adesivo
	Ruptura entre interfaces C(i)	Primer/membrana	Primer/manta
		Membrana/adesivo	Manta/adesivo
		Adesivo/pastilha	Adesivo/pastilha

Quadro 2.14- Configurações de ruptura entre o substrato e a camada impermeabilizante do sistema

Cabe ressaltar que durante o processo de ensaio, a ruptura pode ocorrer em mais de uma forma. Neste caso, o registro do resultado deve ser feito em percentuais de forma de ruptura.

2.4.4 Crack Bridging

2.4.4.1 Fissuração como mecanismo de transporte de massa

As superfícies dos materiais possuem interface com o meio, no qual há presença de fluídos nos estados líquidos e gasosos, além de partículas iônicas presentes na atmosfera, na água e no solo (NEVILLE, 2016, p. 507). A forma como estes elementos impactarão nos materiais está relacionado aos mecanismos de transporte de massa para o interior dos materiais.

Dentre os diversos mecanismos que governam o transporte de massa para o interior das estruturas de concreto destaca-se a fissuração (MENGEL; KRAUSS; LOWKE, 2020; NEVILLE, 2016, p. 503). A depender da amplitude das fissuras em contato com o meio, a taxa de entrada de fluídos pode ser significativa. Com isto, processos de

degradação podem ser iniciados, por exemplo a migração de agentes que induzem a corrosão das armaduras e íons de cloreto (LITVAN, 1996; VAN LOOCK; FLECK, 2018).

A fissura é definida por Broberg (1999) como uma separação do material por uma abertura ou deslizamento, com largura substancialmente menor do que sua extensão (comprimento). Sua significância depende do tipo de elemento estrutural, pois fissuras que são passíveis de aceitação para edifícios podem ser inaceitáveis em estruturas que reservam água (ISSA; DEBS, 2007). Segundo Neville (2016, p. 548) a fissuração pode ser considerada uma descontinuidade no sólido a qual impacta negativamente a estanqueidade aos fluidos.

No contexto das edificações e obras especiais, as fissuras são classificadas como uma manifestação patológica (THOMAZ, 1998, p. 15). Estas são recorrentes no concreto como um defeito inerente à própria estrutura da matriz cimentícia, uma vez que possui baixa capacidade de resistência à tração (GRIBNIAK et al., 2020). De acordo com Mengel et al. (2020) em concretos fissurado, há de se considerar que a resistência normal para o concreto geralmente apresenta micro e macro defeitos, como as microfissuras, que podem surgir devido a incompatibilidades de deformações locais quando da retração ou de outras fontes de tensão. Nos processos de fratura, as microfissuras levam a separação do material em nível microscópico (micro separação), pois acarreta vazios internos, como pequenos furos⁶ (BROBERG, 1999)

Segundo a norma NBR 6118, os limites máximos de abertura de fissura w_k são da ordem de 0,2 a 0,4 mm, tendo em vista a proteção das armaduras, a classe de agressividade ambiental e o tipo de concreto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014b, p. 80). No entanto, partindo da análise da estanqueidade à água, ainda que as fissuras sejam delgadas, entre 0,12 a 0,20 mm⁷, há o risco do início de transporte de fluidos para o interior da estrutura (NEVILLE, 2016, p. 548). Adicionalmente, as microfissuras entre 10 a 60 μm podem formar

⁶ Termo em inglês: *hole*

⁷ Segundo Neville (NEVILLE, 2016, p. 552), apesar de haver divergência entre observadores, a abertura mínima de fissura visível a olho nu é a partir de 0,13 mm

outras vias de transporte de gás ou água (MENGEL; KRAUSS; LOWKE, 2020; WU et al., 2013).

Diante da análise das fissuras, percebe-se que não há um padrão de abertura, comprimento e espaçamento entre uma e outra (GRIBNIAK et al., 2020). Porém, há um consenso geral quanto às causas principais do surgimento destas, que podem ocorrer tanto no estado plástico quanto no estado endurecido do concreto (ISSA; DEBS, 2007).

Neville (2016, p. 549 e 550) categorizou os vários tipos de fissuras a partir das localizações mais recorrentes nas estruturas, assim como suas possíveis causas. Diante do surgimento destas, cabe ressaltar que, independentemente das causas, o sistema de impermeabilização aderido sobre o substrato deverá se deslocar em concordância com a abertura da fissura.

Apesar dos avanços no estudo do comportamento das estruturas de concreto frente ao surgimento de fissuras, ainda pouco se discute a respeito do comportamento dos sistemas de impermeabilização quando aderido e sujeito a este fenômeno. Para o concreto, no entanto, algumas técnicas de avaliação da dimensão de abertura de fissura com uso de instrumentos são aplicáveis, tais como as pinturas eletrocondutoras e os resistores dependentes de luz - LDR (NEVILLE, 2016, p. 552). No item 2.5 será abordada a tecnologia de Análise por Correlação de Imagem Digital (DIC) que tem sido amplamente difundida para avaliação de fissuras em sólidos diversos.

A ação das fissuras em substratos de concreto, com destaque aqueles com armaduras, são aspectos intrínsecos à análise da vida útil de serviço destes elementos (GRIBNIAK et al., 2020). Diante disso, a implementação de sistemas de impermeabilização se torna a causa primordial para a proteção destes elementos, que se dá por meio da estanqueidade aos fluidos. De forma complementar, estes sistemas aportam a função de barreira contra agentes agressivos e intempéries do meio (CASH, 2001; DELUCCHI; BARBUCCI; CERISOLA, 1998).

Neste sentido, aos sistemas de impermeabilização, compatibilizado aos demais constituintes do edifício, são atribuídos: (i) a preservação da integridade dos elementos estruturais assim como a funcionalidade da edificação, (ii) a salubridade

dos ambientes internos e bem-estar dos usuários (KUBAL, 2008, p. 33). Contudo, fatores como a distinção coerente dos materiais, análise do substrato e do meio ao qual será submetido são fatores preponderantes para o desempenho deste elementar sistema (SRIRAVINDRARAJAH; TRAN, 2018).

Considerada como fase preliminar do processo de seleção dos materiais, a avaliação do comportamento do sistema impermeabilizante quando aderidos ao substrato tem suas dificuldades. Isto em decorrência do concreto apresentar comportamento rígido e passível do processo de fissuração, seja em decorrência de reações químicas ou por reações físicas (WALDVOGEL et al., 2020b).

As mantas e membranas, projetadas para trabalhar coesas ao substrato, deveriam sem avarias suportar estas fissuras, a fim de garantir a integral proteção do concreto (DELUCCHI et al., 2002; DELUCCHI; BARBUCCI; CERISOLA, 1997). No entanto, a relação entre as fissuras do substrato e a capacidade dos sistemas impermeabilizantes suportarem esses esforços tornou-se uma problemática (JAEGERMANN; PUTERMAN, 1987).

A perda de desempenho e degradação dos sistemas de impermeabilização prematuramente tornou-se campo para pesquisas e ensejou a elaboração de normas. Desta forma, o termo *crack bridging* foi implementado para fazer referência ao fenômeno da transferência de fissuras relacionadas a membranas impermeabilizantes e camadas de revestimentos.

2.4.4.2 Transferência de fissura - *Crack Bridging*

A norma Europeia EN 1062-7 (EUROPEAN STANDARD, 2004) aborda o conceito de *crack bridging*⁸ como a capacidade ou sistema de revestimento de absorver as deformações resultantes da transmissão da fissura.

O termo *ability*, indica a capacidade do material impermeabilizante em apresentar uma deformação dúctil suficiente para absorver as tensões, de forma a criar uma “ponte” entre a fissura e o substrato. Como indicado na referida norma, o *crack bridging ability*

⁸ Texto original do inglês: “*crack bridging- ability of the coating or coating system to take up the elongation resulting from the movement of the crack sides*”. A mesma norma conceitua “*crack sides: surfaces of the break in the substrate that are generated when the substrate is marking the crack*”.

(CBA) é resultado da medida, em micrômetros ou milímetros, da abertura de fissura medida no substrato quando a primeira fissura é observada na camada impermeável após o ensaio.

2.4.4.3 Evolução de pesquisas no tema

Os estudos de *crack bridging* iniciaram na década de 80, quando os pesquisadores Jaegermann e Puterman (1987) observaram a ocorrência de fissuras em laje de cobertura em Israel. Após observações diretas e ensaios experimentais, constataram que a propagação de fissuras provenientes do substrato de concreto eram a causa primária para falhas nos sistemas de impermeabilização, com destaque para aqueles expostos diretamente a ação da radiação solar (JAEGERMANN; PUTERMAN, 1987).

No campo da impermeabilização, a transferência de fissuras é estudada partindo do princípio que, se um sistema estiver aderido sobre um substrato de concreto com tendência a desenvolver fissuras, este possivelmente irá desenvolver aberturas também (DELUCCHI et al., 2002). Consequentemente, se a camada impermeabilizante entrar em processo de fissuração a permeabilidade aos fluídos será consideravelmente aumentada (MENGEL; KRAUSS; LOWKE, 2020), dando assim início a mecanismos de degradação (GLASSER; MARCHAND; SAMSON, 2008).

Dependendo das condições de carregamento, tais como cargas estáticas, dinâmicas ou controladas, e das condições ambientais, a propagação das fissuras pode atingir um ponto em que ocorra uma fratura (BROBERG, 1999; ISSA; DEBS, 2007). Ademais, quanto maior a extensão das fissuras, maior a concentração de tensão induzida por elas, as quais podem ser propagadas verticalmente, em caso de lajes de concreto, ou horizontalmente quando em alvenaria (HENSHELL, 2000, p. 126; ISSA; DEBS, 2007).

Quando uma fissura se desenvolve no concreto já impermeabilizado, devido à retração e dilatação do elemento estrutural, este começa a se mover, e a tensão é desta forma direcionada para o sistema aderido. Estudos anteriores mostraram que a ruptura da camada impermeabilizante começa no contato com superfície do substrato e migra verticalmente para a superfície do sistema (DELUCCHI et al., 2002; DELUCCHI; BARBUCCI; CERISOLA, 1998).

Pela ilustração da Figura 2.13 é possível perceber que inicialmente as tensões submetidas ao concreto ocasionaram abertura de fissura, as quais atingiram um ápice na interface entre substrato/membrana.

Figura 2.13- Seção lateral do sistema, modelo de transferência da fissura da camada mais interna (substrato) para a mais externa (membrana).

Fonte: Adaptado de DELUCCHI et al. (2002)

Segundo Callister(2018, p. 268), para materiais como o substrato de concreto, o modo de fratura frágil ocorre devido a magnitude da tensão de tração nas regiões onde há microfissuras e defeitos com tamanhos, geometrias e orientações diversas. Ademais, em materiais frágeis as fissuras se propagam rapidamente e rompem com baixa deformação plástica. Para os polímeros termoplásticos, o modo de fratura pode ser tanto frágil quanto dúctil, a depender de variáveis como a temperatura, taxa de deformação, espessura e a presença de um entalhe delgado. Acima da temperatura de transição vítrea, os termoplásticos escoam plasticamente antes de sofrer fratura (CALLISTER, 2018, p. 280). Porém, diferente dos cerâmicos, a fratura nos polímeros é precedida por um fenômeno chamado fibrilação (*crazing*) (CALLISTER, 2018; WALDVOGEL et al., 2020b). Em conjunto com os microvazios (*microvoids*), são formadas pontes de fibrilas que se alongam quando as cadeias moleculares ficam orientadas. Quando a tensão de tração é suficiente, as pontes se alongam e rompem, acarretando em coalescência dos microvazios e surgimento da fissura (WALDVOGEL et al., 2020a). Como mostrado na Figura 2.17, na interface entre o substrato e a

membrana, se a tensão neste ponto é maior que a resistência à tração da membrana ocorre um início de ruptura (HENSHELL, 2000, p. 127).

Uma outra abordagem para a compreensão do fenômeno do *crack bridging* é proposta por Waldvogel et al (2020a). Nesta, a evolução da transferência de tensões e abertura de fissuras é observada em relação ao tempo, como representado na Figura 2.14.

Figura 2.14- Seção frontal da interface membrana e substrato, evolução da transferência de tensões e abertura de fissura com o tempo

Fonte: Adaptado de WALDVOGEL et al. (2020a)

Como mostra a Figura 2.14, inicialmente (T_0) a membrana aderida permanece em um estado relaxado, e no substrato, uma pequena falha é manifestada. Neste estágio, como a membrana está totalmente aderida ao substrato, sua deformação é igual a zero (COX; MARSHALL, 1994; WILLIAM D. CALLISTER, 2001, p. 173), como indicado na equação 2.1:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow l_i - l_0 = 0$$

Equação 2.1

Onde: ε é a deformação total (mm), e Δl é a variação entre a deformação inicial (l_0) e deformação (l_i) após um determinado momento, medido em mm.

Com a movimentação do substrato, a propagação das tensões é iniciada. Ao evoluir o tempo, a falha se desenvolve em uma fissura (T_1). Neste instante, observa-se que

na região da membrana, a qual sofre uma oposição à carga de tração, ocorre um pequeno alongamento, indicando a absorção dos esforços. Com o deslocamento do substrato, a membrana sofre uma deformação, onde o l_0 é maior que zero (COX; MARSHALL, 1994), como mostra a equação 2.2 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow l_i - l_0 > 0$$

Equação 2.2

Com o aumento das tensões na interface há uma maior absorção dos esforços pela membrana, denotado pelo alongamento (T_2). Consequentemente, sua seção transversal é reduzida. Além disso, nota-se que com a significativa abertura de fissura, a superfície de contato substrato e membrana é reduzida. Neste instante ocorre a ruptura adesiva, ou seja, a perda de aderência entre as interfaces, e a membrana forma uma ponte (*bridging*) para que o sistema continue estanque. Em um último momento (T_3), a abertura de fissura no substrato é máxima, ao nível de aumentar o alongamento da membrana até perpassar pelo seu limite de ruptura. Neste último estágio a transferência de fissura é total e a membrana se rompe. Nota-se que até o instante T_2 o sistema permaneceu estanque ao fluxo de água. Contudo, com a ruptura do sistema, a barreira que outrora exercia a função de proteger o substrato torna-se degradada.

Ainda em relação a Figura 2.14, é interessante notar que, nos instantes T_1 e T_2 , a membrana não sofreu danos, apesar das tensões serem transmitidas. Com base em pesquisas experimentais, Delucchi et al. (2002) observaram que o comportamento das membranas quando da transferência de esforços do substrato é dependente de fatores intrínsecos como espessura de filme seco, propriedades mecânicas e composição dos materiais constituintes do sistema.

Um destaque é dado para a espessura, uma vez que as tensões são absorvidas pela seção transversal do sistema. Desta maneira, há tendência de maior resistência à fissuração para sistemas com camadas únicas e mais espessas (DELUCCHI et al., 2002). Ademais, as condições de irregularidades da superfície do substrato, seja por excesso de porosidade ou rugosidades diferentes em um mesmo plano, podem ocasionar concentração de tensões e reduzir a espessura da seção transversal da membrana (HENSHELL, 2000, p. 126).

Por isso, previamente à aplicação do sistema impermeabilizante, principalmente os compostos por membranas, a regularização da superfície se faz necessária (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO, 2013, p. 126). Contudo, fatores extrínsecos, tais como, a temperatura do meio, o grau de aderência ao substrato, e a velocidade na qual a abertura de fissura irá ser induzida também são considerados (DELUCCHI et al., 2002).

O sistema impermeabilizante, em sua maioria poliméricos, é conhecido pelo comportamento elástico e grandes deformações antes de entrar em ruptura (CALLISTER, 2018, p. 251). Por outro lado, aqueles que apresentam comportamento viscoelástico apresentam maior tendência em suportar as tensões e acompanhar as deformações de forma constante (DELUCCHI; BARBUCCI; CERISOLA, 1998). No entanto, sistemas com alta resistência à tração, geralmente apresentam maior módulo de elasticidade e tendência a serem menos aptos a suportar a transferência de fissuras (DELUCCHI et al., 2002).

Dada a sensibilidade dos materiais poliméricos a variação da temperatura (ASKELAND; WRIGHT, 2014, p. 524), no estudo do *crack bridging*, esta é uma variável relevante. Isto é observado, por exemplo, pelo aumento do módulo de elasticidade e da ductilidade quando a temperatura é reduzida (VAN LOOCK; FLECK, 2018). Assim, a temperatura de transição vítrea (T_g) pode ser considerada como fator governante para alterações de comportamento dos materiais impermeabilizantes.

Em estudo experimental, Waldvogel et al. (2020b) submeteram argamassas com adição de polímeros (EVA) em ensaio de tração em condições de temperatura acima da transição vítrea (-4°C), sendo observado que antes da ruptura os corpos de prova deformaram ductilmente. Segundo os referidos autores, a deformação da argamassa antes de fissurar pode ser atribuída a deformação plástica do material.

Cabe ressaltar, portanto, que as argamassas com adição de polímeros, por apresentar características intrínsecas de matriz cerâmica, apresentam geralmente comportamento rígido. Porém, em seu estudo Waldvogel et al. (WALDVOGEL et al., 2020b) constataram que, quando da formulação da argamassa, a adição de polímeros em teores entre 20 a 35% em peso proporcionam significativo desempenho na transferência de fissuras.

Adicionalmente, neste estudo os autores constataram que quando o material foi ensaiado em temperatura um pouco acima da T_g (0°C) e um pouco abaixo (-5°C) a resistência à tração apresentou um aumento significativo de 3,6 MPa para 5,09 MPa. Uma correlação entre a diminuição da temperatura e o aumento da rigidez do material foi obtida para temperaturas de até -20°C (WALDVOGEL et al., 2020b). Desta forma, a perda da capacidade deste material em absorver os esforços é significativamente reduzida.

Em contrapartida, ainda dentro das argamassas com adição de polímeros, a variação da temperatura e da espessura da camada impermeabilizante pode não impactar significativamente na resistência de aderência (HOLTER, 2016; WALDVOGEL et al., 2020b). Contudo, durante o ensaio *crack bridging*, Waldvogel et al. (2020b) perceberam que no momento de transferência de tensões a perda de aderência na interface entre o substrato e a membrana acarretou em aumento na absorção dos esforços.

Em membranas poliméricas, Delucchi et al. (2002) observaram que à medida que a aderência na zona fissurada diminui, tornando o movimento livre, uma maior tendência do alongamento da camada impermeabilizante ocorre, de forma a manter a integral proteção do substrato (DELUCCHI et al., 2002).

Após várias simulações da transferência de fissuras em substratos de concreto com membranas impermeabilizantes aderidas, Delucchi, Barbucci e Cerisola (2004) observaram o fenômeno do *crack bridging* por meio da curva tensão por deformação, como representado na Figura 2.15. Conforme observado, a curva é definida em 4 estágios que representam a resposta mecânica da aplicação de tensão, inicialmente no substrato (I e II) e em seguida na camada aderida (III e IV).

O primeiro estágio (I) indica uma acentuada inclinação na curva tensão por deformação. O aumento progressivo da tensão está relacionado à força necessária para romper o concreto. No segundo estágio (II) nota-se uma brusca queda na curva para baixos níveis de tensão. Esta fase é caracterizada pela fácil identificação da ruptura do concreto e atuação da camada impermeabilizante aderida, que exerce a função de ponte de ligação (*bridging*) entre ambas as partes do concreto rompido.

Um leve aumento da tensão é notado no terceiro estágio (III), indicando a transferência dos esforços para a membrana, que nesta etapa pode sofrer perda de aderência do

substrato (WALDVOGEL et al., 2020a). Esta etapa indica uma possível deformação ainda dentro do limite elástico do material. O ponto máximo de tensão neste estágio reflete a resposta mecânica, da camada impermeabilizante, em resistir a transmissão da fissura. É possível notar que ao final do estágio III e início do estágio IV há uma queda de tensão indicando perda de absorção dos esforços pela camada impermeabilizante.

No último estágio (IV), a redução das tensões registradas indica um potencial de perda de resistência da camada impermeabilizante. Nesta fase há o surgimento de bulbos de tensão, principalmente próximo às regiões de tendência de acúmulo de tensões no substrato, como por exemplo no entalhe (WALDVOGEL et al., 2020b)

Figura 2.15- Curva tensão por deformação típica do fenômeno crack bridging, dividida em 4 estágios: (I) aumento de tensão para romper o concreto, (II) ruptura do concreto, (III) queda de tensão e alongamento da membrana, (IV) ruptura da membrana definindo a abertura de fissura (CBA)

Fonte: Adaptado de DELUCCHI; BARBUCCI e CERISOLA (2004)

Por fim, observa-se uma mudança significativa na inclinação da curva. Este ponto, indicado na Figura 2.15 pela seta como ruptura da membrana ou CBA (*crack bridging*

ability), é considerada a falha da camada impermeabilizante, quando a tensão imposta é superior à tensão de ruptura desta.

Waldvogel et al. (2020b), descrevem a primeira etapa como “descontinuidade”, a qual é caracterizada pela primeira alteração na superfície da membrana. A segunda etapa é descrita como “continuidade da marcação de tensão”, a qual com o aumento da tensão é percebida a formação de uma linha superficial, na mesma direção da aplicação da carga. A terceira etapa é considerada como a “primeira falha” no sistema.

Em teoria, a resposta à ação mecânica nesta fase indica o surgimento de microfissuras, as quais podem não ser visíveis a olho nu (DELUCCHI et al., 2002). Porém, no aspecto de desempenho do sistema, podem implicar em perda de estanqueidade. Ao final do estágio IV, quando é definida a abertura máxima de fissura (CBA), Waldvogel et al.(2020b) a considera como a segunda e última falha do sistema, onde a ruptura é total.

2.4.4.4 Referências normativas para ensaios em laboratório

Em conjunto com a evolução das pesquisas neste campo estão as normas para ensaio, que teve uma das primeiras publicações em 1987 (LITVAN, 1996). O objetivo dos métodos de ensaio em laboratório é induzir, por meio de simulações, a situação mais próxima da realidade e condições climáticas que o material poderá ser exposto. Há várias normas que padronizam os procedimentos de ensaio para materiais de construção que constituem membranas.

As principais referências normativas e guias (*Technical Report*) que apresentam metodologias de ensaios para simular a transferência de fissuras do substrato para a camada aderida estão apresentadas no Quadro 2.15. Observa-se que com exceção da primeira norma citada no referido quadro, todas as demais apresentam métodos que se aplicam exclusivamente para materiais ou sistemas de impermeabilização. Isto decorre de um conceito aplicado na norma EN 10627 que cita como campo de atuação os materiais e sistemas de revestimento, do inglês *coating*, o qual enfatiza as tintas e os vernizes.

Referências	Aplicação	Materiais/sistemas	Condições de ensaio
DIN EN 1062-7 (2004)	Alvenarias e concreto	Tintas, vernizes e sistemas de revestimentos	De 23°C a -40°C
EOTA TR 013 (2004)	Coberturas de concreto	Membranas impermeabilizantes	-30°C ± 2°C
DIN EN 14224 (2010)	Tabuleiros de pontes e áreas de tráfego de veículos em concreto	Membranas e mantas asfálticas	De 0°C a -30 °C
EOTA ETAG 033 (2010)	Tabuleiros de pontes e áreas de tráfego de veículos em concreto (referência EN 14224)	Membranas base: acrílica, epóxi, poliéster, poliureia, poliuretano e polímeros dispersos em água	De 0 °C a -30 °C
ITATech Report n° 2 (2013)	Túneis (referência norma EN 1062-7 método A:C1 <i>Static Tensile</i>)	Membranas formada por polímeros reativos ou à base de água, podendo incorporar cimento, aplicada por spray	20°C
ASTM C1305 (2016c)	Não declara aplicação específica	Membranas impermeabilizantes	-26°C ± 1°C
DIN EN 14891 (2017)	Assentamento de revestimentos em paredes externas, pisos e piscinas	Argamassa modificada com polímeros	De 23°C a -20°C

Quadro 2.15- Referências normativas com indicação de métodos para ensaio de simulação da transferência de fissuras em camadas de revestimento (tintas e impermeabilizantes)

É interessante notar que tanto no desenvolvimento das pesquisas quanto dos procedimentos normativos de ensaio há uma forte indicação de ensaios em baixas temperaturas. É possível presumir que temperaturas rigorosas, as quais as edificações e elementos estruturais são expostos nos países do hemisfério norte, torna esta variável uma problemática para o comportamento dos sistemas impermeabilizantes. Esta situação é considerada crítica para os materiais poliméricos, pois podem sofrer perda de deformação e flexibilidade quando em temperatura abaixo da T_g (WALDVOGEL et al., 2020a).

Dentre as normas vigentes para o ensaio *crack bridging* destaca-se a ASTM C1305 e EN 1062-7, tanto pela aplicação no campo da impermeabilização para edificações, quanto pelos procedimentos que servem de referência para pesquisas e guias (DELUCCHI; CERISOLA, 2012; HOLTER, 2016). Embora os métodos de ensaio apresentem diferentes abordagens, o princípio básico é semelhante, qual seja avaliar o comportamento de membranas aderidas em substratos de concreto (com ou sem armadura) ou de argamassa. Além disso, dentre as similaridades dos procedimentos está a forma de avaliação, que ocorre de forma visual, ou seja, quando a primeira fissura na membrana se torna visível.

2.4.4.5 Desafios do ensaio

No Brasil, ainda não há uma norma ou procedimento que conduza o ensaio de transferência de fissuras em sistemas de impermeabilização aderido. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas desenvolveu no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) uma metodologia para ensaio de desempenho em revestimentos de ligantes sintéticos, como tintas e texturas, tendo como referência as Diretrizes Comuns *da Union Européenne pour l'Agrément Technique dans la Construction* -UEATC (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2004, 2012).

A metodologia apresenta um conceito similar ao *crack bridging* qual seja a transferência de fissura do substrato para a camada subsequente aderida (Figura 2.16 a e b). O ensaio consiste na indução de uma fissura, por meio de aplicação de esforço de tração direta, em um substrato de argamassa, medindo 20 x 10 x 2 cm, com um corte de 1 a 1,5 mm na face oposta àquela revestida, além de um entalhe longitudinal em formato de “V” (AUGUSTO, 2013; BECERE, 2007; FONSECA, 2017).

Figura 2.16- Vista superior (a) e lateral (b) do dispositivo para ensaio de aptidão de fissuras (método IPT)

O corpo de prova é posicionado em um dispositivo com dois relógios comparadores, os quais indicam a abertura de fissura, e uma haste para rotação manual. O resultado do ensaio é dado pela medida da abertura no substrato quando ocorre ruptura no revestimento. O sistema é considerado apto quando suporta aberturas de fissuras no

substrato $\geq 0,2$ mm, a temperatura de 23°C (AUGUSTO, 2013; BECERE, 2007; FONSECA, 2017).

Por meio da análise dos métodos propostos internacionalmente, percebe-se que, dentro das condições de exposição indicadas nas normas, a baixa temperatura é sempre indicada. Isto deve-se ao aumento da rigidez dos materiais quando em temperaturas próximas a transição vítrea e as condições climáticas dos países nos quais as normas foram desenvolvidas. Contudo, ao contrário disso, os problemas de fissura na camada de impermeabilização no Brasil estão possivelmente relacionados com a movimentação do substrato, seja em decorrência de vibrações ou quando da amplitude térmica, causando o efeito de dilatação do substrato.

Conforme observado em pesquisas anteriores, a avaliação da transferência de fissuras foi feita por meio de ensaios mecânicos de tração direta (Figura 2.17 a e b), com aplicação do esforço direcionado em um entalhe previamente preparado (DELUCCHI et al., 2002; DELUCCHI; CERISOLA, 2005; HOLTER, 2016; JAEGERMANN; PUTERMAN, 1987; WALDVOGEL et al., 2020b). Modelos com indução da fissura com aplicação de carregamento prévio no corpo de prova também foram feitos (DELUCCHI; BARBUCCI; CERISOLA, 2004; DELUCCHI; CERISOLA, 2012).

Figura 2.17 - Exemplos de modelos de corpos de prova em pesquisas anteriores

Fonte: Adaptado de (a) DELUCCHI et al. (2002) e (b) HOLTER (2016)

As referências normativas, no entanto, indicam métodos com aplicação de tensões por tração direta e por tração na flexão estática ou dinâmica cíclica. Alguns dos modelos de corpo de prova e forma de aplicação de carga indicadas pelas normas ASTM C1305 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016a) e EN 1062-7 (EUROPEAN STANDARD, 2004) foram levantados para estudo no presente trabalho (Quadro 2.16 e Quadro 2.17).

Foco central	Membranas impermeabilizantes
Escopo	Determinar a capacidade de uma membrana de impermeabilização de resistir a uma fissura pré-existente do substrato quando submetida a baixa temperatura
Quantidade	5 corpos de prova
Substrato	Dois blocos de argamassa justapostos, medidas: 45 x 88 x 25 mm Um método de ensaio: Uma proposta de corpo de prova
Método de ensaio	As membranas devem ter espessura de filme seco de $1,5 \pm 0,10$ mm. As duas partes do substrato devem ser justapostas com fita adesiva. Os corpos de prova permanecem em cura por 14 dias em condições ambientes seguidos de sete dias em estufa com circulação de ar a 70°C . A fita adesiva é retirada e o corpo de prova posicionado em uma máquina de ensaio pré-condicionada a -26°C por pelo menos 24 h e submetendo o conjunto a dez ciclos de movimento. Cada ciclo consiste em tracionar os blocos separando-os na velocidade de 3,2 mm/h até abertura de 3,2 mm e depois retornando à posição a zero e reiniciando o ciclo. Após a conclusão dos dez ciclos, a membrana é tracionada novamente até 3,2 mm, enquanto ainda está posicionada na máquina, é examinada a presença de fissuras.
Expressão dos Resultados	Indicação dos resultados dos corpos de prova que não tiveram falha nos dez ciclos e informar todas as mudanças físicas observadas visualmente.

Quadro 2.16- Principais tópicos do procedimento de ensaio crack bridging - tração direta ASTM C1305

Fonte: Adaptado da norma ASTM C1305 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016a)

A norma EN 1062-7 (EUROPEAN STANDARD, 2004) apresenta seis propostas de corpo de prova para o ensaio de transferência de fissuras, podendo ser aplicadas cargas cíclicas ou esforço contínuo dinâmico.

Foco central	Tintas, vernizes e revestimentos aplicados em alvenaria e concreto
Escopo	Determinar as propriedades de transferência de fissuras em materiais de revestimentos, sistemas de revestimentos e produtos relacionados, destinados a alvenaria externa e concreto
Quantidade	3 corpos de prova
Substrato	Concreto armado ou argamassa
	Dois métodos de ensaio: 6 propostas de corpo de prova (dinâmico ou estático)
Método de ensaio	<p>Após aplicação do revestimento e do período de cura, uma fissura é induzida $\leq 100 \mu\text{m}$ no substrato. O conjunto é submetido a esforços mecânicos até fissurar. Com exceção do método C1 que é necessário um aparato específico, os demais utilizam máquina de ensaio. O esforço é aplicado ao revestimento usando um dos seguintes métodos:</p> <p>Método A: A abertura da fissura é aumentada continuamente a uma velocidade de 0,5 mm/s ou 0,05mm/s. A temperatura do ensaio varia de acordo com a classe desejada pra ensaio, que varia de A1 a 23°C e abertura até $>100\mu\text{m}$ a A2 a A5 a -10°C com abertura variando $> 250\mu\text{m}$ a 2500 μm.</p> <p>Método B: A abertura da fissura varia em ciclos periodicamente dentro das 6 classes de condições de ensaio propostas. Neste método a temperatura de ensaio recomendada é de -10°C.</p>
Expressão dos Resultados	<p>Para o método A: A medição da abertura é feita quando qualquer falha ocorre no revestimento, ou quando a abertura de fissura almejada é atingida.</p> <p>Para o método B: A medição é feita quando ocorre a falha na camada de revestimento, ou quando o ciclo dinâmico é concluído.</p>

- Corpo de prova posicionado no aparato de ensaio;
- Após aplicação de força no entalhe, uma fissura é induzida;
- Remoção dos suportes móveis de apoio e aplicação de força para ruptura do corpo de prova;
- Ruptura da membrana.

Quadro 2.17- Principais tópicos do procedimento de ensaio crack bridging proposto pela norma EN 1062-7

Fonte: Adaptado da norma DIN EN 1062-7 (EUROPEAN STANDARD, 2004)(2004)

Os ensaios com aplicação de tensão de tração direta em materiais frágeis, como os substratos de concreto e argamassa, apresentam tendência em sofrer ruptura de forma abrupta. Além disso, em caso de corpos de prova para o ensaio *crack bridging*, é necessário cuidado no momento de induzir a fissura, principalmente por flexão do substrato, pois pode ocorrer transmissão de carga com o impacto e romper a membrana antes do início do ensaio ou mesmo causar perda de aderência do sistema na região da fissura no concreto (DELUCCHI; BARBUCCI; CERISOLA, 2004).

Uma alternativa ao uso do ensaio de tração direta é o emprego de ensaios indiretos, como tração na flexão e tração por compressão diametral. Outra opção de ensaio indireto é o WST (*Wedge Splitting Test*), também denominado método da cunha (Figura 2.18), difundido como um método que propaga a fissura de forma estável (BRÜHWILER; WITTMANN, 1990; RIBEIRO et al., 2008; SEGURA-CASTILLO; MONTE; FIGUEIREDO, 2018).

Figura 2.18- Configurações de corpo de prova cúbico de concreto em ensaio de tração indireta, (a) ensaio WST e (b) ensaio Montevideo.

Fonte: Adaptado de Segura-Castillo; Monte e Figueiredo (2018)

É também observada a complexidade no acompanhamento da evolução das fissuras no ensaio *crack bridging* principalmente dada a dificuldade para instrumentalizar a

camada impermeabilizada. A percepção deste processo não é evidente, sendo necessário auxílio de instrumentos como microscópios e câmeras digitais.

O uso de microscópio óptico (WILD M3X) acoplado a uma câmera digital (LEICA QWUIN) foi aplicado por Delucchi et al. (2004; 2012) após o ensaio *crack bridging*, tanto para observar a forma de ruptura da interface substrato e membrana, assim como para medir a espessura de filme seco desta. A norma EN 1062-7 (EUROPEAN STANDARD, 2004, p. 23), no procedimento C4 (*dynamic tensile test 2*), indica o uso de uma câmera de vídeo para obtenção de imagens das alterações na amostra durante os dez ciclos dinâmicos.

Waldvogel et al. (2020a) aprofundaram um pouco mais a técnica do monitoramento, pois além do uso de fotos obtidas em microscópio óptico, utilizaram imagens das amostras feitas durante o ensaio de tração direta. Os autores realizaram com auxílio de software (Fiji) e plugins para filtro de forma (shape filter e Xlib) o processamento das imagens, com monitoramento a cada 100 µm de deformação.

É percebido que estes instrumentos têm sido utilizados como ferramenta de análise para avaliar: a forma como a ruptura ocorreu, feita após o ensaio; ou para a observação da deformação durante o ensaio, com uso de imagens que visualizam as deformações, porém, apenas superficialmente à camada impermeabilizante.

Ademais, há uma possível constatação feita por Waldvogel et. al (2020b), a qual indica que a abertura de fissura no substrato ocasiona a formação de bulbo de tensões, principalmente na proximidade da zona do entalhe. Diante disso, os autores indicam que esta hipótese seja verificada, confirmando ou não sua ocorrência.

Este tipo de análise pode ser feito durante o ensaio, com o uso da análise por correlação de imagem digital (*Digital Image Correlation* - DIC), ou por simulações numéricas. Estas técnicas são indicadas por Waldvogel et. al (2020b) como um próximo passo para a evolução do estudo.

Por meio da revisão bibliográfica apresentada ao longo de todo o item 2.4.3 percebe-se que houve significativa evolução nos estudos e desenvolvimento de normas para o ensaio *crack bridging*, e que o tema ainda continua relevante. Porém, este ensaio ainda não está difundido no Brasil. Nem mesmo o ensaio proposto pelo IPT (Dissimulação para aptidão de fissuras) ou pela norma americana ASTM C1305

(AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016a), que utiliza um aparato pouco tecnológico, tem sido utilizado.

Por isso, um programa experimental, detalhado no capítulo 3, busca desenvolver uma metodologia de ensaio com uso de uma máquina de ensaio universal e tensão de tração indireta no corpo de prova. Além disso, a metodologia prevê a utilização de extensômetros virtuais em substituição aos extensômetros físicos, os quais são de difícil acoplamento na camada impermeável durante a abertura de fissura.

2.5 Análise por correlação de imagem digital (DIC)

2.5.1 Princípios gerais da técnica DIC

A medição de deslocamentos e deformações durante os ensaios geralmente são feitos com instrumentos tradicionais como os *Linear Variable Differential Transformer devices* (LVDTs) e os *Strain Gauges* (SGs). Apesar de serem usados há décadas em experimentos, apresentam algumas desvantagens, pois por serem instrumentos físicos, a instalação pode ser invasiva, demorada e complexa, além de possuírem relativamente elevado custo para aquisição. Contudo, a mais significativa desvantagem é a medição dos deslocamentos e deformações em pontos isolados e específicos (DEL REY CASTILLO et al., 2019).

A Correlação de Imagem Digital (DIC) é uma técnica de medição óptica, aplicada dentro de análises experimentais, para obtenção de parâmetros macroscópicos, como deslocamentos e deformações (CHU; RANSON; SUTTON, 1985; PETERS; RANSON, 1982). Esta técnica tem sido usada como uma forma de medição sem contato com o material ensaiado, sendo esta uma significativa vantagem frente aos instrumentos físicos (BADADANI; SRIRANGA; SRIVATSA, 2018). Desta forma, a obtenção das medidas ao longo do objeto pode ser feita em diversas direções, de forma a capturar as alterações de deformações (INTERNATIONAL DIGITAL IMAGE CORRELATION SOCIETY et al., 2018). As medições em superfícies de materiais sólidos podem ser do tipo estático ou dinâmico, com leituras de coordenadas em duas (2D) ou três dimensões (3D), feitas durante os ensaios mecânicos (INTERNATIONAL DIGITAL IMAGE CORRELATION SOCIETY et al., 2018).

O conceito da técnica DIC se iniciou no campo da fotogrametria, e aplicada para a análise por correlação de imagem primeiramente por Gilbert Hobrough, em 1950, que comparou várias representações analógicas de fotos para registrar as características de diversos pontos de vista. Com a evolução das imagens digitais nos anos 60 e 80, pesquisadores de robótica e inteligência artificial desenvolveram algoritmos em paralelo com a fotogrametria (MICHAEL; ORTEU; SCHREIER, 2009). No começo dos anos 80 pesquisadores da *University of South Carolina* deram início em ensaios experimentais para medir deslocamentos e deformações (BADADANI; SRIRANGA; SRIVATSA, 2018).

Apesar de ser considerada uma técnica recente, nos últimos anos teve um rápido desenvolvimento (BADADANI; SRIRANGA; SRIVATSA, 2018), pois se mostrou aplicável em várias áreas, por exemplo na medicina (GRASSI et al., 2020), agricultura (TIPPNER et al., 2019) e na engenharia (DEL REY CASTILLO et al., 2019; GRIBNIAK et al., 2020; TEKIELI et al., 2017).

Com o DIC, o cálculo de deslocamentos e deformações no material é feito pelo rastreamento de movimentos das características de imagens sequenciais, apresentando duas formas de registro: variação de deslocamentos que são convertidos em deformações com uso de medidores virtuais, e para obtenção de mapas dos campos de deformação em escala de intensidade de cores na superfície do material (DEL REY CASTILLO et al., 2019) .

O princípio da medição de deslocamentos com a técnica DIC está inicialmente no contraste aleatório de pontos na superfície do corpo de prova, que cria um valor específico em escala de cinza para representar cada pixel na imagem digital (CHIEN et al., 2019).

Já o conceito da medição DIC 2D está fundamentado na correspondência entre uma imagem indeformada com a imagem deformada, como ilustra a Figura 2.19. O centro dos dois pontos representa um subconjunto (*subset*) arbitrário na imagem digital, com área $w \times h$ pixels, em que Q indica o estado não deformado e Q^* o estado deformado. O termo subconjunto é aplicado para indicar que não são usados apenas dois pixels centrados em cada ponto, mas sim dois subconjuntos de pixel que são correlacionados entre si.

Estes subconjuntos podem ser em formato quadrado ou circular, e o seu tamanho (ou raio) geralmente variam entre 5 a 50 pixels (TEKIELI et al., 2017).

Figura 2.19- Objeto antes e depois da deformação para DIC 2D.

Fonte: Adaptado de Chien et al. (2019)

A correlação é feita com um algoritmo de busca que identifica sobre a imagem deformada qual a área correspondente com os mesmos pixels em tamanho e valor de escala de cinza antes da deformação. Assim, dentro deste subconjunto, o centro do ponto Q^* que corresponde ao estado deformado, é referencial para o deslocamento do ponto Q . Desta forma, o cálculo do deslocamento du/dv pode ser feito (CHIEN et al., 2019).

Os deslocamentos resultados pelo DIC são dentro do algoritmo gerados em pixels, e em seguida convertidos em milímetros. A depender da forma e do software de análise, esta conversão pode ser calculada com dados da distância focal e da distância do corpo de prova até o sensor óptico da câmera digital, ou também pode ser calculada a partir da calibração antes do processamento, feito com a inserção de uma medida relacionada com a dimensão real (TEKIELI et al., 2017). Desta forma, no plano 2D, em um objeto deformado são calculados os dados do campo de deslocamento e de deformação, gerado com o gradiente de cores (CHIEN et al., 2019).

2.5.2 Captação das imagens digitais

Em geral, a configuração dos experimentos com a técnica DIC é feita com uso de: (i) um dispositivo de captura de imagem, uma câmera de vídeo por exemplo, acoplada a

um tripé para evitar movimentos e vibrações; (ii) iluminação adequada e (iii) um dispositivo computacional com software DIC para processamento das imagens (HASSAN, 2021). Para captura de deslocamentos em coordenadas X e Y (2D) é utilizada apenas uma câmera, já para imagens cujo campo de coordenadas seja em X, Y e Z (3D) duas câmeras são necessárias. As câmeras utilizadas são do tipo DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) com uma lente de distância focal variável, com sensor de captura de luz- CCD (*charge-coupled device*) (BADADANI; SRIRANGA; SRIVATSA, 2018; DEL REY CASTILLO et al., 2019).

Para captação das imagens é feita previamente a preparação da superfície. Este preparo tem por finalidade a obtenção de quantidade suficientes de informações por meio da variação de intensidade de cor a ser refletida para o sensor de captura de luz (CCD) da câmera digital. Com essas informações o algoritmo de correlação recupera corretamente o valor da imagem deformada e indeformada. Isto é proporcionado por um padrão aleatório de pontos, também chamado padrão estocástico (CHIEN et al., 2019). A forma mais comum de produzir o padrão de pontos é pela pintura por pulverização, feita com o uso de tinta do tipo spray. A depender da viscosidade da tinta, a abertura e distância do bico pulverizador é possível criar tamanhos diversos de pontos (BADADANI; SRIRANGA; SRIVATSA, 2018). Como é necessário um contraste entre o plano de leitura e o padrão de pontos, a cor branca é aplicada na superfície, como pano de fundo uniforme, e a cor preta é indicada para a criação dos pontos (LEPAGE; SHAW; DALY, 2017).

A preparação das amostras é uma parte importante do processo, pois a perda ou erros de leitura podem ocorrer caso haja falhas na malha de pontos. O valor na escala de cinzas de um subconjunto de pixels pode ser calculado em relação a outros subconjuntos no entorno, pois os pixels da vizinhança fornecem informações que facilitam o rastreamento do subconjunto não deformado. Um dos problemas que pode ocorrer no cálculo é a perda de correspondência caso a dimensão dos pixels do subconjunto aumente a sua dimensão durante o processo de deformação, tornando difícil a rastreabilidade (BADADANI; SRIRANGA; SRIVATSA, 2018). Ademais, os erros de medição podem ser reduzidos quando acompanhados de um aumento na resolução e na precisão do sensor óptico instalado na câmera (CHU; RANSON; SUTTON, 1985). Desta forma, a qualidade do padrão de pontos requer cuidados especiais na preparação da configuração do experimento, tais como o tamanho dos

pontos em relação ao corpo de prova, e a textura do corpo de prova, pois se a superfície for muito áspera já poderá proporcionar um contraste suficiente para a análise (TEKIELI et al., 2017)

2.5.3 Processamento das imagens

Dentre as etapas que envolvem a Análise por Correlação de imagem (DIC) está o processamento das imagens digitais em um software que tenha o algoritmo de correlação. As imagens carregadas para processamento precisam ser calibradas com algum valor de referência real na própria imagem ou com uso de indicadores de dimensão posicionados próximo ao corpo de prova durante o ensaio, que servem de referência antes da primeira imagem deformada (QUANJIN et al., 2020). Uma área de interesse (*Region of Interest- ROI*) para estudo no corpo de prova deve ser delimitada quando da análise das imagens, caso contrário podem ocorrer erros de medição, devido a distorções nas imagens (SUTTON et al., 2008). Em corpos de prova para ensaio de tração por exemplo, a região central é selecionada como região de estudo, para a seleção do subconjunto de correlação, e para inserção de um medidor de deformações virtual (QUANJIN et al., 2020), como indicado na Figura 2.20.

Figura 2.20- Exemplo do princípio da técnica DIC em ensaio mecânico de tração. Um padrão de pontos é aplicado no corpo de prova (a), a imagem após a deformação é capturada (b) e a comparação do deslocamento entre a imagem anterior e a subsequente é feita

Fonte: Adaptado de digitalimagecorrelation.org

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um programa experimental envolvendo ensaios de caracterização de três materiais impermeabilizantes e o desenvolvimento da metodologia de ensaio *crack bridging* para sistemas de impermeabilização aplicados é apresentado. O programa experimental foi dividido em duas etapas com metodologias distintas para cada uma delas, como indicado na Figura 3.1.

Figura 3.1- Etapas do programa experimental

Como representado na Figura 3.1, a primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais impermeabilizantes para obtenção dos seguintes dados: resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade. A segunda etapa envolveu os ensaios que avaliam os materiais aplicados ao substrato, podendo ser considerados, apesar de não contemplar todas as camadas do sistema, como ensaios de desempenho. Para essa etapa foram realizados o ensaio de resistência de aderência em substrato padrão e o ensaio de transferência de fissuras denominado *crack bridging*. Além disso, após finalizado o ensaio de *crack bridging* a aderência foi verificada, de forma a obter uma comparação com os resultados obtidos no ensaio feito em placa de substrato padrão que não haviam passado pela transferência de fissuras.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados no programa experimental são divididos em duas categorias: os moldados in loco e os pré-moldados; constituídos por membranas (neste grupo está incluso a argamassa polimérica) e pela manta asfáltica, respectivamente. O critério principal para seleção dos materiais que integrariam o programa experimental foi a forma de ligação que se dá na camada principal do sistema de impermeabilização com o substrato. Como o estudo trata da transferência de fissuras do substrato para a camada subsequente aderida foi considerado que seriam estudados materiais que trabalhem totalmente aderidos. Um segundo critério para a escolha foi quanto a disponibilidade e frequência de uso dos sistemas no mercado brasileiro.

O Quadro 3.1 mostra os tipos de materiais selecionados para os ensaios e respectiva referência normativa.

Tipos de materiais	Normas
Cimentício:	
Argamassa polimérica flexível	ABNT NBR 11905 (2015a)
Polimérico:	
Membrana de acrilatos puros	ABNT NBR 13321 (2008b)
Asfáltico:	
Manta asfáltica aderida com maçarico	ABNT NBR 9952 (2014a)

Quadro 3.1- Materiais utilizados na pesquisa e respectivas normas

Os materiais aplicados à pesquisa procederam de doações de fabricantes que possuem atuação no mercado brasileiro. Os subitens a seguir apresentam informações complementares dos materiais utilizados no programa experimental.

3.1.1 Argamassa polimérica

A argamassa polimérica utilizada no estudo é um material industrializado bi componente, ou seja, é composto por duas fases principais. Segundo a ficha de informações de segurança de produto químico do fabricante, o primeiro componente (parte A) é uma resina de polímeros acrílicos líquido e aditivos, na cor branca, já o segundo (parte B) é uma argamassa formada por cimento Portland, sílica e aditivos. O produto é comercializado em caixas de 18 kg, sendo 4 unidades de 1 kg da parte A e 1 unidade de 14 kg da parte B (relação de mistura 1:3,5 em massa). O material foi

estocado no laboratório em temperatura ambiente, protegido da exposição direta da radiação solar. As propriedades da mistura dos componentes A e B foram levantadas e constam no Quadro 3.2.

Propriedades	Valores declarados
Densidade (g/cm ³)	2,00
Teor de Voláteis Totais (%)	13,23
Teor de Água (%)	13,23
Teor de Compostos Isentos	Não Detectado
VOC	Não Detectado
Pressão (m.c.a)	25 m.c. a
Resistência aderência	1,00 MPa

Quadro 3.2- Propriedades físico-químicas e mecânicas da argamassa polimérica utilizada

Fonte: Adaptado da ficha técnica do fabricante

3.1.2 Membrana de acrilatos puros

A membrana de acrilatos puros (MAP) utilizada nos ensaios é um material monocomponente, industrializado, composto por resina de acrilatos puros. O Quadro 3.3 apresenta as informações de propriedades químicas, físicas e mecânicas disponíveis na ficha técnica do fabricante.

Propriedades	Valores declarados
Densidade (g/cm ³)	1,40
Teor de sólidos (%)	60
Alongamento (%)	160
Resistência à aderência (MPa)	1,36
Resistência à difusão de vapor (m)	> 0,5

Quadro 3.3- Propriedades químicas, físicas e mecânicas da membrana acrílica.

Fonte: Ficha técnica do fabricante (Adaptado)

3.1.3 Manta asfáltica

A manta asfáltica selecionada para o experimento é classificada segundo a norma 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a) como tipo III, classe B, com espessura de 4 mm. Este material, pré-moldado, é fabricado a partir da modificação física da massa asfáltica com polímeros, estruturada com não tecido de

filamentos contínuos de poliéster previamente estabilizado e acabamento em polietileno. O Quadro 3.4 apresenta as propriedades físicas e mecânicas das mantas aplicadas nos ensaios.

Tipo	III
Espessura (mm)	4
Resistência à tração longitudinal e transversal mínimo (N)	400
Alongamento na longitudinal e transversal mínimo (%)	30
Absorção d'água máxima (%)	1,5
Flexibilidade à baixa temperatura (°C)	Classe B = -5
Resistência ao impacto (J)	4,90
Escorrimento ao calor mínimo (°C)	95
Estabilidade dimensional máxima (%)	1
Flexibilidade após envelhecimento mínimo (°C)	Classe B = 5
Estanqueidade mínimo (m.c.a)	15
Resistência ao rasgo mínimo (N)	120

Quadro 3.4- Classificação e propriedades da manta asfáltica utilizada

Fonte: Adaptado da ficha técnica do fabricante

A aderência da manta asfáltica no substrato é feita por processo de soldagem autógena, quando é feita a queima do filme de polietileno com a utilização de um maçarico manual conectado a um botijão de gás liquefeito de petróleo - GLP.

3.2 Métodos de ensaio

3.2.1 Ensaios de caracterização dos materiais de impermeabilização

Para caracterização do comportamento mecânico foram realizados ensaios de resistência à tração, que permitiram também a determinação do alongamento e do módulo de elasticidade.

3.2.1.1 Moldagem e preparação dos corpos de prova

Membrana de acrilatos puros

A Figura 3.2 mostra os procedimentos realizados para a moldagem das membranas de acrilatos puros para posterior corte dos corpos de prova. Foram utilizados gabaritos

de acrílico, com dimensões variáveis e 2 mm de espessura, fixados à bancada e também em painéis de vidro com uso de fita adesiva. Com auxílio de um pincel foi aplicada uma fina película de óleo desmoldante no gabarito de maneira a facilitar a desforma. A aplicação da membrana foi feita em três demãos com uso de pincel tipo trincha de 2.1/2" e intervalo mínimo de 4 horas entre demãos. Durante o processo de aplicação, para o monitoramento e controle, foi utilizado um aparelho medidor de temperatura e umidade relativa do ar, de forma a manter a temperatura mínima de 8° C e máxima de 35°C, conforme instruções do fabricante.

Figura 3.2- Moldagem dos panos de membrana de acrilatos puros pra preparo dos corpos de prova

A cura da membrana foi ao ar, em temperatura ambiente, durante 28 dias (Figura 3.3). Após este período, as membranas foram desmoldadas para etapa de corte dos corpos de prova no formato gravata.

Figura 3.3- Membrana de acrilatos puros em cura ambiente

Os corpos de prova foram cortados com auxílio de um dispositivo de corte de gravatas em aço, com gumes afiados e sem irregularidades.

O formato foi padronizado segundo modelo I da norma NBR 16548 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), como ilustra a Figura 3.4.

Figura 3.4- Modelo I de corpo de prova para ensaio de tração. Dimensões: W- Largura da seção estreita, 6 mm; WO- Largura total, 26 mm; L- Comprimento da seção estreita, 33 mm; LO- Comprimento total, 115 mm; T- Espessura (variável), $4 \pm 0,02$ mm (manta asfáltica), $4 \pm 0,12$ mm (argamassa polimérica) e $0,91 \pm 0,02$ (membrana acrílica).

Fonte: Adaptado da norma NBR 16548- Formato I (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017)

A Figura 3.5 e Figura 3.6 ilustram o processo de corte e obtenção dos corpos de prova. Após este processo, os corpos de prova foram acondicionados em recipientes plásticos para proteção de agentes contaminantes e água até a realização dos ensaios.

Figura 3.5- Corte dos panos em máquina manual de bancada

Figura 3.6- Corpos de prova cortados em formato haltere (Gravata)

Argamassa Polimérica

Como mostra a Figura 3.7 e Figura 3.8, para moldagem dos corpos de prova de argamassa polimérica foi produzido um gabarito de borracha natural com auxílio do dispositivo de corte de gravatas.

Figura 3.7- Borracha natural, NB 1087, espessura 3 mm, usada para criação de molde

Figura 3.8- Corte do molde de borracha em dispositivo de corte de aço padronizado

A Figura 3.9 apresenta as etapas do processo de preparo e moldagem dos corpos de prova. A argamassa polimérica foi preparada conforme instruções do manual do fabricante, com devida atenção quanto às proporções dos componentes A e B, bem como as condições de temperatura e umidade. As pesagens foram realizadas em balanças eletrônicas de precisão de 0,01 g, assim como a temperatura foi controlada por aparelho de medição de temperatura e umidade no ambiente. A mistura dos componentes foi feita com misturador mecânico de rotação entre 400 a 450 rotações por minuto (rpm) para melhor homogeneização dos materiais (Figura 3.9 a).

Os gabaritos de borracha foram fixados na bancada sobre placas de vidro com uso de fita adesiva e em seguida receberam uma fina camada de desmoldante. A argamassa polimérica fresca foi aplicada nos gabaritos com auxílio de uma colher plástica e sua superfície foi regularizada com espátula plástica (Figura 3.9 b.1 e b.2).

Figura 3.9- Processos de moldagem dos corpos de prova de argamassa polimérica: (a) mistura do componente A e B em misturador mecânico de bancada; (b.1) e (b.2) aplicação da argamassa no molde de borracha; (c) cura dos corpos de prova ao ar durante 3 dias; (d.1) desforma dos corpos de prova no terceiro dia após a moldagem e (d.2) término da cura do material (28 dias)

Como mostra a Figura 3.9 c, os corpos de prova ficaram em cura, em temperatura ambiente, durante três. A desforma foi feita no terceiro dia após a moldagem, quando os corpos de prova ainda estavam maleáveis (Figura 3.9 d1). Em seguida, foram posicionados em uma bancada para término do processo de cura ao ar até completar 28 dias (Figura 3.9 d2).

Manta asfáltica

O corte da manta asfáltica do rolo foi realizado desprezando o primeiro metro e 50 mm das bordas, conforme instruções da norma NBR 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a). Como mostra a Figura 3.10, a conformação dos corpos de prova foi feita com uso de dispositivo de corte de gravatas em aço. O formato foi padronizado segundo modelo I (*vide* Figura 3.4) da norma NBR 16548 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Figura 3.10- Conformação dos corpos de prova de manta asfáltica com uso de dispositivo de corte de gravata

O estruturante resulta um comportamento mecânico anisotrópico e, por isso, é necessário o corte de gravatas nos eixos longitudinal e transversal ao comprimento da manta, como indica a norma NBR 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a).

3.2.1.2 Procedimentos de ensaio

3.2.1.2.1 Determinação da resistência à tração e alongamento

O ensaio de tração nos corpos de prova de membranas e manta foram feitos segundo a metodologia descrita na norma NBR 16548 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). A referida norma indica o uso de cinco corpos de prova, sendo o dobro em caso de anisotropia no material. A norma NBR 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a), para mantas asfálticas, indica que devem ser obtidos ao menos nove resultados válidos. Neste caso, para maior confiança e menor variabilidade nos resultados foram utilizados 13 corpos de prova, em formato haltere (gravata), com as dimensões padronizadas, como apresentado anteriormente na Figura 3.4.

Para o cálculo da seção média transversal foram feitas três medidas de espessura e largura da região mais estreita do corpo de prova com uso de um micrômetro. Os corpos de prova receberam, em sua região central mais estreita, duas marcações iniciais, distantes entre si em $50 \pm 0,5$ mm, as quais servem de referência para o cálculo de deformação e alongamento.

Figura 3.11- Ensaio de tração em corpo de prova de membrana de acrilatos puros

O ensaio consistiu em fixar os corpos de prova pelas extremidades nas garras da máquina de ensaio EMIC DL 10000, utilizando uma célula de carga de 1 kN e uma velocidade de 100 mm/min (Figura 3.11).

A resistência à tração na carga máxima e na carga de ruptura foi determinada pela Equação 3.1:

$$\sigma = \frac{P}{e \cdot L} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

σ = Resistência à tração (MPa);

P = carga máxima ou de ruptura (N);

e = espessura inicial do corpo de prova (mm);

L = largura média da região central mais estreita do corpo de prova (mm).

O alongamento percentual foi calculado tanto para a carga máxima quanto para a carga de ruptura, segundo a Equação 3.2:

$$\Delta L = \left(\frac{d_f - d_i}{d_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

ΔL = alongamento relativo a um dado valor de deformação (%);

d_f = distância entre os centros dos traços na deformação de referência (mm);

d_i = distância inicial entre os traços de referência (mm).

O retorno elástico dos materiais foi medido, com auxílio de um paquímetro, após 24 horas do ensaio de resistência à tração, sendo determinado pela Equação 3.3:

$$Re = \left(\frac{C_f - C_i}{C_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

Re = retorno elástico (%);

C_f = Comprimento final do corpo de prova (mm);

C_i = distância inicial do corpo de prova, medida antes do ensaio (mm).

Alguns parâmetros para cálculo foram observados a depender do tipo de material, como indicado a seguir:

- Manta asfáltica, com estruturante no eixo longitudinal ou transversal: como ilustrado na Figura 3.12, o cálculo da tensão e alongamento de ruptura teve como referência a deformação, medida na curva, para qual a carga diminui em 5% do valor da carga máxima (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018d);

Figura 3.12- Exemplo de diagrama tensão por deformação para a manta asfáltica com estruturante no eixo longitudinal (a) e transversal (b), os valores selecionados para o cálculo de resistência à tração e alongamento na carga máxima e na ruptura são aqueles indicado com um "x"

- Argamassa polimérica: para este material, notou-se no diagrama tensão por deformação que a carga de ruptura é próxima à carga máxima. Por isso, a carga e a deformação última foram consideradas para o cálculo de tensão e alongamento na ruptura, como exemplificado na Figura 3.13.

Figura 3.13- Exemplo de diagrama tensão por deformação para a argamassa polimérica, indicado com um “x” os pontos adotados para o cálculo de resistência à tração e alongamento na carga máxima e na ruptura

- Membrana de acrilatos puros: para este material não foi encontrado na literatura um limite de deformação para obtenção da carga de ruptura. Por isso, foi adotado a carga de tração e alongamento na ruptura quando ocorre a queda última da curva tensão por deformação, como exemplifica a Figura 3.14.

Figura 3.14-Exemplo de diagrama tensão por deformação para a membrana de acrilatos puros, indicado com um “x” os pontos adotados para o cálculo de resistência à tração e alongamento na carga máxima e na ruptura

3.2.1.2.2 Determinação do módulo de elasticidade com a técnica DIC

Para medida da deformação do material durante o ensaio de tração foi utilizada a técnica de análise por correlação de imagem digital (DIC). Para isto foi necessário preparo da superfície dos corpos de prova para filmagem e posterior processamento no software GOM.

A Figura 3.15 e a Figura 3.16 mostram o preparo da superfície dos corpos de prova com uso de tinta do tipo spray na cor branca. Para a manta asfáltica foi aplicada tinta spray à base de água, uma vez que a base solvente causa reações químicas com o asfalto da manta.

Figura 3.15- Preparação de superfície com aplicação de tinta spray cor branca

Figura 3.16- Preparação de superfície com tinta spray base água em manta asfáltica

Os corpos de prova de membrana de acrilatos puros, apesar de já apresentarem a cor branca, também receberam uma fina camada de tinta spray. Após a secagem da tinta, a região central do corpo de prova recebeu a malha de pontos dentro de um espaço delimitado de 50 ± 2 mm. A malha na pontos na cor preta foi criada com uso de uma caneta hidrográfica preta de ponta extrafina de 0,4 mm (Figura 3.17 e Figura 3.18).

Figura 3.17- Criação de padrão de pontos na região central do corpo de prova com uso de caneta hidrográfica

Figura 3.18- Corpo de prova preparado para ensaio

Para a obtenção do módulo de elasticidade foi adotado o mesmo procedimento do ensaio de resistência à tração, com o acréscimo do uso da câmera digital para obtenção das imagens de deformação dos corpos de prova (Figura 3.19). A aquisição de imagens foi sincronizada com a aplicação do esforço de tração.

Figura 3.19- Procedimento de ensaio de tração com filmagem com câmera digital para processamento pela Técnica DIC

A etapa de processamento das imagens digitais é ilustrada na Figura 3.20.

Figura 3.20- Processamento de imagem digital (DIC) em software GOM: (a) vista do mapeamento de tensões no corpo de prova; (b) vista da imagem com extensômetro medindo a deformação do corpo de prova com indicação da área da possível ruptura

Com as ferramentas do software de análise de imagem, para medição das deformações do corpo de prova, foi posicionado um extensômetro virtual na região central da malha de análise, como mostra a Figura 3.20.

Para o cálculo do módulo de elasticidade foram utilizados os dados obtidos no relatório gerado pelo software, compatibilizados com o tempo de aplicação da carga durante o ensaio, gerando curvas de tensão por deformação. As normas ASTM D638 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014a) e ASTM D2370 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016d) foram utilizadas como parâmetro para o cálculo.

A Figura 3.21 apresenta um diagrama esquemático da curva tensão por deformação para a determinação do módulo de elasticidade tangente, aplicado para materiais com comportamento linear, e o módulo de elasticidade secante, para materiais com comportamento não linear.

Figura 3.21- Diagrama esquemático tensão por deformação para cálculo do módulo secante, para materiais de comportamento não linear, e módulo tangente, para materiais com comportamento linear

Fonte: Adaptado de Callister (2018, p. 176)

Em termos matemáticos, o módulo de elasticidade é obtido pela variação da tensão pela variação correspondente à deformação, como expressa a Equação 3.4:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta\sigma$ = Variação da tensão na parte linear da curva (MPa);

$\Delta\epsilon$ = Variação da deformação específica na parte linear da curva (mm/mm)

A argamassa polimérica apresentou trecho linear na curva tensão por deformação, sendo possível o cálculo do módulo tangente à curva, como mostra a Figura 3.22. Para este material, foi considerada a variação de tensão entre 0,15 a 0,30 MPa, e a deformação específica considerada entre os pontos 0,003 mm/mm e 0,01 mm/mm.

Figura 3.22- Exemplo para forma de cálculo do módulo tangente para corpo de prova de argamassa polimérica.

A membrana de acrilatos puros e a manta asfáltica apresentou, na curva tensão por deformação, uma porção linear menos definida, sendo aplicado neste caso o módulo secante. A Figura 3.23 apresenta um exemplo de diagrama tensão por deformação para a manta asfáltica, para o qual foi considerado o intervalo de tensão entre 1 a 1,5 MPa no cálculo do módulo secante e a deformação entre 0,04 e 0,05 mm/mm.

Figura 3.23- Forma de cálculo do módulo secante para manta asfáltica, representação da curva tensão por deformação com estruturante no eixo longitudinal

Para o cálculo do módulo secante da membrana de acrilatos puros foi considerado o valor de tensão de 0,5 MPa e deformação de 0,1 mm/mm, dentro do limite elástico da curva (Figura 3.24).

Figura 3.24- Forma de cálculo do módulo secante os corpos de prova de membrana de acrilatos puros

3.2.2 Ensaios de desempenho dos sistemas de impermeabilização aderidos

Os ensaios de desempenho consistiram em: verificação da resistência de aderência dos sistemas impermeabilizantes selecionados para estudo e ensaios de simulação da transferência de fissuras (*crack bridging*) do substrato para esses sistemas.

3.2.2.1 Resistência de aderência

A norma de aderência para sistemas de impermeabilização NBR 12171 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b) foi recentemente revisada, porém quando da realização dos ensaios, em 2019, ainda não havia publicação da atualização metodológica. A antiga norma NBR 12171 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) apresentava uma metodologia com detalhes insuficientes para a execução do ensaio, tipo de sistema e condições do substrato. Ademais, a norma apresentava procedimento mais indicado para sistemas cimentícios como a argamassa polimérica.

Diante disto, o procedimento utilizado no programa experimental contemplou a preparação do substrato e realização dos ensaios tendo como referência as normas NBR 13528-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) e NBR 14081-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012b). As instruções constantes na ficha técnica dos fabricantes dos materiais impermeabilizantes foram utilizadas para definir a forma de aplicação e consumo mínimo dos materiais.

3.2.2.1.1 Preparação do substrato

A aderência dos materiais impermeabilizantes foi caracterizada em uma placa de substrato padrão de concreto com dimensões 250 mm x 500 mm e espessura de 20 mm, normalizada segundo a NBR 14081:2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c). As normas NBR 13528-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) e NBR 14081-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012b), que focam as argamassas cimentícias, estabelecem a utilização da face rugosa do substrato. Porém, a rugosidade significativa dessa face poderia afetar na uniformidade das camadas dos

materiais durante o processo de aplicação, sendo necessário o acréscimo de uma camada de regularização. Por isso, a face oposta, muito mais lisa, foi adotada.

Para utilização do verso da placa foi necessária preparação prévia, visto que esta face pode conter resíduos de óleo desmoldante proveniente do processo de fabricação. Nesta etapa, com auxílio de lixa massa nº 80 procedeu-se a remoção da camada superficial (Figura 3.25 a). Em seguida, com o auxílio de lavadora de alta pressão, foi realizada limpeza das placas para a remoção de resíduos (Figura 3.25 b).

Figura 3.25- Remoção de óleo desmoldante e material aderido na placa (a), limpeza com uso de água sob pressão (b) e fechamento dos poros aparentes com pasta de cimento e aditivo promotor de aderência (c)

Após a limpeza, notou-se poros abertos na superfície da placa e uma fina camada de pasta de cimento com aditivo promotor de aderência foi aplicada para fechamento dos poros aparentes (Figura 3.25 c). O preparo foi finalizado com outra etapa de lixamento para promover micro ranhuras e facilitar a ancoragem das camadas subsequentes.

3.2.2.1.2 Aplicação dos materiais

A aplicação dos materiais teve como principal procedimento as instruções descritas na ficha técnica dos fabricantes. Por isto, o consumo mínimo, os instrumentos para manuseio e tempo entre demãos sugeridos foram criteriosamente seguidos.

No caso das membranas moldadas in loco, os procedimentos adotados durante a aplicação incluíram controles de massa, temperatura e umidade do ambiente. Estes

dois últimos fatores estão relacionados ao tempo de cura entre demãos, assim como possíveis alterações nas propriedades dos materiais quando em condições adversas aquelas as quais foi preparado. Para o controle de massa foi utilizada balança eletrônica de precisão de 0,01 g. A quantidade de material por demão foi controlada por meio da pesagem do recipiente com material e o pincel, antes e após aplicação. O controle de umidade e temperatura foi feito com uso de um sensor termo higrômetro digital com faixa de medição entre 0 a 50 °C e umidade relativa do ar entre 0 a 80%, exatidão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 5\%$ UR, respectivamente.

A verificação da espessura de filme úmido foi feita após a conclusão da aplicação de cada demão. Para isto, foi utilizado medidor de camada úmida tipo pente com faixa de medição entre 25 a 3000 micron e distância de graduação de 25 μm . Para medição, o pente deve ser posicionado perpendicularmente à superfície impermeabilizada. Desta forma, sem exercer pressão, com o peso próprio do pente à camada úmida é registrada a marcação da espessura. A maior marcação feita no pente pelo material quando no estado fresco representa a espessura da camada aplicada.

Em uma das bordas do substrato foi aplicada fita adesiva para facilitar a retirada de amostras e checagem da espessura média do filme seco em cada placa. Estes procedimentos são mostrados na Figura 3.26 e na Figura 3.27. A Figura 3.28 mostra o processo de corte da manta asfáltica do rolo, desprezando o primeiro metro e bordas a partir de 50 mm, de acordo com instruções da norma NBR 9952 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a).

A imprimação do substrato foi realizada com uso de primer asfáltico base água. A manta asfáltica, com acabamento em polietileno, foi aderida ao substrato com auxílio de maçarico manual portátil, com controle da chama para queima do filme e aderência ao substrato (Figura 3.29). A aplicação da manta foi realizada por um profissional especializado.

Figura 3.26- Aplicação das camadas de membrana impermeabilizante

Figura 3.27- Verificação da espessura de filme úmido com uso de medidor tipo pente

Figura 3.28- Corte da manta asfáltica com uso de estilete

Figura 3.29- Aderência da manta asfáltica com uso de maçarico manual portátil

A Tabela 3.1 apresenta a compilação dos dados referentes ao consumo e espessura dos materiais aplicados.

	Manta asfáltica	Argamassa polimérica	Membrana de acrilatos puros
Ref. Fabricante (kg/m ²)	-	3,00 a 4,00	1,20
Consumo aplicado (kg/m ²)	-	4,42	1,38

Tabela 3.1- Dados de consumo e espessura dos materiais aplicados. Consumo aplicado do primer composto por emulsão asfáltica diluído em 50% de água de 0,16 kg/m². Consumo referência para aplicação da manta asfáltica de 1,15 m²/m²

3.2.2.1.3 Preparo das placas para ensaio

O procedimento utilizado para preparo das placas para o ensaio de resistência à aderência teve como fases a marcação da área, corte, limpeza, medição do diâmetro do corpo de prova e colagem das pastilhas metálicas. A Figura 3.30 a Figura 3.33 mostram a sequência executiva do preparo, sendo 10 corpos de prova por placa.

Figura 3.30- Corte das placas com auxílio de serra copo diamantada

Figura 3.31- Limpeza do substrato com jato de ar comprimido

Figura 3.32- Medição do diâmetro de cada corpo de prova com auxílio de paquímetro

Figura 3.33- Pastilhas metálicas aderidas ao substrato

O diâmetro de cada corpo de prova foi obtido pela média de três determinações feitas ao longo do perímetro. Com essas medidas foi realizado cálculo da seção efetiva de cada corpo de prova em mm^2 .

3.2.2.1.4 Procedimento de ensaio

Para realização do ensaio posicionou-se um dinamômetro de tração ortogonalmente ao plano do substrato impermeabilizado. A célula de carga foi acoplada à pastilha com uso de parafuso, de forma a conectar o conjunto equipamento/corpo de prova sem excentricidade. Antes do início do ensaio foi verificado se o equipamento estava estabilizado de forma a não haver flutuação na leitura do dispositivo. De forma manual, foi aplicado o esforço de tração, com taxa de carregamento constante até a ruptura.

A carga de ruptura (N) de cada corpo de prova foi anotada para cálculo de resistência de aderência à tração (MPa). As formas de ruptura observadas também foram registradas. A resistência de aderência (R_a) é calculada pela razão entre a carga de ruptura, ortogonalmente aplicada, e a seção do corpo de prova, conforme descrito na Equação 3.5:

$$R_a = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

R_a = resistência de aderência à tração (MPa).

F = carga de ruptura, expressa em Newtons (N).

A = área do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm²).

3.2.2.2 Transferência de fissura – *Crack Bridging*

O método de ensaio consistiu em simular a transferência de fissuras do substrato para o sistema de impermeabilização aderido. A análise por Correlação de Imagem Digital (*Digital Image Correlation* - DIC) foi utilizada para obtenção da abertura de fissura na camada impermeabilizante aderida. No substrato, um LVDT foi utilizado para acompanhar a abertura de fissura do mesmo durante o ensaio.

Para o desenvolvimento do método foi realizado um estudo piloto em corpos de prova de concreto com fibras, tendo como sistemas impermeabilizantes a membrana de acrilatos puros e membrana de copolímeros acrílicos. O uso do substrato de concreto com fibras teve como objetivo garantir maior controle da fissuração do concreto

durante o ensaio. A metodologia e os resultados obtidos no estudo piloto estão apresentados em Santos, Santos e Monte (2021). A metodologia desenvolvida e aprimorada após o estudo piloto é apresentada a seguir.

3.2.2.2.1 Definição do substrato

Uma placa de substrato padrão, medindo 500 x 250 x 40 mm, foi selecionada para o programa experimental. Esta placa foi adotada por ser pré-moldada e padronizada nacionalmente pela norma NBR 14081-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c), isto elimina a etapa de moldagem e cura em laboratório, assim como colabora para minimizar possíveis variáveis e alterações provenientes deste processo.

A placa inteira foi cortada em três partes com o auxílio de serra circular de bancada para obtenção de corpos de prova retangulares medindo 250 x 150 x 40 mm. Em seguida, cada corpo de prova recebeu um entalhe no topo, medindo 25 mm de profundidade e 10 mm de largura, realizado com o auxílio de uma serra circular de bancada, como representado na Figura 3.34.

Figura 3.34- Configuração do corpo de prova de concreto para ensaio crack bridging.

Assim como no substrato do ensaio de aderência, nestes corpos de prova optou-se pela aplicação da impermeabilização na face menos rugosa do substrato padrão. Isto porque esta superfície apresenta melhor regularidade para aplicação dos materiais

impermeabilizantes. As etapas de limpeza prévia apresentadas no item 3.2.2.1.1 também foram realizadas.

3.2.2.2.2 Aplicação dos materiais

Após a preparação dos substratos foi realizada a etapa de aplicação dos materiais impermeabilizantes. Foram ensaiados dois corpos de prova de cada sistema, sendo eles compostos por: membrana de acrilatos puros, argamassa polimérica e manta asfáltica com acabamento em polietileno aderida à maçarico.

Os sistemas constituídos por membranas e argamassas foram preparados e moldados em laboratório conforme instruções constantes das fichas técnicas dos fabricantes quanto ao consumo de primer, proporção dos componentes, homogeneização, tempo entre demãos e forma de aplicação.

Antes da aplicação da membrana de acrilatos puros e da argamassa polimérica foi aplicada fita adesiva ao longo da parte superior do substrato, na região próximo ao entalhe, a qual recebeu as camadas de material durante a moldagem. A aplicação dos materiais foi feita com uso de um pincel tipo trincha de 2.1/2", com cerdas sintéticas pretas. O consumo foi controlado pelas pesagens do pincel antes e após cada aplicação do material no substrato.

A Figura 3.35 até a Figura 3.37 mostram os processos seguidos para aplicação dos materiais.

Figura 3.35- Controle de massa do componente A (a) e B da argamassa polimérica (b)

Figura 3.36- Pesagem do pincel antes e após aplicação

Figura 3.37- Corpo de prova de argamassa polimérica em processo de cura

No sistema composto por manta asfáltica foi realizada etapa de imprimação do substrato com uso de primer asfáltico base água, diluído em 50% de água. Em seguida, por meio do processo de soldagem autógena, foi feita a aderência da manta com auxílio de maçarico manual portátil, alimentado por um cilindro de gás GLP. Estas etapas são indicadas na Figura 3.38 e na Figura 3.39.

Figura 3.38- Imprimação do substrato com primer asfáltico base água

Figura 3.39- Aplicação da manta asfáltica com uso de maçarico manual

Após o período de cura (28 dias) da argamassa polimérica e da membrana de acrilatos puros, foi feita a remoção da fita adesiva como ilustra a Figura 3.40. Com um micrômetro, foram feitas dez medidas da espessura do filme seco ao longo da amostra extraída (Figura 3.41). Da média dos valores obtidos foi descontado a espessura da fita adesiva (0,090 mm).

Figura 3.40- Remoção da fita adesiva com membrana após a formação de filme seco

Figura 3.41- Medição da espessura de filme seco com auxílio de um micrômetro

O consumo de materiais e as espessuras médias das camadas de impermeabilização estão apresentados na Tabela 3.2.

	Manta asfáltica		Argamassa polimérica		Membrana de acrilatos puros	
Ref. Fabricante (kg/m ²)	-	-	3,00 - 4,00		1,20	
Consumo aplicado (kg/m ²)	0,17*	0,16*	3,17	3,61	1,97	2,03
Espessura (μ)	4169,27	4169,27	1666,20	1700,60	569,20	574,30

Tabela 3.2- Consumo de material para composição do sistema de impermeabilização e espessura de filme seco para as membranas. * Estes foram os consumos de primer de emulsão asfáltica. Consumo da manta asfáltica, segundo o fabricante é de 1,15 m²/m².

No Apêndice E está apresentada a planilha utilizada para controle de aplicação dos materiais na preparação dos corpos de prova.

3.2.2.2.3 Preparação de superfície

A superfície impermeabilizada dos corpos de prova foi preparada para possibilitar a análise das deformações e aberturas de fissuras por meio da correlação por imagem (DIC). Inicialmente todo material pulverulento na superfície foi retirado com o auxílio de um pincel de cerdas de nylon. Em seguida, uma fina camada de tinta do tipo spray na cor branca foi aplicada. Esta etapa possibilitou a uniformidade da camada para produção da malha de pontos. Por fim, com o auxílio de um carimbo do tipo rolete, com pontos medindo 0,013" (0,3302 mm), foi formada uma malha de pontos, também

chamada padrão de pontos estocásticos. Este padrão foi feito na cor preta, de forma a cobrir a área de interesse para análise e processamento das imagens digitais (Figura 3.42 e Figura 3.43).

Figura 3.42- Aplicação da tinta spray branca

Figura 3.43- Marcação da malha de pontos com carimbo

3.2.2.2.4 Procedimento de ensaio

A metodologia experimental envolveu um ensaio mecânico de tração indireta, inspirado no ensaio WST- *Wedge Splitting Test* (BRÜHWILER; WITTMANN, 1990; SEGURA-CASTILLO; MONTE; FIGUEIREDO, 2018), para avaliar a transferência de fissuras de substratos de concreto para membranas impermeabilizantes aderidas.

O procedimento de ensaio consistiu em submeter os corpos de prova à carga axial na posição do entalhe. Nesta região foi disposta uma cunha metálica para melhor distribuição dos esforços. O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaio (Shimadzu) com velocidade de 0,5 mm/min. Um transdutor para medição do deslocamento linear (Linear Variable Differential Transformer- LVDT) foi acoplado ao corpo de prova na face oposta aquela impermeabilizada, próximo a região do entalhe, com auxílio de insertes metálicos (Figura 3.44).

A cunha foi colocada sobre o entalhe quando do posicionamento do corpo de prova na máquina. Este procedimento possibilitou a formação de uma área de acúmulo de tensões durante a aplicação da carga, o que, conseqüentemente, proporcionou um meio indutor da fissura no corpo de prova ao longo do ensaio.

A face impermeabilizada foi filmada durante o ensaio, a distância de aproximadamente 50 cm do corpo de prova (Figura 3.45). Uma câmera digital modelo NIKON D5300 foi utilizada, com sensor de imagem de 24.2 Megapixels (MP) e distância focal de 35 mm. Para o processamento foram obtidas 2 imagens por segundo com dimensões de 1920

x 1080 pixels por resolução vertical e horizontal de 96 pontos por polegada (*dots per inch* - DPI). O padrão de pontos correspondeu a um subconjunto de 6 pixels da imagem, medindo 0,16 mm cada. Uma luminária com lâmpada led foi posicionada próxima aos aparatos de ensaio para aprimorar a iluminação durante a filmagem. Após a realização dos ensaios, os dados de deformação horizontal medidos por meio do LVDT foram extraídos para posterior análise.

Figura 3.44- Disposição do LVDT na face do substrato

Figura 3.45- Filmagem do ensaio com câmera digital Nikon D5300 posicionada em tripé

3.2.2.2.5 Processamento de imagem digital- DIC

O processamento foi realizado com uso do software de correlação de imagens digitais Gom Correlate. Durante o processamento das imagens foram inseridos medidores de deslocamento, denominados extensômetros virtuais, na superfície impermeabilizada. A partir das medidas determinadas nesses extensômetros foi possível avaliar a abertura de fissura em diversos pontos do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 3.46.

CP 02 Argamassa polimérica

Figura 3.46- Exemplo de processamento de corpo de prova no software GOM com inserção de 3 extensômetros virtuais na superfície analisada

O extensômetro virtual posicionado mais próximo ao LVDT, na face oposta do substrato, foi adotado como referência para comparação com a abertura de fissura do substrato.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Como apresentado no capítulo 3, o programa experimental foi dividido em ensaios de caracterização de materiais impermeabilizantes e de desempenho de sistemas aplicados. Na caracterização dos materiais são apresentados resultados de: resistência à tração e alongamento, na carga máxima e na carga de ruptura; e módulo de elasticidade. Os resultados dos ensaios de resistência de aderência serão apresentados em duas etapas, aqueles obtidos em placa de substrato padrão, e outra realizada no mesmo corpo de prova do ensaio *crack bridging*, medido após o ensaio.

4.1.1 Resistência à tração e alongamento

A Figura 4.1 mostra as curvas médias dos corpos de prova ensaiados à tração, sendo possível observar comportamentos distintos para cada material.

Figura 4.1- Curvas médias de tensão por deformação para os corpos de prova e gráfico expandido indicando diferença nos comportamentos e inclinações das curvas, e formação de patamar de escoamento e estricção na manta asfáltica- eixo longitudinal

A Tabela 4.1 apresenta a síntese dos resultados obtidos no ensaio de tração. Primeiramente, observa-se que a manta asfáltica apresentou resistência à tração na ruptura de 2,41 MPa e 1,88 MPa, respectivamente para os ensaios longitudinal e transversal, resultados consideravelmente superiores àqueles obtidos para argamassa polimérica (0,57 MPa) e para a membrana de acrilatos puros (0,47 MPa). Nota-se também que a tensão de ruptura obtida para estes dois últimos materiais foi próxima, com diferença de cerca de 17%.

Argamassa Polimérica									
	$P_{máx.}$ (N)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\delta_{Pmáx.}$ (mm)	$\Delta L_{Pmáx.}$ (%)	$P_{rup.}$ (N)	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\Delta L_{rup.}$ (%)	Retorno elástico (%)
Média	15,76	0,62	2,74	5,48	14,33	0,57	3,21	6,42	5,80
DP	2,99	0,08	0,76	1,52	2,96	0,09	0,96	1,92	1,99
EP	0,83	0,02	0,21	0,42	0,82	0,03	0,27	0,53	0,55
Manta Asfáltica- Longitudinal									
	$P_{máx.}$ (N)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\delta_{Pmáx.}$ (mm)	$\Delta L_{Pmáx.}$ (%)	$P_{rup.}$ (N)	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\Delta L_{rup.}$ (%)	Retorno elástico (%)
Média	65,84	2,54	15,32	30,65	62,27	2,41	16,81	33,63	16,57
DP	5,33	0,22	0,68	1,36	5,11	0,21	0,67	1,36	3,53
EP	1,48	0,06	0,19	0,38	1,42	0,06	0,18	0,38	0,98
Manta Asfáltica- Transversal									
	$P_{máx.}$ (N)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\delta_{Pmáx.}$ (mm)	$\Delta L_{Pmáx.}$ (%)	$P_{rup.}$ (N)	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\Delta L_{rup.}$ (%)	Retorno elástico (%)
Média	51,70	1,98	12,76	25,36	49,11	1,88	14,02	27,88	18,93
DP	3,56	0,18	1,33	2,62	3,41	0,18	1,83	3,67	2,07
EP	0,99	0,05	0,37	0,73	0,95	0,05	0,51	1,02	0,57
Membrana de Acrilatos Puros									
	$P_{máx.}$ (N)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\delta_{Pmáx.}$ (mm)	$\Delta L_{Pmáx.}$ (%)	$P_{rup.}$ (N)	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\Delta L_{rup.}$ (%)	Retorno elástico (%)
Média	4,82	0,85	33,64	67,75	2,64	0,47	150,85	303,89	39,95
DP	0,50	0,07	4,34	8,49	0,27	0,04	16,30	32,55	6,12
EP	0,14	0,02	1,20	2,36	0,08	0,01	4,52	9,03	1,70

Tabela 4.1- Resultados do ensaio de tração, onde P são as cargas, σ as tensões, δ deformação e ΔL os alongamentos, DP é o desvio padrão e EP o erro padrão. Os resultados individuais podem ser consultados no Apêndice B.

Por outro lado, como indicado na Tabela 4.1, o alongamento na ruptura da membrana de acrilatos puros (303,89%), de comportamento elastomérico, foi superior ao comportamento da manta asfáltica (33,63% e 27,88%) e da argamassa polimérica (6,42%).

A pequena diferença observada no alongamento na carga máxima (5,48%) e na ruptura (6,42%) da argamassa polimérica denota um comportamento característico de materiais frágeis, os quais apresentam alongamento na ruptura de cerca de 5% (CALLISTER, 2018, p. 183).

Quanto as tensões máxima e de ruptura, os maiores valores foram obtidos para a manta asfáltica, independente da orientação do estruturante. Com estruturante no eixo transversal a resistência à tração é cerca de 22% menor que a obtida quando o estruturante está orientado longitudinalmente ao esforço aplicado. Segundo Callister (2018, p. 249), a diferença relacionada a anisotropia do material pode resultar quedas ainda mais expressivas de até 50% do limite de resistência quando a aplicação da carga ocorre na direção perpendicular à direção do estruturante.

4.1.2 Módulo de Elasticidade

A Figura 4.2 apresenta as curvas, individuais e médias, de tensão por deformação específica para obtenção do módulo de elasticidade. As deformações específicas foram determinadas com extensômetros virtuais pela técnica DIC. Percebe-se que os resultados foram pouco dispersos e o comportamento dos três materiais bem distintos. Nota-se também na Figura 4.2c e na Figura 4.2d a diferença na resposta tensão/deformação quando o esforço aplicado é perpendicular ou na direção do estruturante da manta asfáltica.

Figura 4.2- Curva Tensão por Deformação específica para obtenção do módulo de elasticidade para Argamassa Polimérica (a), membrana de acrilatos puros (b), manta asfáltica com estruturante no eixo longitudinal (c) e para a manta asfáltica com estruturante no eixo transversal (d)

A Figura 4.3 apresenta as quatro curvas médias para comparação entre os comportamentos obtidos e a Tabela 4.2 mostra a síntese dos resultados de módulo de elasticidade.

Figura 4.3- Comparação entre as curvas médias de tensão por deformação específica para os diferentes materiais

	Módulo de elasticidade			
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)	Erro padrão (MPa)
Argamassa Polimérica	33,52	15,01	44,78	6,71
Manta Asfáltica- Eixo Long.	27,84	2,81	10,08	1,25
Manta Asfáltica- Eixo Trans.	22,15	1,81	8,16	0,81
Membrana de Acrilatos Puros	4,43	0,30	6,82	0,15

Tabela 4.2- Resultados de módulo de elasticidade obtidos pela curva tensão por deformação específica para cada material

Nota-se na Figura 4.3 que os materiais apresentam um variado comportamento mecânico, desde o mais rígido (argamassa polimérica) para o mais deformável (membrana de acrilatos puros). Observa-se que a membrana de acrilatos puros apresentou módulo de elasticidade (4,43 MPa) cerca de 7 vezes menor do que a argamassa polimérica (33,52 MPa) e 6 vezes menor do que a manta asfáltica (27,84 MPa). Este resultado está diretamente relacionado, a nível microscópico, com as longas cadeias moleculares do metilmetacrilato ligadas primordialmente por forças secundárias, que ao se romperem proporcionam a nível macroscópico maior deformação e menor rigidez nos elastômeros (MCKEEN, 2017b, p. 27).

A maior variabilidade foi observada nos resultados da argamassa polimérica, com coeficiente de variação de aproximadamente 44%. Isto pode ter ocorrido devido a maior dificuldade de obter uniformidade nos corpos de prova, tanto geométrica quando de defeitos internos. A geometria irregular dificulta o ajuste do corpo de prova nas garras da máquina durante o ensaio. Além disso, por ser um material frágil, as falhas internas induzem a concentração de tensões e a ruptura do material, o que pode ocorrer para níveis de tensões variáveis dependendo das características dos defeitos (por exemplo comprimento e curvatura) (CALLISTER, 2018, p. 268).

A manta asfáltica apresentou módulo de elasticidade relativamente alto, aproximando-se dos valores da argamassa polimérica. Porém, esse resultado deve-se a rigidez imposta pelo estruturante e não apenas da massa asfáltica.

4.2 Ensaios de desempenho

4.2.1 Resistência de aderência

A Figura 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de resistência de aderência. São apresentados, para cada sistema, os resultados médios de dez corpos de prova realizados em substrato padrão (antes do ensaio *crack bridging* - CB) e os resultados médios de quatro corpos de prova realizados no substrato que foi submetido ao ensaio CB.

Figura 4.4- Resultados do ensaio de resistência de aderência antes do CB e após o ensaio CB. Os resultados individuais dos corpos de prova podem ser consultados no Apêndice C e Apêndice D.

Fonte: Parâmetros de referência: manta asfáltica Menezes (2018), membrana de acrilatos puros Delucchi e Cerisola (2005) e para a argamassa polimérica NBR 11905 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015a)

É notado na Figura 4.4 que todos os sistemas ensaiados possuem resistência de aderência superior aos parâmetros de referência da literatura. O sistema de membrana de acrilatos puros apresentou maior aderência do que os demais, seguido dos sistemas cimentícios e por último dos asfálticos. Observa-se também que não houve perda de aderência após o ensaio CB. Isto confere com dados de pesquisa anterior (DELUCCHI; CERISOLA, 2005) que observou que a resistência de aderência não é alterada significativamente quando passa pelo ensaio CB, mas que se mantém

constante. A aderência ligeiramente superior obtida nos ensaios pós CB pode ser relacionada com a diferença de espessuras das camadas aplicadas nos substratos, como indicado na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.

O Quadro 4.1 indica as formas de ruptura dos corpos de prova no ensaio de aderência em placas de substrato padrão.

Formas de Ruptura (Ensaio em placa padrão- antes do CB)		
Manta asfáltica	Membrana de Acrílicos Puros	Argamassa polimérica
42% coesiva entre interfaces (primer/manta)	100% no substrato	64,5% Coesiva (corpo da argamassa)
57% Coesiva entre camadas (manta)		35,5% Adesiva (interface argamassa/cola)
1% Adesiva (na cola)

Quadro 4.1- Formas de ruptura dos corpos de prova, ensaio feito em placa de substrato padrão (face lisa)

Observa-se que o sistema asfáltico apresentou resistência de aderência menor do que os demais (0,33 MPa) e formas de ruptura predominantemente coesivas (na manta e na interface do primer com manta). Isto pode estar relacionado a espessura significativamente maior da camada principal (4 mm) e a presença do estruturante, que resulta uma interface a mais sujeita ao esforço. A membrana acrílica apresentou aderência tão intensa que resultou ruptura do substrato, indicando que a resistência de aderência é maior ou igual a 2,12 MPa (Figura 4.4). A argamassa polimérica apresentou expressiva ruptura adesiva, fator este relacionado a falha na aplicação da

cola durante o preparo do ensaio. Esta falha na cola levou a menor área de contato da pastilha metálica com a superfície do corpo de prova. Por isso, o software image J foi utilizado para avaliação apenas da seção que teve efetiva aderência do conjunto pastilha/cola/corpo de prova. Esta área foi a considerada para o cálculo de resistência de aderência dos corpos de prova de argamassa polimérica.

O Quadro 4.2 apresenta as formas de ruptura dos ensaios de aderência realizados nos corpos de prova após o ensaio CB.

Formas de Ruptura (Ensaio em placa padrão- após o ensaio crack bridging-CB)		
Manta asfáltica	Membrana de Acrilatos Puros	Argamassa polimérica
60% coesiva entre interfaces (primer/manta)	6,25% no substrato	97,5% Coesiva (corpo da argamassa)
40% Coesiva entre camadas (manta)	93,75% adesiva (substrato/primer)	2,5% Substrato

Quadro 4.2- Formas de ruptura dos corpos de prova nos ensaios de resistência de aderência realizados após o ensaio crack bridging-CB

Como observado no Quadro 4.2, para o sistema de manta asfáltica, as formas de ruptura e a resistência de aderência após o ensaio crack bridging (CB) foram similares às aquelas obtidas antes do ensaio CB. No entanto, as formas de ruptura da membrana de acrilatos puros e da argamassa polimérica apresentaram a maior diferença quando ensaiadas após o ensaio CB. A ruptura da membrana de acrilatos puros ocorreu predominantemente na interface primer/substrato e com resistência de aderência

maior aquela apresentada nas placas ensaiadas antes do ensaio CB. Esse resultado pode ter relação com a variabilidade da resistência mecânica do substrato de concreto. A argamassa polimérica continuou apresentando ruptura predominante coesiva, no corpo da argamassa, e não apresentou falha na aderência com o adesivo.

4.2.2 *Crack Bridging*

Conforme detalhado no programa experimental, os ensaios *crack bridging* foram realizados com uso da técnica de DIC – correlação de imagem digital. Por isso, após a realização dos ensaios os resultados passaram por uma etapa de pós processamento onde foram obtidos os seguintes dados: deslocamento de pontos contidos na área selecionada para análise de cada corpo de prova; variação do deslocamento (abertura de fissura) por tempo; e análise do comportamento do material frente a variação de tensão nos momentos de aplicação da carga por meio da escala gráfica de cores.

4.2.2.1 Identificação da abertura de fissura na membrana

As aberturas de fissura na camada impermeável foram monitoradas de acordo com a variação do tempo com o uso do software GOM. Este software fornece a ferramenta de análise das deformações com uso de extensômetros virtuais posicionados na superfície selecionada para análise, e simultaneamente indica o campo de variação de tensões atuantes no corpo de prova.

A Figura 4.5 e a Figura 4.10 apresentam o monitoramento da abertura de fissuras em 4 estágios para os dois corpos de prova de cada sistema de impermeabilização. Nas imagens a esquerda são apresentadas as vistas do corpo de prova com a malha de pontos selecionada para análise. As imagens do lado direito apresentam a variação da deformação em cada estágio com uso do diagrama com gradiente de cores. Também são apresentados os valores de abertura de fissura que definem a passagem de um estágio para o outro.

Para a argamassa polimérica (Figura 4.5 e Figura 4.6), observa-se que ao passar de cada estágio é adicionado à imagem uma nova camada de cor no perímetro da fissura, indicando uma distribuição das propagações das tensões na direção ortogonal do corpo de prova (tensão de compressão) e na direção transversal (tensão de tração indireta).

Figura 4.5 Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Argamassa Polimérica CP 1, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a direita.

Figura 4.6-Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Argamassa Polimérica CP 2, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a direita.

Para a membrana de acrilatos puros (Figura 4.7 e Figura 4.8), observa-se que as camadas de cores se iniciam no estágio II e se mantém até o IV, porém com o aumento da espessura. Isto pode ter relação com a elevada aderência da membrana ao substrato que faz com que as tensões se propaguem de maneira mais concentrada na região da fissura.

Figura 4.7- Membrana de Acrilatos Puros CP1, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações a direita. Extensômetro 2 utilizado como referência para obtenção do CBA.

Figura 4.8- Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Membrana de Acrilatos Puros CP2, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações à direita.

Interessante observar que tanto nos corpos de prova de argamassa polimérica quanto de membrana acrílica a evolução da transferência de fissura é claramente visível. Porém, o comportamento dos corpos de prova de manta asfáltica foi bastante distinto dos demais.

Primeiramente, observa-se na Figura 4.9 e Figura 4.10 que não foi identificada nenhuma fissura. Por isso, os valores indicados no lado direito das figuras podem ser considerados apenas como indicação das deformações da camada impermeabilizada ao longo do ensaio, mas não uma abertura de fissura propriamente dita. Por isso, o estágio definido como abertura de fissura final, que seria o IV, não foi considerado para estes corpos de prova. Ademais, pode-se constatar pela visão de mapeamento de deformações que houve grande absorção de esforços pela manta asfáltica na região do entalhe, isto pode ser melhor observado no estágio III da Figura 4.9.

Figura 4.9- Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Manta Asfáltica CP1, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações à direita.

Como mostra a Figura 10, a camada impermeável do CP 2, constituído por manta asfáltica, sofreu ainda menos deformação (estágios I e II) e as tensões transferidas do substrato para o sistema foram muito baixas, como indicado no campo de mapeamento de deformações (estágios III e IV).

Figura 4.10- Monitoramento da abertura de fissura medida pela técnica DIC, Manta Asfáltica CP2, Vista do corpo de prova com malha de seleção à esquerda e vista de mapeamento de deformações à direita.

4.2.2.2 Correlação da abertura de fissura no substrato e na camada impermeabilizada

A Figura 4.11 e a Figura 4.12 apresentam as curvas de deslocamento por tempo e carga por tempo para cada corpo de prova de argamassa polimérica. Para melhor análise de cada estágio da transferência de fissura, os diagramas foram divididos em quatro estágios. O estágio I é definido como o momento em que a ruptura do substrato é atingida. O estágio II é definido como o momento, a partir da ruptura do substrato, em que a transferência de fissura é iniciada no sistema.

Figura 4.11- Evolução da aplicação de carga no substrato e os respectivos deslocamentos no substrato, medido com LVDT, e na superfície impermeabilizada, medido com extensômetro virtual-DIC para a argamassa polimérica (CP1).

No final do estágio III, a abertura de fissura na camada impermeável é suficientemente notada, sendo este ponto definido como *crack bridging ability* (CBA). Neste ponto, uma vez que a fissura é formada no sistema, pode ocorrer perda de estanqueidade. O valor do CBA é a abertura de fissura que se tem no substrato no momento que se tem fissura visível na camada impermeabilizada.

Por último, o estágio IV representa a evolução da abertura de fissura até a máxima abertura obtida no ensaio. Neste estágio, a carga aplicada no substrato é praticamente nula, pois este já se encontra totalmente rompido.

Nota-se também nos diagramas da argamassa polimérica na Figura 4.11 (CP1) e Figura 4.12 (CP2) que após sair do estágio II, a variação de tempo no estágio III para ocorrer uma fissura visível é de aproximadamente 60 s. Além disso, percebe-se uma baixa inclinação da reta deslocamento, indicando menor deformação da camada impermeável.

Figura 4.12 - Evolução da aplicação de carga no tempo e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a argamassa polimérica (CP2).

Com base nos diagramas da Figura 4.13 e da Figura 4.14 é possível concluir que a membrana de acrilatos puros absorve maiores esforços sem se romper quando comparada à argamassa polimérica. Isto é percebido pela maior inclinação da curva de deslocamento por tempo e também pelo maior tempo para atingir o final do estágio III (~270 s) onde se observam fissuras visíveis.

Figura 4.13- Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a membrana de acrilatos puros (CP1).

O estágio III da Figura 4.14 apresenta uma quebra na sequência da curva de deformação por tempo. Observando as deformações no software GOM não foi possível notar alguma fissura ou anomalia na superfície da impermeabilização. Esta ruptura pode ser devida a alguma instabilidade no momento do ensaio, visto que no mesmo período de tempo houve uma pequena variação de carga no corpo de prova.

Figura 4.14- Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a membrana de acrilatos puros (CP2).

A manta asfáltica apresentou um comportamento diferente dos demais materiais. Os diagramas da Figura 4.15 e da Figura 4.16 mostram uma maior permanência no estágio III (~370 s) e nenhuma fissura visível.

Figura 4.15 - Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a manta asfáltica (CP1), imagem expandida da abertura de fissura

Além disso, observa-se que diferente dos demais sistemas, na manta asfáltica é notado no estágio IV uma queda da curva de deslocamento por tempo. Esta queda acontece no momento em que a curva carga por deformação chega a zero, indicando que o substrato não tem mais resistência mecânica residual.

Nesse momento, com a retirada do carregamento ocorre o retorno elástico da manta asfáltica. Em materiais viscoelásticos este comportamento ocorre com a liberação de tensão. Microscopicamente, com a aplicação de tensão as cadeias poliméricas se estiram na direção do esforço, e ao ser retirada se enrolam novamente (CALLISTER, 2018, p. 251). Este retorno à sua forma inicial, como antes da aplicação da tensão, é a resposta macroscópica do material quando ainda está trabalhando dentro do seu limite elástico.

Figura 4.16- Evolução da aplicação de carga no substrato e o efeito da deformação no substrato com uso do LVDT e na superfície impermeabilizada com uso do extensômetro virtual-DIC para a manta asfáltica (CP2), imagem expandida da abertura de fissura

Como observado nos diagramas, para a argamassa polimérica e membrana de acrilatos puros a fissura tornou-se visível no estágio III. As medidas de deslocamento e do tempo neste estágio são indicadas na Tabela 4.3. Estão apresentados também os respectivos deslocamentos no substrato e a diferença entre o deslocamento no substrato e na membrana ($\Delta\delta$).

Os resultados da Tabela 4.3 indicam deslocamentos superiores no substrato do que nas membranas no momento que se identifica a ruptura da membrana. Observa-se também que a argamassa polimérica e a membrana de acrilatos puros absorveram menos a fissura do substrato do que a manta asfáltica, apresentando uma diferença $\Delta\delta$ média de 0,019 mm, 0,075mm e 0,87 mm, respectivamente. Essa diferença pode ser explicada pela maior espessura e resistência à tração da manta asfáltica, conforme indicado na Tabela 4.1. Além disso, pode-se perceber que ainda que a membrana acrílica apresentou no ensaio de tração elevado alongamento na ruptura

(303,89%), este é reduzido significativamente quando o material está perfeitamente aderido.

Argamassa polimérica	Deslocamento (δ_s) Substrato (mm)	Deslocamento (δ_m) Membrana (mm)	$\Delta\delta$ ($\delta_s - \delta_m$) (mm)
Média	0,408	0,390	0,019
Desvio padrão	0,064	0,049	0,015
Erro padrão	0,045	0,035	0,011
Membrana de Acrilatos Puros	Deslocamento (δ_s) Substrato (mm)	Deslocamento (δ_m) Membrana (mm)	$\Delta\delta$ ($\delta_s - \delta_m$) (mm)
Média	1,189	1,114	0,075
Desvio padrão	0,170	0,079	0,091
Erro padrão	0,120	0,056	0,064
Manta asfáltica	Deslocamento (δ_s) Substrato (mm)	Deslocamento (δ_m) Membrana (mm)	$\Delta\delta$ ($\delta_s - \delta_m$) (mm)
Média	1,746	0,876	0,870
Desvio padrão	0,659	0,389	0,270
Erro padrão	0,466	0,275	0,191

Tabela 4.3- Deslocamentos (δ_s) relativos à fissura visível no substrato, correspondente deslocamento na membrana (δ_m), e a variação entre o deslocamento ocorrido no substrato e na membrana ($\Delta\delta$) medidos no estágio III para a argamassa polimérica e membrana de acrilatos puros e estágio IV para a manta asfáltica.

Para efeito de comparação entre as diferenças de aberturas de fissura obtidas no substrato (LVDT) e na superfície do sistema de impermeabilização (DIC) foi elaborado um diagrama de deslocamento por tempo, como indicado na Figura 4.17 e na Figura 4.18 respectivamente. Observa-se pelas curvas de deslocamento dos substratos um comportamento muito similar, o que confirma a uniformidade dos substratos. De forma contrária, as curvas de deformação por tempo para os sistemas de impermeabilização foram bem diferentes umas das outras, especialmente a manta asfáltica, indicando que o ensaio CBA com o uso da técnica DIC permitiu distinguir o comportamento dos sistemas.

Figura 4.17 - Curva de deslocamento do substrato no tempo obtida pelo LVDT para os três sistemas de impermeabilização

Figura 4.18- Comportamento dos três sistemas de impermeabilização frente a deformação do substrato, comparação de deslocamento obtida pelo extensômetro virtual (DIC)

Na Figura 4.19 foram correlacionados os deslocamentos médios obtidos no substrato e nas membranas. É possível observar uma forte correlação linear ($R^2 > 0,99$) entre os deslocamentos medidos no substrato (com LVDT) e aqueles medidos na membrana (com DIC).

Os coeficientes angulares da reta indicam a relação entre os deslocamentos no substrato (eixo x) e na superfície das membranas (eixo y), sendo o coeficiente da argamassa polimérica igual a 0,9977, da membrana de acrilatos puros igual a 0,9373 e da manta asfáltica igual a 0,5317. A significativa diferença entre esses coeficientes expressam o comportamento distinto dos sistemas frente a deformação do substrato.

Figura 4.19- Correlação entre os deslocamentos do substrato (LVDT) e da membrana (DIC)

4.2.2.3 Relação entre as propriedades mecânicas e o CBA

A Tabela 4.4 apresenta uma compilação dos principais dados de propriedades mecânicas dos materiais e desempenho dos sistemas no ensaio CBA. Nota-se nos resultados obtidos para o sistema de manta asfáltica que este não fissurou, apesar da abertura de fissura no substrato ter sido em média 1,75 mm. Isto pode indicar que para materiais que não fissuram a definição do CBA precisa ser distinta. Neste caso, pode-se considerar que a capacidade de transferência de fissuras (CBA) para a manta asfáltica é $\geq 1,75$ mm. Observa-se também que o sistema composto por manta asfáltica apresentou maior diferença de deformação em comparação com o substrato

($\Delta\delta = 0,87$ mm). Isto pode estar relacionado com a espessura da camada, presença de estruturante e resistência à tração deste material.

Sistema	Propriedades mecânicas				
	Espessura média do CP (mm)	$\sigma_{rup.}$ (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Recuperação elástica (%)	Mód. Elasticidade (MPa)
Argamassa polimérica	4,17	0,57	6,42	5,80	33,52
Manta Asfáltica Long.	4,16	2,01	35,60	16,57	27,84
Manta Asfáltica Transv.	4,16	0,11	37,82	18,93	22,15
Membrana de acrilatos puros	0,91	0,47	303,89	39,95	4,43
Propriedades de desempenho					
Sistema	Espessura média do CP (mm)	Resistência de aderência (MPa)	CBA (mm)	$\Delta\delta$ (mm)	
Argamassa polimérica	1,68	1,08	0,41	0,019	
Manta Asfáltica	4,16	0,34	1,75*	0,870	
Membrana de acrilatos puros	0,57	2,54	1,19	0,075	

Tabela 4.4 - Tabela resumo das propriedades mecânicas dos materiais e desempenho dos sistemas, * não foi observado abertura de fissura nos corpos de prova de manta asfáltica, por isso o valor médio de 1,75 mm não pode ser considerado como CBA, e sim como uma deformação no material, a qual foi absorvida totalmente

Como constatado em estudos anteriores o aumento da capacidade dos sistemas em absorver as fissuras são maiores quanto maior a espessura e a resistência à tração na ruptura do material (DELUCCHI; CERISOLA, 2005, 2012). Pode-se notar que o sistema com menor CBA foi a argamassa polimérica, sendo este também o que apresentou maior módulo de elasticidade e menor alongamento na ruptura.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões gerais e específicas que puderam ser estabelecidas com o desenvolvimento desse estudo.

As conclusões gerais dão resposta ao objetivo geral da pesquisa que é desenvolver uma metodologia de ensaio para avaliação da transferência de fissuras de um substrato de concreto para sistemas de impermeabilização aderidos. Neste sentido, são abordadas as características da metodologia desenvolvida, suas vantagens e limitações.

As conclusões específicas se apresentam na sequência dos objetivos específicos apresentados, ressaltando as principais contribuições de cada um para o atendimento ao objetivo geral.

Por último, algumas sugestões para pesquisas futuras são apresentadas que possibilitem avançar no desenvolvimento da metodologia proposta.

5.1 Conclusões gerais

Para avaliação da transferência de fissuras do substrato de concreto para a camada de impermeabilização este trabalho desenvolveu uma metodologia de ensaio *crack bridging*. Os ensaios de *crack bridging* têm sido aplicados internacionalmente para avaliar a transferência de fissuras em materiais como tintas, vernizes e membranas impermeabilizantes. Porém, os métodos normalizados ainda que avaliem quantitativamente a abertura de fissura, o surgimento inicial da fissura é apontado com uma análise visual. Microfissuras, por exemplo, podem não ser perceptíveis com esta abordagem.

A metodologia desenvolvida utilizou a análise por correlação de imagens digitais 2D (DIC), a qual possibilita a identificação do surgimento de fissuras de forma fácil e precisa, pois, é possível realizar monitoramentos na etapa de pós-processamento. Outro diferencial da técnica DIC nestas análises é o acompanhamento dos deslocamentos na superfície impermeabilizada com o uso de extensômetros virtuais, uma vez que a instalação de extensômetros físicos é difícil. O monitoramento das deformações e dos campos de tensão na etapa de pós-processamento permite

detectar o momento exato da transferência de fissura antes mesmo que a fissura se torne visível.

A possibilidade de correlacionar o comportamento mecânico dos materiais com a capacidade do sistema de impermeabilização absorver as deformações do substrato pode auxiliar os projetistas na especificação dos materiais mais adequados às solicitações do substrato ou os fabricantes no desenvolvimento de materiais mais adequados. Além disso, a definição de critérios quantitativos de desempenho para os sistemas de impermeabilização aderidos quanto a transferência de fissuras pode ser adotado pela norma de desempenho.

5.2 Conclusões específicas

A caracterização mecânica dos materiais para impermeabilização utilizados na pesquisa identificou que esses materiais, ainda que sejam de base polimérica ou contenham polímero em sua composição, podem apresentar comportamento mecânico muito distinto.

A manta asfáltica, ensaiada com estruturante no eixo longitudinal e no eixo transversal, apresentou maior resistência à tração na ruptura (2,41 MPa e 1,88 MPa) do que a membrana de acrilatos puros (0,47 MPa) e a argamassa polimérica (0,57 MPa). Além disso, o ensaio realizado no eixo longitudinal resultou um patamar de escoamento devido a deformação do estruturante. O maior alongamento na ruptura foi notado na membrana de acrilatos puros (303,89%), que apresentou comportamento de polímero elástico no diagrama tensão por deformação. A manta asfáltica apresentou comportamento de polímero plástico, com alongamento na ruptura uma ordem de grandeza menor do que a membrana de acrilatos puros (33,63%). Por outro lado, a argamassa polimérica apresentou comportamento similar a um compósito cimentício ou de um polímero frágil, com alongamento na ruptura de cerca de 6%.

A técnica DIC mostrou-se viável para obtenção das curvas tensão por deformação para cálculo do módulo de elasticidade. Com a técnica DIC foi possível obter os dados de deformação e associá-los com os valores de carga durante o ensaio. Com exceção da argamassa polimérica, os coeficientes de variação para a determinação do módulo de elasticidade podem ser considerados baixos para esse tipo de ensaio, variando

entre 6 e 10%. Para a argamassa polimérica a variabilidade foi bem maior (44%) e deve-se principalmente a maior dificuldade de obter uniformidade nos corpos de prova, tanto geométrica quando de defeitos internos. A geometria irregular dificulta o ajuste do corpo de prova nas garras da máquina durante o ensaio.

Quanto a resistência de aderência observou-se que não houve alteração significativa nos resultados após o ensaio *crack bridging*. Porém, percebeu-se que quanto maior a variação de abertura de fissura entre o substrato e a camada impermeável menor a resistência de aderência do sistema. Isto pode estar relacionado ao descolamento da camada impermeável na região da fissura.

O levantamento do estado da arte dos métodos de ensaio para avaliação da transferência de fissuras mostrou que o interesse por estudos no tema não é recente e existem alguns métodos de ensaio normalizados internacionalmente. Nota-se que nesses métodos normalizados a identificação da transferência de fissura é visual e a quantificação da abertura de fissura durante o ensaio não é realizada.

O desenvolvimento da metodologia com o uso da técnica DIC para avaliação da transferência de fissuras do substrato para a camada aderida mostrou-se eficaz. A configuração de ensaio proposta é simples, faz uso de uma máquina de ensaio universal com aplicação de deslocamento constante e pode ser relativamente fácil a implementação em laboratórios de controle tecnológico.

A leitura do deslocamento horizontal de pontos na superfície impermeabilizada pode ser realizada com precisão por meio de um ou mais extensômetros virtuais, o que possibilita a avaliação quantificativa da abertura de fissura na camada impermeável. Além disso, a licença gratuita do software GOM apresenta ferramentas suficientes para processamento e análise das imagens.

A metodologia desenvolvida permitiu comparar o comportamento dos diferentes sistemas de impermeabilização aderidos ao substrato de concreto. As membranas de base acrílica e argamassas polimérica são muito sensíveis aos esforços provenientes do substrato. Apesar do elevado alongamento na ruptura, cerca de 300%, a membrana de acrilatos puros perde esta capacidade quando fortemente aderida ao substrato. No ensaio de transferência de fissuras este sistema se comportou de forma similar as argamassas poliméricas, que é um material muito mais rígido. A manta

asfáltica acompanhou a deformação do substrato até o limite de deformação deste, sem fissurar.

5.3 Sugestões para pesquisas futuras

Ainda que a dissertação tenha proposto uma metodologia para avaliar a transferência de fissuras ainda há espaço para aprimoramento. Dentre as sugestões de continuidade da pesquisa estão:

- Aprimorar a metodologia com: (1) o uso de substrato padrão reforçado com malha de aço, isto poderia evitar instabilidades no ensaio, assim como poderia ser observada a abertura de fissura em materiais de maior capacidade de deformação, como as mantas asfálticas, uma vez que a malha de aço aumentaria a capacidade de deformação do substrato; (2) avaliação da estanqueidade após o ensaio *crack bridging* caso não haja fissuras visíveis; (3) a realização de um ensaio de abertura de fissura dinâmico para avaliação da fadiga.
- Avaliar a influência da variação da espessura do material de impermeabilização e de reforços, como fibras e telas, na transferência de fissura.
- Estudar outros sistemas de impermeabilização, como poliuretano e poliureia, que trabalham aderidos ao substrato e apresentam grande potencial de aplicação no mercado brasileiro.
- Comparar o comportamento na transferência de fissuras de manta asfáltica aderida com maçarico ou aderida com asfalto aquecido.
- Comparar o comportamento mecânico dos materiais e de resistência à transferência de fissuras dos sistemas de impermeabilização antes e após ensaio de envelhecimento acelerado.
- Desenvolver modelos numéricos para simulação do comportamento na transferência de fissuras de sistemas de impermeabilização aderidos, considerando o nível de deformação do substrato e as propriedades mecânicas e de deformação do material de impermeabilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, Hebert. **Asphalts and allied substances, their occurrence, modes of production, uses in the arts and methods of testing**. 2. ed. New York: D.Van Nostrand Company, 1920.

ALLEN, Edward; LANO, Joseph. **Fundamentos da engenharia de edificações: materiais e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 515.2R-13: Guide to Selecting Protective Treatments for Concrete**. 1. ed. Farmington Hills.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 5957: Standard Guide for Flood Testing Horizontal Waterproofing Installations Pennsylvania, 1998. DOI: 10.1520/D5957-98R13.2.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, 2014. a. DOI: 10.1520/D0638-14.1. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E140%0Ahttp://www.astm.org/Standards/E8.htm>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7877: Standard Guide for Electronic Methods for Detecting and Locating Leaks in. Pennsylvania, v. i, p. 1–7, 2014. b. DOI: 10.1520/D7877-14.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C1305/C1305M: Standard Test Method for Crack Bridging Ability of Liquid-Applied Waterproofing Membrane West Conshohocken, United States, 2016a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D6164: Standard Specification for Styrene Butadiene Styrene (SBS) Modified Bituminous Sheet Materials Using Polyester Reinforcements 2016b. DOI: 10.1520/D6164.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D6223: Specification for Atactic Polypropylene (APP) Modified Bituminous Sheet Materials Using a Combination of Polyester and Glass Fiber Reinforcements 2016c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D412 Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers - Tension West

Conshohocken, 2016d.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D2370: Standard Test Method for Tensile Properties of Organic Coatings Pennsylvania, 2016e. Seção Reapproved, p. 8–11. DOI: 10.1520/D2370-16.2.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D1079: Standard Terminology Relating to Roofing and Waterproofing West Conshohocken, 2018a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D6083: Standard Specification for Liquid Applied Acrylic Coating Used in Roofing. West Conshohocken, Estados Unidos, 2018. b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM International West Conshohocken, 2018c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D5147: Standard Test Methods for Sampling and Testing Modified Bituminous Sheet Material. second type of tensile. Pennsylvania, 2018d. DOI: 10.1520/D5147.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D2523: Standard Practice for Testing Load-Strain Properties of Roofing Membranes West Conshohocken, 2019a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D8231-19: Standard practice for the use of a low voltage electronic scanning system for detecting and locating breaches in roofing and waterproofing membranes. Pennsylvania. DOI: 10.1520/D8231-19.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D3878: Standard Terminology for Composite Materials West Conshohocken, 2020a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D883: Standard Terminology Relating to Plastics West Conshohocken, 2020b.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e Engenharia dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO. **Mãos à Obra Pro-O guia do Profissional da Construção**. 1. ed. São Paulo: Alaúde, 2013. v. 1

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8083- Materiais e

sistemas utilizados em impermeabilizaçãoRio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12171- Aderência aplicável em sistemas de impermeabilização composto por cimento impermeabilizante e polímeros.Rio de Janeiro, 1992.

NBR 9574- EXECUÇÃO DE IMPERMEABILIZAÇÃO. Direção: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13321: Membrana acrílica para impermeabilização. Rio de Janeiro, 2008. b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9575: Impermeabilização – Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16072- Argamassa impermeávelRio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14081-4 Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 4: Determinação da resistência de aderência à traçãoRio de Janeiro, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9952: Manta asfáltica para impermeabilização. Rio de Janeiro, 2014. a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.Rio de Janeiro, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11905: Argamassa polimérica industrializada para impermeabilização. Rio de Janeiro, 2015. a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 37Rio de Janeiro, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14081-2: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas- Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaiosRio de Janeiro, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16548: Materiais de

impermeabilização — Determinação da resistência à tração e alongamento. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528-2: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas — Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 2: Aderência ao substrato. . 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2021. a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12171: Aderência aplicável em sistema de impermeabilização composto por cimento impermeabilizante e polímeros. Rio de Janeiro, 2021. b.

AUGUSTO, Leandro. **Análise crítica dos métodos e critérios de avaliação das texturas acrílicas com vistas a uma proposta de diretriz SINAT**. 2013. [S. l.], 2013. Disponível em: http://cassiopea.ipt.br/teses/2013_HAB_Leandro_Augusto.pdf.

BADADANI, Vijayakumar; SRIRANGA, T. S.; SRIVATSA, Shivashankar R. Analysis of Uncertainty in Digital Image Correlation Technique for Strain Measurement. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 5, n. 10, p. 20912–20919, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.479. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.479>.

BAUER, L. A. Falcã. **Materiais de construção**. 6. ed. Rio de Janeiro.

BECERE, Osmar Hamilton. **Revestimentos de ligantes sintéticos: proposta de métodos de ensaios para avaliação de desempenho**. 2007. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, [S. l.], 2007. Disponível em: http://cassiopea.ipt.br/teses/2007_HAB_Osmar_Hamilton_Becere.pdf.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti Da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiro**. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção. Patologia, reabilitação e prevenção**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2014.

BÍBLIA SAGRADA. **Bíblia Sagrada Versão atualizada King James**. Revisão 20 ed. Rio de Janeiro: BV Books Editora, 1611.

BROBERG, K. Bertram. **Cracks and Fracture**. Dublin: Academic Press, 1999. DOI: 10.1016/b978-012134130-5/50001-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012134130-5/50001-5>.

BRÜHWILER, E.; WITTMANN, F. H. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. **Engineering Fracture Mechanics**, Great Britain, v. 35, n. 1–3, p. 117–125, 1990. DOI: 10.1016/0013-7944(90)90189-N.

CALLISTER, Willian. **Fundamentos da Ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CANEVAROLO, Jr.; SEBASTIÃO, V. **Ciência dos Polímeros um texto básico para técnicos e engenheiros**. 2º ed. São Carlos. v. 1

CASH, C. G. Roofing Materials. *In*: BUSCHOW, K. H. Jürgen; CAHN, Robert W.; FLEMINGS, Merton C.; ILSCHNER, Bernhard; KRAMER, Edward J.; MAHAJAN, Subhash; VEYSSIÈRE, Patrick B. T. Encyclopedia of Materials: Science and Technology (org.). **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2001. p. 8217–8221. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01471-6>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526014716>.

CASSU, Silvana Navarro; FELISBERTI, Maria Isabel. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxação es em polímeros e blendas poliméricas. **Química Nova**, Brasil, v. 28, n. 2, p. 255–263, 2005.

CHAWLA, Krishan K. **Composite Materials**. 3. ed. New York, NY: Springer New York, 2012. DOI: 10.1007/978-0-387-74365-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-74365-3>.

CHIEN, Chi Hui; SU, Ting Hsuan; HUANG, Chao Jian; CHAO, Yuh Jin; YEH, Wei Li; LAM, Poh Sang. Application of digital image correlation (DIC) to sloshing liquids. **Optics and Lasers in Engineering**, [S. l.], v. 115, n. August 2018, p. 42–52, 2019. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.11.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.11.016>.

CHU, T. C.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. **Experimental Mechanics**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 232–244, 1985. DOI: 10.1007/BF02325092.

COX, B. N.; MARSHALL, D. B. Concepts for bridged cracks in fracture and fatigue. **Acta Metallurgica Et Materialia**, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 341–363, 1994. DOI: 10.1016/0956-7151(94)90492-8.

DEL REY CASTILLO, Enrique; ALLEN, Tom; HENRY, Richard; GRIFFITH, Michael; INGHAM, Jason. Digital image correlation (DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction FRP composites used in civil infrastructure. **Composite Structures**, [S. l.], v. 212, n. January, p. 43–57, 2019. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.01.024.

DELUCCHI, M.; BARBUCCI, A.; CERISOLA, G. Study of the physico-chemical properties of organic coatings for concrete degradation control. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 11, n. 7–8, p. 365–371, 1997. DOI: 10.1016/S0950-0618(97)00060-3.

DELUCCHI, M.; BARBUCCI, A.; CERISOLA, G. Crack-bridging ability and liquid water permeability of protective coatings for concrete. **Progress in Organic Coatings**, [S. l.], v. 33, n. 1, p. 76–82, 1998. DOI: 10.1016/S0300-9440(98)00012-5. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300944098000125>.

DELUCCHI, M.; BARBUCCI, A.; CERISOLA, G. Crack-bridging ability of organic coatings for concrete: influence of the method of concrete cracking, thickness and nature of the coating. **Progress in Organic Coatings**, [S. l.], v. 49, n. 4, p. 336–341, 2004. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2003.09.016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030094400300225X>.

DELUCCHI, M.; BARBUCCI, A.; TEMTCHENKO, T.; POGGIO, T.; CERISOLA, G. Study of the crack-bridging ability of organic coatings for concrete: analysis of the mechanical behaviour of unsupported and supported films. **Progress in Organic Coatings**, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 261–269, 2002. DOI: 10.1016/S0300-9440(02)00054-1. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300944002000541>.

DELUCCHI, M.; CERISOLA, G. Influence of thickness on mechanical properties and crack-bridging ability of coatings for concrete. **Progress in Organic Coatings**, [S. l.], v. 54, n. 4, p. 305–309, 2005. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2005.07.005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300944005001694>.

DELUCCHI, M.; CERISOLA, G. Influence of temperature on crack-bridging ability of coatings for concrete. **Progress in Organic Coatings**, [S. l.], v. 75, n. 3, p. 253–258,

2012. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2012.05.006.

DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO FÍSICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **DT.03.Coberturas**Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://www.ufmg.br/proplan/wp-content/uploads/COBERTURAS.pdf>.

EBEWELE, Roberto O. **Polymer science and technology**. 1. ed. New York: CRC Press LLC, 2000.

EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS. European Technical Approval Guidelines 033: Liquid Applied Bridge Deck Waterproofing Kits.Brussels, 2010. Disponível em: <https://www.eota.eu/en-GB/content/etags/26/>.

EUROPEAN STANDARD. 1062-7: Paints and varnishes Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete Part 7: Determination of crack bridging properties.Brussels, 2004.

FERREIRA, Jaime M. M. Numismas das Sete Maravilhas do Mundo Antigo. Lisboa, 2014.

FILHO, Firmino Soares de Siqueira. **Parâmetros para um sistema de qualidade para impermeabilização**. 2008. Universidade FUMEC, [S. l.], 2008.

FILHO, Hayrton Rodrigues do Prado. A qualidade da impermeabilização. Brasil, v. 2, n. Ed.92, 2020. Disponível em: <https://www.revistaadnormas.com.br/2020/02/04/a-qualidade-da-impermeabilizacao>.

FONSECA, Erick Flávio Luiz. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas para melhoria do desempenho de revestimentos sintéticos texturizados**. 2017. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, [S. l.], 2017. Disponível em: http://cassiopea.ipt.br/teses/2017_HAB_Erick_Fonseca.pdf.

FRANCKE, Barbara; PIEKARCZUK, Artur. Experimental Investigation of Adhesion Failure between Waterproof Coatings and Terrace Tiles under Usage Loads. **Buildings**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 59, 2020. DOI: 10.3390/buildings10030059. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/10/3/59>. Acesso em: 3 maio. 2020.

FRAZIER, Tim. **Dampproofing vs waterproofing**. 2014. Disponível em: <https://precast.org/2014/03/damp-proofing-vs-waterproofing-part-1/>. Acesso em: 30 abr. 2020.

GLASSER, Fredrik P.; MARCHAND, Jacques; SAMSON, Eric. Durability of concrete - Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 226–246, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.015.

GODOY, Eduardo Henrique Pinheiro De; BARROS, Mercia Bottura De. A avaliação de desempenho dos sistemas de impermeabilização com argamassa polimérica. In: 10º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO 1997, São Paulo. São Paulo: Instituto Brasileiro de Impermeabilização, 1997. p. 206–218.

GRASSI, Lorenzo; KOK, Joeri; GUSTAFSSON, Anna; ZHENG, Yi; VÄÄNÄNEN, Sami P.; JURVELIN, Jukka S.; ISAKSSON, Hanna. Elucidating failure mechanisms in human femurs during a fall to the side using bilateral digital image correlation. **Journal of Biomechanics**, [S. l.], v. 106, p. 109826, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109826>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929020302499>.

GRIBNIAK, Viktor; RIMKUS, Arvydas; PÉREZ CALDENTEY, Alejandro; SOKOLOV, Aleksandr. Cracking of concrete prisms reinforced with multiple bars in tension—the cover effect. **Engineering Structures**, [S. l.], v. 220, p. 110979, 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110979.

HASSAN, Ghulam Mubashar. Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, [S. l.], v. 137, n. August 2020, p. 106394, 2021. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106394. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106394>.

HELENE, Paulo. **Materiais de construção. Patologia, reabilitação e prevenção. Prefácio à edição brasileira**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2014.

HENSHELL, Justin. **The Manual of Below-grade waterproofing systems**. 1. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons., Inc, 2000.

HOLTER, Karl Gunnar. **Performance of EVA-Based membranes for SCL in hard rock** **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016. DOI: 10.1007/s00603-015-0844-5.

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO. **Legados e conquistas**. 1. ed.

São Paulo: BB Editora, 2018. a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO. **Guia de aplicação da norma de desempenho para impermeabilização: Especificação, aplicação e contratação com foco no atendimento à ABNT NBR 15575:2013.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://ibibrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/06/Guia-de-Aplicação-da-Norma-de-Desempenho-para-Impermeabilização-IBI.pdf>.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico nº72400: Ensaio de desempenho- Aptidão para dissimular uma fissura.** São Paulo. Disponível em: [http://icobit.com.br/certificacoes/aptidao para dissimular fissura.pdf](http://icobit.com.br/certificacoes/aptidao%20para%20dissimular%20fissura.pdf).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Texturas acrílicas.** 2012. Disponível em: https://www.ipt.br/ipt_na_midia/271-texturas_acrilicas.htm. Acesso em: 12 nov. 2020.

INTERNATIONAL DIGITAL IMAGE CORRELATION SOCIETY; JONES; E.M.C.; IADICOLA. **A Good Practices Guide for Digital Image Correlation** (Elizabeth Jones, Mark Iadicola, Org.). United States of America. DOI: 10.32720/idics/gpg.ed1. Disponível em: <http://idics.org/guide/>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-1: Plastics- Determination of tensile properties- Part 1: General principles Geneva, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-3: Plastics — Determination of tensile properties — Part 3: Test conditions for films and sheets Geneva, 2019.

ISSA, Camille A.; DEBS, Pauls. Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 157–163, 2007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.030.

JAEGERMANN, C.; PUTERMAN, M. The evaluation of the crack-bridging ability of exposed roof coatings. **Materials and Structures**, [S. l.], v. 20, n. 6, p. 403–407, 1987. DOI: 10.1007/BF02472490. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02472490>.

KUBAL, Michael T. **Construction Waterproofing Handbook.** 2. ed. United States. DOI: TRF2693 [pii]\r10.1111/j.1537-2995.2010.02693.x.

KURAMAN, Marinkal K.; MITALAS, Gintautas P.; BOMBERG, Mark T. **Moisture**

control in buildings. Fundamentals of transport and storage of moisture in building material and components. Philadelphia: Heinz R. Trechsel. ASTM, 1994.

LEPAGE, W. S.; SHAW, J. A.; DALY, S. H. Optimum Paint Sequence for Speckle Patterns in Digital Image Correlation. **Experimental Techniques**, [S. l.], v. 41, n. 5, p. 557–563, 2017. DOI: 10.1007/s40799-017-0192-3.

LIMA, Irene De Azevedo. A UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA PARA COMPLEMENTAR O ENSAIO. *In:* (Instituto Brasileiro de Impermeabilização, Org.) ANAIS DO 15º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo p. 1–18.

LIMA, Jorge Luiz de Aquino; PASSOS, Francisco Uchoa; COSTA, Dayana Bastos. Processo integrado de projeto, aquisição e execução de sistemas de impermeabilização em edifícios residenciais. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 59–77, 2013. DOI: 10.1590/s1678-86212013000300005.

LISTER, W. N. **Waterproofing and water-repellency.** Edited by J.L. Moilliet. Amsterdam, London, New York: Elsevier Publishing Company, 1963.

LITVAN, Gerard G. Waterproofing of parking garage structures with sealers and membranes: the Canadian experience. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 95–100, 1996. DOI: 10.1016/0950-0618(95)00061-5. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0950061895000615>.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como Materiais de Engenharia.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

MCKEEN, Laurence W. Polyolefins, Polyvinyls, and Acrylics. *In:* **Permeability Properties of Plastics and Elastomers.** [s.l.] : Elsevier, 2017. a. p. 157–207. DOI: 10.1016/B978-0-323-50859-9.00009-9. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323508599000099>. Acesso em: 21 jun. 2020.

MCKEEN, Laurence W. Introduction to Plastics and Polymers. *In:* **Permeability Properties of Plastics and Elastomers.** [s.l.] : Elsevier, 2017. b. p. 21–40. DOI: 10.1016/b978-0-323-50859-9.00002-6.

MENEZES, Maressa. Influência da umidade do substrato na aderência de Sistema de impermeabilização com manta asfáltica Aderida à maçarico. **ANAIS DO 15º**

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, [S. l.], 2018.

MENGEL, Lena; KRAUSS, Hans Werner; LOWKE, Dirk. **Water transport through cracks in plain and reinforced concrete – Influencing factors and open questions***Construction and Building Materials*Elsevier Ltd, , 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118990.

MICHAEL, A. ...; ORTEU, JJ.; SCHREIER, H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications. **Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications**, Boston, MA, n. Introduction, p. 1–321, 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-78747-3.

MICHAELS, Alans S. **Waterproofing and water-repellency. Edited by J.L. Moilliet**. Amsterdam, London, New York: Elsevier Publishing Company, 1963.

MOREIRA, Kirke Andrew Wrubel. Utilização da termografia infravermelha e escaneamento para identificação de infiltrações e vazios em elementos nas construções. *In: (Instituto Brasileiro de Impermeabilização, Org.) ANAIS DO 15º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO 2018, São Paulo. Anais [...]*. São Paulo p. 1–11.

NACIONAL ROOFING CONTRACTORS ASSOCIATION. **The NRCA Roofing Manual: Membrane Roof Systems**. Rosemont: NRCA, 2007.

NEVILLE, A. ... Propriedades do concreto. *In: BOOKMAN (org.)*. 5. ed. Porto Alegre. p. 841.

NEVILLE, A. ...; BROOKS, J. ... **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. [s.l.] : Bookman, 2013.

PETERS, W. H.; RANSON, W. F. Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis. **Optical Engineering**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 7972925, 1982. DOI: 10.1117/12.7972925.

PETRUCCI, Eladio G. ... **Materiais de Construção**. 3. ed. Rio Grande do Sul.

PICCHI, Flavio Augusto. **Impermeabilização de coberturas**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1986.

PIRONDI, Zeno. **Manual prático da impermeabilização e de isolamento térmica**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1988.

QUANJIN, Ma; REJAB, M. R. M.; HALIM, Qayyum; MERZUKI, M. N. M.; DARUS, M. A. H. Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 27, p. 757–763, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.072. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.072>.

RIBEIRO, S.; EXPOSITO, C. C. D.; RODRIGUES, J.; CARLOS, S. Projeto, adaptação, instalação e testes preliminares para um sistema de medida de energia de fratura de materiais cerâmicos pelo método da cunha. **Cerâmica**, [S. l.], v. 54, p. 418–426, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132008000400006&script=sci_abstract&tlng=pt.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; SANTOS, Cynthia Firmino Dos; OLIVEIRA, Jaquelline Barros De; ALBUQUERQUE, Larissa Kelly dos Santos; PÓVOAS, Yêda Vieira. Detecção de infiltração em áreas internas de edificações com termografia infravermelha: estudo de caso. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 329–340, 2018. DOI: 10.1590/s1678-86212018000400308.

SANTOS, Julie Anne Braun Dos; SANTOS, Felipe Pereira; MONTE, Renata. Avaliação da transferência de fissuras em sistemas de impermeabilização aderidos. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [S. l.], v. 12, n. 00 SE-Comunicações, p. e021003, 2021. DOI: 10.20396/parc.v12i00.8661114. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8661114>.

SEGURA-CASTILLO, Luis; MONTE, Renata; FIGUEIREDO, Antonio D. Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 192, p. 731–741, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.101. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.101>.

SERTILLANGES, Antonin-Gilbert. **A vida intelectual: seu espírito, suas condições, seus métodos**. 1. ed. São Paulo: É Realizações, 1965.

SICULUS, DIODORUS. **On the hanging garden, as it is called, and the other astonishing things in Babylonia (chaps. 10-13). The Library of History of Diodorus Siculus**. [s.l.] : The Loeb Classical Library, 1933. v. I Disponível em: https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Diodorus_Siculus/2A*.html#note26.

SINGH, R.; SCHRUEFER, S.; WILSON, S.; GIBMEIER, J.; VASSEN, R. Influence of coating thickness on residual stress and adhesion-strength of cold-sprayed Inconel 718 coatings. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 350, n. December 2017, p. 64–73, 2018. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.06.080. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.080>.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e Ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, Grupo A, McCRAW-HILL, 2012.

SOUZA, Julio Cesar Sabadini De. **Impermeabilização dos pisos do pavimento-tipo de edifícios: diretrizes para o projeto e sistemas empregados**. 1997. Universidade de São Paulo, [S. l.], 1997.

SRIRAVINDRARAJAH, Rasiah; TRAN, Elizebeth. **Waterproofing practices in Australia for building construction**MATEC Web of ConferencesLes UlisEDP Sciences, , 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201819501002>. Disponível em: <https://search.proquest.com/docview/2098001813?accountid=14643>.

SUTTON, M. A.; YAN, J. H.; TIWARI, V.; SCHREIER, H. W.; ORTEU, J. J. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. **Optics and Lasers in Engineering**, [S. l.], v. 46, n. 10, p. 746–757, 2008. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2008.05.005.

TEKIELI, Marcin; DE SANTIS, Stefano; DE FELICE, Gianmarco; KWIECIEN, Arkadiusz; ROSCINI, Francesca. Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing. **Composite Structures**, [S. l.], v. 160, p. 670–688, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.096.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. [s.l.] : PINI, 1998. DOI: 10.1145/2505515.2507827.

TIPPNER, Jan; PRAUS, Luděk; BRABEC, Martin; SEBERA, Václav; VOJÁČKOVÁ, Barbora; MILCH, Jaromír. Using 3D digital image correlation in an identification of defects of trees subjected to bending. **Urban Forestry & Urban Greening**, [S. l.], v. 46, p. 126513, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126513>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866718302231>.

TYE, Ronald P. **Moisture Control in building. Relevant moisture properties of building construction materials**. Philadelphia: Heinz R. Trechsel. ASTM, 1994.

UNDERSTAND BUILDING CONSTRUCTION. Waterproofing Membranes. *In: Encyclopedia of Building Construction*, [s.d.].

VAN GEMERT, Dionys; CZARNECKI, Lech; MAULTZSCH, Matthias; SCHORN, Harald; BEELDENS, Anne; ŁUKOWSKI, Paweł; KNAPEN, Elke. Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds: A report from 11th ICPIG Congress in Berlin, 2004. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 27, n. 9–10, p. 926–933, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.05.004.

VAN LOOCK, Frederik; FLECK, Norman A. Deformation and failure maps for PMMA in uniaxial tension. **Polymer**, [S. l.], v. 148, p. 259–268, 2018. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.06.027.

WALDVOGEL, Marius; ZURBRIGGEN, Roger; BERGER, Alfons; HERWEGH, Marco. The microstructural evolution of cementitious, flexible waterproofing membranes during deformation with special focus on the role of crazing. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 107, p. 103494, 2020. a. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103494. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095894651931337X>. Acesso em: 3 maio. 2020.

WALDVOGEL, Marius; ZURBRIGGEN, Roger; BERGER, Alfons; HERWEGH, Marco. Influences of temperature and opening rate of substrate cracks on the mechanical behaviour, crack-bridging ability and deformation mechanisms of one-component, cementitious, flexible waterproofing membranes. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 136, p. 106140, 2020. b. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106140. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884620301708>. Acesso em: 19 jul. 2020.

WHITESIDE, Glenn. Asphalt Cement. *In: LIM, Kyung-Sun I. B. 978-0. 8103-8952-6. I. B. 978-1. 4144-3338-7. (org.). How Products Are Made: An Illustrated Guide to Product Manufacturing*. Detroit, MI: Gale, 1996. v. 2p. 21–26. Disponível em: https://link.gale.com/apps/doc/CX2896600015/GPS?u=usp_br&sid=GPS&xid=47a86fb2.

WILLIAM D. CALLISTER, David G. Rethwisch. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach**. 5. ed. United States of America: John Wiley & Sons., Inc, 2001.

WU, Z.; MAC, M. J.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Characterisation of Microcracks and Their Influence on Transport Properties of Cementitious Materials. *[S. l.]*, p. 3–6, 2013.

YOUNG, Francis J.; MINDESS, Sidney; GRAY, Robert J.; BENTUR, Arnon. **The Science and technology of civil engineering materials**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. v. 35 DOI: 10.5860/choice.35-5678.

YU, Yuan; SUN, Tao. Polymer-modified cement waterproofing coating and cementitious capillary crystalline waterproofing materials: Mechanism and applications. *In: KEY ENGINEERING MATERIALS 2017*, p. 527–531. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.726.527. Disponível em: www.scientific.net/KEM.726.527. Acesso em: 3 maio. 2020.

**APÊNDICE A- DIMENSÕES E SEÇÃO MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA PARA
ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO, ALONGAMENTO E MÓDULO DE
ELASTICIDADE**

CP	Comprimento útil (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Seção (mm ²)
1	50,06	5,92	4,26	25,25
2	50,05	6,38	4,89	31,24
3	49,96	6,16	3,76	23,19
4	50,12	5,99	3,93	23,54
5	50,00	6,50	4,56	29,66
6	50,00	5,66	4,45	25,22
7	49,85	5,99	4,75	28,42
8	50,00	6,29	3,33	20,99
9	49,52	5,93	3,74	22,17
10	49,96	5,99	4,07	24,37
11	49,86	6,32	4,25	26,87
12	50,50	5,89	4,11	24,19
13	50,30	6,00	4,11	24,68
Média	50,01	6,08	4,17	25,37
Desvio Padrão	0,23	0,24	0,43	2,96
Erro Padrão	0,06	0,07	0,12	0,82

Tabela A.1- Dimensões e seção média dos corpos de prova de argamassa polimérica

CP	Comprimento útil (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Seção (mm ²)
1	49,36	6,23	1,03	6,44
2	49,34	6,31	0,94	5,94
3	48,65	6,06	0,91	5,48
4	48,66	5,89	0,87	5,14
5	50,00	6,09	0,85	5,19
6	50,00	6,11	0,99	6,06
7	49,91	6,15	0,99	6,08
8	49,93	6,21	0,85	5,26
9	50,06	6,33	0,85	5,35
10	50,22	6,16	0,89	5,51
11	50,59	6,43	0,89	5,71
12	49,42	6,29	0,87	5,48
13	49,16	6,27	0,94	5,86
Média	49,64	6,19	0,91	5,65
DP	0,59	0,14	0,06	0,40
Erro Padrão	0,16	0,04	0,02	0,11

Tabela A.2- Dimensões e seção dos corpos de prova de membrana acrílica

CP	Comprimento útil (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Seção (mm²)
1	50,00	6,46	4,18	27,01
2	50,00	6,22	4,17	25,93
3	50,23	6,23	4,21	26,24
4	48,75	6,26	4,16	26,08
5	50,12	6,30	4,25	26,75
6	49,47	6,18	4,06	25,10
7	50,06	6,14	4,12	25,28
8	49,66	6,26	4,13	25,85
9	49,77	6,16	4,07	25,06
10	51,12	6,15	4,27	26,28
11	49,86	6,12	4,13	25,28
12	50,62	6,39	4,15	26,53
13	50,09	6,15	4,11	25,30
Média	49,98	6,23	4,16	25,90
DP	0,56	0,10	0,06	0,65
Erro Padrão	0,15	0,03	0,02	0,18

Tabela A.3- Dimensões e seção dos corpos de prova de manta asfáltica- Eixo do estruturante no sentido Longitudinal

CP	Comprimento útil (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Seção (mm²)
1	49,74	6,39	4,53	28,91
2	49,58	6,22	4,19	26,03
3	49,77	6,28	4,17	26,22
4	49,92	6,33	4,30	27,18
5	51,10	6,34	4,42	28,02
6	51,09	6,16	4,10	25,26
7	51,28	6,21	4,18	25,99
8	49,93	6,34	4,25	26,92
9	50,03	6,18	4,01	24,77
10	50,30	6,21	4,04	25,11
11	49,90	6,31	4,04	25,51
12	50,15	6,25	4,14	25,89
13	51,20	6,16	4,02	24,73
Média	50,31	6,26	4,18	26,20
DP	0,62	0,08	0,16	1,26
Erro Padrão	0,17	0,02	0,04	0,35

Tabela A.4- Dimensões e seção dos corpos de prova de manta asfáltica- Eixo do estruturante no sentido Transversal

APÊNDICE B- RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ALONGAMENTO

Argamassa polimérica										
CP	Seção (mm ²)	P _{máx.} (N)	σ _{máx.} (MPa)	δP _{máx.} (mm)	ΔL _{Pmáx.} (%)	P _{rup.} (N)	σ _{rup.} (MPa)	δ _{rup.} (mm)	ΔL _{rup.} (%)	Retorno elástico após 24 horas (%)
1	25,25	14,55	0,58	1,44	2,87	14,11	0,56	1,50	3,00	2,11
2	31,24	16,72	0,54	2,03	4,06	13,23	0,42	2,42	4,83	3,28
3	23,19	14,67	0,63	2,89	5,78	14,05	0,61	3,12	6,25	6,16
4	23,54	15,68	0,67	3,01	6,01	14,24	0,60	3,55	7,07	7,07
5	29,66	22,34	0,75	3,29	6,59	20,27	0,68	3,94	7,88	7,88
6	25,22	14,11	0,56	2,50	4,99	12,70	0,50	3,08	6,16	4,69
7	28,42	21,39	0,75	2,31	4,63	20,24	0,71	2,73	5,47	5,15
8	20,99	12,85	0,61	2,42	4,84	12,48	0,59	2,55	5,11	5,11
9	22,17	13,95	0,63	3,30	6,66	12,41	0,56	4,28	8,64	8,03
10	24,37	17,03	0,70	1,57	3,14	15,96	0,65	1,85	3,71	3,63
11	26,87	14,20	0,53	3,75	7,52	12,95	0,48	4,38	8,79	6,36
12	24,19	12,76	0,53	3,56	7,04	9,98	0,41	4,07	8,06	8,06
13	24,68	14,64	0,59	3,56	7,08	13,67	0,55	4,26	8,47	7,83
Média	25,37	15,76	0,62	2,74	5,48	14,33	0,57	3,21	6,42	5,80
Desvio Padrão	2,96	2,99	0,08	0,76	1,52	2,96	0,09	0,96	1,92	1,99
Erro Padrão	0,82	0,83	0,02	0,21	0,42	0,82	0,03	0,27	0,53	0,55

Tabela B.1- Resultados individuais do ensaio de tração, onde P são as cargas, σ as tensões, δ deformação e ΔL os alongamentos, para os corpos de prova de argamassa polimérica

Membrana de acrilatos puros										
CP	Seção (mm ²)	P _{máx.} (N)	σ _{máx.} (MPa)	δP _{máx.} (mm)	ΔL _{Pmáx.} (%)	P _{rup.} (N)	σ _{rup.} (MPa)	δ _{rup.} (mm)	ΔL _{rup.} (%)	Retorno elástico após 24 horas (%)
1	6,44	5,56	0,86	29,66	60,09	2,92	0,45	150,66	305,22	45,87
2	5,94	4,09	0,69	38,30	77,62	2,29	0,39	141,45	286,68	45,93
3	5,48	4,75	0,87	32,30	66,40	2,29	0,42	165,32	339,82	43,88
4	5,14	4,34	0,84	28,58	58,74	2,39	0,47	139,17	286,00	37,69
5	5,19	4,93	0,95	40,56	81,12	2,70	0,52	163,17	326,34	30,00
6	6,06	5,69	0,94	36,40	72,81	2,95	0,49	180,27	360,54	48,00
7	6,08	5,56	0,92	37,92	75,97	3,21	0,53	152,84	306,23	40,25
8	5,26	4,49	0,85	37,81	75,73	2,64	0,50	160,79	322,02	42,20
9	5,35	4,97	0,93	36,72	73,35	2,67	0,50	170,29	340,18	47,82
10	5,51	4,53	0,82	30,19	60,12	2,67	0,48	132,45	263,73	33,41
11	5,71	4,56	0,80	29,88	59,07	2,42	0,42	137,36	271,51	34,41
12	5,48	4,49	0,82	29,22	59,13	2,48	0,45	125,17	253,27	33,55
13	5,86	4,71	0,80	29,78	60,58	2,70	0,46	142,12	289,09	36,29
Média	5,65	4,82	0,85	33,64	67,75	2,64	0,47	150,85	303,89	39,95
Desvio Padrão	0,40	0,50	0,07	4,34	8,49	0,27	0,04	16,30	32,55	6,12
Erro Padrão	0,11	0,14	0,02	1,20	2,36	0,08	0,01	4,52	9,03	1,70

Tabela B.2- Resultados individuais do ensaio de tração, onde P são as cargas, σ as tensões, δ deformação e ΔL os alongamentos, para os corpos de prova de membrana de acrilatos puros

Manta asfáltica- estruturante no eixo longitudinal

CP	Seção (mm ²)	P _{máx.} (N)	σ _{máx.} (MPa)	δP _{máx.} (mm)	ΔL _{Pmáx.} (%)	P _{rup.} (N)	σ _{rup.} (MPa)	δ _{rup.} (mm)	ΔL _{rup.} (%)	Retorno elástico após 24 horas (%)
1	27,01	73,15	2,71	16,38	32,76	54,18	2,01	18,93	37,86	10,00
2	25,93	61,83	2,38	14,33	28,67	48,40	1,87	16,57	33,13	16,00
3	26,24	57,81	2,20	14,79	29,44	47,36	1,80	17,21	34,25	12,28
4	26,08	65,29	2,50	15,27	31,32	48,24	1,85	17,42	35,73	20,12
5	26,75	68,50	2,56	15,63	31,19	54,30	2,03	17,60	35,11	16,62
6	25,10	68,74	2,74	14,05	28,40	51,79	2,06	17,73	35,84	20,56
7	25,28	70,51	2,79	15,40	30,77	56,44	2,23	17,59	35,13	15,24
8	25,85	69,88	2,70	16,07	32,36	52,04	2,01	19,97	40,20	21,67
9	25,06	65,73	2,62	15,59	31,32	51,91	2,07	18,85	37,88	20,17
10	26,28	67,49	2,57	15,73	30,76	54,30	2,07	17,21	33,66	13,65
11	25,28	63,47	2,51	15,23	30,54	51,41	2,03	16,81	33,71	15,50
12	26,53	54,33	2,05	14,79	29,22	51,25	1,93	17,39	34,35	14,70
13	25,30	69,25	2,74	15,88	31,70	54,05	2,14	18,03	36,00	18,95
Média	25,90	65,84	2,54	15,32	30,65	51,97	2,01	17,79	35,60	16,57
Desvio Padrão	0,65	5,33	0,22	0,68	1,36	2,72	0,12	0,95	2,02	3,53
Erro Padrão	0,18	1,48	0,06	0,19	0,38	0,75	0,03	0,26	0,56	0,98

Tabela B.3- Propriedades mecânicas obtidas na carga máxima e na carga de ruptura para corpos de prova de manta asfáltica- eixo longitudinal

Manta asfáltica- estruturante no eixo transversal

CP	Seção (mm ²)	P _{máx.} (N)	σ _{máx.} (MPa)	δP _{máx.} (mm)	ΔL _{Pmáx.} (%)	P _{rup.} (N)	σ _{rup.} (MPa)	δ _{rup.} (mm)	ΔL _{rup.} (%)	Retorno elástico após 24 horas (%)
1	28,91	49,43	1,71	12,93	25,99	3,27	0,11	18,17	36,53	19,76
2	26,03	51,51	1,98	14,12	28,47	3,05	0,12	23,38	47,15	20,27
3	26,22	53,05	2,02	11,22	22,54	2,73	0,10	16,35	32,85	19,81
4	27,18	51,94	1,91	11,13	22,30	2,99	0,11	15,88	31,81	16,95
5	28,02	55,87	1,99	12,82	25,09	3,17	0,11	17,77	34,77	15,83
6	25,26	55,56	2,20	13,88	27,17	2,89	0,11	18,10	35,42	17,03
7	25,99	49,49	1,90	13,15	25,64	3,21	0,12	20,88	40,72	20,81
8	26,92	47,29	1,76	11,02	22,06	2,86	0,11	14,61	29,27	15,28
9	24,77	56,08	2,26	15,48	30,94	2,61	0,11	20,41	40,80	18,97
10	25,11	55,46	2,21	13,18	26,20	2,92	0,12	20,92	41,60	20,18
11	25,51	49,18	1,93	11,24	22,52	2,89	0,11	21,13	42,34	22,38
12	25,89	44,78	1,73	13,05	26,02	2,80	0,11	20,10	40,07	19,08
13	24,73	52,48	2,12	12,65	24,71	2,77	0,11	19,63	38,34	19,77
Média	26,20	51,70	1,98	12,76	25,36	2,93	0,11	19,02	37,82	18,93
Desvio Padrão	1,26	3,56	0,18	1,33	2,62	0,20	0,01	2,47	4,96	2,07
Erro Padrão	0,35	0,99	0,05	0,37	0,73	0,05	0,00	0,69	1,38	0,57

Tabela 0.2- Propriedades mecânicas obtidas na carga máxima e na carga de ruptura para corpos de prova de manta asfáltica- eixo transversal

**APÊNDICE C- RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS DE PROVA DO
ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA EM PLACA DE SUBSTRATO
PADRÃO- REFERÊNCIA DE VALOR ANTES DO ENSAIO CRACK BRIDGING**

Manta Asfáltica										
Corpo de prova	diâmetro médio	Área (mm²)	Carga de ruptura (N)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrão	Erro Padrão	Forma de ruptura		
								Primer/Manta	Manta	Adesivo
1	48,06	1813,83	450,17	0,25	0,33	0,05	0,01	25,00	70,00	5,00
2	48,12	1818,36	648,50	0,36				30,00	70,00	
3	48,38	1838,58	532,50	0,29				50,00	45,00	5,00
4	48,04	1812,32	653,50	0,36				50,00	50,00	
5	47,99	1809,05	653,50	0,36				40,00	60,00	
6	47,83	1797,01	582,50	0,32				55,00	45,00	
7	48,25	1828,46	519,50	0,28				60,00	40,00	
8	48,23	1826,69	657,50	0,36				60,00	40,00	
9	47,99	1808,80	675,60	0,37				30,00	70,00	
10	47,79	1793,51	682,00	0,38				20,00	80,00	

Tabela C.1 - Resultados individuais dos corpos de prova da manta asfáltica, no ensaio de resistência de aderência

Membrana de Acrilatos Puros								
Corpo de prova	diâmetro médio	Área (mm²)	Carga de ruptura (N)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrao	Erro Padrão	Forma de ruptura
								Substrato
1	47,27	1754,69	3827,50	2,18	2,12	0,21	0,07	100,00
2	47,32	1758,65	3814,50	2,17				100,00
3	47,32	1758,90	4071,50	2,31				100,00
4	47,29	1756,42	-	-				100,00
5	47,30	1756,92	4121,50	2,35				100,00
6	47,41	1765,10	3358,00	1,90				100,00
7	47,26	1754,44	4200,00	2,39				100,00
8	47,29	1756,67	3200,00	1,82				100,00
9	47,33	1759,64	3300,00	1,88				100,00
10	47,31	1758,15	3700,00	2,10				100,00

Tabela C.2-Resultados individuais dos corpos de prova da membrana de acrilatos puros, no ensaio de resistência de aderência

Argamassa Polimérica										
Corpos de prova	d médio	Área (mm²)	Área medida em software	Carga de ruptura (N)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrao	Erro Padrão	Forma de ruptura	
									Argamassa Polimérica	Adesivo
1	47,22	1751,47	1223,94	1032,00	0,84	0,69	0,13	0,04	70,00	30,00
2	47,24	1752,46	1181,09	1096,00	0,93				80,00	20,00
3	47,27	1755,18	911,48	1032,50	0,59				60,00	40,00
4	47,26	1754,19	1058,50	1396,50	0,80				80,00	20,00
5	47,15	1746,04	1017,99	1146,00	0,66				60,00	40,00
6	47,21	1750,24	969,39	1266,00	0,72				80,00	20,00
7	47,23	1752,21	894,39	1261,50	0,72				65,00	35,00
8	47,24	1752,71	652,56	961,50	0,55				45,00	55,00
9	47,22	1751,47	812,75	987,00	0,56				50,00	50,00
10	47,37	1762,12	690,89	1007,00	0,57				55,00	45,00

Tabela C.3- Resultados individuais dos corpos de prova da argamassa polimérica, no ensaio de resistência de aderência

**APÊNDICE D- RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS DE PROVA DO
ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA - APÓS DO ENSAIO CRACK
BRIDGING**

Manta asfáltica										
Placa	Corpo de prova	diâm. méd.	Área (mm²)	Carga de ruptura (N)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrao	Erro	Forma de ruptura	
									Primer /manta	Manta
1	1	47,74	1789,76	582,00	0,33	0,34	0,05	0,03	100	
	2	47,96	1806,79	496,00	0,27				100	
2	1	47,32	1758,40	670,00	0,38	0,34	0,05	0,03	20 80	
	2	47,55	1775,54	675,00	0,38				20 80	
Membrana de Acrilatos Puros										
Placa	Corpo de prova	diâm. méd.	Área (mm²)	Carga de ruptura (N)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrao	Erro	Forma de ruptura	
									Substrato	Substrato/ primer
1	1	47,50	1771,81	4843,50	2,73	2,54	0,39	0,20	5 95	
	2	47,36	1761,38	3484,00	1,98				5 95	
2	1	47,32	1758,40	5049,50	2,87	2,54	0,39	0,20	100	
	2	47,55	1775,54	4588,00	2,58				15 85	
Argamassa Polimérica										
Placa	Corpo de prova	diâm. méd.	Área (mm²)	Carga de ruptura (N)	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrao	Erro	Forma de ruptura	
									Substrato	Argamassa Polimérica
1	1	47,51	1772,80	1719,00	0,97	1,08	0,14	0,07	100	
	2	47,45	1768,57	2029,50	1,15				100	
2	1	47,55	1775,79	2208,50	1,24	1,08	0,14	0,07	100	
	2	47,51	1773,05	1681,00	0,95				10 90	

Tabela D.1- Resultados individuais dos corpos de prova de resistência de aderência após ensaio crack bridging

APÊNDICE E- PLANILHA DE CONTROLE DE MASSA DE APLICAÇÃO DE MATERIAIS (ENSAIO CRACK BRIDGING)

Controle de massa de material aplicado						
Ensaio:	<i>Crack bridging</i>					
Material:	Membrana de acrilatos puros		Manta Asfáltica Maçarico		Argamassa polimérica	
Corpo de prova	CP01	CP02	CP01	CP02	CP01	CP02
Área da placa (m²)	0,0375	0,0375	0,0375	0,0375	0,0375	0,0375
Consumo mín.fabricante (kg/m²)	1,20	1,20	-	-	3,00	3,00
Quantidade						
Primer (g)	16,98	14,63	6,33	6,05	-	-
2 Demão M1 (g)	20,44	22,34	-	-	47,51	69,19
3 Demão M2 (g)	19,94	19,97	-	-	37,49	36,02
4 Demão M3 (g)	33,53	33,82	-	-	33,94	30,13
Total aplicado (M1+ M2+M3) (g)	73,91	76,13	6,33	6,05	118,94	135,34
Total aplicado (M1+ M2+M3) (kg/m²)	1,97	2,03	0,17	0,16	3,17	3,61
Espessura total filme seco (µ)	569,20	574,30	4.000,00	4.000,00	1.666,20	1.700,60

Tabela E.1- Planilha utilizada durante aplicação dos materiais para controle de massa e espessura