

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e  
Infraestrutura**

**Luiz Gustavo Mallmann Bianchetti**

**Design Construtal aplicado à Interação entre a Chuva Dirigida e  
as Fachadas de Edificações**

Porto Alegre  
2021

**LUIZ GUSTAVO MALLMANN BIANCHETTI**

**DESIGN CONSTRUTAL APLICADO À INTERAÇÃO ENTRE  
A CHUVA DIRIGIDA E AS FACHADAS DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia

**Prof<sup>a</sup> Angela Borges Masuero**  
Doutora pela UFRGS  
Orientadora

**Prof<sup>a</sup> Lais Zucchetti**  
Doutora pela UFRGS  
Coorientadora

Porto Alegre  
2021

**LUIZ GUSTAVO MALLMANN BIANCHETTI**

**DESIGN CONSTRUTAL APLICADO À INTERAÇÃO ENTRE  
A CHUVA DIRIGIDA E AS FACHADAS DE EDIFICAÇÕES**

Porto Alegre, dezembro de 2021

**Profª Angela Borges Masuero**  
Doutora pela UFRGS  
Orientadora

**Profª Lais Zucchetti**  
Doutora pela UFRGS  
Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha (UFRGS)**  
Doutor pela Duke University

**Profª Flávia Schwarz Franceschini Zinani (UNISINOS)**  
Doutora pela UFRGS

**Profª Dóris Zechmeister Bragança Weinmann (UFRGS)**  
Doutora pela UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço às minhas orientadoras, professoras Angela Borges Masuero e Lais Zucchetti pelo apoio e amizade de sempre, desde antes do mestrado, por não me deixarem desistir, apesar das dificuldades impostas pela pandemia e pela vida. Guardo muita admiração e carinho por vocês. Carrego comigo todos os ensinamentos que vocês dividiram comigo.

Agradeço ao professor Luiz Alberto Rocha e à professora Dóris Weinmann por me ajudarem a dar os “primeiros” passos na compreensão da Lei Construtal e do Método do Design Construtal. Sem esse apoio inicial o restante da jornada teria sido bem mais difícil.

Agradeço aos meus colegas de mestrado pelos momentos que dividimos no ano de 2019, Aline Z., Jéssica B., José N., Marcelo M., Thainá,D., Thais Silva e Vanessa P. Infelizmente a pandemia afastou a todos, mas guardo com grande carinho essas lembranças.

Agradeço aos demais colegas, professores e funcionários do Lamtac/Norie, todos foram importantes na minha caminhada.

Agradeço à minha mãe Regina, ao meu pai Sextilio e à minha irmã Priscila. Vocês sempre me apoiaram e foram fonte de motivação para que eu pudesse concluir esta etapa.

Agradeço especialmente à Sarah Longhi Kunzler, que me acompanhou de perto nessa jornada. Foi minha companheira, meu porto seguro, meu refúgio, minha inspiração e fonte de ânimo. Obrigado!

Agradeço aos demais amigos que me acompanharam e peço desculpa pelas minhas ausências neste período.

Ser como o rio que deflui  
Silencioso dentro da noite.  
Não temer as trevas da noite.  
Se há estrelas nos céus, refleti-las.  
E se os céus se pejam de nuvens,  
Como o rio as nuvens são água,  
Refleti-las também sem mágoa  
Nas profundidades tranquilas.

*(O Rio, Manuel Bandeira)*

## RESUMO

BIANCHETTI, L. G. M. **Design Construtal aplicado à Interação entre a Chuva Dirigida e as Fachadas de Edificações**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

A degradação de todos os sistemas da edificação tem direta relação, entre outros, com a exposição à umidade, que no caso das vedações externas têm sua principal origem na água das chuvas. Por este motivo, a chuva dirigida (associação da chuva com o vento) é um dos objetos centrais dos estudos relacionados à durabilidade das fachadas. A interação entre a água da chuva e as fachadas ocorre de diversas maneiras e é influenciada por diferentes fatores, como a velocidade do vento associada à chuva, as dimensões das gotas, as condições climáticas no momento da interação, a geometria do volume da edificação, a composição de detalhes incorporados ao revestimento e também as propriedades do revestimento (entre outros fatores). Na tentativa de ampliar os conhecimentos sobre a interação entre a chuva dirigida e os paramentos das fachadas, diversos autores têm realizado trabalhos de análise do estado de conservação de edificações existentes, experimentos em laboratório de detalhes submetidos à simulação de chuva dirigida, simulação de chuva dirigida em escala, entre outros. A Lei Construtal é um princípio que rege a evolução da estrutura de sistemas de escoamento na natureza. A partir dessa lei, foi concebido o Método do Design Construtal (MDC), o qual possibilita prever a evolução da configuração geométrica de várias estruturas na natureza em uma escala curta de tempo de maneira a facilitar o acesso ao escoamento que a percorre. Na engenharia, a aplicação do MDC permite a busca por *designs* que melhorem o desempenho dos sistemas, para isso é necessário identificar alguns elementos importantes para aplicação do método: definição do sistema de escoamento, o escoamento, os indicadores de desempenho, as restrições, os parâmetros do escoamento e os graus de liberdade. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do MDC à análise da interação entre a chuva dirigida e as fachadas, propondo o desenvolvimento de experimentos alinhados à proposta do MDC e permitindo a comparação e proposição de melhorias na geometria das estruturas de escoamento de fachadas. Foram propostas três escalas diferentes de análise: a escala maior, para analisar a interação da chuva dirigida com fachadas completas; a escala intermediária, para analisar a interação com detalhes construtivos, como frisos, peitoris e molduras; e uma escala menor, para analisar a interação do escoamento com as propriedades dos revestimentos. Foi possível identificar na literatura os elementos necessários à aplicação do MDC na análise da interação da chuva dirigida e fachadas. Através da aplicação de restrições foi possível obter novas conclusões sobre resultados de experimentos já realizados. Também, foi possível propor melhorias geométricas para volumes de fachadas e peitoris de janelas, indicando que o MDC apresenta grande potencial de aplicação à análise da interação da chuva dirigida com as fachadas das edificações.

**Palavras-chave:** Chuva dirigida; Método do *Design Construtal*; Fachadas de Edificações; Desempenho de SVVE.

## ABSTRACT

BIANCHETTI, L. G. M. **Constructal Design Applied to the Interaction between Wind Driven Rain and Building Facades**. 2021. - Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

The degradation of all building systems is directly related, among others, to exposure to moisture, which in the case of external fences has its main origin in rainwater. For this reason, wind-driven rain (the association between rain and wind) is one of the central objects of studies related to the durability of facades. The interaction between rainwater and facades occurs in different ways and is influenced by different factors, such as the wind speed associated with the rain, the droplet dimensions, the weather conditions at the time of interaction, the geometry of the building volume, the composition of details incorporated into the coating and also the coating properties (among other factors). In attempt to expand the knowledge about the interaction between wind-driven rain and the façades, several authors have carried out works analyzing the state of conservation of existing buildings, experiments in the laboratory of details submitted to wind-driven rain simulation, wind-driven rain simulation in scale, among others. The Constructal Law is a principle that governs the evolution of the structure of flow systems in nature. From this law, the Constructal Design Method (CDM) was conceived, which makes it possible to predict the evolution of the geometric configuration of various structures in nature on a short time scale in order to facilitate access to the flow that runs through it. In engineering, the application of the MDC allows the search for designs that improve the performance of the systems, for this it is necessary to identify some important elements for the application of the method: definition of the flow system, the flow, the objective function, the constraints, the flow parameters and degrees of freedom. This work aimed to evaluate the applicability of the MDC to the analysis of the interaction between the wind-driven rain and the facades, proposing the development of experiments aligned with the MDC proposal and allowing the comparison and proposition of improvements in the geometry of the facade flow structures. Three different scales of analysis were proposed: the largest scale, to analyze the interaction between the wind-driven rain and the entire facades; the intermediate scale, to analyze the interaction with constructive details, such as joints, window sills and moldings; and a smaller scale, to analyze the interaction of the flow with the properties of the coatings. It was possible to identify in the literature all the elements necessary for the application of MDC to the analysis of the interaction between wind-driven rain and facades. Through the application of constraints, it was possible to obtain new conclusions about the results of experiments already carried out. Also, it was possible to propose geometric improvements for volumes of facades and window sills, indicating that the MDC has great potential for application to the analysis of the interaction between wind-driven rain and building facades.

**Key words:** Wind driven rain; Constructal Design; Building Facades, Facades Performance

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Degradação das edificações nos ambientes urbanos .....	14
Figura 2 - Detalhes de parte da fachada do Theatro São Pedro, em Porto Alegre, RS .....	17
Figura 3 – (a) Frisos delimitando áreas de um revestimento em uma edificação contemporânea. (b) Molduras em um pano de uma fachada de uma edificação contemporânea .....	17
Figura 4 – Exemplo de arquiteturas de escoamento de um ponto para uma área ou volume em folhas e árvores .....	24
Figura 5 – Pulmão humano com suas bifurcações é uma estrutura aprimorada para o transporte de oxigênio e dióxido de carbono .....	25
Figura 6 - Rede postulada de estrutura ramificada de resfriadores .....	27
Figura 7 – Esquema de funcionamento de um sistema CAO .....	28
Figura 8 - Distribuição de tensões em placas com mesma relação entre área de aberturas e área da placa .....	28
Figura 9 – Detalhe de deposição não uniforme de sujeira em muro .....	34
Figura 10 – Fantômes: visualização dos blocos da alvenaria e a estrutura através do revestimento da fachada .....	35
Figura 11 – Perfil de velocidade e escoamento do vento sobre edificação isolada .....	38
Figura 12 – Escoamento de ar no entorno de uma edificação consideravelmente mais alta que seu entorno. ....	38
Figura 13 – Mapa das isopletas para a velocidade básica do vento no Brasil .....	39
Figura 14 – Efeito da rugosidade do terreno na velocidade do vento. ....	40
Figura 15 – Efeito da rugosidade do terreno na alteração da turbulência junto à superfície. ....	41
Figura 16 – Pressão na fachada com o vento incidindo 0° .....	41
Figura 17 – Efeito abrigo.....	43
Figura 18 – Efeito barreira .....	43
Figura 19 – Efeito Venturi.....	44
Figura 20 – Efeito abertura.....	44
Figura 21 – Efeito canal ou corredor .....	45
Figura 22 - Medidores de pressão instalados na edificação central .....	45
Figura 23 – Ação da chuva, sem vento.....	48
Figura 24 – Chuva dirigida sobre edificações .....	50
Figura 25 – Mapa do índice de chuva dirigida médio para o período entre 2000 e 2010 .....	52
Figura 26 – Mapa do ICDA mínimo (a) e máximo (b) para o período entre 2000 e 2010 .....	53
Figura 27 – Parábola de chuva dirigida.....	53
Figura 28 - Condições de exposição conforme as regiões brasileiras.....	54
Figura 29 – Molhamento em edificação situada em região com entorno com mesma altura .....	56
Figura 30 – Molhamento em edificação situada em região com entorno com metade da altura .....	56
Figura 31 – Molhamento em edificação isolada.....	57
Figura 32 - Modelo exposto à chuva dirigida com vento de velocidade elevada .....	57
Figura 33 – Comportamento da gota de chuva após o impacto sobre a superfície .....	59
Figura 34 - Fases de interação de água nas fachadas.....	60
Figura 35 – Tipos de infiltração em paredes – Infiltração de água por gravidade associada à capilaridade e pressão do vento (a). Infiltração de água através de meio poroso associada à capilaridade e à ação da pressão do vento (b). Água da chuva sob ação do vento em junta defeituosa (c).....	61
Figura 36 - Sistema de fachada com redundâncias para realizar a proteção dos ambientes internos .....	62
Figura 37 – Formatos de torres avaliados no trabalho de Poyastro (2011).....	63
Figura 38 – Quadro esquemático das edificações e entornos analisados.....	64
Figura 39 – Etapas do processo de quantificação de áreas molhadas.....	64
Figura 40 – Percentual de áreas afetadas pelo molhamento dos modelos avaliados .....	65
Figura 41 – Geometria do arranjo do modelo de edificações cúbicas para medições de campo de chuva dirigida .....	65
Figura 42 – Posicionamento dos anemômetros ultrassônicos e dos medidores de chuva dirigida .....	66
Figura 43 - Intensidade da chuva dirigida com uma precipitação de intensidade de 48,8 mm/h e velocidade do vento de 0,8 m/s.....	67
Figura 44 – Modelo utilizado nos experimentos. ....	67
Figura 45 - Lavados sujos e limpos .....	69
Figura 46 – Escoamentos concentrados pelos canais contínuos .....	70
Figura 47 – Seções verticais de Planos contínuos .....	71
Figura 48 – Escoamentos de água sobre a fachada de edifícios .....	71
Figura 49 – Escoamentos dispersos em forma de gotejamento pela descontinuidade.....	72
Figura 50 – Escoamentos canalizados dispersos em superfícies planas .....	72
Figura 51 – Concentração de escoamento plano .....	72



Figura 52 - Diagramas de escoamento de água para molduras com diferentes dimensões .....	74
Figura 53 – Molduras de acabamento reto e concavo .....	75
Figura 54 - Molduras horizontais que possibilitam o descolamento da água escorrida.....	75
Figura 55 – Região no topo da fachada não apresenta detalhes construtivos para proteger o topo da exposição à chuva dirigida, enquanto a presença de elemento saliente protege a porção do revestimento imediatamente abaixo .....	76
Figura 56 – Formas que proporcionam proteção contra a água da chuva.....	77
Figura 57 - Dois diferentes tipos de elementos protetores que abrigam superfícies inferiores.....	77
Figura 58 – Esquema de coroamento para muros e paredes .....	78
Figura 59 - Escorrimento em esquadria sem peitoril.....	79
Figura 60 - Aspecto visual da evolução do molhamento com chuva colorida na Parede sem peitoril; .....	80
Figura 61 - Escorrimento em esquadria com peitoril .....	80
Figura 62 - (a) Escoamento contínuo de escorrimento na saliência; (b) concentração do escoamento na extremidade da saliência.....	81
Figura 63 – Diagrama de Escoamento de água – peitoril engastado e sem engaste .....	81
Figura 64 - Trajetória do escoamento de água em peitoris sem engastamento e com engastamento .....	82
Figura 65 – Indução do escoamento de água a partir do uso de saliências em peitoris (a); escoamento dividido sobre peitoril sem saliências (b). .....	82
Figura 66 – Possível solução para o problema de manchamento nos peitoris de janelas (esquerda): introdução de elementos de condução e gotejamento da água .....	83
Figura 67 – Aspecto visual da evolução do molhamento com chuva colorida na Parede com peitoril sem engaste lateral;.....	84
Figura 68 – Aspecto visual da evolução do molhamento com chuva colorida na Parede com peitoril com engaste lateral;.....	84
Figura 69 – Efeito do formato do lacrimal sobre o escoamento de água dos peitoris .....	85
Figura 70 – Quantidade de água coletada ao longo dos ciclos da chuva dirigida nos modelos testados .....	86
Figura 71 – Área protegida do molhamento das paredes analisadas .....	86
Figura 72 – Escoamento de água no sentido transversal dos peitoris com (a) $p=5,0$ cm e $i=6\%$ e (b) $p=12,0$ cm e $i=20\%$ .....	87
Figura 73– Efeito de reentrâncias na amenização dos efeitos de manchamento nos revestimentos .....	88
Figura 74 – Reentrâncias utilizadas em fachadas com efeito lavado abundante .....	88
Figura 75 –Juntas abertas e os diferentes mecanismos de penetração de água por capilaridade e gravidade.....	89
Figura 76 –Juntas abertas e os diferentes mecanismos de penetração de água por tensão superficial e energia cinética (momentum).....	89
Figura 77 – Penetração da água da chuva em revestimentos aderidos pelos mecanismos de (a) energia cinética da chuva, (b) sucção capilar (b), gravidade (c), corrente de ar (d), pressão do vento e capilaridade e (f) pressão do vento isolada.....	91
Figura 78 – Trajetórias do escoamento em superfície com juntas desalinhadas.....	92
Figura 79 – Escoamento sobre uma superfície com juntas desalinhadas .....	92
Figura 80 – (a) Textura muito lisa, sem rugosidade. (b) Textura em que as rugosidades apresentam dimensões menores que as partículas. (c) Textura em que as dimensões da rugosidade são da mesma ordem de grandeza que as partículas. ....	95
Figura 81 - Ângulo de contato de molhamento .....	97
Figura 82 - Diagrama de Tensão superficial.....	97
Figura 83 – Os três níveis de construtos avaliados através do MDC: 1. Fachadas e seus volumes; 2.a Perfis Salientes; 2.b Perfis reentrantes; 3. Propriedades da superfície.....	99
Figura 84 - Metodologia do trabalho .....	101
Figura 85 – Sistema de escoamento genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e a volumetria da edificação .....	103
Figura 86 – Sistema de Escoamento Genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e áreas de fachada com detalhes em perfis salientes .....	104
Figura 87 – Sistema de Escoamento Genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e áreas de fachada com detalhes em perfis salientes .....	105
Figura 88 – Sistema de Escoamento Genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e a superfície da fachada da edificação .....	106
Figura 89 – Duas edificações com arranjos diferentes de geometria restritos às imposições do MDC.....	108
Figura 90 – (a) Estrutura de escoamento com perfil saliente genérico destacado em vermelho. (b) Exemplo de perfil saliente: moldura com pingadeira sobre uma janela. ....	109
Figura 91 – (a) Estrutura de escoamento com perfil reentrante genérico destacado em vermelho. (b) Exemplo de perfil reentrante em fachada: frisos. ....	110

Figura 92 - Arranjos de Volumetria da Fachada sem alterar o volume global da edificação. Volumes salientes: azul e laranja; Volumes reentrantes: verde e amarelo. (a) Edificação 1; (b) Edificação 2 .....	112
Figura 93 – Arranjos de volumetria de fachada sem alterar a altura da edificação. (a) Edificação 1; (b) Edificação 2.....	113
Figura 94 - Arranjos de volumetria de fachada sem alterar a largura da edificação. (a) Edificação 1; (b) Edificação 2.....	114
Figura 95 – Diferentes configurações de projeções.....	117
Figura 96 – Estruturas de escoamento com diferentes quantidades de saliências, mantendo o volume constante .....	118
Figura 97 – Variações da seção transversal com a manutenção do volume da saliência constante. (a) perfil saliente 1; (b) perfil saliente 2 com mais graus de liberdade acrescentados, como inclinação e lacrimal .....	118
Figura 98 – Condições diferentes de exposição devido à localização na fachada. Área vermelha: alta exposição; Área amarela: exposição intermediária; Área verde: exposição protegida. ....	119
Figura 99 – Estruturas de escoamento com variação geométrica de perfil reentrante. (a) perfil referência; (b) perfil proposto com manutenção do volume .....	120
Figura 100 - Estruturas de escoamento com diferentes quantidades de reentrâncias. (a) perfil referência; (b) perfil proposto cuja a soma dos volumes mantém igual volume.....	121
Figura 101 – Formatos de torres avaliados no trabalho de Poyastro (2011) com medidas em cm. ....	127
Figura 102 – (a) Altura das edificações vizinhas em cm. (b) Disposição das edificações de entorno .....	128
Figura 103 – Influência do formato da edificação no percentual de áreas afetadas pelo molhamento.....	129
Figura 104 - Situação hipotética - Volumes das estruturas de escoamento iguais.....	130
Figura 105 - Planta baixa indicando área de potencial concentração de pressão de vento .....	133
Figura 106 – Primeira proposta de melhoria da estrutura de escoamento de fachadas.....	134
Figura 107 – Primeira proposta de melhoria volumétrica/de orientação das fachadas da edificação (dimensões em cm).....	134
Figura 108 – (a)Vista e corte da parede padrão dos modelos ensaiados (dimensões em metros).....	136
Figura 109 – Normalização das dimensões de largura e projeção do peitoril em relação à altura da janela .....	138
Figura 110 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 1 ao longo tempo.....	140
Figura 111 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 2 ao longo tempo.....	141
Figura 112 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 3 ao longo tempo.....	142
Figura 113 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 4 ao longo tempo.....	142
Figura 114 - Proposta inicial de aprimoramento na geometria de peitoris sem engastamento lateral .....	143
Figura 115 - Melhoria do arranjo geométrico do peitoril, com redução da espessura e criação de engastes laterais, mantendo o volume da peça constante .....	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de agressividade de chuva dirigida.....	51
Tabela 2 – Condições de ensaio de estanqueidade à água de SVVE.....	55
Quadro 3 – Resumo das Estruturas de escoamento.....	126
Tabela 4 – Volumes globais dos modelos analisados por Poyastro (2011).....	128
Tabela 5 – Dimensões normalizadas dos modelos pela altura das edificações.....	131
Tabela 6 – Aplicação das dimensões dos modelos de Poyastro (2011) para obter o parâmetro $\emptyset$ .....	132
Tabela 7 – Configuração geométrica dos peitoris avaliados. ....	137
Tabela 8 – Dimensões de largura ( $LP$ ) e projeção ( $P$ ) do peitoril normalizada pela largura da janela ( $LJ$ ) .....	138
Tabela 9 – Desempenho dos modelos quanto a área protegida em $m^2$ .....	139
Tabela 10 – Desempenho dos modelos quanto a quantidade de água coletada em (g).....	139
Tabela 11 – Aprimoramento das estruturas de escoamento 1 e 2 através da redução da espessura das peças e criação dos engastes laterais.....	144
Tabela 12 – Melhoria das estruturas de escoamento 3 e 4 através da redução da espessura das peças e criação dos engastes laterais.....	145

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

EE: Escola de Engenharia

MDC: Método do *Design Construtal*

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Construção

PPGCI: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

RMS: *Root mean square*

SVVE: Sistema de Vedação Vertical Externa

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA .....	15
1.2	QUESTÕES DE PESQUISA.....	18
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	19
1.4	LIMITAÇÕES.....	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2</b>	<b>LEI <i>CONSTRUTAL</i> DO <i>DESIGN</i> E EVOLUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	22
2.2	MÉTODO DO <i>DESIGN CONSTRUTAL</i> .....	23
2.2.1	Sistemas de escoamento .....	23
2.2.2	Objetivo e Indicadores de desempenho.....	26
2.2.3	Restrições .....	29
2.2.4	Graus de liberdade.....	30
<b>3</b>	<b>AS FACHADAS DE EDIFICAÇÕES E SUAS INTERAÇÕES</b> .....	<b>31</b>
3.1	FATORES EXTRÍNSECOS.....	33
3.1.1	Contaminantes atmosféricos .....	33
3.1.2	Temperatura ambiente .....	36
3.1.3	Vento .....	37
3.1.4	Fontes de umidade .....	46
3.1.4.1	Umidade relativa do ar.....	46
3.1.4.2	Chuva dirigida.....	48
3.1.4.3	Escorrimento da chuva pela superfície das fachadas.....	58
3.2	FATORES INTRÍNSECOS .....	61
3.2.1	Geometria das fachadas.....	61
3.2.1.1	Volumetria e formas das Fachadas .....	62
3.2.1.2	Detalhes incorporados de Fachadas .....	68
3.2.1.2.1	Elementos salientes horizontais .....	73
3.2.1.2.2	Elementos reentrantes horizontais .....	87
3.2.2	Características de revestimento.....	93
3.2.2.1	Porosidade.....	93
3.2.2.2	Textura .....	94

3.2.2.3	Ângulo de contato de molhamento .....	96
<b>4</b>	<b>MDC E A INTERAÇÃO ENTRE CHUVA DIRIGIDA E FACHADAS</b>	<b>98</b>
4.1	SISTEMAS DE ESCOAMENTO GENÉRICOS .....	102
4.1.1	Fachadas da edificação e seus volumes .....	102
4.1.2	Detalhes incorporados .....	103
4.1.3	Propriedades da Superfície .....	105
4.1.4	Indicadores de Desempenho.....	106
4.1.4.1	Área molhada (%):.....	106
4.1.4.2	Quantidade de água coletada (l): .....	107
4.1.5	Graus de Liberdade .....	107
4.1.5.1	Volumetria da fachada .....	107
4.1.5.2	Geometria do perfil saliente.....	108
4.1.5.3	Geometria do perfil reentrante .....	109
4.1.5.4	Propriedades dos materiais de revestimento como uma variável .....	110
4.1.6	Restrições .....	111
4.1.6.1	Restrição Global do Volume da edificação .....	111
4.1.6.2	Restrição Local de Altura das fachadas .....	112
4.1.6.3	Restrição Local de Largura da fachada analisada.....	113
4.1.6.4	Restrição Local das Propriedades dos materiais do revestimento .....	114
4.1.6.5	Restrição Global do Volume global dos perfis salientes: .....	115
4.1.6.6	Restrição Local da Posição da área analisada na fachada.....	119
4.1.6.7	Restrição Global do Volume dos perfis reentrantes .....	120
4.1.7	Parâmetros Constantes .....	121
4.1.7.1	Velocidade do vento .....	121
4.1.7.2	Vazão de água.....	122
4.1.7.3	Dimensão das gotas de chuva .....	123
4.1.7.4	Ângulo de incidência do vento .....	123
4.1.7.5	Temperatura ambiente .....	123
4.1.7.6	Umidade relativa.....	123
4.1.7.7	Entorno da edificação .....	124
4.1.7.8	Contaminantes atmosféricos .....	124
4.1.7.9	Duração do ensaio/chuva .....	125
4.1.8	Resumo dos Sistemas de escoamento propostos .....	125
4.1.9	Aplicação do MDC na Análise de um Sistema de escoamento de Fachadas e seus volumes .....	127

<b>4.1.10</b>	<b>Aplicação do MDC na Análise de um Sistema de Escoamento de Perfil</b>	
<b>Saliente</b>	<b>135</b>	
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>146</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>149</b>





## 1 INTRODUÇÃO

Três condições devem ser satisfeitas em toda a obra de arquitetura, *firmitas*, *utilitas* e *venustas*, conforme discutido pelo arquiteto romano Vitruvius (primeiro século a.C.) em sua obra *De Architectura*. Vitruvius trata de aspectos de: *firmitas* (solidez, integridade), abordando temas ligados à solidez, como a execução correta de elementos estruturais e a escolha cuidadosa dos materiais; *utilitas* (habitabilidade, utilidade), abordando a ocorrência de falhas nos projetos e as condições de circulação e uso através da disposição dos cômodos; e *venustas* (estética, atratividade), abordando a aparência, a elegância, as proporções e a observação da simetria (VITRUVIUS, 1999<sup>1</sup>; MANENTI, 2014).

Ao longo do tempo, os valores apresentados por Vitruvius foram discutidos e avaliados por diversos autores e, mais recentemente, estão associados aos efeitos que a arquitetura (e seu produto, as edificações) representa para as pessoas, podendo ser traçado um paralelo às categorias criadas por Abraham Maslow para a teoria da hierarquia das necessidades, bastante difundida pela pirâmide de Maslow (HERSHBERGER, 1999). Na base desta pirâmide, se concentram as necessidades mais básicas à existência humana, que são as fisiológicas; quando estas necessidades são satisfeitas, outras, de diferentes complexidades, podem ser atendidas, como a segurança, o pertencimento, a autoestima e a autorrealização. Uma habitação pode inclusive satisfazer as necessidades de hierarquia mais elevada quando apresenta qualidade e atende as necessidades do usuário; ao mesmo passo que uma habitação sem as condições adequadas pode afetar inclusive as necessidades mais básicas, como a segurança e o atendimento das necessidades fisiológicas.

Mesmo com pouco tempo de uso, é comum que algumas fachadas apresentem suas aparências deterioradas (Figura 1), principalmente nos centros urbanos, não deixando de serem percebidas

---

<sup>1</sup>Manenti (2014) apresenta alguns trechos traduzidos da obra de Vitruvius, nesse caso especificamente: VITRUVIUS. **Ten architecture books**. Traduzido por Ingrid D. Rowland e Comentado e Ilustrado por Thomas N. Howe. New York: Cambridge University Press, 1999.

pelos observadores interessados na conservação da paisagem urbana como parte de seu ambiente vital (PETRUCCI, 2000).

Figura 1 – Degradação das edificações nos ambientes urbanos



(fonte: autor, 2021)

Os sistemas de vedações verticais externas (SVVE) apresentam grande relevância na relação entre as necessidades dos indivíduos e as condições que as edificações devem satisfazer, o que é representado pelo estabelecimento de requisitos de desempenho de sustentabilidade, de segurança e habitabilidade apresentados pela NBR 15.575 (ABNT, 2021). Caso os SVVE, que são a envoltória protetora da edificação, não atendam mais a alguma dessas funções, seja pela degradação da estética, pela perda da sensação de segurança ou pelo aumento da insalubridade do ambiente construído, há a possibilidade de isso causar algum grau de insatisfação aos usuários.

O revestimento das fachadas (juntamente com as vedações e esquadrias) faz parte do SVVE, complementando as funções deste sistema (RIBEIRO, 2006). Nesse sentido, é importante considerar que o desempenho individual de cada parte da edificação impacta no desempenho como um todo (BAÍA; SABBATINI, 2002).

## 1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

As fachadas definem a aparência arquitetônica da edificação (KNAACK *et al.*, 2007), cumprem um papel fundamental na expressão volumétrica da edificação (BRAGA, 2010) e apresentam função preponderante na configuração das paisagens e espaços urbanos (PETRUCCI, 2000).

Em levantamento realizado por Bazzan (2019), com dados de assistência técnica de uma construtora, foi constatado que 5,18% das reclamações feitas pelos usuários estavam relacionadas a problemas nas vedações verticais externas. Entre alguns dos defeitos mais citados pelos usuários estão as infiltrações, fissuras e descolamentos nas áreas de revestimentos externos.

Problemas relacionados à penetração de umidade em fachadas estão intimamente ligados à ação da água sobre os revestimentos, comumente associados às precipitações. Entretanto, esse tipo de fenômeno pode ser mais bem compreendido quando denominado chuva dirigida, que é a ação composta da chuva e dos ventos. O estudo do fenômeno da chuva dirigida sobre revestimentos contribui na explicação do porquê de determinadas fachadas apresentarem uma maior quantidade de manifestações patológicas quando comparadas a outras, incluindo fachadas em uma mesma edificação. De maneira geral, estudos têm contribuído para um melhor entendimento da interação entre a chuva dirigida e as edificações e seus detalhes construtivos (ZUCCHETTI, 2016).

Os detalhes arquitetônicos e construtivos da fachada são importantes para promover a proteção necessária dos revestimentos da fachada (e das estruturas de concreto também) e para atender a variados tipos de solicitações, devendo ser considerados no projeto de revestimentos (MACIEL; MELHADO, 1997). Em comparação aos edifícios “tradicionais”, caracterizados pela presença de beirais largos e de outros detalhes construtivos nas fachadas, nas edificações atuais esses elementos tendem a ser considerados apenas como decorativos. Os edifícios tradicionais, entretanto, frequentemente são caracterizados por envelhecerem de maneira mais “graciosa” (ROBINSON; BAKER, 1975). Contudo, os autores não sugerem que os projetistas devam aplicar novamente todos os tipos de ornamentos, mas que alguns detalhes tradicionais devem ser reconhecidos por desempenhar uma melhoria na durabilidade das fachadas.

O conjunto de detalhes arquitetônicos utilizado em fachadas de edifícios de características neoclássicas e ecléticas, como frisos, molduras e cimalkas apresenta função técnica de minimizar a concentração de água das chuvas e, em alguns casos, de descolar a lâmina de água

que se forma sobre a superfície da fachada. Dessa maneira os detalhes apresentam não somente uma função estética, o que contribui para que esse tipo de edificação, apesar de degradada quando não submetida a ações de manutenção periódicas e/ou adequadas, ainda se encontre em estado satisfatório de conservação (VIEIRA, 2005). Sob essa perspectiva, a autora sugere que podem ser elaborados estudos relativos à releitura de técnicas clássicas e processos construtivos dos detalhes arquitetônicos de fachadas, de modo a adaptar os mesmos à linguagem atual de projeto e à dinâmica de execução das obras, o que corrobora com a afirmação de Robinson e Baker (1975) de que para diminuir a ocorrência de infiltrações, dos manchamentos e da deterioração de maneira geral dos elementos em uma edificação, é necessário fazer o controle do escoamento de água nas fachadas.

Poyastro (2011) demonstra, em ensaio de túnel de vento, que diferenças na configuração geométrica da edificação (volumetria) e que o entorno em que a edificação está inserida alteram as condições de molhamento quando esta sofre ação da chuva dirigida. Em uma escala de dimensões menor, Zucchetti (2016) avalia que diferentes configurações geométricas de peitoris apresentam desempenhos diferentes quando submetidos à ação da chuva dirigida e menciona que detalhes incorporados de fachadas não devem só ser especificados quanto à estética, mas também quanto ao desempenho. Ambos os trabalhos reforçam a afirmação feita por Petrucci (2000) de que as decisões feitas em projeto afetam o desempenho e a durabilidade das fachadas, inclusive fazendo com que estas possam passar por condições de degradação aceleradas.

A arquitetura das fachadas em períodos mais antigos priorizava a riqueza de detalhes construtivos, ao passo que com a evolução os mesmos foram sendo abandonados, chegando ao contexto atual em que muitas vezes os detalhes são bastante suprimidos (PETRUCCI, 2000). A diferença da quantidade de detalhes que ornem as edificações consideradas clássicas e as edificações contemporâneas pode ser feita a partir da comparação entre a Figura 2 e a Figura 3 (a) e (b). Enquanto a edificação da Figura 2 apresenta grande riqueza nos detalhes que ornem a fachada, a Figura 3 (a) e (b) representa a simplificação formal de muitas edificações contemporâneas.

Figura 2 - Detalhes de parte da fachada do Theatro São Pedro, em Porto Alegre, RS



(fonte: autor)

Figura 3 – (a) Frisos delimitando áreas de um revestimento em uma edificação contemporânea. (b) Molduras em um pano de uma fachada de uma edificação contemporânea



(a)

(b)

(fonte: autor)

Embora o despojamento formal seja evidente em boa parte das edificações contemporâneas, com a introdução da NBR 15.575 no ano de 2013, há uma tendência de que ocorra uma evolução na compreensão dos critérios de atendimento dos requisitos de desempenho dos SVVE para novos projetos, os quais tendem seguir o caminho da preocupação com a correta concepção dos detalhes de projeto, das etapas de execução e de manutenção das fachadas. Sob essa perspectiva, os detalhes arquitetônicos podem representar uma melhoria de desempenho em alguns

requisitos específicos para os SVVE, mais evidentemente os requisitos de estanqueidade e durabilidade.

O Método do Design Construtal (MDC) possibilita a melhoria de produtos através da aplicação de conceitos derivados da Lei Construtal. Segundo esta lei, sistemas de escoamento finitos, vivos e que têm liberdade para se modificar, evoluem com o passar do tempo de maneira a desenvolver configurações melhores, que vão atender aos objetivos do sistema (BEJAN; ZANE, 2012). Na natureza, há diversos exemplos de sistemas de escoamento que estão em constante evolução, de modo a desenvolver configurações melhores, como no caso das bacias hidrográficas dos rios e dos sistemas que compõe a anatomia dos animais e também das plantas (BEJAN, 1996).

Para a aplicação do MDC é necessário a identificação de alguns elementos essenciais: o sistema de escoamento, os indicadores de desempenho, os graus de liberdade e as restrições do sistema (GOMES, 2014, HELBIG *et al.*, 2016). A partir da definição destes elementos é possível entender quais são as estruturas do sistema que podem ter suas dimensões variadas para se obter uma melhoria de desempenho, quais são as restrições que devem ser aplicadas e quais indicadores são importantes de serem avaliados.

Para o estudo da interação entre a chuva dirigida e as fachadas das edificações é possível realizar a análise do MDC em três escalas distintas, sendo a primeira o volume global da edificação, a escala intermediária considerando os detalhes construtivos de fachada e uma última escala considerando as propriedades da superfície do revestimento da fachada.

## 1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

Com base no apresentado, foi definida a questão principal de pesquisa:

**É possível aplicar o Design Construtal na definição da configuração geométrica de fachadas de modo a torná-las mais eficientes quanto ao desempenho de proteção da superfície frente à ação da chuva dirigida?**

Como desdobramento da questão principal, foram definidas as questões secundárias:

- Quais são os critérios necessários para analisar o desempenho de detalhes de fachada e da volumetria das edificações na proteção da superfície da fachada frente à ação da chuva dirigida sob a perspectiva do Design Construtal?
- É possível elaborar experimentos sob a perspectiva do Design Construtal?
- É possível aplicar o MDC para diferentes escalas de análise de fachada?

### 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

A partir do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do Método do Design Construtal à análise desempenho de fachadas frente à chuva dirigida, considerando diferentes escalas de construtos, propondo o desenvolvimento de experimentos alinhados à proposta do MDC e permitindo a comparação e proposição de melhorias na geometria das estruturas de escoamento de fachadas.

Os objetivos específicos são:

- desenvolver metodologias genéricas para avaliar sistematicamente o desempenho da geometria de fachadas frente à ação da chuva dirigida através do Design Construtal;
- analisar trabalhos experimentais já realizados identificados na bibliografia sob a perspectiva das metodologias desenvolvidas;
- propor configurações geométricas que apresentem um melhor desempenho a partir das análises realizadas.

### 1.4 LIMITAÇÕES

O trabalho se restringiu a analisar o desenvolvimento e a aplicação teórica do MDC à análise da Interação entre a Chuva dirigida e Fachadas, utilizando resultados de trabalhos experimentais encontrados na bibliografia. Dessa forma, não foram elaboradas hipóteses para serem avaliadas ao término deste trabalho.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo é feita uma contextualização breve do tema, introduzindo a importância das edificações e quais são os principais requisitos de desempenho que devem ser atendidos. As fachadas são apresentadas como um elemento definidor do atendimento dos requisitos dos usuários, por serem a envoltória protetora da edificação. Também é comentado brevemente sobre o Método do Design Construtal e como o mesmo pode ser aplicado na evolução do *design* das fachadas.

A **Lei Construtal** é apresentada no segundo capítulo, no qual são apresentados os conceitos fundamentais da teoria e também o MDC. Ainda neste capítulo são definidos através da exploração da bibliografia os principais elementos necessários à aplicação do MDC, que são os *sistemas de escoamento*, os *objetivos e indicadores de desempenho*, as *restrições*, os *parâmetros do escoamento* e os *graus de liberdade*. A apresentação destes conceitos neste capítulo é importante para que seja possível perceber como esses elementos do MDC serão associados à análise da chuva dirigida em fachadas, que será introduzida no capítulo subsequente.

No terceiro capítulo é introduzida a temática de manifestações patológicas em revestimentos resultantes da interação das fachadas com a chuva dirigida, sendo apresentados de maneira breve os impactos que os mesmos representam aos usuários. Nesse tópico, são abordadas as possíveis causas das manifestações a partir da investigação dos principais **Fatores de Degradação** relacionados ao fenômeno da chuva dirigida, de modo a propor posteriormente metodologias de análise associadas aos fatores de degradação. Para isso, os fatores foram categorizados como *extrínsecos*, relativos ao contexto em que a edificação está inserida, e *intrínsecos*, relativos a características e propriedades das edificações e dos revestimentos.

O quarto capítulo apresenta a **aplicação do MDC à interação entre a Chuva Dirigida e Fachadas**. A aplicação foi realizada partir da combinação dos elementos fundamentais apresentados no capítulo 1, com os fatores de degradação explorados e demais condicionantes das geometrias das fachadas apresentadas no capítulo 2. As metodologias foram estruturadas para três diferentes escalas de interação entre a chuva dirigida e fachadas, considerando que todas as escalas são importantes para garantir o desempenho adequado das fachadas frente à ação da chuva dirigida: *volumetria da edificação*; *detalhes incorporados*; e *as propriedades da superfície*. Também, é realizada uma comparação com os conceitos utilizados nos projetos de



experimentos, identificando similaridades com os elementos essenciais para a aplicação do MDC. Neste capítulo são apresentados quadros resumos que justificam a estruturação das metodologias. Por fim, são analisados dois experimentos de interação entre a Chuva Dirigida e Fachadas com possibilidade de aplicação do MDC, sendo o primeiro trabalho avaliando a exposição de grandes volumes em fachadas e o segundo trabalho avaliando a configuração geométrica de peitoris em janelas. A partir das análises realizadas foram propostas configurações geométricas melhores para fachadas e para os peitoris analisados.

No capítulo de **Considerações Finais** são feitas as ponderações sobre a aplicabilidade do Design Construtal ao processo de elaboração de experimentos, bem como ao próprio processo de concepção de fachadas. Nesse sentido foi concluído que o MDC pode ser aplicado para experimentos que avaliem a interação da chuva dirigida com fachadas, com grande potencial de melhoria de desempenho das fachadas a partir da proposição de geometrias melhores. Também, são feitas sugestões de continuidade do estudo para trabalhos futuros.

## 2 LEI CONSTRUTAL DO DESIGN E EVOLUÇÃO

A Lei Construtal é um princípio que rege a evolução da estrutura de sistemas de escoamento na natureza. A partir dessa lei, foi concebido o Método do Design Construtal (MDC), o qual possibilita prever a evolução da configuração geométrica de várias estruturas na natureza em uma escala curta de tempo de maneira a facilitar o acesso ao escoamento. A sequência deste capítulo é destinada a apresentar os conceitos fundamentais da Lei Construtal e o detalhamento do funcionamento do MDC.

### 2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Segundo Bejan e Zane (2012), as estruturas dos fenômenos da natureza, das descargas atmosféricas, das plantas, das bacias hidrográficas e dos sistemas metabólicos dos animais não são formadas ao acaso. Para os autores há um princípio científico que rege tais fenômenos e que produz essas estruturas natural e espontaneamente com padrões previsíveis e que molda o *design* de tudo que está à nossa volta.

A Teoria *Construtal* é uma maneira de visualizar, é o entendimento (pensamento) de que as estruturas de sistemas de escoamento encontradas na natureza podem ser fundamentadas com base em um princípio evolutivo de aumentar o acesso ao escoamento com o passar do tempo (HELBIG *et al.*, 2016). Aplicando a Lei Construtal é possível reformular, estruturar e prever o processo de evolução de maneira orgânica e dinâmica de modo a obter *designs* melhores (BEJAN; ZANE, 2012; GOMES, 2014).

Como resultado do conjunto de evidências empíricas, Bejan (1996) postulou a base para uma nova lei da natureza que pode ser descrita da seguinte maneira: “Para um sistema onde há escoamento (movimento, escoamento) de tamanho finito persistir no tempo (viver), sua configuração deve evoluir livremente de maneira a proporcionar acesso facilitado para as correntes que fluem através de si”.

## 2.2 MÉTODO DO *DESIGN CONSTRUTAL*

O Método do Design Construtal possibilita a aplicação da Lei Construtal para melhorar o desempenho da engenharia, buscando não somente melhores configurações, mas também melhores estratégias para definir a geometria dos sistemas de escoamento (LORENTE, 2010; HELBIG *et al.*, 2016; BEJAN)

Segundo Helbig *et al.* (2016), a aplicação do MDC “permite a avaliação da influência da configuração geométrica no desempenho do sistema”. Para realizar a aplicação do método, além da identificação dos **Sistemas de Escoamento** (escoamento e estrutura), é necessária a definição de **Indicadores de desempenho** (que devem ser calculados ou medidos), dos **Graus de liberdade do Sistema** e das **Restrições** (GOMES, 2014; HELBIG *et al.*, 2016).

### 2.2.1 Sistemas de escoamento

Um sistema de escoamento é caracterizado por propriedades ou restrições, como o **volume total**. Os sistemas de escoamento são também caracterizados pelas funções e/ou objetivos que desempenham e por apresentar uma estrutura através da qual o escoamento percorre (BEJAN; LORENTE, 2004). A estrutura do escoamento pode ser mencionada na literatura como *design*, *layout*, geometria, configuração ou arquitetura.

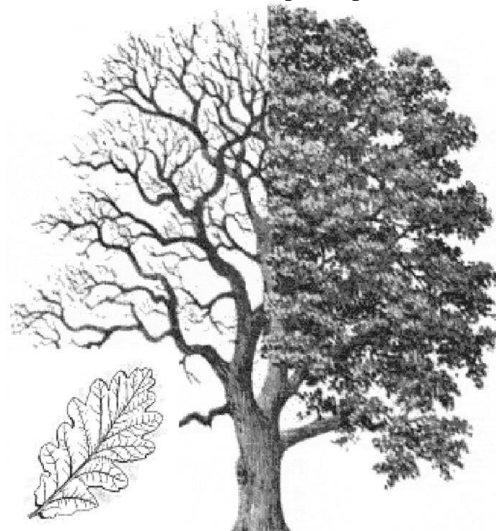
Os sistemas de escoamento encontrados na natureza são complexos e apresentam grande diversidade de magnitude de extensão e massa. A Lei *Construtal* é baseada na ideia de que os sistemas de escoamento não são sem propósito, mas sim livres para se transformar e evoluir através do tempo, sob determinadas restrições para atingir propósito do escoamento (ROCHA *et al.*, 2013). Dessa maneira, nenhum sistema de escoamento permanecerá em uma determinada configuração por longos períodos (BEJAN; LORENTE, 2004).

Para a aplicação do MDC é fundamental a definição do sistema de escoamento a ser estudado. Os sistemas de escoamentos apresentam dois principais componentes: a corrente que está fluindo (fluido, calor, massa ou informação) e a estrutura (*design*) através da qual ela flui (BEJAN; ZANE, 2012, GOMES, 2014; HELBIG *et al.*, 2016). Para o sistema ser considerado vivo, a corrente deve fluir (apresentar um desequilíbrio termodinâmico) e o *design* através do qual ela flui, deve se transformar ao longo do tempo, de modo a proporcionar um escoamento facilitado (BEJAN, 1996; GOMES, 2014).

Pode ser identificado, por exemplo, que estruturas mecânicas são redes através das quais escoam as tensões de um componente para seu vizinho, atuando de maneira análoga aos sistemas de escoamento de fluídos ou de transferência de calor (BEJAN; LORENTE, 2010; HELBIG *et al.*, 2016).

Os sistemas de escoamentos na natureza ocorrem e evoluem com frequência formando estruturas em formato similar a uma árvore, conhecidas também como estruturas dendríticas (Figura 4), pois este padrão de estrutura é bastante eficiente para facilitar escoamentos de uma área ou volume para um ponto e de um ponto para uma área ou volume (BEJAN, 1996).

Figura 4 – Exemplo de arquiteturas de escoamento de um ponto para uma área ou volume em folhas e árvores



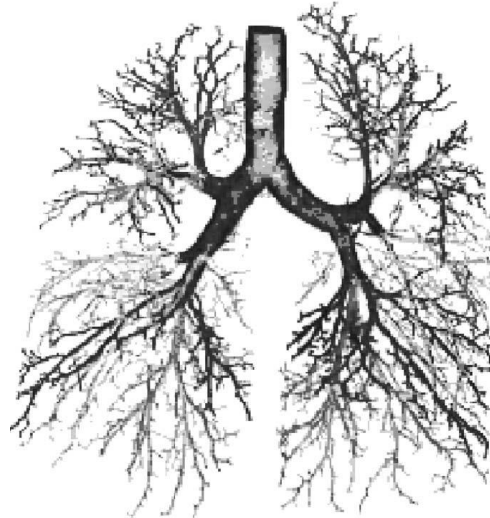
(Fonte: REIS, 2006)

Pela Lei *Construtal*, os pequenos elementos se unem em estruturas maiores, constituindo componentes de tamanhos variados, os quais atuam em conjunto para facilitar o escoamento pelos sistemas de escoamento (BEJAN; ZANE, 2012) – esses diferentes níveis de elementos que constituem a estrutura de escoamento são chamados de **construtos**. Dessa forma, a melhoria da geometria do escoamento deve partir dos sistemas elementares, que são os construtos de menores escalas, aos sistemas de ordem mais elevada, que são os grandes construtos maiores (REIS, 2006).

Tudo que apresenta movimento, tanto animado quanto inanimado, é um sistema de escoamento, os quais geram forma e estrutura com o tempo a fim de facilitar o movimento do escoamento através de uma paisagem repleta de resistências (BEJAN; ZANE, 2012), como, por exemplo:

- uma descarga atmosférica parte de uma nuvem (volume) para um ponto (por exemplo. para raio, outra nuvem, etc.). O caminho percorrido pela descarga é o que apresenta menor resistência elétrica, através de trechos ionizados que apresentam maior condutividade (BEJAN, 1996);
- as bacias hidrográficas apresentam formato semelhante, desenvolvendo sua rede de escoamentos por caminhos de alta condutividade (rios, riachos), coletando água que se move de uma área, que é a bacia hidrográfica, para um ponto, que é a foz do rio (BEJAN, 1996);
- nos animais, é possível observar estruturas semelhantes nas passagens de ar dos pulmões (sistema de escoamento de oxigênio e dióxido de carbono, Figura 5), na capilarização de veias e artérias (sistema de escoamento para o sangue) e nos dendritos dos neurônios (sistema de escoamento para sinais) (BEJAN, 1996);

Figura 5 – Pulmão humano com suas bifurcações é uma estrutura aprimorada para o transporte de oxigênio e dióxido de carbono



(Fonte: REIS, 2006)

- nos sistemas de tráfego de veículos, pequenas vias suburbanas se unem a estradas maiores e convergem em grandes autoestradas que apresentam grande capacidade de concentração de veículos, formando uma extensa e complexa malha viária. Essa malha não é uma cópia de parte de estruturas de escoamento identificadas na natureza, mas são uma manifestação dela (BEJAN; ZANE, 2012). A maneira como é estruturada a malha urbana é inclusive identificada em bibliografias que não tratam sobre a *Lei Construtal*,

como verificado por Netto e Saboya (2010), que menciona uma estrutura dendrítica ao longo do esqueleto principal das ruas, que são em seguida capilarizadas intersticialmente nos tecidos locais dos bairros, formando estruturas complexas.

Embora sejam bastante comuns de serem observados, os sistemas de escoamento em formato dendrítico são apenas manifestações da Lei *Construtal* (BEJAN; ZANE, 2012). Outros exemplos também podem ser mencionados como:

- toras de árvores ou icebergs em lagos se orientam perpendicularmente ao vento para facilitar a transferência de movimento do corpo de ar para o corpo de água;
- o design dos corpos dos animais, desenvolvendo características específicas, por exemplo o tamanho dos órgãos, os formatos dos ossos e membros, os ritmos cardiorrespiratórios, que evoluíram para permitir a movimentação de maneira cada vez melhor através de uma paisagem (percorrendo maiores distâncias com maior eficiência energética).

### 2.2.2 Objetivo e Indicadores de desempenho

Os *designs* dos sistemas desenvolvidos pela engenharia evoluem no tempo através de configurações que apresentem melhor desempenho, que atendam melhor ao objetivo que são destinados (REIS, 2006).

De maneira simples e intuitiva, o objetivo dos sistemas de escoamento é fornecer acesso facilitado ao escoamento ao longo do tempo. A identificação do objetivo possibilita a visualização de para onde o sistema deve evoluir e quais melhorias podem ser feitas no *design* de modo a melhorar o desempenho do sistema de escoamento.

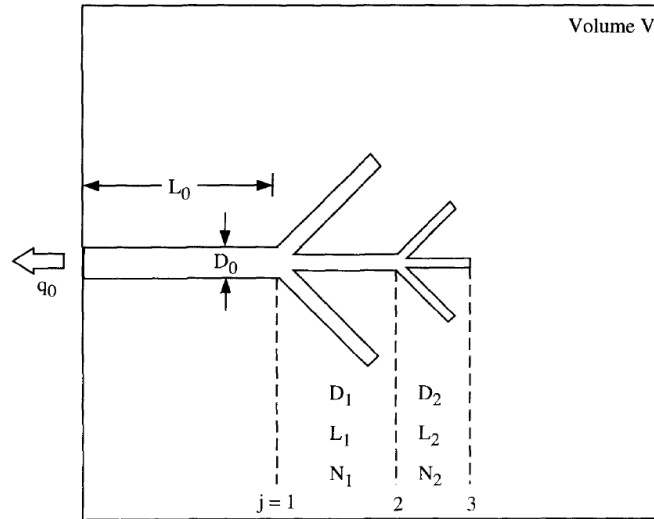
A definição do objetivo, de modo geral, deve estar atrelada ao delineamento dos indicadores de desempenho. Através desses indicadores será possível avaliar qual configuração geométrica é mais eficiente quando submetida a um determinado escoamento.

A escolha do indicador depende do problema que está sendo avaliado:

- nos sistemas de resfriamento de processadores, o desenvolvimento de uma configuração de um condutor que apresenta maior eficiência na dissipação de calor é avaliado através da comparação das taxas de transferência de calor (BEJAN, 1996). A Figura 6 apresenta

a postulação de um sistema de resfriamento de processadores com uma estrutura ramificada.

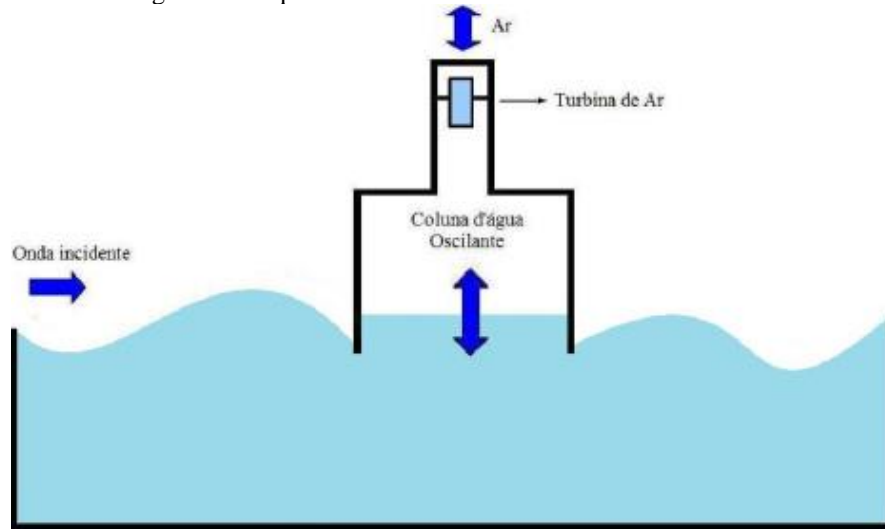
Figura 6 - Rede postulada de estrutura ramificada de resfriadores



(Fonte: BEJAN, 1996)

- em sistemas de conversão de energias de ondas do mar em energia elétrica através de dispositivos do tipo coluna de água oscilante (CAO) é avaliado como indicador a média RMS da vazão mássica, da pressão e potência hidropneumática gerada por cada configuração geométrica de dispositivo CAO (GOMES, 2014). A Figura 7 apresenta esquematicamente o funcionamento de um sistema CAO, em que a oscilação da coluna de água produz uma variação de pressão dentro da chaminé, movimentando a turbina de ar.

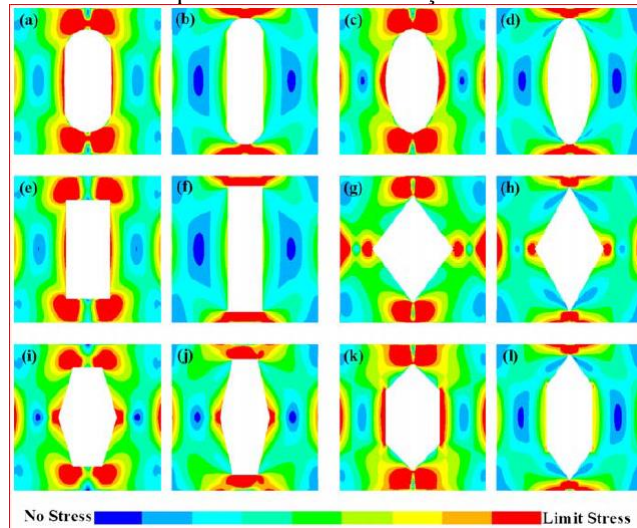
Figura 7 – Esquema de funcionamento de um sistema CAO



(Fonte: GOMES, 2014)

- para sistemas estruturais de placas o melhor desempenho mecânico foi avaliado pela distribuição mais homogênea da tensão limite de flambagem em placas que apresentavam relação entre área de abertura e área da placa, como exposto na Figura 8 (HELBIG *et al.* 2016).

Figura 8 - Distribuição de tensões em placas com mesma relação entre área de aberturas e área da placa



(Fonte: HELBIG *et al.*, 2016)



### 2.2.3 Restrições

As restrições são os parâmetros do sistema que são mantidos constantes ao longo do estudo (ou da investigação). Também, as restrições definem a presença integral e inevitável das resistências do sistema (BEJAN; LORENTE, 2004).

Para o atendimento do objetivo do sistema de escoamento ser global, este deve estar associado às **restrições globais**, as quais podem incluir a **área ou volume** em que o sistema está contido (REIS, 2006). Se o sistema for livre para se transformar e estiver submetido às restrições globais, a melhor estrutura de escoamento será aquela que minimizará as resistências globais ou maximizará o acesso global do escoamento (ROCHA *et al.*, 2013). Nessa perspectiva, também devem ser aplicadas **restrições locais**<sup>2</sup>, que podem ser as condições permitidas de temperatura, pressão ou tensão (REIS, 2006).

Bejan (1996) propôs variações geométricas de condutores de modo a maximizar a condução de calor sem acrescentar mais volume aos condutores, ou seja, impondo uma condição de igualdade da quantidade de volume entre as proposições de estrutura de escoamento feitas. Esses volumes tem de ser mantidos constantes, pois através deles ocorre um escoamento de volume finito.

Gomes (2014) optou pela manutenção da área da câmara do dispositivo de CAO e a área total do dispositivo CAO, o que gerou uma restrição de volume na câmara de entrada do dispositivo e no volume total do dispositivo. Dessa maneira, o autor definiu como constante a razão entre o volume da câmara de entrada e o volume total do dispositivo.

Helbig *et al* (2016) limitou o espaço mínimo entre a borda de corte e as bordas das placas e também o volume de material utilizado nas placas. Dessa maneira, o autor definir a restrição chamada fração do volume de buracos, o que permitiu comparar o desempenho de placas com uma mesma razão de volume de buracos/volume da placa.

Outro tipo de restrição importante são os **parâmetros do escoamento**, propriedades como taxa de escoamento, condições de temperatura e pressão, as quais devem ser mantidas constantes

---

<sup>2</sup> Na bibliografia sobre a interação entre chuva dirigida e fachadas pode ser observado que dimensões de modelos como largura e altura interferem no escoamento e, por isso, serão tratados como restrições locais.

durante o estudo para determinar a geometria com melhor desempenho em cada condição de escoamento.

#### **2.2.4 Graus de liberdade**

A transformação do sistema de escoamento ocorre devido à interação entre os objetivos globais e as restrições globais. A transformação frequente à que estão submetidos os sistemas ocorre pois estes são livres para serem alterados (desde que não transgridam as condições de restrição) (BEJAN; LORENTE, 2004). As características (dimensões, comprimentos) passíveis de serem alteradas sem ferir as restrições do MDC são chamadas graus de liberdade. Os graus de liberdade estão associados ao *design* do sistema, isto é, são dimensões que podem ser alteradas de modo a melhorar o desempenho do sistema.

### 3 AS FACHADAS DE EDIFICAÇÕES E SUAS INTERAÇÕES

Muitas vezes é desconsiderada a possibilidade de que os materiais utilizados nas edificações estão suscetíveis a fenômenos muito similares aos processos de deterioração considerados normais a que são submetidos os materiais na natureza, causados por agentes físicos, químicos e biológicos (ROBINSON; BAKER, 1975). Os recursos necessários para resolver os problemas nas fachadas representam significativa parcela das despesas de manutenção das edificações (CHEW; TAN, 2003). Dessa forma, compreender a natureza de origem dos danos é fundamental para orientar a busca por alternativas para solucionar ou mitigar as manifestações patológicas nas edificações.

A manifestação patológica é uma irregularidade que se pronuncia em razão de falhas com possíveis origens em diferentes etapas, como no projeto, na produção, na instalação, na execução, na montagem, no uso e na manutenção – ou em outros problemas não oriundos do envelhecimento natural (ABNT NBR 15.575-1, 2013). A importância das manifestações patológicas pode ser estabelecida através da identificação das causas do problema, da influência da manifestação patológica na perda do desempenho, dos custos de manutenção entre outros (BAUER *et al.*, 2020).

Os tipos de manifestações patológicas dependem também da região em que uma edificação está localizada. Bauer *et al.* (2020) evidenciou que para a cidade de Brasília (DF) as manifestações mais evidentes nos revestimentos podem ser agrupadas em patologias da argamassa (destacamentos, rachaduras, pulverulência, eflorescência e manchamentos) e patologia das pinturas (destacamentos, rachaduras e bolhas).

Para um conjunto de edificações históricas de Porto Alegre (RS), Verdum *et al.* (2021) evidenciaram outro conjunto de manifestações patológicas nos revestimentos: destacamentos, deslocamentos, rupturas, desintegração superficial, vesículas, manchamentos por umidade, manchamentos por sujidade, manchamentos por biodeterioração, biodeterioração vegetal, biodeterioração animal, biodeterioração por insetos, eflorescências, criptoefflorescências, bolhas em pintura, pinturas descascadas e microfissuras na pintura.

Para Chew e Tan (2003), os principais fatores na alteração da coloração dos revestimentos incluem os materiais empregados na fachada, o nível de exposição, a cor, a absorção de água, a retenção de sujeira, a textura e a solubilidade. Deve se ressaltar que, nas fases iniciais, o

aparecimento de manchas de sujeira afeta tão somente a qualidade visual das fachadas pela perda do caráter estético. Entretanto, a permanência das sujeiras no revestimento durante longos períodos associados à presença de umidade podem agravar o grau de manchamento e potencializar os danos de outras anomalias (MELO JR, 2016).

As manifestações patológicas podem ser organizadas em duas categorias: a primeira categoria agrupa as degradações de ordem estética e que alteram a aparência da edificação, sem comprometer a estabilidade e o uso da edificação; a segunda categoria concentra as manifestações patológicas funcionais, que alteram a integridade dos componentes dos sistemas e prejudicam o desempenho e segurança das edificações (FLORES-COLEN *et al.*, 2006; BAUER *et al.*, 2020).

Os principais fatores que determinam o desempenho das fachadas (e que podem causar deteriorações estéticas e estruturais) também podem ser agrupados em três categorias (EL SHIMI, 1979):

- condições climáticas locais: poluição do ar, precipitação, vento, temperatura ambiente, umidade relativa e radiação atmosférica;
- configuração geométrica das fachadas: geometria geral, formas e detalhes incorporados;
- e propriedades dos materiais: absorção, acabamento superficial, composição química e solubilidade.

Outra alternativa de categorização propõe compreender a ocorrência de manchamentos em revestimentos externos a partir da análise das interações entre a **forma construída** e as **condições ambientais** no contexto em que a edificação está inserida (PETRUCCI, 2000. Grifo meu). O conjunto das condições ambientais podem ser classificadas como *fatores extrínsecos*, pois são “externos” à edificação e atuam sobre a forma construída, enquanto que todos os elementos que compõem a forma construída podem ser classificados como *fatores intrínsecos*, pois são características inerentes da edificação (PETRUCCI, 2000).

As abordagens de classificação propostas por El Shimi (1979) e Petrucci (2000) são agregadoras a este trabalho na medida em que possibilitam a rápida identificação dos elementos que compõe os sistemas de escoamento com suas respectivas estruturas, objetivos e indicadores de desempenho, restrições e graus de liberdade – ou seja, possibilitam a aplicação do Método

do Design Construtal para a análise da interação da chuva dirigida com as fachadas de edificações. Os tópicos seguintes apresentaram os principais fatores de degradação associados à interação entre a chuva, o vento e as fachadas.

### 3.1 FATORES EXTRÍNSECOS

Fatores extrínsecos são relacionados às condições ambientais de exposição da edificação, como contaminantes atmosféricos (através de mecanismos de deposição e adesão) e fatores climáticos (ação do vento, da chuva, umidade relativa e temperatura ambiente) (PETRUCCI, 2000).

#### 3.1.1 Contaminantes atmosféricos

Contaminantes do ar podem alterar a intenção estética da fachada do projetista e determinar alterações visuais através da combinação com as ações dos ventos e das chuvas, interagindo com os elementos construtivos da fachada, sua geometria e seus detalhes (PETRUCCI, 2000). Os agentes químicos contidos na poluição atmosférica frequentemente se depositam e interagem com a superfície das fachadas (EL SHIMI, 1979).

O manchamento uniforme de revestimentos é um defeito comum de edificações localizadas nos centros urbanos, resultados da deposição de partículas de solo, poeira, fuligem e outros poluentes, os quais são transportados pela chuva e pelo vento até as fachadas, onde se depositam (CHAVES, 2009; MELO JR, 2016; PEREIRA *et al.*, 2020).

Segundo El Shimi (1979), os poluentes atmosféricos geralmente se distribuem em três estratos: O primeiro é causado pela poluição dos automóveis e é o estrato mais baixo, situado sobre as casas e espaços abertos; aproximadamente 20 metros acima está a segunda camada, produzida pelas chaminés de casas; a terceira camada é situada acima de 50-60 metros e é causada por chaminés de indústrias. Entre os principais poluentes, pode-se citar partículas de carbono e dióxido de enxofre, que em contato com a água da chuva sofrem uma reação química que forma uma camada de material e promove a deterioração da superfície do revestimento.

As partículas de poluição atmosférica são movimentadas pela ação do vento e variações de temperatura, depositando-se sobre superfícies planas e salientes das fachadas, podendo exercer uma ação agressiva sobre os materiais do revestimento quando em concentrações elevadas (CHAVES, 2009).

Para Chaves (2009), as “crostas negras” em revestimentos pétreos são formadas em ambientes poluídos, aparecendo em zonas umidades e protegidas das fachadas, e constituídas por gesso, cinzas volantes e poeiras depositadas sobre as pedras.

A sujeidade de coloração escura (marrom, escura ou preta) tem como origem a acumulação de materiais externos de diversas naturezas (poeira, fuligem ou outras fontes de partículas poluentes) com profundidades variadas, apresentando fraca aderência e coesão proveniente do próprio revestimento. Outras formas de manchamentos escuros estão associadas à presença de umidade no revestimento, a qual pode apresentar origem na construção, na umidade ascensional do solo, nas precipitações, nos fenômenos de higroscopicidade entre outras causas (FLORES-COLEN *et al.*, 2006). Exemplos de sujeidade com coloração escura podem ser observadas na Figura 9, que apresenta um muro com deposição não uniforme de partículas de sujeidade.

Figura 9 – Detalhe de deposição não uniforme de sujeira em muro



(Fonte: FLORES-COLEN *et al.*, 2006)

Há também manchas “fantasmas”, ou fantômes (Figura 10), fenômeno provocado por uma deposição não uniforme de poeira sobre as paredes, associada a problemas higrotérmicos nas paredes, permitindo a visualização da alvenaria e da estrutura através de um processo de coloração diferencial do revestimento, podendo provocar manchamentos e a colonização de microrganismos (FLORES-COLEN *et al.*, 2006). As poeiras se depositam com uma intensidade que é tanto maior quanto mais baixa for a temperatura da fachada, fenômeno denominado termoforese (MELO JR, 2016).

Figura 10 – Fantômes: visualização dos blocos da alvenaria e a estrutura através do revestimento da fachada



(Fonte: FLORES-COLEN *et al.*, 2006)

Para Genel (2005), as fachadas são mais rapidamente manchadas quando expostas a ventos dominantes, pois os mesmos podem transportar sujeiras e, de maneira combinada com as chuvas, podem acelerar os processos de incrustação de partículas em uma fachada, enquanto que para El Shimi (1979) os ventos fortes contribuem para que ocorra a mistura das camadas de poluição, mas também podem “varrer” a poluição das cidades, e os períodos de ventos fracos com frequência contribuem para que ocorra o depósito de partículas de pó e fuligem nas fachadas. A análise da deposição e adesão de partículas deve ser feita, entretanto, considerando as dimensões das partículas e os mecanismos de adesão superficial (o que inclui a ação dos ventos e da umidade).

Em sua grande maioria (em torno de 97%), as partículas envolvidas nos processos de manchamento apresentam raios superiores a 1  $\mu\text{m}$ . Desta fração, 70% apresenta dimensões entre 1  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$  e sofrem deposição por ação turbulenta, enquanto 27% sofre deposição por mecanismos gravitacionais ou inerciais, quando a camada de ar atmosférico se encontra, respectivamente, parada ou em movimento. Com a ação do vento, partículas de dimensões intermediárias são mais afetadas e por representarem a maior quantidade de partículas presentes na atmosfera ocorre grande influência no manchamento de superfícies verticais ou protegidas. A deposição de partículas em superfícies verticais e/ou protegidas é menos frequente em contextos em que as camadas de ar não se movimentam, mas pode ocorrer devido à rugosidade do revestimento, ou caso a superfície da fachada e/ou a partícula apresentem cargas eletrostáticas, ou caso as partículas sejam influenciadas por fenômenos convectivos devido à gradientes térmicos (VALLEJO, 1990).

Como principais meios de adesão de partículas, podem ser destacados os meios gravitacionais e os que envolvem a tensão superficial relacionada à umidade do ar e do substrato. De modo geral, a adesão das partículas não é causada por um único meio, mas pela ação conjunta de vários meios e dependem das características dos materiais e das condições ambientais. Se a partícula estiver somente depositada sobre a superfície pode ser simplesmente varrida pelo vento, mas nos casos de grande aglutinação de partículas a limpeza da superfície só acontecerá com a utilização de processos mecânicos (VALLEJO, 1990).

As manchas nos revestimentos se formam majoritariamente a partir do escoamento superficial de água sobre o revestimento, carregando as partículas de contaminantes que estão retidas nos materiais das fachadas e distribuindo-as pelo paramento, sendo que, após a fachada estar seca, as partículas que não forem completamente lavadas se manifestam como manchas no revestimento (CHEW; TAN, 2003).

### **3.1.2 Temperatura ambiente**

A temperatura é uma das sete grandezas fundamentais do Sistema Internacional e se relaciona às sensações de calor e frio (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Ela também pode ser definida como o grau de agitação molecular, sendo que quanto maior for a velocidade de vibração das moléculas, mais elevada será a temperatura (AYOADE, 1998).

As propriedades de muitos materiais mudam consideravelmente quando estes são submetidos a variações de temperaturas, como quando os fluidos aumentam de volume e barras metálicas aumentam de comprimento. A medição da temperatura é feita através do uso de termômetros, que são instrumentos que, quando postos em contato com outro objeto, entram em equilíbrio térmico com este, indicando a temperatura do objeto (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

De modo geral, as temperaturas mais elevadas tendem a gerar um efeito genérico nos fenômenos de manchamento das fachadas, pois dispersam e diluem os poluentes. Entretanto, quando ocorre o fenômeno de inversão térmica (quando a camada atmosférica de ar quente fica concentrada abaixo da camada de ar frio) a dispersão e a diluição dos poluentes é prejudicada (VALLEJO, 1990).

As superfícies de fachadas quando submetidas a um processo de aquecimento apresentam menor risco de condensação, pois ocorre um aumento da pressão de saturação do ar nas camadas de ar próximas às fachadas (VALLEJO, 1990). O autor indicou na época do estudo que pouco



conhecida é a influência da temperatura na alteração da taxa de absorção de água, que altera também as condições de deslizamento da lâmina de água.

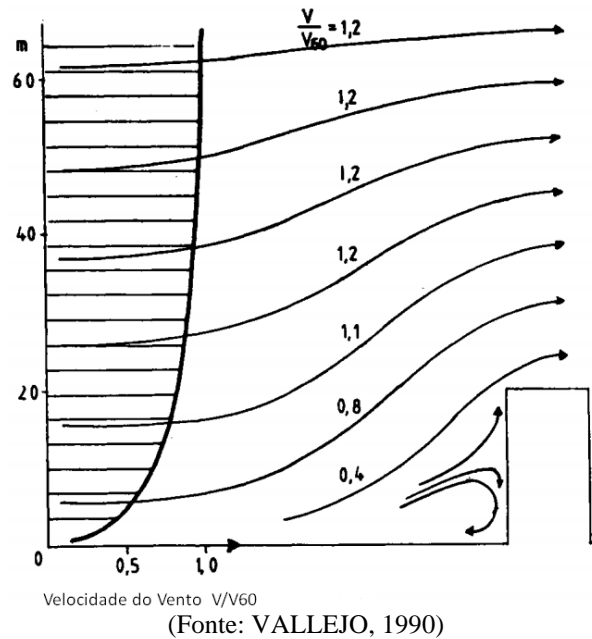
Seng *et al.* (2017) identificaram que a temperatura é a principal força motriz para o transporte de umidade em concretos com base em materiais biológicos quando a umidade relativa do ar está abaixo dos 95%, ou seja, favorecendo o processo a transferência de umidade pela capacidade higroscópica dos materiais.

### **3.1.3 Vento**

O vento apresenta grande influência na dispersão e transporte de contaminantes atmosféricos, podendo beneficiar fontes emissoras de poluição e prejudicar regiões muito distantes, que não são responsáveis pelas contaminações (VALLEJO, 1990). Corroborando com esse argumento, Petrucci (2000) afirma que o vento, através das suas componentes de velocidade e direção, transporta as partículas sujas e a água da chuva, além de atuar na modificação da distribuição da sujeira depositada nas superfícies das fachadas através da força própria e da energia cinética (PETRUCCI, 2000).

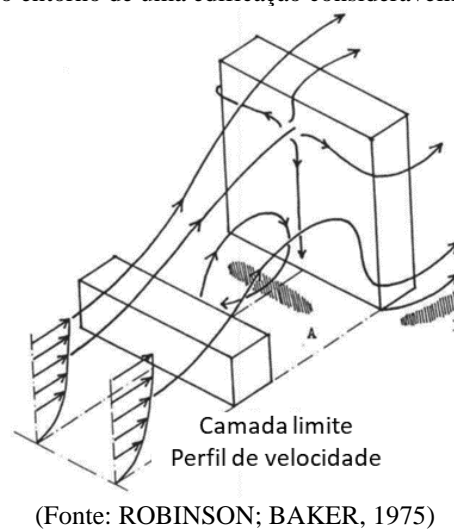
Através de turbulências e desvios de massas, com uma força que depende da velocidade do vento e da altura em relação ao nível do solo, o vento pode atuar indiretamente sobre a superfície das fachadas (VALLEJO, 1990). O autor menciona que ocorre uma “limpeza a seco” nas áreas mais expostas das fachadas aos ventos de maior velocidade (extremidades superiores e laterais); assim como os ventos de menor intensidade atuam na deposição de partículas nas partes protegidas por saliências e obstáculos. A Figura 11 apresenta um esquema da camada limite do vento na atmosfera atuando sobre uma edificação isolada.

Figura 11 – Perfil de velocidade e escoamento do vento sobre edificação isolada



Para Robinson e Baker (1975), o escoamento de ar acaba se dividindo em três partes quando o vento encontra uma edificação de formato retangular e isolada ou consideravelmente mais alta que as demais em seu contexto: parte passa por cima da cobertura da edificação; parte pelas laterais e pelos cantos mais altos da parede de barlavento; e parte segue para as áreas mais baixas, formando vórtices que varrem os cantos mais baixos (Figura 12).

Figura 12 – Escoamento de ar no entorno de uma edificação consideravelmente mais alta que seu entorno.



A pressão do vento é uma consequência da velocidade do escoamento de ar, que tende a variar conforme a região em que está localizada. A Norma NBR 6123 - “Forças devido ao vento em

edificações” (ABNT, 1988) apresenta um método de cálculo para a determinação das forças estáticas devido ao vento, obtido do seguinte modo:

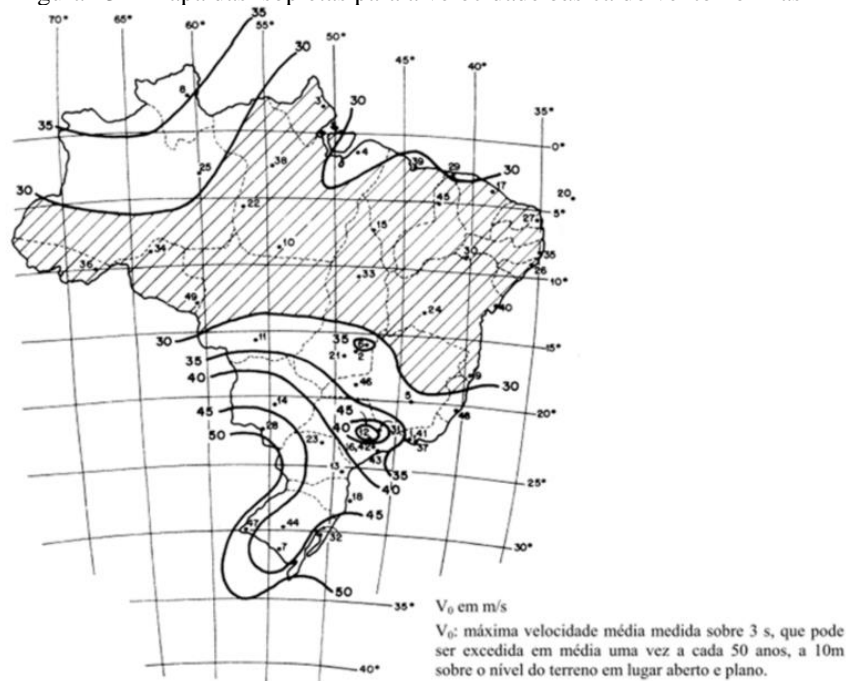
Determinação da Velocidade característica do vento ( $V_K$ ): O valor de  $V_K$  é determinado do produto das condições de contorno em que a edificação em análise está inserida, como da máxima velocidade média do vento na região ( $V_0$ ), o coeficiente topográfico ( $S_1$ ), o coeficiente de rugosidade e a dimensão da edificação e a altura acima do terreno ( $S_2$ ), além de um fator estatístico ( $S_3$ ).

$$V_K = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

Equação 1 - Velocidade característica do vento (ABNT, 1988).

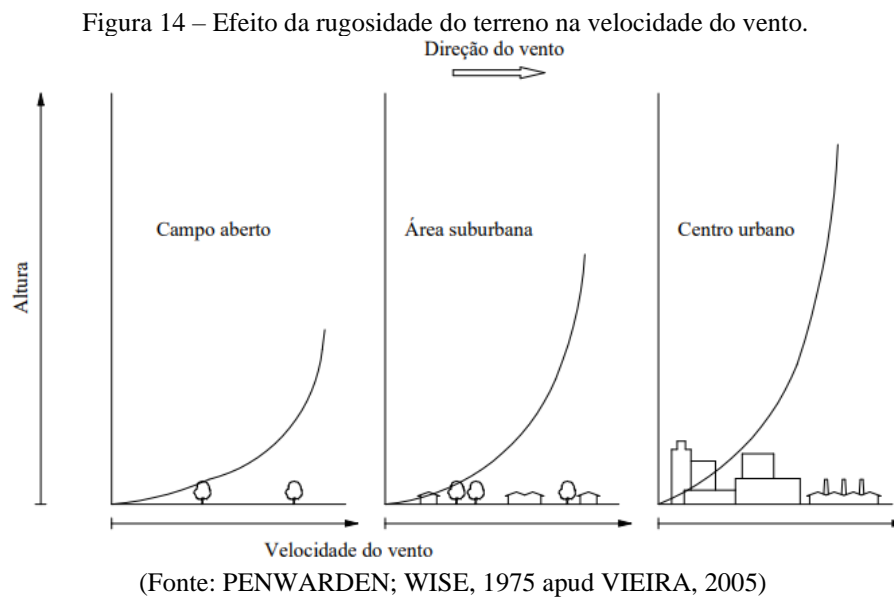
A  $V_0$  é definida como “a velocidade de uma rajada de 3 segundos, exercida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno em campo aberto e plano. Para identificar a velocidade básica do vento de cada região do Brasil, a NBR 6123 (1998) apresenta o mapa das isopleias (Figura 13), o qual delimita o território brasileiro em cinco diferentes categorias de velocidade básica do vento.

Figura 13 – Mapa das isopleias para a velocidade básica do vento no Brasil



(Fonte: ABNT, 1988)

A Figura 14 demonstra como a rugosidade superficial do terreno, representado pelo coeficiente  $S_2$  aplicado na equação da velocidade característica do vento, afeta a velocidade do vento junto da superfície, sendo que regiões de campo aberto apresentam maior velocidade de vento, enquanto regiões que apresentam grande densidade de edificações (ou outros volumes) junto da superfície diminuem a velocidade do vento (PENWARDEN; WISE, 1975<sup>3</sup> apud VIEIRA, 2005).

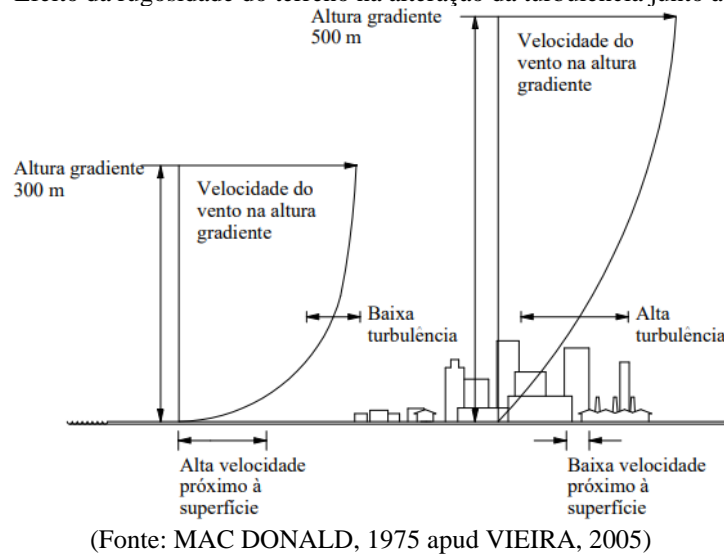


Os obstáculos formados pela rugosidade no terreno também afetam a intensidade e direção do vento, provocando, além de uma diminuição da velocidade do vento, também um aumento dos efeitos turbulentos junto da superfície, como esquematizado na Figura 15 (MAC DONALD, 1975<sup>4</sup> apud VIEIRA, 2005).

<sup>3</sup> PENWARDEN, A. D.; WISE, A. F. E. **Wind Environment around buildings**. Building Research Establishment – BRE, 1975.

<sup>4</sup> MAC DONALD, A. J. **Wind Loading on buildings**. London: Applied Sciences Publishers, 1975.

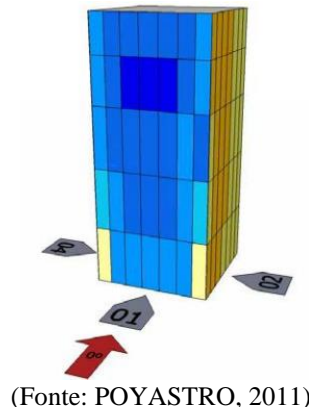
Figura 15 – Efeito da rugosidade do terreno na alteração da turbulência junto à superfície.



O estudo realizado por Poyastro (2011) apresenta conclusões relevantes e que estão apresentadas na definição da metodologia de avaliação deste trabalho. Com relação à influência do vento sobre as fachadas, as principais considerações são as que seguem:

- i. Quando o vento incide perpendicularmente ( $0^\circ$ ) sobre uma fachada a barlavento de uma edificação isolada, as sobrepessões atingem um ponto máximo a aproximadamente  $2/3$  da altura da fachada (Figura 16), enquanto as demais fachadas sofrem sucção (pressões negativas). Também foi observado que as pressões vão ficando menores nas fachadas laterais na medida em que a camada de ar se aproxima da fachada de sotavento;

Figura 16 – Pressão na fachada com o vento incidindo  $0^\circ$



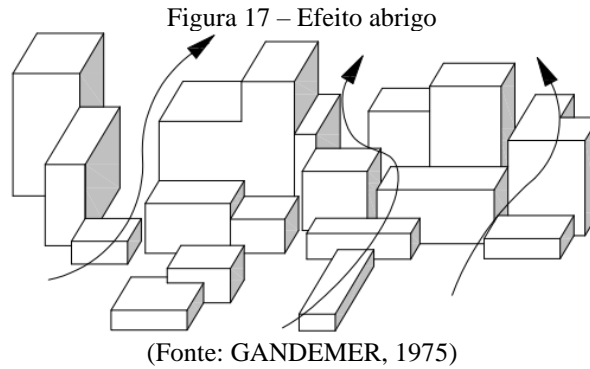
- ii. As áreas de sobrepressões acabam por ser deslocadas lateralmente com o vento quando o ângulo de incidência do vento aumenta. Essa inclinação do ângulo tende a fazer com que volumes salientes das torres protejam partes das fachadas (torres com planta baixa em formato de cruz ou “H”). Quando a inclinação do vento completa 90° a sua atuação é idêntica para ângulos de 0°, apenas sendo alterada a fachada de barlavento.
- iii. As edificações de entorno protegem uma edificação da incidência direta do vento. Se as edificações de entorno apresentam metade da altura da edificação principal, a metade inferior da edificação principal fica protegida da ação do vento – mas a 2/3 da altura da fachada de barlavento também é observado o ponto de maior sobrepressão. Quando as edificações de entorno apresentam a mesma altura da edificação principal, esta fica com todas as fachadas praticamente totalmente protegidas da ação direta do vento, sendo observado majoritariamente a incidência de pressões negativas. Corredores de vento entre as edificações, entretanto, podem provocar sobrepressões próximo das arestas verticais.

Os fenômenos de pressão e sobrepressão observados por Poyastro (2011) podem ser explicados por alguns efeitos já bastante conhecidos dos ventos em edificações em centros urbanos e explicados por Gandemer (1975<sup>5</sup>, apud POYASTRO, 2011 e MELO JR, 2010):

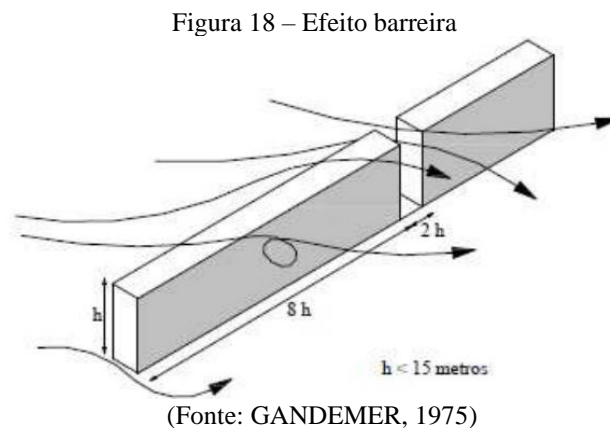
- i. Efeito abrigo: são observados locais de abrigo contra o vento originados pelo arranjo do conjunto de edificações (Figura 17), sendo este efeito considerado uma anomalia em função de ser dificilmente quantificado.

---

<sup>5</sup> GANDEMER, J. **Wind environment around buildings; aerodynamic concepts**. In: International conference on wind effects on buildings and structures, 4, 1975, Heathrow. Proceedings... Heathrow: Keith J. Eaton, 1975.

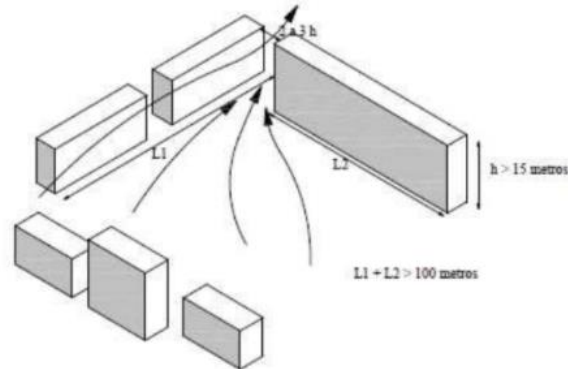


- ii. Efeito barreira: caracterizado por situações em que os edifícios são muito largos com uma razão entre comprimento de altura de 1:8, não tendo espessura maior do que 10 m e altura maior do que 30 m. Quando o vento incide sobre a face de maior dimensão desta edificação, o mesmo tende a seguir por cima da edificação, deixando protegidos da ação dos ventos os edifícios atrás da barreira e que apresentam altura inferior (Figura 18).



- iii. Efeito Venturi: este fenômeno é caracterizado pelo afinamento do escoamento de ar e aumento da velocidade do vento no fim do canal, que ocorre quando as faces de fachadas de edificações separadas convergem formando um ângulo agudo ou reto. Para que o efeito seja possível, também é necessário que os edifícios apresentem altura superior a 15 m, comprimento maior do que 100 m e que a área de vizinhança desocupada seja aproximadamente igual à área do canal (Figura 19).

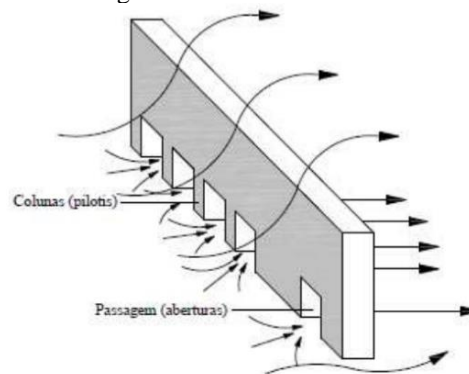
Figura 19 – Efeito Venturi



(Fonte: GANDEMER, 1975)

- iv. Efeito abertura: ocorre quando a edificação apresenta aberturas em sua base que permitem o escoamento de ar entre duas faces opostas de maneira mais concentrada, através de jatos (Figura 20).

Figura 20 – Efeito abertura

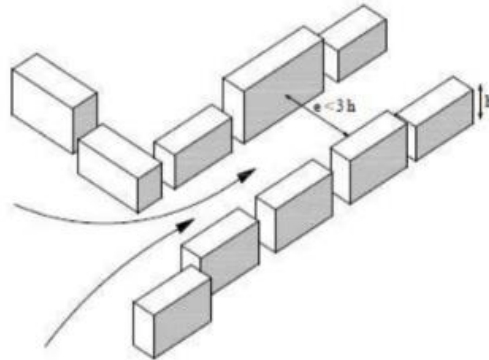


(Fonte: GANDEMER, 1975)

- v. Efeito canal ou corredor: é caracterizado pela canalização do vento com aceleração do escoamento de ar. O fenômeno ocorre devido à presença de edifícios paralelos entre si, com o canal apresentando largura menor do que três vezes a altura dos prédios (Figura 21).



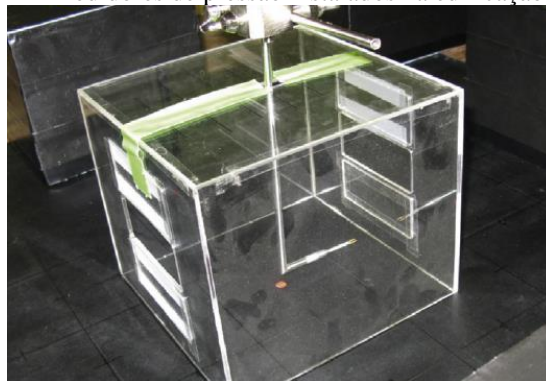
Figura 21 – Efeito canal ou corredor



(Fonte: GANDEMER, 1975)

Shirzadi *et al.* (2019) realizaram um experimento em túnel de vento sobre a pressão de vento e a ventilação cruzada em um modelo genérico de edificações protegidas em áreas urbanas. Medidores de pressão foram instalados na edificação central à barlavento e sotavento do escoamento.

Figura 22 - Medidores de pressão instalados na edificação central

(Fonte: SHIRZADI *et al.* 2019)

A variação da pressão superficial do vento apresentou tendências distintas para os edifícios isolados e edifícios abrigados em termos de diferença de pressão superficial nas fachadas de barlavento e sotavento. A diferença de pressão total diminuiu quando o ângulo do vento foi aumentado de  $0^\circ$  para  $90^\circ$  no caso da edificação isolada. Já para o caso da edificação abrigada, a diferença de pressão total aumentou rapidamente quando o ângulo foi aumentado de  $0^\circ$  para  $45^\circ$ , posteriormente passando novamente a diminuir com o aumento do ângulo para  $90^\circ$ . Também, foi notado que a pressão de vento foi reduzida drasticamente quando a aumentada densidade das edificações de entorno (SHIRZADI *et al.*, 2019).

### 3.1.4 Fontes de umidade

A parte de requisitos gerais da Norma Brasileira de Desempenho de Edificações habitacionais define que:

“A exposição à água de chuva, à umidade proveniente do solo e aquela proveniente do uso da edificação habitacional devem ser consideradas em projeto, pois a umidade acelera os mecanismos de deterioração e acarreta a perda das condições de habitabilidade e de higiene do ambiente construído” (ABNT NBR 15.575-1, 2021, p. 20).

A água está envolvida em mecanismos destrutivos, como alterações dimensionais, corrosão, ataques biológicos, lixiviação, eflorescências e congelamento e pode provocar a perda do isolamento térmico, manchamentos e a degradação dos acabamentos internos (ROBINSON; BAKER, 1975).

A lixiviação é um fenômeno mecânico e químico, caracterizado pelo transporte da dissolução da pasta do aglomerado (cal, cimento ou outros) para o exterior das peças, o que aumenta a porosidade, desestrutura o material, promovendo alterações que vão desde a diferença de tonalidade em um mesmo plano de um revestimento até a completa desagregação do material, diminuindo a resistência mecânica e tornando-o pulverulento (RECENA, 2014).

A chuva e a umidade (do ar e dos materiais) representam importantes fatores para o manchamento das fachadas, sendo que regiões chuvosas e costeiras são mais afetadas por esse tipo de problema (GENEL, 2005).

#### 3.1.4.1 Umidade relativa do ar

O vapor d'água é o componente mais importante na determinação do tempo e do clima, mesmo que represente apenas 2% da massa total da atmosfera e 4% do seu volume. A quantidade de vapor d'água varia em função da localidade e do transcurso do tempo. Podem ser utilizadas diversas metodologias para expressar o conteúdo de umidade atmosférica, sendo que a Umidade Relativa é a mais popularmente utilizada por ser facilmente obtida e computada. A umidade relativa é definida como a razão entre o conteúdo real de umidade de um determinado volume de ar e a quantidade de umidade que este mesmo volume de ar pode conter sob as mesmas condições de temperatura e pressão quando saturado (AYOADE, 1996).

A quantidade de máxima de vapor de água que o ar pode conter depende predominantemente da sua temperatura, sendo que quanto mais elevada for a temperatura, maior é a capacidade do ar em conter vapor de água. O ar é denominado saturado quando o teor de umidade contida no

ar é máximo (SATO *et al.*, 2002). Nesse sentido, Ayoade (1996) afirma que a Umidade Relativa varia inversamente com a temperatura e que esta medida indica o quão próximo da saturação está o ar.

Qualquer massa de vapor de água que for acrescida ao ar atmosférico, mantendo-se a temperatura constante, fará com que Umidade Relativa seja elevada, podendo inclusive atingir a saturação. A partir da condição de saturação, qualquer acréscimo de massa de vapor a uma temperatura constante (ou uma diminuição de temperatura mantendo a quantidade de vapor) fará com que excesso de vapor contido no ar seja condensado (AYOADE 1996; SATO *et al.*, 2002).

O fenômeno da condensação pode ocorrer através da variação independente ou associada dos seguintes fatores: volume de ar, temperatura, pressão ou umidade (AYOADE, 1996). No caso específico dos revestimentos de fachada, ocorre a condensação com o resfriamento da massa de ar por contato com o revestimento, geralmente nos períodos noturnos, quando a superfície da fachada apresenta temperaturas inferiores à do ar atmosférico. Denomina-se ponto de orvalho a temperatura abaixo da qual passa a ocorrer o fenômeno da condensação (AYOADE 1996; SATO *et al.*, 2002).

A umidade relativa e a pressão de vapor de água são fatores importantes para a absorção e armazenamento de água na região higroscópica de revestimentos porosos (FANG *et al.*, 2021). A higroscopicidade pode ser definida como a capacidade dos materiais de construção tem de absorver o vapor de água do ambiente, sendo que a capacidade higroscópica está relacionada com a capacidade dos materiais tanto em absorver como em liberar o vapor de água para o ambiente ao longo de um determinado período de tempo (SANTOS; FARIA, 2015; COELHO, 2020).

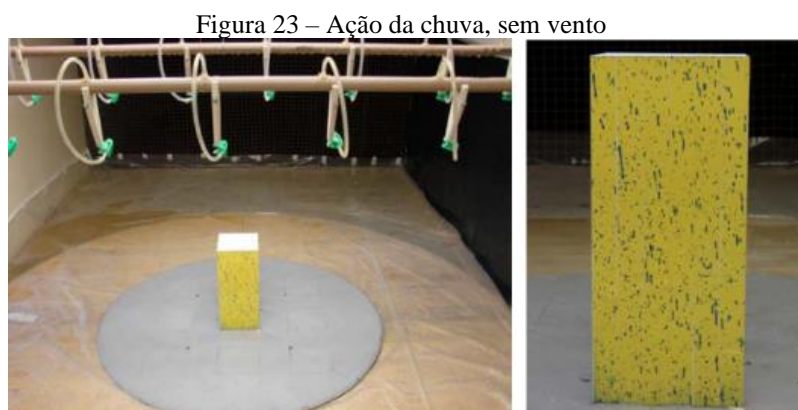
Na realização de um experimento com concretos com materiais biológicos, Seng *et al.* (2017), identificaram que para uma umidade relativa do ar abaixo de 95% o principal processo de transporte de umidade tende a ser potencializado pelo gradiente de temperatura, favorecendo o fenômeno da higroscopicidade; acima de 95% o principal processo de transporte de umidade passa a ser a capilaridade, em função da mudança do estado físico da água para líquido.

### 3.1.4.2 Chuva dirigida

O desempenho higrotérmico e a durabilidade das fachadas são afetados pela exposição às chuvas, que são as principais fontes de umidade. Os estudos de chuva dirigida aplicados à construção civil envolvem duas partes: o efeito da chuva dirigida sobre as paredes da edificação antes do impacto da gota de chuva no revestimento; e avaliação da resposta das paredes quando expostas à chuva, que ocorre após o impacto da gota de chuva (BLOCKEN *et al.*, 2012).

Na análise “pré-impacto”, a intensidade da chuva dirigida incidente sobre uma fachada é dada por uma ampla diversidade de fatores: geometria urbana, geometria do edifício, geometria da fachada, detalhamento da fachada, posição na fachada do edifício, além dos parâmetros meteorológicos, como a velocidade e direção do vento, intensidade da chuva e dimensão da gota (BLOCKEN *et al.*, 2012). Nesse sentido, a chuva dirigida é altamente influenciada pelo regime de vento nos meses chuvosos do ano (BAUER *et al.*, 2020).

A ocorrência concomitante do vento e da chuva é denominada chuva dirigida (KUBILAY *et al.*, 2014). Essa ação conjunta gera uma componente horizontal de velocidade dada pela ação do vento, fazendo com que a precipitação ocorra de maneira oblíqua (BLOCKEN *et al.*, 2012). Sem a ação do vento a precipitação apresenta basicamente o componente vertical de aceleração, apenas provocando poucos respingos sobre a fachada, tal qual observado em experimento por Poyastro (2011, Figura 23) e mencionado por Robinson e Baker (1975) e Petrucci (2000). Dessa forma, para que a chuva atinja as superfícies verticais das fachadas é necessário que esta seja conduzida pelo vento (GIONGO, 2007).

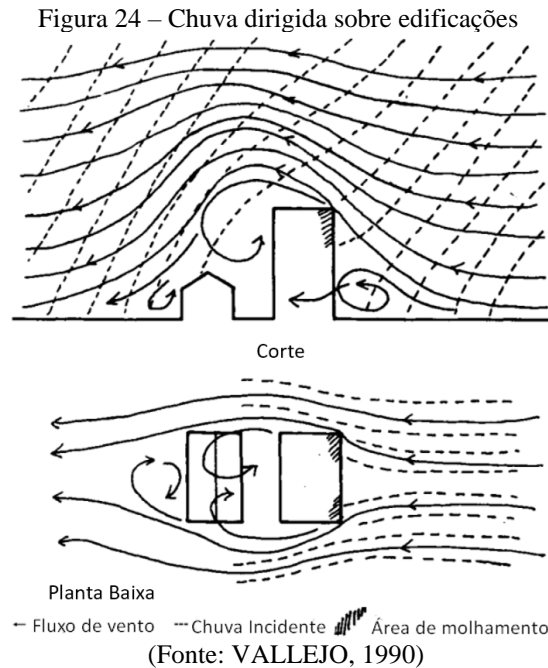


(Fonte: POYASTRO, 2011)

De maneira geral, as precipitações atuam por dois mecanismos fundamentais: o escoamento superficial e o respingo (GENEL, 2005). O comportamento da chuva que atinge uma fachada e escorre por sua superfície pode ser descrito através do conhecimento da angulação da precipitação, da intensidade e da duração da chuva, da dimensão característica das gotas e das condições de vento predominante (EL SHIMI, 1979). A precipitação sobre as fachadas é afetada pelo tamanho e pelo ângulo de queda das gotas, sendo que, em geral, as gotas de menores dimensões são mais propensas a serem desviadas das edificações pelos escoamentos de ar que passam no entorno (ROBINSON; BAKER, 1975). Nesse sentido, para que ocorra um desvio angular da gota em relação a um plano vertical a velocidade do vento deve ser tanto maior quanto for a dimensão da gota - dessa forma, a combinação entre a dimensão da gota e velocidade do vento determinará o ângulo de incidência da chuva sobre a fachada (MARSH, 1977).

As gotas de diferentes tamanhos respondem de maneira diferente para as variações de velocidade do vento, sendo que as menores gotas do espectro da chuva transitam através dos vórtices de vento e, devido à baixa inércia, consegue entrar em contato com a fachada. Gotas de dimensão média no espectro da chuva podem não atingir a fachada devido ao efeito de abrigo provocado por edificações a montante da fachada analisada, enquanto as maiores gotas do espectro da chuva sofrem menos desvios devido a uma trajetória mais vertical (KUBILAY *et al.*, 2014). A faixa (ou espectro) dimensional do tamanho de gotas é um importante fator e foi controlada inclusive nos experimentos realizados por Poyastro (2011) e Zucchetti (2016).

Vallejo (1990) afirma que a quantidade de água que atinge uma fachada representa menos da metade da quantidade de água que atravessa uma seção de ar com dimensões equivalentes e em uma posição semelhante, concluindo que isso ocorre devido a desvios de trajetória causados pela interação entre escoamentos de vento de diferentes velocidades, causados principalmente devido à interferência de obstáculos. Para o autor, a chuva atinge principalmente a parte superior e as bordas laterais da fachada nos casos de edificações isoladas com vento incidindo ortogonalmente à fachada, enquanto nas partes inferiores das fachadas a trajetória das chuvas são quase paralelas à superfície, diminuindo o molhamento dessas áreas (Figura 24).



Há a possibilidade de ser realizada uma estimativa dos valores de chuva dirigida para locais abertos com dados da precipitação que cai em um plano horizontal e a velocidade do vento. Outros fatores, como a taxa de precipitação, velocidade terminal e tamanho das gotas, devem ser considerados para estabelecer com maior precisão a relação entre a precipitação sobre um plano vertical e um plano horizontal (NEWMAN<sup>6</sup>, 1987, apud. PETRUCCI, 2000). Mesmo assim, é possível realizar uma aproximação através da Equação 2:

$$Rv = 200 \times Rh \times V \times \cos \theta$$

Equação 2 - Precipitação de um plano desobstruído vertical livre em mm (NEWMAN, 1987)

Em que:

$Rv$  = Precipitação de um plano desobstruído vertical livre (mm)

$Rh$  = Precipitação de um plano horizontal (mm)

$V$  = Velocidade do vento (m/s)

$\theta$  = ângulo entre a velocidade do vento e a normal do plano vertical considerado

<sup>6</sup> NEWMAN, A. J. Microclimate and its effect on durability. **Chemistry and Industry**, London Society of Chemical Industry, n 17, p. 583-593, 1987

Marsh (1977) avalia a severidade da exposição à chuva dirigida estabelecendo uma métrica a partir da Equação 3, que fornece como resultado um índice de chuva dirigida anual (ICDa), o qual indica a quantidade total de chuva dirigida que incidirá sobre um pano vertical perpendicular ao vento durante um ano:

$$ICDa = P \times V/1000$$

Equação 3 - Índice de chuva dirigida anual em m<sup>2</sup>/s (MARSH, 1977)

Em que:

ICDa= Índice de chuva dirigida anual (m<sup>2</sup>/s)

P= Precipitação pluviométrica anual (mm)

V= Velocidade média anual do vento (m/s)

O ICDa é expresso em m<sup>2</sup>/s e, segundo Marsh (1977), um ICDa de 1m<sup>2</sup>/s equivale a aproximadamente 200 litros de chuva que incide sobre uma superfície vertical de 1m<sup>2</sup> durante um ano. Chand e Bhargava (2002) propõe a classificação do ICDa em quatro faixas, conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Faixas de agressividade de chuva dirigida

Faixa de ICDa (m <sup>2</sup> /s)	Grau de Agressividade
0 a 3	Exposição Protegida
3 a 7	Exposição Moderada
7 a 11	Exposição Alta
Acima de 11	Exposição Severa

(Fonte: CHAND; BHARGAVA, 2002)

Uma classificação anterior, apresentada por Marsh (1977) indicava três categorias de faixa de agressividade, sendo que um ICDa acima de 7m<sup>2</sup>/s já seria considerada uma exposição severa. Nesse sentido, o autor indica que as classes protegida e moderada deveriam ser classificadas em um nível de agressividade superior sempre que a área avaliada estivesse até 8 km próximo do mar ou grandes estuários.

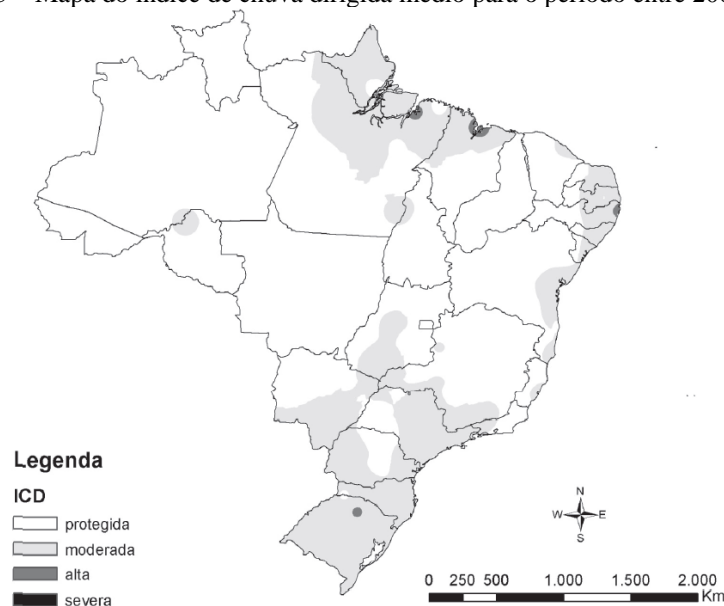
Morelli *et al.* (2012), afirmam que as condições de entorno da edificação e a própria edificação não são consideradas nas classificações de agressividade, bem como demais aspectos das condições brasileiras devem ser avaliados e validados, pois a variedade da geomorfologia costeira e continental podem causar variações nos ventos.

Deve-se observar que edifícios altos que se destacam das demais edificações do entorno ou situados sobre colinas ou elevações devem ser enquadrados em um grau mais severo do que o calculado, caso a classificação do ICDA indique exposição protegida ou moderada (PETRUCCI, 2000).

Van Goethen (2014) indica que a severidade de um evento de chuva com duração de 4 horas não é determinada não pela intensidade média do evento, mas sim pela presença de um pico de intensidade. Já para um evento de chuva com duração de 12 horas, a severidade se dá pela própria duração do evento e, conseqüentemente, pela quantidade de chuva dirigida incidente na fachada.

Um mapa com o índice de chuva dirigida médio para o período compreendido entre 2000 e 2010 foi elaborado por Morelli *et al.* (2012). Neste mapa (Figura 25) é possível identificar que a severidade média anual varia entre moderada em todo o território nacional, com exceção de quatro pontos que apresentam severidade alta.

Figura 25 – Mapa do índice de chuva dirigida médio para o período entre 2000 e 2010



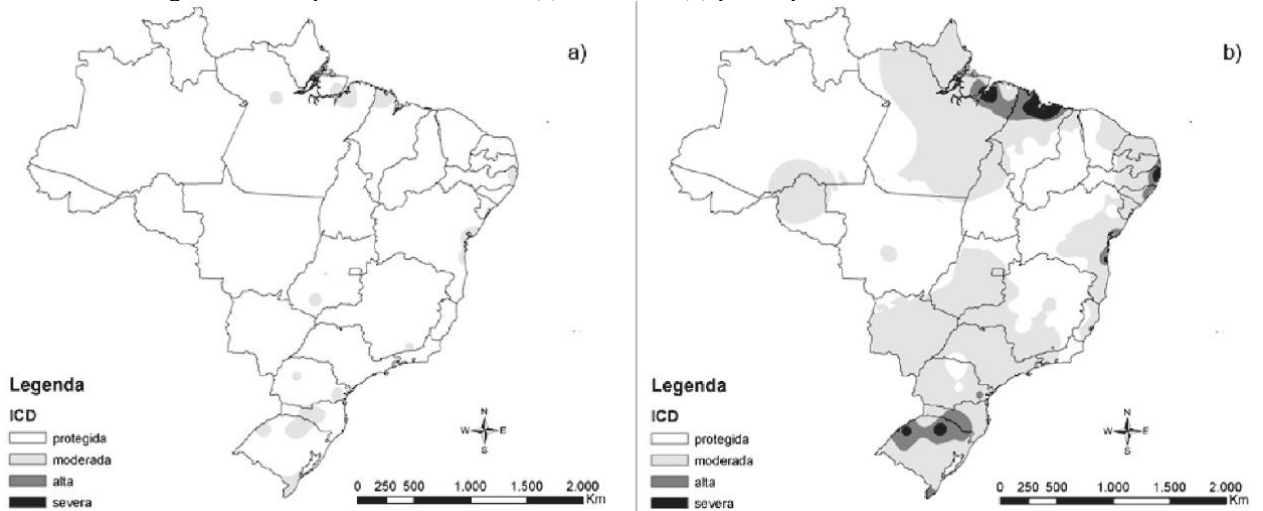
(Fonte: MORELLI *et al.*, 2012)

Também foi elaborado por Morelli *et al.* (2012) dois mapas que apresentam os extremos mínimos (Figura 26 a) e máximos (Figura 26 b) também para o período de 2000 até 2010, sendo possível observar que as regiões costeiras apresentam um aumento na severidade do ICDA, assim como a serra entre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina apresentam o maior



aumento de severidade, possivelmente causada, segundo os autores, pela entrada das frentes frias vindas do sul do continente, as quais aumentam a velocidade do vento e das chuvas.

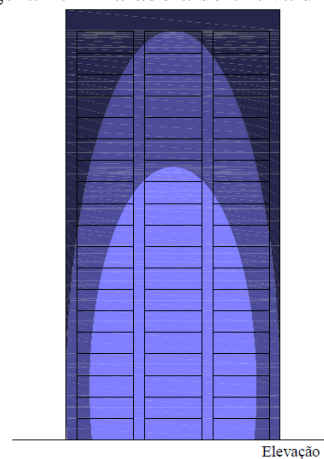
Figura 26 – Mapa do ICDA mínimo (a) e máximo (b) para o período entre 2000 e 2010



(Fonte: MORELLI *et al*, 2012)

A interação entre a fachada exposta e a chuva dirigida pelo vento gera um padrão de molhamento em forma de parábola, como descrito em trabalhos de observação de edificações em escala real (COUPER, 1972 apud ROBINSON; BAKER, 1975), trabalhos com coletores de chuva em fachadas e também trabalhos com modelos reduzidos em túnel de vento e camada limite com simulação de chuva também em escala (PETRUCCI, 2000; MELO JR, 2010). Nesse sentido, Petrucci (2000) conclui que a incidência da chuva sobre uma fachada não ocorre de maneira uniforme, com o topo e esquinas da fachada exposta apresentando maior deposição inicialmente, enquanto as áreas mais abaixo aparentam estar relativamente secas.

Figura 27 – Parábola de chuva dirigida



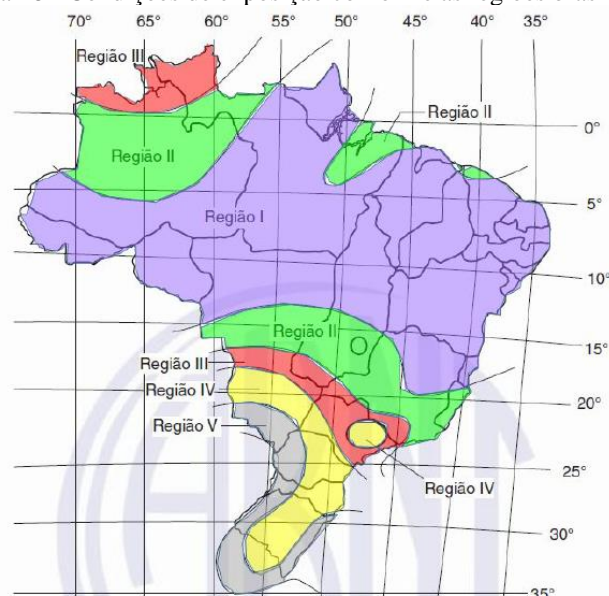
(Fonte: COUPER, 1972 apud MELO JR, 2010)

Mesmo nos locais mais expostos à chuva dirigida nas fachadas (cantos superiores das edificações) a intensidade da chuva dirigida é significativamente menor do que a intensidade que passaria por um plano vertical imaginário de mesma altura, mas sem a presença da edificação. Este fenômeno é denominado “Efeito de Bloqueio de Vento” e é mais evidente quanto mais alta e larga for a edificação (BLOCKEN; CARMELIET, 2006). Esse termo se refere à perturbação no padrão do escoamento de vento à montante provocando uma diminuição no componente de velocidade do vento (BLOCKEN *et al.*, 2012).

Como o vento está associado à maioria das tempestades de chuva, isso aumenta a exposição das superfícies voltadas (ortogonais) ao vento. O depósito da chuva e seus escoamentos na fachada estão associados com a exposição da mesma à chuva dirigida e sua variação direcional ao longo do tempo. É importante destacar que a exposição das fachadas à chuva varia conforme a localização da edificação e também ao longo do ano, o que faz com que determinadas superfícies estejam mais expostas ao fenômeno do que outras. Além disso, o depósito de partículas de chuva não ocorre de maneira uniforme, sendo que as partes mais altas e as laterais da edificação sofrem maior deposição. (ROBINSON; BAKER, 1975).

A parte 4 da NBR 15.575 (ABNT, 2021) apresenta um mapa das condições de exposição à chuva e vento das regiões brasileiras, o qual é bastante similar ao mapa das isopletas presente na NBR 6123 (ABNT, 1988). O mapa, apresentado na Figura 28, categoriza o território em cinco regiões de exposição, as quais foram coloridas de modo a facilitar a visualização.

Figura 28 - Condições de exposição conforme as regiões brasileiras



(Fonte: adaptado de ABNT, 2021)

As condições de exposição apresentadas pela NBR 15.575 (2021) são a pressão estática de vento em Pascal (Pa), variando de 10 a 50 Pa, e a vazão de água em litros por minuto e por área, com valor único de 3 (L/min/m<sup>2</sup>), estão indicadas na Tabela 2 retirada da norma, com correspondência de cores da figura 28. As condições de exposição fornecidas pela tabela 2 são utilizadas em ensaios de estanqueidade à água de SVVE.

Tabela 2 – Condições de ensaio de estanqueidade à água de SVVE

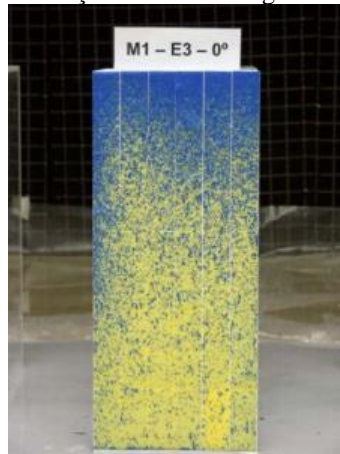
Região do Brasil	Condições de ensaio de paredes	
	Pressão estática Pa	Vazão de água L/min/m <sup>2</sup>
I	10	3
II	20	
III	30	
IV	40	
V	50	

(Fonte: adaptado de ABNT, 2021)

O padrão de molhamento das fachadas é afetado pelo ângulo de incidência do vento sobre a edificação, podendo criar áreas de proteção devido aos volumes da edificação, sendo que o escoamento de ar incidindo perpendicularmente à fachada é o que contribui mais para o molhamento das superfícies. Outro fator que contribui para o molhamento é o entorno da edificação, conforme concluído por Poyastro (2011):

- i. Quando a edificação está situada em uma região com edificações de mesma altura, a faixa molhada é maior (mais larga) na parte superior da edificação, o que pode ser identificado na Figura 29 pela coloração azul do modelo, enquanto as áreas próximas à base sofrem menor influência, mantendo a coloração amarelada original do modelo.

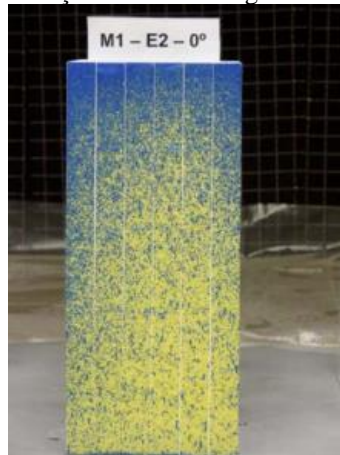
Figura 29 – Molhamento em edificação situada em região com entorno com mesma altura



(Fonte: POYASTRO, 2011)

- ii. Quando a edificação está situada em um contexto em que as edificações do entorno são mais baixas (metade da altura) o molhamento ocorre de maneira mais distribuída (Figura 30).

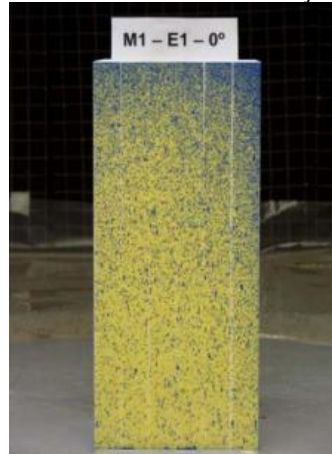
Figura 30 – Molhamento em edificação situada em região com entorno com metade da altura



(Fonte: POYASTRO, 2011)

- iii. Edificações isoladas (em contrassenso) apresentam menor percentual de molhamento, concluindo-se assim, que o entorno agrava o molhamento das fachadas devido à ação da chuva dirigida, ao invés de promover a proteção da mesma (Figura 31).

Figura 31 – Molhamento em edificação isolada



(Fonte: POYASTRO, 2011)

Nas três conclusões apresentadas por Poyastro (2011), pode ser evidenciado o Efeito de Bloqueio do Vento, o qual provoca a diminuição da quantidade de área molhada na parte inferior e central da fachada. Para Blocken e Carmeliet (2006) esse efeito também será mais evidente à medida que a intensidade da chuva dirigida diminui – o que foi confirmado experimentalmente por Poyastro (2011), que aplicou sobre o modelo uma maior velocidade do vento (que aumenta o ICDA), o que provocou um molhamento em quase a totalidade da fachada, com a região central inferior sendo quase imperceptivelmente menos afetada, conforme Figura 32. A velocidade do vento neste ensaio foi da ordem de 33 km/h na região topo da edificação em escala natural, enquanto os demais ensaios realizados por Poyastro (2011) foram da ordem de 25 km/h na região do topo da edificação.

Figura 32 - Modelo exposto à chuva dirigida com vento de velocidade elevada



(Fonte: POYASTRO, 2010)

Poyastro (2011), Kubilay *et al.* (2017) e Cho *et al.* (2020) apresentaram conclusões bastante similares no que diz respeito à correlação entre o aumento da velocidade do vento e o aumento do molhamento da fachada, indicando que a velocidade do vento influenciou mais significativamente o aumento da quantidade de água da chuva coletada sobre a fachada do que um aumento na intensidade da precipitação.

#### 3.1.4.3 Escorrimento da chuva pela superfície das fachadas

No estudo da resposta das paredes é importante a análise dos fenômenos de superfície, como respingos, saltos, adesão, espalhamento e absorção das gotas de chuva, formação de filme e escoamento, absorção do filme e distribuição da umidade na parede (BLOCKEN *et al.*, 2012).

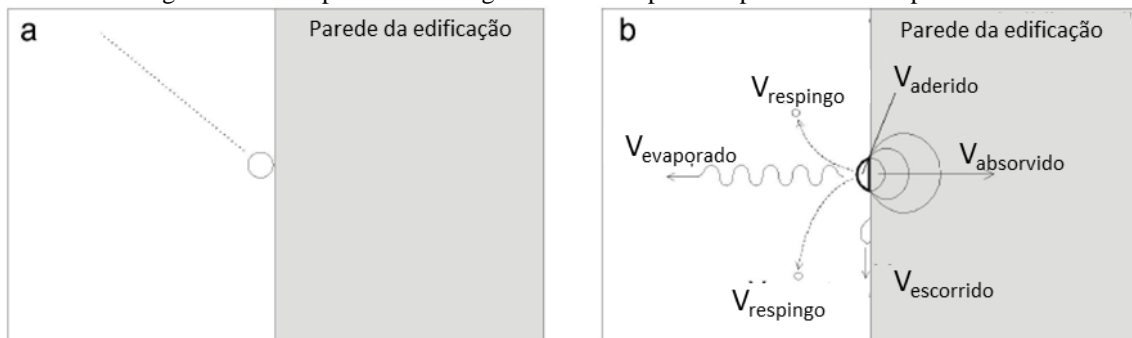
A água da chuva atinge a superfície da edificação e se fragmenta, podendo ser refletida e retornar para o campo da chuva, migrar para outros pontos próximos na fachada, escorrer como um fino filme ou também ser absorvida pela superfície do revestimento (ROBINSON; BAKER, 1975). Vallejo (1990) acrescenta que a água que não é refletida acaba ficando presa à superfície, sendo parcialmente absorvida por capilaridade, parcialmente adsorvida por tensão superficial e, quando o material fica saturado, pode vir a escorrer pela fachada.

A intensidade da chuva dirigida que incide sobre uma superfície é parcialmente dissipada no impacto da gota sobre o revestimento através de respingos ( $V_{\text{respingo}}$ ) que são refletidos da superfície e da evaporação da água ( $V_{\text{evaporado}}$ ) que ocorre durante todo o evento de uma chuva. Outra parte se espalha pela superfície, sendo absorvida ( $V_{\text{absorvido}}$ ) ou permanecendo aderida ( $V_{\text{aderido}}$ ) no revestimento. A espessura do filme de água aumenta à medida que diversas gotas se aglutinam, fazendo com que as forças gravitacionais eventualmente excedam as forças de tensão superficial, gerando o escoamento ( $V_{\text{escoado}}$ ) na superfície (BLOCKEN *et al.*, 2012; STRAUBE, 1998). Este processo está apresentado na Figura 33 e o balanço de massa de uma gota que impacta a superfície está expresso na Equação 4 .

$$V_{\text{gota}} = V_{\text{respingo}} + V_{\text{evaporado}} + V_{\text{absorvido}} + V_{\text{aderido}} + V_{\text{escoado}}$$

Equação 4 – Balanço de massa de uma gota que interage com uma superfície

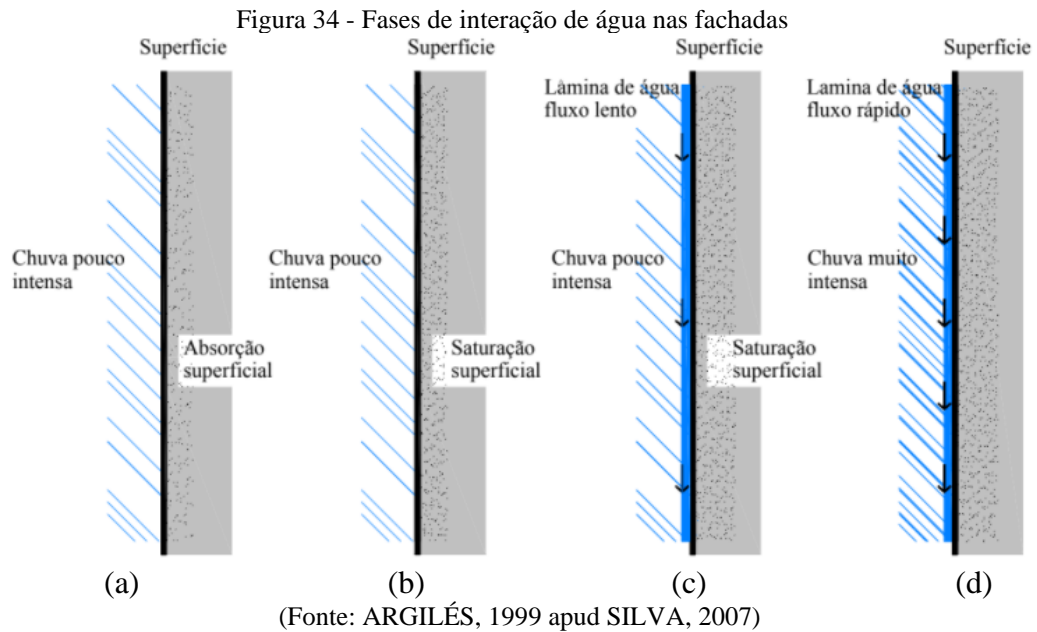
Figura 33 – Comportamento da gota de chuva após o impacto sobre a superfície

(Fonte: BLOCKEN *et al.*, 2012)

A chuva escorre pela fachada formando uma fina película, que é muito sensível às irregularidades da superfície. Essa película de água atua no manchamento do revestimento, podendo facilitar a absorção das partículas de sujeira pela porosidade, provocar um processo de erosão físico-química na superfície (criando caminhos preferenciais para o escoamento) e, principalmente, provocar efeitos de lavagem na fachada, que são responsáveis por espalhar parcial ou totalmente as partículas de sujeira na fachada. (VALLEJO, 1990). De maneira sucinta, o escoamento carrega a sujeira acumulada e a espalha sobre a fachada e também cria zonas úmidas para os agentes biológicos se desenvolverem (GENEL, 2005).

O escoamento sobre a fachada apresenta quatro estágios distintos de comportamento: a absorção por capilaridade é mais pronunciada quando a fachada é submetida a chuvas pouco intensas (a); os poros do material ficam saturados após determinado período (b); com a superfície saturada começa a ser evidenciada a formação de uma fina lâmina de água, o que aumenta a absorção de água pela superfície (c); por fim, o escoamento torna-se mais intenso juntamente com o aumento da intensidade da chuva (d). A pressão do vento sobre o revestimento sob as condições descritas de escoamento sobre a superfície da fachada também impacta na penetração de água no revestimento (ARGILÉS, 1999<sup>7</sup> apud SILVA, 2007).

<sup>7</sup> ARGILLÉS, J. M. J et GARCIA, A. A. G. **Patología y técnicas de intervención: fachadas y cobiertas**. Madrid: Munilla- Lérvia, 1999.



Van Goethen (2014) concluiu que o escoamento superficial ocorrerá dentro de qualquer circunstância para edifícios com alto grau de exposição, independente do coeficiente de absorção do revestimento. Para chuvas com duração menor do que 4 horas em edificações protegidas pelo efeito do abrigo do entorno com um revestimento com coeficiente de absorção elevado tendem a não formar escoamento superficial. Já para eventos de 12 horas, a formação do escoamento ocorrerá independente da condição de exposição da edificação e do coeficiente de absorção do revestimento.

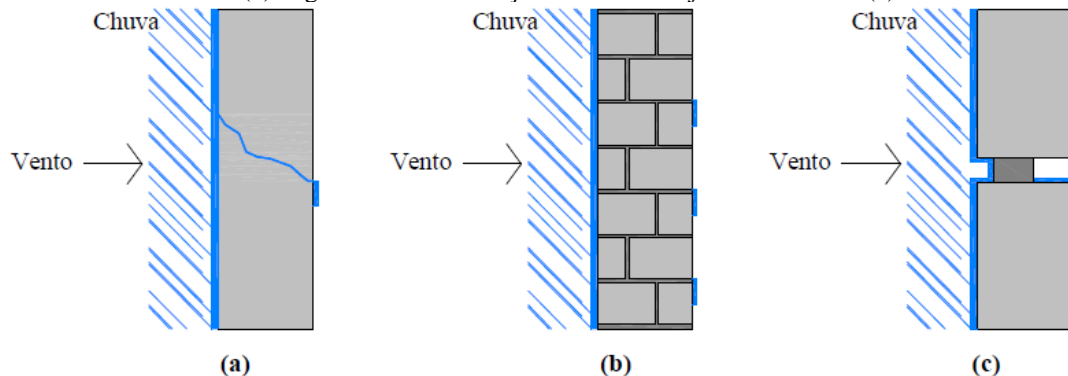
Na resposta do revestimento à chuva dirigida a quantidade de água drenada da superfície é importante, pois está disponível para a penetração e é a principal causa de manchamentos. A quantidade de água armazenada por absorção ou aprisionada no revestimento é importante pois o aumento do teor de umidade no revestimento é um dos principais fatores de deterioração. A quantidade de água que penetra através do revestimento é importante pois é uma fonte de umidade para os materiais dentro da edificação (STRAUBE, 1998).

Além disso, em função das características do escoamento de água e dos caminhos preferenciais para o escoamento, a lavagem da fachada pode ser limpa ou suja. Os caminhos preferenciais do escoamento decorrem dos obstáculos (detalhes construtivos de fachadas) e da rugosidade da superfície (VALLEJO, 1990).



Os efeitos da pressão do vento sobre o escoamento superficial também são fatores importantes na interação do escoamento superficial com as fachadas. Os mesmos foram descritos por Argilés (1999, apud SILVA, 2007), o qual aponta que a pressão de vento atua conjuntamente à presença da força de gravidade e capilaridade em revestimentos com propriedades porosas (Figura 35).

Figura 35 – Tipos de infiltração em paredes – Infiltração de água por gravidade associada à capilaridade e pressão do vento (a). Infiltração de água através de meio poroso associada à capilaridade e à ação da pressão do vento (b). Água da chuva sob ação do vento em junta defeituosa (c)



(Fonte ARGILÉS, 1999 apud SILVA, 2007 MELO JR, 2010)

## 3.2 FATORES INTRÍNSECOS

Fatores intrínsecos são relativos às características formais das fachadas, como a geometria da edificação, os detalhes da fachada, a textura do revestimento e os materiais empregados (PETRUCCI, 2000).

### 3.2.1 Geometria das fachadas

As paredes externas devem garantir a estanqueidade total do ambiente interior quando submetidas à ação da chuva dirigida (BAUER, 1987). De maneira geral, a falta de detalhamento, a escolha inadequada de materiais, aplicação inadequada e a não existência de manutenção como uma das principais causas de manifestações patológicas em fachadas (FLORES-COLEN; BRITO, 2010). A NBR 13.755 (ABNT, 2017) introduz o conceito de projeto de revestimento de fachada (PRF) como um “conjunto de informações gráficas e descritivas sobre os detalhes construtivos do revestimento”.

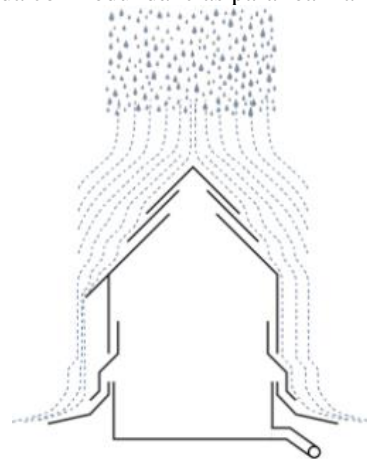
A tomada de decisão influencia não somente nos aspectos estéticos, como também no desempenho da fachada quando submetida à fatores de deterioração, como a chuva e a

deposição de partículas (ZUCCHETTI, 2016). Nesse sentido, justamente as decisões ou escolhas feitas na etapa de projeto, entre outros fatores, é que podem conduzir à deterioração acelerada da fachada (PETRUCCI, 2000).

O arquiteto francês Auguste Perret (COLLINS, 1959<sup>8</sup>, apud ROBINSON; BAKER, 1975) defendia que as edificações devem ser providas com os “órgãos” que as protejam contra as ações climáticas, ou seja, que se deve dotar a envoltória das edificações com os detalhes construtivos que proporcionem um desempenho adequado ao contexto em que a edificação está inserida.

De modo geral, é importante que os sistemas de vedação vertical externa apresentem redundâncias, como esquematizado na Figura 36, que impeçam a entrada de água nos ambientes internos (KESIK<sup>9</sup>, 2016).

Figura 36 - Sistema de fachada com redundâncias para realizar a proteção dos ambientes internos



(Fonte: KESIK, 2016)

### 3.2.1.1 Volumetria e formas das Fachadas

O zoneamento urbano é um dos principais instrumentos de planejamento das cidades e tem como principais objetivos o controle da densidade de ocupação do solo e evitar conflitos entre usos incompatíveis fazendo uso dos mecanismos de limitação de tamanho e da área construída

<sup>8</sup> COLLINS, P. **The vision of a New Architecture**. New York, Horizon Press, 1959.

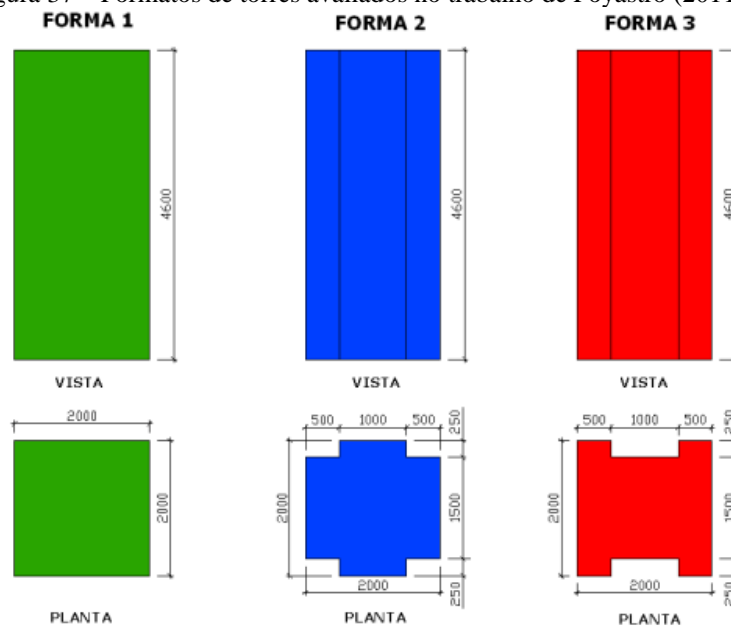
<sup>9</sup> KESIK, T. J. **Moisture Management Strategies**. Whole Building Design Guide. 2016.

<https://www.wbdg.org/resources/moisture-management-strategies> Visto em (07 de julho de 2021).

dos lotes e das edificações (entre outros mecanismos) (NETTO; SABOYA, 2010). Essa limitação geométrica é geralmente representada nos Planos Diretores das cidades por tabelas de coeficientes de aproveitamento, os quais acabam por ser responsáveis pelo volume final construído em uma região do espaço urbano, sendo que a manifestação mais evidente desse controle é a altura das edificações (RIBAS; MOURA, 2015). Essas restrições impostas pelos planejamentos urbanos das cidades delimitam um conjunto de volumetrias que podem ser executadas em um determinado espaço geográfico.

Poyastro (2011) realizou um estudo para avaliar o desempenho de edificações com diferentes formatos quando submetidos à ação da chuva dirigida. Os formatos escolhidos pela autora para serem avaliados levaram em consideração as tipologias mais comuns de planta baixa das torres que estavam sendo lançados, em construção ou entregues na época do estudo (Figura 37).

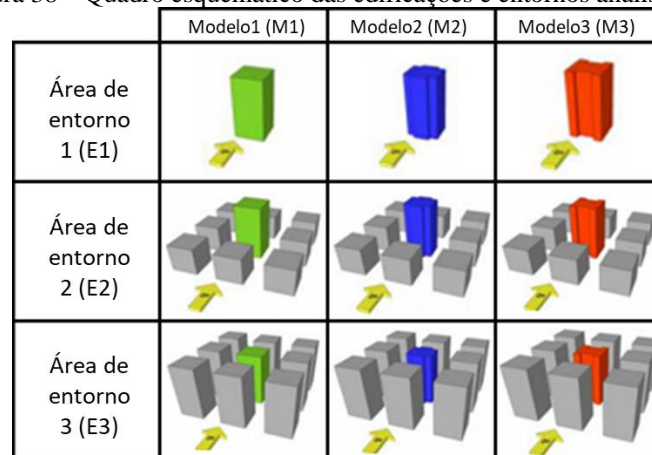
Figura 37 – Formatos de torres avaliados no trabalho de Poyastro (2011).



(Fonte: POYASTRO, 2011)

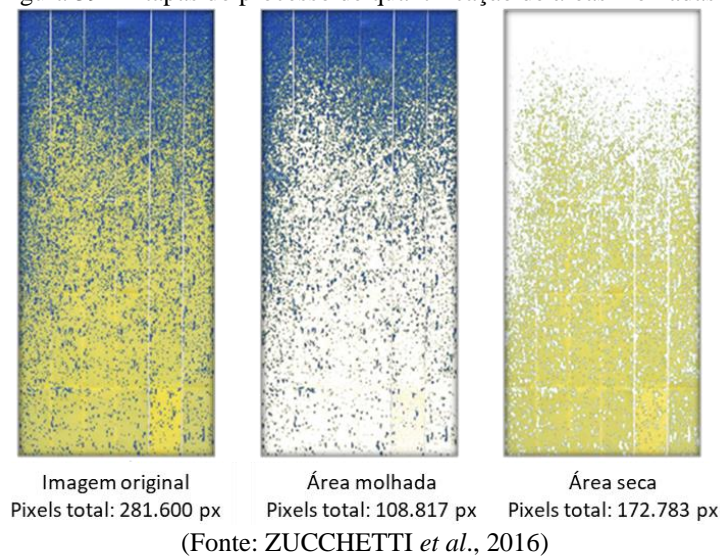
Zucchetti *et al.* (2016) procedeu com a quantificação dos resultados dos ensaios de chuva dirigida obtidos no trabalho realizado por Poyastro (2011). Para isso foram analisados os resultados das três formas de torre (prismática, em cruz e “H”) inseridas em três entornos diferentes (edificação isolada, edificações de entorno com metade da altura da edificação analisada e entorno com altura igual à da edificação analisada). A Figura 38 apresenta um quadro resumo das análises realizadas.

Figura 38 – Quadro esquemático das edificações e entornos analisados

(Fonte: ZUCCHETTI *et al.*, 2016)

A quantificação realizada por Zucchetti *et al.* (2016) foi realizada em três etapas: padronização da quantidade total de pixel das imagens e definição do tamanho padrão para todas as imagens; seleção da área a ser utilizada como referência, separação das áreas molhadas (coloração azul) e secas (coloração amarela) e obtenção da quantidade de pixels para cada área; por fim, deletar a área selecionada na etapa anterior e anotar a quantidade de pixels restantes (Figura 39).

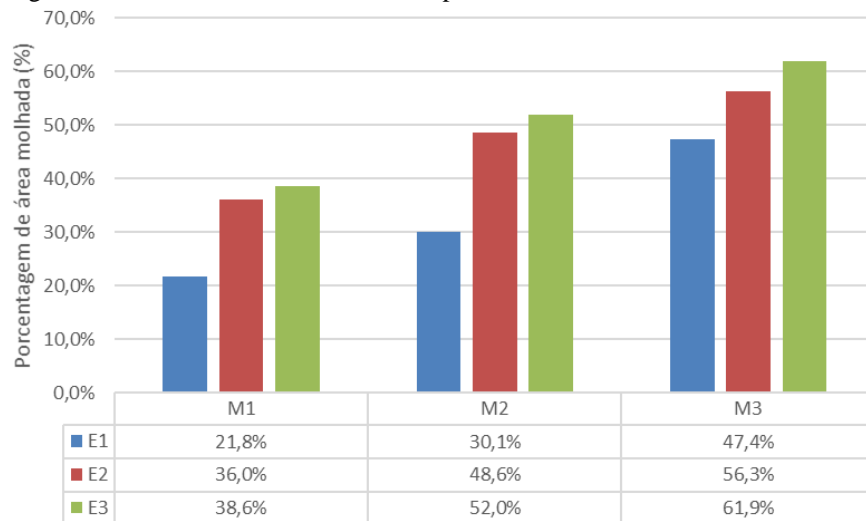
Figura 39 – Etapas do processo de quantificação de áreas molhadas



Ao quantificar os resultados das áreas de molhadas (

Figura 40), é possível observar que o modelo 3 com base em formato de ‘H’ apresentou maior porcentagem de área molhada para todas as situações de entorno (ZUCCHETTI *et al.*, 2016).

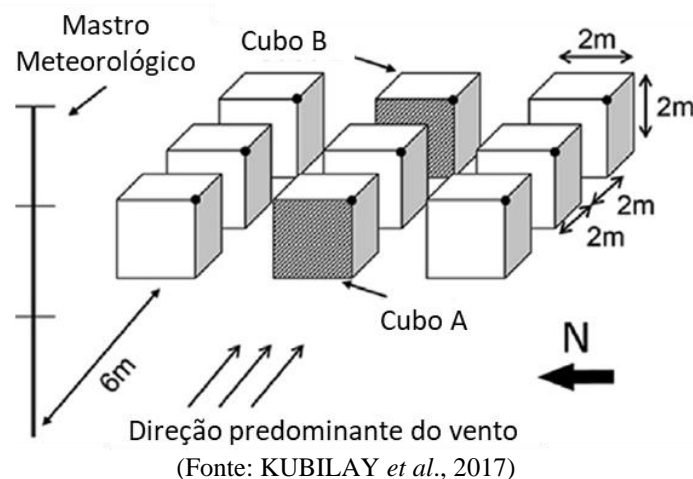
Figura 40 – Percentual de áreas afetadas pelo molhamento dos modelos avaliados



(Fonte: ZUCCHETTI *et al.*, 2016)

Kubilay *et al.* (2014) apresentaram medições de campo para uma configuração genérica idealizada de edificações dispostas em uma matriz de 9 edificações cúbicas de iguais dimensões em que foram analisadas as edificações cúbicas A e B (Figura 41). Para medir as condições do vento incidente no arranjo de edificações foi utilizado um mastro meteorológico (também indicado na Figura 41).

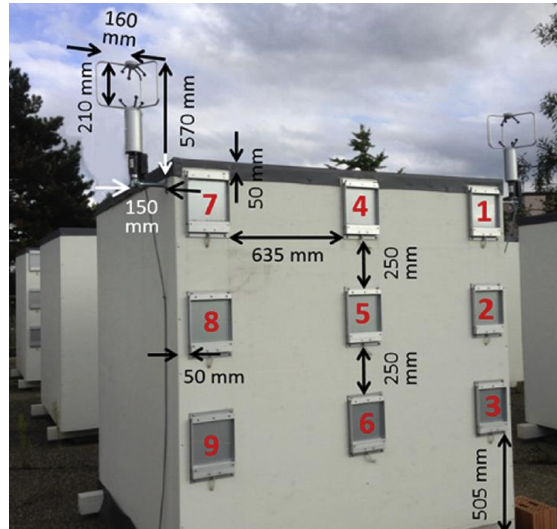
Figura 41 – Geometria do arranjo do modelo de edificações cúbicas para medições de campo de chuva dirigida



As condições de exposição foram determinadas por Kubilay *et al.* (2017) através do posicionamento de dois anemômetros ultrassônicos nos vértices superiores dos cubos A e B. Para determinar a quantidade de água foram posicionados 9 medidores de chuva dirigida na fachada dos cubos analisados. Pode se perceber conforme a Figura 42 que os medidores no

cubo A ficaram voltados para o lado externo do arranjo de cubos, enquanto os medidores do cubo B, ficaram voltados ao lado interno do arranjo de cubos.

Figura 42 – Posicionamento dos anemômetros ultrassônicos e dos medidores de chuva dirigida



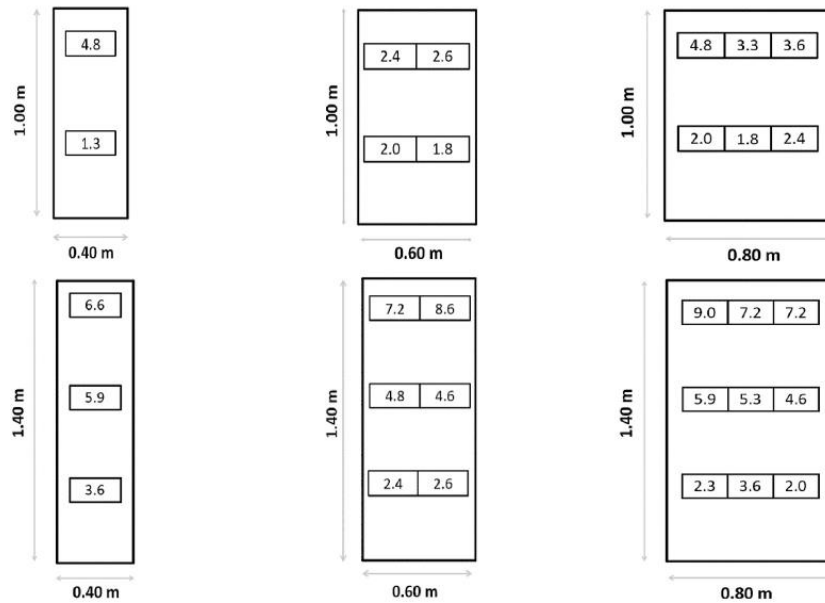
(Fonte: KUBILAY *et al.*, 2017)

Para um evento de chuva dirigida com vento perpendicular às fachadas, tanto para o cubo A, quanto para o cubo B, a maior razão de captação de água ocorreu nos vértices superiores devido às maiores velocidades de vento na altura superior das fachadas e também devido à aceleração do ar acima das fachadas. A intensidade da chuva dirigida nos dois terços inferiores do cubo B foram, entretanto, menores do que a intensidade medida na edificação B, indicando a ocorrência de um efeito protetor promovido pela edificação à montante do escoamento (possivelmente associado ao efeito barreira mencionado anteriormente). Também é importante observar que a razão de captação de água não é igual entre as faces do cubo, variando de acordo com a orientação da fachada, a qual está relacionada com diferentes condições de exposição de vento, mais especificamente gerando diferentes ângulos de incidência do vento entre as fachadas (KUBILAY *et al.*, 2017).

Cho *et al.* (2020) simularam a intensidade da chuva dirigida em 6 diferentes modelos (Figura 43) para avaliar a distribuição do manchamento sobre a fachada. Estes modelos foram submetidos à duas intensidades diferentes de chuva dirigida: a primeira com uma taxa de precipitação de 48 mm/h e uma velocidade de vento de 0,80 m/s; a segunda com uma taxa de precipitação de 81,6 mm/h e uma velocidade de vento de 1,11 m/s. É possível avaliar pela Figura 43, que a quantidade de água coletada pelos modelos é alterada tanto pela largura da

edificação quanto pela altura da mesma. Os autores também afirmam que a distribuição espacial da chuva dirigida medida nos modelos (Figura 44) foi muito similar ao apontado em estudos prévios.

Figura 43 - Intensidade da chuva dirigida com uma precipitação de intensidade de 48,8 mm/h e velocidade do vento de 0,8 m/s



(Fonte: CHO *et al.*, 2020)

Figura 44 – Modelo utilizado nos experimentos.



(Fonte: CHO *et al.*, 2020)

A interação da chuva dirigida com as fachadas pode ser muito variada em função das alterações geométricas tanto nas das edificações quanto do entorno, mesmo que as condições meteorológicas permaneçam constantes. Dessa maneira, outras razões de configurações

geométricas de edificações e de entorno comuns em áreas urbanas podem ser avaliadas (KUBILAY *et al.*, 2017).

### 3.2.1.2 Detalhes incorporados de Fachadas

Os detalhes de fachada de edificações históricas contribuem de forma positiva sobre as fachadas, evitando a concentração de água e descolando a lâmina de escoamento da superfície do revestimento, mesmo que na concepção inicial dos projetistas os detalhes fossem aplicados muito mais por motivos estéticos do que funcionais (MARSH, 1977). Com a arquitetura moderna é que se tornou mais evidente a importância dos detalhes arquitetônicos para a estanqueidade e durabilidade dos edifícios ao passo que as edificações modernas suprimiram os detalhes, se tornando predominantemente lineares (PEREZ, 1988).

Mesmo as fachadas sofrendo um processo de despojamento formal e construtivo, a maioria das edificações ainda apresenta descontinuidades estéticas, construtivas, funcionais e de autoproteção, que provocam uma exposição da fachada não uniforme aos agentes ambientais, sendo raros os casos de fachadas constituídas por um único plano vertical, liso e contínuo (PETRUCCI, 2000). De modo geral, superfícies horizontais reentrantes e salientes na fachada permitem uma retenção da sujeira (CHEW; TAN, 2003; CHAVES, 2009; MELO JR, 2016)

Detalhes construtivos, como pontos de captação pluvial, beirais, cimalthas, frisos, molduras horizontais, planos inclinados sobre peitoris de janelas, proteções superiores de parapeitos de sacada, entre outros elementos que formam várias espécies de plataformas, em conjunto com os mecanismos de adesão, oferecem condições para deposição de contaminantes nas fachadas e podem ser utilizados na proteção da fachada contra a incidência e ação da chuva (PETRUCCI, 2000; RIBEIRO, 2006). Detalhes de fachada como reentrâncias ou descontinuidades permitem o acúmulo de partículas ao mesmo tempo em que agem no controle do escoamento da água da chuva, atuando de maneira ambígua no processo de lavagem dos panos das fachadas (LERSCH, 2003; ZUCCHETTI, 2016).

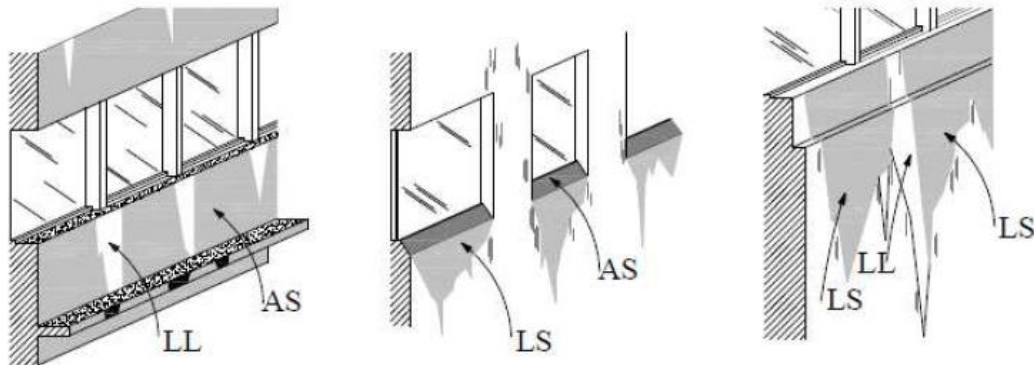
Quando bem dimensionados e posicionados os elementos podem atuar como protetores da edificação. Da mesma maneira, um uso inadequado de elementos pode potencializar a deposição de partículas de contaminação, acelerando os processos de manchamento e escorrimentos (LERSCH, 2003; VIEIRA, 2005). Nesse sentido, Zucchetti (2016) acrescenta que o segredo para evitar a deterioração das superfícies do edifício expostas à chuva e diminuir os riscos de infiltração de água está no controle dos escoamentos de água que se acumulam nas



superfícies, dissipando escoamentos de maiores concentrações e protegendo as partes vulneráveis dos edifícios.

Os manchamentos nos revestimentos de fachadas se formam quando o escoamento é perturbado devido à presença de saliências, reentrâncias e acessórios que se projetam para fora do paramento (CHEW; TAN, 2003). A trajetória dos escoamentos de água nas fachadas tende a determinar três tipos distintos de manchamentos, chamados Lavado Sujo (LS), Lavado Limpo (LL) e Acúmulo de Sujeira (AS), os quais são produzidos comumente abaixo dos elementos horizontais de aberturas (parapeitos das janelas) ou de plataformas horizontais através dos quais a água desliza (ROBINSON; BAKER, 1975).

Figura 45 - Lavados sujos e limpos



(Fonte: ROBINSON; BAKER, 1975)

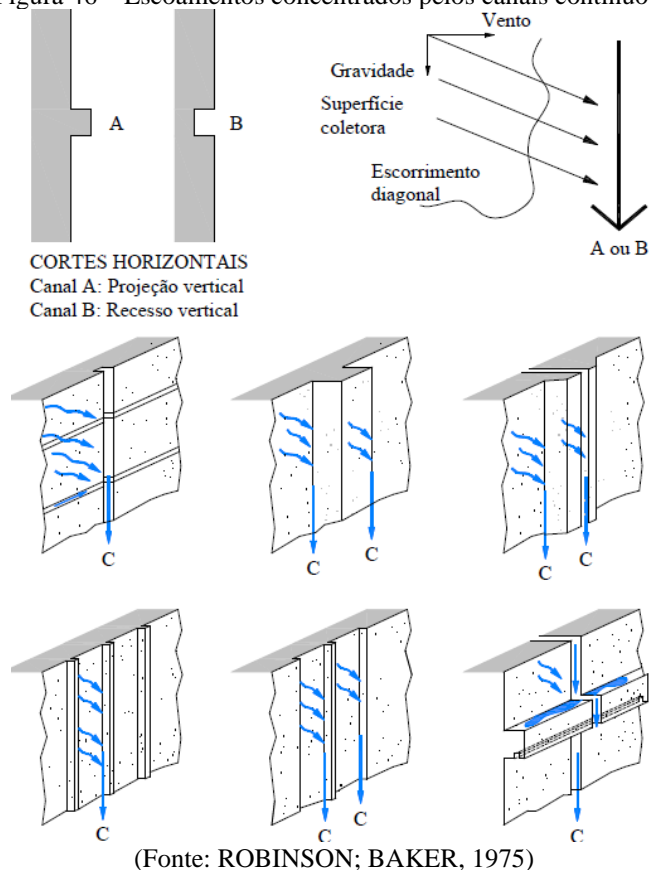
O lavado sujo é decorrente da água da chuva que atinge superfícies com sujidades, provocando o escoamento da água da chuva em conjunto com a sujeira depositada na superfície da fachada, a qual é reasentada em planos verticais ou inclinados adjacentes. O escoamento denominado lavado limpo ocorre quando o escoamento de água carrega as partículas contaminantes para outros locais, limpando a superfície por onde passa; este tipo de manchamento ocorre de maneira geral nas partes baixas da edificação, com velocidade e intensidade do escoamento de água que segue a gravidade e quando não há obstáculos na superfície da fachada. O manchamento devido ao acúmulo de sujeira ocorre quando a precipitação não atinge determinadas superfícies da fachada, fazendo com que as partículas fiquem aderidas aos paramentos (ZUCCHETTI, 2016).

A combinação de elementos de fachada pode ser classificada a partir da observação do efeito destes sobre o escoamento de água superficial. Muitas podem ser as categorizações pela

diversidade de elementos existentes, entretanto, Robinson e Baker (1975) apresentam a seguinte classificação:

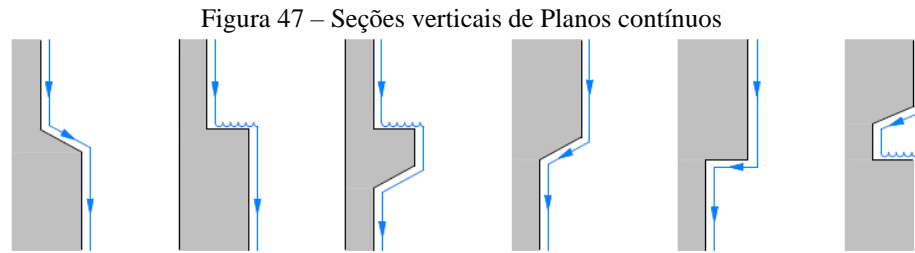
- i. *Canais contínuos*: são todas as projeções ou reentrâncias verticais que bloqueiam e coletam a água, conduzindo-a de maneira diagonal através da superfície. Juntas de painéis, de alvenaria, de expansão e construtivas são alguns dos exemplos mencionados pelos autores. Também são mencionados como canais as projeções ou as reentrâncias horizontais, que atuam no direcionamento do escoamento da lâmina de água, como é possível observar na Figura 46 (ROBINSON; BAKER, 1975; MELO JR, 2010). A principal propriedade deste arranjo é a inexistência do desprendimento do escoamento de água da superfície da fachada (ZUCCHETTI, 2016).

Figura 46 – Escoamentos concentrados pelos canais contínuos



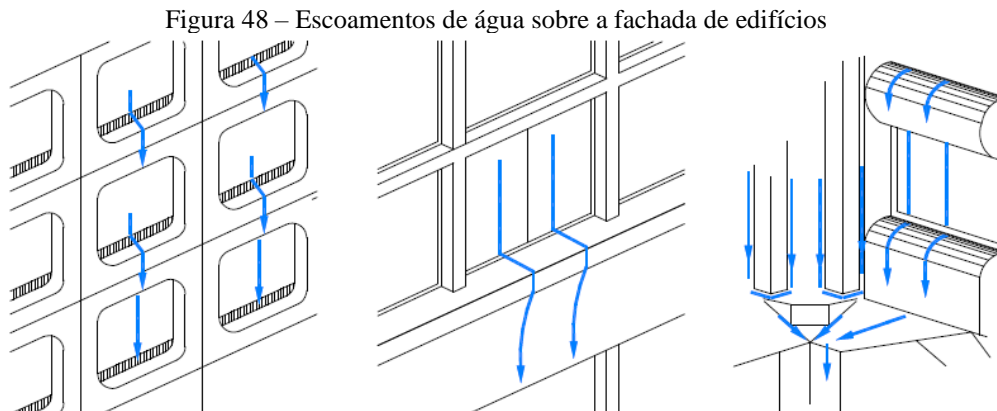
- ii. *Planos contínuos*: são as combinações de superfícies horizontais, verticais ou inclinadas, que permitem o escoamento do escoamento de água sem que ocorra o gotejamento. Entre os principais exemplos, são mencionadas pelos autores caixilhos

de janelas, peitoris, lajes em balanço, projeções de fachada, etc., conforme Figura 47 (ROBINSON; BAKER, 1975).



CORTES VERTICAIS

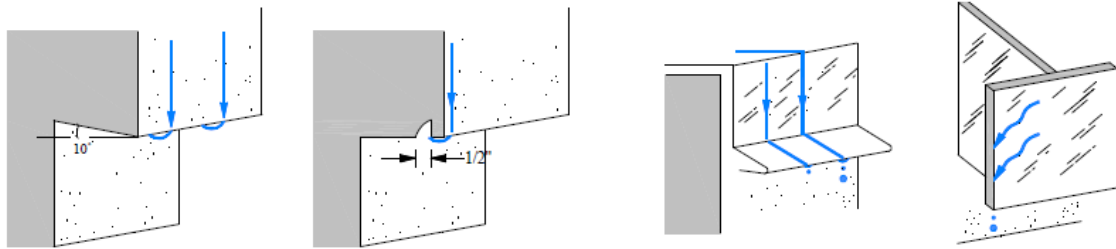
(Fonte: ROBINSON; BAKER, 1975)



(Fonte: ROBINSON; BAKER, 1975)

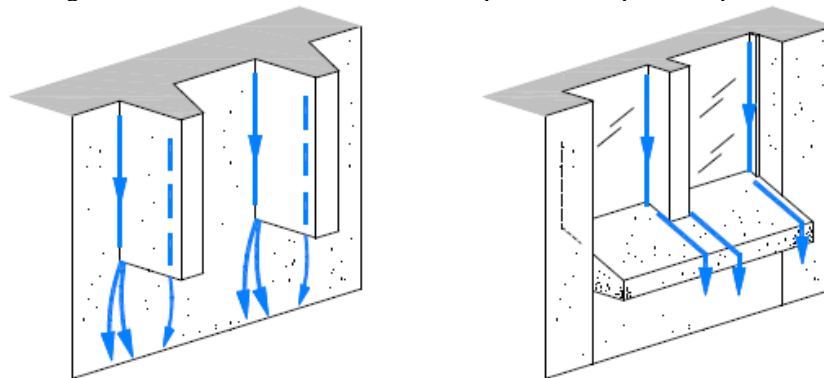
- iii. *Descontinuidades de planos e canais contínuos*: que podem ser consideradas como uma combinação entre as duas categorias anteriores e são caracterizadas pela descontinuidade do escoamento de água, podendo ser concentrado em canais para em seguida ser dispersado em planos, ou vice-versa. Estes elementos também podem ser caracterizados pela alternância entre planos e canais. A alteração no escoamento de água em função das descontinuidades é caracterizada por forças que agem sobre a lâmina de água, as quais, frequentemente podem provocar gotejamentos conforme a Figura 49 (ROBINSON; BAKER, 1975).

Figura 49 – escoamentos dispersos em forma de gotejamento pela descontinuidade



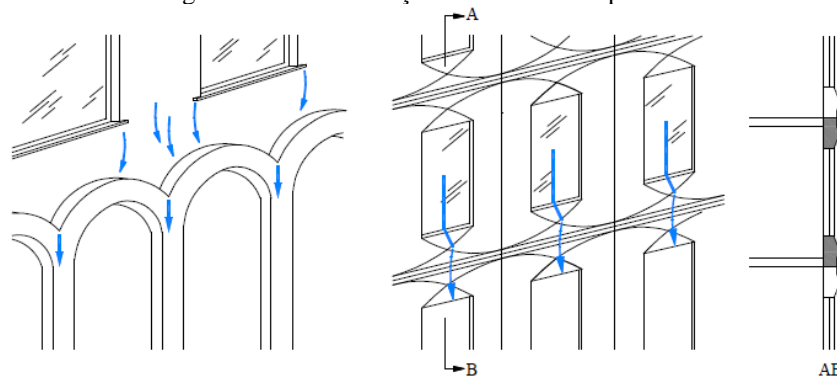
(Fonte: ROBINSON; BAKER, 1975)

Figura 50 – escoamentos canalizados dispersos em superfícies planas



(Fonte: ROBINSON; BAKER, 1975)

Figura 51 – Concentração de escoamento plano



(Fonte: ROBINSON; BAKER, 1975)

Na análise da interação do escoamento com planos contínuos, canais contínuos e descontinuidades entre planos e canais contínuos pode ser traçado um paralelo com o movimento de fluidos de um ponto para uma área e de uma área para um ponto, que é uma característica importante das estruturas de escoamento dentro do MDC.

Caso sejam adequadamente empregadas, as *projeções horizontais* apresentam um papel importante na proteção das superfícies das fachadas ao promover o descolamento do escoamento de água da fachada (ZUCCHETTI, 2016). Por outro lado, os *elementos reentrantes* da fachada têm o comportamento ainda pouco explorado, supondo-se a partir da observação do estado de manchamento das fachadas que os mesmos possam atuar como canais concentradores de escoamentos e também como depósito de partículas de sujeidade – como verificado nos trabalhos de Robinson e Baker (1975) e Vieira (2005).

Nos tópicos seguintes, os detalhes de fachadas são abordados em *elementos salientes horizontais* e *elementos reentrantes horizontais*.

#### 3.2.1.2.1 Elementos salientes horizontais

São elementos que são salientes ao plano da fachada, ou seja, se projetam para fora da superfície do paramento. São elementos que ficam mais expostos aos agentes agressivos do meio e por isso promovem a proteção dos panos de revestimento da fachada, sendo necessário um cuidado na configuração destes elementos (ZUCCHETTI, 2016). Molduras horizontais ou plataformas, coroamentos e peitoris podem ser classificados como projeções horizontais (POYASTRO, 2011). Em alguns casos, os elementos salientes como varandas e peitoris tornam as sujeiras mais detectáveis pela proteção de áreas que não são atingidas pelas chuvas (PEREIRA *et al.*, 2020).

As *molduras horizontais* apresentam como função principal a proteção contra a chuva incidente ou escorrida das partes da fachada que ficam sob elas. A proteção decorre do descolamento do escoamento de água (ZUCCHETTI, 2016). Detalhes em forma de saliência e projeção são capazes de reduzir em até 50% o escoamento de água incidente sobre essas superfícies (THOMAZ, 1990).

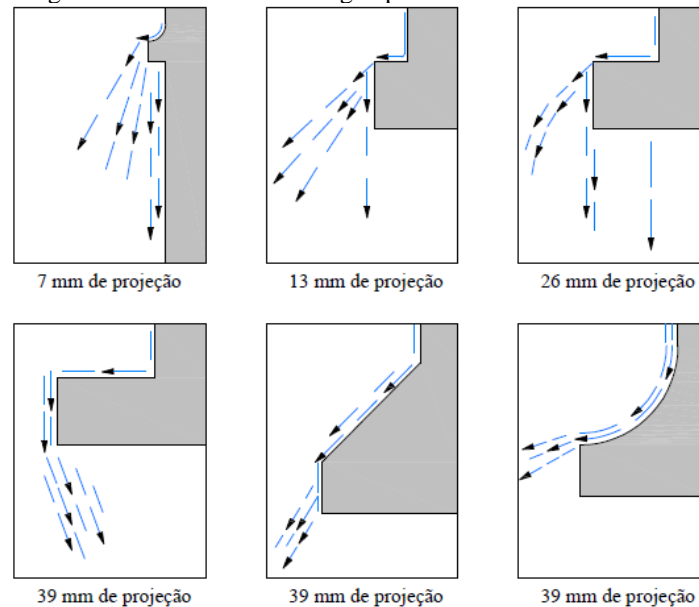
Além da correta especificação de dimensões e geometrias das molduras, também deve ser previsto o correto posicionamento dos detalhes construtivos que compõe as molduras, de maneira a se obter um desempenho adequado (SQCC-MRT, 1993<sup>10</sup> apud ZUCCHETTI, 2016;

---

<sup>10</sup> Seminário de Qualidade na Construção Civil II (segundo). **Manuais de Referência Técnica** (MRT/ SQCC). Revestimentos de argamassa, 1993.

POYASTRO, 2011). Nesse sentido, quanto maior for a projeção do elemento em relação à fachada e quanto menos ortogonal for o ângulo da parte superior do elemento (parte que recebe e redireciona o escoamento) melhor será o desempenho do descolamento da lâmina e redirecionamento do escoamento incidente, conforme Figura 52 (PEREZ, 1988; ZUCCHETTI, 2016).

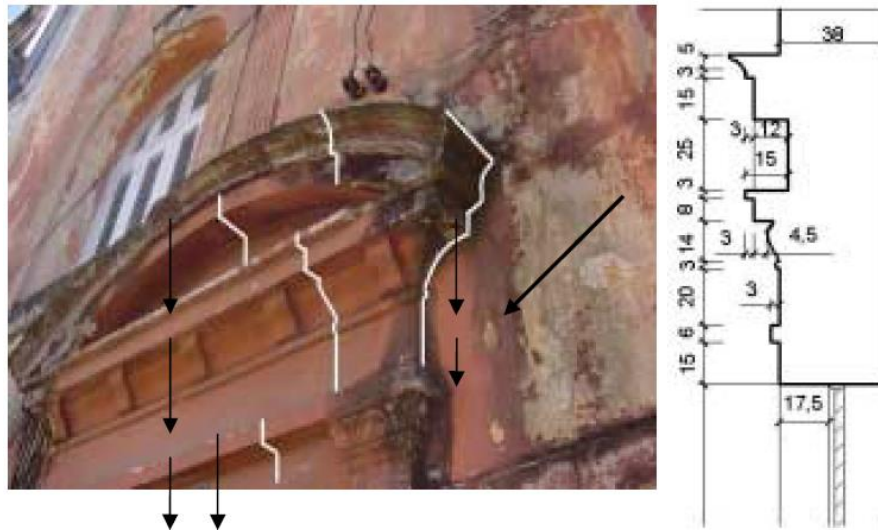
Figura 52 - Diagramas de escoamento de água para molduras com diferentes dimensões



(Fonte: PEREZ, 1988)

Molduras de acabamento reto (visíveis na parte central do corte na Figura 53) tendem a promover o descolamento total da lâmina de água, controlando de modo eficiente o escoamento de água ao dissipar a concentração e proteger as superfícies da edificação, enquanto nas molduras com acabamento inferior côncavo (visíveis na parte superior do corte na Figura 53) ocorre a condução do escoamento para o restante da parede (VIEIRA, 2005). Neste caso apresentado por Vieira (2005), a escolha equivocada do acabamento arredondado gera efeitos de manchamento mais evidentes ao conduzir a água para junto da parede.

Figura 53 – Molduras de acabamento reto e concavo



(Fonte: VIEIRA, 2005)

Em outra situação observada por Petrucci (2000), a escolha da geometria adequada das molduras permite o descolamento da água que escorre dos paramentos da fachada, diminuindo sua quantidade, sendo evidente a menor quantidade de manchamento por escorrimento (Figura 54).

Figura 54 - Molduras horizontais que possibilitam o descolamento da água escorrida



(Fonte: PETRUCCI, 2000)

Na Figura 55, no topo da edificação, região de maior exposição à chuva dirigida, os detalhes que promovem o descolamento da lâmina de água foram removidos após uma reforma, o que deixou a região mais suscetível aos processos de degradação. Na mesma fachada, também pode

ser observado que a utilização de um detalhe projetado (plataforma) promove uma maior proteção da superfície da fachada na região imediatamente abaixo. Quando esses elementos salientes apresentam uma projeção maior do que 100 mm podem atuar como plataformas para a deposição de poeiras (VERDUM *et al.*, 2021).

Figura 55 – Região no topo da fachada não apresenta detalhes construtivos para proteger o topo da exposição à chuva dirigida, enquanto a presença de elemento saliente protege a porção do revestimento imediatamente abaixo



(Fonte: VERDUM *et al.*, 2020)

Amplas projeções, a exemplo das sacadas e terraços, podem proporcionar uma eficiente proteção contra incidência da chuva, como apresentado na

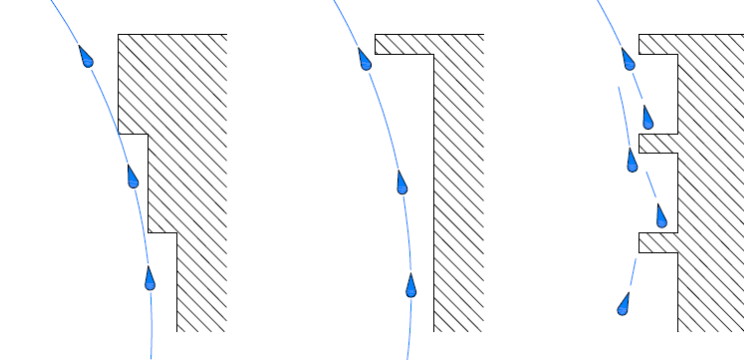
Figura 56, atuando de modo a reduzir a quantidade de superfície a ser molhada (*Recomendaciones y manuales técnicos*, 1993<sup>11</sup>, apud MELO JR, 2010).

---

<sup>11</sup> RECOMENDACIONES Y MANUALES TÉCNICOS. **Durabilidad de estructuras de Hormigón. Guia de Diseño CED.** Grupo Español del Hormigón. Hormigón. 1993.



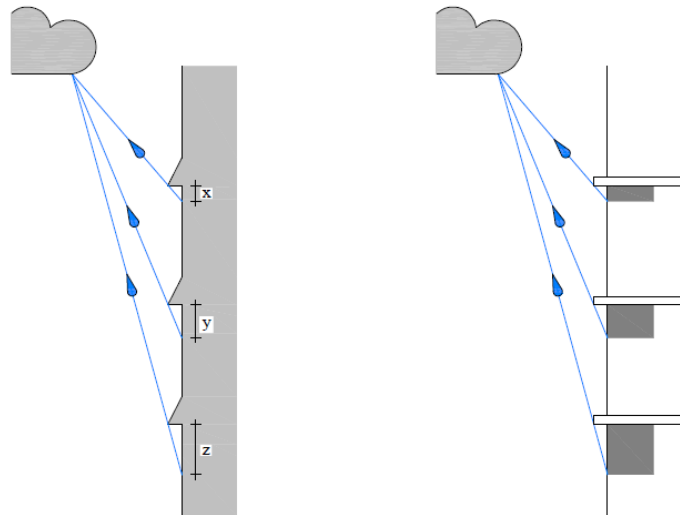
Figura 56 – Formas que proporcionam proteção contra a água da chuva



(Recomendaciones y manuales técnicos, 1993, apud MELO JR, 2010)

A eficiência das projeções como elementos protetores também está associada com a posição em que estas se encontram na fachada (Figura 57), especialmente em edificações altas, pois nos pavimentos inferiores a tendência é que o ângulo com que a chuva incide sobre a superfície seja menor (*Recomendaciones y manuales técnicos*, 1993, apud MELO JR, 2010).

Figura 57 - Dois diferentes tipos de elementos protetores que abrigam superfícies inferiores



(Recomendaciones y manuales técnicos, 1993, apud MELO JR, 2010)

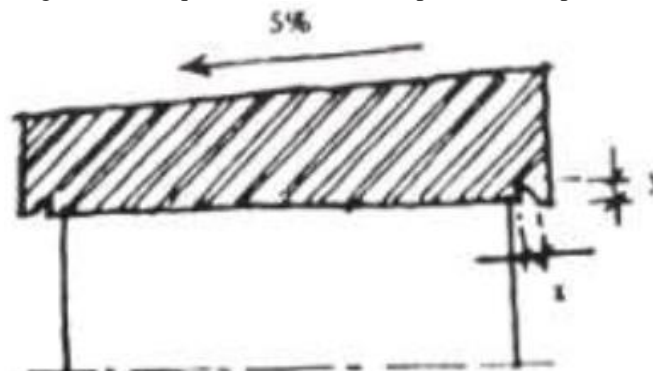
Os *coroamentos* das edificações são locais altamente vulneráveis devido à exposição para a chuva, poluentes e ciclos de molhagem em secagem. Em geral, são utilizadas cimalkhas para proteger e dar acabamento às platibandas de coberturas ou em parapeitos de muros externos (ZUCCHETTI, 2016). Estes elementos previnem a penetração da água da chuva na superfície

superior, através das projeções internas e externas, bem como redireciona o escoamento, afastando da superfície da fachada, atuando dessa forma em evitar o molhamento excessivo da parede (SQCC-MRT, 1993 apud ZUCCHETTI, 2016).

Para a correta concepção destes elementos devem ser considerados os seguintes aspectos, esquematizados na Figura 58 (SQCC-MRT, 1993 apud ZUCCHETTI, 2016):

- projeções para além do plano da parede;
- lacrimais inferiores para realizar o descolamento da água;
- juntas estanques entre os elementos dos coroamentos;
- para proteções com elementos monolíticos devem ser executadas juntas em intervalos de aproximadamente 10 m;
- o elemento deve apresentar uma inclinação mínima de 5% para que não ocorra a deposição de água da chuva sobre o elemento, redirecionando o escoamento.

Figura 58 – Esquema de coroamento para muros e paredes

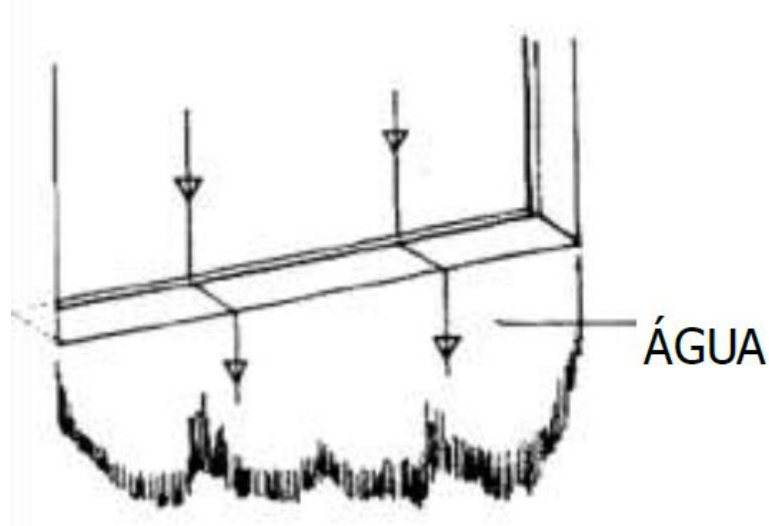


(Fonte: SQCC-MRT, 1993 apud ZUCCHETTI, 2016)

Os *peitoris* de janelas são bastante associados à manifestação patológica de manchamento por escorrimento, que ocorre pela combinação de diferentes elementos da fachada: os vidros que compõe as esquadrias apresentam baixíssima capacidade de absorção de água (além de apresentarem uma superfície lisa) o que favorece o desenvolvimento de um escoamento com maior quantidade de água. Caso a região da janela não apresente nenhum elemento horizontal

(Figura 59), o escoamento de água pela superfície terá um espalhamento uniforme ao longo da abertura do vão (EL SHIMI *et al.*, 1980).

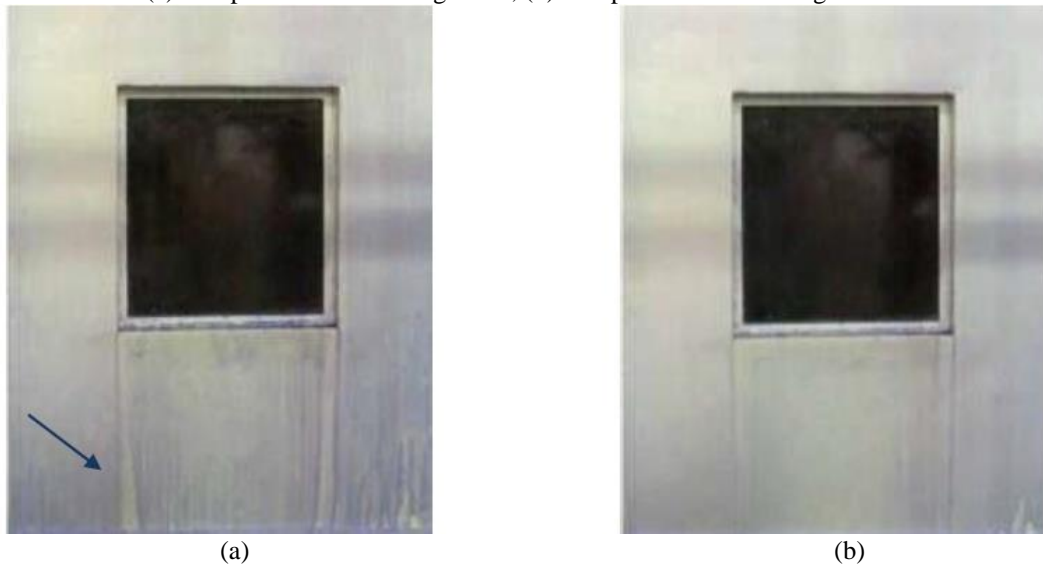
Figura 59 - Escorrimento em esquadria sem peitoril



(Fonte: EL SHIMI *et al.*, 1980 adaptado por ZUCCHETTI, 2016)

No experimento realizado por Zucchetti (2016), o resultado do ensaio de um modelo de parede com esquadria e sem peitoril foi de encontro à afirmação feita por El Shimi *et al.* (1980), corroborando que a absorção diferencial entre a superfície do vidro da esquadria e o revestimento da fachada produz um efeito de manchamento diferencial abaixo do vão da janela. Nesse sentido, junto dos vértices da esquadria é possível se observar um escoamento com coloração mais marcada, sendo um indicativo de que o escoamento de água é contínuo e mais intenso nessa região (Figura 60).

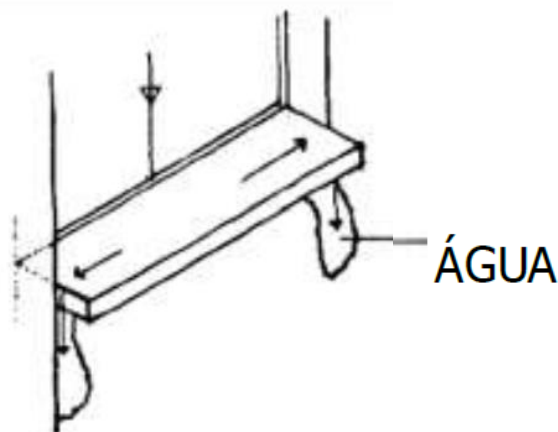
Figura 60 - Aspecto visual da evolução do molhamento com chuva colorida na Parede sem peitoril;  
 (a) Tempo de ensaio: 40 segundos; (b) Tempo de ensaio: 46 segundos



(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)

Em outra situação, caso junto da esquadria seja executado um peitoril (Figura 61), a tendência é de que os manchamentos se concentrem nas laterais dos vãos, pelo fato de que o peitoril tem maior capacidade em redirecionar o escoamento para fora do plano da fachada (EL SHIMI *et al.*, 1980).

Figura 61 - Escorrimento em esquadria com peitoril

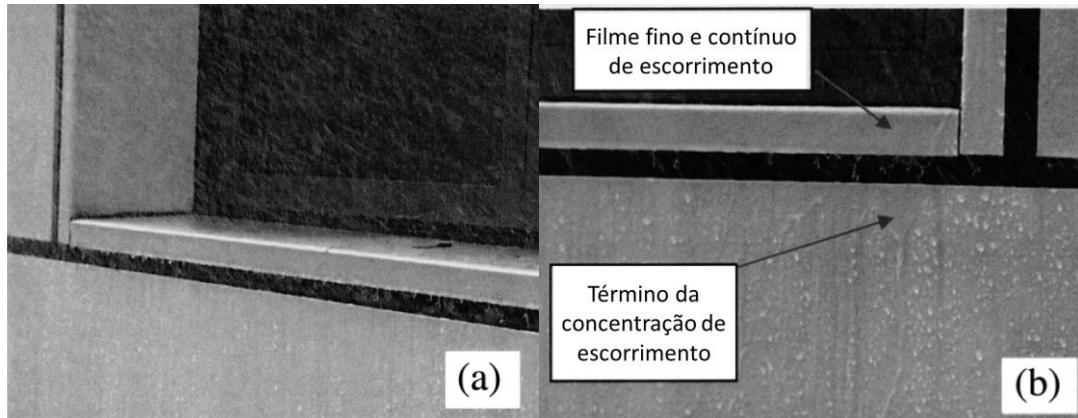


(Fonte: EL SHIMI *et al.*, 1980 adaptado por ZUCCHETTI, 2016)

Os escoamentos ao longo de saliências como peitoris tendem a ser uniformes, desde que o elemento não apresente amassados, juntas ou rachaduras ao longo da sua estrutura. Nas extremidades das saliências o escoamento tende a ser concentrado, por isso se espera que nessas regiões os manchamentos ocorram, conforme Figura 62. O padrão do escoamento sobre a

saliência afeta diretamente o padrão do manchamento que se forma no entrono do detalhe (CHEW; TAN, 2003).

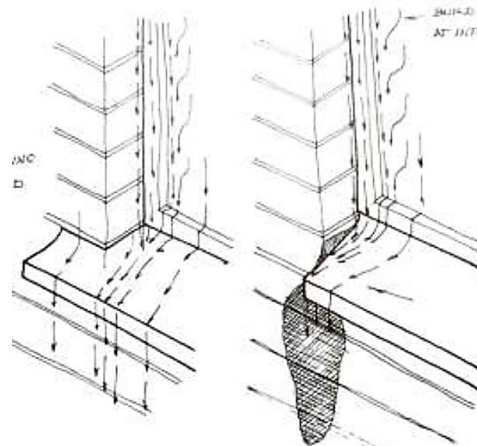
Figura 62 - (a) Escoamento contínuo de escoamento na saliência; (b) concentração do escoamento na extremidade da saliência



(Fonte: CHEW; TAN, 2003)

Com a função de evitar a lavagem diferencial por acúmulo de escoamento na interface entre peitoril e parede, assim como evitar a infiltração de água, Marsh (1977) propõe o prolongamento lateral do peitoril, também conhecido como engastamentos (Figura 63).

Figura 63 – Diagrama de Escoamento de água – peitoril engastado e sem engaste

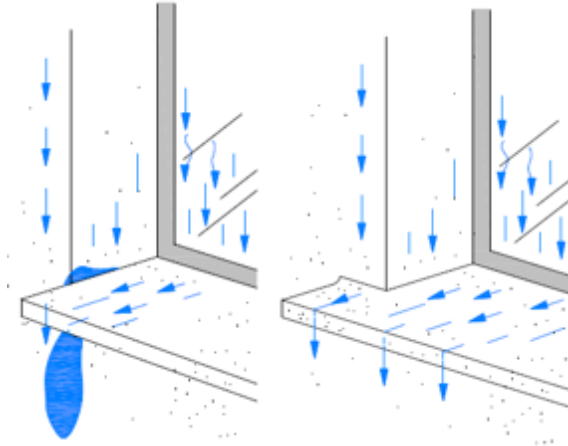


(Fonte: MARSH, 1977)

Thomaz (1990) observa de maneira muito similar o fenômeno descrito por Marsh (1977), argumentando que um projeto inadequado de peitoril em termos de geometria, composição e execução pode criar caminhos preferenciais para o escoamento de água. Desse modo,

poluentes sobre os peitoris ou até mesmo a água da chuva facilitarão o desenvolvimento de manchamentos de maneira concentrada nos materiais porosos da fachada.

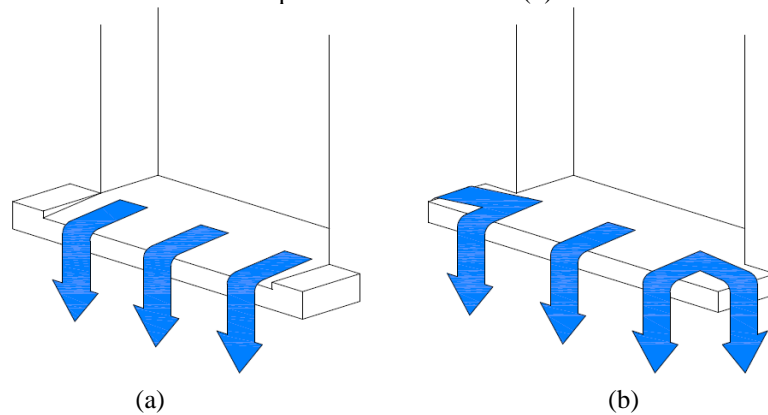
Figura 64 - Trajetória do escoamento de água em peitoris sem engastamento e com engastamento



(Fonte: THOMAZ, 1990)

Além da projeção lateral dos peitoris, Silva e Torres (2003) propõe que o escoamento lateral seja evitado através da indução do escoamento de águas através do uso de saliências no peitoril (Figura 65 (a)), indicando que, de outro modo, o escoamento acaba por se dividir e escorrer lateralmente pelo peitoril criando caminhos de escoamento ao longo das paredes e formação de sujidades (Figura 65 (b)).

Figura 65 – Indução do escoamento de água a partir do uso de saliências em peitoris (a); escoamento dividido sobre peitoril sem saliências (b).



(Fonte: SILVA; TORRES, 2003)

Flores-Colen *et al.* (2006) argumentam que a partir da identificação de possíveis causas dos manchamentos é muito importante realizar a prevenção da reincidência. Caso uma das possíveis fontes dos manchamentos seja um elemento com detalhamento deficiente, as intervenções devem incluir medidas para evitar as anomalias no futuro.

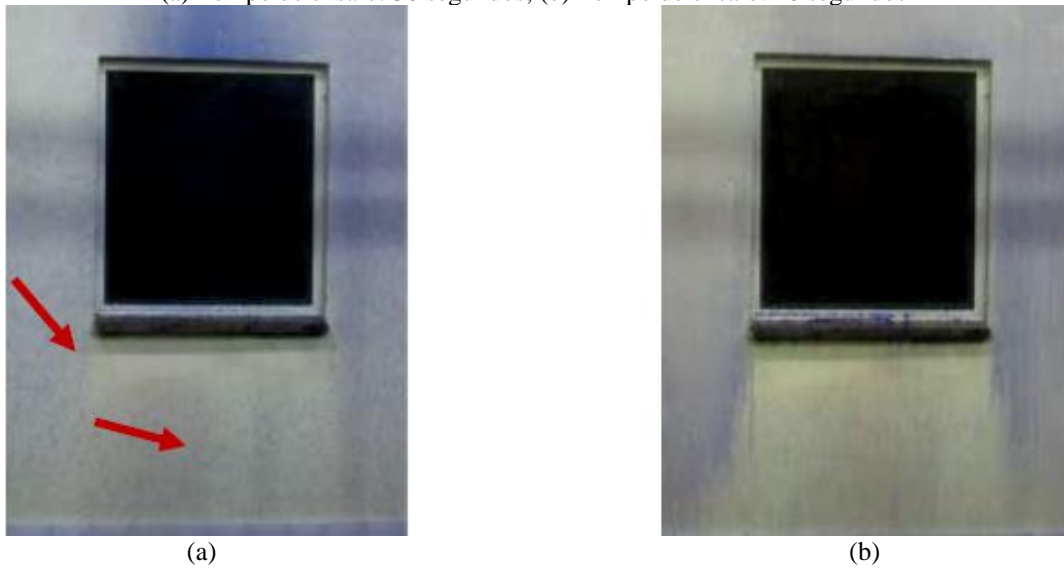
Figura 66 – Possível solução para o problema de manchamento nos peitoris de janelas (esquerda): introdução de elementos de condução e gotejamento da água



(Fonte: FLORES-COLEN *et al.*, 2006)

Corroborando com o exposto por Marsh (1977), El Shimi *et al.* (1980) e Thomaz (1990), nos modelos com peitoril sem prolongamentos laterais (Figura 67) ensaiados por Zucchetti (2016) é possível observar que com a evolução do molhamento o escoamento da chuva tende a se concentrar na interface entre o canto da janela e a lateral do peitoril, com a superfície logo abaixo da pedra do peitoril ficando molhada de maneira mais esparsa. A autora menciona que para este caso foi identificada uma redução do escoamento de água junto do paramento de 45% quando comparado aos resultados do modelo sem nenhum tipo de peitoril (apresentado na Figura 60).

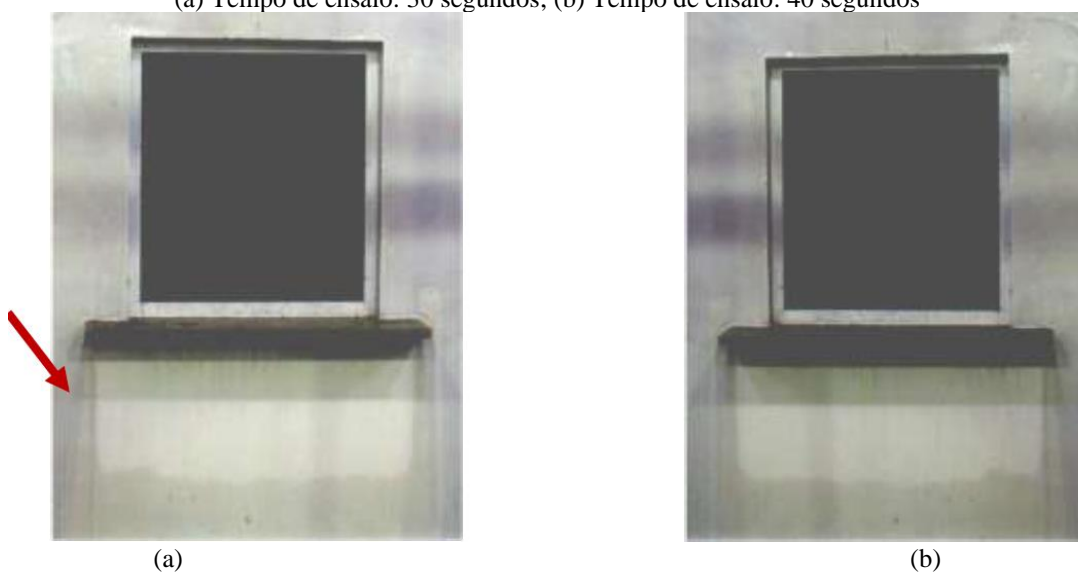
Figura 67 – Aspecto visual da evolução do molhamento com chuva colorida na Parede com peitoril sem engaste lateral;  
(a) Tempo de ensaio: 30 segundos; (b) Tempo de ensaio: 40 segundos



(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)

Também comprovando o apresentado por Marsh (1977) e Thomaz (1990), Zucchetti (2016) apresenta a evolução do molhamento de modelos de peitoril com engastamento lateral (Figura 68). Neste caso o escoamento acompanha o vértice do peitoril, direcionando uma maior quantidade de água para as laterais. A autora menciona que para este caso foi identificada uma redução do escoarimento de água junto do paramento de 68% quando comparado aos resultados do modelo sem nenhum tipo de peitoril (apresentado na Figura 60).

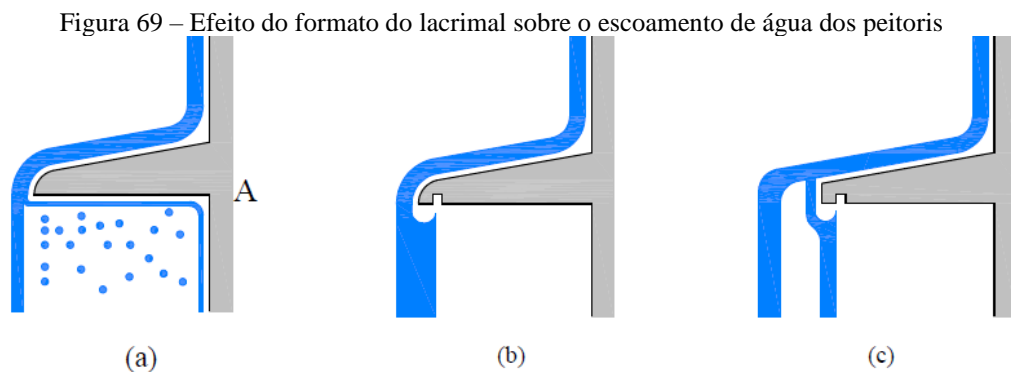
Figura 68 – Aspecto visual da evolução do molhamento com chuva colorida na Parede com peitoril com engaste lateral;  
(a) Tempo de ensaio: 30 segundos; (b) Tempo de ensaio: 40 segundos



(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)



Uma solução incremental é a aplicação do lacrimal (pingadeira) na borda inferior dos peitoris de modo a diminuir as possibilidades de a lâmina de água ser conduzida por baixo do peitoril e penetrar na fachada na interface entre peitoril e revestimento, indicada pelo ponto A. Além disso, a utilização de peitoris com bordas vivas auxiliam na divisão do escoamento de água (SILVA; TORRES, 2003).



(Fonte: SILVA; TORRES, 2003)

A Figura 70 apresenta os dados da quantidade de água coletada enquanto a Figura 71 apresenta a área protegida do molhamento nos modelos analisados por Zucchetti (2016). Neles estão contidas as informações sobre cada modelo, sendo importante destacar que PR é o modelo de referência, que não apresentou nenhum peitoril, ‘p’ indica a dimensão da projeção do peitoril em relação à superfície da fachada, ‘i’ indica a inclinação do peitoril, ‘s/e’ indica que não há engastamento lateral no modelo e ‘c/e’ indica a presença de engastamento lateral. A autora avaliou a combinação de dois valores de ‘p’ (5,0 cm e 12,0 cm), com duas inclinações (6% e 20%) e com a utilização ou não de um engastamento projetado 10,0 cm cada uma das laterais das janelas. As dimensões testadas por Zucchetti (2016) foram encontradas na exploração bibliográfica realizada pela autora. A espessura dos peitoris utilizada foi de 2,0 cm e foi constante entre todos os modelos. Entretanto, a dimensão mínima encontrada pela autora na revisão bibliográfica foi de 1,5 cm.

Figura 70 – Quantidade de água coletada ao longo dos ciclos da chuva dirigida nos modelos testados

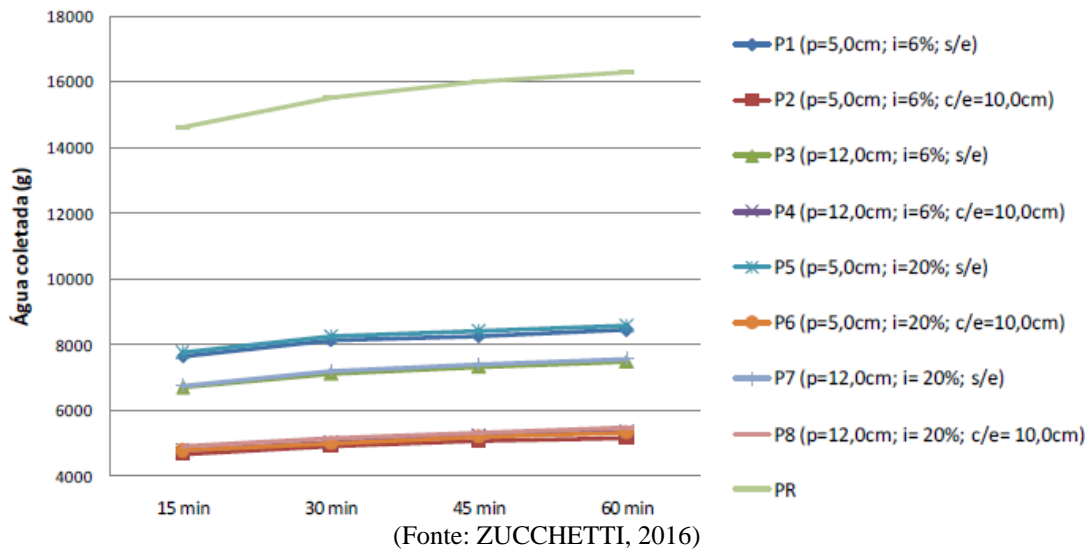
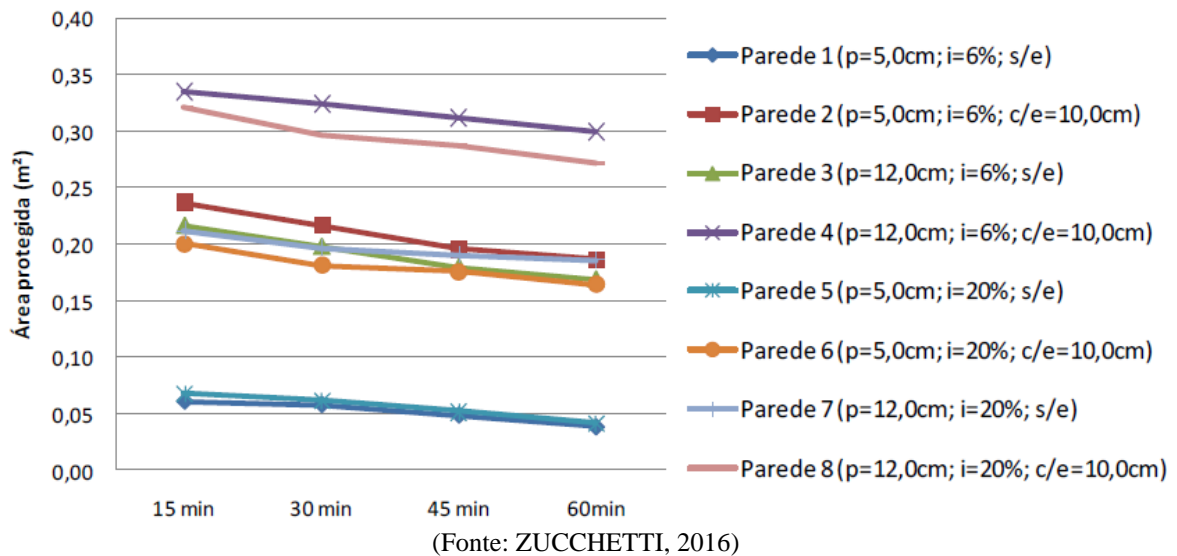


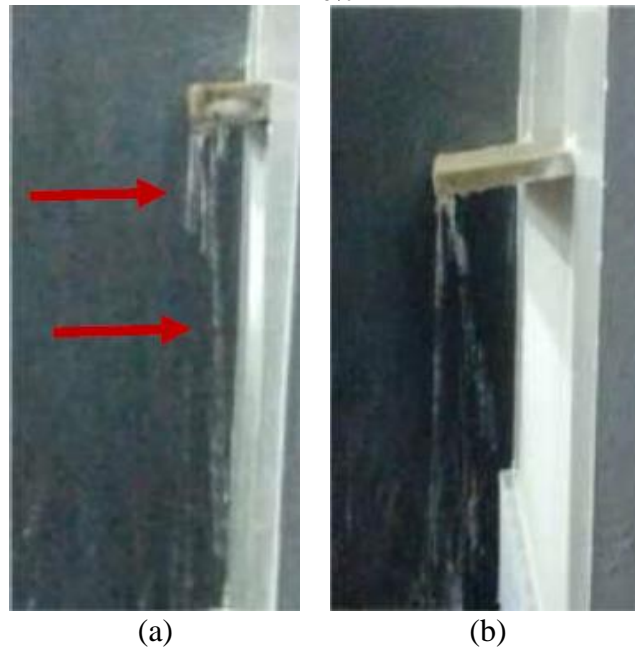
Figura 71 – Área protegida do molhamento das paredes analisadas



A capacidade de descolamento da lâmina de água e proteção da superfície abaixo do peitoril depende de outros, fatores, como a inclinação da pedra e a dimensão da projeção. Na Figura 72 (a) o peitoril apresenta uma inclinação de 6% e uma projeção de 5 cm e o escoamento consegue nesta situação percolar pela face inferior do peitoril e inclusive passar pelo lacrimal em direção à interface entre peitoril e o revestimento, com parte do escoamento gotejando verticalmente e paralelo ao paramento; enquanto na Figura 72 (b) o peitoril apresenta uma inclinação de 20% e uma projeção de 12 cm, fazendo com que o gotejamento ocorra ou no vértice inferior do peitoril

ou no lacrimal, sem que ocorra a percolação de água pela face inferior do peitoril (ZUCCHETTI, 2016).

Figura 72 – escoamento de água no sentido transversal dos peitoris com (a)  $p=5,0$  cm e  $i=6\%$  e (b)  $p=12,0$  cm e  $i=20\%$



(a) (b)

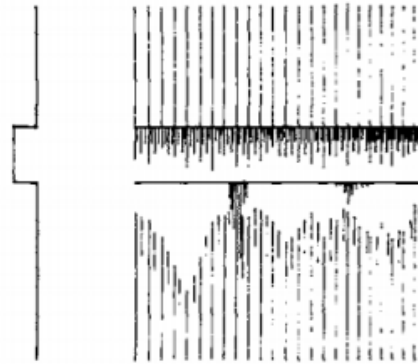
(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)

### 3.2.1.2.2 Elementos reentrantes horizontais

Entre os elementos de controle do escoamento, as reentrâncias em fachadas, como as juntas construção e expansão podem ser classificadas como canais contínuos (BAUER, 1987). A região próxima às juntas é crítica, pois a deterioração dos materiais do revestimento associada à umidade frequentemente ocorre quando a junta de argamassa ou os materiais adjacentes à junta falham (HOIGARD *et al.*, 2004).

Composições ornamentais em fachadas podem ajudar a mascarar o efeito dos manchamentos por sujeira irregulares, criando efeitos visuais que são predominantes em relação à aparência da sujeira no revestimento (VALLEJO, 1990), como apresentado na Figura 73. Nesse sentido, foi observado que frisos com dimensões entre 10 mm e 20 mm podem ser suficientes para a proteção da superfície do revestimento (VIEIRA, 2005).

Figura 73– Efeito de reentrâncias na amenização dos efeitos de manchamento nos revestimentos



(Fonte: VALLEJO, 1990)

Ranhuradas ou molduras podem ser consideradas como elementos estriados e são recomendadas quando estão previstas trajetórias oblíquas de escoamento, mesmo que possam favorecer o acúmulo de sujeira (VALLEJO, 1990). Como tamanho favorável das estrias, o autor recomenda que estas tenham dimensões entre 0,5 cm e 15 cm, e que as distâncias entre os elementos sejam da ordem de 25 cm caso o lavado seja abundante, reduzindo a separação caso a quantidade de água diminua, sendo que maiores separações podem originar parábolas características de manchamento (Figura 74).

Figura 74 – Reentrâncias utilizadas em fachadas com efeito lavado abundante



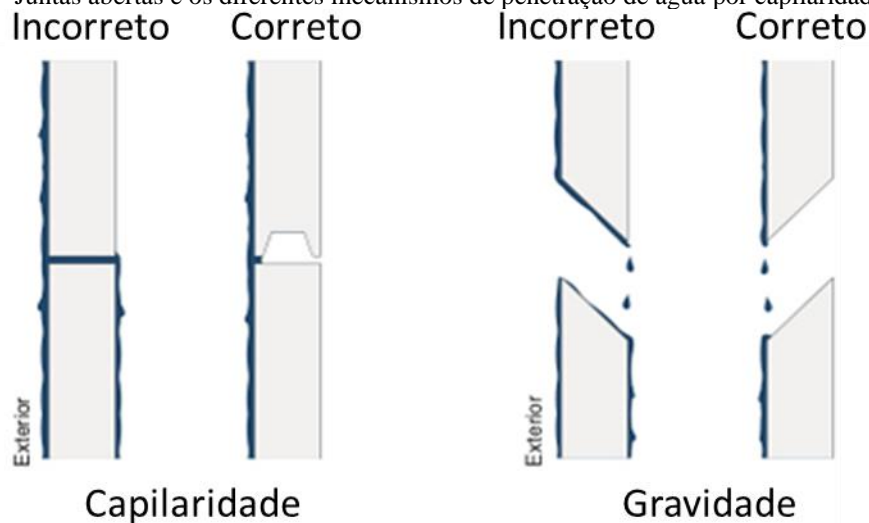
(Fonte: VALLEJO, 1990)

Frisos são utilizados de maneira geral como juntas de trabalho, que apresentam como principal função a subdivisão do revestimento para aliviar as tensões oriundas da movimentação do substrato ou do próprio revestimento (BAÍÁ; SABBATINI, 2002). As juntas apresentam funções mais complexas do que os elementos que elas unem. A principal função dos panos de revestimento externo é isolar o ambiente interno contra às ações externas – enquanto as juntas

devem, de maneira adicional, permitir a movimentação diferencial entre os elementos e ser coerente com a estética do restante da fachada (CHADWICK; MCJUNKIN, 2004).

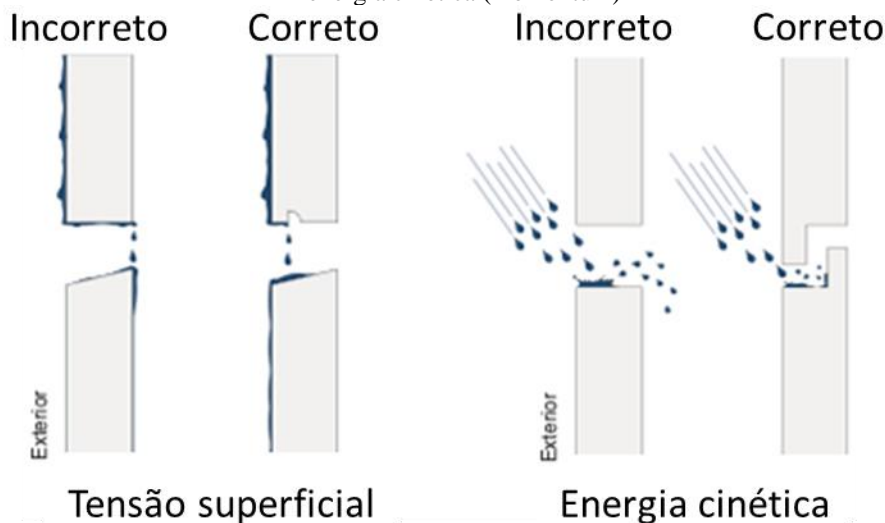
As juntas no revestimento externo são inevitáveis e devem ser projetadas de maneira a considerar os mecanismos de penetração da água da chuva, como nos casos das juntas abertas. A Figura 75 e a Figura 76 apresentam o detalhamento incorreto e a solução correta para os mecanismos de penetração de água por tensão superficial, *momentum* (ou energia cinética), capilaridade e gravidade (KESIK, 2016).

Figura 75 – Juntas abertas e os diferentes mecanismos de penetração de água por capilaridade e gravidade



(Fonte: KESIK, 2016)

Figura 76 – Juntas abertas e os diferentes mecanismos de penetração de água por tensão superficial e energia cinética (*momentum*)



(Fonte: KESIK, 2016)

Para os casos de juntas vedadas é importante o detalhamento da largura e da geometria da junta. Se for utilizado algum material selante, este deve apresentar um módulo de elasticidade adequado às deformações impostas pela expansão e contração da junta, considerando os mecanismos de penetração de umidade em revestimentos (KESIK, 2016).

Pode-se observar que os fenômenos descritos por Kesik (2016) são similares aos fatores observados por Garden (1963<sup>12</sup>, apud MELO JR, 2010) em revestimentos aderidos. A penetração pela energia cinética ocorre quando as gotas vão de encontro à fachada com velocidades elevadas, penetrando nas aberturas da fachada caso estas apresentem caminhos entre os poros – de outra forma a água não consegue penetrar no revestimento (Figura 77 (a)).

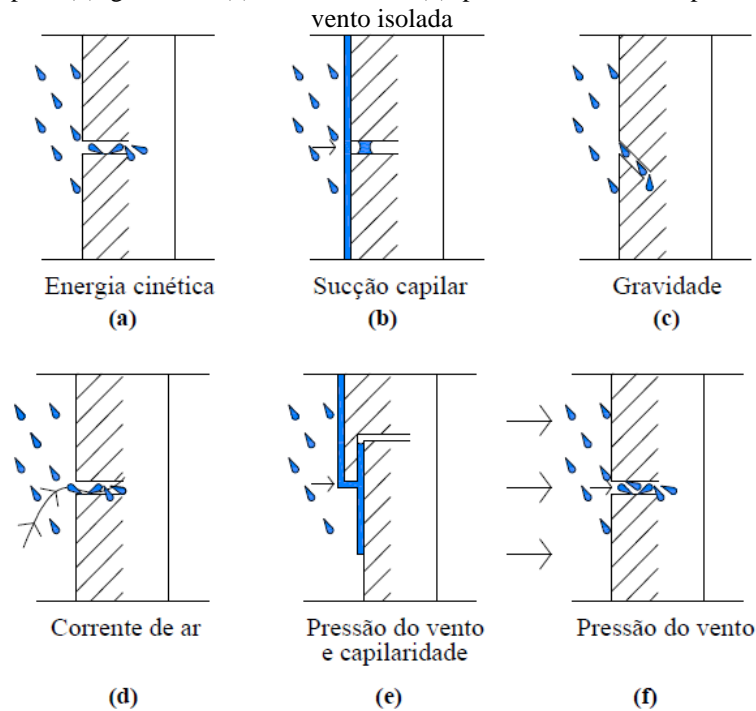
A sucção capilar decorre da interação entre a lâmina de água do escoamento e as superfícies porosas, sendo também uma função da saturação dos poros e da existência de forças diferenciais que podem fazer com que a água saia dos materiais saturados para o exterior (Figura 77 (b)).

A penetração por gravidade atua em superfícies com grandes capilares, de cima para baixo e em direção ao interior da edificação, conforme a Figura 77 (c). Os efeitos apresentados nas Figura 77 (d), (e) e (f) estão associadas às correntes de ar, à pressão de vento atuando em conjunto à capilaridade e à pressão do vento isolada, respectivamente. Nos casos com pressão de vento, a água pode ser conduzida a distâncias consideráveis dentro das paredes (GARDEN, 1963, apud MELO JR, 2010).

---

<sup>12</sup> GARDEN, G.K. **Rain Penetration and its Control**. National Research Council Canada. CBD 40, 5 p., 1963.

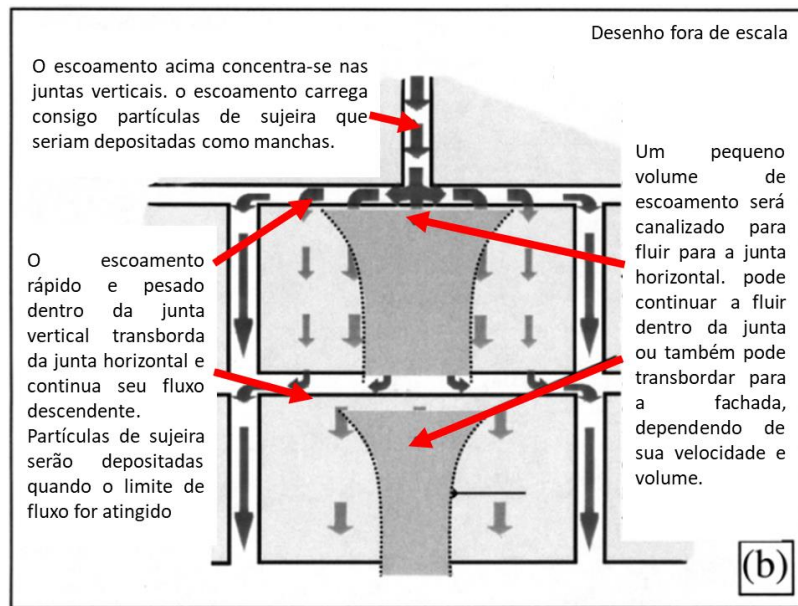
Figura 77 – Penetração da água da chuva em revestimentos aderidos pelos mecanismos de (a) energia cinética da chuva, (b) sucção capilar (b), gravidade (c), corrente de ar (d), pressão do vento e capilaridade e (f) pressão do



(Fonte: GARDEN, 1963)

Juntas verticais desalinhadas afetam o escoamento, provocando transbordamento do escoamento para o pano abaixo da interrupção da junta. Com o acréscimo de velocidade e de volume do escoamento, qualquer obstrução vertical, como uma janela ou juntas de painéis, tendem a promover uma concentração do escoamento. Ao encontrar a descontinuidade, o escoamento continua parcialmente a percorrer a trajetória vertical, enquanto uma pequena porção do volume é desviado lateralmente pela junta horizontal, conforme esquematizado na Figura 78 (CHEW; TAN, 2003).

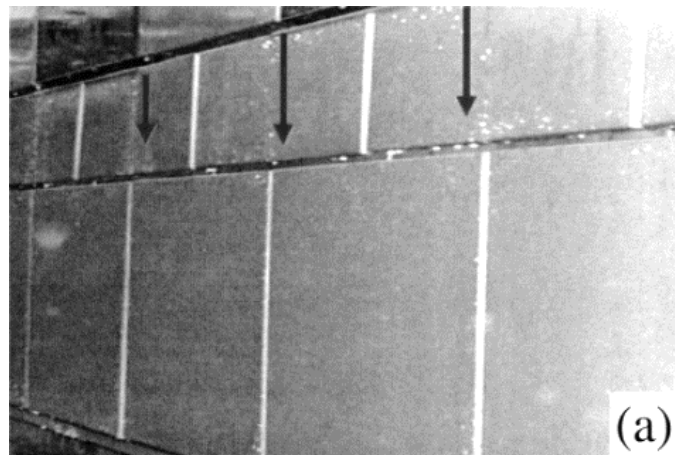
Figura 78 – Trajetórias do escoamento em superfície com juntas desalinhadas



(Fonte: CHEW; TAN, 2003)

Este tipo de escoamento resulta em manchas compridas abaixo da junta vertical, delimitadas lateralmente por junta menos distintas e mais curtas. Quando a chuva cessa, o escoamento se torna distinto e corresponde às marcas das manchas existentes. No limite do escoamento, à medida que o escoamento seca, ocorre o acúmulo de sujeira nas marcas de manchas existentes, conforme a Figura 79 (CHEW; TAN, 2003).

Figura 79 – Escoamento sobre uma superfície com juntas desalinhadas



(Fonte: CHEW; TAN, 2003)



### 3.2.2 Características de revestimento

Os principais aspectos relacionados à estética das fachadas são a textura, a cor e a porosidade (POYASTRO, 2011). A natureza dos materiais de revestimento determina o que acontece com a fachada na continuação de uma chuva, afetando inclusive modelos de manchamento/limpeza (ROBINSON; BAKER, 1975). Sob condições ambientais naturais, o armazenamento da umidade pode ser dividido entre as regiões de higroscopicidade e capilaridade, sendo que não há uma fronteira definida entre elas (FANG *et al.*, 2021). Para todas os tipos de edificação, as características do projeto arquitetônico podem fazer com que a retenção de sujeira e o escoamento do escoamento superficial sejam irregulares e descontrolados, gerando manchamentos (CHEW; TAN, 2003).

#### 3.2.2.1 Porosidade

Genel (2005) define a porosidade como a grandeza que exprime a porcentagem de vazios em um material. A taxa de absorção de água do material do revestimento é o que determina a quantidade de água da chuva incidente nas paredes que pode penetrar na porosidade aberta do revestimento (VALLEJO, 1990). A quantidade de água que escorre pelo revestimento é também uma função da taxa de absorção do material de revestimento, que é dada em função da porosidade do mesmo (VIEIRA, 2005). Dessa forma, a porosidade permite a estocagem da água absorvida por capilaridade (GENEL, 2005).

Durante uma chuva, os materiais porosos tendem a absorver inicialmente a água sobre a superfície da parede até que a taxa de depósito de água supere a taxa de absorção; a partir deste instante a água começa a migrar da parede para o solo. Para materiais não porosos a formação de escoamento de água ocorre tão logo a água se deposite sobre a superfície (ROBINSON; BAKER, 1975). Rebocos de parede mais porosos dificultam os processos de lavagem e podem apresentar uma camada de manchamento mais uniforme (PEREIRA *et al.*, 2020).

A porosidade pode influenciar nos manchamentos de duas maneiras: alterando na distribuição dos efeitos de lavagem e redistribuição da sujeira; facilitando a formação da camada de sujeira devido ao acúmulo de partículas nos poros, alvéolos e capilares. As partículas colmatam essas aberturas e se aderem nas regiões próximas o que intensifica o processo de manchamento e pode gerar efeitos secundários, como a modificação da permeabilidade do revestimento (VALLEJO, 1990; CHAVES 2009). Fungos e bactérias inclusive obtêm na porosidade a oportunidade de entrar no material e desenvolver as estruturas necessárias às suas atividades metabólicas (GENEL, 2005).

Em revestimentos de argamassa, a porosidade afeta a permeabilidade à água do revestimento, por isso a água das chuvas deve ser retida de modo uniforme em toda a fachada para, posteriormente, ser devolvida à atmosfera por evaporação (CHAVES, 2009).

A porosidade é determinada pela razão entre o volume de poros abertos e o volume total da amostra (considerando os vazios), caracterizando-se como os vazios intercomunicados através dos quais ocorre a movimentação de fluídos por percolação ou capilaridade (GTA, 2009). Ela pode ser definida como uma “abertura” característica inerente à maioria dos materiais de construção utilizados (argamassa, alvenaria, concreto), os quais apresentam uma ordem de grandeza das aberturas compreendida entre  $0,28 \times 10^{-9}$  m e  $0,013 \times 10^{-3}$  m (BAUER, 1987).

É necessário se fazer a caracterização desta propriedade para determinar a capacidade de absorção ao vapor de água ou água líquida, sendo a dimensão e geometria dos poros fatores importantes para determinar a permeabilidade dos materiais (ZANONI, 2015). Straube (1998), identificou na literatura que a porosidade aberta dos tijolos pode variar entre 11% e 40% e argamassas de cimento podem apresentar porosidades entre 20% e 30%. Van Goethen (2014) identificou na literatura que tijolos podem apresentar uma porosidade de até 17%, enquanto as argamassas apresentam uma porosidade média de 31%. Por sua vez, Zanoni (2015) identificou na literatura valores de porosidade de argamassa entre 26% e 29% e de tijolos cerâmicos entre 28% e 32,4 %.

#### 3.2.2.2 Textura

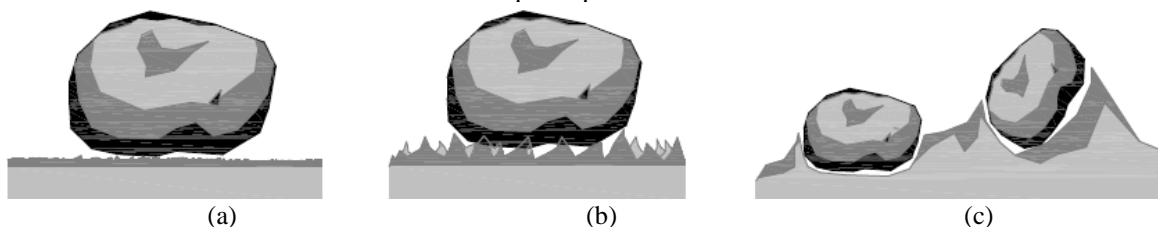
As texturas superficiais podem ser classificadas pelo tamanho da aspereza, pela resposta à deposição e adesão de partículas de sujidade e pela distribuição de água de chuva escorrida (VALLEJO, 1990). A textura superficial é resultado do modo de aplicação do material: revestimentos simplesmente projetados tendem a ser mais rugosos; após a projeção, se o material for pressionado (através do desempenho) a superfície tende a ficar mais lisa (GENEL, 2005).

As texturas dos materiais de revestimento estão relacionadas com a taxa de acúmulo de partículas contaminantes, sendo que os diferentes tipos de textura promovem diferentes processos de lavagem na superfície da fachada (PEREIRA *et al.*, 2020). Os diferentes tipos de estão descritos na sequência, fazendo também a menção dos processos de manchamento associados:

- **Textura Rugosa:** apresenta asperezas com tamanho superior a 1 mm de profundidade e por isso são mais sensíveis ao desenvolvimento de uma camada de sujidade – embora o efeito de lavagem da sujidade ocorra de maneira mais regular devido à distribuição do escoamento (VALLEJO, 1990; PETRUCCI, 2000, MELO JR, 2010, POYASTRO, 2011). Superfícies rugosas proporcionam um espalhamento dos escoamentos de água e diminuição de desgastes diferenciais (VIEIRA, 2005). Devido à grande área de superfície específica, texturas muito rugosas podem fazer com que a água permaneça aderida ao revestimento e estacionária (STRAUBE, 1998).
- **Textura lisa:** com asperezas de profundidade e separação na ordem de 10 a 1.000  $\mu\text{m}$ , apresenta efeitos de lavagem e de manchamento dependentes das condições de exposição da fachada com tendência a desenvolver a camada de manchamento lentamente (VALLEJO, 1990; PETRUCCI, 2000, MELO JR, 2010, POYASTRO, 2011).
- **Textura polida:** apresenta baixa porosidade e elevada uniformidade superficial e baixa permeabilidade, faz com que a sujeira seja lavada da superfície quase que em sua totalidade (VALLEJO, 1990; PETRUCCI, 2000; MELO JR, 2010; POYASTRO, 2011).

A Figura 80 proposta por Carrié e Morel (1975, apud MELO JR, 2010) representa como a rugosidade do revestimento influencia a aderência de partículas: na Figura 80 (a) a textura lisa, dificulta a aderência da partícula, à medida que na Figura 80 (c) a ordem de grandeza similar entre as dimensões da rugosidade do substrato e da partícula favorecem a ancoragem mecânica das partículas.

Figura 80 – (a) Textura muito lisa, sem rugosidade. (b) Textura em que as rugosidades apresentam dimensões menores que as partículas. (c) Textura em que as dimensões da rugosidade são da mesma ordem de grandeza que as partículas.



(Fonte: CARRIÉ; MOREL, 1975<sup>13</sup> apud MELO JR 2010)

<sup>13</sup> CARRIÉ, C.; MOREL, D. **Salissures de Façades**. Paris: Eyrolles, 1975.

A rugosidade permite a fixação de microrganismos e o armazenamento de matéria orgânica nutritiva (GENEL, 2005). Quanto maior for a rugosidade, menor será a velocidade do escoamento, facilitando a absorção da água por capilaridade (ARGILÉS, 1999 apud SILVA, 2007), o que também pode influenciar na diminuição do efeito de lavagem das partículas contaminantes e microrganismos da superfície da fachada.

Além disso, Vallejo (1990) propõe que seja reduzida a rugosidade do material onde não se prevê uma manutenção periódica e principalmente nas áreas em que ocorre pequeno aporte de água e que o uso de texturas rugosas seja feito somente quando o efeito do lavado for abundante e regular.

### 3.2.2.3 Ângulo de contato de molhamento

O ângulo de contato de molhamento pode ser definido como o ângulo entre o menisco de água e a superfície capilar. Materiais hidrofílicos (que atraem a água) apresentam ângulos inferiores a  $90^\circ$ , enquanto materiais hidrofóbicos (que repelem a água) apresentam ângulos entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ . Ou seja, quanto menor o ângulo de contato, maior será a tendência de ocorrer a sucção capilar (ASHRAE, 2009).

Também, pode ser apresentada com a propriedade característica entre um fluido e um sólido, sendo que o ângulo de contato representa a tensão superficial entre eles. A tensão superficial afeta a sucção entre o sólido e a água. Um baixo ângulo de contato e uma alta tensão superficial indicam que o material é hidrofílico (PARK *et al.*, 2018). Nesse sentido, os autores indicam que são necessários ainda mais estudos sobre a tensão superficial e o ângulo de contato entre a água e os diversos materiais de modo a poder ser empregado em modelos de simulação computacional, em função da diversidade de materiais escolhidos por projetistas de fachadas, os quais apresentam diferentes interações com a água em função de características específicas.

Zucchetti (2016) determinou o ângulo de contato da água com a superfície superior e inferior de um peitoril de granito encontrando os valores médios de  $37,26^\circ$  e  $17,90^\circ$ , respectivamente para cada uma das situações (Figura 81 (a) e (b)).

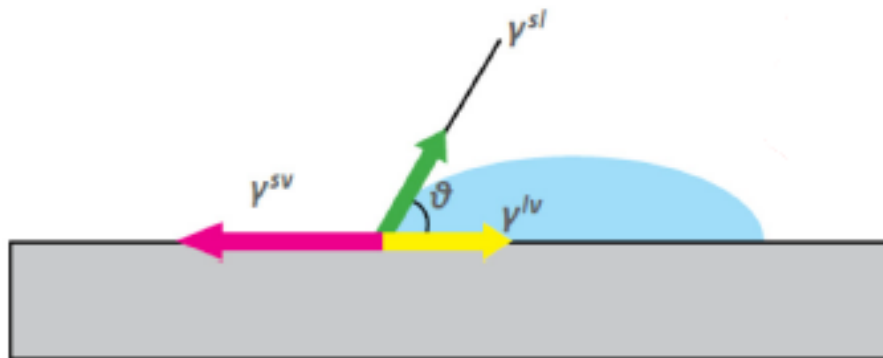
Figura 81 - Ângulo de contato de molhamento



(Fonte: Zuchetti, 2016)

Park *et al.* (2018), indicam que a tensão superficial de um sólido e de um líquido devem ser idênticas. Além disso, a tensão do sólido ( $\gamma_{SV}$ ) é resultante da tensão superficial do líquido ( $\gamma_{LV}$ ), da tensão de interface ( $\gamma_{SL}$ ) e do ângulo de contato ( $\theta$ ), tal qual apresentado pela Figura 82.

Figura 82 - Diagrama de Tensão superficial

(Fonte Park *et al.* 2018)

## 4 MDC E A INTERAÇÃO ENTRE CHUVA DIRIGIDA E FACHADAS

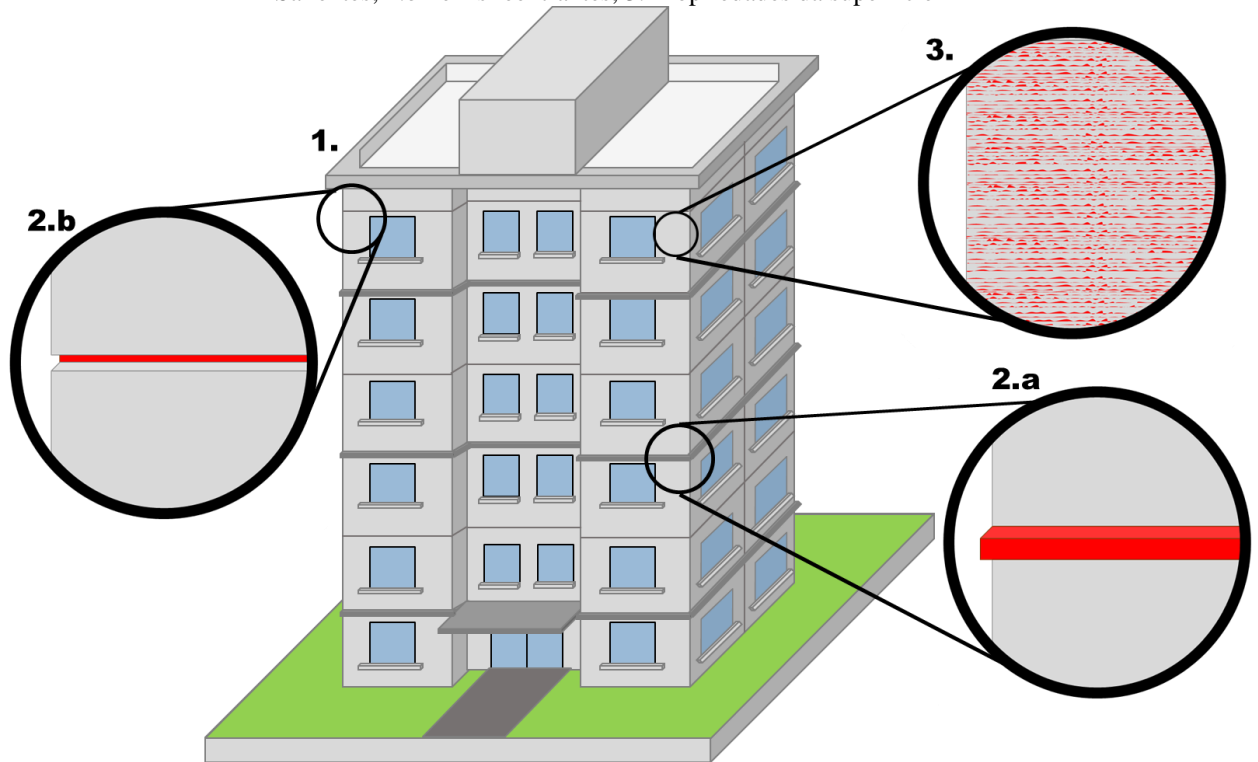
O MDC tem sido amplamente empregado para a melhoria geométrica em problemas da área de mecânica dos fluidos e transferência de calor (BEJAN; LORENTE, 2010, ROCHA *et al.* 2013, GOMES, 2014). Contudo, foram identificados alguns trabalhos que podem ser aplicados à construção civil na melhoria da eficiência de distribuição de tensões em estruturas (HELBIG *et al.*, 2016;) e, mais especificamente, não foi identificada até o momento da publicação deste trabalho a aplicação do MDC ao estudo de configurações de fachadas de edificações, visando a melhoria de desempenho destes sistemas.

A aplicação do MDC para avaliar a interação entre o fenômeno da chuva dirigida e as fachadas de edificações foi estruturado de maneira a abordar os elementos que podem contribuir para a melhoria do desempenho de estanqueidade e da durabilidade das fachadas das edificações, pois, conforme é afirmado por Robinson e Baker (1975), para fazer o controle de infiltrações, manchamentos e deterioração dos elementos em uma edificação, é necessário fazer o controle do escoamento de água nas fachadas.

Segundo a Lei *Construtal*, os construtos elementares (pequenos elementos) se unem em construtos maiores (estruturas de mais alta ordem) e esses componentes de tamanhos variados trabalham juntos para que o acesso ao escoamento seja facilitado (REIS, 2006; BEJAN; ZANE, 2012), o que também se soma à afirmação de Baía e Sabbatini (2002) de que o desempenho individual de cada parte da edificação impacta no desempenho como um todo.

No caso específico deste trabalho, foram propostas metodologias com base no MDC para a análise de desempenho das fachadas frente à ação da chuva dirigida em três níveis distintos de construtos (conforme Figura 83), a partir de uma abordagem mais geral, ou seja, partindo dos construtos de ordem mais elevada da fachada, que é a própria *Fachada* com seus volumes (1.), passando pelos construtos de dimensões intermediárias, que são os *Detalhes Incorporados de fachadas* (2.a e 2.b), e finalizando nos construtos elementares dos revestimentos, que são tratados como *Propriedades da Superfície* (3.).

Figura 83 – Os três níveis de construtos avaliados através do MDC: 1. Fachadas e seus volumes; 2.a Perfis Salientes; 2.b Perfis reentrantes; 3. Propriedades da superfície



(Fonte: autor)

Nesse sentido, para estas três escalas de construtos da fachada, quatro metodologias foram estruturadas conforme esquematizado na Figura 83 e com base nos elementos considerados essenciais para a aplicação do MDC identificados na bibliografia explorada, que foram selecionados com a utilização dos seguintes critérios:

- a. A definição do **Sistema de Escoamento**, identificando qual é o escoamento (**O que flui**) e qual é a estrutura que o escoamento tem de percorrer (**Design**);
- b. A definição dos **Indicadores de Desempenho**, que são os parâmetros de desempenho que devem ser melhorados com a variação da geometria;
- c. A identificação dos **Graus de Liberdade** (dimensões, comprimentos, etc.) da geometria que podem ser alterados visando a melhoria do desempenho;
- d. A identificação das **Restrições**, separadas em duas categorias levando em consideração as seguintes definições:

- i. **Restrições Globais:** são parâmetros geométricos da estrutura de escoamento (volumes e áreas) que devem ser fixados com o objetivo de permitir a observação dos efeitos dos graus de liberdade nos indicadores de desempenho (resultados) a serem avaliados e melhorados.
  - ii. **Restrições Locais:** são as propriedades da estrutura de escoamento (altura, largura) que não podem ser ultrapassados para poder obter taxas de escoamento constantes acessando o sistema.
- e. Identificação dos **Parâmetros Constantes**, que são as propriedades do escoamento que devem ser mantidas constantes (temperatura, vazão, pressão).
- f. **Aplicação do MDC aos sistemas de escoamento propostos:** A partir da definição dos sistemas de escoamento e da seleção dos demais elementos essenciais para a aplicação do MDC é possível propor as metodologias para avaliar o desempenho dos sistemas de escoamento variando os graus de liberdade. Nesse sentido foram utilizados dois trabalhos experimentais com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do método.
- g. **Proposta de melhoria geométrica:** após a análise dos experimentos sob a perspectiva do MDC, é feita a proposição de melhorias geométricas para os trabalhos avaliados.

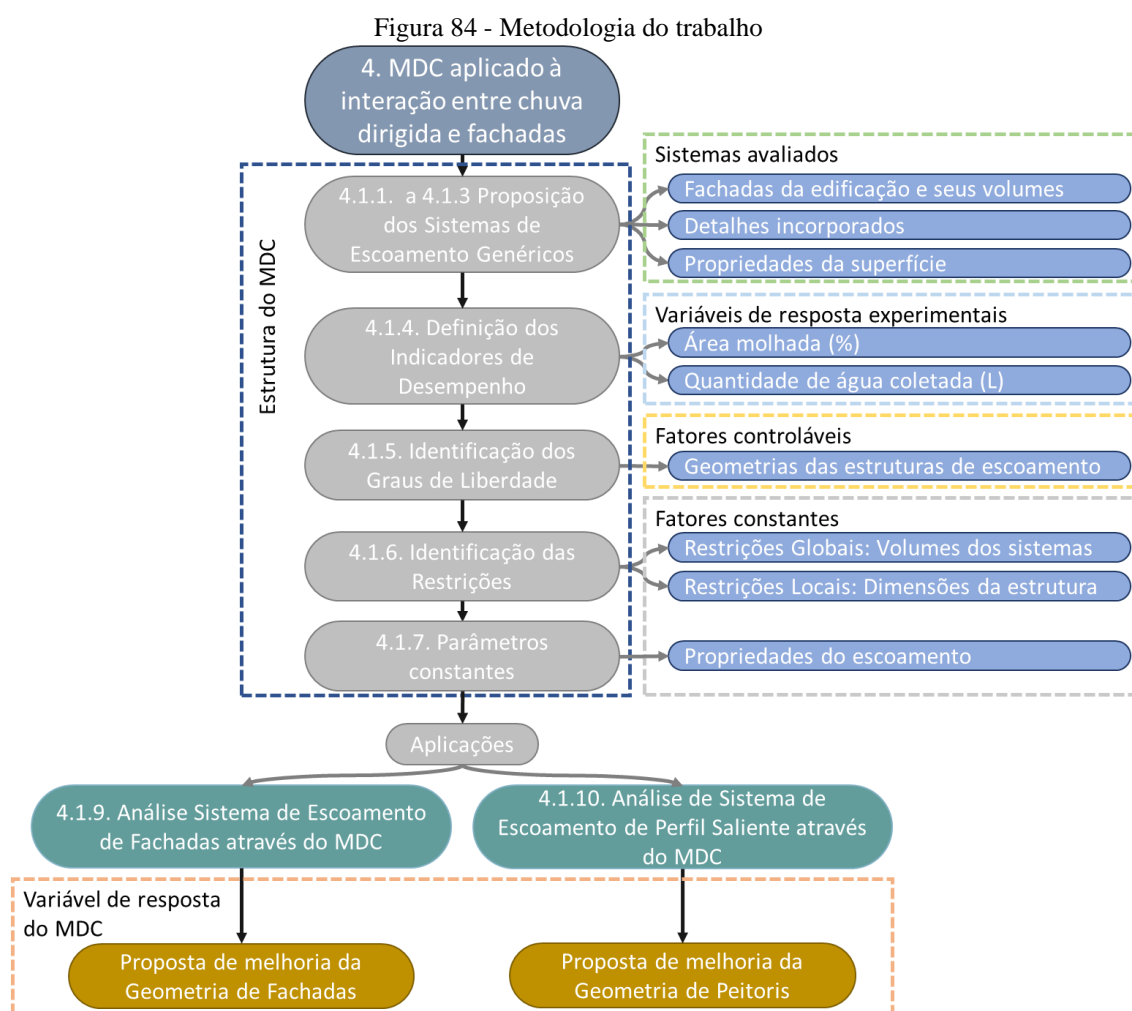
Ainda, deve ser ressaltado que é possível traçar um paralelo entre os elementos do MDC e conceitos utilizados no planejamento de experimentos, como as variáveis de resposta, os fatores controláveis e os não controláveis.

As *variáveis de resposta* são informações mensuráveis e que permitem analisar características e propriedades relacionadas com a qualidade de um produto (RIBEIRO; TEN CATEN, 2011). Sob a perspectiva do MDC, as *variáveis de resposta experimentais* são os *indicadores de desempenho* dos sistemas, ou seja, os resultados obtidos experimentalmente através de ensaios ou simulações que permitem a comparação de desempenho entre os sistemas de escoamento, enquanto as *variáveis de resposta do MDC* são as propostas de melhoria geométrica para as estruturas de escoamento, sendo a prospecção da evolução do *design* uma das principais características do método.



Os *fatores controláveis* são um subconjunto dos parâmetros do processo, elegidos para serem estudados e avaliados em diversos níveis (RIBEIRO; TEN CATEN, 2011), ou seja, são muito similares aos *graus de liberdade* do MDC, utilizados na proposição da melhoria da geometria do sistema.

Os *fatores constantes* não entram no experimento ou são mantidos constantes durante o experimento (RIBEIRO; TEN CATEN, 2011), tal qual as *restrições* aplicadas no MDC. O mapeamento da metodologia aplicada no trabalho está apresentado na Figura 84.



## 4.1 SISTEMAS DE ESCOAMENTO GENÉRICOS

Os sistemas de escoamento que serão apresentados na sequência foram concebidos com base na exploração bibliográfica objetivando possibilitar a aplicação das metodologias desenvolvidas em uma grande diversidade de trabalhos (experimentais ou de simulação) envolvendo a interação entre a chuva dirigida e as fachadas, considerando elementos regularmente utilizados nas edificações – por isso os sistemas foram considerados como genéricos.

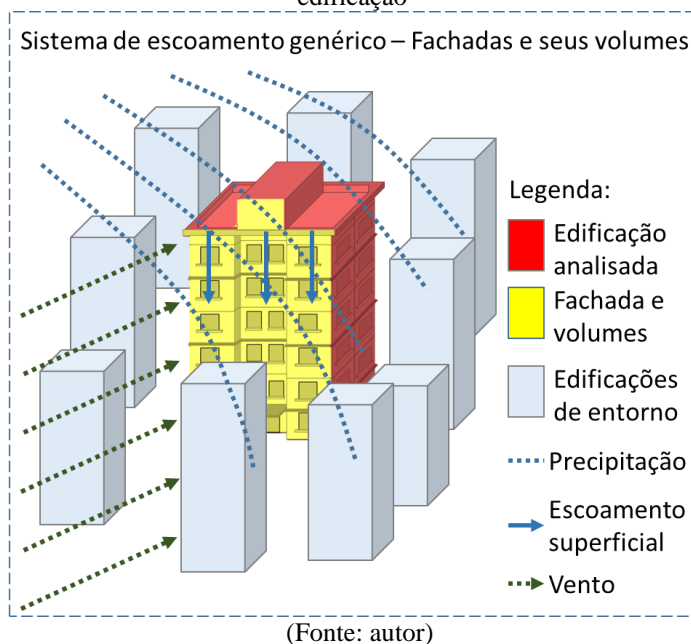
### 4.1.1 Fachadas da edificação e seus volumes

O sistema de escoamento genérico para análise da interação da chuva dirigida com a edificação foi baseado nos ensaios realizados por Poyastro (2011), Zucchetti *et al.* (2016), Kubilay *et al.* (2017) e Cho *et al.* (2020). A partir desses trabalhos foi definido que o **design**, ou seja, a estrutura que o escoamento percorre, é a fachada da edificação que se deseja analisar, com seus avanços e recuos e propriedades superficiais.

A partir dos trabalhos analisados na revisão bibliográfica, foi identificado como constituintes do “escoamento”: o vento, a precipitação e o escoamento superficial (POYASTRO, 2011; ZUCCHETTI *et al.*, 2016; KUBILAY *et al.*, 2017; CHO *et al.*, 2020). Nesse sentido, para manter as taxas de escoamento que acessam o sistema constantes, foi identificado que as edificações de entorno também compõem esse sistema genérico.

A Figura 85 apresenta o esquema do sistema de escoamento genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e a volumetria da edificação, sendo que a edificação que terá sua geometria variada dentro das condições impostas pelo MDC está destacada em vermelho e a fachada que terá o desempenho avaliado a partir das variações volumétricas está destacada em amarelo.

Figura 85 – Sistema de escoamento genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e a volumetria da edificação

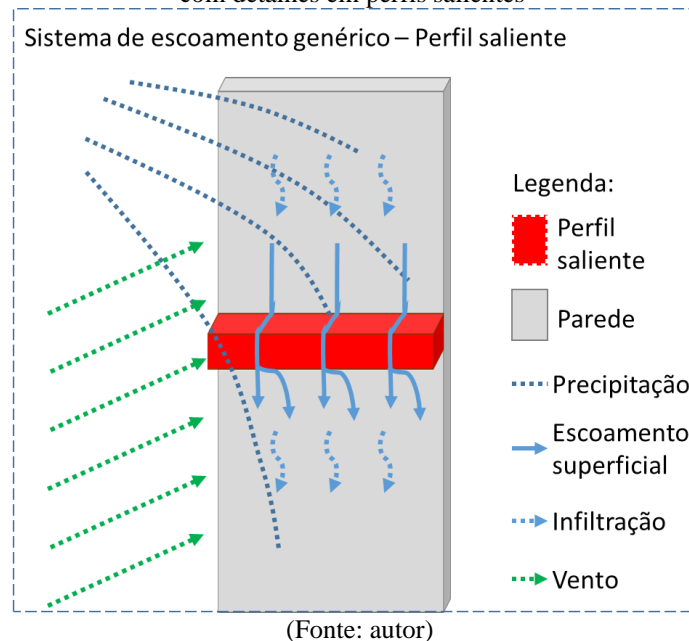


#### 4.1.2 Detalhes incorporados

Para detalhes incorporados de fachadas foram pensados dois tipos de sistemas de escoamento genéricos. O primeiro sistema de escoamento genérico foi elaborado com base nas observações feitas por Marsh (1977), Chew e Tan (2003) e no trabalho executado por Zucchetti (2016) que avaliou a influência de detalhes de peitoris no manchamento de fachadas. A partir desses trabalhos foi definido que o **design**, ou seja, a estrutura percorrida pelo escoamento, é uma área da fachada da edificação que se deseja analisar, com suas projeções (perfil saliente) e propriedades superficiais. Dessa maneira, foi denominado como sistema de escoamento genérico para perfis salientes. Os perfis salientes, destacados em vermelho na Figura 86, são as variáveis do sistema que podem ter sua forma alterada dentro das condições impostas pelo MDC.

O **escoamento** foi identificado como a chuva dirigida que acessa a estrutura de escoamento, representadas pela precipitação e pelo perfil de vento que incidem sobre a superfície da fachada, o escoamento superficial, que só é plenamente desenvolvido após os poros do revestimento estarem completamente saturados, o que ocorre através da infiltração de água. Para esse sistema de escoamento é importante a avaliação a capacidade das projeções em conduzir o escoamento superficial de modo a afastá-lo da superfície da fachada, bem como de criar pequenas áreas de abrigo.

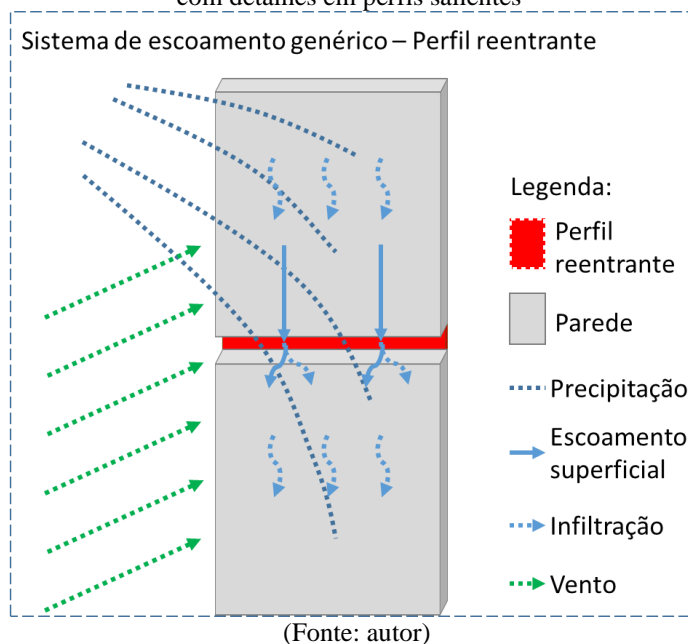
Figura 86 – Sistema de escoamento genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e áreas de fachada com detalhes em perfis salientes



O segundo sistema de escoamento para detalhes incorporados foi concebido a partir das observações feitas por Robinson e Baker (1975), Vallejo (1990), Chew e Tan (2003) e Vieira (2005), trabalhos de caráter empírico no sentido de observar a resposta da fachada submetida à chuva dirigida, e com a intenção de analisar qual é o comportamento do escoamento ao interagir com áreas de fachada cujo único detalhe incorporado são os frisos horizontais.

Dessa maneira, o **design** do sistema de escoamento foi identificado como uma área da fachada e um detalhe reentrante em relação à superfície do paramento. O **escoamento** que incide no sistema genérico de perfis reentrantes foi considerado o mesmo que incide sobre o sistema de escoamento genérico de perfis salientes. Na Figura 87, está apresentado o sistema de escoamento genérico, em que o perfil reentrando pode ter sua geometria variada dentro das condições impostas pelo MDC.

Figura 87 – Sistema de Escoamento Genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e áreas de fachada com detalhes em perfis salientes



Foi identificada na bibliografia a falta de evidências experimentais que descrevam qual é o comportamento mais preciso dos detalhes reentrantes: se os mesmos são um ponto de concentração de umidade; se tem a capacidade de conduzir o escoamento de água lateralmente; ou se interagem de alguma outra maneira com o escoamento.

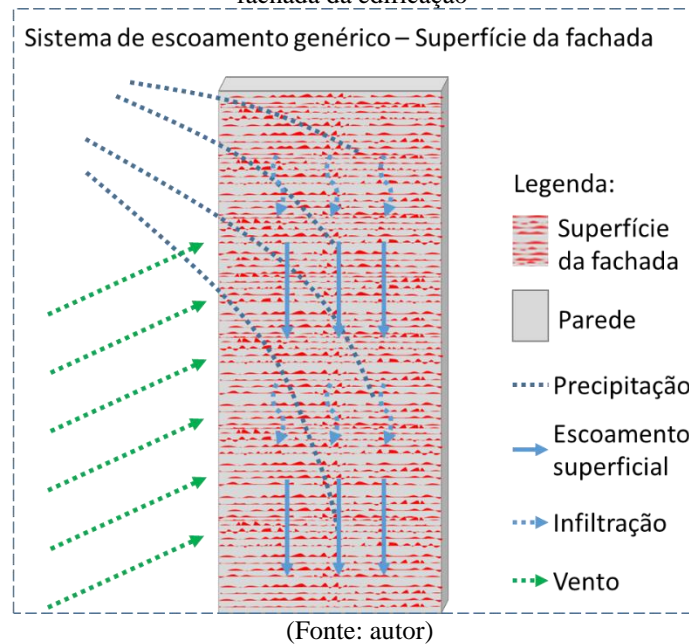
#### 4.1.3 Propriedades da Superfície

A última proposta de análise da chuva dirigida sobre a superfície da fachada leva em consideração que as propriedades da superfície podem atuar de maneira a redistribuir o escoamento de maneira mais ou menos homogênea, assim como atuar de maneira diferente na aderência e adesão de partículas contaminantes sobre a superfície da fachada (VALLEJO, 1990; STRAUBE, 1998; VIEIRA, 2005; GENEL, 2005; CHAVES, 2009; MELO JR, 2010; ZANONI, 2015; PEREIRA *et al.*, 2020).

O **design** para avaliar esse nível mais elementar dos construtos é constituído pela superfície da fachada. O **escoamento** é constituído pela chuva dirigida, representada pela precipitação e pelo perfil de vento e pelo escoamento superficial, que só é plenamente desenvolvido após a completa saturação dos poros do revestimento, que ocorre através da infiltração. O sistema de escoamento genérico apresentado na Figura 88 tem como proposição avaliar a redistribuição do escoamento sobre a fachada com a alteração das propriedades superficiais, as quais podem

ser variadas a partir das condições impostas pelo MDC e que estão representadas de maneira esquemática pela hachura vermelha sobre a superfície da fachada.

Figura 88 – Sistema de Escoamento Genérico para analisar a interação entre a chuva dirigida e a superfície da fachada da edificação



#### 4.1.4 Indicadores de Desempenho

Os indicadores de desempenho foram selecionados com base nos resultados dos trabalhos de Poyastro (2011) e Zucchetti (2016) e estão justificados nos tópicos que seguem.

##### 4.1.4.1 Área molhada (%):

A área molhada (%) é considerada a razão percentual entre área molhada e a área total da fachada. Tal qual identificado na análise realizada por Zucchetti *et al.* (2016), é perceptível que a forma construída pode influenciar na quantidade de área molhada. Também, as diferentes formas das edificações podem criar áreas de proteção na fachada (POYASTRO, 2011). Outra alternativa possível, seria interpretar os dados considerando a área protegida ao invés da área molhada, como Zucchetti (2016) considerou nos resultados dos trabalhos sobre os peitoris.

A utilização da razão percentual entre a área molhada e área úmida pode ser aplicável a todos os sistemas de escoamento genéricos. Deve-se observar, entretanto, que a área protegida nem sempre significará que a superfície da fachada está completamente seca, condição que pode ser

difícil de ser atingida, mas sim pode ser representada pela formação de áreas de umedecimento diferencial. Nesse sentido pode ser utilizado um mapeamento das zonas de umidade para determinar quais áreas estão mais protegidas ou expostas.

#### 4.1.4.2 Quantidade de água coletada (l):

Na análise das volumetrias das edificações, a quantidade de água coletada é alterada com a alteração da relação entre a largura e altura, como apresentado por Cho *et al.* (2020). Conforme identificado por Poyastro (2011) e Zucchetti *et al.* (2016), a forma da volumetria pode criar áreas de abrigo e afetar a quantidade de área molhada em termos percentuais, a avaliação da quantidade efetiva de água coletada junto da superfície do revestimento com a variação da forma é igualmente importante de ser melhor compreendida.

Na análise de detalhes incorporados de fachada, como apresentado por Zucchetti (2016), a quantidade de água coletada na base dos modelos está relacionada com a capacidade dos peitoris em conduzir o escoamento, afastando-o da superfície da fachada. Esse método poderia ser replicado à análise de sistemas de escoamento para detalhes reentrantes e para a análise de sistemas de escoamento de propriedades superficiais do revestimento. Nas medições realizadas por Kubilay *et al.* (2017), as quantidades de água coletada estão relacionadas com a posição da edificação analisada no arranjo de edificações e com a orientação das fachadas.

Em resumo, a quantificação de água coletada junto da superfície pode ser aplicável a quase todos os sistemas de escoamento genéricos. A exceção são os ensaios de simulação de chuva sobre volumetrias em escala muito reduzida, tal qual o realizado por Poyastro (2011), nos quais não é possível a utilização de coletores de água.

### 4.1.5 Graus de Liberdade

Os graus de liberdade foram selecionados com base nas características das estruturas de fluxo que não se constituem como restrições e que por isso podem ser alteradas de maneira a proporcionar melhorias no desempenho.

#### 4.1.5.1 Volumetria da fachada

Poyastro (2011) identificou que diferentes arranjos de avanços de volume em uma fachada produzem áreas de proteção diferentes quando interagem com a chuva dirigida. Zucchetti *et al.* (2016), evidenciam quantitativamente o efeito de proteção da fachada através dos rearranjos de volumes a partir da análise das imagens dos ensaios realizados por Poyastro (2011),

concluindo que a forma arquitetônica da edificação influenciou no padrão de molhamento da fachada analisada.

A Figura 89 apresenta um esquema de variação da geometria da fachada em que os volumes salientes da fachada destacados em azul e laranja são dispostos inicialmente nas laterais da fachada e, posteriormente, ao centro, entretanto sem ferir as restrições impostas pelo MDC, que são a Volumetria Global da Edificação, a Altura (H) e a Largura da Fachada (L) analisada.

Figura 89 – Duas edificações com arranjos diferentes de geometria restritos às imposições do MDC



(Fonte: autor)

Entretanto, conforme será justificado no item 4.1.6, as propostas de variação da volumetria devem se dar dentro de determinadas restrições para satisfazer os critérios de aplicação do MDC. As principais restrições identificadas na revisão bibliográfica foram a Volumetria Global da Edificação, a Altura e a Largura da Fachada analisada.

#### 4.1.5.2 Geometria do perfil saliente

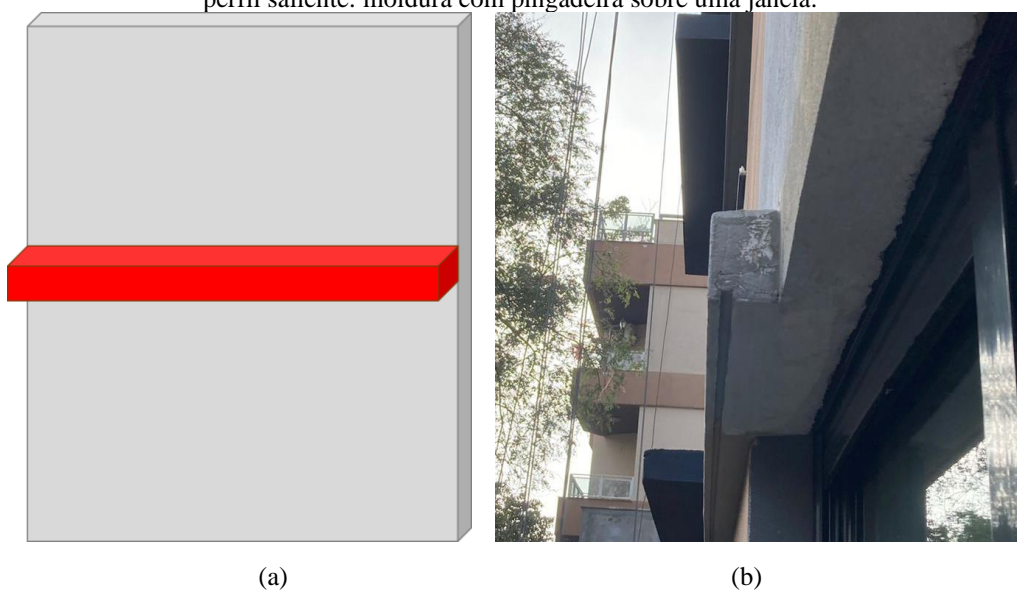
Perfis salientes são detalhes arquitetônicos, normalmente de pequenas dimensões quando comparados ao volume total da edificação, como peitoris, molduras, que formam plataformas horizontais salientes no revestimento. Como identificado por Perez (1998) o formato e a dimensão da projeção em relação à superfície da fachada afetam a eficiência no descolamento



da lâmina de água das superfícies. A utilização de bordas com cantos vivos e pingadeiras, como sugerido por Silva e Torres (2003) e observado por Verdum *et al.* (2021) tende a melhorar a condução do escoamento de água, afastando-o da superfície do revestimento.

O trabalho de Zucchetti (2016) evidenciou que diferentes combinações de projeção, engastamento lateral e inclinação de peitoris abaixo de esquadrias produzem efeitos distintos de proteção na superfície da fachada. Outros elementos salientes carecem de estudos, como molduras e plataformas, avaliando a combinação de outras configurações geométricas. A Figura 90 (a) apresenta uma estrutura de escoamento genérica em que o perfil saliente (em vermelho) pode ter sua configuração geométrica variada sob as condições impostas pelo MDC. A Figura 90 (b) apresenta um exemplo de perfil saliente utilizado em fachada, que é uma moldura com pingadeira sobre uma janela.

Figura 90 – (a) Estrutura de escoamento com perfil saliente genérico destacado em vermelho. (b) Exemplo de perfil saliente: moldura com pingadeira sobre uma janela.



(Fonte: autor)

#### 4.1.5.3 Geometria do perfil reentrante

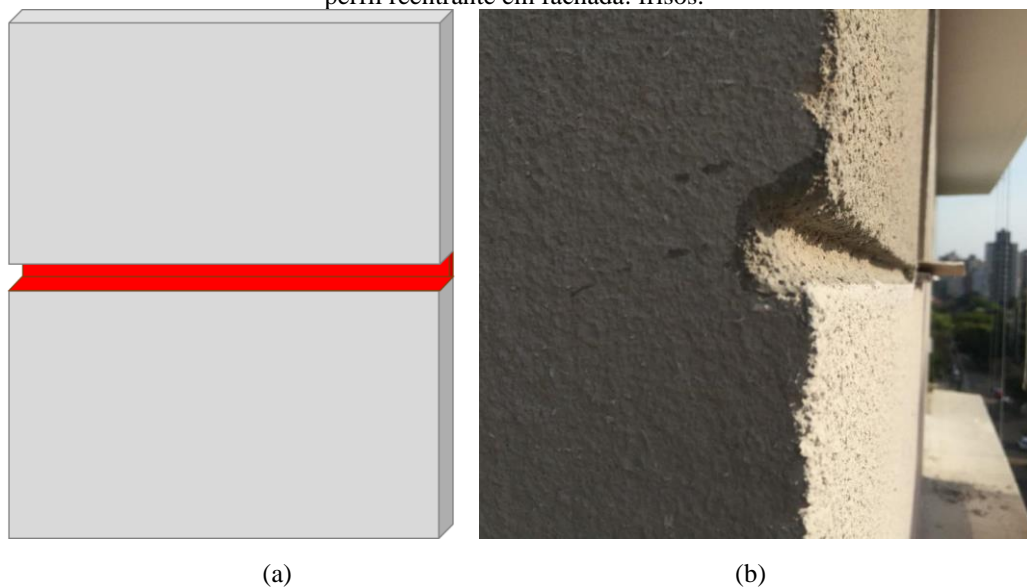
Os perfis reentrantes são detalhes de fachadas, normalmente apresentando pequenas dimensões quando comparados ao volume total da edificação. Os principais exemplos de perfis reentrantes são os frisos e as juntas de revestimento. A geometria dos perfis reentrantes, deve ser avaliada levando em consideração os mecanismos de penetração da água da chuva no revestimento

apontados por Garden (1963), Chew e Tan (2003), Vieira (2005) e Kesik (2016). Dessa forma, podem ser avaliadas a profundidade, altura e forma geométrica aplicada nos frisos, por exemplo.

Observa-se, entretanto, a falta de trabalhos que evidenciem como o escoamento de água interage com esse detalhe. Nesse sentido, ainda é necessária melhorar a compreensão de como ocorre a condução do escoamento de água por esse tipo de detalhe incorporado.

A Figura 91 (a) apresenta uma estrutura de escoamento para um perfil reentrante. As áreas destacadas em vermelho representam as dimensões da reentrância que podem ser variadas observando-se as restrições impostas pelo MDC. A Figura 91 (b) apresenta um exemplo de detalhe reentrante em fachada, que são os frisos.

Figura 91 – (a) Estrutura de escoamento com perfil reentrante genérico destacado em vermelho. (b) Exemplo de perfil reentrante em fachada: frisos.



(Fonte: autor)

#### 4.1.5.4 Propriedades dos materiais de revestimento como uma variável

A variação das propriedades superficiais do revestimento como a rugosidade, a porosidade e o ângulo de contato de molhamento tendem a provocar alterações na distribuição do escoamento sobre a superfície da fachada (VALLEJO, 1990; ZUCCHETTI, 2016; PARK *et al.*, 2018; PEREIRA *et al.*; 2020; FANG *et al.*, 2021).

Uma análise mais detalhada, entretanto, baseada em evidências que detalhem com maior acuidade como os escoamentos se desenvolvem e se propagam ao longo do tempo sobre superfícies com diferentes propriedades ainda se faz necessária.

Sugere-se que a utilização das propriedades da superfície como grau de liberdade para os sistemas de escoamento em fachadas seja aplicável inicialmente somente ao sistema de escoamento genérico para superfícies de fachadas, de maneira a compreender como o ocorre a interação das superfícies com o escoamento.

#### **4.1.6 Restrições**

As variações na estrutura de fluxo têm de respeitar as restrições globais e locais do MDC, que estão descritas nos tópicos a seguir.

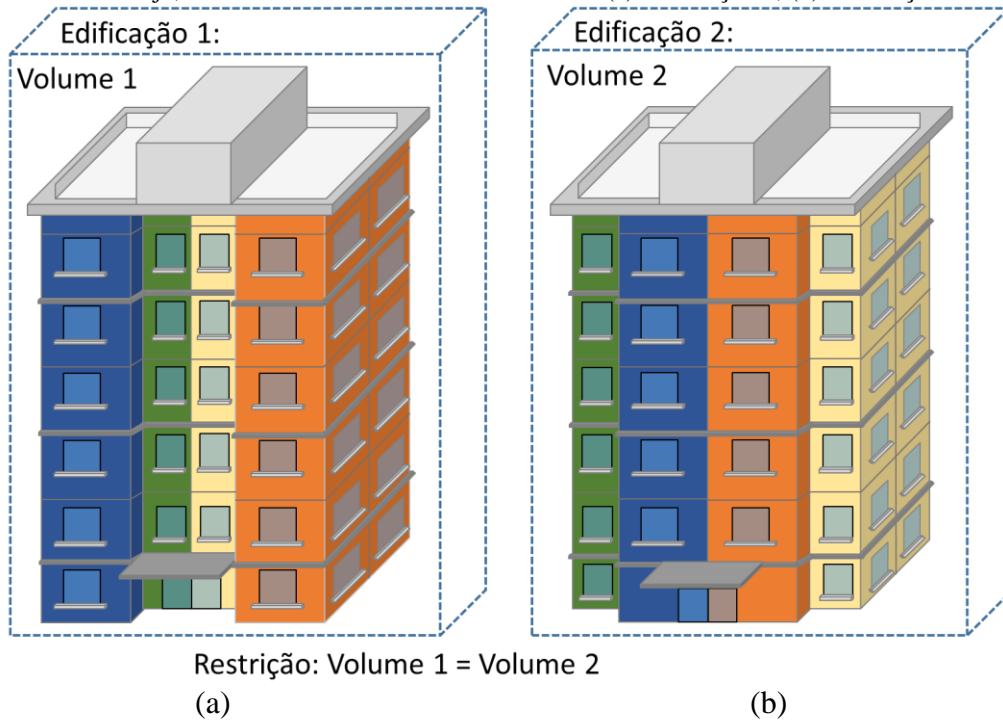
##### **4.1.6.1 Restrição Global do Volume da edificação**

A fixação do *volume global da edificação* como um fator constante atende ao critério do MDC de que o volume da estrutura do sistema de escoamento deve permanecer constante (BEJAN, 1996; REIS, 2006), pois dessa maneira é possível identificar qual configuração geométrica da estrutura de escoamento é mais eficiente sem a necessidade de fazer um acréscimo ou redução de volume.

Além disso, na concepção de uma edificação as formas podem ser variadas livremente dentro de limitações impostas por planos diretores, como o controle da densidade da ocupação dos solos através de coeficientes de aproveitamento, os quais acabam por limitar a volumetria máxima que pode ser utilizada (NETTO; SABOYA, 2010; RIBAS; MOURA, 2015).

A Figura 92 apresenta duas configurações de fachadas para um mesmo sistema de escoamento. Na Edificação 1 os volumes salientes da fachada encontram-se nas laterais da edificação e estão destacados pelas cores azul e laranja, enquanto os volumes da fachada que ficam reentrantes estão destacados pelas cores verde e amarelo. A Edificação 2 apresenta uma configuração alternativa, em que os volumes salientes (em azul e laranja) estão situados ao centro da edificação e os volumes reentrantes situados nas laterais. Deve ser considerado nesse caso que os volumes azuis, laranjas, verdes e amarelos apresentam suas dimensões preservadas para conservar o volume global da edificação.

Figura 92 - Arranjos de Volumetria da Fachada sem alterar o volume global da edificação. Volumes salientes: azul e laranja; Volumes reentrantes: verde e amarelo. (a) Edificação 1; (b) Edificação 2



(Fonte: autor)

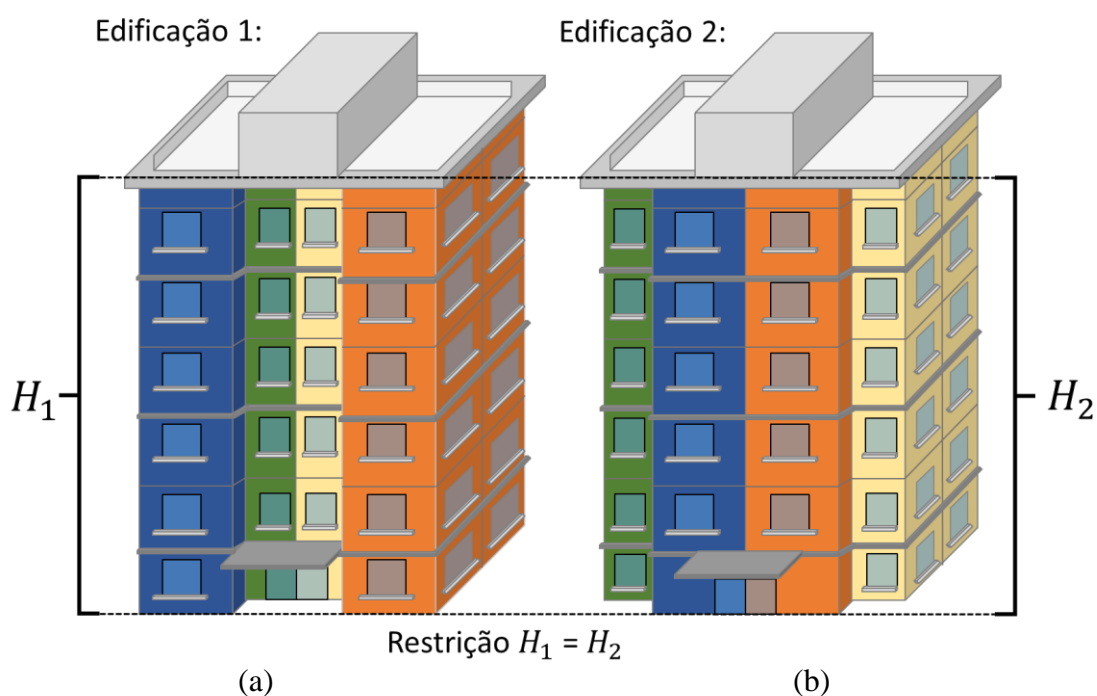
#### 4.1.6.2 Restrição Local de Altura das fachadas

A altura da edificação sofre influência do perfil de distribuição da velocidade do vento, que interfere no modo de deposição de partículas que podem provocar manchamentos nas fachadas (VALLEJO, 1990) e também na pressão de vento exercida sobre a fachada (POYASTRO, 2011; ABNT, 1988). Quanto mais alta for a edificação mais evidente é o “Efeito de Bloqueio de Vento”, que diminui a quantidade de chuva dirigida sobre a superfície da fachada (VALLEJO, 1990; BLOCKEN; CARMELIET, 2006; POYASTRO, 2011; BLOCKEN *et al.*, 2012).

Inclusive, a altura da edificação influencia na determinação do fator  $S_2$ , que é utilizado no cálculo da velocidade característica do vento pela NBR 6123 (ABNT, 1988). Dessa maneira, a altura da edificação deve ser mantida constante, mantendo também constante a velocidade e a pressão do vento, o que é essencial para a aplicação do MDC. Soma-se a isso o fato de que as alturas das edificações são restritas pelos Planos Diretores das cidades (NETTO; SABOYA, 2010; RIBAS; MOURA, 2015).

Em resumo, para um sistema de escoamento que analisa o desempenho de fachadas expostas à chuva dirigida, é importante que a altura da fachada/edificação seja mantida constante para que o escoamento que acessa o sistema também permaneça constante (pois não há alteração no perfil de velocidade do vento) e também para satisfazer as imposições dos planos diretores da cidade. A Figura 93 apresenta dois arranjos distintos de edificação para um sistema de escoamento em que a altura da Edificação 1 ( $H_1$ ) e a altura da Edificação 2 ( $H_2$ ) são iguais e que por isso atendem às restrições impostas pelo MDC.

Figura 93 – Arranjos de volumetria de fachada sem alterar a altura da edificação. (a) Edificação 1; (b) Edificação 2



#### 4.1.6.3 Restrição Local de Largura da fachada analisada

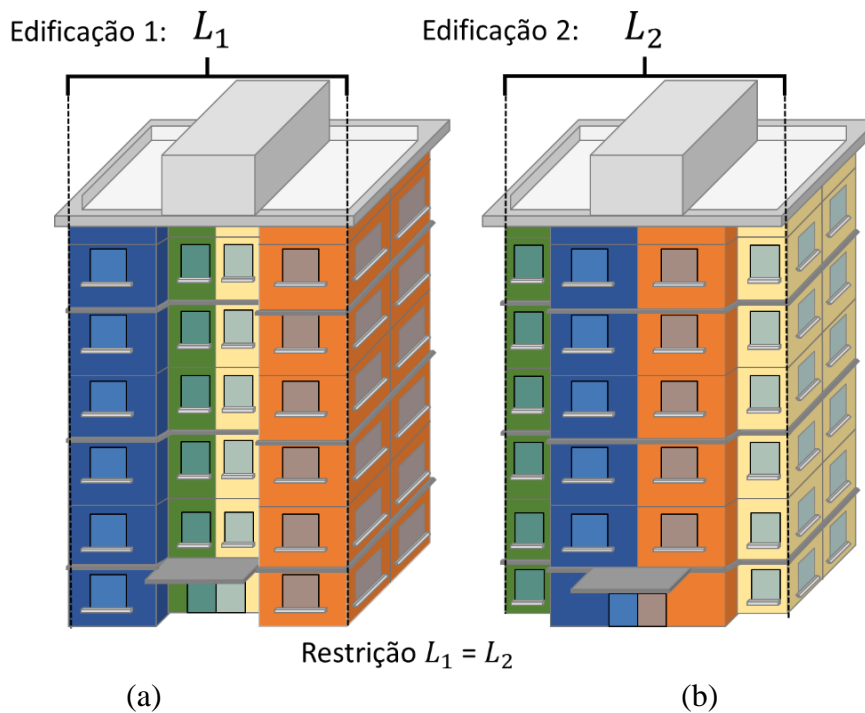
A largura da fachada (edificação) pode potencializar a ocorrência do “Efeito Barreira” quando submetida à incidência de vento (GANDEMER, 1975; POYASTRO, 2011) e, tal qual a altura da edificação, quanto mais larga é a edificação exposta à chuva dirigida, maior será o “Efeito de Bloqueio de Vento” (BLOCKEN; CARMELIET, 2006; BLOCKEN *et al.*, 2012).

A dimensão da fachada exposta ao vento é também considerada na determinação do fator  $S_2$  utilizado na determinação da velocidade característica do vento pela NBR 6123 (1988). Soma-

se a isso, o fato de que as edificações geralmente apresentam limitações de dimensões devido às taxas de ocupação dos terrenos (NETTO; SABOYA, 2010; RIBAS; MOURA, 2016).

Por conseguinte, para que o escoamento que acessa um sistema de escoamento de fachadas permaneça constante, a largura da edificação deve ser mantida constante para que os fenômenos de “Efeito Barreira” e “Efeito de Bloqueio de Vento” sejam os mesmos para todas as variações de configuração geométrica analisadas. A Figura 94 dois arranjos distintos de edificação que atendem às restrições impostas pelo MDC, pois a largura da Edificação 1 ( $L_1$ ) e a largura da Edificação 2 ( $L_2$ ) são iguais.

Figura 94 - Arranjos de volumetria de fachada sem alterar a largura da edificação. (a) Edificação 1; (b) Edificação 2



(Fonte: autor)

#### 4.1.6.4 Restrição Local das Propriedades dos materiais do revestimento

Manter as propriedades dos revestimentos constantes é importante da perspectiva do MDC para avaliar a interação entre a chuva dirigida e diferentes volumes de edificação, pois essas características afetam a distribuição do escoamento sobre a fachada.

Diferentes tipos de textura superficial, determinadas pela rugosidade dos materiais, podem distribuir de maneira mais ou menos homogênea o escoamento da água da chuva pela

superfície da fachada (VALLEJO, 1990; PETRUCCI, 2000; MELO JR, 2010, POYASTRO, 2011).

A dimensão e a intercomunicação entre os poros no revestimento podem favorecer o fenômeno de absorção por capilaridade e também atuar na distribuição dos lavados sobre a superfície da fachada (VALLEJO, 1990; CHAVES, 2009; GTA, 2009). O ângulo de contato de molhamento entre a água e o material do revestimento estão associados à tensão superficial da água sobre o revestimento, sendo que quanto menor for o ângulo de contato da água com o revestimento, maior será a tendência à sucção capilar (PARK *et al.*, 2018). A capacidade do revestimento em absorver a água da chuva é muito importante nos momentos iniciais em que a precipitação começa a interagir com a fachada, pois a lâmina de escoamento de água somente estará bem desenvolvida após os poros do material estarem completamente saturados (ARGILÉS, 1999).

A fixação das propriedades da superfície é aplicável aos sistemas de escoamentos genéricos de fachadas e de detalhes incorporados, pois para estes casos a alteração das características superficiais do revestimento poderiam alterar as condições de escoamento. Dessa forma, é recomendável a fixação das propriedades superficiais do revestimento para melhor avaliar o efeito isolado das alterações geométricas da volumetria, dos detalhes incorporados salientes e reentrantes.

De maneira especial, na avaliação do desempenho de modelos em escala reduzida, deve ser utilizado o mesmo tipo de material na superfície dos modelos para realizar os testes, com a finalidade de garantir as mesmas condições de escoamento. Reproduzir uma textura e porosidade em escala, entretanto, pode ser inexecutável.

Para os sistemas de escoamento que avaliam as propriedades das superfícies, pode ser avaliado o aspecto econômico da aplicação de texturas como uma restrição, pois, por exemplo, a variação da dimensão das texturas tende a provocar consumos diferentes de materiais.

#### 4.1.6.5 Restrição Global do Volume global dos perfis salientes:

Projeções em fachadas, como as molduras, apresentam formatos variados e atendem ao especificado no projeto arquitetônico de fachada. A projeção, a espessura (ou altura) e a seção transversal desses elementos podem conduzir o escoamento, afastando-o do paramento de maneira mais ou menos eficiente (PEREZ, 1988; ZUCCHETTI, 2016).

Para a aplicação do MDC, deve ser mantido constante o volume global das saliências, pois assim é possível verificar quais configurações geométricas são mais eficientes no descolamento da lâmina de água e na proteção das superfícies contíguas sem a necessidade de ser realizado um acréscimo ou subtração de volume do sistema.

Nesse sentido, a Figura 95 apresenta um exemplo para a aplicação do MDC, que deve apresentar as seguintes características:

- são apresentados três sistemas de escoamento, um com saliência vermelha (referência), um segundo com saliência verde (variação 1) e o terceiro com saliência amarela (variação 2);
- os volumes dos três sistemas de escoamento é o mesmo:

$$V_1 = V_2 = V_3$$

- o volume das saliências é dado pelo produto das dimensões da largura  $L$  pelas respectivas projeções  $P$  e espessuras  $E$ , sendo assim:

$$V = L \times P \times E$$

- os elementos salientes apresentam a mesma largura em todos os três sistemas de escoamento, ou seja:

$$L = L_1 = L_2 = L_3$$

Assim:

$$V = L \times P_1 \times E_1 = L \times P_2 \times E_2 = L \times P_3 \times E_3$$

- dessa forma, o volume sempre é constante se a seção transversal dos perfis salientes apresentar a mesma área:

$$A = P_1 \times E_1 = P_2 \times E_2 = P_3 \times E_3$$

- o segundo sistema de escoamento, com a saliência verde, apresenta uma dimensão maior de projeção  $P_2$  do que  $P_1$ , que, por sua vez, é maior do que a projeção  $P_3$ :

$$P_2 > P_1 > P_3$$



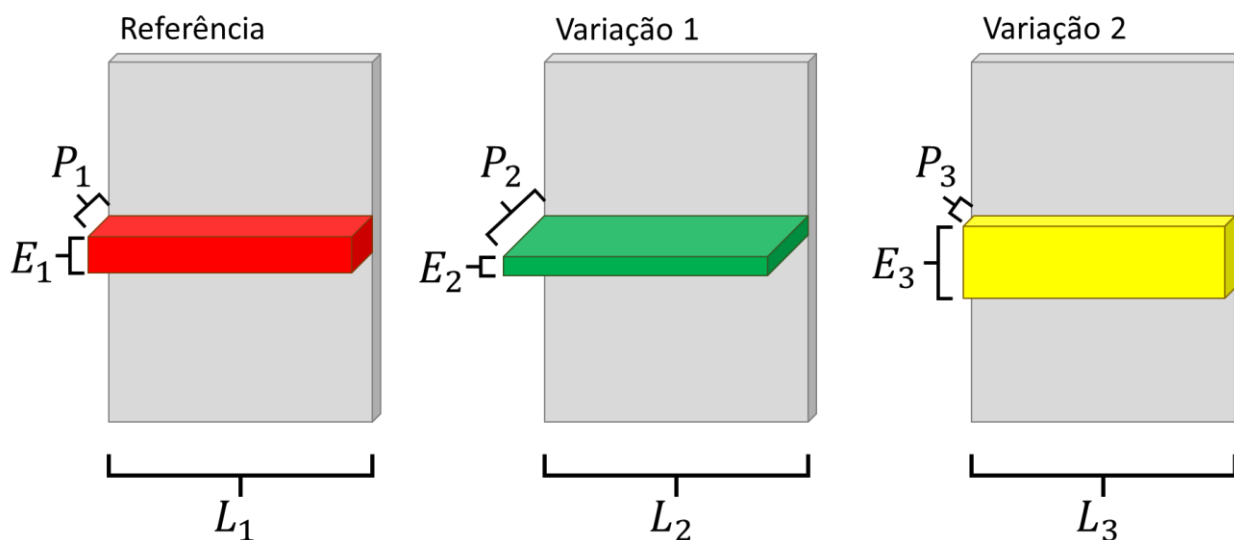
- para que seja possível a aplicação do MDC e os volumes sejam mantidos constantes, a espessura da segunda saliência  $E_2$  deve ser igual ao produto da espessura  $E_1$  pela razão entre  $P_1$  e  $P_2$ :

$$E_2 = E_1 \times \frac{P_1}{P_2}$$

- da mesma maneira, a espessura da saliência  $E_3$  tem de ser dada pelo produto da espessura  $E_1$  pela razão entre  $P_1$  e  $P_3$ :

$$E_3 = E_1 \times \frac{P_1}{P_3}$$

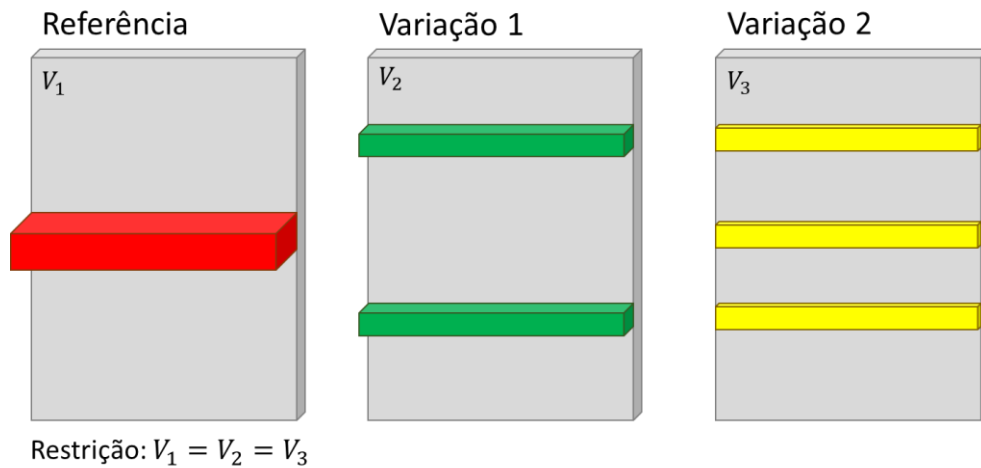
Figura 95 – Diferentes configurações de projeções



(Fonte: autor)

Outra possibilidade a ser analisada é a combinação em diferentes quantidades de perfis salientes na estrutura de escoamento, contanto que os volumes das saliências sejam mantidos constantes, conforme Figura 96. Por essa perspectiva, a quantidade de elementos salientes pode ser considerado um grau de liberdade.

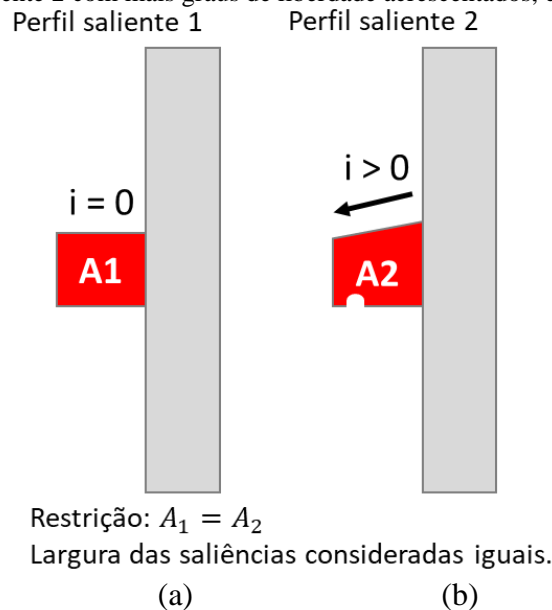
Figura 96 – Estruturas de escoamento com diferentes quantidades de saliências, mantendo o volume constante



(Fonte: autor)

Ainda, as saliências podem ter sua seção transversal alterada, incluindo inclinações na parte superior do elemento e recortes do tipo lacrimal na parte inferior para melhorar a eficiência no descolamento da lâmina de água da superfície (SILVA; TORRES, 2003; ZUCCHETTI, 2016). Para a aplicação do MDC neste caso, também é importante observar que ao incluir uma inclinação e um lacrimal ao elemento saliente mais graus de liberdade são acrescentados à Figura 97 (b).

Figura 97 – Variações da seção transversal com a manutenção do volume da saliência constante. (a) perfil saliente 1; (b) perfil saliente 2 com mais graus de liberdade acrescentados, como inclinação e lacrimal



(Fonte: autor)

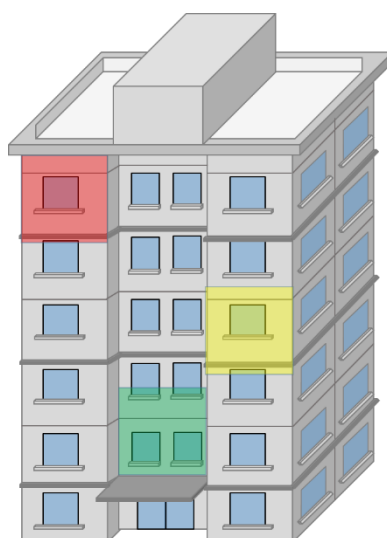
Ressalta-se que para um trabalho experimental como o realizado por Zucchetti (2016), no qual a largura do elemento saliente não é constante entre todos os sistemas de escoamento, para ser aplicado o MDC, a largura do elemento saliente também deve ser considerada para manter o volume do sistema constante.

#### 4.1.6.6 Restrição Local da Posição da área analisada na fachada

De maneira especial em edificações altas, a localização dos detalhes na fachada está relacionada com a eficiência com que os mesmos protegem a superfície. Projeções mais próximas do topo da edificação são, em geral, menos eficientes na proteção de superfícies contíguas (Recomendaciones y manuales técnicos, 1993, apud MELO JR, 2010). Dessa maneira, esquinas e topos da edificação são mais expostos à deposição de chuva e contaminantes, enquanto as partes mais baixas da edificação (COUPER, 1972; VALLEJO 1990; PETRUCCI, 2000; MELO JR, 2010).

Diferentes condições de exposição são apresentadas na Figura 98, em que a área em vermelho é teoricamente a mais exposta à chuva dirigida por estar próxima dos vértices superiores da edificação, enquanto a área destacada em amarela estaria exposta de maneira intermediária, pois está próxima ao vértice, mas em uma altura mais baixa, e a área em verde representaria uma região mais abrigada, por estar no centro do corpo da edificação e próxima à base da torre.

Figura 98 – Condições diferentes de exposição devido à localização na fachada. Área vermelha: alta exposição; Área amarela: exposição intermediária; Área verde: exposição protegida.

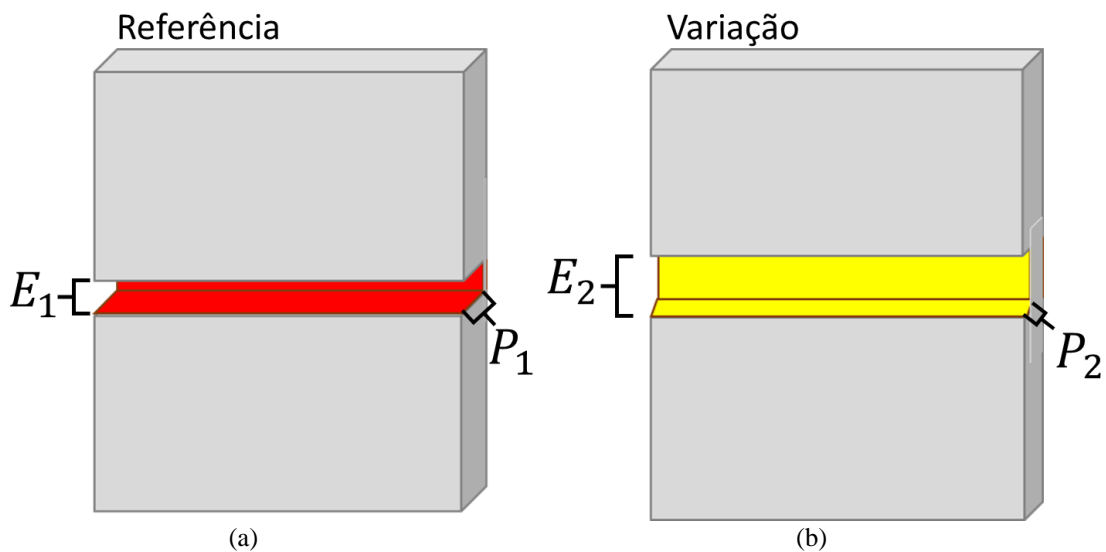


(Fonte: autor)

#### 4.1.6.7 Restrição Global do Volume dos perfis reentrantes

A Figura 99 apresenta uma estrutura de escoamento de referência, em vermelho, e uma estrutura de escoamento com a variação das dimensões da reentrância. Neste exemplo, de maneira análoga ao apresentado na manutenção do volume constante nos perfis salientes, a manutenção da constância do volume do perfil reentrante pode ser determinada pela manutenção da área da seção transversal da saliência.

Figura 99 – Estruturas de escoamento com variação geométrica de perfil reentrante. (a) perfil referência; (b) perfil proposto com manutenção do volume



(Fonte: autor)

A área da saliência é dada por pelo produto da espessura pela profundidade da reentrância:

$$A = E \times P$$

Para possibilitar a aplicação do MDC, conforme apontado por Rei (2006), a área da seção transversal das reentrâncias deve permanecer constante ( $A_1=A_2$ ), dessa forma, a espessura da estrutura de variação  $E_2$  deve ser dada pelo produto da espessura da estrutura de referência  $E_1$  e pela razão entre as profundidades  $P_1$  e  $P_2$ :

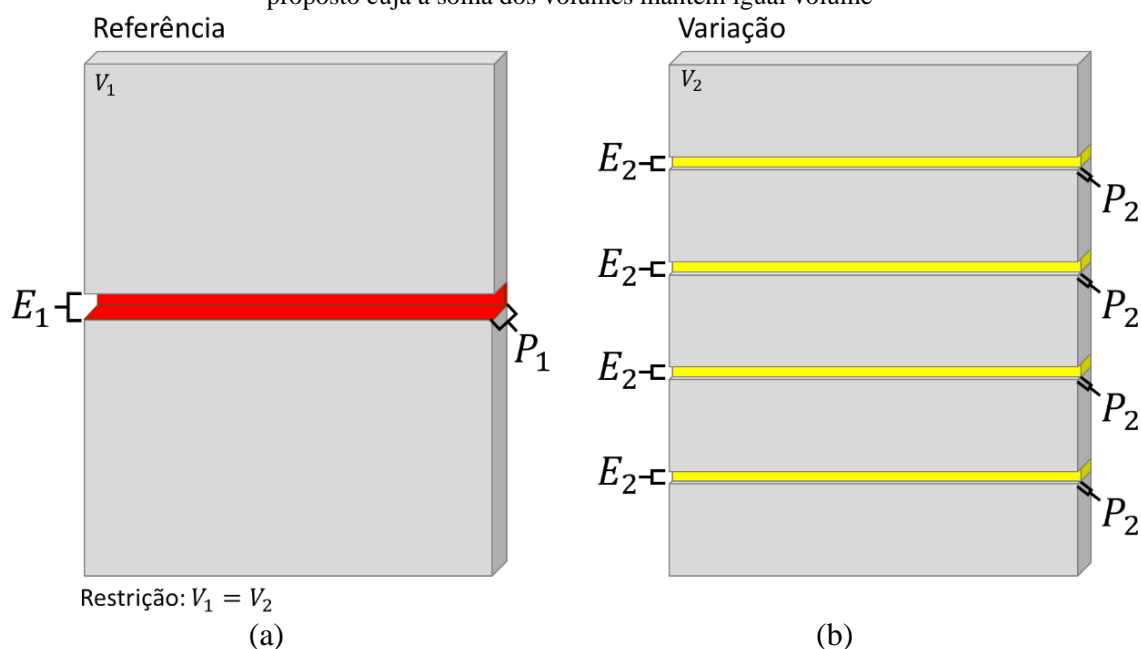
$$E_2 = E_1 \times \frac{P_1}{P_2}$$

A outra possibilidade de variação é a utilização de “n” reentrâncias com um mesmo volume global de modo a avaliar a regulação do escoamento. Tal qual nos perfis salientes, a quantidade

de elementos reentrantes pode ser considerado um grau de liberdade. Para exemplificar, uma variação da estrutura de escoamento com 4 reentrâncias está apresentada na Figura 100. Neste exemplo, a relação entre  $E_2$  e  $E_1$  para manter o volume reentrante constante é:

$$E_2 = E_1 \times \frac{P_1}{4 \times P_2}$$

Figura 100 - Estruturas de escoamento com diferentes quantidades de reentrâncias. (a) perfil referência; (b) perfil proposto cuja a soma dos volumes mantém igual volume



(Fonte: autor)

#### 4.1.7 Parâmetros Constantes

Os próximos tópicos abordam as principais propriedades do escoamento nos sistemas de chuva dirigida propostos. Como condição para a aplicação do MDC, todas as propriedades do escoamento devem ser **parâmetros constantes**, pois dessa maneira é possível a identificação e proposição de geometrias das estruturas de escoamento de melhor desempenho na proteção das fachadas, seus componentes e elementos frente à ação da chuva dirigida.

##### 4.1.7.1 Velocidade do vento

A velocidade do vento é um dos fatores que determina a componente horizontal da chuva dirigida e, por consequência, do ângulo de incidência da precipitação sobre a fachada (NEWMAN, 1987; PETRUCCI, 2000); de maneira mais ampla, quando analisada junto com a vazão de água, é importante na determinação do índice de chuva dirigida (MARSH, 1977).

A pressão estática de vento sobre a superfície da fachada é determinada pela velocidade característica do vento, conforme a NBR 6.123 (ABNT, 1988). Inclusive, a NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) apresenta na Tabela 2 a pressão estática do vento como uma das condicionantes para a realização de ensaio de estanqueidade em fachadas. O efeito da pressão de vento sobre a lâmina de água das fachadas, conforme apontam, Garden (1963), Argilés (1999) e Kesik (2016) pode potencializar os fenômenos de absorção e infiltração de água por capilaridade.

Poyastro (2011), Kubilay *et al.* (2017) e Cho *et al.* (2020) identificaram que o incremento da velocidade do vento tende a ser um importante fator no aumento do molhamento das fachadas. Isso pode ser justificado por dois motivos:

- Ventos fortes apresentam maior a capacidade de deslocamento horizontal das gotas maiores (e mais pesadas). Nesse sentido, quanto maior a velocidade do vento, maior a tendência das gotas em atingir os planos verticais da fachada perpendicularmente, o que gera uma maior eficiência no molhamento do que se a chuva incidisse em um ângulo muito inclinado em relação ao plano da fachada (tendendo a uma queda totalmente vertical).
- Quanto maior a velocidade do vento, maior será a pressão sobre o escoamento superficial, que tenderá a percolar junto da superfície mesmo que a fachada apresente descontinuidades ou canais para dissipar ou conduzir o escoamento.

É importante salientar que para sistemas com construtos de ordem mais elevada, como o sistema de fachadas e seus volumes, o vento interage com a fachada de modo a criar áreas de exposição e de abrigo. Para os construtos de menor ordem e os mais elementares (de detalhes incorporados e de propriedades da superfície, respectivamente), o vento atua de modo a manter o escoamento de água junto da fachada e potencializar os processos de absorção e infiltração.

#### 4.1.7.2 Vazão de água

A vazão de água é apresentada na Tabela 2 pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) como uma das condicionantes para a realização dos ensaios de estanqueidade em fachadas. Grandes vazões de água, conforme evidenciado por Poyastro (2011) e Cho *et al.* (2020), tendem a diminuir consideravelmente as áreas protegidas das fachadas. Um maior escoamento de água que acessa o sistema pode acelerar o processo de formação e a intensidade da lâmina de água por saturar a porosidade do revestimento com maior velocidade (ARGILÉS, 1999; SILVA, 2007). Dessa

maneira, a vazão de água é uma propriedade que afeta tanto os construtos de ordem mais elevada, quanto os mais elementares.

#### 4.1.7.3 Dimensão das gotas de chuva

A dimensão característica das gotas associada à velocidade do vento determina o ângulo com que a precipitação atingirá a fachada. Gotas menores são mais facilmente transportadas, mas também são facilmente desviadas pelos efeitos turbulentos do vento (ROBINSON; BAKER, 1975; MARSCH, 1977; EL SHIMI, 1979; VAN GOETHEN *et al.*, 2014).

Especificamente para ensaios de modelos em escala, como realizado por Poyastro (2011) é necessário a compatibilidade das dimensões das gotas com a escala utilizada nos modelos para aprimorar a representatividade dos resultados obtidos. A restrição das dimensões das gotas de chuvas é aplicável em todos os sistemas de escoamento propostos. Zucchetti (2016), também teve atenção ao dispositivo de aspersão utilizado no trabalho de modo a manter as dimensões das gotas constantes.

#### 4.1.7.4 Ângulo de incidência do vento

A variação do ângulo de incidência do vento pode criar regiões de exposição diferenciais na fachada, alterar as zonas de pressão e sucção (POYASTRO, 2011). Shirzadi *et al.* (2019) identificou que a variação ângulo de incidência do vento combinada com as edificações de entorno podem provocar distintas zonas de exposição ou proteção de vento nas fachadas. As variações de pressão de vento, como previamente mencionado, alteram as condições de interação do escoamento com o revestimento, podendo potencializar a penetração de água nos poros e gerar infiltrações.

#### 4.1.7.5 Temperatura ambiente

Os efeitos da temperatura ambiente são mencionados na bibliografia como uma característica a ser melhor explorada, pois o acréscimo de temperatura pode provocar alterações na evaporação e na absorção de água pelo revestimento, também alterando as condições de pressão de saturação de ar nas camadas de ar próximas às fachadas (VALLEJO, 1990; SENG *et al.*, 2017).

#### 4.1.7.6 Umidade relativa

A umidade relativa do ar deve ser controlada principalmente no período que antecede o início do ensaio, pois uma quantidade de vapor de água elevada no ar atmosférico pode ser condensada (SATO *et al.*, 2002; AYOADE, 1996) caso a fachada apresente uma temperatura inferior à

temperatura do ar atmosférico, o que pode interferir no tempo de formação do escoamento na superfície do revestimento.

O vapor de água no ar atmosférico pode influenciar também na presença de água nos poros revestimento através da capacidade higroscópica dos materiais, que é a capacidade de captar e liberar a umidade dependendo da umidade relativa do ar (SANTOS; FARIA, 2015; COELHO, 2020; FANG *et al*, 2021). Para umidades relativas abaixo de 95%, o principal fenômeno de transporte de umidade em concretos com materiais biológicos tende a ser a higroscopicidade; acima de 95% há uma tendência maior que os principais fenômenos de transporte sejam relativos à capilaridade (SENG *et al*, 2017).

#### 4.1.7.7 Entorno da edificação

O entorno da edificação altera não só a velocidade do vento que incide sobre a fachada, através de efeitos de abrigo e canalização do vento (GANDEMER, 1975; MAC DONALD, 1975; PENWARD; WISE, 1975; VIEIRA, 2005; MELO JR 2010), como também altera as condições de exposição da edificação ao fenômeno da chuva dirigida (POYASTRO, 2011).

Edifícios isolados e edifícios abrigados apresentam tendências distintas em termos de diferença de pressão superficial nas fachadas de barlavento e sotavento com a variação do ângulo de incidência (SHIRZADI *et al.*, 2019). Em suma, as variações geométricas do entorno produzem diferentes interações entre a chuva dirigida e as fachadas das edificações, mesmo que as condições meteorológicas sejam idênticas (KUBILAY *et al.*, 2014).

O efeito das condições de entorno de uma edificação também é evidenciado pela equação que determina a velocidade característica de vento, representado pelos coeficientes  $S_1$  (topográfico) e  $S_2$  (de rugosidade do terreno e dimensões da edificação), indicados pela NBR 6.123 (ABNT, 1988).

Nesse sentido, o entorno de uma edificação atua regulando as taxas de escoamento que acessam o sistema, sendo, dessa maneira, necessária a fixação das condições de entorno de um sistema de escoamentos para a análise de fachadas e seus volumes.

#### 4.1.7.8 Contaminantes atmosféricos

Os contaminantes atmosféricos são responsáveis (juntamente com o escoamento superficial) pelos efeitos de lavado limpo e lavado sujo descritos por Robinson e Baker (1975). As partículas de contaminação apresentam dimensões distintas e, em função dessas diferenças, apresentam



processos distintos de transporte através da atmosfera e de aderência aos revestimentos, os quais apresentam diferentes tipos de rugosidade superficial (VALLEJO, 1990; PETRUCCI, 2000, MELO JR, 2010; POYASTRO, 2011). As partículas de sujidade interagindo juntamente com a chuva dirigida e as fachadas pode ser aplicada em todos os sistemas de escoamento, mas talvez o efeito seja mais para os sistemas de escoamento de detalhes incorporados e de propriedades da superfície, pois estes sistemas de escoamento apresentam uma escala em que o manchamento das partículas é mais evidente.

#### 4.1.7.9 Duração do ensaio/chuva

Conforme apontado por Argilés (1999), a duração da exposição da superfície do revestimento à chuva dirigida é determinante na formação de um escoamento superficial bem desenvolvido, ou seja, quanto maior o tempo de exposição, maiores as condições para que o escoamento esteja desenvolvido.

Van Goethen (2014) indica que eventos de chuva com duração superior a 12 horas tendem sempre a formar escoamento superficial de água sobre a fachada, independente das condições de entorno da edificação e do tipo de revestimento utilizado, enquanto eventos de chuva de até 4 horas podem ou não provocar escoamento superficial, dependendo da exposição e do tipo de revestimento utilizado.

A duração da exposição da fachada ao escoamento também é responsável pela evolução dos processos de lavagem limpa e lavagem suja apontados por Robinson e Baker (1975) e evidenciados experimentalmente por Zucchetti (2016). Dessa maneira, a duração da exposição ao escoamento apresenta influência sobre o desenvolvimento do escoamento superficial e por isso deve ser considerada uma restrição importante para a aplicação do MDC.

#### 4.1.8 Resumo dos Sistemas de Escoamento propostos

O Quadro 3 apresenta um resumo dos sistemas de escoamento propostos considerando o **Design**, o **Escoamento**, os **Indicadores de Desempenho** e as **Restrições** aplicáveis ao design e ao escoamento para cada sistema.

Quadro 3 – Resumo das Estruturas de escoamento

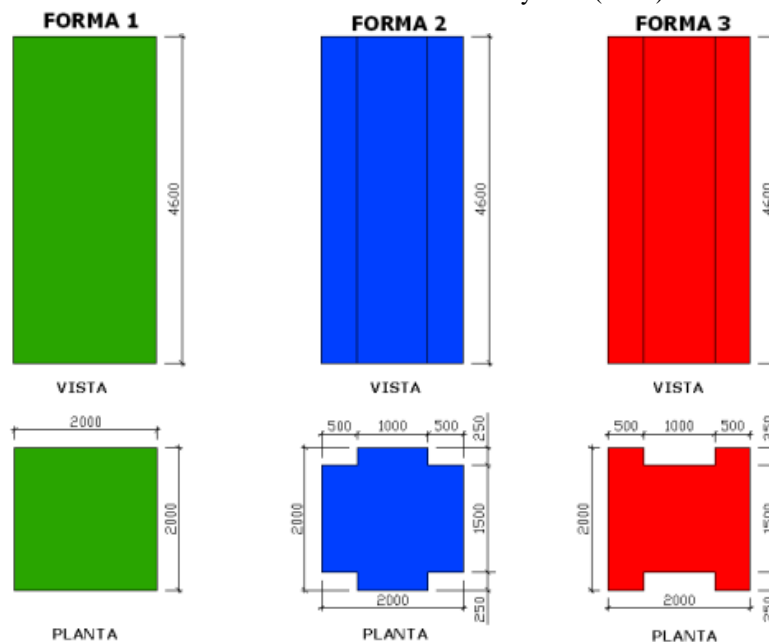
Sistemas de Escoamento	4.1.1 Fachadas e seus volumes	4.1.2 Perfil Saliente	4.1.2 Perfil Reentrante	4.1.3 Propriedades da superfície
<b>Temas</b>				
4.1.1 Sistema de Escoamento Genérico				
Design (estruturas de escoamento)				
Fachadas e seus volumes	X			
Saliências		X		
Reentrâncias			X	
Superfície da Fachada	X	X	X	X
Escoamento (o que flui)				
Vento	X	X	X	X
Chuva	X	X	X	X
Escoamento superficial	X	X	X	X
4.1.4 Indicadores de Desempenho				
4.1.4.1 Área protegida (%)	X	X	X	X
4.1.4.2 Quantidade de água coletada (L)	X	X	X	X
4.1.5 Graus de liberdade				
4.1.5.1. Fachadas e seus volumes	X			
4.1.5.2. Geometria do perfil saliente		X		
4.1.5.3. Geometria do perfil reentrante			X	
4.1.5.4. Propriedades dos materiais de revestimento (variável)				X
4.1.6 Restrições				
4.1.6.1 Restrição Global do Volume da edificação	X			
4.1.6.2 Restrição Local de Altura das fachadas	X			
4.1.6.3 Restrição Local de Largura da fachada analisada	X			
4.1.6.4 Restrição Local das Propriedades dos materiais do revestimento	X	X	X	
4.1.6.5 Restrição Global do Volume global dos perfis salientes		X		
4.1.6.6 Restrição Local da Posição da área analisada na fachada		X	X	X
4.1.6.7 Restrição Global do Volume dos perfis reentrantes			X	
4.1.7 Parâmetros Constantes				
4.1.7.1 Velocidade do vento	X	X	X	X
4.1.7.2 Vazão de água	X	X	X	X
4.1.7.3 Dimensão das gotas de chuva	X	X	X	X
4.1.7.4 Ângulo de incidência do vento	X	X	X	X
4.1.7.5 Temperatura ambiente	X	X	X	X
4.1.7.6 Umidade relativa	X	X	X	X
4.1.7.7 Entorno da edificação	X			
4.1.7.8 Partículas (Contaminantes atmosféricos)	X	X	X	X
4.1.7.9 Duração do ensaio	X	X	X	X

#### 4.1.9 Aplicação do MDC na Análise de um Sistema de escoamento de Fachadas e seus volumes

Para exemplificar a aplicação do MDC em um Sistema de escoamento de fachadas e seus volumes, foi escolhido o experimento realizado por Poyastro (2011) e a análise dos dados obtidos por Zucchetti *et al.* (2016).

A primeira etapa consiste na identificação da **estrutura de escoamento**, que é determinada pelas dimensões dos volumes das edificações, conforme (Figura 101). A primeira edificação apresenta um volume prismático perfeito. Quando observadas as plantas baixas dos demais modelos, a segunda edificação apresenta uma forma de ‘cruz’ e a terceira edificação uma forma de ‘H’. Como **escoamento** que acessa o sistema, foram considerados a velocidade do vento e a precipitação, que foram executados em escala por Poyastro (2011). Para o escoamento é importante mencionar que a autora manteve como fatores constantes (**restrições**) durante os ensaios a velocidade do vento incidente, a umidade relativa do ar, a temperatura do ar e o tamanho das gotas de chuva. Na análise com a utilização do MDC, foi considerado o ângulo de incidência ortogonal às fachadas.

Figura 101 – Formatos de torres avaliados no trabalho de Poyastro (2011) com medidas em cm.



(Fonte: POYASTRO, 2011)

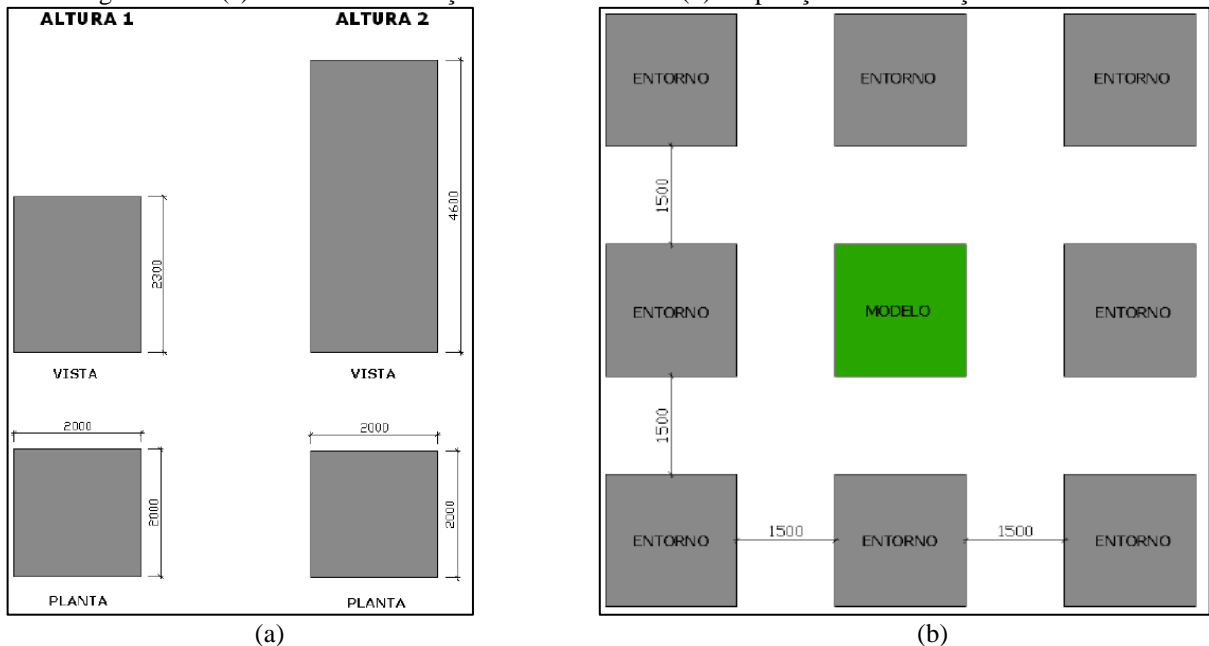
Com as dimensões dos modelos analisados por Poyastro (2011), é possível determinar a volumetria dos modelos e, dessa maneira, pode-se aplicar a **restrição** de que os volumes globais devem ser iguais entre as estruturas de escoamento. Sob a perspectiva da aplicação do MDC, somente os modelos 2 e 3 poderiam ser analisados para avaliar qual apresenta uma geometria mais eficiente na proteção da superfície da fachada, pois os mesmos apresentavam o mesmo volume global, conforme indicado. Nos modelos também podem ser aplicadas as **restrições** de que os mesmos devem apresentar a mesma altura e a mesma largura, sendo que os modelos M2 e M3 também atendem a estas restrições do método.

Tabela 4 – Volumes globais dos modelos analisados por Poyastro (2011).

Modelo	Área base (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Seção transversal
M1	400	46	18400	Quadrada
M2	350	46	16100	Cruz
M3	350	46	16100	‘H’

O entorno, ou seja, as edificações vizinhas dos modelos foram variadas em 3 níveis, conforme Figura 102 (a): sem edificações vizinhas (E1); com edificações vizinhas com metade da altura (E2); e com edificações vizinhas de mesma altura (E3). A disposição das edificações de entorno está apresentada na Figura 102 (b).

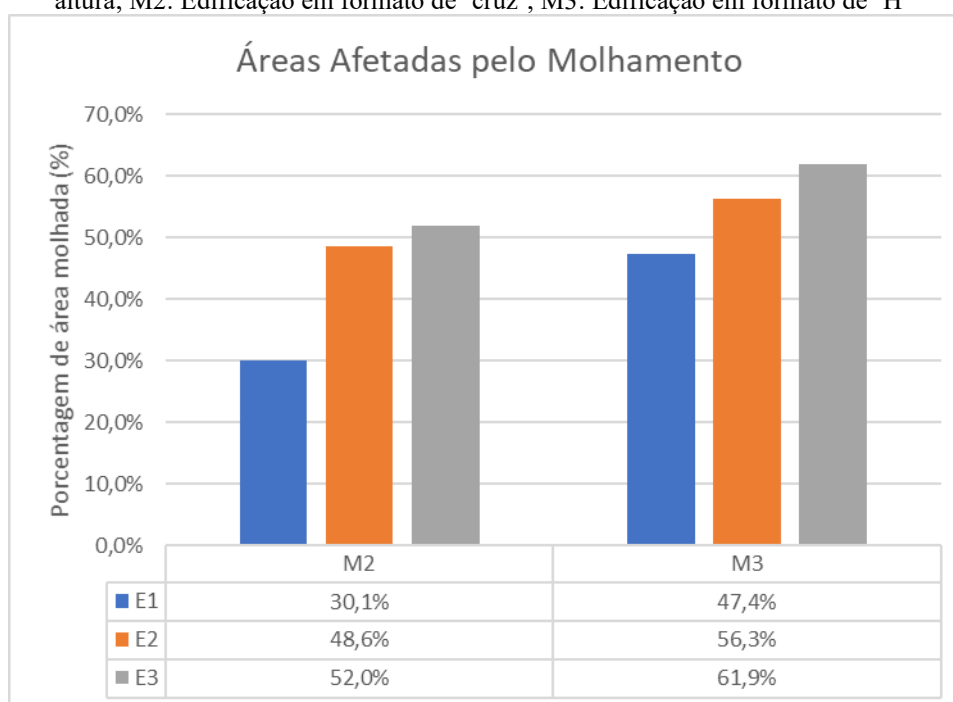
Figura 102 – (a) Altura das edificações vizinhas em cm. (b) Disposição das edificações de entorno



(Fonte: POYASTRO, 2011)

O **indicador de desempenho** é o percentual de área protegida e foi escolhido com base nos resultados de Poyastro (2011) analisados quantitativamente por Zucchetti *et al.* (2016). A Figura 103 apresenta o desempenho dos modelos M2 e M3 em termos de percentual de áreas afetadas pelo molhamento. É possível observar que o modelo M2 foi mais eficiente, apresentando um menor percentual de áreas afetadas pelo molhamento para todas as condições de entorno.

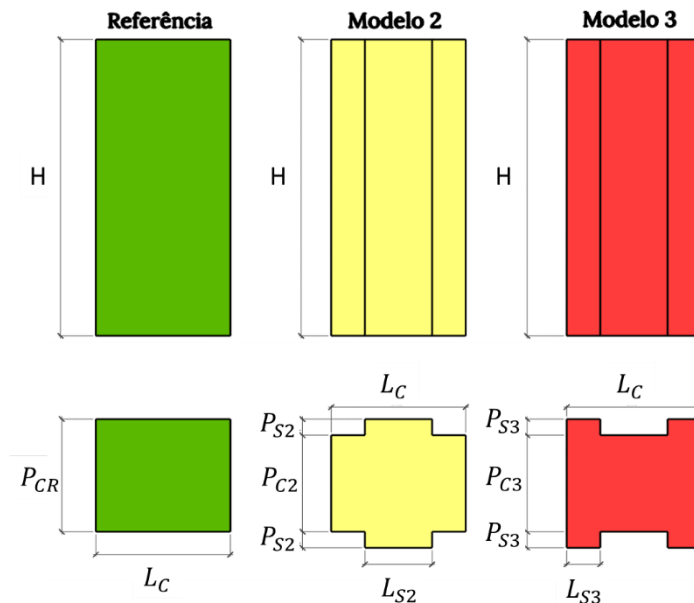
Figura 103 – Influência do formato da edificação no percentual de áreas afetadas pelo molhamento. E1: edificação isolada; E2: Edificação com entorno de metade da altura; E3: Edificação com entorno de mesma altura; M2: Edificação em formato de ‘cruz’; M3: Edificação em formato de ‘H’



(Fonte: Adaptado de ZUCCHETTI *et al.*, 2016)

Para a aplicação do MDC é comum a elaboração de uma relação que permite expressar numericamente o quanto do volume (ou área) de uma estrutura de escoamento de referência foi utilizada no aprimoramento das estruturas de escoamento propostas. Para possibilitar a criação desta relação, os volumes entre as estruturas de escoamento devem ser constantes. A Figura 104 apresenta uma situação hipotética em que todos os modelos avaliados apresentam um mesmo volume global – baseados nos modelos de Poyastro (2011).

Figura 104 - Situação hipotética - Volumes das estruturas de escoamento iguais



(Fonte: Adaptado de POYASTRO, 2011)

Onde:

$H$ : Altura da fachada da edificação. Tem de ser igual em todos os modelos;

$P_{CR}$ : Profundidade do corpo principal da edificação de referência em planta baixa;

$L_C$ : Largura do corpo principal da edificação em planta baixa, considerando a fachada analisada.

Tem de ser igual em todos os modelos;

$P_{Ci}$ : Profundidade do corpo principal da edificação de variação em planta baixa;

$P_{Si}$ : Profundidade do volume saliente da fachada em relação ao corpo principal em planta baixa;

$L_{Si}$ : Largura da projeção da fachada em planta baixa.

A Tabela 5 apresenta os valores das dimensões normalizadas pela altura dos modelos utilizados por Poyastro (2011). Através da normalização é possível se estabelecer uma relação entre as dimensões dos elementos.

Tabela 5 – Dimensões normalizadas dos modelos pela altura das edificações

<b>Modelo</b>	<b>Lc/H</b>	<b>Pc/H</b>	<b>Ls/H</b>	<b>Seção transversal</b>
M2	0,33	0,43	0,05	Cruz
M3	0,43	0,33	0,05	‘H’

(Fonte: autor)

A partir da identificação dos elementos dos volumes que compõem a estrutura de escoamento, pode ser proposta uma relação matemática, que será identificada por  $\emptyset$ , a qual fornece a razão de volume da estrutura de referência que foi convertida em volumes salientes da fachada, conforme Equação 5.

$$\emptyset = \frac{V_S}{V_R} = \frac{\sum_{i=1}^n H \times N_{Si} (P_{Si} \times L_{Si})}{H \times P_{CR} \times L_C}$$

Equação 5 – Razão entre volumes salientes e volume de referência

Onde:

$V_S$ : É o volume das saliências, dado em função da soma do produto da altura da saliência ( $H$ ) pela profundidade da saliência ( $P_S$ ), pela largura da Saliência ( $L_P$ ) em planta baixa e pela quantidade de vezes que este elemento se multiplica na fachada ( $N_S$ ) para cada diferente projeção identificada na fachada.

$V_R$ : É o volume de referência, que é constante para todas as estruturas de escoamento e é dado pela multiplicação da altura ( $H$ ), profundidade ( $P_{CR}$ ) e largura ( $L_C$ ) da edificação de referência.

O parâmetro  $\emptyset$  fornece a porcentagem do volume da edificação de referência que foi convertido em projeções e poderia ser utilizado como um indicativo de qual seria a fração ideal do volume original que sendo convertido em projeções poderia apresentar melhor desempenho na diminuição da superfície molhada da fachada. Também, é possível comparar composições geométricas que apresentem a mesma razão entre volume projetado da fachada e volume global da edificação.

Como para a aplicação do MDC a altura é um fator constante, a equação para obter o parâmetro  $\emptyset$  pode ser simplificada de modo a utilizar somente a razão entre as áreas das plantas baixas, sendo  $A_S$  a área saliente da fachada e  $A_R$  a área de referência.

$$\emptyset = \frac{A_S}{A_R} = \frac{N_{Si}(P_{Si} \times L_{Si})}{P_{CR} \times L_C}$$

Equação 6 – Razão entre área em planta baixa das saliências e área global da edificação

Foram aplicadas as dimensões dos modelos, em metros, elaborados por Poyastro (2011) para exemplificar a obtenção do parâmetro  $\emptyset$  na Tabela 6. A área de referência  $A_R = 350 \text{ m}^2$  foi calculada previamente e está apresentada na Tabela 4. A  $A_R$  é utilizada como critério de aplicação do MDC, pois todos os modelos tem de apresentar mesma área de seção transversal, visto que as alturas permanecem também constantes.

Tabela 6 – Aplicação das dimensões dos modelos de Poyastro (2011) para obter o parâmetro  $\emptyset$

<b>Modelo</b>	<b>Lc</b> (m)	<b>Pc</b> (m)	<b>Psi</b> (m)	<b>Lsi</b> (m)	<b>Nsi</b> (quantidade)	<b>Área de referência</b> (m <sup>2</sup> )	<b>Área das saliências</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\Phi</math></b> (%)
M2	20	15	2,5	10	2	350	50	14,29%
M3	20	15	2,5	5	4	350	50	14,29%

(Fonte: autor)

Dessa maneira, para um  $\emptyset = 14,29\%$ , o modelo M2 foi mais eficiente em apresentar uma menor porção da fachada úmida dentre os dois modelos analisados, como apresentado anteriormente na Figura 103. Nesse sentido, poderiam ser exploradas outras edificações que atendam aos critérios do MDC com um  $\emptyset$  equivalente ao dos modelos M2 e M3. Outra alternativa de análise pode levar em consideração o estudo da eficiência outros modelos com proporções diferentes de  $\emptyset$  no percentual de áreas molhadas das fachadas.

Proposição de melhoria na geometria das fachadas avaliadas por Poyastro (2011)

A indicação de aprimoramento da configuração geométrica tem o objetivo de propor um arranjo diferente de volumes de fachadas com potencial de melhora no desempenho com base nos resultados analisados dos modelos de Poyastro (2011) com a aplicação do MDC.

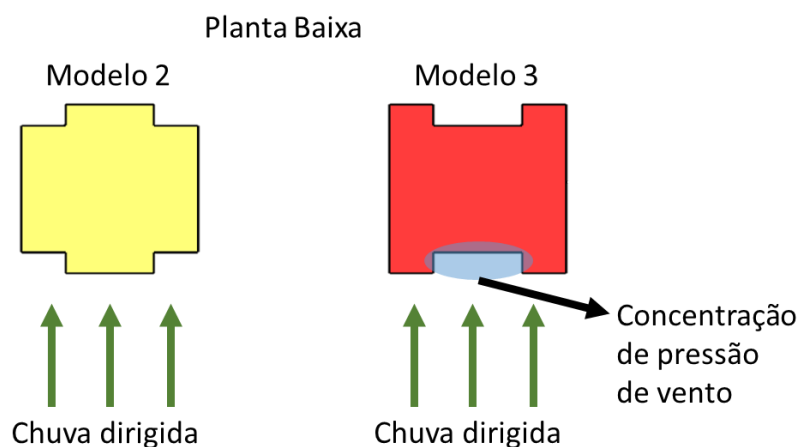
Em testes isolados, Poyastro (2011) e Cho *et al.* (2020) identificaram que o aumento da velocidade do vento é mais significativo no aumento do molhamento das fachadas do que o aumento do volume de precipitação. Nesse sentido, a proposta de aprimoramento da volumetria



para os construtos de ordem mais elevada, que são as fachadas e seus volumes, deve ser pensada de modo a diminuir a pressão de vento sobre a fachada.

Aplicando as restrições do MDC, na comparação entre as edificações realizada por Poyastro (2011) é possível observar que o modelo em forma de ‘H’ teve um desempenho inferior ao modelo em forma de ‘cruz’. Quando o vento incide ortogonalmente, o formato em ‘H’ possivelmente potencializa a concentração de pressão sobre a região central da edificação. A forma em “cruz” possivelmente apresenta maior capacidade de dissipação do escoamento por apresentar uma forma mais aerodinâmica (quando comparada à edificação do tipo ‘H’) quando o vento incide de maneira normal à fachada. A Figura 105 apresenta as plantas baixas dos modelos M2 e M3 analisados através do MDC, indicando o ângulo de incidência da chuva dirigida sobre as fachadas e a possível região de concentração de pressão de vento no modelo M3 destacada em azul.

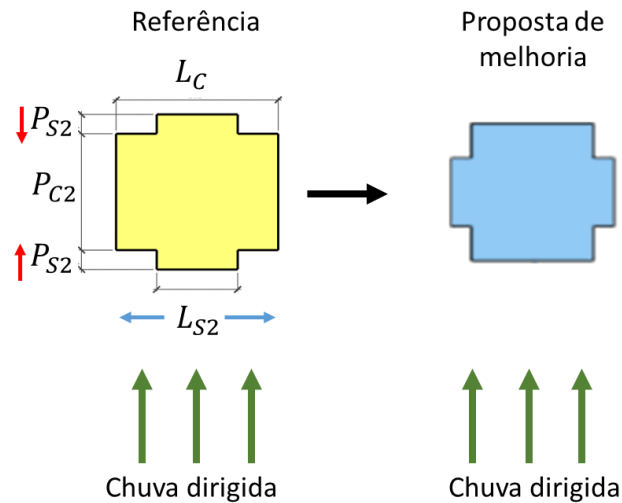
Figura 105 - Planta baixa indicando área de potencial concentração de pressão de vento



Como na análise original dos modelos propostos por Poyastro (2011) a edificação com seção transversal quadrada (volume prismático) apresentou um melhor desempenho, a melhora na eficiência tende a ser um formato que apresente um aumento na dimensão de  $L_{S2}$  (largura da saliência) e, para manter o volume constante, uma diminuição da dimensão de  $P_{C2}$  (profundidade do corpo principal da edificação). O aumento da largura da saliência ( $L_{S2}$ ) é indicado pelas setas azuis, a redução da profundidade do corpo principal da edificação ( $P_{C2}$ ) é indicada pelas setas vermelhas e o resultado da melhoria volumétrica proposta é a planta baixa

destacada em azul na Figura 106. As setas verdes indicam o a direção do escoamento de chuva dirigida que incide sobre a edificação.

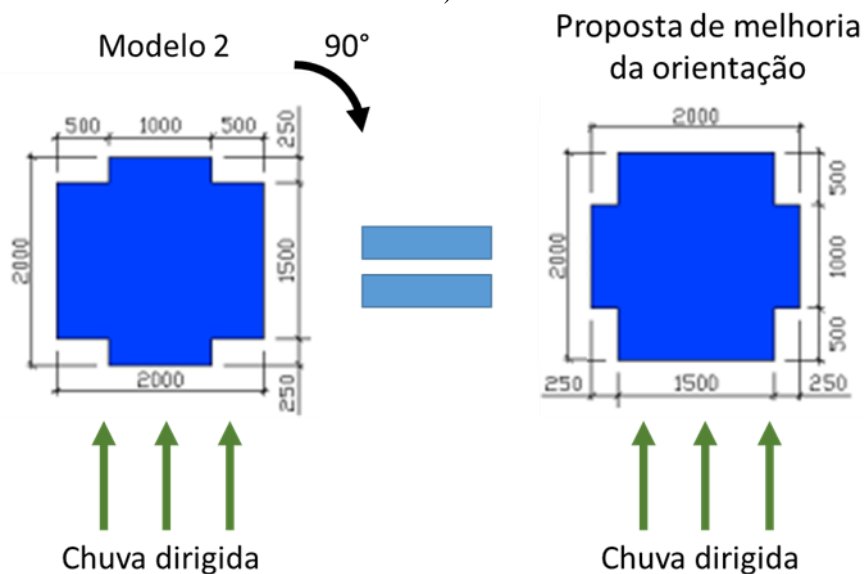
Figura 106 – Primeira proposta de melhoria da estrutura de escoamento de fachadas



(Fonte: autor)

É possível observar que a proposta de melhora da volumetria poderia ter sido avaliada inclusive no trabalho de Poyastro (2011), visto que para isso seria necessário somente fazer o experimento com chuva dirigida para a fachada a  $90^\circ$ , como indicado na Figura 107. Dessa maneira, a proposta de melhora pode ser vista também como a escolha da melhor orientação da edificação.

Figura 107 – Primeira proposta de melhoria volumétrica/de orientação das fachadas da edificação (dimensões em cm).



(Fonte: autor)

Entretanto, deve ser observado que os volumes projetados em relação ao corpo principal foram alterados. O volume global da edificação é o mesmo, mas é perceptível a alteração do parâmetro  $\emptyset$ , razão entre as áreas das saliências das fachadas e a área total do pavimento, aplicando as dimensões do aprimoramento da configuração da estrutura proposta na Equação 6:

$$\emptyset = \frac{A_S}{A_R} = \frac{N_{Si}(P_{Si} \times L_{Si})}{P_{CR} \times L_C}$$

Aplicando as dimensões da geometria melhorada:

$$\emptyset_{melhorado\ 1} = \frac{2(5 \times 15)m^2}{350\ m^2}$$

$$\emptyset_{melhorado\ 1} = 42,86\%$$

Para fins de comparação, as volumetrias originais propostas por Poyastro (2010) apresentam um  $\emptyset = 14,29\%$ .

Tem-se a expectativa, assim, de que as fachadas dos volumes laterais possam ser melhor protegidas em função de um possível efeito de “bloqueio de vento localizado” proporcionado pelo volume central da edificação. Para isso, novos experimentos devem ser realizados com o objetivo de comprovar se há uma melhoria no desempenho, ou seja, uma diminuição da área molhada (%).

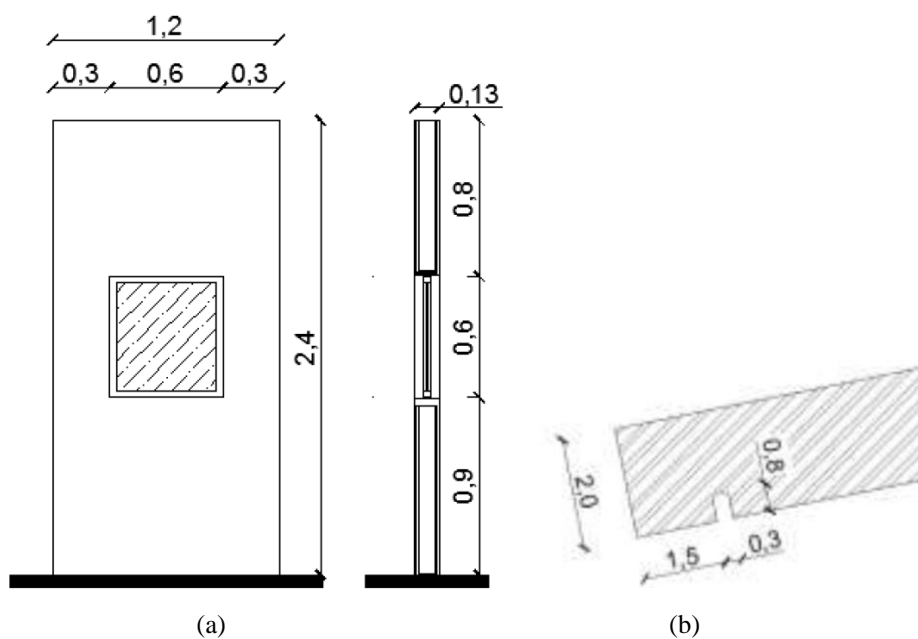
#### **4.1.10 Aplicação do MDC na Análise de um Sistema de escoamento de Perfil Saliente**

Para exemplificar a aplicação do MDC em um Sistema de escoamento de perfis salientes, foi escolhido o experimento realizado por Zucchetti (2016), o qual avaliou o desempenho de diferentes configurações de peitoris de janelas em uma parede.

A **estrutura de escoamento** dos sistemas está identificada na Figura 108 (a), na qual está representada a vista frontal e o corte lateral da parede utilizada como padrão nos modelos de Zucchetti (2016). As pedras de peitoril são instaladas na parte inferior da esquadria. Na Figura 108 (b) está apresentado um esquema da seção transversal da borda das pedras de peitoris, com indicação da espessura da pedra e detalhe do recorte do tipo pingadeira. Ainda, no sistema de

escoamento foram mantidos constantes as dimensões das paredes (altura, largura e espessura), o sistema de vedação utilizado, o revestimento dos modelos, que são restrições do sistema.

Figura 108 – (a) Vista e corte da parede padrão dos modelos ensaiados (dimensões em metros).  
(b) Esquema da seção transversal dos peitoris (dimensões em cm).



(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)

De maneira a compreender melhor as estruturas de escoamento avaliadas por Zucchetti (2016), a Tabela 7 descreve a configuração geométrica dos peitoris que compõe o sistema. A dimensão da projeção (p) indica qual é o afastamento da borda do peitoril em relação ao paramento da fachada; no trabalho foram empregadas duas dimensões de projeções, 5,0 cm e 12,0 cm. Para cada dimensão de projeção, foram combinadas outras duas informações de geometria: a inclinação (i), sendo que foram utilizadas duas inclinações, de 6% e de 20%; e o engastamento lateral da pedra, em que foram produzidos peitoris sem engastamento (s/e) e com engastamento (c/e) de 10 cm. A combinação dessas geometrias resultou em oito modelos de paredes com peitoris e um modelo de parede sem peitoril, totalizando de 9 paredes.

Tabela 7 – Configuração geométrica dos peitoris avaliados.

<b>Paredes</b>	<b>Inclinação (%)</b>	<b>Projeção (mm)</b>	<b>Com engaste</b>	<b>Sem engaste</b>
P1 (p=5,0cm; i=6%; s/e)	6	50	-	X
P2 (p=5,0cm; i=6%; c/e=10,0cm)	6	50	X	-
P3 (p=12,0cm; i=6%; s/e)	6	120	-	X
P4 (p=12,0cm; i=6%; c/e=10,0cm)	6	120	X	-
P5 (p=5,0cm; i=20%; s/e)	20	50	-	X
P6 (p=5,0cm; i=20%; c/e=10,0cm)	20	50	X	-
P7 (p=12,0cm; i= 20%; s/e)	20	120	-	X
P8 (p=12,0cm; i= 20%; c/e= 10,0cm)	20	120	X	-
PR* (sem peitoril)	-	-	-	-

(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)

Para possibilitar a aplicação e realizar a comparação dos modelos sob a perspectiva do MDC, os peitoris utilizados devem apresentar um volume constante. Analisando as geometrias dos peitoris, a única comparação possível nesse sentido é em pares entre os modelos que apresentam mesmo volume de estrutura de escoamento e somente a diferença de inclinação entre si que são:

Estrutura de escoamento 1: P1 (p=5,0cm; i=6%; s/e) e P5 (p=5,0cm; i=20%; s/e);

Estrutura de escoamento 2: P2 (p=5,0cm; i=6%; c/e=10,0cm) e P6 (p=5,0cm; i=20%; c/e=10,0cm);

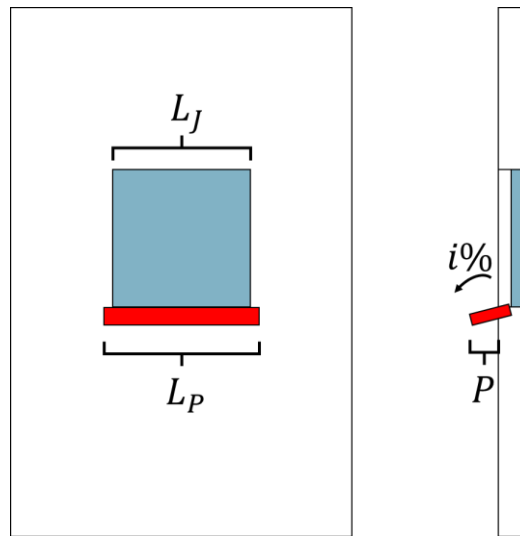
Estrutura de escoamento 3: P3 (p=12,0cm; i=6%; s/e) e P7 (p=12,0cm; i= 20%; s/e);

Estrutura de escoamento 4: P4 (p=12,0cm; i=6%; c/e=10,0cm) e P8 (p=12,0cm; i= 20%; c/e=10,0cm).

\*Observação: PR (sem peitoril) não pode ser comparada com outro modelo.

Na Figura 109, é apresentado um esquema genérico que foi utilizado na normalização das dimensões do peitoril. Foi escolhida a largura da janela ( $L_j$ ) como dimensão característica para ser realizada a normalização das dimensões, pois o escoamento de água geralmente é transversal a esta dimensão. As dimensões do peitoril a serem normalizadas são a largura do peitoril, identificada por  $L_p$ , a dimensão da projeção, identificada por  $P$ , e a inclinação  $i$ (%).

Figura 109 – Normalização das dimensões de largura e projeção do peitoril em relação à altura da janela



(Fonte: adaptado de ZUCCHETTI, 2016)

Na Tabela 8 estão apresentadas as dimensões dos peitoris avaliados por Zucchetti (2016) normalizadas pela largura da janela. O valor de  $L_P/L_J$  igual a 1,00 indica que o peitoril tem a mesma largura da janela, ou seja, não apresenta engastamento lateral; valores de  $L_P/L_J$  maiores do que 1 indicam que o peitoril apresenta engastamento lateral, sendo que quanto maior for a razão, maior o engastamento do peitoril. Quanto maior for o valor  $P/L_J$ , maior é a dimensão da projeção, ou seja, maior é o afastamento da mesma em relação à fachada, sendo que um valor igual a zero indicaria que não há projeção no modelo analisado.

Tabela 8 – Dimensões de largura ( $L_P$ ) e projeção ( $P$ ) do peitoril normalizada pela largura da janela ( $L_J$ )

Dimensões normalizadas				
Grupos	Paredes	i (%)	P/LJ	LP/LJ
Est 1	P1	6	0,08	1
	P5	20		
Est 2	P2	6	0,08	1,33
	P6	20		
Est 3	P3	6	0,20	1
	P7	20		
Est 4	P4	6	0,20	1,33
	P8	20		

(Fonte: autor)

O escoamento do sistema foi considerado a precipitação de água que acessa o sistema, a qual teve a vazão e a faixa de dimensão das gotas mantidas constantes, e a velocidade do vento e ângulo de incidência do vento em relação ao modelo, que também foram mantidos constantes durante os ensaios. Além disso, foram mantidos constantes a duração dos ensaios e as distâncias, alturas e alinhamentos dos sistemas de aspersão do ensaio, para garantir o mesmo tipo de exposição nas paredes.

Deve ser ressaltado que Zucchetti (2016) menciona que a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente do laboratório não foram mantidas constantes durante os ensaios, mas foram registradas para todos os testes ensaiados. Para fins de permitir a exemplificação da aplicação do MDC, será considerado nesse caso que os ruídos gerados pela variação desses fatores não influenciaram nos resultados do trabalho.

Os indicadores de desempenho utilizados por Zucchetti (2016) foram a área protegida em (m<sup>2</sup>), que está apresentado na Tabela 9, e a quantidade de água coletada (g), que está apresentada na Tabela 10. É importante observar que as tabelas apresentam a evolução do desempenho para quatro períodos de tempo de 15 minutos. Em ambas tabelas os modelos foram agrupados nos respectivos pares de igual volume para facilitar a comparação dos indicadores de desempenho.

Tabela 9 – Desempenho dos modelos quanto a área protegida em m<sup>2</sup>

Paredes	Características				Área Protegida (m <sup>2</sup> )			
	Inclinação	Projeção	Com engaste	Sem engaste	15 min	30 min	45 min	60min
P1 (p=5,0cm; i=6%; s/e)	0,06	50mm	-	X	0,0615	0,0585	0,0491	0,0384
P5 (p=5,0cm; i=20%; s/e)	0,2	50mm	-	X	0,0680	0,0623	0,0521	0,0420
P2 (p=5,0cm; i=6%; c/e=10,0cm)	0,06	50mm	X	-	0,2373	0,2174	0,1961	0,1872
P6 (p=5,0cm; i=20%; c/e=10,0cm)	0,2	50mm	X	-	0,2006	0,1815	0,1759	0,1646
P3 (p=12,0cm; i=6%; s/e)	0,06	120 mm	-	X	0,2093	0,1929	0,1779	0,1693
P7 (p=12,0cm; i= 20%; s/e)	0,2	120 mm	-	X	0,2250	0,2105	0,2015	0,1920
P4 (p=12,0cm; i=6%; c/e=10,0cm)	0,06	120 mm	X	-	0,3357	0,3244	0,3128	0,3002
P8 (p=12,0cm; i= 20%; c/e= 10,0cm)	0,2	120 mm	X	-	0,3222	0,2978	0,2891	0,2730

(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)

Tabela 10 – Desempenho dos modelos quanto a quantidade de água coletada em (g)

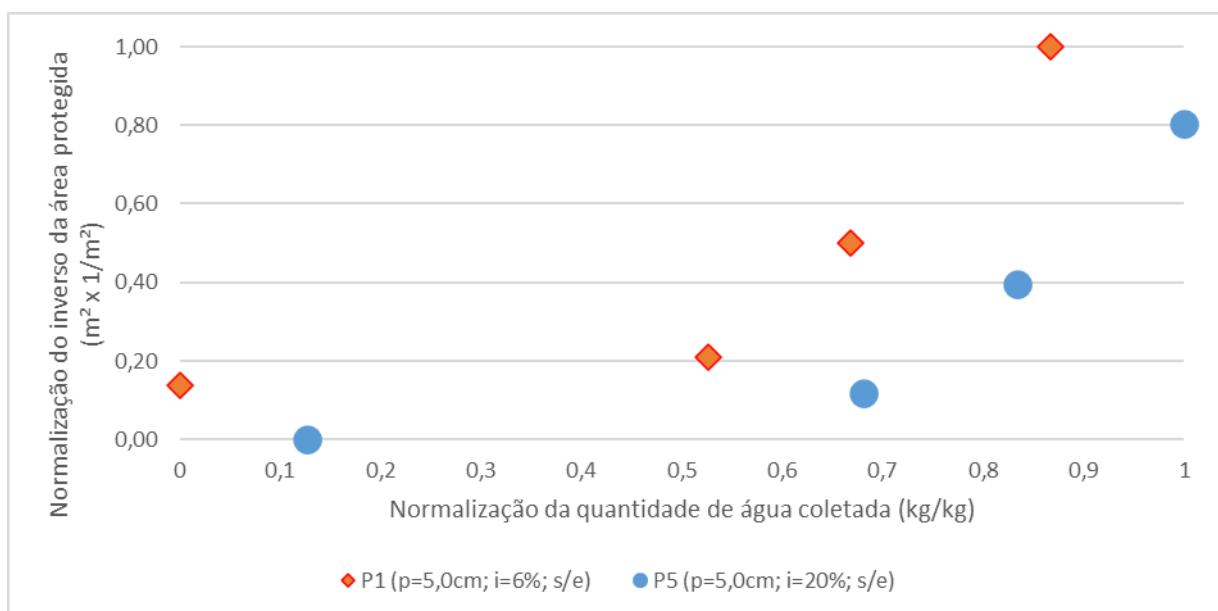
Paredes	Características				Quantidade de água Coletada (g)			
	Inclinação	Projeção	Com engaste	Sem engaste	15 min	30 min	45 min	60min
P1 (p=5,0cm; i=6%; s/e)	0,06	50mm	-	X	7622	8110	8242	8426
P5 (p=5,0cm; i=20%; s/e)	0,2	50mm	-	X	7740	8254	8396	8550
P2 (p=5,0cm; i=6%; c/e=10,0cm)	0,06	50mm	X	-	4644	4892	5048	5148
P6 (p=5,0cm; i=20%; c/e=10,0cm)	0,2	50mm	X	-	4750	4978	5174	5286
P3 (p=12,0cm; i=6%; s/e)	0,06	120 mm	-	X	6674	7094	7304	7456
P7 (p=12,0cm; i= 20%; s/e)	0,2	120 mm	-	X	6728	7192	7394	7536
P4 (p=12,0cm; i=6%; c/e=10,0cm)	0,06	120 mm	X	-	4772	4998	5216	5320
P8 (p=12,0cm; i= 20%; c/e= 10,0cm)	0,2	120 mm	X	-	4882	5134	5308	5442

(Fonte: ZUCCHETTI, 2016)

Os dados dos indicadores de desempenho das paredes foram então agrupados nos pares de volume e foram tratados de maneira a normalizar os valores de área protegida e quantidade de água coletada. Para a área protegida a normalização foi feita considerando o maior e o menor valor de área protegida nos pares de paredes; o maior valor de área protegida corresponde a um valor igual 1 e o menor valor de área protegida corresponde a um valor igual a 0. Os demais valores foram obtidos utilizando uma relação proporcional composta entre os valores máximos e mínimos. O mesmo processo de normalização foi utilizado nos pares de paredes para o indicador de desempenho de água coletada.

Na Figura 110 estão plotados os valores normalizados do inverso da área protegida (em  $m^2 \times 1/m^2$ ) pela quantidade de água coletada (em  $kg/kg$ ) para os pares da Estrutura de Escoamento 1, com projeção de 5,0 cm e sem engastamento lateral. Com essa configuração, o melhor desempenho da parede, ou seja, a maior quantidade de área protegida e a menor quantidade de área coletada se aproximam da origem do gráfico na Figura 110. Nesse sentido, é possível observar que cada configuração teve um desempenho melhor em um aspecto para todos os períodos de tempo de ensaio: a parede P1 ( $i=6\%$ ) foi mais eficiente em diminuir a quantidade de água coletada, enquanto a P5 ( $i=20\%$ ) foi mais eficiente em proteger uma maior área da parede.

Figura 110 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 1 ao longo tempo

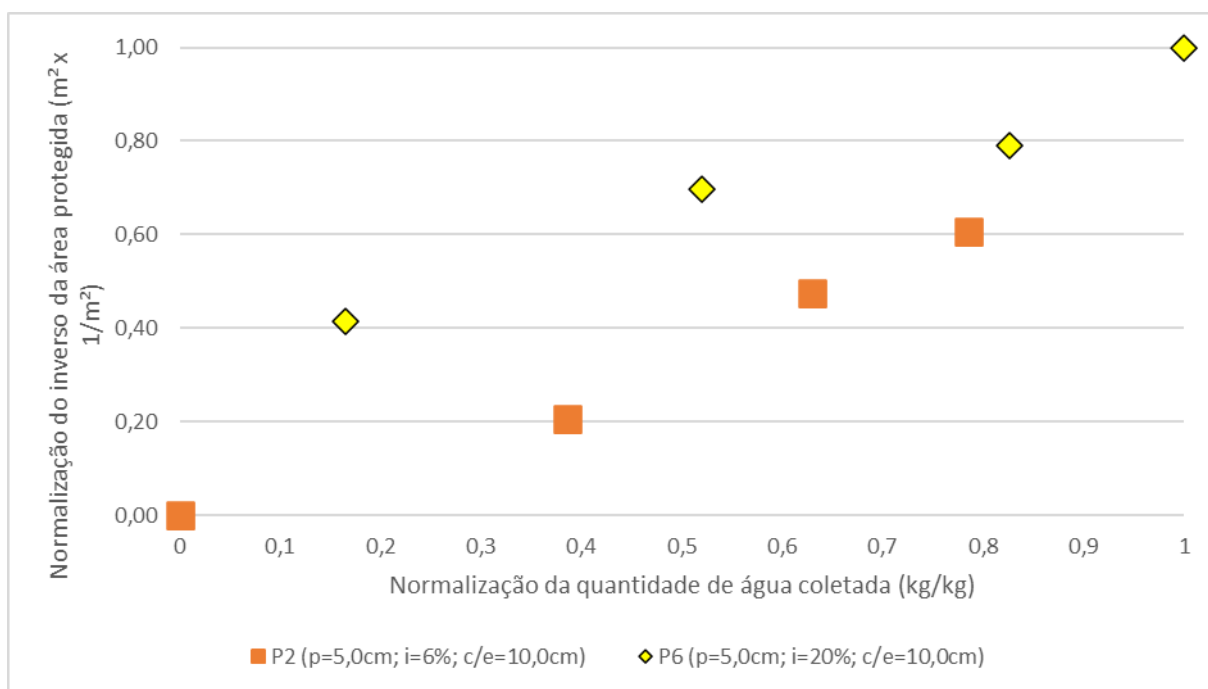


(Fonte: adaptado de ZUCCHETTI, 2016)



Na Figura 111 foi aplicado o mesmo processo de normalização da Figura 111 para o par de paredes do Volume 2 ( $p=5,0$  cm e  $c/e=10,0$  cm). Nesse conjunto de estrutura de escoamento, a parede P2 ( $i=6\%$ ) apresentou melhor desempenho em todos os períodos de tempo tanto na diminuição da quantidade de água coletada da parede, quanto na proteção da maior quantidade de área, pois os valores aproximam-se mais da origem do gráfico quando comparados aos equivalentes da parede P6 ( $i=20\%$ ).

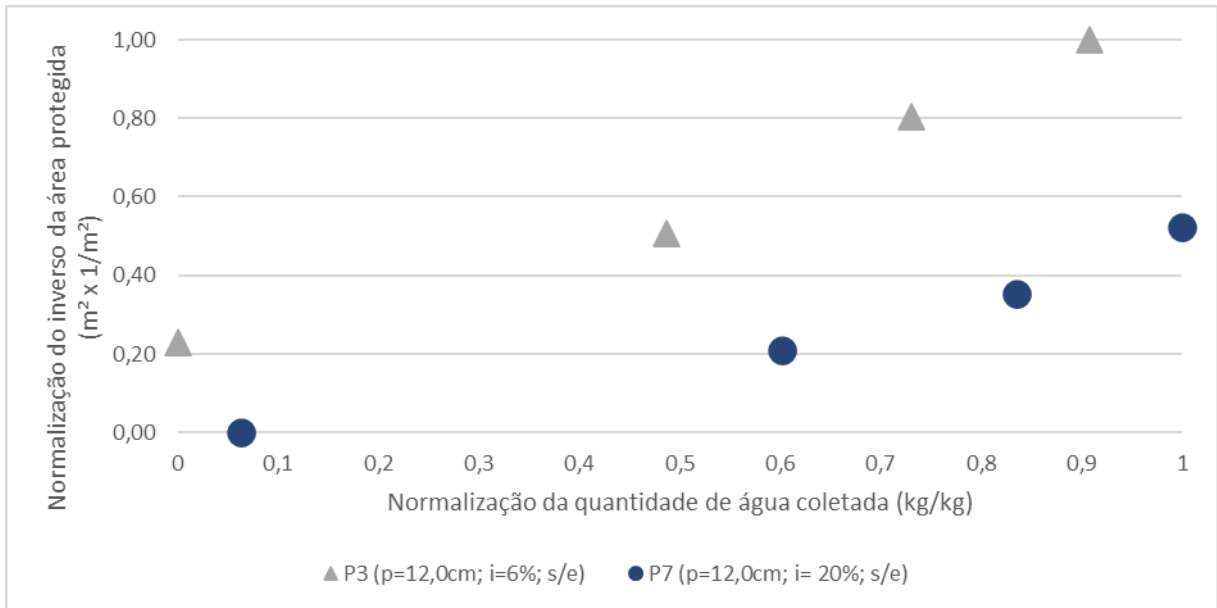
Figura 111 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 2 ao longo tempo



(Fonte: adaptado de ZUCCHETTI, 2016)

Na Figura 112 foi aplicado o mesmo tratamento de normalização dos dados para o par da Estrutura de Escoamento 3 ( $p=12,0$  cm e sem engastamento). Tal qual a Estrutura de Escoamento 1, o modelo que empregou o peitoril com inclinação de 6% (P3) apresentou melhor desempenho na diminuição de água coletada, enquanto o modelo que empregou o peitoril com inclinação de 20% (P7) foi mais eficiente no aumento de área protegida na parede.

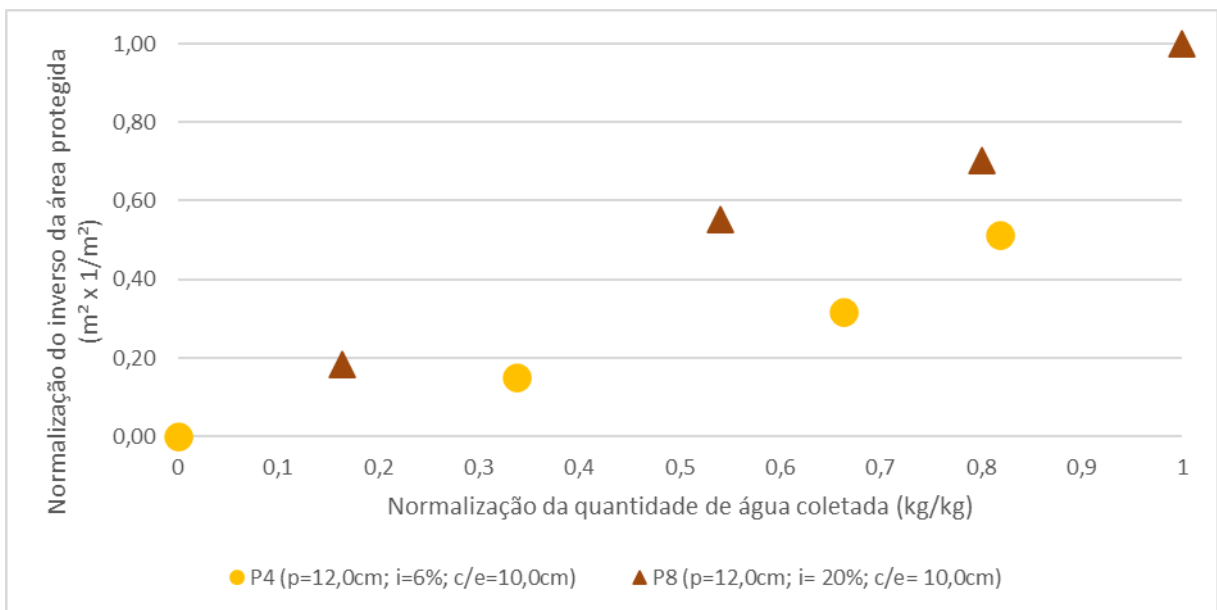
Figura 112 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 3 ao longo tempo



(Fonte: adaptado de ZUCCHETTI, 2016)

Na Figura 113 estão apresentados os dados para a Estrutura de Escoamento 4 (p=12,0 cm e c/e=10,0 cm). A parede P4 (i=6%) apresentou maior eficiência tanto na diminuição da quantidade de água coletada quanto no aumento da proteção da superfície.

Figura 113 – Evolução da área molhada e quantidade de água coletada no par da Estrutura de Escoamento 4 ao longo tempo



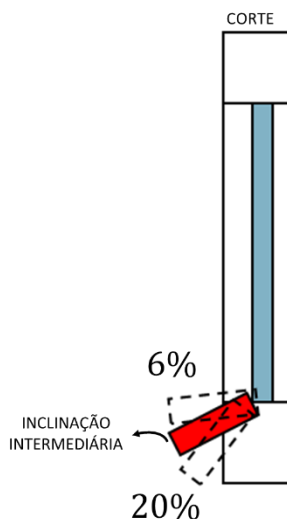
(Fonte: adaptado de ZUCCHETTI, 2016)

Proposição de melhoria das geometrias de peitoris avaliadas por Zucchetti (2016)

Nos construtos de menor escala, a eficiência da estrutura de escoamento é dada pela capacidade de conduzir o escoamento superficial de modo a afastá-lo da fachada. A aplicação do MDC proporcionou uma análise diferente dos dados ao ser necessário agrupar os dados das paredes em pares com mesmo volume de estrutura de escoamento.

Nesse sentido, nas estruturas de escoamento 1 e 3, com projeções de 5,0 e 12,0 cm (respectivamente) e sem engastamento nas laterais ( $\frac{L_P}{L_J} = 1$ ), é possível notar que as inclinações de 6% foram mais eficientes no controle de água coletada, enquanto as inclinações de 20% foram mais eficientes na proteção da superfície. Dessa maneira, a proposta de aprimoramento de geometria para peitoris sem engastamento seria a identificação de uma inclinação intermediária a 6% e 20%, de modo a obter tanto uma maior proteção da superfície, quanto um maior descolamento de água. Na Figura 114 o peitoril com inclinação intermediária está destacado em vermelho.

Figura 114 - Proposta inicial de aprimoramento na geometria de peitoris sem engastamento lateral



(Fonte: autor)

Entretanto, como a não utilização do engastamento lateral não é recomendada por diversos autores devido à concentração do escoamento de água nos vértices inferiores das janelas que provocam manchamentos (MARSH, 1977; SILVA; TORRES, 2003; FLORES-COLEN *et al.*, 2006; ZUCCHETTI, 2016). Dessa maneira, a proposta de aprimoramento da configuração geométrica também deve considerar o rearranjo das dimensões do peitoril, e não somente a

alteração da inclinação, de modo que parte do volume de material original seja convertido em um volume de engastamento lateral. Nesse sentido, foi observado que para as estruturas de escoamento 1 e 3 é possível realizar uma redução da espessura do peitoril de 2,0 cm para 1,5 cm, espessura mínima encontrada por Zucchetti (2016) na revisão bibliográfica. Dessa forma, para manter o volume global da peça de peitoril podem ser acrescentados engastamentos laterais com projeção de 10,0 cm.

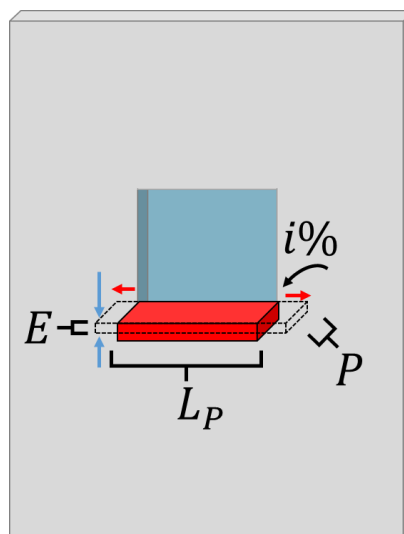
Tabela 11 – Aprimoramento das estruturas de escoamento 1 e 2 através da redução da espessura das peças e criação dos engastes laterais

Estrutura	Peitoril	Espessura (cm)	Projeção (cm)	Largura total do peitoril (cm)		Volume (cm <sup>3</sup> )
				Largura janela	Engaste (x2)	
Est 1	Original	2	5	60	0	600
	Melhorado	1,5	5	60	10	600
Est 2	Original	2	12	60	0	1440
	Melhorado	1,5	12	60	10	1440

(Fonte: autor)

Na Figura 115 está esquematizado o processo de melhoria das estruturas de escoamento 1 e 3, em que as setas azuis indicam a redução da espessura do peitoril, as setas vermelhas indicam a criação dos engastamentos laterais e  $i\%$  indica a inclinação da peça.

Figura 115 - Melhoria do arranjo geométrico do peitoril, com redução da espessura e criação de engastes laterais, mantendo o volume da peça constante



(Fonte: autor)

Nas Estruturas de Escoamento 2 e 4, com projeções de 5,0 e 12,0 cm (respectivamente) e com engastamento nas laterais de 10,0 cm ( $\frac{L_P}{L_J} = 1,33$ ), é possível observar que os peitoris com 6% de inclinação foram mais eficientes tanto na diminuição da quantidade de água coletada quanto no aumento da área protegida. Para essa situação específica, podem ser avaliadas se inclinações do peitoril intermediárias a 6% e 20 % apresentam influência na melhoria de desempenho.

Outra proposta de aprimoramento a ser feita para as estruturas de escoamento 3 e 4 é a redução dos engastamentos laterais para um valor intermediário de 5,0 cm de modo a possibilitar um aumento na dimensão das projeções dos peitoris. Com a redução dos engastamentos laterais, para fazer a manutenção do volume constante a dimensão da projeção do peitoril pode ser aumentada em aproximadamente 1,7 cm. As relações entre as estruturas 3 e 4, originais e aprimoradas está apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Melhoria das estruturas de escoamento 3 e 4 através da redução da espessura das peças e criação dos engastes laterais

Estrutura	Peitoril	Espessura (cm)	Projeção (cm)	Largura total do peitoril (cm)		Volume (cm <sup>3</sup> )
				Largura janela	Engaste (x2)	
Est 2	Original	2	5	60	10	800
	Melhorado	2	5,7	60	5	800
Est 4	Original	2	12	60	10	1920
	Melhorado	2	13,7	60	5	1920

(Fonte: autor)

Ressalta-se que devem ser realizados estudos para avaliar a melhoria de desempenho das configurações geométricas propostas a partir da avaliação do percentual de área protegida e da quantidade de água coletada pela fachada.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A questão principal da pesquisa foi avaliar a aplicabilidade do *Design Construtal* na definição da configuração geométrica de fachadas para torná-las mais eficientes na proteção da própria superfície do revestimento frente à ação da chuva dirigida. Nesse sentido foi necessário um aprofundamento do conhecimento sobre o Método do *Design Construtal*, em que foram compreendidos quais os elementos e critérios necessários para a aplicação do método.

A aplicação do MDC na definição de configurações geométricas das fachadas apresenta um grande potencial de aplicabilidade ao propor uma análise da interação da chuva dirigida em construtos de diferentes magnitudes, desde os mais elementares como os relativos às propriedades superficiais dos materiais, passando pelos construtos intermediários, que são os detalhes incorporados de fachadas, até os construtos de mais alta ordem, que são as próprias fachadas e seus volumes.

Também, demonstrou-se muito valorosa a possibilidade de definição dos elementos que constituem as estruturas de escoamento, delimitando o que é a estrutura, o que é o escoamento, quais são os indicadores importantes para a análise do desempenho e quais são as restrições importantes para se realizar a análise do sistema.

As restrições são um dos principais aspectos da aplicação do MDC e, no caso da análise da interação da chuva dirigida com as fachadas, foi necessário aprofundar quais elementos do sistema de escoamento seriam necessários de serem restritos sob a perspectiva da bibliografia existente sobre chuva dirigida e fachadas. A aplicação das restrições proporcionou uma abordagem diferente aos trabalhos já realizados sobre as fachadas de edificações e seus volumes e também para a análise de perfis salientes em fachadas. Em suma, foi possível identificar na literatura sobre chuva dirigida e fachadas todos os critérios necessários à aplicação do MDC.

A partir disso, percebeu-se que nem sempre existirá uma estrutura de escoamento que é eficiente para as diferentes taxas de escoamento que acessam um sistema de escoamento ou que seja eficiente para todos os indicadores de desempenho. Talvez por isso, uma outra alternativa de aplicação do MDC seria submeter os conjuntos de estruturas de escoamento avaliadas a variações de escoamento que acessam o sistema. Dessa maneira é possível avaliar quais

estruturas apresentam um desempenho médio mais satisfatório para uma maior gama de escoamentos.

Outra observação importante é que a partir de uma construção de uma aplicação específica do MDC para análise de diferentes sistemas de escoamentos de fachadas foi possível observar que a eficiência dos sistemas se dá nos construtos de ordem mais elevada (fachadas e seus volumes) pela maior quantidade de áreas protegidas geradas pelas configurações geométricas das fachadas e nos construtos elementares (propriedades da superfície) pela regulação e distribuição do escoamento pela superfície de maneira homogênea. Nos construtos intermediários (detalhes de fachadas) a análise parece se voltar tanto para a análise da área protegida, quanto para a análise da regulação e distribuição do escoamento de maneira homogênea.

Com a proposição de metodologias a partir dos trabalhos existentes e com a análise dos experimentos já realizados sob a perspectiva do MDC, também foi constatado que é possível elaborar experimentos e metodologias de ensaios para diferentes escalas de construtos de modo a avaliar o desempenho e propor *designs* de fachadas com uma geometria aprimorada – o que também cumpre com o objetivo desta pesquisa, que foi a sistematização da aplicabilidade do MDC a partir da proposição das metodologias em edificações.

Por fim, a aplicação do MDC também pode ser de grande valor na visualização de quais sistemas de escoamento propostos podem apresentar o melhor desempenho, indicando qual deve ser a **evolução do design** das fachadas no sentido de atender os requisitos de desempenho dos usuários de sustentabilidade, segurança e habitabilidade.

#### *Sugestões para trabalhos futuros:*

- Reproduzir em laboratório um experimento similar ao de Poyastro (2011) de modo a avaliar diferentes geometrias de fachadas com o objetivo de melhorar o desempenho no indicador de percentual de áreas afetadas pelo molhamento.
- Reproduzir em laboratório um experimento similar ao de Zucchetti (2016) de modo a avaliar diferentes geometrias de peitoris com o objetivo de melhorar o desempenho nos indicadores de percentual de áreas afetadas pelo molhamento e de quantidade de água coletada pela superfície.

- Desenvolver experimento de laboratório similar ao de Zucchetti (2016) de modo a avaliar diferentes configurações de detalhes reentrantes com o objetivo de verificar e melhorar o desempenho nos indicadores de percentual de áreas afetadas pelo molhamento e de quantidade de água coletada pela superfície.
- Desenvolver experimento similar ao de Zucchetti (2016) de modo a avaliar diferentes configurações de propriedades superficiais com o objetivo de melhorar o desempenho nos indicadores de percentual de áreas afetadas pelo molhamento e de quantidade de água coletada pela superfície.
- Aprofundar a comparação entre o escoamento da água sobre as discontinuidades entre planos e canais contínuos (proposto por Robinson e Baker, 1975) e o escoamento de fluídos de um ponto para uma área ou de uma área para um ponto, que é uma característica fundamental das estruturas de escoamento no MDC.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.755**: Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante — Projeto, execução, inspeção e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2017

\_ **NBR 6123**: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

\_ **NBR 15.575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013

\_ **NBR 15.575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013

ASHRAE. Standard 160P. **Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings**. Public Review, set, 2009

AYOADE, J.O **Introdução a climatologia para os trópicos**. – 4. Ed. – Rio De Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. São Paulo: O nome da Rosa, 2002

BAUER, E. **Resistência a penetração da chuva em fachadas de alvenaria de materiais cerâmicos**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 1987

BAUER, E.; PIAZZAROLLO, C. B.; SOUZA, J. S.; SANTOS, D. G. Relative Importance of pathologies in the severity of façade degradation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation** 5:7. 2020.

BAZZAN, J. **Método para coletar e analisar dados de assistência técnica da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

BEJAN, A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. **Internal Journal of Heat and Mass Transfer**. Vol 40, No 4, pp. 799 -816 1996.

BEJAN, A.; LORENTE, S. The Constructal law and the thermodynamics of flow systems with configuration. **Internal Journal of Heat and Mass Transfer** 47 3203-321, 2004.

BEJAN, A.; LORENTE, S. The Constructal law of design and evolution in nature. **Philosophical transactions of the Royal Society B**, 365, 1335-1347. 2010.

BEJAN, A. ZANE, P. J. **Design in nature: How the Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization**. Doubleday, Toronto. 2012.

BLOCKEN, B; CARMELIET, J. The Influence of wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 94, 101-127, 2006.

BLOCKEN, B.; DEROME, D., & CARMELIET, J. (2012). Rainwater runoff from building facades: A review. **Building and Environment**, 60, 339-361.

BRAGA, C. C. **Manifestações patológicas em conjuntos habitacionais: a degradação das fachadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2010.

CHADWICK, J. J.; MCJUNKIN, J. T., **Facade Maintenance: Owners' Techniques for Data Management**, Building Facade Maintenance, Repair, and Inspection, ASTMSTP1444, J. L. Erdly and T. A. Schwartz, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

CHAND, I.; BHARGAVA, P. K. Estimation of Wind Driving Rain Index Form Index. **Journal Building and Environment**, v. 37, n25, p. 549-554, 2002

CHAVES, A. M. V. A. **Patologia e Reabilitação de Revestimentos de Fachadas**. Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia, Universidade do Minho. 2009.

CHEW; M. Y. L.; TAN, P. P. Façade staining arising from design features. **Construction and Building Materials** 17 181-187. 2003.

CHO, E.; YOO, C; KANG, M; SONG, S; KIM, S. Experiment of wind-driven-rain measurement on building walls and its in-situ validation. **Building and Environment**, 2020.

COELHO, F. H. C. **Caracterização De revestimentos interiores com base em argamassas**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. 2020.

EL SHIMI, M. A. **Predicting Environmental Performance of Facade Geometry**. Master of Engineering. Concordia University Montreal, Quebec, Canada. 1979.

FLORES-COLEN, I; BRITO, J; FREITAS, V. P. Stains in facades' rendering – Diagnosis and maintenance techniques' classification. **Construction and Building Materials** v. 22, 211-221, p. 2006.

FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. A systematic approach for maintenance budgeting of buildings façades based on predictive and preventive strategies. **Construction and Building Materials**. v. 24, n. 9, p. 1718-1729, 2010.

GENEL, F. **Salissures de façade: comment les éviter? Exemples de solutions technique**. Guide pratique. Paris, CTSB, 2005.

GIONGO, M. **Análise do nível de exposição das edificações à chuva dirigida para Florianópolis**. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007. 107 p.

GOMES, M. N. **Constructal design de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante**. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS. 2014.

GTA – GRUPO DE TRABALHO EM ARGAMASSA. Terminologia de Argamassas. Luís Carlos Bonin (org.). In: VIII SBTA, Curitiba - PR. **Anais...** UFRGS: GT-Argamassas / ANTAC, maio de 2009

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica**. 10. Ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2016

HELBIG D.; SILVA C. C. C. D.; REAL M. D. V.; DOS SANTOS E. D.; ISOLDI L. A.; ROCHA L. A. O. 2016. **Study About Buckling Phenomenon in Perforated Thin Steel Plates Employing Computational Modeling and Constructal Design Method**. Latin American Journal of Solids and Structures

HERSHBERGER, R. **Architectural Programming and Predesign Manager**. Tucson, USA: McGraw-Hill, 1999. 400 p.

HOIGARD, K. R., MULHOLLAND, G. R., AND HAUKOHL, R. C., **Terra Cotta Facades**, Symposium on Building Facade Maintenance, Repair, and Inspection, ASTMSTP 1444, J. L. Erdlv and T. A. Schwartz, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

KNAACK, U.; KLEIN, T.; BILOW, M.; AUER, T. **Façades: Principles of construction**. Birkhäuser, 2007.

KUBILAY, A.; DEROME, D.; BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. High-resolution field measurements of wind-driven rain on an array of low-rise cubic buildings. **Building and Environment** 78 1-13, 2017

LERSCH, I. M. **Contribuição para a identificação dos principais fatores e mecanismos de degradação em edificações do Patrimônio Cultural de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MACIEL, L. L., & MELHADO, S. B. **O projeto e a qualidade dos revestimentos de argamassa de fachada de edifícios**. Anais do XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP, ABEPRO) Gramado, Brasil, 1997

MANENTI, L. (2014). **Repensando vitrúvio: reflexão acerca de princípios e procedimentos de projeto**. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

MARSH, 1977. **Air and rain penetration of buildings**. London: The Construction Press, 1977.

MELO JR, C. M. **Influência da chuva dirigida e dos detalhes arquitetônicos na durabilidade de revestimentos de fachada**. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MELO JR, C. M. **Metodologia para geração de mapas de danos de fachadas a partir de fotografias obtidas por veículo aéreo não tripulado e processamento digital de imagens**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. DEPARTAMENTO DE Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2016

MORELLI, F.; LIMA, M. G., SOUSA JÚNIOR, W. C. Influência do ambiente natural sobre o ambiente construído. Um estudo sobre o índice de chuva dirigida. **Ambiente e sociedade** 15, 41-52, 2012.

NETTO, V. M.; SABOYA, R. T. A urgência do planejamento: a revisão dos instrumentos normativos de ocupação urbana. *Arquitextos*. São Paulo, v11. 2010.

PARK, C. W.; PARK, J., KIM, N.; KIM, Y. Modeling water flow on façade. **Automation in Construction** 93, 265-279. 2018.

PEREIRA, C.; SILVA, A.; SILVESTRE, J. D. Urgency of repair of building elements: Prediction and influencing factors in façade renders. **Construction and Building Materials**, 2020.

PEREZ, A. R. Umidade nas Edificações: recomendações para a prevenção da penetração de água pelas fachadas. Em: Tecnologia de Edificações: 1ª parte. São Paulo: PINI, IPT – Divisão de Edificações, 1988. p. 571-574. 1988

PETRUCCI, H. M. C. **A alteração da aparência das fachadas dos edifícios: Interação entre as condições ambientais e a forma construída**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

POYASTRO, P. C. **Influência da volumetria e das condições de entorno da edificação no manchamento e infiltração de água em fachadas por ação de chuva dirigida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

REIS, A. H. Constructal Theory: From Engineering to Physics, and How Flow Systems Develop Shape and Structure. **Applied Mechanics Reviews** 59(5):269-282. 2006.

RIBAS, P. R.; MOURA, A. C. M.; CARVALHO, G. A.; FONSECA, B. M. Proposição metodológica de extração da altimetria em edificações utilizando dados LIDAR com vista a estudos volumétricos de coeficientes de aproveitamento. **Revistas UD Y La Geomática** 10. 53-63, 2015

RIBEIRO, F. A. **Especificação de Juntas de Movimentação Em Revestimentos Cerâmicos de Fachadas de Edifícios: Levantamento Do Estado Da Arte**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. S. **Projeto de Experimentos**. Série Monográfica Qualidade. UFRGS. Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Porto Alegre, RS. 2011

ROBINSON, G.; BAKER, M. C. **Wind-driven rain and buildings**. Technical Paper n. 445, Division of Building Research, National Research Council, Ottawa, Canada, 1975.

ROCHA, L. A. O.; LORENTE, S.; BEJAN, A. (eds.), *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*. **Springer Science + Business Media** New York. 2013

SATO, N. M. N. *et al.* Condensação de vapor de água e desenvolvimento de microrganismos em fachadas de edifícios: estudo de caso. Em: Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. 9. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002

SANTOS, T.; FARIA, P. 2015. Avaliação de argamassas de terra para rebocos interiores. **Tech ITT Revista Internacional**, 13(36), 18–30. Visto em: <http://hdl.handle.net/10362/16577>

SENG, B.; LORENTE, S.; MAGNIONT, C. Scale analysis of heat and moisture transfer through bio-based materials — Application to hemp concrete. **Energy and Buildings**. P. 546 -558. 2017.

SHIZARD, M.; TOMINAGA, Y.; MIRZAEI, P. A. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic sheltered building in urban areas. **Building and Environment** 158, 60-72. 2019

SILVA, A. F. **Manifestações patológicas em fachadas com revestimentos argamassados. Estudo de caso em edifícios em Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007

SILVA, J. M.; TORRES, M. I. **Deficiências do desempenho dos peitoris na proteção das fachadas contra a acção da água**. Em: 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios – PATORREB. FEUP, Porto, 2003.

STRAUBE, J. F. **Moisture Control and Enclosure Wall Systems**. PhD Thesis in Civil Engineering. University of Waterloo, Canada. 1998

THOMAZ, E. **Manual Técnico de Alvenaria: Patologia**. São Paulo: Projeto, 1990

VALLEJO, F. J. L. **Ensuciamiento de fachadas pétreas por la contaminación atmosférica. El caso de la ciudad de Valladolid, España**. Informes de La Construcción, Madrid, Instituto Eduardo Torroja, v.41, n.405. p. 45-72, 1990.

VAN GOETHEN, S. **Rainwater runoff on building facades: numerical simulations and analysis of wetting patterns**. Master's dissertation. Department of Architecture and Urban Planning. Universiteit Gent. 2014.

VERDUM, G.; BERSCH, J. D.; GUERRA, F. L.; SOCOLOSKI, R. F.; GIORDANI, C.; ZUCCHETTI, L.; MASUERO, A. B. Mortar coating degradation in historical buildings façades form Rio Grande do Sul – Brazil. **Construction and Building Materials** 310, 125221, 2021.

VIEIRA, A. A. **Influência dos detalhes arquitetônicos no Estado de conservação das fachadas de edificações do patrimônio cultural do centro histórico de Porto Alegre – estudo de caso**. Trabalho de conclusão (mestrado profissional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Porto Alegre, BR-RS, 2006.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Brasília, DF. 2015

ZUCCHETTI, L. **Influência das características do peitoril no molhamento dos paramentos próximos às janelas frente à chuva dirigida.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ZUCCHETTI, L.; POYASTRO, P.; DAPPER, S. T. H.; MASUERO, A. B.; LOREDO-SOUZA, A. M. The Wind-Driven Rain and the Buildings: Directional Driving Rain, Experimental Simulation and Quantification of Wetness Areas. **Recent Developments in Building Diagnosis Techniques**, Springer, 2016, pg 91-103.