



João Miguel Tavares Prata

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Métodos de quantificação da chuva incidente em paredes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Perfil de Construção

Orientador: Fernando M.A. Henriques, Professor
Catedrático, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina S.F. Faria Rodrigues
Arguente: Prof. Doutor Daniel Aelenei
Vogal: Prof. Doutor Fernando M.A. Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho de 2012

“Copyright” João Miguel Tavares Prata, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar ao meu orientador, Professor. Doutor Fernando Henriques pela cedência de material bibliográfico, pela disponibilidade sempre demonstrada para esclarecimento de dúvidas e discussão de ideias. Ainda pelo valioso contributo na revisão dos textos.

Desejo expressar o meu agradecimento a todos quanto de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação, em particular:

Ao Professor John Straube da Universidade de Waterloo pela cedência de conteúdos bibliográficos e disponibilidade para esclarecimentos.

Ao meu colega do LNEC, o Engenheiro Eduardo Bretas pelo tempo dedicado à leitura deste trabalho e pelas suas sinceras opiniões e sugestões.

A todos os meus amigos da secção de xadrez do Clube TAP pelos bons momentos de camaradagem e amizade.

Finalmente e não sem menor relevância, aos meus pais pelo apoio incondicional e dedicação inextinguível.

Resumo

A chuva incidente conta-se entre os factores mais relevantes que afectam o desempenho termo-higrométrico das edificações. Este tipo de precipitação caracteriza-se por ser afectada pela componente horizontal da velocidade do vento que direcciona a chuva para a envolvente dos edifícios. A quantidade de chuva que incide está correlacionada com diversos factores entre os quais: a geometria do edifício, a topografia do meio envolvente e a velocidade do vento apenas para salientar os mais relevantes. Este conjunto de factores converte a abordagem ao tema da sua quantificação num processo complexo. Este fenómeno é responsável pelo aparecimento de anomalias da construção com consequentes prejuízos económicos e sociais. Esta dissertação decorre na sequência de outros trabalhos realizados anteriormente e visa fazer uma actualização do estado do conhecimento e das novas contribuições entretanto surgidas.

Actualmente existem três linhas principais de investigação, divididas em métodos experimentais, semi-empíricos e numéricos. Os primeiros reportam-se ao estabelecimento de sistemas de medição *in situ*, envolvendo aparelhos de medição como pluviómetros, udómetros e anemómetros, ou em alternativa experiências em túneis de vento. O método experimental constitui-se como a principal fonte geradora de dados para implementação nos dois restantes métodos. O segundo método envolve a integração dos dados experimentais, conjugados com expressões matemáticas que permitem a quantificação da chuva incidente de forma mais célere e mais abrangente. É portanto um modelo com bases teóricas cujos coeficientes assentam em observações experimentais. O documento normativo ISO 15927-3 é disso exemplo, assim como um procedimento paralelo desenvolvido por Straube e Burnett. Os métodos numéricos, envolvendo a utilização de ferramentas computacionais de dinâmica de fluidos foram aplicados a este tema em inícios da década de 90. Através de modelações do caso em estudo em elementos de grelha, com aplicação de modelos de turbulência e integração de dados meteorológicos, conseguem fazer uma previsão da chuva incidente com maior qualidade e poder de resolução.

Estes métodos são complementares, pelo que há interesse em prosseguir a investigação nestas áreas.

Termos Chave: Chuva incidente, Pluviómetros, Norma ISO 15927-3, CFD, Carta de incidência

Abstract

Wind driven rain is one of the most relevant facts that can affect the hygrothermal performance of buildings. This kind of rain is characterised for being affected by the horizontal component of the wind thus driving the rain into the building façade. The amount of driving rain impinged into a building is related with many factors, being the most prevalent the geometry of the building, the surrounding topography and the wind speed. This group of facts makes the quantification approach to the theme into a complex process. This phenomenon is responsible for the appearance of constructions pathologies that account for considerable economic and social losses. The present dissertation goes in the sequence of work done by other investigators, with the objective of making an update until the present day.

Nowadays there are three leading directions of investigation, divided between experimental methods, semi empirical and numerical. First ones are reported to the establishment of *in situ* measurement systems by means of utilizations of such kind of equipments as gauges, pluviometers, udometers and anemometers, or in alternative by means of experiences in wind tunnels. This method constitutes itself as the main data source for implementation in the other two methods. The second method involves the integration of the experimental data coordinated with mathematical expressions that allow for the quantification of driving rain in faster and wider way. It's then a theoretical based model in which its coefficients are experimentally funded. The normative document ISO 15927-3 constitutes as an example of this semi empirical approach as well as the procedures developed by Straube and Burnett. The numerical methods involving the adoption of computational fluid dynamics were applied to this theme at the beginning of the 90s. Modelling the case study in grid elements, applying turbulence models and integrating meteorological data they allow for a higher quality and resolution power of the impingent rain.

These methods are complementary for there is an interest in pursuing investigations concerning this theme.

Key Words: Wind-driven rain, Pluviometers, Standard ISO 15927-3, CFD, Catch charts

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Âmbito e objectivos.....	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	3
2	Equipamentos e técnicas auxiliares de medição de chuva incidente	5
2.1	Aparelhos mecânicos de medição de precipitação horizontal (udómetros).....	5
2.1.1	Udómetro tradicional	5
2.1.2	Udómetro de recipiente basculante	6
2.1.3	Udómetro de capacitância com auto-sifonagem	7
2.2	Aparelhos electrónicos de medição de precipitação horizontal (disdrómetros)	8
2.3	Aparelhos de medição da velocidade e direcção do vento (anemómetro).....	11
3	Métodos experimentais de medição da chuva incidente.....	13
3.1	Quantificação das variações de incidência da chuva em fachadas reais- Caso Português. Elaboração de um índice de chuva incidente para o território nacional	13
3.2	Análise comparativa de pluviómetros de superfície com princípio de medição mecânico, sem sensor de pressão.....	15
3.2.1	Descrição dos aparelhos.....	15
3.2.2	Descrição do ensaio e resultados	18
3.2.3	Principais conclusões do ensaio.....	20
3.3	Pluviómetros com sensor de pressão - Pluviómetro da Universidade Católica de Leuven (KUL)	22
3.4	Estudo numérico sobre água aderente numa superfície vertical em PMMA.....	23

3.5	Análise da relação entre água aderente e o tipo de material em que incide	25
3.6	Ensaio Experimental- Medição de chuva incidente com alta resolução. Eventos cumuliformes versus eventos estratiformes.....	26
3.7	Recomendações para a construção e operação de pluviómetros	27
3.8	Recomendações para recolher com precisão dados sobre chuva incidente	27
3.9	Simulação de chuva incidente em túneis de vento	28
3.9.1	Estudo dos efeitos dos detalhes arquitectónicos sobre os padrões de molhagem	29
3.9.2	Ensaio no túnel de vento Jules Verne em Nantes	30
4	Métodos semi-empríricos	31
4.1	Revisão histórica e fundamentos	31
4.2	Índice de chuva incidente. Caso brasileiro.....	34
4.3	Uma abordagem probabilística.....	36
4.3.1	Interação entre a precipitação e o vento	36
4.3.2	Interação entre vento, chuva e o edifício.....	37
4.4	Método Straube & Burnett (SB).....	38
4.5	Norma BS 8104 “Assessing exposure of walls to wind-driven rain”	44
4.6	Análise ISO 15927-3 “Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data”	44
4.6.1	Método 1 - Descrição.....	45
4.7	Método 2 - Estimativa dos efeitos da chuva incidente	52
4.8	Comparação entre a norma ISO e o Método SB.....	53
5	Métodos numéricos	55
5.1	Seleção de intervalos de resolução temporal adequados, para uso em estudos de CFD.....	57
5.2	Método híbrido CFD-DRI	58
5.3	Aplicação do método C-FD-E para o estudo do efeito da aplicação de uma cornija sobre o padrão de molhagem de um edifício.....	61
5.4	Método CFD na validação do método da projecção do cosseno	62
6	Comparação entre modelos de cálculo para chuva incidente em edifícios.....	65

6.1	Análise do efeito bloqueador do vento	68
7	Conclusões.....	73
7.1	Propostas para futuros desenvolvimentos.....	74
	Referências Bibliográficas	77

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Tipos de erro e frequência para recipientes basculantes	16
Quadro 3.2 - Ângulos de contacto e valores totais de água aderente para 6 tipos de materiais.....	25
Quadro 4.1 - Países e respectivos autores que possuem mapas de chuva incidente	33
Quadro 4.2 - Classes de severidade de exposição de Chand e Bhargava.....	35
Quadro 4.3 - Comparação entre tabelas de níveis de exposição entre Lacy e Chand e Bhargava, incluindo recomendações de Marsh.....	35
Quadro 4.4 - Comparação entre DRF teórico e experimental.....	39
Quadro 4.5 - Coeficientes de Exposição	41
Quadro 4.6 - Factor de exposição e altura (EHF)	42
Quadro 4.7 - Parâmetros para o cálculo do factor TF	43
Quadro 4.8 - Categorias do terreno e parâmetros relacionados	47
Quadro 4.9 - Comprimento efectivo L_e	48
Quadro 4.10 - Factor de Obstrução.....	50

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Processo de formação do fenómeno de chuva incidente	1
Figura 1.2 - Anomalia em fachada, desenvolvimento de fungos	1
Figura 2.1 - Udómetro tradicional.....	5
Figura 2.2 - Udómetro de recipiente basculante para medição de precipitação horizontal	6
Figura 2.3 - Udómetro de capacitância com auto sifonagem.....	7
Figura 2.4 - Situação (a) com trajectória da chuva perturbada pelo vento e situação (b) com deflexão moderada	8
Figura 2.5 - Disdrómetro	8
Figura 2.6 - Disdrómetro acústico.....	10
Figura 2.7 - Comparação de medições horárias entre um disdrómetro e um aparelho tradicional.	10
Figura 2.8 - Anemómetro de 3 conchas	11
Figura 2.9 - Anemómetro sónico	12
Figura 3.1 - Pluviómetro de superfície.....	13
Figura 3.2 - Distribuição da chuva incidente em duas fachadas.	14
Figura 3.3 - Aparelho CTH	16
Figura 3.4 - Aparelho TUE II	17
Figura 3.5 - Aparelho TUD	18
Figura 3.6 - Vista geral do edifício de teste e localização da colocação dos aparelhos	19
Figura 3.7 - Correlação entre intensidades da chuva incidente, com o aparelho TUE-II no eixo X e o aparelho TUE-I no eixo Y	20
Figura 3.8 - Valores de RDF para edifícios com altura muito inferior ao comprimento e altura muito superior ao comprimento	21
Figura 3.9 - Valores de RDF para edifícios com cobertura inclinada	21
Figura 3.10 - Aparelho KUL	22
Figura 3.11 - Reservatório equipado com sensor de pressão	23

Figura 3.12 - Comparação entre quantidades acumuladas, para chuva incidente infligida, efectivamente medida e água aderente	24
Figura 3.13 - Esquema de colocação dos pluviómetros na fachada de Sudoeste	26
Figura 3.14 - Edifício de teste com cobertura de duas águas	30
Figura 3.15 - Pluviómetro produzido pelo CSTB Nantes (ao centro)	30
Figura 4.1 - Mapa brasileiro de chuva incidente	34
Figura 4.2 - Interação entre a precipitação e o vento	36
Figura 4.3 - Interação entre o vento, a chuva e o edifício	37
Figura 4.4 - Factor TF para colinas.	43
Figura 4.5 - Factor TF para escarpas.	43
Figura 4.6 - Definição dos factores para determinação do coeficiente de topografia	48
Figura 4.7 - Factor s para penhascos e escarpas	49
Figura 4.8 - Factor s para colinas e cristas	49
Figura 4.9 - Factor de parede	51
Figura 5.1 - Exemplo de uma carta de rácios de incidência	56
Figura 5.2 - Divisão da fachada por áreas	59
Figura 5.3 - Factor LIF para cada uma das áreas	59
Figura 5.4 - Valores de LIF para o modelo C-FD-E(à esquerda), para a experiência de Inculet (meio) e para um ensaio de Choi (direita)	61
Figura 5.5 - Factor de eficiência da cornija (F_z) para a geometria do edifício	62
Figura 5.6 - Representação gráfica dos erros introduzidos pelo método da projecção do cosseno num ponto P da fachada exposta ao vento de um edifício modelado em computador	62
Figura 6.1 - Tipologias de edifícios em estudo	66
Figura 6.2 - Variação de α com a altura para três intensidades de R_h . Tipologia B	67
Figura 6.3 - Variação de α com a altura para três intensidades de R_h . Tipologia D	68
Figura 6.4 - Variação do coeficiente α em função do factor BSL	69
Figura 6.5 - Variação de α em função de R_h para as 4 tipologias	70
Figura 6.6 - Fachada Sudoeste do edificio Hunting Lodge St. Hubertus	71

Simbologia

Latinas maiúsculas

$C_R(z)$ - Coeficiente de rugosidade

C_T - Coeficiente de topografia

D - Direcção média horária do vento a partir do norte

E_{AA} – Evaporação da água aderente

E_{cond} – Condensação

E_{evap} – Evaporação do recipiente basculante

E_{resid} – Resíduos de água do recipiente

$F(d)$ – Fração de água líquida presente no ar com gotas de diâmetro inferior a d

F_{ro} - Factor de escorrência

F_z - Factor de eficiência de cornija

H - Altura efectiva

H_p - Altura da fachada do edifício acima do ponto em estudo

I_A - Índice anual em campo aberto

I_s - Índice em campo aberto persistente

I_{WA} - Índice anual de parede

I_{WS} - Índice de parede persistente

K_R - Factor de terreno

L_d - Comprimento real da encosta descendente

L_e - Comprimento efectivo da encosta ascendente

L_u - Comprimento real da encosta descendente na direcção do vento

N - Número de anos

O - Factor de obstrução
P – Total de precipitação anual
 R_h – Intensidade da chuva em superfície horizontal
 R_{wdr} – Intensidade da chuva incidente
U – Velocidade do vento
 U_{10} - Velocidade do vento a 10 m de altura
 $U(z)$ – Velocidade do vento à altura z
 $V_{recipiente}$ – Volume do recipiente
 V_t – Velocidade terminal das gotas de água
W - Factor de parede

Latinas minúsculas

d – Diâmetro das gotas de água
n – Número de movimentos de basculação
r - Total de precipitação anual
v - Velocidade média horária do vento
x - Distância na horizontal medida desde o local em estudo até ao topo da crista
z - Altura acima do solo
 z_0 - Extensão da rugosidade
 z_{min} - Altura mínima

Gregas minúsculas

a - Coeficiente de chuva incidente
Q - Orientação da parede relativamente à direcção norte

θ - Ângulo entre a direcção do vento e a normal à fachada

ϕ - Declive na direcção para onde sopra o vento

Abreviaturas (siglas)

AAF - Fórmula de Admitância Aerodinâmica

ASCE - American Society of Civil Engineers

BLWT - Boundary Layer Wind Tunnel

BRE - Building Research Establishment

BS - British Standard

BSL . Factor de Escala do Edifício

CFD - Métodos Computacionais de Dinâmica de Fluidos

C.I S4 - Chuva incidente em S4

CSTB - Center for Scientific and Technical Building Studies

CTH - Universidade Técnica de Chalmers

DD - Draft for Development

DRF - Função de Chuva Incidente

DRI - Índice de Chuva Incidente

EHF - Factor de Exposição e Altura

ER-COFTAC - European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion

ISO - International Standard Organisation

KUL - Katholieke Universiteit Leuven

LIF - Factor de Influência Local

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PMMA - Polimetil-metacrilato

PTFE - Politetrafluoretileno

PVC - Policloreto de Vinil

RANS - Equações de Reynolds Navier-Stokes

RDF - Factor de Deposição de Chuva

TAHMO - Trans-African Meteorological Observatory

TF - Factor de Topografia

TU Delft - Technical University of Delft

TUD - Technical University of Denmark

TUE - Technical University of Eindhoven

WMO - World Meteorological Organisation

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Os danos provocados por fenómenos de chuva incidente têm sido negligenciados ao longo do tempo, quer ao nível das boas práticas da construção de edifícios, quer na sua manutenção, encontrando-se na origem da ocorrência de apreciáveis danos patrimoniais. A chuva incidente não é mais do que a precipitação, a qual sofre uma contribuição da componente horizontal da velocidade do vento. Em determinadas circunstâncias de combinação de chuva com a acção do vento (Figura 1.1), grandes quantidades de água são projectadas na direcção da envolvente dos edifícios. A quantidade de chuva que incide numa dada edificação depende de factores que englobam a geometria do edifício, velocidade do vento, intensidade da chuva, espectro do tamanho das gotas e topografia envolvente, entre outros. Como tal é um fenómeno com forte variabilidade no espaço e no tempo. Este amplo conjunto de factores torna a abordagem ao tema num processo complexo. Anomalias tão diversas como o desenvolvimento de fungos (Figura 1.2), aparecimento de eflorescências, corrosão, danos provocados por ciclo gelo/degelo, perda de capacidade térmica dos isolamentos dos materiais, podem ter a sua origem em chuva incidente.

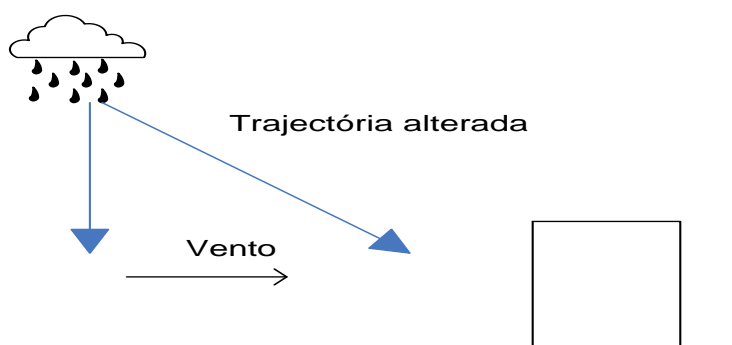


Figura 1.1 - Processo de formação do fenómeno de chuva incidente



Figura 1.2 - Anomalia em fachada, desenvolvimento de fungos

A partir de 1950 este assunto começou a ser estudado em pormenor e a receber mais contribuições científicas, quer através da investigação dos mecanismos que estão por detrás dos seus princípios activos, quer ao nível do desenvolvimento de plataformas que permitam a sua quantificação. Na sequência do trabalho realizado por Henriques [39] em 1992 e passado um hiato de 20 anos revela-se pois de importância fazer uma actualização relativamente ao estado do conhecimento. Este processo passa por divulgar as inovações e contribuições entretanto surgidas. O conhecimento adequado deste complexo fenómeno reveste-se de especial importância tanto na fase de projecto como na fase construtiva de edificações, sendo de relevante interesse para os fabricantes de materiais de construção. O diagnóstico do grau de incidência a que um edifício pode estar exposto, permitirá adoptar disposições construtivas consentâneas e assim actuar de forma profiláctica.

1.2 Âmbito e objectivos

A presente dissertação tem como finalidade fazer uma sùmula dos novos desenvolvimentos surgidos na área da quantificação da chuva incidente desde 1992, sem perder de vista uma perspectiva da evolução histórica das práticas e teorias. Existem actualmente três frentes de investigação principais. A primeira diz respeito aos métodos experimentais que se constituem como a base geradora de dados científicos e de recolha de informação para os restantes dois métodos, fornecendo-lhes importantes contribuições. Os métodos experimentais envolvem o desenvolvimento e implementação de sistemas de medição constituídos por uma diversa gama de equipamentos. Estes sistemas envolvem geralmente o uso de pluviómetros para medição de chuva incidente, udómetros para medição de precipitação em superfície horizontal e anemómetros para registo de velocidade e direcção do vento. Ao longo desta dissertação serão descritos cada um dos tipos de aparelho com as respectivas finalidades, apresentando as vantagens e desvantagens do seu uso. Concretamente será apresentado um ensaio comparativo entre os diversos modelos de pluviómetros com diferentes soluções construtivas e princípios activos de medição. Serão igualmente apresentados um conjunto de boas práticas construtivas e linhas orientadoras, apesar de não vinculativos, para concepção destes aparelhos, fundamentadas em testes executados ao longo dos anos. Pretende-se também divulgar uma linha de estudo envolvendo o recurso a túneis de vento para se obterem padrões de molhagem nos edifícios. Estes ensaios em túneis foram usados para avaliar o impacto de diversos tipos de detalhes arquitectónicos sobre esses mesmos padrões.

Os métodos semi-empíricos integram dados experimentais na sua génese para produção de um conjunto de expressões que permitam quantificar a chuva incidente. Muitos dos seus pressupostos são fundamentados em observações experimentais. O primeiro documento produzido com efeito vinculativo sobre este tema é originário do Reino Unido sob a forma da norma DD-93 [23], ao qual se seguiu a norma BS8104 [24] que apenas será abordada superficialmente.

É objectivo desta dissertação dar a conhecer os métodos vigentes, nomeadamente a norma ISO 15927-3 [43] e o método proposto por Straube e Burnett [55,57] doravante designado por método SB. Usando dados meteorológicos conjugados com factores topográficos, rugosidade do terreno, entre outros, estes procedimentos permitem fazer uma previsão da deposição de chuva para diversos pontos numa fachada. À data de elaboração desta dissertação, a norma ISO constitui-se como a norma vigente a nível mundial, ainda que tendo sido elaborada para climas de natureza semelhante aos do Reino Unido, possui um método de cálculo alternativo de quantificação que permite a sua aplicabilidade aos restantes países. Pretende-se também expor o método SB desenvolvido no Canadá

que partindo de premissas semelhantes às da norma ISO apresenta algumas diferenças e limitações que serão assinaladas.

Pretende-se também fazer uma introdução aos métodos numéricos, onde se aplicam métodos computacionais de dinâmica de fluidos ao estudo da quantificação da chuva incidente.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação que se apresenta está organizada em 7 capítulos, sendo o primeiro o presente capítulo introdutório.

No capítulo 2 respeitante aos métodos experimentais, são apresentados os equipamentos que compõem os dispositivos essenciais a uma campanha experimental, comparando as diversas opções existentes no mercado numa perspectiva de vantagens/desvantagens onde se sugerem algumas alternativas mais económicas.

No capítulo 3 abordam-se também os métodos experimentais, mais concretamente os aparelhos responsáveis pela medição de chuva incidente, os pluviómetros e é feito o enquadramento ao caso português. São também apresentados ensaios comparativos entre diversos modelos, discutidas soluções construtivas e respectivas conclusões. É abordado o fenómeno da água aderente aos aparelhos e as relações que se estabelecem entre os diversos tipos de materiais em que são construídos os pluviómetros. São apresentadas um conjunto de regras a observar (ainda que sem qualquer tipo de carácter vinculativo) para a operação desses equipamentos, assim como um conjunto de procedimentos para execução de acções de campanhas experimentais. Finalmente são divulgados alguns ensaios realizados em túneis de vento e é relatado o uso desta técnica para obter informação sobre a influência de detalhes arquitectónicos, nomeadamente sobre os padrões de molhagem dos edifícios.

No capítulo 4 são introduzidos os métodos semi-empíricos. Faz-se uma breve revisão histórica e são apresentados alguns conceitos fundamentais. Como caso particular, é exposto o cálculo do índice de chuva incidente (DRI) para o território brasileiro, que se aproveita para introduzir as tabelas de classe de severidade de exposição dos edifícios. É igualmente apresentada uma abordagem probabilística da relação entre a chuva-vento-edifício da autoria de Straube e Burnett. São apresentados os dois documentos normativos mais relevantes dos últimos anos, a BS8104 e a norma ISO 15927-3, sendo que apenas a última é explicada em detalhe para os seus dois métodos. Paralelamente a esta norma é também analisado o método SB. Finalmente estabelece-se uma comparação entre a norma ISO e o método SB em redor de sete parâmetros essenciais.

O capítulo 5 é respeitante aos métodos numéricos, onde se apresentam os métodos computacionais de dinâmica de fluidos (CFD), que a partir do início da década de 90 se constituíram como uma das ferramentas mais poderosas e precisas para análise deste tema. É descrito o trabalho pioneiro desenvolvido por Choi [27, 28, 29] sob condições estacionárias e a sua posterior extensão ao domínio temporal por Blocken e Carmeliet [7, 8]. Apresenta-se igualmente uma iniciativa da autoria de Choi para estabelecer uma ligação entre os modelos CFD e DRI [30]. Ainda em termos de modelos híbridos descrevem-se tentativas de integração dos resultados produzidos em túneis de vento nos métodos CFD.

No capítulo 6, são apresentados estudos comparativos entre o método SB, norma ISO e CFD e discussão. No último capítulo faz-se uma sùmula da dissertação e as conclusões gerais acompanhadas de algumas propostas para futuras investigações neste tema.

2 EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS AUXILIARES DE MEDIÇÃO DE CHUVA INCIDENTE

2.1 Aparelhos mecânicos de medição de precipitação horizontal (udómetros)

Os udómetros são aparelhos utilizados para medição de chuva em superfície horizontal, como tal caracterizam-se por possuírem uma abertura no sentido horizontal. Seguidamente serão apresentados alguns modelos expondo os seus princípios de funcionamento, bem como alguns prós e contras da sua utilização. Complementarmente são também descritos os aparelhos responsáveis pela medição da velocidade e direcção do vento (anemómetros).

2.1.1 Udómetro tradicional

São os aparelhos de construção mais simples, constituídos por um colector e uma área afunilada que conduz a água até um recipiente que a acumula entre os intervalos de medição (Figura 2.1). Foram aparelhos bastante usados para o estudo de chuva incidente, mas actualmente a sua utilização encontra-se em declínio a favor dos aparelhos mencionados nos pontos 2.1.2, 2.1.3 e 2.2. Apesar da sua parca utilização importa apresentar algumas recomendações da World Meteorological Organization (WMO) [64] para a sua construção, tendo em vista a minoração dos erros, são sugeridos os seguintes detalhes construtivos:

1. A extremidade do colector deve ser biselada e as paredes interiores devem possuir forte pendente para assegurar um escoamento eficaz.
2. A construção do aparelho deve em todas as circunstâncias ser de tal forma que a área do orifício de escoamento seja sempre constante.
3. O colector deve ser executado tendo em vista a mínima dispersão de água por fenómenos de salpicos. Para o efeito as paredes do funil devem ter um declive mínimo de 45°.
4. A entrada do colector deve ser o mais estreita possível e o recipiente de armazenagem estar suficientemente protegido da radiação solar por forma a evitar perdas acrescidas por evaporação.

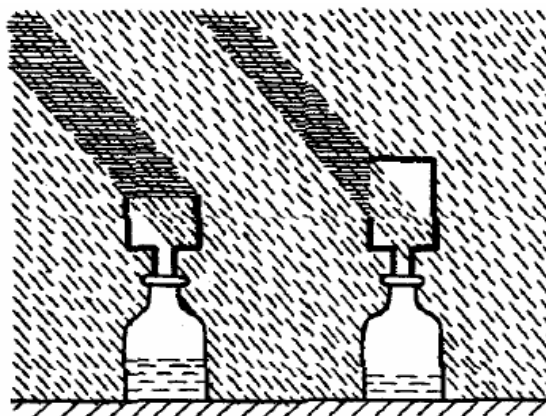


Figura 2.1 - Udómetro tradicional [11]

2.1.2 Udómetro de recipiente basculante

Para efectuar a medição da precipitação horizontal, o equipamento de uso mais frequente é o aparelho de recipiente basculante (Figura 2.2). Consiste numa área de captação afunilada na extremidade inferior que conduz a água até um recipiente basculante geralmente executado em metal que está balançado em equilíbrio instável em torno de um eixo horizontal. Os compartimentos do recipiente estão executados para que a água seja esvaziada pelo compartimento que se encontra em posição inferior, enquanto o outro compartimento se posiciona agora mais elevado para receber a água. Quando este atinge a quantidade pré definida efectua um movimento basculante, enviando a água para o reservatório e emitindo um sinal eléctrico que é posteriormente armazenado num data logger ou aparelho semelhante. Apresenta uma limitação relevante que se prende com o facto de o movimento basculante apenas ocorrer quando o recipiente se encontra cheio. Na maior parte dos casos haverá sempre precipitação que não será contabilizada. Igualmente estes aparelhos são tanto mais ineficientes quanto piores são as condições atmosféricas [19]. Alguns destes aparelhos podem ser equipados com uma balança por forma a fornecerem leituras da precipitação a qualquer altura.



Figura 2.2 - Udómetro de recipiente basculante para medição de precipitação horizontal [68]

Para além das limitações acima mencionadas a WMO [64] acrescenta ainda mais alguns inconvenientes destes aparelhos:

1. A natureza descontínua do mecanismo de medição é particularmente falível sob condições de chuva fraca. Não sendo possível apurar com precisão o início e o fim do período de precipitação.
2. O fluxo de água proveniente da área de recolha e que atinge os compartimentos provoca regularmente leituras inflacionadas.
3. A água aderente nas paredes exteriores dos compartimentos provoca alguns erros, testes em compartimentos com cera anti-aderente revelam diferenças de até 4% para o volume necessário para se atingir uma basculação.
4. Com o design habitual neste tipo de compartimentos, a relação entre a área de água exposta e o seu volume promove os fenómenos de evaporação, sendo um factor ainda mais agravado

em climas tradicionalmente quentes como é o caso de Portugal. Para ocorrências de chuva fraca ou moderada constitui também uma significativa fonte de erros.

5. Em climas frios, onde a temperatura desce abaixo dos 0° C, como no norte e interior de Portugal, poderiam ser usados dispositivos de aquecimento para os compartimentos, mas a WMO adverte para a fraca performance dos mesmos, dado que altera as leituras em virtude da neve derretida. A WMO não recomenda o uso deste tipo de instrumentos em climas frios.

2.1.3 Udómetro de capacitância com auto-sifonagem

Blocken e Carmeliet [16] sugerem o uso deste aparelho (Figura 2.3) em detrimento do anterior, dado que permite efectuar registos de forma contínua com maior resolução. Em virtude destas características, este tipo de aparelhos permite obter leituras da duração dos períodos de precipitação. Adicionalmente estes equipamentos fornecem leituras instantâneas das medições a qualquer altura, os aparelhos anteriores estão dependentes do movimento de basculação, com todas as imprecisões que acarreta esse princípio de funcionamento.



Figura 2.3 - Udómetro de capacitância com auto sifonagem [16]

Blocken e Carmeliet [16] mencionam ainda a elevada susceptibilidade ao erro deste tipo de aparelhos face à influência do vento, que é mesmo considerada a maior fonte de erros que afecta este tipo de instrumentos. Este erro deve-se à deformação de forma sistemática do padrão do fluxo do vento em torno do orifício do equipamento que consequentemente perturba a trajectória das gotas de água. Numa configuração típica de montagem destes aparelhos a uma altura do solo situada entre os 0.5 e os 1.5m o erro pode situar-se na ordem de grandeza entre os 2% e os 10%. O erro aumenta na ordem proporcional com o aumento da altura dado que a velocidade do vento é consequentemente superior.

Por forma a minorar este efeito Blocken e Carmeliet [16] sugerem a construção de uma parede semicircular em relva em torno do aparelho (Figura 2.4). A adopção desta medida permite que o fluxo de ar em volta do equipamento ocorra na direcção mais horizontal possível, reduzindo desta forma alguma da deflexão provocada pelo vento.

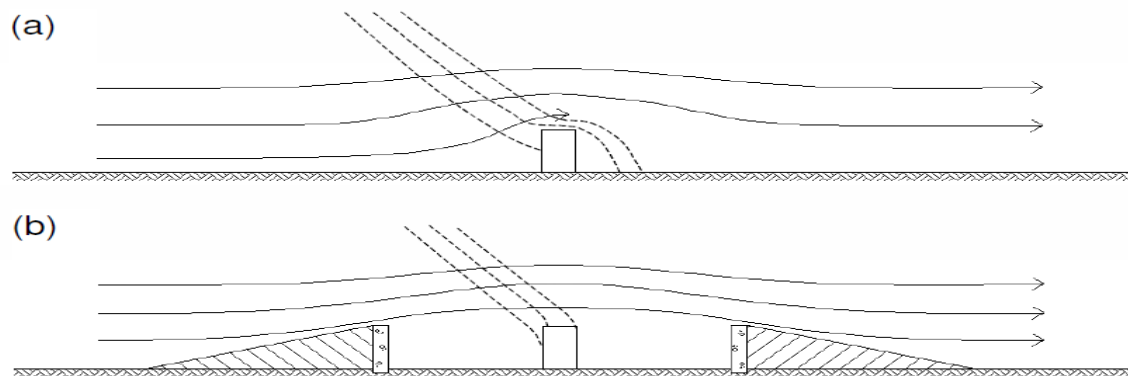


Figura 2.4 - Situação (a) com trajetória da chuva perturbada pelo vento e situação (b) com deflexão moderada

2.2 Aparelhos electrónicos de medição de precipitação horizontal (disdrómetros)

Os aparelhos comumente usados para medir chuva em superfície horizontal são do tipo recipiente basculante. São aparelhos de relativa fiabilidade, usados geralmente para fins meteorológicos, que no entanto para o tratamento da questão da chuva incidente apresentam algumas limitações. Com o propósito de se obter mais acuidade nos ensaios tornou-se necessária a exploração de outros tipos de aparelhos que permitissem processar uma superior variedade de informação. Os disdrómetros (Figura 2.5), também designados por monitores de precipitação a laser (MPL), conseguem destringir entre gotas líquidas e partículas sólidas, para além de permitirem um registo da velocidade e tamanho das partículas, possibilitando assim a sua classificação de acordo com o seu tamanho e velocidade terminal.



Figura 2.5 - Disdrómetro [65]

De uma forma genérica um disdrómetro moderno é constituído por um díodo a laser e um conjunto de lentes que produzem um feixe de luz que incide numa dada área de detecção [47]. O mecanismo de funcionamento e medição consiste na ocultação do feixe de infravermelhos por parte das gotas de chuva. Quando esta situação ocorre, a amplitude do feixe sofre uma conseqüente redução. Estabelece-

se portanto uma relação entre a amplitude de redução do feixe e o tamanho das partículas. O cálculo da velocidade das partículas é obtido através da medição do período de tempo durante o qual ocorre a obstrução do feixe. De acordo com Van Mook [62] existem essencialmente quatro tipos de aparelhos diferentes, cada qual com o seu princípio de funcionamento:

1. Disdrómetro Joss-Waldvogel. Aparelho pioneiro e concebido em 1967. O equipamento consiste num sensor e numa área de recolha de 50cm^2 . As gotas incidentes no sensor provocam um deslocamento descendente que é sentido por uma mola. A amplitude de pulso da voltagem oriunda da mola traduz o tamanho da gota. Posteriormente o electrómetro processador de sinais classifica os diversos pulsos em 20 canais que correspondem a 20 categorias já pré-calibradas e definidas pelo fabricante. Este é considerado o aparelho de referência sendo ainda hoje utilizado.
2. Disdrómetro por ocultação de imagem. Já anteriormente mencionado, este é formado por um díodo emissor de luz que produz um feixe laser, opticamente moldado para ter uma secção em forma rectangular ou elíptica de pequena altura. Este feixe ilumina uma fileira de foto-díodos. As gotas que passam através do feixe são dimensionadas de acordo com o “efeito sombra” que produzem no sensor de luz. Este princípio de medição foi primeiramente aplicado por Knollenberg em 1970 [11]. Em 1994 surge o disdrómetro bidimensional. Este equipamento foi dotado de 2 câmaras de vídeo que produzem fotografias de cada gota de chuva, floco de neve ou qualquer outro tipo de hidrómetro que atinja o feixe.
3. Disdrómetro por atenuação de luz. Ao invés de captar toda a sombra produzida pela gota de chuva, neste caso é usado um único foto-díodo que capta a total atenuação de luz. Como principais vantagens apresenta o facto de ser um princípio de medição directa e facilidade de uso.
4. Disdrómetro método Radar Doppler. Medem a reflectividade espectral.

Sendo o disdrómetro a laser uma tecnologia dispendiosa, Stijn de Jong [32] e a sua equipa da TU Delft, desenvolveram um protótipo de baixo custo de um disdrómetro acústico (Figura 2.6), cujo custo total, excluindo os componentes electrónicos se cifra nos 10 USD. Este dispositivo possui um sensor na forma de um elemento piezoeléctrico que permite converter o impacto das gotas num sinal eléctrico que é depois processado e armazenado. O sinal convertido é naturalmente função do tamanho e da velocidade das gotas. O disdrómetro foi sujeito por Benghuijs [4] a ensaios num clima tropical, na Zâmbia, sendo parte integrante do projecto TAHMO " Trans-African Hydro-Meteorological Observatory". Os autores mencionam problemas ao nível da calibração do aparelho que ainda não permitiram a obtenção de resultados consistentes. A calibração do equipamento foi efectuada com recurso a deposição de gotas de água através de seringas médicas, numa posição fixa de uma altura de 12 metros. Através deste método apenas foi possível obter uma curva de calibração no espectro entre os 2 e os 5 mm de diâmetro das gotas. Como vantagens deste tipo de aparelho, Van Giesen [61] indica a sua apreciável precisão sob intempéries bem como o facto de ser diminutamente afectado por movimentos de insectos, dado o seu baixo número de componentes móveis.

Este novo dispositivo encontra-se ainda em fase de desenvolvimento, sendo um projecto embrionário. Espera-se num futuro próximo a apresentação de um modelo melhorado.



Figura 2.6 - Disdrómetro acústico [32]

Na Escócia, Kumaraperumal [47] efectuou um trabalho tendo em vista uma aferição dos resultados produzidos por um disdrómetro laser comparativamente a um udómetro basculante. Para o efeito foi seleccionado um edifício comercial, sede do Building Research Establishment (BRE) em East Kilbride, com uma envolvente de carácter urbano. Na Figura 2.7 encontram-se as medições horárias de precipitação executadas com um disdrómetro bem como para um aparelho tradicional para os dias 12 e 13 de Dezembro de 2006. Este trabalho reveste-se de especial importância na medida em que foi o primeiro trabalho que procurou aquilatar a performance dos disdrómetros por comparação com os aparelhos tradicionalmente empregues.

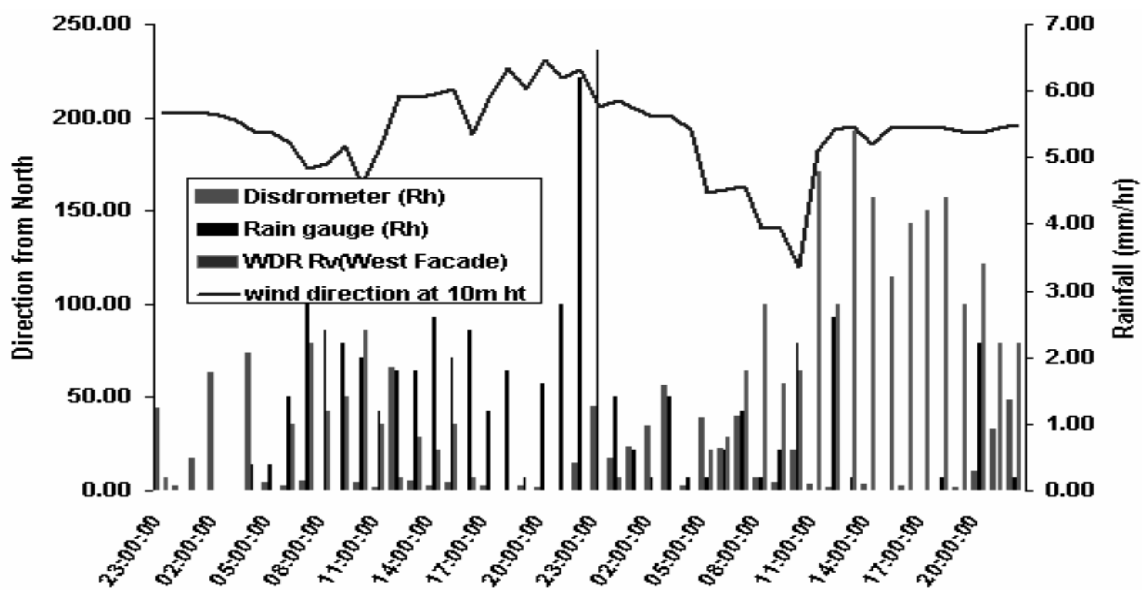


Figura 2.7 - Comparação de medições horárias entre um disdrómetro e um aparelho tradicional [47]

Apresentemente o udómetro revelou-se mais eficiente na recolha de água, no entanto os aparelhos encontravam-se colocados em localizações diferentes da fachada do edifício. Os resultados do ensaio, ainda que apontem para uma direcção são inconclusivos. Os autores mencionam a necessidade de se efectuarem ensaios com maior amostragem e contemplando distintos cenários, com diferentes intensidades de precipitação e velocidades do vento.

2.3 Aparelhos de medição da velocidade e direcção do vento (anemómetro)

O anemómetro, aparelho muito vulgarmente usado para fins meteorológicos, efectua medições da velocidade do vento (em m/s) e em alguns modelos regista a direcção (em graus). Existem dois tipos de anemómetros, os de velocidade e os de pressão, sendo que apenas os primeiros têm interesse no âmbito desta dissertação. Entre os aparelhos de velocidade contam-se 6 modelos, sendo os mais usados o anemómetro tipo concha, o sónico, o tipo laser-Doppler e o de turbina.

Os anemómetros tipo concha (Figura 2.8) usam habitualmente 3 ou 4 conchas, hemisféricas que se encontram acopladas na extremidade de braços horizontais, montados com ângulos iguais entre si em torno de uma única haste horizontal. O fluxo de ar que atravessa as conchas roda-as de uma forma proporcional à velocidade do vento. O número de voltas dado pelas conchas, indexado a um determinado período de tempo, permite calcular a velocidade do vento. Actualmente os anemómetros de 3 conchas são mais usados que os de 4. Em certos casos apresentam sobre-velocidade nas conchas devido a flutuações na componente longitudinal da velocidade do vento provocado pela turbulência, mas de acordo com Kristensen [46] esta sobre velocidade raramente excede em 2% os valores normais.

O anemómetro sónico (Figura 2.9) usa ondas ultra-sónicas para medir a velocidade do vento, baseado no tempo que a onda sónica demora a percorrer os transdutores. Como vantagens apresenta uma boa resolução temporal, sendo particularmente adequados para medições em condições de turbulência. O facto de apresentarem poucas partes móveis torna-os mais resistentes e adequados para uso a longo prazo. A sua principal desvantagem reside na distorção do fluxo de ar provocado pela estrutura que comporta os transdutores.

Uma situação ideal em termos experimentais envolve a utilização do binómio anemómetro de concha e sónico, dado serem aparelhos complementares.



Figura 2.8 - Anemómetro de 3 conchas [66]



Figura 2.9 - Anemómetro sónico [67]

3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO DA CHUVA INCIDENTE

Os pluviómetros de superfície são os aparelhos concebidos para medição de chuva incidente em superfícies verticais, são caracterizados por possuírem aberturas verticais para o efeito. Existem aparelhos de vários tipos e diferentes princípios de medição.

3.1 Quantificação das variações de incidência da chuva em fachadas reais- Caso Português. Elaboração de um índice de chuva incidente para o território nacional

Por forma a enquadrar o caso nacional é de relevante importância assinalar o contributo de Henriques [38] para o conhecimento da incidência de chuva num caso real. Para o efeito recorreu a pluviómetros de superfície (Figura 3.1) semelhantes aos descritos pelo Building Research Establishment (BRE). Este aparelho era uma caixa rectangular com uma abertura de 625 cm^2 , com uma caldeira de recolha de águas localizada na base. Os equipamentos foram concebidos de tal forma que evitavam a recolha de água proveniente de salpicos. Para a medição de caudais recorreu a um mecanismo de recipientes basculantes, o funcionamento deste tipo de mecanismos será descrito em mais detalhe nos pontos seguintes. Cada movimento de basculação produzia um impulso eléctrico que se traduzia numa quantidade equivalente a $0,032 \text{ mm}$ de precipitação.



Figura 3.1 - Pluviómetro de superfície.

A campanha experimental protagonizada por Henriques envolveu a colocação de 11 pluviómetros em duas fachadas de um edifício localizado no complexo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Foram seleccionadas uma fachada com orientação a poente e outra com orientação a sul. A primeira configurando uma situação de orientação para terreno aberto e sem obstruções nas imediações, a segunda parcialmente obstruída por edifícios de pequena dimensão na vizinhança e por edifícios de grande altura a cerca de 100 m de distância. Os equipamentos foram implantados a três

níveis: 5 m, 11 m e 13,5 m acima do nível do solo. A disposição dos pluviómetros na fachada e respectivos resultados encontram-se na Figura 3.2. Os resultados são apresentados como uma relação entre a precipitação recolhida nos vários colectores relativamente a um colector localizado na zona central.

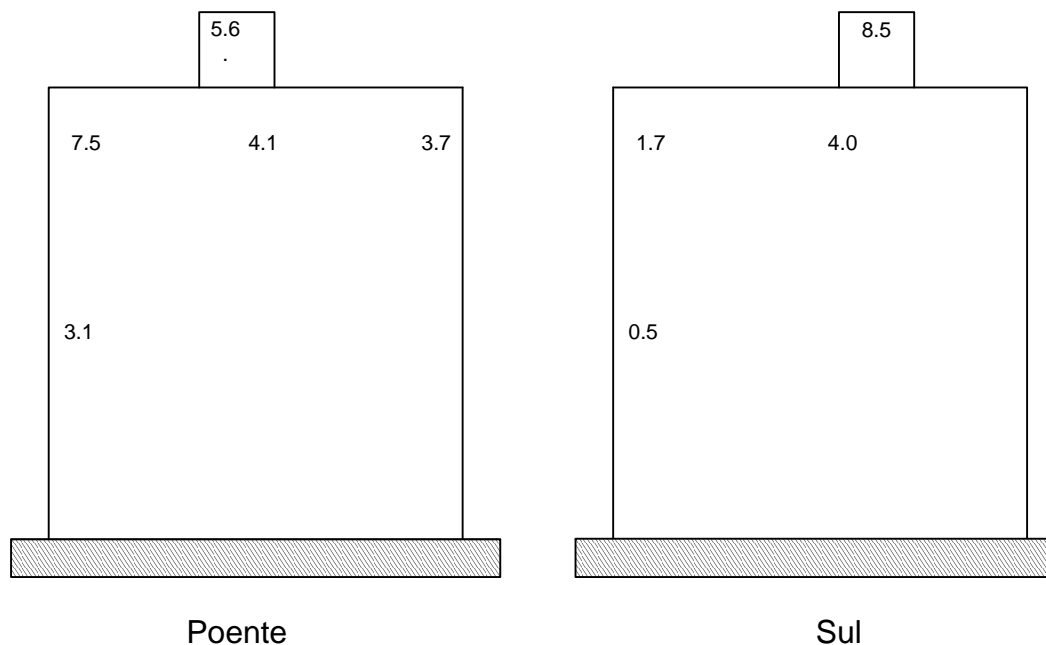


Figura 3.2 - Distribuição da chuva incidente em duas fachadas. Adaptado de [38]

Em primeiro lugar destaca-se a observação de que quanto maior é a cota de implantação do aparelho, maiores são as quantidades de chuva incidente recolhida. De acordo com as observações referidas por Henriques [38] e baseando-se essencialmente na fachada poente é possível inferir que a incidência nas zonas superiores das fachadas é aproximadamente quatro vezes superior à das zonas centrais. Nas zonas de cumhal esse incremento corresponde aproximadamente ao triplo.

A elaboração de um índice português apenas conhece desenvolvimentos em 1988. Este tema é retomado por intermédio de Henriques [39] que demonstra a viabilidade de aplicação ao caso nacional dos novos desenvolvimentos sobre chuva incidente que entretanto foram sendo actualizados. Para o efeito calculou os valores de índice de chuva incidente direccional para nove distritos nacionais (Bragança, Vila Real, Viana do Castelo, Porto, Coimbra, Portalegre, Lisboa, Évora e Beja). Estes valores são apresentados sob a forma de rosetas para 12 pontos cardeais principais. No ano seguinte Henriques [39] deu início a uma campanha experimental tendo em vista a validação dos novos desenvolvimentos entretanto surgidos. Estes estudos ocorreram sob o signo de três premissas propostas por Henriques:

- Melhorar os conhecimentos relativos aos fenómenos da chuva incidente em paredes e à forma de os quantificar.
- Estabelecer uma relação entre os valores do índice de chuva incidente e as correspondentes quantidades de chuva em superfície vertical, recolhidas quer em campo aberto quer sobre superfícies continuas.

- Estabelecer uma relação entre as quantidades de água da chuva captadas em superfícies contínuas e em campo aberto.

Os estudos sobre chuva incidente em território nacional, ao que tudo aponta parecem ter cristalizado à data publicação da campanha experimental de Henriques, não havendo qualquer outra evolução até aos dias de hoje.

3.2 Análise comparativa de pluviómetros de superfície com princípio de medição mecânico, sem sensor de pressão

Com início em Julho de 1998, Hogberg *et al.* [40], conduziram ensaios experimentais com recurso a diferentes pluviómetros. Estes aparelhos tinham concepções e soluções construtivas bastante distintas entre si com o fim de aferir qual a solução mais eficaz e que resultados mais fidedignos conseguiriam reproduzir. As variáveis principais deste estudo eram: intensidade da precipitação, duração da precipitação e velocidade do vento. Este ensaio decorreu sob o signo de três objectivos fundamentais:

- Desenvolvimento e teste de diversos aparelhos de medição de chuva incidente com princípios de funcionamento distintos. Dado que não existem aparelhos destes disponíveis no circuito comercial, nem tão pouco regras vinculativas para a sua construção, estes ensaios constituem-se como um importante modelo aquisitivo de informação, para implementação em futuros desenvolvimentos.
- Recolha de informação e dados relativos a chuva incidente (em modelos de escala 1/1, em circunstâncias reais), como propósito de desenvolvimento futuro para modelos “Heat and Air Moisture” (HAM) em envolventes de edifícios.
- Futura verificação e validação dos estudos com base em CFD nas mesmas circunstâncias meteorológicas.

Os aparelhos usados foram os seguintes:

- Aparelho da Chalmers University of Technology (CTH)
- Aparelho da Technical University of Denmark (TUD)
- 2 Aparelhos produzidos pela Eindhoven University of Technology (TUE-I e TUE-II)

3.2.1 Descrição dos aparelhos

O CTH (Figura 3.3) foi executado em perspex, possui comparavelmente aos restantes uma pequena área de recolha de chuva, cifrando-se nos 0.032 m². Foi concebido em num material hidrófugo e o fluxo de água é conduzido a um recipiente basculante com uma capacidade equivalente a 1g de água. Como medida de referência relativamente à medição de chuva acrescenta-se que a 5 movimentos de basculação por hora corresponde uma precipitação de 0.45 mm/h.

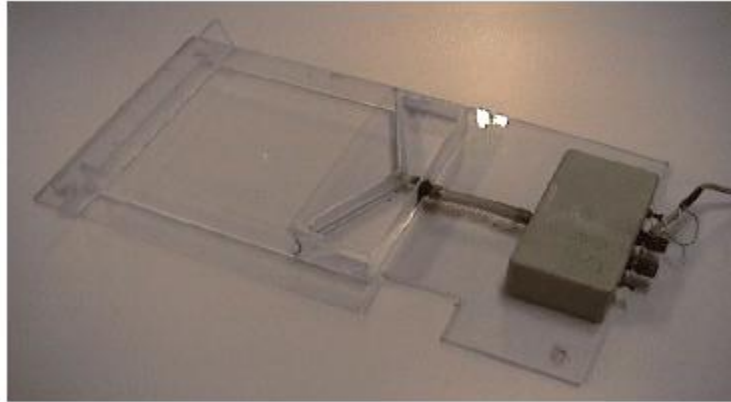
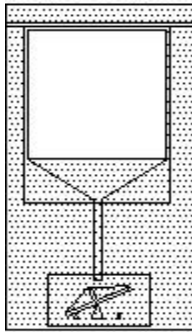


Figura 3.3 - Aparelho CTH [40]

Relativamente ao uso dos recipientes basculantes como mecanismo de medição, na Noruega, Nore *et al.* [52] levaram a cabo um procedimento experimental com o intuito de determinar o erro relativo associado a este mecanismo. Para o efeito sistematizaram primeiramente os cinco principais erros advinentes e respectiva frequência (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Tipos de erro e frequência para recipientes basculantes

Tipo de erro	Símbolo	Frequência da ocorrência
Evaporação da água aderente	E_{AA}	Durante e depois de um evento de chuva incidente
Evaporação do recipiente basculante	E_{evap}	Assumida como constante no tempo
Condensação	E_{cond}	Assumida como constante no tempo
Resíduos de água no recipiente	E_{resid}	No início e fim de um evento
Perdas durante a basculação	E_{basc}	Em cada processo e basculação

Partindo destes erros, os autores somaram E_{AA} durante todo o tempo de duração do ensaio, com o somatório horário de E_{evap} e E_{cond} . Assim o erro total deste processo traduz-se pela equação seguinte:

$$E_{total} = E_{AA} + E_{evap} + E_{cond} + \frac{E_{resid} + nE_{basc}}{nV_{recipiente}} \quad (3.1)$$

- E_{AA} Evaporação da água aderente (g);
- E_{evap} Evaporação do recipiente basculante (g/h);
- E_{cond} Condensação (g);
- E_{resid} Resíduos de água no recipiente (g);
- n Número de movimentos de basculação;
- E_{basc} Perdas durante a basculação (g);
- $V_{recipiente}$ Volume do recipiente (g).

O TUE-I é um aparelho de concepção e princípio activo semelhante ao anterior. Comparativamente ao CTH, possui uma área de recolha superior com 0.44 m^2 . Em termos de soluções construtivas as paredes interiores foram revestidas a teflon com o intuito de facilitar a condução das gotas de água até ao reservatório. A massa de água é depois medida por uma balança com precisão de 0.1g , colocada no reservatório.

O TUE-II (Figura 3.4) é em tudo semelhante ao TUE-I, mas equipado com um limpador de superfície para a área de recolha, também designada por colector, um mecanismo equivalente ao dos limpa pára-brisas dos automóveis. A adopção desta disposição construtiva visa aferir da sua eficiência para a anulação de um dos principais erros que afectam estes ensaios, a água que permanece aderente às paredes do reservatório e que não é contabilizada. Este mecanismo foi programado para uma velocidade de $1/3$ de rotação por segundo, após cada 5 segundos de movimento este repousa outros 5 segundos por forma a evitar danos provocados pela fadiga do material.



Figura 3.4 - Aparelho TUE II [40]

O aparelho TUD (Figura 3.5) possui um colector executado em aço inoxidável com uma área de recolha equivalente a 0.21 m^2 . No entanto este não é um colector tradicional como nos três restantes aparelhos, onde a água é direccionada a um reservatório para ser quantificada. Neste caso a quantificação é feita no próprio colector (incluindo o peso próprio do mesmo) Um reservatório está integrado no colector e possui auto sifonagem com uma capacidade a rondar os 300 ml. O processo de medição é feito para períodos de 10 minutos e é calculado pela diferença de massa no colector em dois períodos subsequentes de 10 minutos. Apenas foram aceites diferenças positivas que excedessem um valor mínimo estabelecido para 1.3g durante períodos de precipitação.

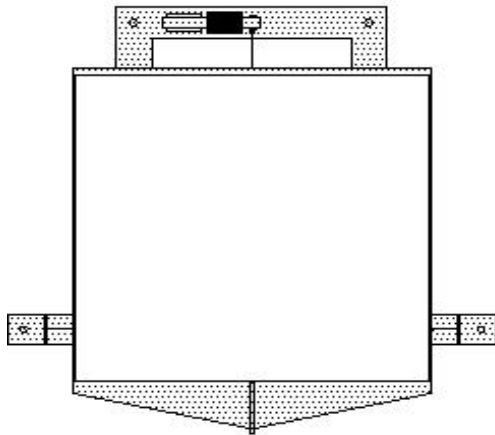


Figura 3.5 - Aparelho TUD [40]

3.2.2 Descrição do ensaio e resultados

Os ensaios foram efectuados no edifício principal do campus da TUE, em Eindhoven na Holanda, numa zona com topografia maioritariamente plana e sem edifícios altos. Na Figura 3.6 encontra-se um esquema com uma descrição das características geométricas do edifício e a indicação da localização dos aparelhos na fachada. Este local foi considerado o mais apropriado pelos investigadores, em função de que a direcção predominante do vento e da precipitação para este local é a direcção oeste. Precisamente a oeste deste edifício não existem obstáculos de grande dimensão. O edifício de maior altura que se encontrava mais próximo é uma construção com 45 metros de altura. A velocidade de referência do vento foi medida a 45 metros de altura (a partir do rés de chão), num poste localizado a 127 metros a oeste do edifício principal. A intensidade da precipitação horizontal foi medida em dois udómetros basculantes localizados no topo do auditório. Paralelamente aos aparelhos em ensaio, foram utilizados outros instrumentos de medição auxiliar tais como: anemómetros ultra-sónicos, para medir a velocidade do vento; udómetros com reservatórios basculantes, para medir a intensidade da precipitação horizontal; disdrómetros para medir o espectro das gotas de água. Os princípios de funcionamento e modelos de disdrómetros serão analisados mais adiante nesta dissertação.

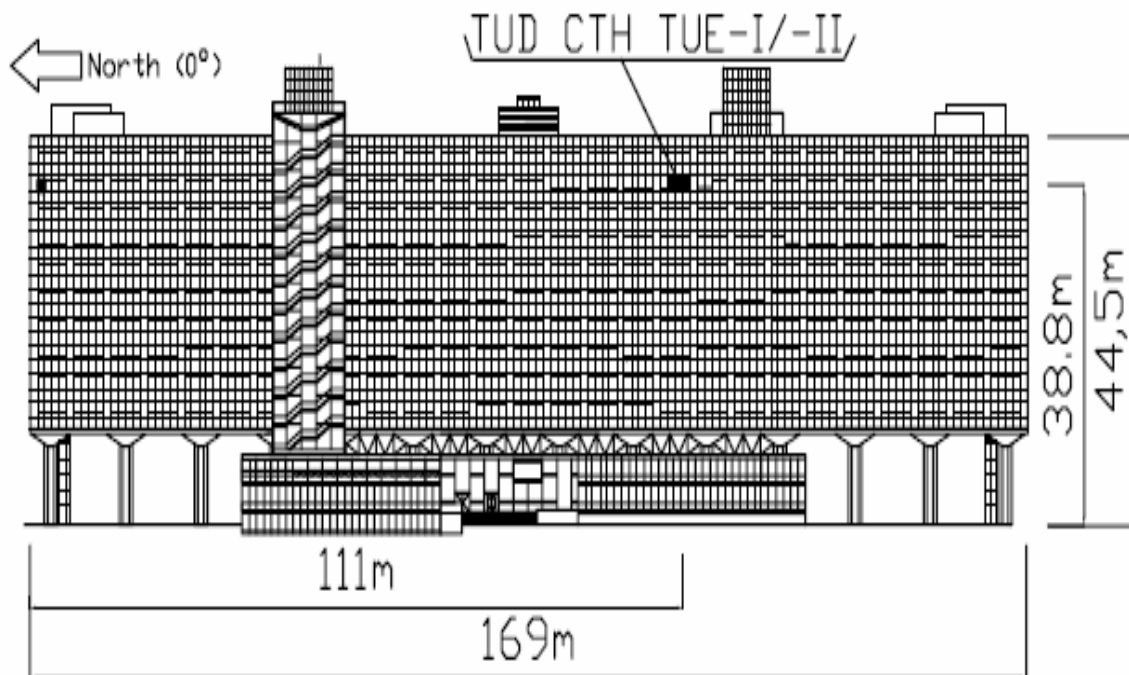


Figura 3.6 - Vista geral do edifício de teste e localização da colocação dos aparelhos [40]

Após um período experimental de 5 meses, os investigadores verificaram que as diferenças entre a soma total de chuva incidente medida pelos aparelhos CTH, TUD e TUE-II foram de apenas 3 mm entre si. O aparelho TUE-I teve um desempenho bastante inferior situando-se abaixo da metade da quantidade recolhida pelos restantes equipamentos.

Na origem das discrepâncias obtidas nas medições podem encontrar-se factores tão diversos como: água que escorre pelas paredes da fachada e entra no colectador; forma e tamanho da área de recolha; efeitos de salpicos para fora da área de recolha; fenómenos de evaporação; fenómenos que se prendem com a colocação espacial dos aparelhos de medição; perturbações causadas pelo vento que podem induzir a aproximação ou o afastamento das gotas.

Finalmente para períodos de precipitação de 20 minutos foram correlacionados os valores de intensidade de chuva incidente dos aparelhos TUE-II com todos os dos restantes aparelhos. A título exemplificativo mostra-se um destes gráficos, correlacionando o aparelho TUE II com o TUE-I (Figura 3.7). Em termos desta análise a correlação entre os 2 aparelhos TUE mostra um resultado sensivelmente igual a 2:1, significando que o TUE-II recolhe aproximadamente o dobro da água que o TUE-I. Na comparação com o CTH o resultado foi de 1:1, enquanto com o TUD este valor situou-se nos 1:1,3. A correlação estabelecida entre os dois aparelhos da TUE tem especial interesse, na medida em que permitir aferir sobre a eficiência do mecanismo implantado no aparelho TUE-II.

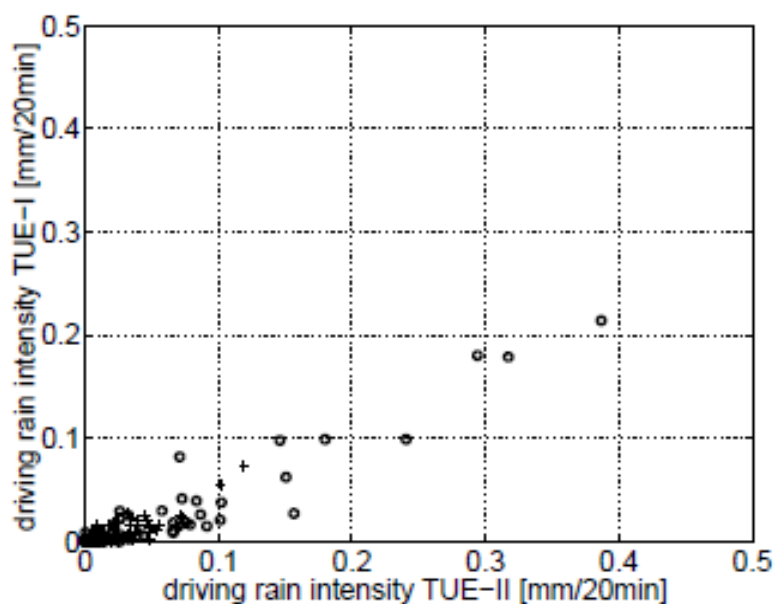


Figura 3.7 - Correlação entre intensidades da chuva incidente, com o aparelho TUE-II no eixo X e o aparelho TUE-I no eixo Y [40]

3.2.3 Principais conclusões do ensaio

As seguintes conclusões são mencionadas pelos autores:

- O uso de um revestimento em teflon para a obtenção de uma superfície lisa e hidrofóbica nas paredes do colector não provou ser solução correcta. Este material é propenso a acumular sujidade, afectando a lisura da superfície.
- Não foi possível retirar conclusões efectivas acerca de que maneira os efeitos do tamanho e da forma da área de recolha influenciam a precisão dos resultados. Da comparação entre o CTH (0,032 m²) e o TUE-I (0,5 m²), não se consegue extrair nenhuma conclusão, dado a diferença entre os princípios de funcionamento de cada aparelho. Igualmente as correlações analisadas não apontam em nenhuma direcção conclusiva sobre este assunto.
- Comparando apenas os aparelhos TUE-I e TUE-II são visíveis os benefícios provenientes da adopção de um limpador de superfície, sendo o segundo muito mais eficaz.
- Se forem considerados intervalos temporais largamente inferiores aos do ensaio, como por exemplo intervalos de 20 minutos, as respostas dos equipamentos evidenciam desvios significativos. Esta consideração é especialmente válida para o equipamento CTH. O seu reservatório basculante, introduz erros consideráveis. Os autores deixam a recomendação que para ensaios com intervalos de tempo reduzidos, sejam usados dispositivos de medição contínua ao invés dos reservatórios basculantes.
- Tendo em conta todos os aspectos, os autores apontam o aparelho TUE-II como sendo o mais equilibrado e mais preciso. Possui uma boa resolução para intervalos de 10 minutos, o limpador de superfície permite manter a superfície do colector limpa e força as gotas a escorrerem, mais ainda indicam que é pouco sensível aos efeitos do vento.

Ponderados todos os aspectos resultantes do ensaio, o aparelho TUE-II é reconhecido pelos autores como aquele que produz resultados mais fiáveis. Possui uma boa resolução para intervalos de tempo

curtos (como por exemplo períodos de 10 minutos), factor onde como foi referido anteriormente, o aparelho CTH se revela inadequado, consequência do seu princípio de medição. O limpador de superfície do TUE-II mantém a superfície limpa e força as gotas de água a escorrerem e serem conduzidas ao reservatório, reduzindo desta forma as perdas por evaporação.

Tendo em conta os ensaios experimentais com pluviómetros de superfície, Straube e Burnett [55] elaboraram diagramas de chuva incidente em fachadas compilando resultados dos seguintes investigadores: Schwarz, Frank, Sandin, Flori, Henriques, Kuenzel, Blocken e Incelet. Estes diagramas (Figura 3.8 e Figura 3.9) foram elaborados tendo em conta os trabalhos executados pelos investigadores acima referidos. Os valores são apresentados segundo um esquema de curvas isóbaras. Estes dados são denominados por “Rain Deposition Factor” (RDF) e são parte integrante do método SB, que será explicado em mais detalhe no ponto 4.4.

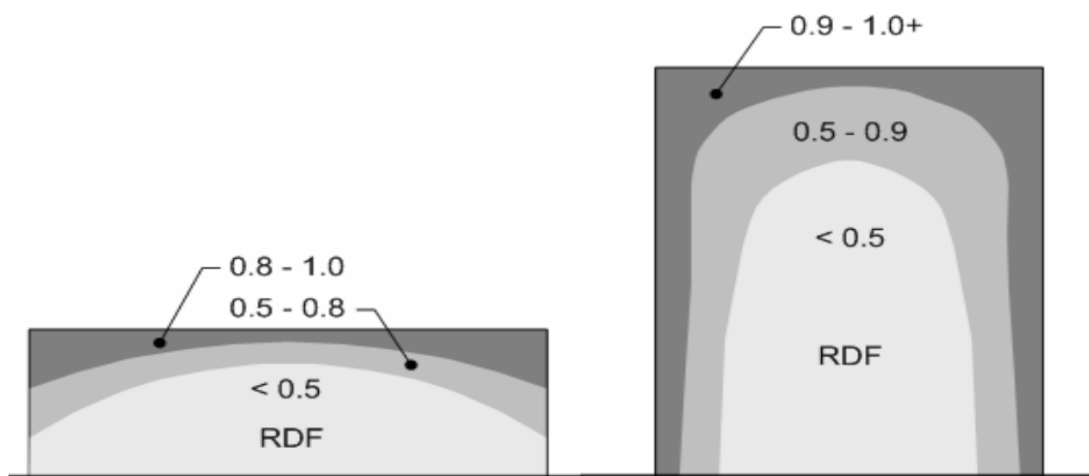


Figura 3.8 - Valores de RDF para edifícios com altura muito inferior ao comprimento e altura muito superior ao comprimento [7]

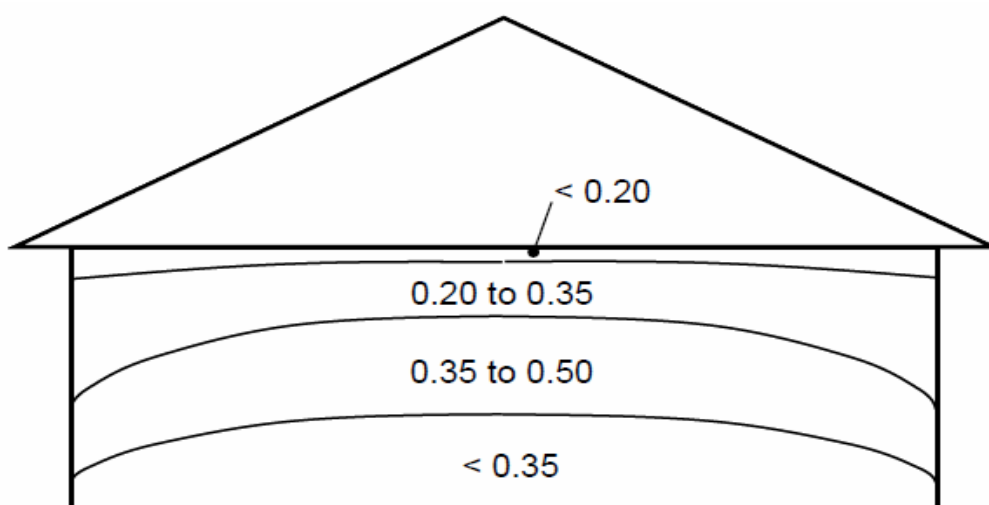


Figura 3.9 - Valores de RDF para edifícios com cobertura inclinada [7]

É visível que os topos e as bordas dos edifícios apresentam índices muito superiores ($0.8 < RDF < 1.0$) aos das restantes zonas. Em áreas de pequena dimensão com geometrias complexas o valor de RDF poderá exceder largamente a unidade. A excepção a este facto são os edifícios com coberturas inclinadas que apresentam um RDF com ordem de grandeza muito inferior. A explicação desta ocorrência reside no aspecto de as coberturas inclinadas provocarem um redireccionamento do fluxo de vento num sentido ascendente, afastando portanto a chuva da fachada, de onde ressalta o efeito benéfico da adopção deste tipo de solução construtiva.

3.3 Pluviómetros com sensor de pressão - Pluviómetro da Universidade Católica de Leuven (KUL)

Aproveitando o estudo comparativo realizado por Hogberg *et al* [40], Blocken e Carmeliet [16] apresentaram como nova proposta um aparelho tendo em vista os resultados do ensaio comparativo de Hogberg. Este aparelho, designado por KUL (Figura 3.10), foi elaborado em polimetil-metacrilato (PMMA) possuindo uma área de recolha de $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$.



Figura 3.10 - Aparelho KUL [16]

Este dispositivo foi elaborado com especificações bastante distintas dos anteriores, em primeiro lugar os reservatórios de armazenamento encontravam-se no interior do edifício, limitando desta forma de sobremaneira os riscos de danos nos reservatórios derivados da acção do gelo. Ao invés do mecanismo de medição sustentado em recipientes basculantes, os investigadores optaram por equipar os aparelhos com sensores de pressão (Figura 3.11) para efectuarem a medição do nível de água. A adopção destes tipos de mecanismos, para além de acarretar vantagens económicas, um sensor de pressão pode custar entre metade a um quarto menos que um recipiente basculante, permitem ainda medições de forma contínua e elevada resolução temporal. Como contrapartida foi apenas mencionada alguma perturbação ao nível do sinal recolhido pelos sensores provocado pelo impacto da queda das gotas do tubo de drenagem para o reservatório.

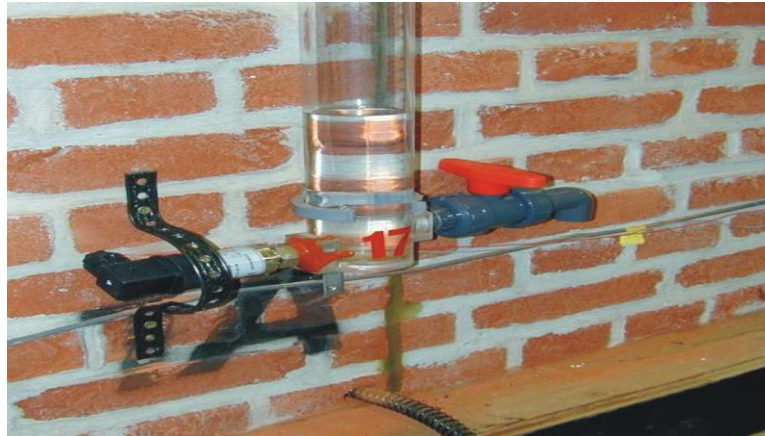


Figura 3.11 - Reservatório equipado com sensor de pressão [16]

3.4 Estudo experimental sobre água aderente numa superfície vertical em PMMA

Um dos principais erros presentes em qualquer estudo sobre chuva incidente é o fenómeno de evaporação da água que adere às paredes dos reservatórios dos pluviómetros. Durante e após uma ocorrência de um evento de chuva incidente existe sempre uma fracção da precipitação que permanece por quantificar, é geralmente proveniente da água que fica aderente às paredes da área de recolha dos instrumentos de medição. Como efeito agravante existe ainda a evaporação dessa mesma água. Por forma a adquirir mais conhecimentos sobre estes fenómenos ainda pouco estudados, Blocken e Carmeliet [13] efectuaram um estudo numérico sobre este problema.

O trabalho baseou-se na elaboração de uma simulação simplificada do comportamento de gotas de chuva após o seu impacto numa superfície vertical, lisa e impermeável (superfície de recolha). O método consistiu em dividir uma vasta área de colecção em pequenos quadrados de reduzida área, tendo posteriormente os autores procedido a uma análise de Monte-Carlo aos resultados. Para este fim cada gota de chuva incidente é afectada a um determinado quadrado (foram desprezados efeitos provenientes de salpicos). Quando uma gota de água atinge a superfície vertical espalha-se formando uma gota pendente da superfície com diâmetro de base d_{SPD} . Com a evolução do processo de simulação, outras gotas incidirão na superfície; sempre que uma gota incide num quadrado já ocupado por outra, as duas juntam-se sendo contabilizado o seu volume conjunto. Quando é atingido um dado volume as gotas escorrem pela área de colecção, consequentemente lavando-a parcialmente e arrastando outras gotas pendentes no seu caminho. Neste trajecto até ao reservatório as gotas deixam um subtil rasto de pequenas gotas. O volume de água que escorre é então adicionado ao reservatório e denominado como chuva incidente recolhida. Todas as restantes gotas que ficaram aderentes à superfície são designadas como água aderente. O volume total das gotas que foram assignadas aos quadrados é denominado chuva incidente infligida. Para se poder proceder à simulação, os autores definiram empiricamente alguns parâmetros:

1. O tamanho dos quadrados (A_{area}), correspondentes a uma área de 5 x 5 mm.
2. Diâmetros das gotas impactantes (d), todas as gotas incidentes na superfície possuem um diâmetro de 1 mm, valor controlado experimentalmente.
3. Volume de escorrência (V_{limite}) e diâmetro limite de base (d_{limite}).
4. Relação entre o diâmetro limite de base (d_{limite}) e o valor limite do volume da gota pendente (V_{limite}).

5. Diâmetro de base das gotas de rasto (d_{rasto}).
6. Espaçamento entre as gotas de rasto (S_{rasto}).
7. Relação entre d_{rasto} e V_{rasto} .
8. A relação entre V_{limite} e d_{limite} é dada pela expressão:
$$V_{\text{limite}} = \frac{\pi(d_{\text{rasto}})^3}{18}$$
9. A relação entre d_{rasto} e V_{rasto} é dada pela expressão:
$$V_{\text{rasto}} = \frac{\pi(d_{\text{rasto}})^3}{12}$$

Os testes foram conduzidos borrifando as gotas de água numa superfície vertical em PMMA, usando um borrifador de plantas, verificaram-se as seguintes observações:

- O limite da base de uma gota na iminência de escorrer é praticamente constante (4-5mm).
- Quando ocorre a escorrência, a gota segue um caminho a direito no sentido descendente, recolhendo as gotas no seu caminho e deixando um rasto.
- O d_{rasto} e o espaçamento entre as gotas (S_{rasto}) apresentam valores praticamente fixos, respectivamente de 1mm e 8-10mm.

As últimas duas relações resultam de observações visuais e constituem apenas estimativas.

A Figura 3.12 ilustra os resultados obtidos no ensaio onde se adopta os parâmetros acima referidos. Como é expectável os valores de chuva incidente infligida são sempre superiores aos demais. Como dado relevante acrescenta-se que ao valor limite de 0,12 mm de chuva incidente acumulada, toda a água se constitui como ficando aderente à superfície, não se registando valores de chuva incidente que tenham sido efectivamente medidos. Para valores superiores a esse limite o valor de água aderente segue uma tendência de estabilização que se baliza entre os 0,05 e os 0,08 mm. Os autores salientam como limitação ao ensaio alguns factores, como apenas se ter tido em conta um tipo de material e apenas uma configuração de diâmetro do orifício do borrifador.

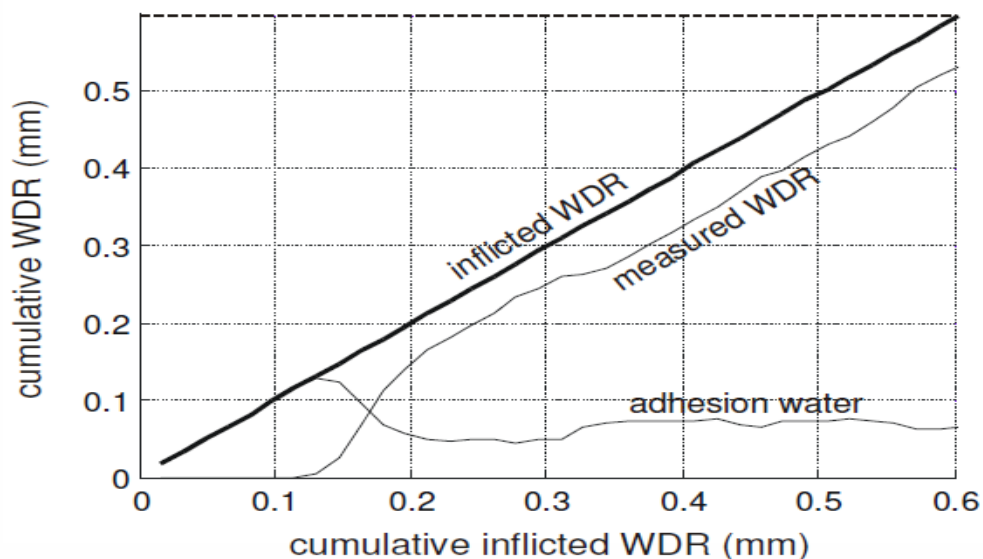


Figura 3.12 - Comparação entre quantidades acumuladas, para chuva incidente infligida, efectivamente medida e água aderente [13]

3.5 Análise da relação entre água aderente e o tipo de material em que incide

Os mesmos autores do ensaio descrito no ponto anterior, levaram a cabo uma análise comparativa sobre o comportamento da água aderente numa superfície vertical em função do tipo de material em que esta incide [17]. Os materiais eleitos para análise foram: policloreto de vinil (PVC), PMMA, politetrafluoretileno (PTFE) conhecido pelo nome comercial teflon, vidro corrente (vidro 1), vidro com revestimento hidrofólio (vidro 2) e vidro com revestimento hidrófugo (vidro 3). Estes materiais foram escolhidos por possuírem propriedades distintas. Foram também medidos os diversos ângulos de contacto das gotas com as superfícies.

Cada placa foi sujeita pelos experimentadores a 30 ciclos de borrifos, com água da torneira. Em cada ciclo prolongaram-se os borrifos até se acumular uma apreciável quantidade de água no reservatório, proveniente da água escorrida na superfície vertical. Os experimentadores optaram pela adopção deste procedimento dado que elimina o parâmetro diâmetro da gota. Vários ensaios foram efectuados regulando o orifício do borrifador para diferentes diâmetros, tendo sido obtidos resultados que permitem afastar a relevância da influência do parâmetro d . Após cada ciclo a placa de superfície vertical foi pesada e registada a quantidade de água aderente (AA). Durante a realização do ensaio os autores procuraram explorar também a importância do ângulo de contacto das gotas de água com a superfície, como factor relevante para o fenómeno da água aderente. Desta forma estes ângulos foram medidos com recurso à técnica óptica, que consiste em colocar uma gota de tamanho ínfimo (aproximadamente $1\mu\text{L}$) numa superfície vertical e posteriormente apurado o seu ângulo de contacto com recurso a imagens foto-visuais [58]. Um sumário com alguns dos resultados mais relevantes obtidos pelos experimentadores é apresentado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Ângulos de contacto e valores totais de água aderente para 6 tipos de materiais

	PVC	PMMA	PTFE	Vidro 1	Vidro 2	Vidro 3
Ângulo de contacto (°)	93,5	100	101,9	24,9	14,5	106,6
Água aderente (mm ou L/mm ²)	0,07	0,06	0,1	0,03	0,03	0,1

Relativamente aos resultados obtidos os investigadores apontam para o facto de não haver diferenças significativas entre os ângulos de contacto do PVC, PMMA e PTFE. São os três superiores a 90° , configurando portanto materiais com comportamento tipo hidrofóbico. Existem algumas diferenças ao nível da água aderente. As placas de vidro 1 e 2 apresentam comportamento hidrofólio, possuem ângulos de contacto substancialmente diferentes mas a mesma quantidade de água aderente. As maiores quantidades de água aderente encontram-se no material PTFE e na placa de vidro 3 (material hidrófugo).

As conclusões dos investigadores apontam em três direcções principais:

- As medições dos ângulos de contacto das gotas não fornecem indicações orientadoras acerca da quantidade de água aderente numa superfície vertical, ficando esta situação a dever-se a factores que se podem prender com fenómenos de coagulação, que promovem a junção das gotas, desvirtuando consequentemente a natureza dos resultados.

- Em ensaios anteriores tinha sido usado o material PTFE, conhecido pela sua natureza hidrófuga. Onde seria expectável que materiais dessa natureza promovessem a escorrência, a prática experimental demonstrou um efeito oposto.
- As superfícies com acabamento em PMMA e PVC, vidro 1 e vidro 2 retêm muito menos água aderente. É aconselhável o emprego destes materiais para áreas de recolha na construção de aparelhos de medição de chuva incidente.

3.6 Ensaio Experimental- Medição de chuva incidente com alta resolução. Eventos cumuliformes versus eventos estratiformes.

No laboratório de física da KUL, decorreu um ensaio pioneiro por Blocken e Carmeliet [16] dado ter sido a primeira tentativa de obtenção de um padrão de molhagem com elevado índice de resolução. Futuramente estes dados seriam usados em estudos de validação de modelos sobre chuva incidente. Adicionalmente foi feita uma distinção entre eventos de precipitação cumuliformes e estratiformes, fenómenos meteorológicos cujos traços gerais se apresentam de seguida.

Eventos cumuliformes- Cúmulos são nuvens densas que se formam em ar instável e sobretudo na baixa troposfera e que surgem em blocos isolados ou agrupados. Quando crescem verticalmente em pilha (cumulus em latim) até grandes alturas assinalam trovoadas e tempestades. As nuvens cumulus formam-se nas regiões das correntes ascendentes. O tipo de precipitação usualmente produzido por estes eventos é vulgarmente denominado por aguaceiros. Iniciam-se e cessam de forma abrupta sendo caracterizados pela sua curta duração.

Eventos estratiformes- Estratos são nuvens de aspecto estratificado que cobrem largas faixas horizontais do céu. Formam-se sobretudo na baixa troposfera em ar estável. Estão associados a precipitação fraca ou moderada, podendo também ser acompanhados de outras partículas como flocos de neve. Este tipo de eventos pode estender a sua duração por várias horas.

Dada a distinta natureza dos dois eventos, envolvendo tipos de acontecimentos meteorológicos muito díspares, é compreensível a separação dos dois casos.

O edifício VLIET-HAMTIE K20, usado para o ensaio é constituído por 2 módulos principais, um de cobertura plana e outro com cobertura inclinada, intervalados por um módulo em terraço (Figura 3.13).

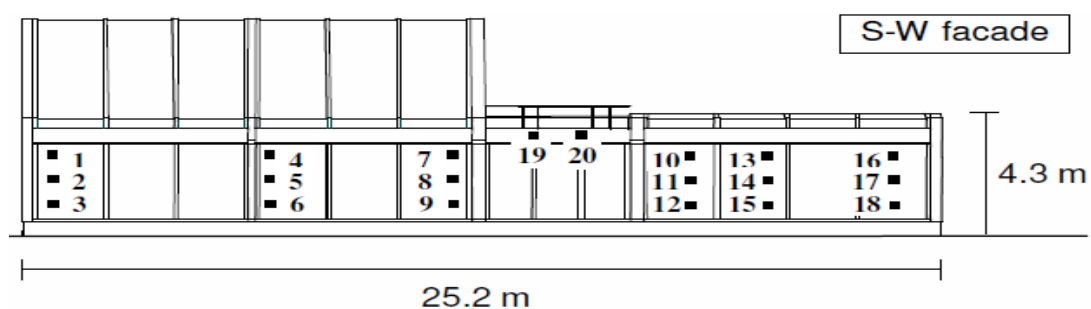


Figura 3.13 - Esquema de colocação dos pluviómetros na fachada de Sudoeste [16]

Em termos de equipamento de medição, foi montado um poste meteorológico equipado com 3 anemómetros de concha, 1 anemómetro ultra-sónico, 1 udómetro de capacitância com auto-sifonagem e 24 aparelhos tipo KUL (20 na fachada sudoeste e 4 na parede orientada a noroeste). Os resultados foram inconclusivos quanto à influência da natureza dos fenómenos meteorológicos sobre as quantidades de chuva incidente recolhidas.

3.7 Recomendações para a construção e operação de pluviómetros

Tendo por base trabalhos efectuados pela Technical University of Eindhoven (TUE), Chalmers University of Technology (CTH) e a Technical University of Denmark (TUD), Blocken e Carmeliet [13] elaboraram um conjunto de linhas orientadoras abrangendo recomendações construtivas para aparelhos medidores de chuva incidente, pluviómetros. Contam-se entre elas as seguintes:

1. Limitar a quantidade de água aderente na área de recolha, este efeito pode ser conseguido recorrendo às seguintes disposições construtivas: construir aparelhos equipados com limpador de superfície (aparelho TUE II); escolher um material de acabamento superficial adequado, conforme concluído nos ensaios anteriormente descritos é preferível a utilização do material folha de vidro plana em detrimento do PMMA e do PVC. A aplicação de PTFE conduz a resultados distorcidos da realidade, pelo que o seu uso deve ser abandonado.
2. Perdas por evaporação a partir do reservatório podem ser minimizadas, assegurando que haja um mínimo possível de exposição da superfície de água ao ar. Menor superfície de contacto conduz necessariamente a uma menor evaporação. Semelhantes resultados podem ser conseguidos restringindo a ventilação no reservatório, bem como adicionando regularmente algumas gotas de óleo no reservatório.
3. Nas circunstâncias em que seja possível, a água proveniente da chuva deve ser direccionada para reservatórios colocados dentro da parede interior dos edifícios. Esta medida tem por objectivo evitar danos de congelamento nos depósitos, situação particularmente frequente durante os meses frios e em países de clima nórdico. Igualmente a adopção de depósitos interiores ao edifício traz a vantagem de se mitigar perdas de evaporação por aquecimento proveniente da radiação solar.
4. Assegurar uma boa drenagem do tubo de escoamento para o reservatório. Este tubo deve ser executado prevendo a menor extensão possível e ser executado com materiais que minimizem os efeitos da água aderente.
5. Limitar a altura das extremidades do aparelho por forma a minorar os erros provocados pelo vento, perturbações causadas pelo fluxo do mesmo em torno do aparelho.

3.8 Recomendações para recolher com precisão dados sobre chuva incidente

Fundamentando-se nos mesmos estudos mencionados no ponto anterior, Blocken e Carmeliet [16] deixam também algumas instruções de boas práticas, sobre como se deve proceder relativamente a um ensaio experimental de chuva incidente e respectivo tratamento dos dados obtidos. São elas:

1. Medir a evaporação no reservatório de recolha e na posse destes dados introduzir um factor de correcção que traduza adequadamente este fenómeno.
2. Fazer os ensaios com períodos de chuva durante os quais a direcção do vento seja predominantemente perpendicular à fachada em estudo.

3. Fazer uma estimativa das possíveis perdas por evaporação para a situação meteorológica em estudo. Se estes erros forem de tal forma expressivos e não puderem ser atenuados deverá proceder-se a novos ensaios.
4. Seleccionar para efeitos de quantificação experimental, apenas os eventos durante os quais os efeitos advenientes de fenómenos de salpicos sejam diminutos. Usualmente estas condições verificam-se para velocidades de referência do vento U_{10} inferiores a 10 m/s e para intensidades de precipitação horizontal a que corresponda uma baixa probabilidade de gotas de grande diâmetro, $R_h < 20$ mm/h.
5. Estimar o erro provocado pela água aderente, usualmente este erro pode ser estimado admitindo que toda esta água foi evaporada após cada interrupção de queda de chuva, neste caso o erro está a ser majorado, sendo portanto uma solução de cariz conservativo.

3.9 Simulação de chuva incidente em túneis de vento

Os testes em túneis de vento assumiram nas duas últimas décadas um papel de contribuição assinalável para a compreensão e estudo da aerodinâmica dos edifícios. Particularmente no que respeita ao tema da chuva incidente, existem dois factores de crítica importância para a execução deste tipo de testes dinâmicos. O primeiro prende-se com a avaliação da pressão de teste requerida para o mecanismo de spray. De acordo com Baskaran e Brown [2] esta pressão deve estar balizada entre os 137 e os 700 Pa. A outra questão relevante prende-se com a quantificação da água a usar no ensaio que adequadamente consiga representar a chuva incidente no edifício. Para efeitos de testes em estanquidade de janelas, Baskaran e Brown [2] apontam o valor mínimo de $3,4$ l/min/m², que se traduz numa precipitação equivalente a 200 mm/h.

À data da realização desta dissertação apenas se conhecem 4 ensaios em túneis de vento com relevância e de interesse académico. O primeiro foi realizado por Inculet e Surry [42] no Boundary Layer Wind Tunnel (BLWT) no Canadá em 1994. Para o efeito construíram um modelo à escala 1/64 que foi colocado no túnel de vento. O problema crítico neste tipo de ensaios é determinar a chuva incidente que efectivamente atinge o modelo. Para o efeito existem duas técnicas disponíveis, a do sensor electrostático de que não se dispõem de informação detalhada, e a do papel sensível à água, adoptada por Inculet e também por Rousseau [54] no seu ensaio. Este último procedimento consiste em revestir todo o modelo com este papel. A chuva incidente deixará uma marca no papel, obtendo-se desta forma uma mancha visual elucidativa acerca do padrão de molhagem do modelo. Inculet e Surry [42] apontam algumas limitações a este modelo de análise que se prendem com o dispêndio de tempo e de mão-de-obra para fazer a contagem e a seriação das marcas no papel, conduzindo a que não seja possível a realização de baterias de testes. Igualmente referem problemas relacionados com a dificuldade de obtenção de uma distribuição espacial uniforme do regime de precipitação criado artificialmente por um conjunto de borrifadores.

Também com recurso ao túnel de vento BLWT, Rousseau e a sua equipa [54] dão seguimento à experiência de Inculet. Este projecto teve como principal objectivo estudar os padrões de molhagem em edifícios, bem como analisar os efeitos de diversos tipos de características arquitectónicas sobre esses padrões de molhagem. Foi construído um modelo de um edifício de 18 andares à escala 1/64, com núcleo executado em madeira e revestido a espuma. As paredes exteriores em alvenaria foram revestidas com o mesmo papel da experiência de Inculet. Também neste caso a análise quantitativa baseou-se em dimensionar as manchas causadas pela chuva e determinar o volume por estas ocupadas. Dada a especificidade do ensaio os experimentadores tiveram de assegurar que as gotas de

água não se evaporavam antes de atingir o edifício e que o espalhamento lateral das gotas fosse adequado a diferentes níveis da velocidade do vento. Para tal conceberam um sistema de borrifadores equipados com válvulas que permitiam uma manobra quase instantânea de encerramento do processo. Desta forma garantiram um maior controlo sobre a duração dos testes e prevenindo perturbações ao nível das dimensões das gotas. Por forma a apurar o rigor científico do projecto os autores estabeleceram os seguintes critérios experimentais:

- A duração dos testes foi comandada pela área mais molhada do modelo, assim que as manchas individuais se tornassem indetectáveis o teste era finalizado.
- Os ensaios foram realizados para 3 diferentes velocidades do vento: 4,8; 12,0 e 18,4 m/s.
- Modelo simulado a orientações de 0°, 45° e 90° em relação à direcção vento. Os 0° configuram a situação em que a maior dimensão do modelo está do lado do fluxo de vento.

As seguintes observações foram extraídas:

- Para o ângulo de orientação correspondente a 0°, os cantos superiores apresentaram mais chuva incidente, seguidas pelas bordas superiores e laterais do modelo.
- Verificou-se uma tendência para o incremento de chuva incidente no centro da fachada relativamente aos bordos quando houve incremento para o segundo patamar de velocidade do vento. Esta tendência não foi confirmada para o último nível.
- Tendência regressiva para a molhagem de uma fachada à medida que esta deixa de estar exposta à direcção predominante do vento.

3.9.1 Estudo dos efeitos dos detalhes arquitectónicos sobre os padrões de molhagem

Os ensaios de Rousseau [54] envolveram ainda algumas experiências com diferentes tipos de detalhes arquitectónicos a fim de aquilatar sobre as variações no padrão de molhagem obtido. Foram testados três tipos de detalhes arquitectónicos, sendo eles:

Cornijas - Foram modeladas duas cornijas, uma com profundidade de 2 m e outra com 1 m. Os ensaios revelaram um bom desempenho na protecção em toda a área directamente abaixo das cornijas a toda a largura do edifício, adicionalmente revelaram ser eficientes nas zonas angulosas. O padrão de molhagem para um modelo equipado com cornijas revelou-se idêntico ao dos modelos sem este detalhe arquitectónico, com as regiões interiores das faces a receberem a mesma incidência de chuva. As próprias cornijas encontravam-se molhadas num padrão muito semelhante ao do restante edifício.

Cobertura de duas águas - Ao modelo foi acrescentada uma cobertura de duas águas com ângulo de 45°. Esta cobertura tem um impacto benéfico sobre a incidência de chuva na face exposta ao vento (barlavento), uma vez mais o seu desempenho supera o do modelo inicial mas revela-se inferior ao uso de uma cornija. A face exposta ao vento da cobertura recebeu quantidades apreciáveis de chuva incidente, enquanto a face abrigada do vento (sotavento) manteve-se relativamente molhada perto do topo e progressivamente mais molhada na base. A zona da cumeeira permaneceu seca.

Edifício com forma cilíndrica - Quando foi testada uma construção circular, verificou-se que o bordo de barlavento topo, a cerca de 45 graus de cada lado do eixo recebeu o maior impacto de chuva, seguido pelo eixo de barlavento.

3.9.2 Ensaio no túnel de vento Jules Verne em Nantes

Blocken e a sua equipa [18] usaram um edifício de teste com dimensões 2 x 3 x 2 m equipados com pluviómetros de superfície instalados em 2 lados do modelo. Ao invés dos dois ensaios anteriores que apenas visavam obter uma dimensão gráfica dos padrões de molhagem, neste caso foi utilizada uma abordagem de carácter mais conservador no que aos métodos experimentais diz respeito. O edifício foi testado com 3 configurações de coberturas diferentes: cobertura plana, cobertura de duas águas (Figura 3.14) e uma cobertura plana incluindo uma pala. A medição da velocidade do vento foi registada com recurso a um anemómetro ultra-sónico. O equipamento usado para o registo da precipitação em superfície horizontal foi um disdrómetro e aparelhos de recipiente basculante. A chuva incidente foi medida utilizando os aparelhos da Universidade Católica de Leuven (KUL) que já foram mencionados em pontos anteriores. Foram igualmente experimentados os aparelhos CTH, TUE-II e um aparelho de forma ovalada produzido pelo CSTB Nantes (Figura 3.15). Os testes confirmaram um superior desempenho por parte do aparelho TUE-II confirmando os resultados obtidos por Hogberg [40].



Figura 3.14 - Edifício de teste com cobertura de duas águas [18]



Figura 3.15 - Pluviómetro produzido pelo CSTB Nantes (ao centro) [18]

4 MÉTODOS SEMI-EMPRÍRICOS

4.1 Revisão histórica e fundamentos

Os métodos semi-empíricos surgem no seguimento dos métodos experimentais. Dado que é fisicamente impossível fazer medições experimentais para cada localização, surgiu a necessidade de encontrar uma forma de quantificação mais abrangente e padronizada. Ainda que bastante restritivos no seu âmbito os métodos experimentais tiveram uma contribuição importante, muitos dos coeficientes actualmente utilizados nos métodos semi-empíricos encontram origem nos métodos experimentais. Existem presentemente duas correntes principais de investigação, o modelo preconizado por Straube & Burnett (SB) e a norma ISO 15927-3, sendo esta última o corolário das antecedentes DD93 e BS8104.

No âmbito desta dissertação interessa identificar e descrever os métodos tidos como mais avançados, que são aplicáveis ao caso da quantificação da chuva incidente em paredes, sem perder de vista algum do processo evolutivo e novas abordagens de cálculo que foram propostas ao longo dos anos. São igualmente apontados aspectos comparativos e pontos de contacto/distinção entre a ISO e o modelo SB.

Importa pois apresentar uma breve cronologia da evolução deste método assinalando os trabalhos mais relevantes.

Em 1955 Hoppestad [41] inicia o seu trabalho pioneiro criando o primeiro mapa de chuva incidente (índice de chuva incidente) na Noruega. Este índice não era mais que o produto da velocidade média do vento pela quantidade de chuva anual. Quando multiplicado pelo coeficiente de chuva incidente traduz a chuva incidente num plano vertical. Adicionalmente propôs a primeira expressão para o cálculo da intensidade da chuva incidente (4.1):

$$R_{wdr} = K.U.R_h \quad (4.1)$$

- R_{wdr} Intensidade de chuva incidente (L/m^2 ou mm/h);
 K Coeficiente de chuva incidente;
 U Velocidade do vento (m/s);
 R_h Intensidade da chuva em superfície horizontal (L/m^2 ou mm/h).

Hoppestad calculou ainda alguns valores de K nas seguintes cidades: 0,130 (Oslo), 0,188 (Bergen), 0,221 (Trondheim) e 0,148 (Tromso).

Em 1962 Lacy e Shellard [48] melhoram a equação de Hoppestad introduzindo factores como o tamanho médio das gotas de água como função da intensidade da precipitação horizontal e a inclusão do factor de velocidade terminal dessas gotas.

$$R_{wdr} = 0.222.U.R_h^{0.88} \quad (4.2)$$

- R_{wdr} Intensidade de chuva incidente (L/m^2h ou mm/h);
 U Velocidade do vento (m/s);
 R_h Intensidade da chuva em superfície horizontal (L/m^2 ou mm/h).

e introduzem um método de cálculo para obtenção de um índice chuva incidente nas ilhas britânicas.

$$DRI = \frac{V.P}{100} \quad (4.3)$$

DRI Índice de chuva incidente (m²/s);
V Velocidade média anual do vento (m/s);
P Total de precipitação anual (mm).

A título de exemplo Lacy [48] estimou que 1 mm de chuva incidente em superfície vertical equivale a 206 unidades de DRI. Mais tardiamente Henriques [39] indicou uma correspondência de 90 l/m² a corresponder a uma unidade de DRI se recolhida em superfície vertical, ou a 150 l/m² se for recolhida por um pluviómetro em campo aberto.

Salienta-se o cálculo para o coeficiente médio de chuva incidente, tendo tido sido apurado o valor de 0.222. Valor em consonância com os anteriormente determinados por Hoppestad. Mais tardiamente surgiu a primeira fórmula tendo em conta os fenómenos locais, incluindo o factor direcção do vento, passando o coeficiente de chuva incidente a ser designado por α . Este coeficiente tem em conta o efeito do edifício, de obstruções nas imediações e a posição na fachada, esta é considerada a equação definidora da relação de chuva incidente em edifícios

$$R_{wdr} = \alpha.U.R_h \cdot \cos \theta \quad (4.4)$$

R_{wdr} Intensidade de chuva incidente (L/m² ou mm/h);
 α Coeficiente de chuva incidente;
U Velocidade do vento (m/s);
R_h Intensidade da chuva em superfície horizontal (L/m² ou mm/h);
 θ Ângulo entre a direcção do vento e a normal à fachada.

onde θ representa o ângulo entre a direcção do vento e a normal à fachada. A adição de $\cos \theta$ é denominada método da projecção do cosseno, conceito aplicado tanto na norma ISO como no modelo de SB. Acerca deste método Blocken e Carmeliet [14] levaram a cabo um estudo de validação chegando à conclusão do que o mesmo não reúne as condições necessárias para a sua validação. No capítulo 5 será abordado este tema em maior detalhe.

Em 1966 numa revisão crítica ao índice das ilhas britânicas, Kuenzel [11] aponta que o mesmo tem pouca aplicabilidade fora destes territórios. São igualmente destacadas mais algumas limitações ao índice e à fórmula de cálculo: uso de apenas médias de longa duração (valores anuais de vento e de precipitação); o facto de o índice apenas se reportar a precipitação em campo aberto, não contemplando factores relevantes como a topografia e geometria dos edifícios.

Os estudos sobre este tema em Portugal tiveram origem nos trabalhos pioneiros de J.V. Paiva [53] que em 1969 elaborou aquele que é até hoje o único zonamento climático do território nacional, seguindo uma metodologia de divisão do país em classes de severidade de exposição, Para o efeito o investigador calculou os índices de severidade através dos somatórios dos produtos da intensidade de precipitação pela velocidade do vento, fundamentado em médias mensais para o período compreendido entre 1931 e 1960.

Em 1984 surge o primeiro trabalho realmente consistente sob a forma da norma DD 93 [23], baseado nos trabalhos anteriores de Lacy e Shellard. Este documento introduz pela primeira vez coeficientes semi-empíricos e estará na génese da posterior BS8104 “Code of Practice for assessing exposure of walls to wind driven rain” [24]. Este documento foi posteriormente convertido em 1997 num projecto de norma europeia pr-EN 13013-3 [35]. Em 2009 surge já a norma ISO 15927-3 [43], que está ainda

em vigor. Paralelamente à norma ISO e operando em moldes semelhantes encontra-se o método desenvolvido por Straube & Burnett (Método SB) O Quadro 4.1 apresenta um sumário para todos os países, e respectivos autores, onde até à actualidade foram já elaborados índices de chuva incidente.

Quadro 4.1 - Países e respectivos autores que possuem mapas de chuva incidente

País	Autores e data de publicação
Noruega	Hoppestad (1955)
Dinamarca	Jessing (1959,1966)
Reino Unido	Lacy,Shellard (1962)
Canadá	Boyd(1966)
Polónia	Blociszewski (1966)
Roménia	Jansen e Marm (1966)
Espanha	Avendano(1966)
Suécia	Varnbo (1966), Jarmark (1968)
Ex RFA	Caspar (1966)
Ex RDA	Eichler (1970)
EX USSR	Shver (1971)
EUA	Grimm (1982), Underwood (1998)
Portugal	Henriques (1992)
China	Sauer (1987)
Índia	Chand e Bhargava (2002)
Brasil	Lima e Morelli (2005)
Nigéria	F.O.A. Akingbade (2008)
Irlanda	S.Walsh (2010)

Destaca-se como mais relevante o trabalho pioneiro de Hoppestad na Noruega, que produziu o primeiro índice de chuva incidente [41]. Igualmente importantes foram as contribuições de Lacy e Shellard, a quem se deve muitos dos progressos sobre este tema. Salienta-se o caso do índice português desenvolvido por Henriques. Nesta dissertação será apresentado o caso brasileiro e a contribuição de Chand e Bhargava sobre um novo sistema de classificação de graus de severidade à exposição dos edifícios, que foi adoptado para o índice indiano.

A determinação do coeficiente α revelava-se como a pedra de toque do método semi-empírico. Globalmente este valor era obtido por métodos experimentais a partir de medições horárias da

velocidade do vento, direcção do vento, precipitação horizontal e chuva incidente para uma dada posição na fachada do edifício (que configura um dado ângulo θ). O produto destes factores é depois introduzido num gráfico e efectuada uma regressão linear para encontrar o declive da recta que melhor traduz os valores [16].

4.2 Índice de chuva incidente. Caso brasileiro.

O DRI tem como objectivos principais fornecer indicações preliminares para engenheiros e arquitectos sobre o grau de severidade meteorológica a que uma dada edificação estará exposta. Encontra igualmente finalidade para enquadrar procedimentos experimentais acerca das condições que devem ser simuladas sobre um modelo de teste para reproduzir adequadamente o meio em que se insere.

Em 2005 foi concluído no Brasil, o primeiro mapa de chuva incidente (DRI) para o território por Lima e Morelli [49]. Este mapa (Figura 4.1) contém apenas informações relativas ao grau de exposição; sendo um estudo meramente qualitativo não possui informações de índices direccionais. É portanto um mapa de âmbito limitado, dado que apenas permite fazer uma avaliação dos riscos a que cada edificação está sujeita. Através da sua consulta pode inferir-se acerca do risco de infiltrações em fachadas e danos provocados por humidade. Para a elaboração do mapa foi adoptada a fórmula de Lacy (4.3) em conjunto com a tabela de classes de exposição propostas por Chand e Bargava (Quadro 4.2) e usadas no seu estudo para o território indiano [26].

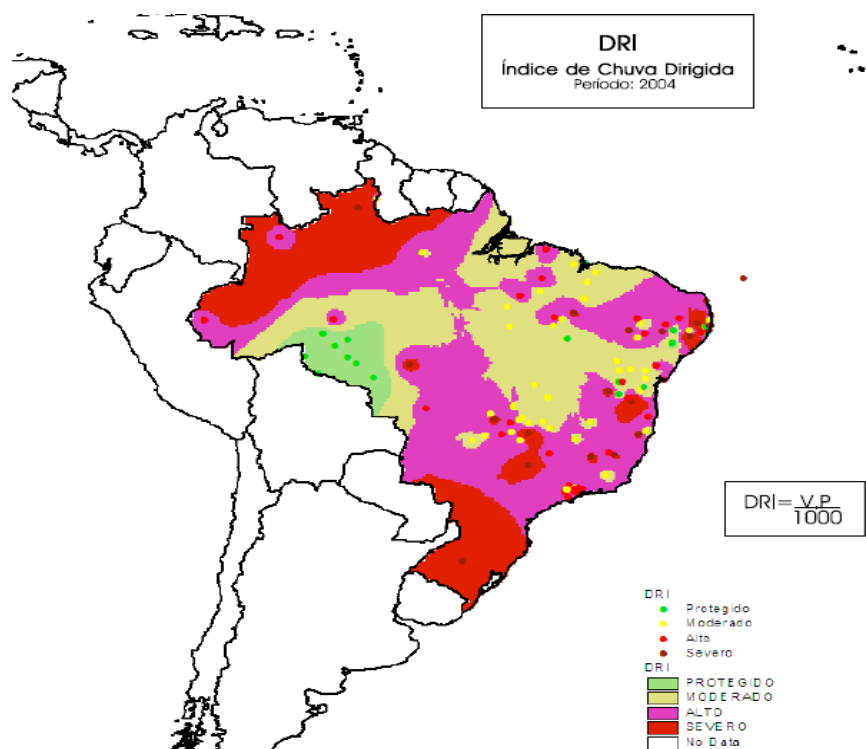


Figura 4.1 - Mapa brasileiro de chuva incidente [49]

Quadro 4.2 - Classes de severidade de exposição de Chand e Bhargava

Faixa	Grau de exposição
$DRI \leq 3m^2/s$	Protegida
$3m^2/s < DRI \leq 7m^2/s$	Moderada
$7m^2/s < DRI \leq 11m^2/s$	Alta
$DRI \leq 11m^2/s$	Severa

Em 2007, Giongo [36], apresenta o primeiro índice de chuva incidente para a cidade de Florianópolis, uma cidade localizada no litoral brasileiro. Adicionalmente levou a cabo uma comparação entre as tabelas de níveis de exposição (Quadro 4.3) de Lacy, Chand e Bhargava. Nesta comparação inclui ainda as recomendações feitas por Marsh [50]. Que apontam os seguintes factores a ter em conta: proximidade da costa, elevação do terreno, altura da edificação. Marsh propôs ainda que áreas com distâncias ao mar inferiores a 8km não devem ser avaliadas como exposição protegida. Numa primeira análise conclui-se que a inclusão das recomendações de Marsh, tanto na tabela de Lacy como na de Chand e Bhargava, agravam ou no melhor dos casos mantêm o nível de exposição. Aparentemente para efeitos de avaliação do risco de molhagem o uso da tabela de Chand e Bhargava com recomendações será o mais aconselhável, dado ser a que se encontra mais do lado da segurança.

Quadro 4.3 - Comparação entre tabelas de níveis de exposição entre Lacy e Chand e Bhargava, incluindo recomendações de Marsh

Índice de chuva incidente	Nível de exposição			
	Lacy	Chand e Bhargava	Lacy com recomendação	Chand e Bhargava com recomendação
$DRI \leq 3$	Protegido	Protegido	Moderado	Moderado
$3 < DRI \leq 5$	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
$5 < DRI \leq 7$	Moderado	Moderado	Severo	Alto
$7 < DRI \leq 11$	Severo	Alto	Severo	Severo
$DRI > 11$	Severo	Severo	Severo	Severo

Em 2011 foi publicado um índice direccional para a cidade de Goiânia, num trabalho efectuado por Carlos Mariano Melo Júnior [45], o método usado foi a fórmula de Lacy. Como método auxiliar à equação, o autor procedeu também ao levantamento de dados sobre casos de infiltração em fachadas de edifícios. Foram também recolhidos registos fotográficos de anomalias em fachadas com o intuito de se estabelecer a relação entre a chuva incidente e a densidade de anomalias nas fachadas.

4.3 Uma abordagem probabilística

A previsão e estimativa da deposição de chuva incidente em edifícios reveste-se de inúmeros obstáculos, entre eles a natureza estocástica do vento e da chuva, conjugada com variáveis tão díspares como a localização do edifício e a sua geometria. Acrescentam-se ainda factores de difícil quantificação como sendo a absorção por fenómenos de capilaridade e a própria drenagem da parede. Em 1998 Straube e Burnett [56] propõem um modelo probabilístico, tendo por objectivo o estudo da interacção entre o vento e a chuva. Estes dois elementos foram considerados como sendo estatisticamente independentes. O estudo envolveu três partes principais, sendo que a última por sair fora do âmbito desta dissertação não será mencionada.

4.3.1 Interação entre a precipitação e o vento

A velocidade média horária do vento configura uma distribuição normal logarítmica com valores estatísticos bem documentados. Contudo para intervalos de tempo reduzidos a velocidade do vento assume um comportamento aleatório. Partindo de informações existentes na forma de distribuições de probabilidades da velocidade do vento, estes dados foram transformadas do domínio temporal para o domínio da frequência. Ao executar este procedimento o comportamento do vento resulta numa distribuição bem definida que é apenas função da velocidade do vento e do tipo de terreno. O resultado desta secção do estudo encontra-se na Figura 4.2, onde $S_{wind}(f)$ representa a função da densidade espectral do vento e é apresentada a distribuição da probabilidade da intensidade da chuva incidente no ambiente, para cada velocidade e orientação do vento.

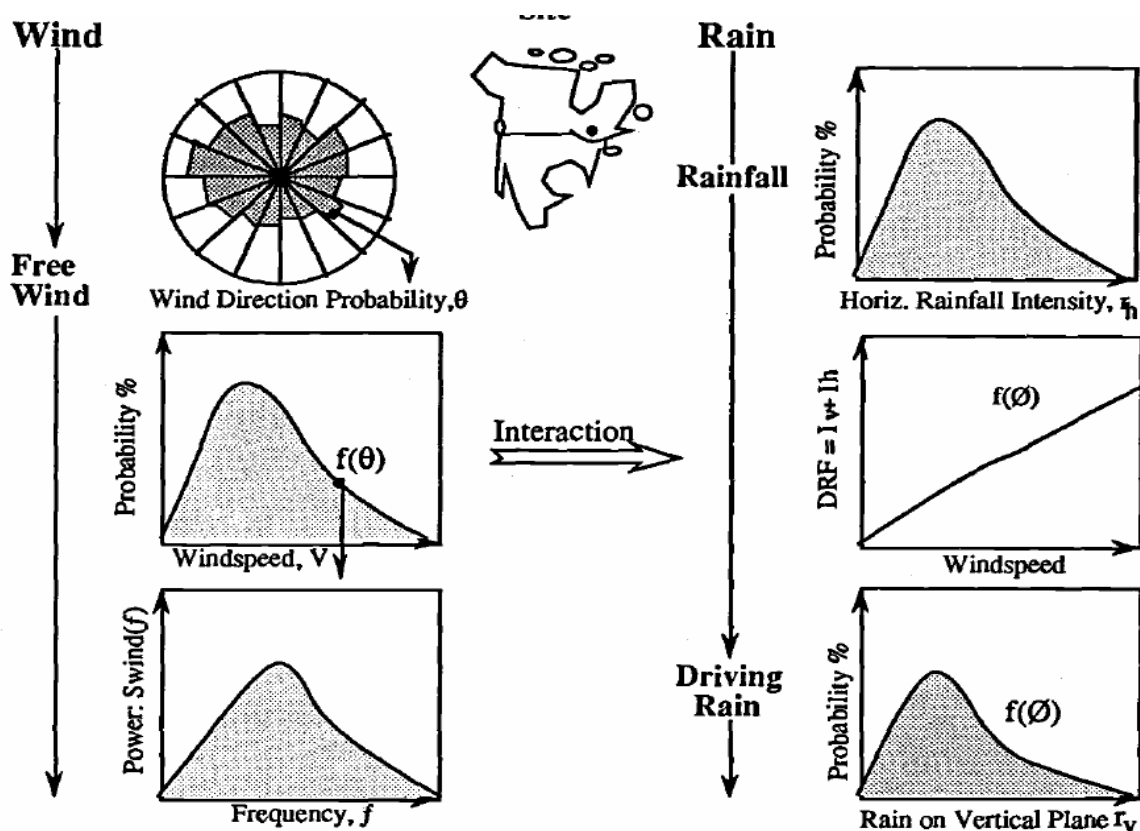


Figura 4.2 - Interação entre a precipitação e o vento [56]

O lado esquerdo da figura apresenta a distribuição de probabilidades da velocidade do vento para uma dada direcção θ e a respectiva transformação para o domínio da frequência da função densidade espectral da velocidade do vento. O lado direito apresenta os resultados para o fenómeno chuva, com uma distribuição de probabilidades para a precipitação em superfície horizontal R_h . Consta-se também a linearidade da relação entre a função de chuva incidente (DRF) e a velocidade do vento. Finalmente encontra-se a distribuição de probabilidades para a precipitação em superfície vertical em função do diâmetro das gotas. Todos estes dados são de carácter qualitativo e de aplicação limitada ao local em estudo.

4.3.2 Interacção entre vento, precipitação e o edifício

Quando o vento se aproxima da envolvente de um edifício formam-se linhas de fluxo e gradientes de pressão em torno dele, que são de difícil quantificação. Para a segunda parte do estudo foi considerada uma pequena área da fachada de um edifício, tendo em conta que quanto menor for à área maior a precisão do modelo. A este modelo foi aplicada a fórmula de admitância aerodinâmica (AAF), que permite transformar a distribuição espectral do vento em gradientes de pressão actuantes sobre a fachada. A AAF varia consoante a geometria do edifício, o terreno circundante e o local do edifício em estudo. No modelo foi igualmente introduzido o factor de deposição de chuva (RDF) que permite prever a deposição da precipitação na fachada, cujo produto final se apresenta na Figura 4.3.

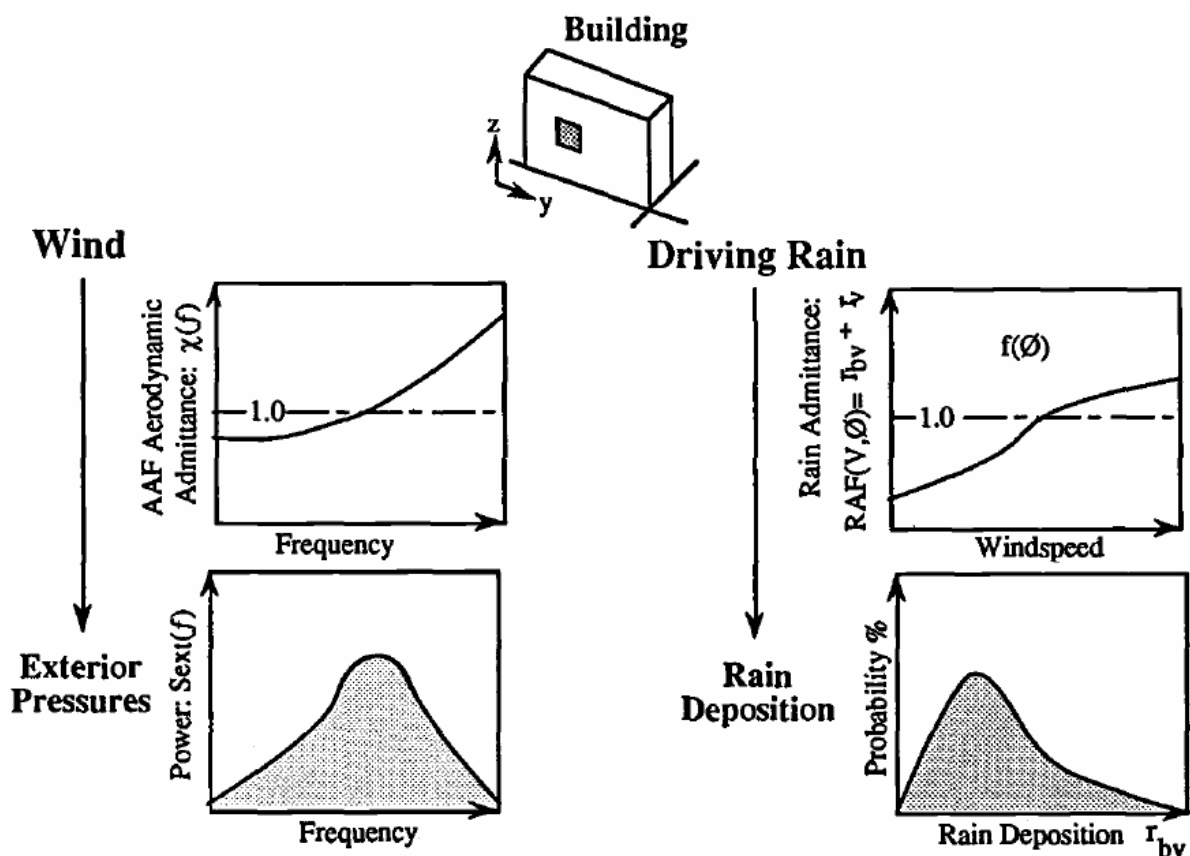


Figura 4.3 - Interacção entre o vento, a chuva e o edifício [56]

O DRF e a AAF são expressões úteis para o tratamento do tema da chuva incidente, permitem o seu estudo e a comparação de dados. Estes factores conjugados com informações meteorológicas podem ser usados para calcular aproximadamente a deposição de chuva na fachada de um edifício. À data da realização desta dissertação não se conhecem continuações à investigação de Straube e Burnett relativamente ao tratamento estatístico do tema da chuva incidente.

4.4 Método Straube & Burnett (SB)

Partindo da equação primordial para o cálculo de chuva incidente (4.1), estes investigadores introduzem em 1996 [56] um conceito denominado de “Driving Rain Function” (DRF), também designado por de “Driving Rain Factor” nalguma literatura. Este factor traduz a relação entre a precipitação que incide em superfícies verticais com a que incide em superfícies horizontais.

$$R_{wdr} = \frac{1}{V_t} \cdot U \cdot R_h = DRF \cdot U \cdot R_h \quad (4.5)$$

- R_{wdr} Intensidade da chuva incidente (mm/h);
 V_t Velocidade terminal das gotas de água (m/s);
 U Velocidade do vento (m/s);
 R_h Intensidade da precipitação em superfície horizontal (mm/h);
 DRF “Driving Rain Function”.

Foi apurado que DRF se traduz geralmente pelo inverso da velocidade terminal das gotas de água, tendo Straube e Burnett determinado a expressão da velocidade recorrendo à fórmula de Dingle e Lee [33]

$$V_t(d) = -0.166033 + 4.91844d - 0.888016d^2 + 0.054888d^3 \leq 9.20m/s \quad (4.6)$$

- $V_t(d)$ Velocidade terminal das gotas de água (m/s);
 d Diâmetro das gotas (mm).

Deve referir-se que Choi [31] recomenda a aplicação da equação de Mualem e Assouline [51] para o cálculo da velocidade terminal.

Para obtenção do diâmetro foi adoptado o espectro de gotas de Best [5]

$$F(d) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{a}\right)^n\right), \quad a = AR_h^p \quad (4.7)$$

- $F(d)$ Fração de água líquida presente no ar, com gotas de diâmetro inferiores a d ;
 d Diâmetro das gotas (mm);
 a Parâmetro;
 n Parâmetro;
 p Parâmetro;
 R_h Intensidade da precipitação num plano horizontal (mm/h).

Através da equação anterior é então possível determinar-se o tamanho médio das gotas de água, traduzidos pela equação seguinte

$$\bar{d} = 1.105 R_h^{0.232} \quad (4.8)$$

\bar{d} Diâmetro médio das gotas (mm);
 R_h Intensidade da precipitação em superfície horizontal (mm/h).

A aplicação do factor DRF permite representar a razão entre a chuva que incide numa superfície horizontal e a chuva que incide numa superfície inclinada. Estudos experimentais efectuados na Universidade de Waterloo [7], na Alemanha por Kuenzel [11] e por Choi [31] permitiram balizar o valor de DRF entre 0.20 e 0.25 para condições meteorológicas normais. Contudo DRF varia consideravelmente para diferentes intensidades de precipitação e tipos de tempestade. A título de exemplo a uma situação de aguaceiros corresponde um valor de DRF= 0.5, ao passo que para precipitações fortes este valor se situa na casa dos 0,15.

Usando as equações 4.5, 4.6 e 4.7 para estabelecer os valores teóricos Straube e Burnett [57] levaram a cabo medições experimentais, com o intuito de estabelecer uma comparação entre os valores experimentais e teóricos de DRF. Instalando um aparelho medidor de chuva incidente na fachada do edifício de teste (a 3.5 metros de altura) da Universidade de Waterloo foram registados mais de 1000 medições de períodos de 15 minutos de precipitação. Os resultados encontram-se sumarizados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Comparação entre DRF teórico e experimental

Intensidade média (mm/hr)	Diâmetro médio (mm)	DRF teórico	DRF experimental
0,37	0,88	0,272	0,286
1,8	1,27	0,22	0,211
3,6	1,49	0,188	0,186
10,26	1,9	0,136	0,158

Os valores encontrados por Straube e Burnett enquadram-se na gama de valores obtidos para o K por Hoppestad e por Lacy. As oscilações entre os valores experimentais e teóricos são pouco significativas. A respeito deste ensaio os seus autores salientam a necessidade de em futuros ensaios se implantar o aparelho a uma altura superior, com o intuito de assim se poder inferir acerca da precisão das equações usadas para taxas de precipitação mais elevadas [17].

Actualmente a equação que define o modelo SB e que é usada para a quantificação de chuva incidente é a seguinte:

$$R_{wdr} = DRF.RDF.U(z).R_h \cdot \cos \theta \quad (4.9)$$

R_{wdr} Intensidade da chuva incidente (mm/h);
 DRF Função de chuva incidente;
 RDF Factor de deposição de chuva (Figura 3.8 e Figura 3.9);

$U(z)$	Velocidade do vento à altura z (m/s);
R_h	Intensidade da precipitação em superfície horizontal (mm/h);
θ	Ângulo entre a direcção do vento e a normal à fachada ($^\circ$).

Trata-se de uma equação relativamente simples que para quantificar a chuva incidente numa superfície vertical tem em conta os efeitos da aerodinâmica e geometria do edifício em análise, bem como o efeito do vento. RDF é também designado por RAF (Rain admittance factor) nalguma literatura. Este factor é função das seguintes variáveis: forma do edifício, aerodinâmica, ângulo de ataque do vento, diâmetro das gotas de água e velocidade do vento. Este factor permite que se possa transformar a taxa de chuva incidente não perturbada para se determinar a chuva incidente num dado edifício. De acordo com Blocken e Carmeliet [10] um único valor de RDF pode ser representativo de um diverso espectro de intensidades de precipitação. Nas figuras (Figura 3.8 e Figura 3.9) são ilustrados os valores de RDF de acordo com o método SB.

Como é observável os valores de RDF são apresentados segundo um esquema de curvas isóbaras, o que pode resultar em dificuldades na escolha do valor correto a seleccionar. Importa destacar prioritariamente que segundo o método SB apenas se podem extrair valores de RDF para duas configurações de edifícios, sempre que uma das dimensões seja de ordem muito superior à outra. Mais adiante nesta dissertação, durante a análise da ISO 15927, ver-se-á que esta situação de limitação de configurações geométricas, não constitui impedimento, sendo o RDF designado por factor de parede W . Straube sugere que a aplicação de uma cobertura inclinada num edifício multipisos constitui uma forma eficiente e económica de mitigar os prejuízos causados pela chuva incidente. Straube e Burnett [57] apontam no entanto que investigações com recurso a modelação por computador, sustentadas por trabalhos de campo parecem indicar que um único factor de RDF (independente da intensidade da precipitação) constitui uma aproximação razoável para um espectro diverso de intensidades de precipitação. Contudo esta conclusão carece ainda de confirmação em zonas propensas a furacões e semelhantes fenómenos meteorológicos. Depende ainda de estudos que possam validar se efectivamente esta simplificação poderá traduzir adequadamente o efeito da chuva incidente.

Da análise da equação (4.9) facilmente se conclui que a deposição de chuva aumenta directamente com o incremento da velocidade do vento, pelo que as fachadas com maior risco de exposição ao vento estarão naturalmente mais expostas à chuva incidente. A velocidade do vento é condicionada por factores tão diversos como por exemplo a presença de colinas, outros edifícios e árvores nas imediações do edifício em estudo. Adicionalmente existe outra restrição à precisão da equação (4.9): os serviços meteorológicos apenas disponibilizam registos do vento em regime desobstruído a 10 m de altura. Tendo em conta as restrições acima mencionadas o método SB sugere a adopção da fórmula da ASCE 7 [1] (4.10), para cálculo da velocidade do vento. Esta fórmula compreende a diferenciação entre diferentes classes de exposição, agrupando-as em três tipos de terrenos.

$$U(z) = U_{10} \cdot (z / 10)^\alpha \quad (4.10)$$

$V(z)$	Velocidade do vento à altura z (m/s);
U_{10}	Velocidade do vento a 10 m de altura, valor fornecido pelas estações meteorológicas (m/s);
z	Altura acima do solo (m);
α	Coefficiente de exposição. Fornecido pelo Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Coeficientes de Exposição

Classe de Exposição	Expoente α
(A) Campo aberto com poucas obstruções, apenas algumas árvores e edifícios dispersos	0,14 (1/7)
(B) Áreas urbanas ou pequenas concentrações de edifícios	0,25 (1/4)
(C) Centros urbanos, com grande concentração de edifícios altos (com mais de 4 pisos)	0,36 (3/8)

Como produto final do modelo SB, encontram-se as recomendações para apuramento dos valores de chuva incidente em situações de projecto [17] (4.11), que englobam os seguintes passos:

1. Encontrar o valor de R_{wdr} para o clima adequado e orientação específica, (4.9)
2. Avaliar a geometria do edifício e seleccionar os valores RDF (Figura 3.8, Figura 3.9)
3. Encontrar o factor de exposição e altura (EHF)
4. Aplicar o factor de topografia TF (4.12)

$$ACI_{proj} = R_{wdr} \cdot RDF \cdot EHF \cdot TF \quad (4.11)$$

ACI_{proj} Acção da chuva incidente de projecto (kg/m^2 ou l/m^2);

R_{wdr} Intensidade da chuva incidente (mm/h);

RDF Factor de deposição de chuva;

EHF Factor de exposição e altura (Quadro 4.6);

TF Factor de topografia (4.12).

O factor EHF permite uma melhor adaptação à realidade, em termos da relação que permite estabelecer entre a altura do edifício e a velocidade do vento. A maiores alturas correspondem valores superiores da velocidade do vento. Em termos físicos constitui um multiplicador da velocidade do vento. O Quadro 4.6 indica o valor do factor a adoptar em função da altura ao solo e da classe de exposição. Os valores intermédios poderão ser obtidos por interpolação. Este procedimento para o cálculo da acção da chuva incidente revela-se de especial interesse para projectistas e fabricantes de materiais de construção.

Quadro 4.6 - Factor de exposição e altura (EHF)

Altura (m)	Classe A	Classe B	Classe C
1	0,72	0,56	0,44
3	0,84	0,74	0,65
5	0,91	0,84	0,78
7	0,95	0,91	0,88
10	1,0	1,0	1,0
20	1,1	1,19	1,28
30	1,17	1,32	1,49
50	1,25	1,5	1,78

A classe A enquadra-se num ambiente de campo aberto, a B para um ambiente suburbano e a C para uma envolvente urbana.

São ainda previstos factores de multiplicação adicionais para o caso seguinte:

Em edifícios abrigados, quando a altura da obstrução ao caso em estudo se encontrar a uma distância não superior ao dobro da altura do edifício em estudo, o resultado final deve ser multiplicado por 0,5.

A introdução do factor TF prende-se com a necessidade de traduzir o fenómeno de incremento da velocidade do vento quando é conduzido na direcção de colinas ou escarpas. Como em casos anteriores, a maiores velocidades do vento corresponde necessariamente maiores pressões do vento sob o edifício e maior deposição de chuva. Para o cálculo deste factor o método SB propõe a adopção da fórmula da NBCC "National Building Code of Canada" [25] (4.12), em conjugação com a Figura 4.4 e Figura 4.5 e o Quadro 4.7.

$$TF = \{1 + S_{\max} \{1 - |x|/(k.L)\} e^{(-az/L)}\}^{1/2} \quad (4.12)$$

- TF* Factor de topografia;
- S_{max}* Parâmetro;
- x* Distância à crista (m);
- k* Parâmetro relacionado com a direcção em que sopra o vento;
- L* Valor topográfico geométrico (Figura 4.4 e Figura 4.5);
- a* Parâmetro topográfico (Quadro 4.7);
- z* Altura acima da crista (m) (Figura 4.4 e Figura 4.5).

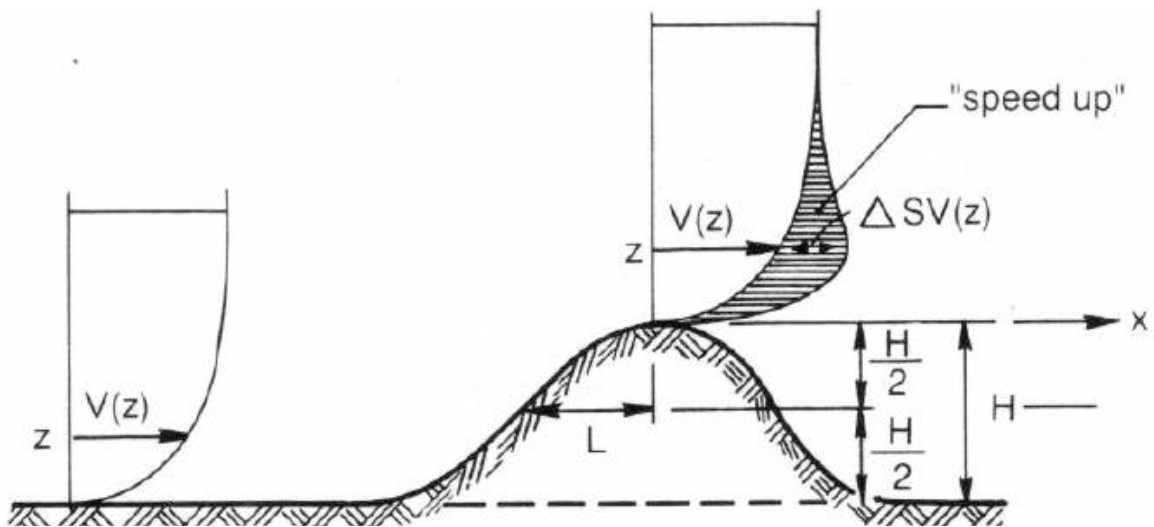


Figura 4.4 - Factor TF para colinas. [55]

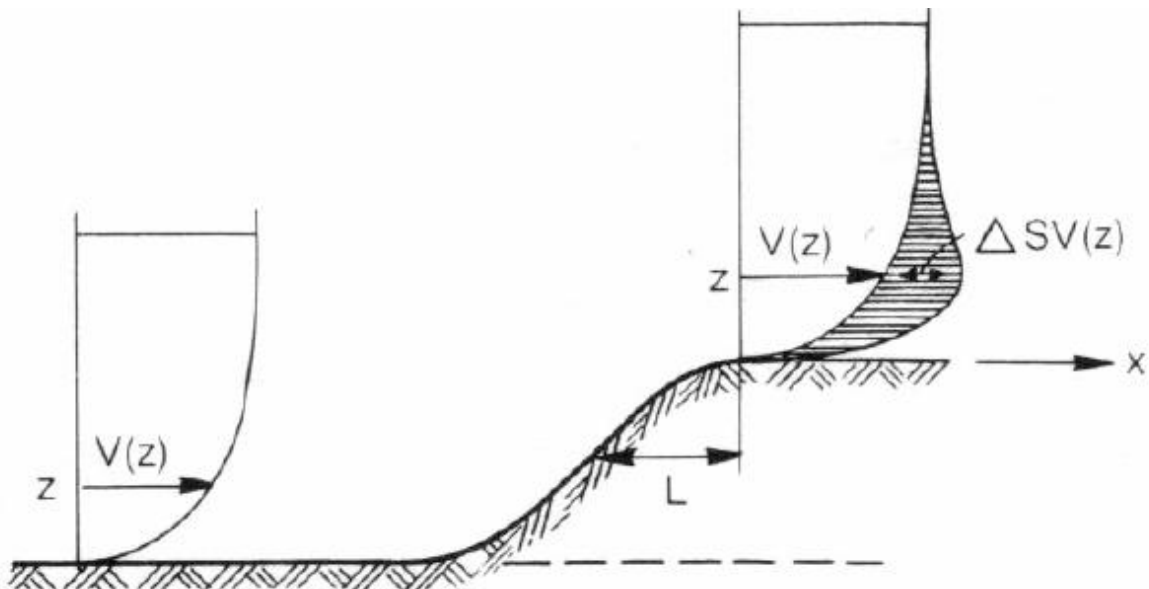


Figura 4.5 - Factor TF para escarpas. [55]

Quadro 4.7 - Parâmetros para o cálculo do factor TF

Forma da colina	S_{max}	a	k barlavento ($x < 0$)	k sotavento ($x > 0$)
Cume bidimensional	$2,2H/L$	3	1,5	1,5
Escarpas bidimensionais	$1,3H/L$	2,5	1,5	4
Colinas simétricas tridimensionais	$1,6H/L$	4	1,5	1,5

A tabela identifica 3 configurações possíveis de terreno, desdistingando as situações que configuram uma situação do lado em que sopra o vento das que são contra. Straube e Burnett destacam que o

documento publicado pelo “Building Research Establishment” [22] contém um método semelhante a este, que no entanto fornece informação mais detalhada que no método da NBCC [25].

4.5 Norma BS 8104 “Assessing exposure of walls to wind-driven rain”

Este documento surgiu na sequência da DD93 [23]. Num sentido evolutivo e para se estabelecer um termo de comparação com a vigente ISO, a BS8104 [24] será descrita em termos gerais, abordando a mecânica de cálculo e os princípios activos que o estabelecem. Salientando as melhorias relativamente à antecedente DD93 de acordo com Blocken e Carmeliet [14] indicam-se a seguintes:

- Uso de dados de variação horária do vento e da precipitação.
- Uso de dados com maior horizonte temporal. De 1959 a 1973 na DD93, de 1959 a 1991 na BS8104.
- Introdução de um índice de chuva incidente persistente juntamente com o índice anual por forma a ter em conta eventos de curta duração de chuva incidente.
- Introdução de novos coeficientes de cálculo na forma de factores de parede e de obstrução (substitui o factor de protecção). Nova abordagem de cálculo para o factor de rugosidade.

O documento faz a distinção entre o método de índice persistente e índice anual. O primeiro é uma medida da ocorrência de períodos de precipitação que podem durar várias horas ou dias, enquanto o segundo método se reporta a quantidade total anual de precipitação. As recomendações das situações de aplicabilidade de cada método são as mesmas que na DD93.

Os valores do incremento geográfico e rosetas são retirados dos mapas constantes dos anexos. O zonamento geográfico encontra-se subdividido em 19 mapas.

Os resultados D_{WA} e D_{WS} retirados da folha de cálculo exprimem a quantidade de chuva que incide numa dada localização na parede. Contudo a BS8104 prevê a existência de um factor de correcção adicional a este resultado, factor de escorrência. Este fenómeno ocorre predominantemente em situações cuja parede não possua capacidade absorvente ou que a mesma já se encontre saturada. O procedimento para o cálculo deste factor é descrito em detalhe no ponto A.6 da norma.

4.6 Análise ISO 15927-3 “Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data”

A norma ISO15927-3 [43] é directamente baseada na BS8104, a qual pode ser considerada a sua antecessora. Esta norma vem substituir a abordagem das suas antecessoras, fundamentada em índices e mapas de chuva incidente para determinar a exposição das edificações através da equação (4.4). São propostos dois métodos de cálculo distintos com mecânicas de cálculo diferenciadas, que serão alvo de análise durante este capítulo. O primeiro recorre a medições horárias de vento e precipitação para diferentes localizações do Reino Unido que foram compiladas aquando da execução da BS8104. A norma destaca que este método é fundamentalmente adequado para países que possuam um tipo de clima semelhante ao das ilhas britânicas, recomendando que caso não se verifique essa situação, deverá ser feita uma validação posterior dos dados recolhendo medições de chuva incidente em edifícios representativos da localidade em análise.

O primeiro método é fundamentado em registos horários de chuva e vento e permite calcular um índice anual como medida da exposição média à chuva incidente e um índice persistente como medida

de valor de pico. Este último índice é útil para avaliar a probabilidade de penetração da chuva através das paredes de alvenaria, juntas e outros sistemas construtivos. O segundo método surge como alternativa a localidades de onde não se disponham das medições horárias supramencionadas. Para tal recorre-se a informação do vento com base em valores médios e a registos qualitativos da presença e intensidade de precipitação. É descrito um procedimento que permite calcular a duração de um evento de precipitação durante o qual um material absorvente (como a alvenaria) se encontra húmido, o qual tem a probabilidade de 10% de ser excedido num ano.

No Anexo C da norma são indicados os procedimentos para obtenção de mapas de chuva incidente, caso se disponham de dados de estações meteorológicas em número suficiente.

Fora do âmbito da norma ficam os seguintes casos:

- Áreas montanhosas com penhascos abruptos ou vales profundos.
- Áreas em que 25% ou mais da precipitação anual seja causada por tempestades de origem convectiva.
- Áreas e períodos cuja significativa quantidade de precipitação seja constituída por neve ou gelo.

No Anexo A da norma constam algumas referências aos limites, que influenciam a validade dos índices calculados para ambos os métodos. Não havendo para já regras claras quanto aos limites, são indicadas as seguintes situações para as quais os valores apurados poderão ser considerados não válidos:

- Índices calculados com base em estações meteorológicas que se localizem em regiões no interior, não devem ser considerados representativos ou indicativos quando se consideram edifícios em zonas costeiras (situados a menos de 8km do mar).
- Valores apurados para regiões montanhosas apenas são válidos nas imediações dessa mesma estação. O clima montanhoso é demasiado variável num curto espaço geográfico, para que se possa fazer uma extrapolação dos índices.
- Em regiões de terreno predominantemente plano (com variações de altitude inferiores a 100 m), os índices obtidos possuem uma aceitação num raio até 100 km da estação usada. Isto sem prejuízo das anteriores condições.

4.6.1 Método 1 - Descrição

1) Cálculo do índice anual em campo aberto

$$I_A = \frac{2}{9} \frac{\sum v r^{8/9} \cos(D - \Theta)}{N} \quad (4.13)$$

Onde I_A se refere ao índice anual em campo aberto ($l/m^2/ano$) para uma dada orientação da parede.

N	Número de anos;
v	Velocidade média horária do vento (m/s);
r	Total de precipitação horária (mm);
D	Direcção média horária do vento a partir do norte (°);

⊖ Orientação da parede relativamente à direcção norte (°).

O factor $\cos(D - \Theta)$ configura a situação de o vento estar a soprar na direcção da parede. O índice I_A é definido pela quantidade de chuva que incide numa superfície vertical de uma dada direcção por metro quadrado durante 1h a uma altura de 10 m acima do solo em campo aberto.

Para efeitos de acuidade da fórmula a norma salienta que para uma dada localidade se disponha no mínimo de registos de 10 anos com valores horários da velocidade, direcção do vento e precipitação. No entanto a recomendação aponta para o uso de registos entre 20 e 30 anos.

2) Cálculo do índice em campo aberto persistente

$$I'_s = \frac{2}{9} \sum v r^{8/9} \cos(D - \Theta) \quad (4.14)$$

v Velocidade média horária do vento (m/s);
 r Total de precipitação anual (mm);
 D Direcção média horária do vento a partir do norte (°);
 Θ Orientação da parede relativamente à direcção norte (°).

O índice I_s (l/m^2) refere-se ao índice em campo aberto persistente para uma dada orientação de parede totalizado para o pior evento de provável ocorrência em qualquer período de 3 anos. A norma define evento como um período durante o qual ocorre chuva incidente e que é precedido ou seguido por um período de pelo menos 96h onde $v.r^{8/9} \cdot \cos(D - \Theta) \leq 0$. No Anexo B da ISO encontram-se mais informações sobre a natureza de um evento.

Estes índices traduzem a quantidade de precipitação que seria recolhida num pluviómetro em campo aberto. São depois afectados de coeficientes a fim de serem convertidos em índices de parede.

3) Factor de rugosidade

Este factor pretende reflectir a modificação da velocidade do vento em virtude da rugosidade do terreno. Depende da altura acima do solo para o ponto em estudo e da rugosidade do terreno na direcção em que sopra o vento. Este procedimento difere bastante do proposto na BS8104, sendo mais preciso e beneficiando da introdução de novos factores. Ao procedimento mais qualitativo da BS8104 a ISO contrapõe com uma abordagem mais quantitativa. São propostas as seguintes equações usadas em conjugação com o Quadro 4.8:

$$C_R(z) = K_R \ln(z / z_0) \quad \text{Para } z \geq z_{\min} \quad (4.15)$$

$$C_R(z) = C_R(z_{\min}) \quad \text{Para } z < z_{\min} \quad (4.16)$$

$C_R(z)$ Coeficiente rugosidade;
 K_R Factor de terreno (Quadro 4.8);
 z Altura acima do solo (m);
 z_0 Extensão da rugosidade (m);
 z_{\min} Altura mínima (m).

Quadro 4.8 - Categorias do terreno e parâmetros relacionados

Categoria do terreno	Descrição	K_R	z_o	z_{min}
I	Mar aberto, costa de lago com pelo menos 5 km de extensão na direcção do vento. Terrenos planos sem obstáculos	0,17	0,01	2
II	Terrenos rurais com vedações fronteiriças, pequenas estruturas agrícolas, casas ou árvores	0,19	0,05	4
III	Áreas suburbanas ou industriais, florestas permanentes	0,22	0,3	8
IV	Áreas urbanas cuja superfície está no mínimo 15% ocupada com edifícios de altura média excedendo os 15m	0,24	1	16

No essencial a distinção das categorias segue princípios semelhantes aos da BS8104.

4) Coeficiente de topografia

No coeficiente de topografia, à semelhança do factor de rugosidade, é introduzido um método mais quantitativo em detrimento da apreciação global topográfica postulada pela BS8104. Este coeficiente tem em conta o aumento da velocidade média do vento em colinas isoladas e escarpas, sendo recomendada a sua aplicação nas situações seguintes:

- Locais que se encontrem a mais de meio caminho no sentido ascendente de uma encosta.
- Locais a uma distância nunca superior a 1,5 vezes a altura do penhasco medidas desde a base do penhasco.

São propostos os seguintes coeficientes e a consulta da Figura 4.6 e o Quadro 4.9.

$$C_T = 1 \quad \text{Para } \phi < 0.5 \quad (4.17)$$

$$C_T = 1 + 2s\phi \quad 0.05 \leq \phi \leq 0.3 \quad (4.18)$$

$$C_T = 1 + 0.6s \quad \text{Para } \phi > 0.3 \quad (4.19)$$

- C_T Coeficiente de topografia;
- ϕ Declive na direcção para onde sopra o vento, dado pela relação H / L_u ;
- s Factor obtido por consulta das Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 e adaptado à extensão da crista no sentido ascendente do vento L_u , ou no sentido descendente do vento L_e

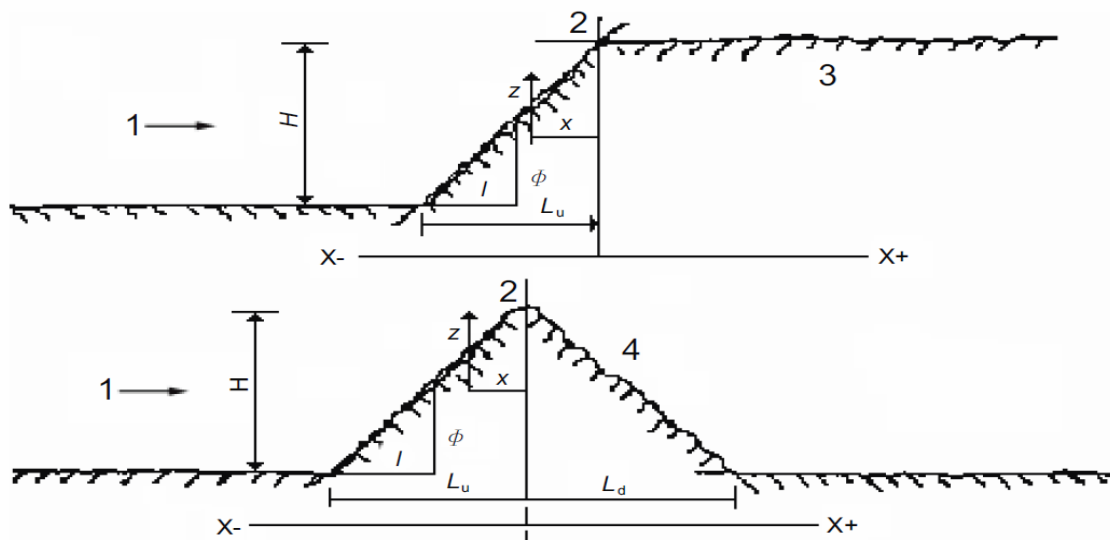


Figura 4.6 - Definição dos factores para determinação do coeficiente de topografia [43]

- 1 Vento;
- 2 Crista;
- 3 Encosta descendente <0.05 ;
- 4 Encosta ascendente > 0.05 ;
- L_u Comprimento real da encosta ascendente na direcção do vento (m) (Figura 4.6);
- L_d Comprimento real da encosta descendente (m) (Figura 4.6);
- L_e Comprimento efectivo da encosta ascendente (m). Consultar Quadro 4.9;
- H Altura efectiva (m) (Figura 4.6);
- x Distância na horizontal medida desde o local em estudo até ao topo da crista (m) (Figura 4.6);
- z Distância na vertical medida desde o nível do solo até ao local em estudo (m) (Figura 4.6).

Quadro 4.9 - Comprimento efectivo L_e

Declive na direcção do vento	
Raso ($0.05 < \Phi < 0,3$)	Íngreme ($\Phi > 0,3$)
$L_e = L_u$	$L_e = H/0,3$

O factor s depende da geometria do terreno, e faz a distinção entre 4 situações. Na posse do valor de x e do comprimento efectivo L_e , o valor é deduzido pela consulta dos ábacos representados na

Figura 4.7 e Figura 4.8. O factor s é apresentado nos ábacos segundo um esquema de curvas isóbaras, sendo determinado ao interceptar os valores dos quocientes z/L_e e x/L_e .

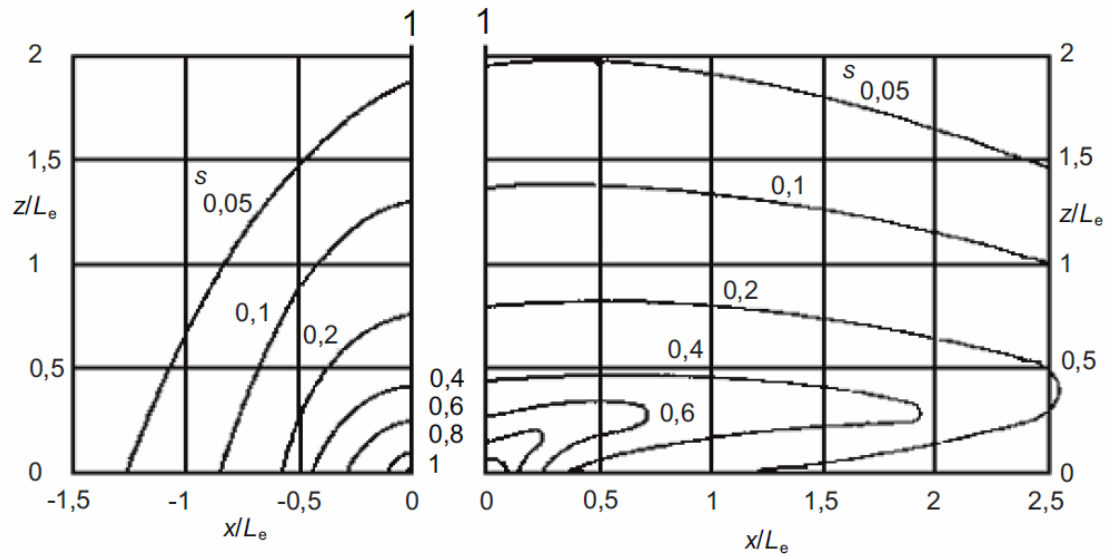


Figura 4.7 - Factor s para penhascos e escarpas [43]

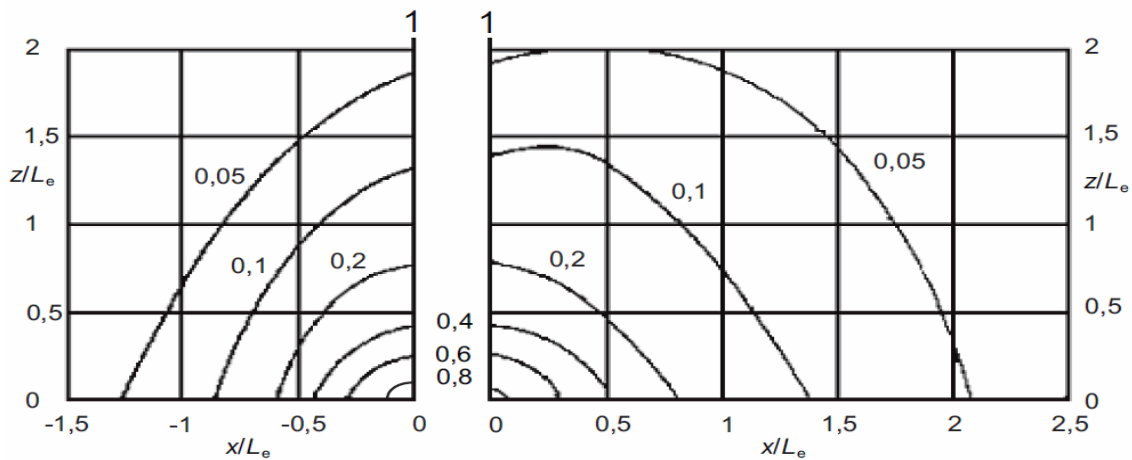


Figura 4.8 - Factor s para colinas e cristas [43]

5) Factor de Obstrução

Tem em conta o abrigo proporcionado ao edifício em estudo pelo obstáculo mais próximo. A exposição da parede deve ser avaliada determinando a distância horizontal para o obstáculo mais próximo que está pelo menos à mesma altura da parede, na linha de vista dessa parede (Quadro 4.10). É apenas acrescentada a recomendação de nas situações em que o local que seja propenso a canalizar o vento para uma parede, o factor de obstrução a considerar assumirá o valor 1, mesmo que se verifiquem obstruções. Esta situação assume portanto uma configuração da circunstância mais gravosa possível.

Quadro 4.10 - Factor de Obstrução

Distância da obstrução à parede em análise (m)	Factor de obstrução (O)
4 a 8	0,2
8 a 15	0,3
15 a 25	0,4
25 a 40	0,5
40 a 60	0,6
60 a 80	0,7
80 a 100	0,8
100 a 120	0,9
>120	1

6) Factor de parede

Este factor define-se como a relação entre a quantidade de água que atinge uma parede com a quantidade de água que incide num espaço equivalente mas desobstruído. São aplicáveis as mesmas disposições da BS8104, com uma ligeira alteração. Para edifícios de 3 andares foi introduzido mais um nível de diferenciamento, melhorando a precisão do cálculo. Como é observável e especialmente comparando com o método SB, a norma ISO revela uma gama muito superior de configurações possíveis, podendo adaptar-se a um alargado espectro de parques habitacionais, como é o caso nacional. Este factor depende das características da parede em análise, tais como: forma, altura e coberturas (Figura 4.9). No caso de um edifício multipisos com cobertura plana o valor de W mantém-se constante e igual a 0,2 para a totalidade do edifício com excepção aos últimos 2,5 m onde o factor mais do que duplica, configurando uma zona particularmente gravosa.

Description of wall	Average value	Distribution
Two-storey gable	0,4	
Three-storey gable	0,3	
Multi-storey building with flat roof (pitch < 20°)	0,2 for a ten-storey building, for example, but with a higher intensity at top	0,5 for top 2,5 m 0,2 for remainder
Two-storey wall with eaves	0,3	
Three-storey wall with eaves	0,4	
Two-storey building with flat roof (pitch < 20°)	0,4	

Figura 4.9 - Factor de parede [43]

7) Cálculo dos índices de parede

Os índices em campo aberto são posteriormente convertidos em índices de parede, sendo afectados por coeficientes para ter em conta a diferença entre chuva em campo aberto e a que incide em edifícios

$$I_{WA} = I_A \cdot C_R \cdot C_T \cdot O.W \quad (4.20)$$

I_{WA} Índice anual de parede (l/m^2);

I_A Índice anual em campo aberto (l/m^2);

C_R Coeficiente de rugosidade (4.15) e (4.16);

C_T Coeficiente de topografia (4.17), (4.18) e (4.19);

- O* Factor de obstrução (Quadro 4.10);
W Factor de parede (Figura 4.9).

$$I_{ws} = I_s \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \quad (4.21)$$

- I_{ws} Índice de parede persistente (l/m^2);
 I_s Índice persistente em campo aberto (l/m^2);
 C_R Factor de rugosidade (4.15) e (4.16);
 C_T Coeficiente de topografia (4.17), (4.18) e (4.19);
O Factor de obstrução (Quadro 4.10);
W Factor de parede (Figura 4.9).

4.7 Método 2 - Estimativa dos efeitos da chuva incidente

Uma primeira abordagem a um procedimento semelhante a este já tinha sido proposto por Beguin em 1986 [3], através do conceito denominado risco de molhagem. Este conceito era expresso em termos do tempo máximo de molhagem, em dias, associado a um período de retorno de dez anos, para nove orientações distintas cobrindo cada uma um sector de 40°. Dividindo um dia em dois períodos de 12 horas e analisando diversos factores meteorológicos tais como a quantidade de precipitação, velocidade, direcção do vento e humidade relativa do ar. Em virtude destes parâmetros um período seria consequentemente classificado como de “molhagem”, “secagem” ou “neutro”.

Este método, agora introduzido na norma ISO, constitui a inovação mais relevante relativamente aos procedimentos indicados na BS8104, sendo agora possível a obtenção de uma estimativa de um índice de chuva incidente mesmo não dispondo de valores meteorológicos horários. Sendo mais limitado e globalmente inferior ao método 1, a sua inclusão é obrigatória para garantir a aplicabilidade da norma a todos os países. O método compreende os seguintes fundamentos e passos: Primeiramente os dados disponíveis devem ser divididos em períodos de 12h, da seguinte forma: 07:00-18:00 e 19:00-06:00. Estes períodos são denominados meios-dias. São estabelecidas as condições para um meio-dia ser considerado como húmido se todas as seguintes premissas forem cumpridas:

- a) Ocorrência de uma precipitação superior a 4 mm em superfície horizontal no meio-dia.
- b) Se no código meteorológico (fornecidos pela WMO) estiver assinalada a presença de precipitação em pelo menos 3 das 5 observações tri-horárias do meio-dia. São elas: 06:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00 e 18:00, 21:00, 00:00, 03:00, 06:00.
- c) Se a velocidade média do vento exceder os 2 m/s durante o meio-dia.
- d) Se a direcção média do vento durante o meio-dia estiver no intervalo $\pm 60^\circ$ com a perpendicular à parede: $[D - \Theta] \leq 60$

Verificando-se todas as 4 condições supramencionadas a superfície da parede pode ser considerada molhada por chuva incidente, estando reunidas as condições para o estabelecimento de migração de água para o interior da parede por capilaridade.

Em alternativa um meio-dia é definido como seco se forem verificadas todas as seguintes circunstâncias:

- a) A média da humidade relativa atmosférica durante o meio-dia se situar abaixo dos 70%.
- b) A velocidade média do vento durante o meio-dia estiver no intervalo $\pm 60^\circ$ na direcção perpendicular à parede.

Verificadas estas condições, assume-se que a presença do vento e a humidade atmosférica permitem a evaporação da água na parede. As restantes condições atmosféricas são consideradas neutras. Os seguintes valores algébricos são propostos em função da avaliação do meio-dia, 0 para neutro, +1 para húmido e -1 para seco. Seguidamente somam-se todos os valores apurados para os meios-dias, nunca podendo este valor ser inferior a 0. O valor máximo correspondente à duração em meios-dias do evento de molhagem mais longo anual deve ser deduzido para cada ano e para cada orientação de parede. A distribuição cumulativa do máximo anual, calculada a partir de N anos de informações meteorológicas é depois ajustada por uma função de Gumbel (4.22). Este procedimento visa obter o chamado evento de referência, que corresponde ao evento máximo em termos de valor algébrico, que ocorre uma vez a cada 10 anos, para uma dada estação meteorológica e uma dada orientação de parede,

$$F(X) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{X-a}{b}\right)\right] \quad (4.22)$$

a, b Factores de dispersão

O Anexo D da ISO apresenta um estudo comparativo entre os dois métodos, usando registos horários a 20 anos, que continham todos os parâmetros necessários para aplicação de ambos os métodos, para três cidades do Reino Unido: Londres, Manchester e Edimburgo. Referindo que nas circunstâncias em que ambos os totais anuais e os totais de evento são considerados, existe um aceitável grau de similaridade nos resultados produzidos.

4.8 Comparação entre a norma ISO e o Método SB

De acordo com Blocken e Carmeliet [17] existem sete pontos fundamentais com influência significativa no estudo da chuva incidente. É em torno destes sete itens fundamentais que estabelecem uma comparação entre os dois principais métodos semi-empíricos, designadamente: 1) geometria do edifício; 2) localização na fachada; 3) topografia do meio circundante; 4) velocidade do vento; 5) direcção do vento; 6) padrão do fluxo de vento em torno do edifício e dispersão de turbulência; 7) precisão de cálculo e custos.

1. O modelo ISO fornece informações para 6 configurações diferentes de edifícios, indicando factores de parede (W). O modelo SB é mais restritivo no sentido em que apenas disponibiliza 3 configurações, sendo portanto a sua aplicação bastante limitativa, de onde se infere a muito mais abrangente esfera de aplicação da norma ISO.
2. No método SB o factor de parede (RDF) é apresentado segundo um esquema tipo curvas isóbaras, definido limites máximos e mínimos. No modelo ISO os factores de parede são indicados para posições discretizadas na fachada, dando lugar a situações menos dúbias que no método SB.

3. Uma vez mais a norma ISO é mais detalhada no tratamento dos aspectos topográficos, apresentando mais factores de correcção, incluindo um factor de rugosidade e um factor de obstrução, estando estes últimos ausentes no método SB. De onde se conclui que o modelo SB é apenas estritamente aplicável a edifícios que se encontrem isolados
4. Em ambos os métodos é previsto o cálculo da velocidade do vento, a norma ISO recorre às equações logarítmicas 4.15 e 4.16, enquanto o modelo SB recorre à função exponencial. Na ISO, a velocidade de referência do vento é definida como a velocidade que ocorreria a 10 m de altura no meio de um descampado inserido na localidade geográfica em estudo. Pelas fórmulas (4.15 e (4.16) é visível que o valor de C_R varia consoante o tipo de categoria do terreno. Estas duas fórmulas constituem na realidade um modelo de transformação baseado no modelo logarítmico da velocidade média do vento.
5. Ambos os modelos utilizam a mesma abordagem para ter em conta a influência da direcção do vento, o método da projecção do cosseno. Como já anteriormente discutido este procedimento pode ser responsável por dados incorrectos. No entanto até à data este constitui a única hipótese aceite pela comunidade científica.
6. O padrão de fluxo de vento está representado tanto na ISO como no modelo SB pelo factor de parede W e pelo RDF respectivamente, ambos fundamentados em observações experimentais. A dispersão de turbulência está igualmente implícita nos factores W e RDF, dado que são factores experimentais onde essa dispersão de turbulência esteve presente.
7. Não existem diferenças significativas relativamente à componente económica, dado que ambos se apoiam em mecânicas de cálculo semelhantes. São métodos de cálculo rápidos que apenas envolvem a integração dos respectivos dados meteorológicos e geográficos. Em termos de precisão de cálculo, tendo em conta os itens discutidos nos pontos anteriores, a norma ISO revela-se superior em todos os aspectos.

5 MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos computacionais de dinâmica de fluidos, vulgarmente abreviados para CFD "Computational Fluid Dynamics", são um ramo da mecânica dos fluidos que recorrem a métodos numéricos e algoritmos para resolver problemas que envolvem fluxos de fluidos ou com elementos com propriedades semelhantes como é o caso do vento. Estes métodos analisam as interações dos fluidos com as superfícies de contacto designadas por superfícies de fronteira. Na base do CFD está a aplicação das fórmulas de Navier Stokes. A metodologia geral usada num problema de CFD recorre aos seguintes passos básicos: 1) definição da geometria do problema, 2) discretização em células do volume ocupado pelo fluido, 3) definição das condições de fronteira (este passo compreende a especificação do comportamento do fluido em análise), 4) início da simulação que é realizada através de um processo iterativo.

De acordo com Blazek [6], existem alguns parâmetros que se assumem como a principal fonte de erros que podem afectar os resultados reproduzidos por um estudo de CFD. Os primeiros dizem respeito à medição e decorrem da escolha do modelo de turbulência aplicado e das condições de fronteira físicas implementadas. Outros erros, ainda que de menor ordem, têm origem na elaboração do modelo de grelha para a discretização dos elementos em estudo e nos erros de truncatura daí advenientes [52]. Existem actualmente alguns guias de boas práticas para o tratamento destes assuntos, tais como o guia da ER-COFTAC [34].

Em inícios da década de 90, Choi [27,28] apresentou aquele que é considerado o trabalho pioneiro em termos de aplicação de CFD ao tema da chuva incidente, cujo produto final foi a elaboração de cartas de incidência.

Procedimentos dos CFD utilizados por Choi:

1. O padrão estacionário em 3D do fluxo de vento é calculado com base num código CFD. São resolvidas as equações de continuidade e momentos de Reynolds Navier Stokes (RANS), que representam os fluxos de turbulência. A função de encerramento é obtida empregando um modelo de turbulência k- ϵ . Os gradientes de fluxos devem regra geral ser limitados para assegurar a precisão do modelo.
2. As trajectórias das gotas de água são obtidas injectando um espectro diverso de tamanhos de gotas no fluxo de vento previamente calculado e resolvendo as suas equações de movimento.
3. A carta de rácios de incidência específica η_d é posteriormente obtida através da configuração das trajectórias de gotas de chuva que foram introduzidas no modelo de fluxo e que incidem sobre a fachada. Esta carta está apenas relacionada com gotas de diâmetro d . É dada pela seguinte equação:

$$\eta_d(d) = \frac{R_{wdr}(d)}{R_h(d)} \quad (5.1)$$

d Diâmetro das gotas (m);

$R_{wdr}(d)$ Intensidade específica de chuva incidente (mm/h);

$R_h(d)$ Intensidade específica de chuva em superfície horizontal;

4. A carta de incidência η é calculada a partir do rácio de incidência específica η_d e com base na distribuição do espectro do tamanho das gotas. Este procedimento é seguidamente repetido para várias posições na fachada, com diferentes configurações da velocidade do vento U_{10} , direcção do vento ϕ_{10} e intensidade de precipitação horizontal R_h .

$$\eta = \frac{R_{wdr}}{R_h} \quad (5.2)$$

5. Todos os dados reproduzidos pelo programa, dos passos acima descritos, são usados para produzir cartas de rácios de incidência, como por exemplo a carta reproduzida na Figura 5.1. Estas cartas apresentam os valores de η em função da velocidade do vento U_{10} e da intensidade da precipitação horizontal R_h , para uma dada posição na fachada do edifício e para uma dada direcção do vento.

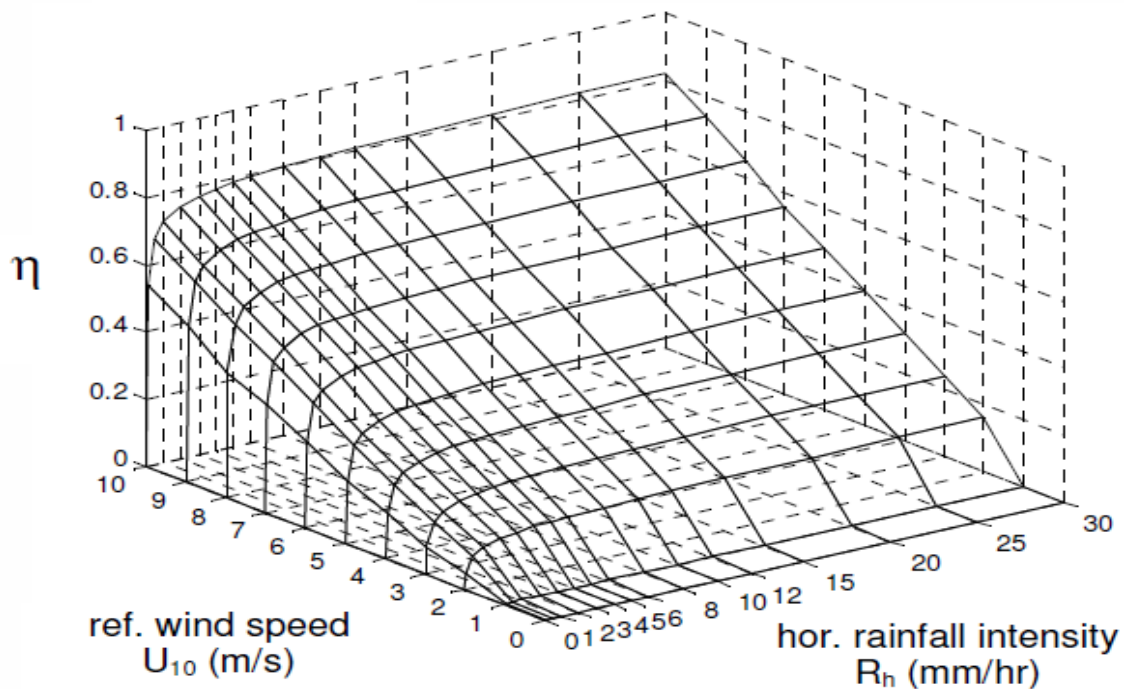


Figura 5.1 - Exemplo de uma carta de rácios de incidência [17]

Este tipo de cartas é essencialmente afectada por cinco tipos de factores: a geometria do edifício, incluindo também a topografia do meio circundante; a posição da superfície em análise na fachada; velocidade de referência do vento U_{10} , direcção de referência do vento ϕ_{10} e intensidade da precipitação em superfície horizontal R_h . Aproveitando estas cartas de incidência existem modelos numéricos que combinam CFD com modelos numéricos de calor-ar-humidade (CFD-HAM), os quais se assumem como uma importante ferramenta de avaliação do comportamento higrotérmico e da durabilidade dos componentes de uma fachada face às circunstâncias meteorológicas. O método CFD-HAM [19,44] usa as cartas de incidência geradas pelo CFD que são posteriormente implementadas no

modelo HAM. A amplitude de utilização deste método encontra-se ainda limitada a materiais homogéneos e de composição isotrópica.

Mais tarde Blocken e Carmeliet [15] estendem o modelo de Choi para o domínio temporal, após a elaboração das cartas de incidência estas podem ser convertidas em registo de chuva incidente para qualquer posição na fachada de um edifício, para tal basta implementar os dados meteorológicos respeitantes a U_{10} e R_h seguindo o procedimento indicado por Blocken e Carmeliet [15]. Para se determinar a chuva incidente para um dado evento de precipitação, o mesmo deve sofrer uma partição em intervalos equidistantes de 10 minutos que foi considerado um intervalo com resolução adequada validada. Cada um destes intervalos é assumido como sendo de condições estacionárias e as condições meteorológicas de cada intervalo são utilizadas para extrair o rácio de incidência a partir da carta de rácio de incidência. Multiplicando o rácio de incidência pelo intervalo de tempo com a correspondente quantidade de precipitação horizontal S_h permite apurar a respectiva quantidade de chuva incidente S_{wdr} para esse intervalo. Esta extensão ao domínio temporal já foi validada por Tang e Davidson [60] e por Blocken Carmeliet [15].

5.1 Seleção de intervalos de resolução temporal adequados, para uso em estudos de CFD

A extensão para o domínio temporal do CFD, levada a cabo por Blocken e Carmeliet [9], conduziu a investigações sobre qual seria o intervalo de tempo mais adequado a usar nas experiências e que resultados mais fidedignos conseguiriam reproduzir. Dado o carácter de extrema variabilidade temporal dos eventos de precipitação, é uma conclusão natural que tempos de intervalo de registo mais curtos produz resultados mais apurados. Os intervalos de tempo vulgarmente disponibilizados pelas estações meteorológicas correspondem a períodos de 1 hora ou até mesmo diários, os valores são obtidos ponderando aritmeticamente registos correspondentes a intervalos de 10 minutos, considerado um intervalo adequado e já validado por Blocken e Carmeliet [15] de acordo com o seguinte procedimento aritmético.

$$U_j = \frac{\sum U_i}{n}, \quad R_{hj} = \frac{\sum R_{hi}}{n} \quad (5.3)$$

- U_j Velocidade média horária do vento;
- j Valor horário;
- n Número de intervalos de tempo;
- R_{hj} Intensidade média da precipitação horizontal.
- R_{hi} Intensidade da precipitação horizontal durante o intervalo i ;
- i Intervalo de medição de curta duração (1-10 min).

De acordo com Sumner [59] os registos horários, apesar de vulgarmente usados, não fornecem a precisão adequada a estudos que envolvam fenómenos de precipitação. Igualmente existem 3 classes de causas de erros [16] que podem afectar grandemente um estudo quando é aplicado o método aritmético: 1) média da velocidade do vento; 2) média da intensidade da precipitação, 3) violação da co-ocorrência do vento e da precipitação. As duas primeiras causas prendem-se com a possibilidade do esbatimento dos seus respectivos valores de pico. A terceira diz respeito à perda de informação dos fenómenos de co-ocorrência devido a terem sido diluídos aquando da execução da média.

Em função das limitações patenteadas pelo método anterior, Blocken e Carmeliet [11] propõem a adopção de uma nova metodologia, onde tanto U_i como R_{hi} são ponderados através da multiplicação do factor quantidade de precipitação horizontal S_{hi} , de acordo com a seguinte fórmula

$$U_j = \frac{\sum_i U_i \cdot S_{hi}}{\sum_i S_{hi}}, \quad R_{hj} = \frac{\sum_i R_{hi} \cdot S_{hi}}{\sum_i S_{hi}} \quad (5.4)$$

- U_j Velocidade média horária do vento ponderada;
- S_{hi} Quantidade de precipitação em superfície horizontal;
- R_{hj} Intensidade média da precipitação horizontal ponderada;
- i Intervalo de medição de curta duração (1-10 min);
- j Valor horário.

Segundo os investigadores, usando estes valores ponderados em estudos de CFD, não serão introduzidos erros decorrentes da execução da média, desde que a carta de incidência (η) constitua uma função linear de U_{10} e de R_h , para o intervalo de média considerado.

5.2 Método híbrido CFD-DRI

Sendo os métodos CFD complexos e bastante exigentes ao nível de dispêndio de tempo, Choi [30] estudou a viabilidade da integração de dados já existentes sob a forma de DRI no modelo CFD e a possibilidade de estimar quantidades de chuva incidente em edifícios usando valores provenientes do DRI. O primeiro estudo ocorreu em Sidney com posteriores estudos noutras localidades para fins de validação do método. O investigador propôs um conjunto de expressões que visam estabelecer uma relação entre o CFD e o DRI, aplicando o conceito de factor de influência local (LIF). O valor de LIF reflecte a intensidade de chuva incidente para uma dada posição na fachada de um edifício. Este factor reproduz uma combinação de diversos fenómenos, tais como a interacção entre os movimentos de gotas de água e os movimentos do ar e as interacções entre o edifício e a sua envolvente com o fluxo de vento. Quanto maior o valor de LIF mais gravoso é o grau de incidência. O LIF é fundamentalmente função da distribuição do espectro de tamanho das gotas de água, da geometria do edifício, velocidade do vento, intensidade da precipitação e do regime de turbulência do vento.

Para o estudo, Choi desenvolveu um modelo computadorizado standard de um edifício rectangular à escala de 4:1:1 (altura, largura, profundidade), dividindo a fachada principal em 12 áreas iguais de acordo com o esquema da Figura 5.2, ao qual aplicou a ferramenta CFD para determinar R_{wdr} na fachada. Seguidamente determinou os valores de LIF para cada uma das áreas do modelo (Figura 5.3). É visível que os sectores mais gravosos são os cantos superiores, com destaque particular para o segmento S4.

$$LIF = \frac{R_{wdr}}{R_{IA}} \quad (5.5)$$

- LIF Factor de influência local;
- R_{wdr} Intensidade da chuva incidente (L/m^2h ou mm/h);
- R_{IA} Intensidade da chuva incidente em campo aberto (L/m^2h ou mm/h).

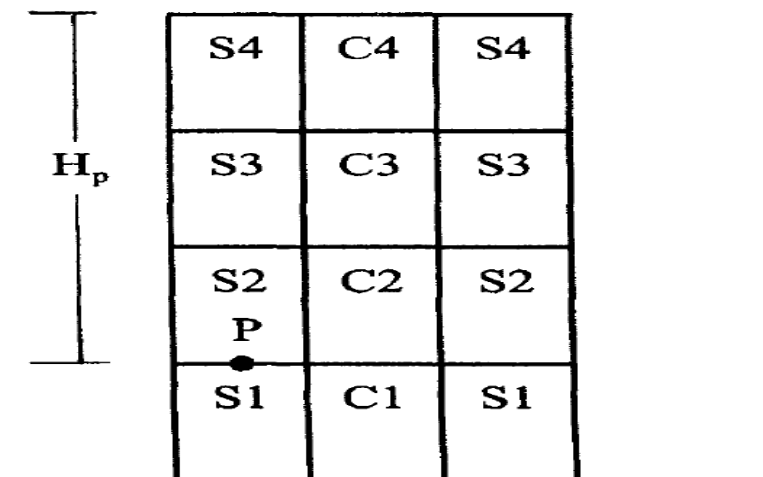


Figura 5.2 - Divisão da fachada por áreas [30]

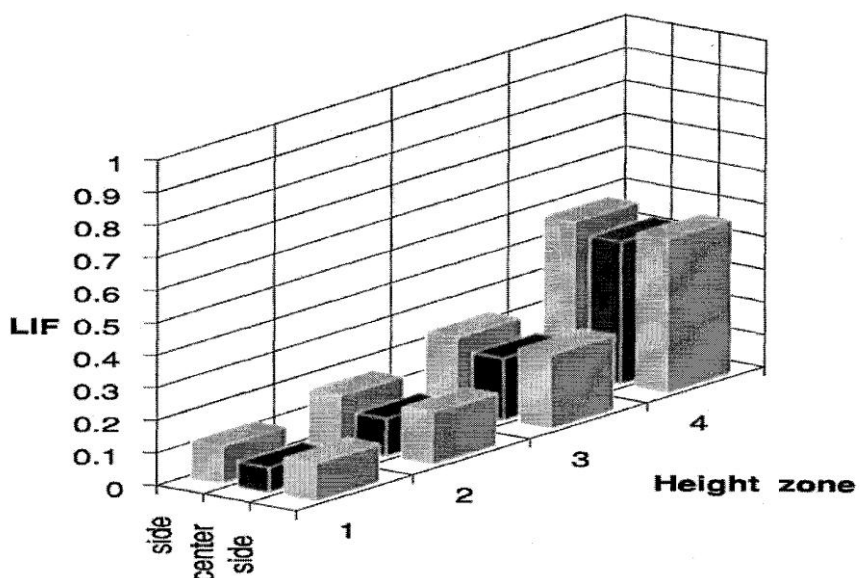


Figura 5.3 - Factor LIF para cada uma das áreas [30]

Relacionando graficamente o LIF para algumas secções (S4, S2, C4, C2), com o binómio largura/altura de um edifício, o investigador estabeleceu uma relação básica entre o LIF para S4 e para a velocidade do vento a 250 m de altura V_{250} (5.6), altura a partir da qual o vento não sofre qualquer tipo de perturbação derivado da presença do edifício. Como é observável o LIF aumenta rapidamente com a velocidade do vento.

$$LIF = 0,025.V_{250}^{1.3} \quad (5.6)$$

LIF Factor de influência local;
 V_{250} Velocidade do vento a 250 m de altura (m/s).

Com dados recolhidos a partir de 4 estações meteorológicas na região de Sidney, respeitantes à precipitação anual (mm), velocidade média do vento (m/s) e calculando o respectivo DRI (m²/s) para 4 edifícios representativos, Choi apresentou uma expressão aproximada para o cálculo da chuva incidente em S4,

$$C.I\ S4 = 0,1.DRI \quad (5.7)$$

C.I S4 Quantidade de chuva incidente anual em S4 (m);

DRI Índice de chuva incidente (m²/s);

Para efeitos de validação, Choi executou experiências semelhantes noutras duas cidades australianas, Brisbane e Melbourne. Estes locais foram escolhidos por apresentarem condições climáticas díspares das de Sidney. Melbourne apresenta um clima temperado, estando Brisbane numa zona mais tropical e propensa a ciclones. Choi relata que a equação 5.7 apresenta resultados consentâneos. Na comparação entre os valores teóricos fornecidos pela equação 5.7 e os valores obtidos experimentalmente o desvio para o caso de Brisbane é apenas de 1% e de 1.13% para Melbourne. Na equação 5.7 foi assumido que toda a água que atingia uma determinada área na fachada ou era totalmente absorvida pelos materiais ou em alternativa ressaltava para fora. Contudo a ocorrência de escorrências não é negligenciável, complementarmente Choi apresentou uma expressão para traduzir este efeito sob a forma de quantidade de escorrência anual (m³/m),

$$\text{Escorrência anual} = 0,1.DRI.F_{ro}.H_p \quad (5.8)$$

DRI Índice de chuva incidente (m²/s);

F_{ro} Factor de escorrência;

H_p Altura da fachada do edifício acima do ponto em estudo (m);

Este método conjuga a simplicidade e disponibilidade de dados do DRI, com os métodos mais complexos e precisos em CFD.

Ainda em termos de tentativas de combinação dos CFD com outros modelos, há a registar as experiências de Hangan [37] que conduziu investigações no sentido de integrar estudos em túneis de vento com os CFD (C-FD-E). Esta abordagem permite simplificar alguns procedimentos, já que os resultados dos túneis de ventos podem ser integrados nos CFD, podendo servir para calibração destes métodos numéricos. Actualmente os ensaios em túneis de vento encontram especial aplicação como forma de implementação dos fenómenos de escorrência nos modelos CFD. Hangan comparou os resultados em termos de LIF para o modelo adaptado (C-FD-E), com a experiência de Incullet e com um ensaio executado por Choi. Os resultados são apresentados na Figura 5.4

CFD	EXP.	Choi (CFD)
1.6	2.7	1.2
1.2	1.7	0.8
0.8	1.2	0.7
0.3	0.7	0.5

Figura 5.4 - Valores de LIF para o modelo C-FD-E (à esquerda), para a experiência de Incullet (meio) e para um ensaio de Choi (direita) [37]

As discrepâncias verificadas, principalmente nas zonas superiores ficaram a dever-se essencialmente aos modelos de turbulência aplicados para simular o fluxo de vento, estes modelos apresentam tendência para sobrestimar a energia de turbulência, esta ocorrência induz uma maior distorção do fluxo de vento nas zonas superiores do edifício [37], que são as zonas onde precisamente se verificam uma maior disparidade entre os resultados obtidos.

5.3 Aplicação do método C-FD-E para o estudo do efeito da aplicação de uma cornija sobre o padrão de molhagem de um edifício

Hangan [37] com recurso ao método C-FD-E, estudou a eficiência da implantação de uma cornija num edifício de baixa altura. O objectivo foi determinar até que extensão a adopção deste detalhe arquitectónico reduz a chuva incidente. Para o efeito foi modelado um edifício, ao qual se aplicou uma cornija. Foram simuladas duas situações: o edifício sem a cornija e posteriormente com a cornija. A simulação decorreu com uma velocidade do vento $U_{10} = 10$ m/s e $R_h = 11$ mm/h, e foram obtidos os respectivos valores de LIF para ambas as situações. O autor elaborou uma expressão que permite traduzir a eficiência de uma cornija, relacionando os valores de LIF

$$F_z = \frac{(LIF)_{semcornija}}{(LIF)_{comcornija}} \quad (5.9)$$

F_z Factor de eficiência de uma cornija;
 $LIF_{sem\ cornija}$ Factor de influência local sem cornija;
 $LIF_{com\ cornija}$ Factor de influência local com cornija.

Para valores de $F_z > 1$ a cornija reduz a incidência de chuva, para valores inferiores a 1 a sua adopção é considerada prejudicial. Os resultados da experiência de Hangan encontram-se materializados na determinação do factor F_z para cada zona do edifício (Figura 5.5).

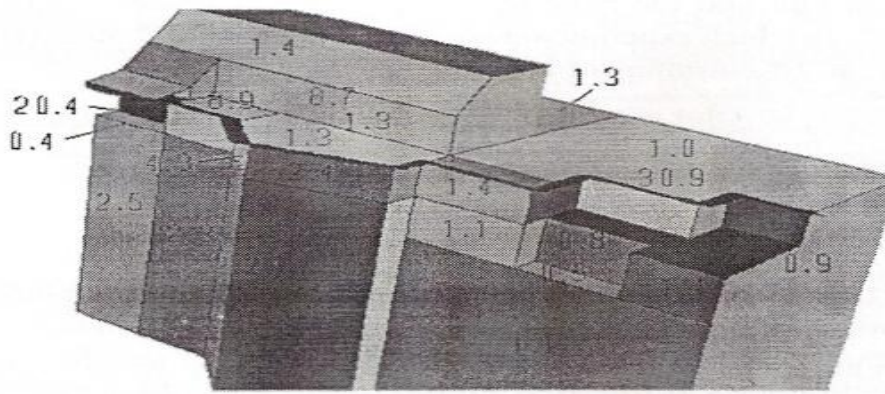


Figura 5.5 - Factor de eficiência da cornija (F_z) para a geometria do edifício [37]

Os resultados apontam de uma forma generalizada para um efeito benéfico da introdução da cornija. As zonas imediatamente abaixo da cornija registam menor deposição de chuva incidente, com factores F_z a variar entre 1,4 e 4,3. A única zona que apresenta evidente desempenho inferior é a que se localiza na varanda imediatamente abaixo da cobertura, com $F_z=0.4$.

5.4 Método CFD na validação do método da projecção do cosseno

Baseados em simulações numéricas para um modelo de edifício cúbico de pequena dimensão, Blocken e Carmeliet [14] sujeitaram este edifício a 4 configurações diferentes de incidência de vento (0° , 22.5° , 45° e 67.5°), onde os 0° configuram a situação de vento a actuar na perpendicular ao edifício. Foram produzidas as respectivas cartas de incidência e elaborado um gráfico traduzindo o erro para cada uma das orientações em função de R_h e de U_{10} (Figura 5.6)

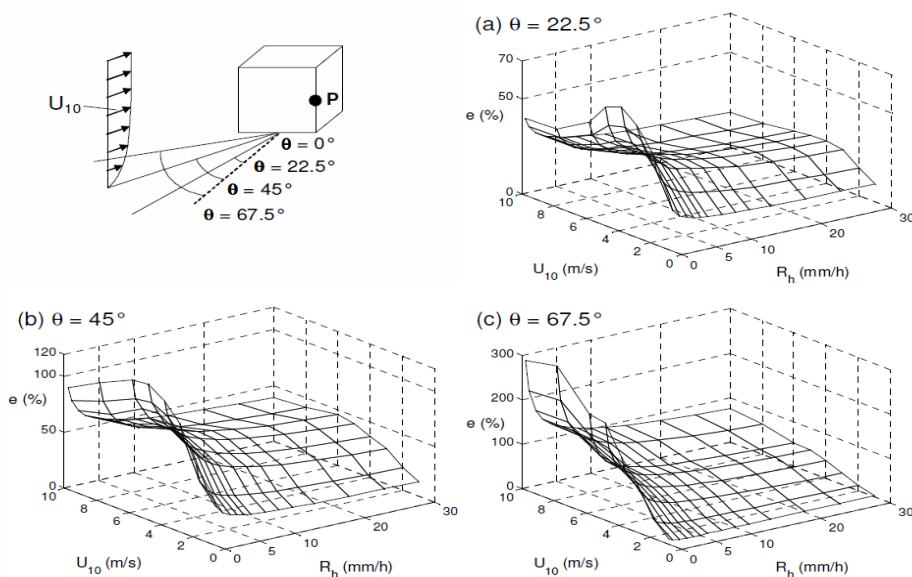


Figura 5.6 - Representação gráfica dos erros introduzidos pelo método da projecção do cosseno num ponto P da fachada exposta ao vento de um edifício modelado em computador [14]

As seguintes observações foram retiradas:

1. Para $\theta = 22,5^\circ$, mesmo sendo um desvio relativamente pequeno à normal do edifício foram encontrados erros até a um total de 30%.
2. Para $\theta = 45^\circ$, os bordos superiores apresentaram um desvio pouco significativo, contrastando com a parte inferior da fachada do edifício.
3. Para $\theta = 67,5^\circ$ verificaram-se erros generalizados em toda a área da fachada com particular incidência nos cantos superiores.

Blocken e Carmeliet confirmam que não foi possível levar a cabo uma validação desta projecção. Acrescentam ainda que estes erros poderão ser ainda maiores com o incremento da complexidade geométrica do edifício, pelo que se aguarda por futuros desenvolvimentos acerca deste tema.

6 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE CÁLCULO PARA CHUVA INCIDENTE EM EDIFÍCIOS

Ainda que o método baseado na análise com recurso a CFD seja bastante fiável e produza os resultados mais fidedignos entre todos os métodos até agora analisados, no entanto revela-se dispendioso e consumidor de recursos. É então fundamental obter conclusões sobre a fiabilidade e condições de aplicabilidade dos resultados produzidos pelos métodos semi-empíricos. Na sequência desta questão Blocken e Carmeliet [20] elaboraram um trabalho comparativo entres os três métodos.

Sendo actualmente os modelos de cálculo mais utilizados para o estudo de chuva incidente o modelo CFD, a ISO 15927-3 e a relação de chuva incidente proposta por Straube e Burnett (SB) foi conduzido um ensaio comparativo cujo objecto principal foi a obtenção do coeficiente de chuva incidente α para a fachada exposta ao vento para cada um dos três métodos. O estudo foi conduzido no sentido de apurar a capacidade de cada um dos modelos em reflectir o feito bloqueador do vento e variação de R_h . Para o estudo apenas foi considerada a situação de vento perpendicular à fachada, configurando uma situação em que $\cos(\theta) = 0$. Para cada um dos métodos os valores teóricos para o coeficiente α são os seguintes:

1) CFD

$$\alpha = \frac{\eta \cdot R_h^{0.12}}{U_{10}} \quad (6.1)$$

α Coeficiente de chuva incidente;
 η Rácio de incidência;
 R_h Intensidade da precipitação num plano horizontal (mm/h);
 U_{10} Velocidade do vento a 10 m de altura (m/s).

2) ISO 15927-3

$$\alpha = \frac{2}{9} \cdot C_r \cdot C_t \cdot O \cdot W \quad (6.2)$$

α Coeficiente de chuva incidente;
 C_r Coeficiente de rugosidade;
 C_t Coeficiente de topografia;
 O Factor de Obstrução;
 W Factor de parede.

3) SB

$$\alpha = DRF \cdot RAF \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\beta \cdot R_h^{0.12} \quad (6.3)$$

α Coeficiente de chuva incidente;
 DRF Factor de deposição de chuva;

RDF	Factor de deposição de chuva;
z	Altura [m];
β	Factor exponencial;
R_h	Intensidade da precipitação num plano horizontal (mm/h);

Foram seleccionadas quatro tipologias básicas de edifícios representativas de tipologia comuns do parque habitacional. Os autores optaram pela não inclusão de qualquer espécie de detalhes nas fachadas a fim de reduzir a complexidade do estudo. As tipologias usadas são as seguintes (Figura 6.1).

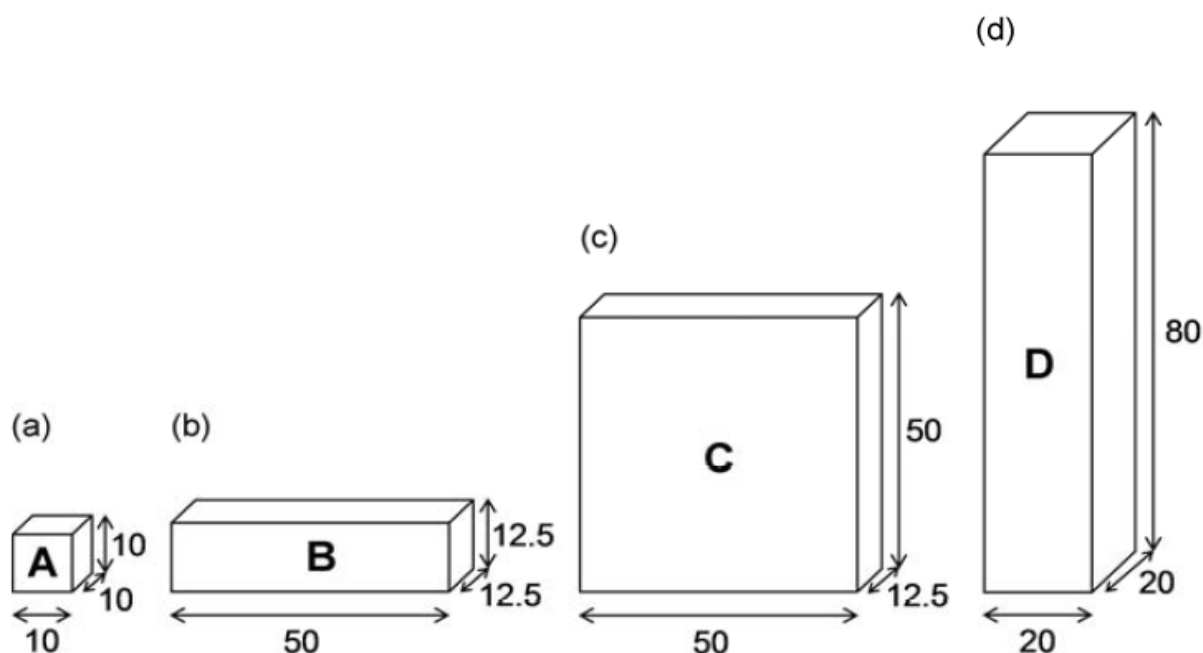


Figura 6.1 - Tipologias de edifícios em estudo [20]

As condições meteorológicas idealizadas foram consideradas estacionárias: velocidade do vento $U_{10}=10$ m/s, direcção do vento a 10 metros de altura ϕ_{10} perpendicular à fachada.

Dado que os estudos com recurso a CFD foram já alvo de estudos de validação, estes foram tidos como o parâmetro de comparação para os dois restantes métodos segundo os seguintes critérios: capacidade de traduzir o efeito bloqueador do vento sobre o coeficiente α ; capacidade de traduzir a variação do coeficiente em função da intensidade de precipitação horizontal R_h .

A envolvente aos edifícios configura uma situação isolada, implantados numa superfície plana de relva com rugosidade uniforme ($Z_o=0.03$ m). Dado que na ISO não está previsto esta situação, este valor foi obtido por interpolação entre os valores de 0.01m e 0.05m. Para a análise em CFD foram aplicados os procedimentos já anteriormente descritos nesta dissertação. A título de exemplo nas figuras seguintes (Figura 6.2 e Figura 6.3) estão presentes os resultados para duas das tipologias, B e D. Os gráficos traduzem a variação de α em função da altura z na fachada em três circunstâncias diferentes, sujeitos a três intensidades de R_h . São igualmente apresentados os resultados no centro e na borda direita da fachada. Os valores SBmax e SBmin reportam-se aos valores máximos e mínimos do factor RDF.

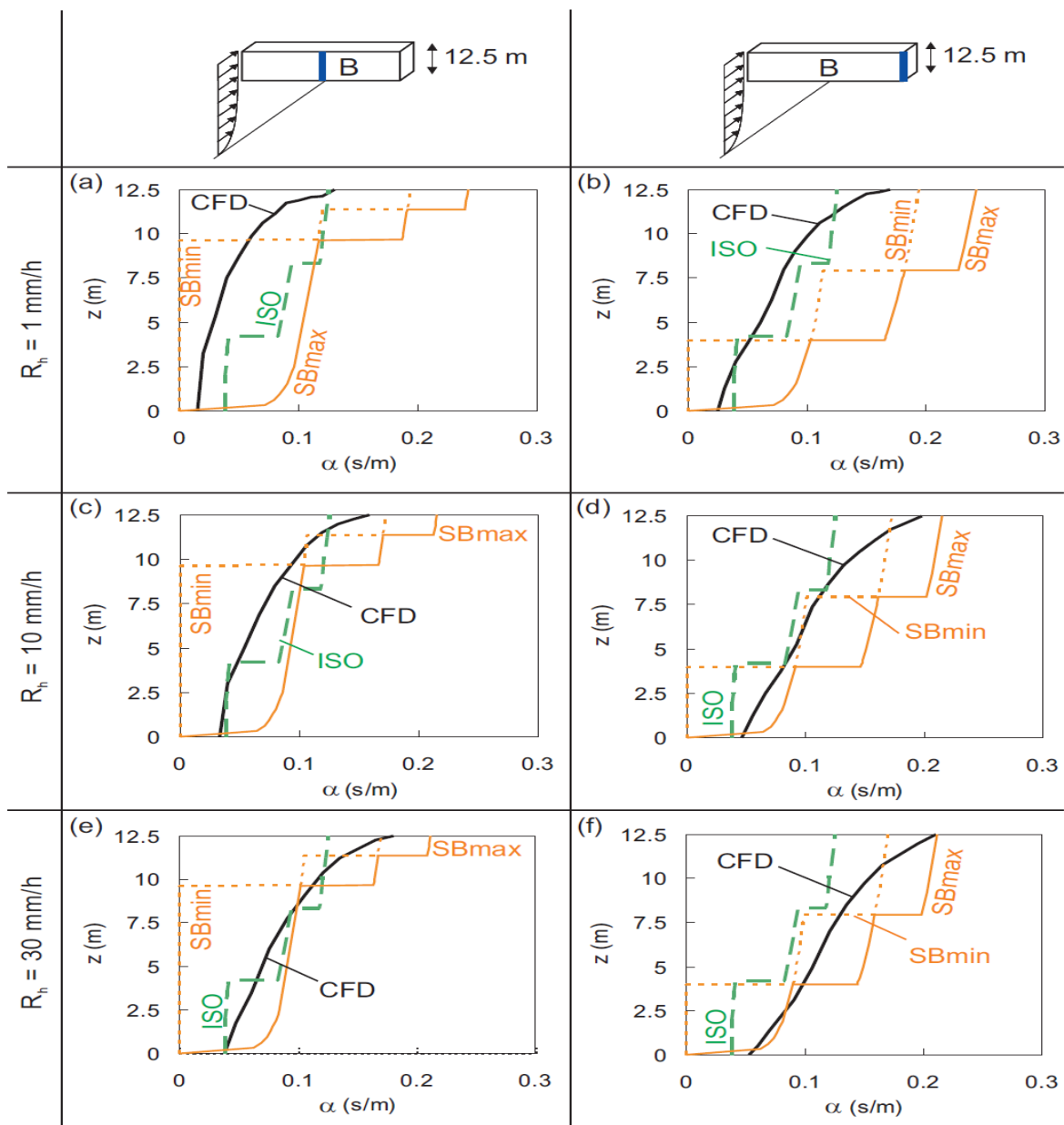


Figura 6.2 - Variação de α com a altura para três intensidades de R_h , Tipologia B [20]

Excluindo a linha média para $R_h = 1 \text{ mm/h}$ e a linha da borda para $R_h = 30 \text{ mm/h}$, a ISO consegue uma boa aproximação de resultados ao CFD. Para $R_h = 1 \text{ mm/h}$ e nas seções superiores e de borda o método SB apresenta previsões algo sobrestimadas. Para os níveis de $R_h = 10$ e 30 mm/h as previsões indicam boa consonância com o CFD.

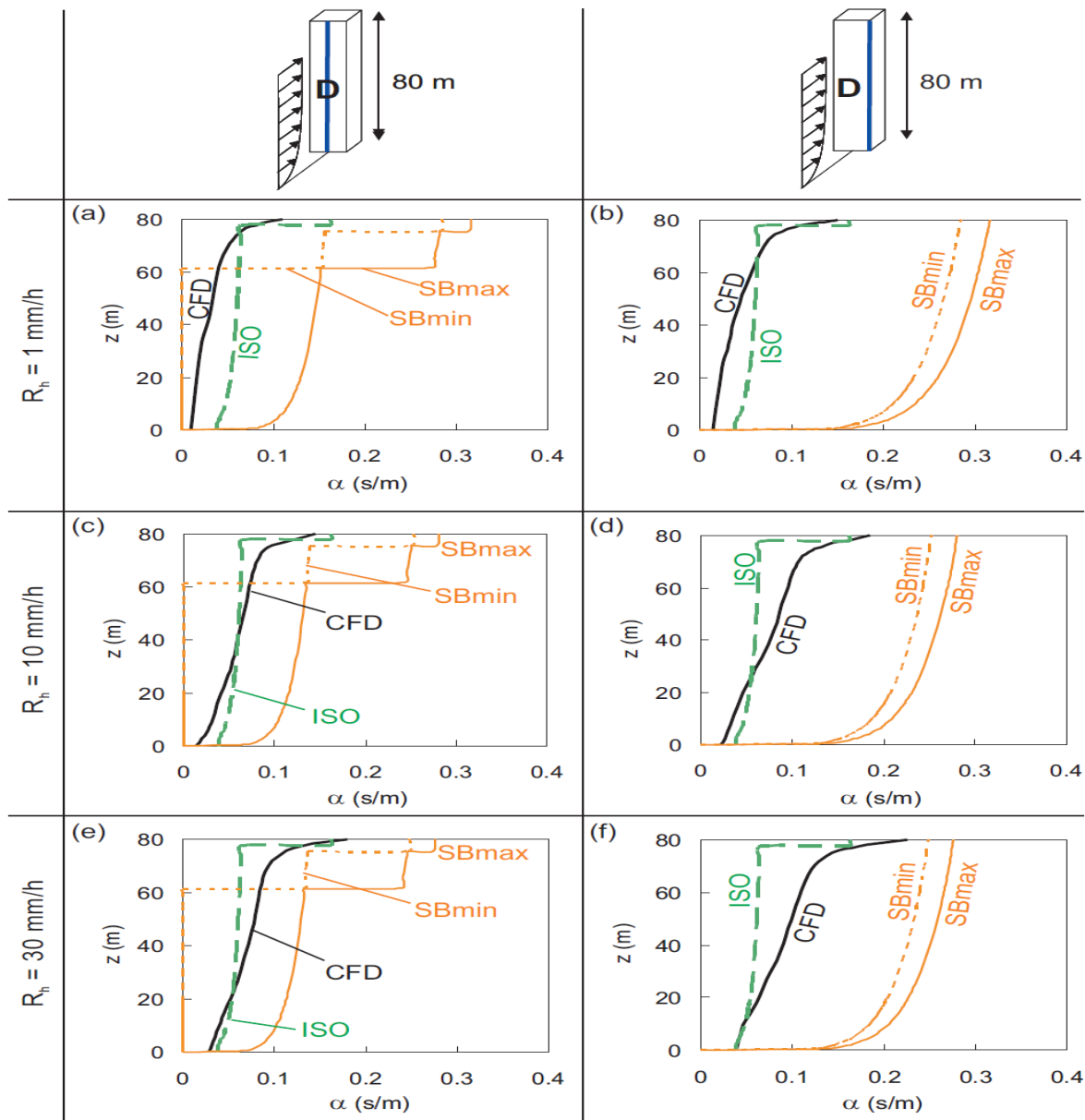


Figura 6.3 - Variação de α com a altura para três intensidades de R_h . Tipologia D [20].

A norma ISO consegue razoáveis aproximações aos resultados do modelo CFD, apresentando no entanto apreciáveis subestimativas para valores de $R_h=30$ mm/h. O método SB revela um desfaseamento considerável apresentando valores muito excessivos em todas as circunstâncias de R_h e altura na fachada.

6.1 Análise do efeito bloqueador do vento

Para ter em conta o efeito bloqueador do vento que é apenas visível nos resultados com recurso a CFD, os autores recorreram ao parâmetro factor de escala do edifício BSL (Building Scale Length) proposto por Wilson em 1989 [63]. Este efeito tem em conta a perturbação contracorrente do fluxo de vento pela presença do edifício e consequente descida da componente a favor do vento da velocidade.

O factor BSL relaciona o binómio altura/comprimento da fachada para obter resultados que reproduzam este fenómeno.

$$BSL = (B_l \cdot B_s^2)^{1/3} \quad (6.4)$$

- BSL Factor de escala do edifício;
 B_l Maior dimensão da fachada exposta ao vento (m);
 B_s Menor dimensão da fachada exposta ao vento (m).

Na figura seguinte encontram-se os resultados já ponderados com este factor.

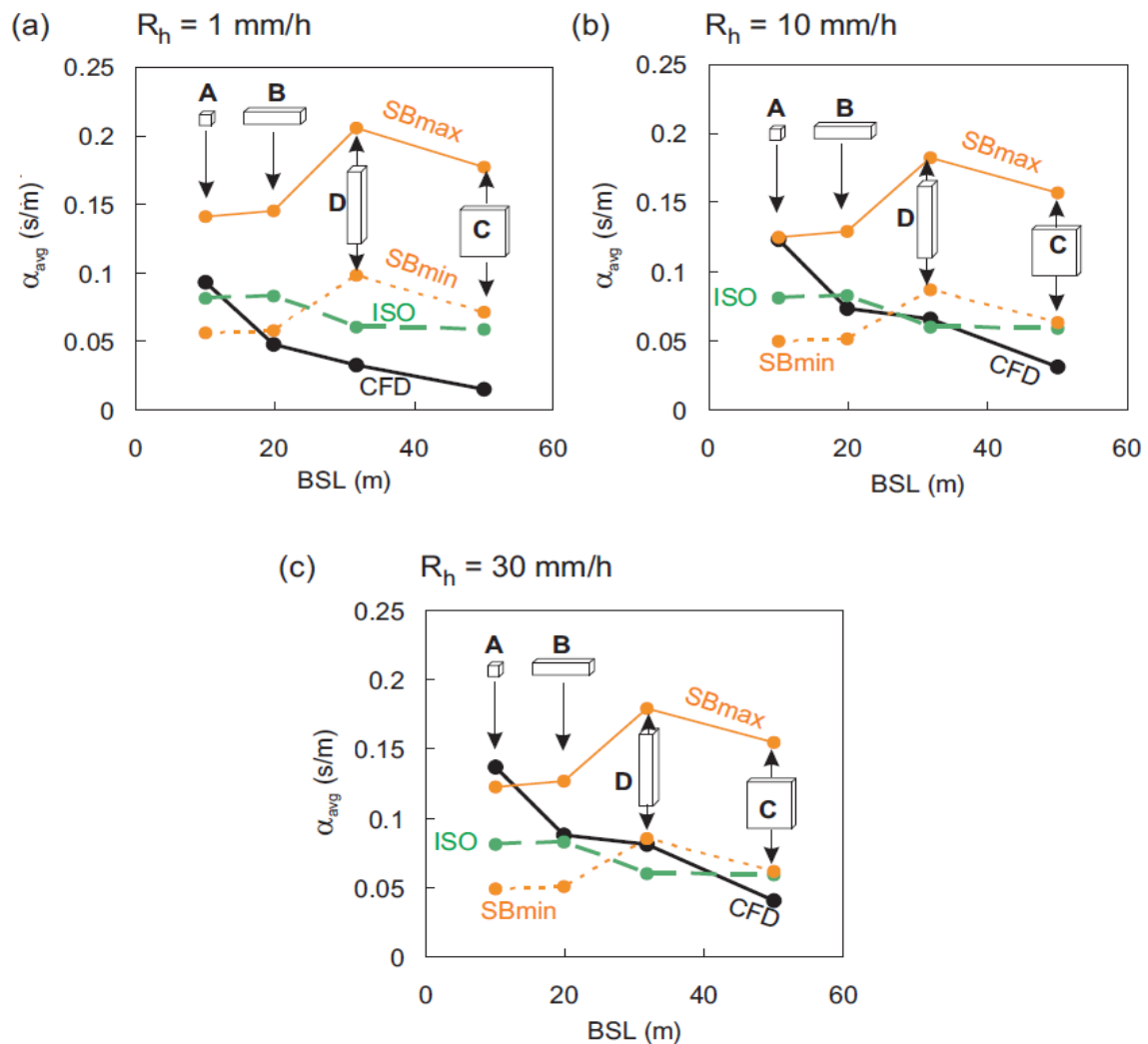


Figura 6.4 - Variação do coeficiente α em função do factor BSL [20].

Os autores do estudo apontam as seguintes conclusões retiradas relativamente ao uso do factor BSL:

1. Para o modelo de CFD, o coeficiente α_{avg} diminui com o aumento de BSL, estando de acordo com os pressupostos do efeito bloqueador do vento
2. No modelo SB, α é significativamente maior para a torre que para os dois edifícios mais baixos. Os resultados indiciam que neste modelo o coeficiente está apenas relacionado com a altura do edifício negligenciando os efeitos do comprimento.

3. O método ISO apresenta apenas uma diminuição de α_{avg} na comparação entre os dois edifícios mais baixos com os mais altos. A mesma tendência não é observável relativamente ao binómio altura/comprimento, deixando antever que apenas a altura tem influência sobre α .

Por fim os resultados de α_{avg} foram ainda expressos em termos de variação de R_h para as 4 tipologias, Figura 6.5.

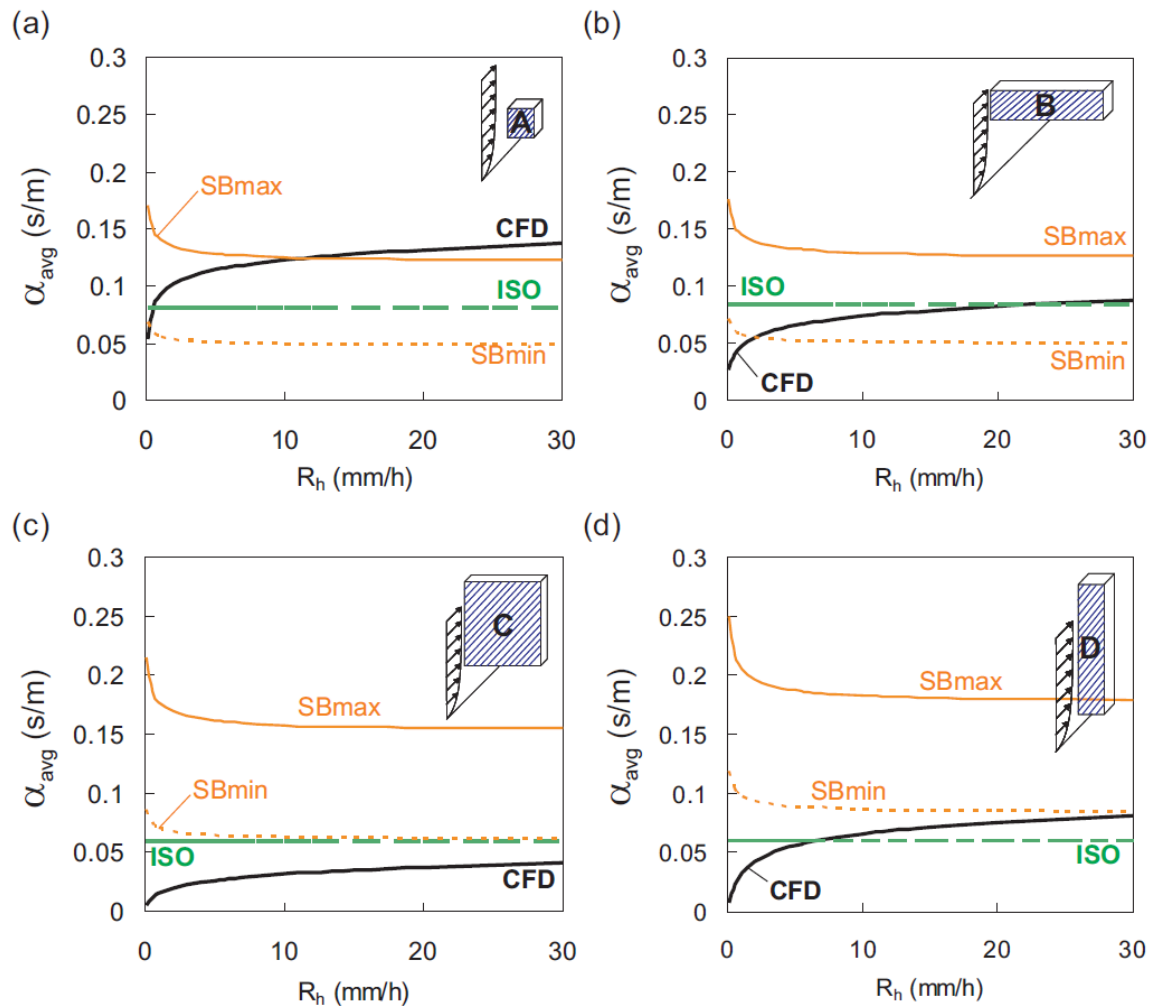


Figura 6.5 - Variação de α em função de R_h para as 4 tipologias [20]

O modelo CFD indica um crescimento de α sempre que aumenta R_h . A variação de α parece revelar uma total independência do aumento de R_h , fora deste modelo. Já o modelo SB apresenta uma tendência inversa. As diferenças do coeficiente entre os 3 modelos são tanto maiores quanto menor é R_h . O modelo ISO consegue uma razoável aproximação ao CFD nas configurações B e D.

Os autores do estudo assinalam como conclusões mais representativas da experiência as seguintes:

1. Apenas o método CFD apresenta um incremento de α relacionado com o incremento de R_h . Nem o modelo SB nem a ISO conseguem traduzir esta tendência.
2. O efeito bloqueador do vento apenas está patente no modelo de CFD. Como acima mencionado este efeito implica uma relação entre a altura e o comprimento da fachada. Nos modelos ISO e SB apenas a altura parece ter influência nos resultados obtidos.

3. Tanto o modelo ISO como o CFD são aplicáveis às quatro configurações. O modelo SB encontra-se limitado às situações em que o comprimento da fachada é muito maior que a altura ou a situação inversa.
4. A gama de intervalos de RDF para o método SB dá azo a uma elevada dispersão dos resultados, sendo que a transição entre os resultados é abrupta, com a consequente perda de qualidade de avaliação.

Ainda no mesmo âmbito comparativo entre estes três modelos, Blocken e Carmeliet [21] aplicam-no a um caso real, para o efeito e como caso prático foi seleccionada uma torre (com 34.5m de altura) de um edifício monumento, mais concretamente a Hunting Lodge St. Hubertus (Figura 6.6) na Holanda. Esta torre apresenta algumas particularidades geométricas que como se verá mais adiante expõem algumas das limitações mais evidentes dos dois métodos semi-empíricos. Para obter as medições experimentais foi instalado um sistema de medição composto por um anemómetro sónico (registra U_{10} e ϕ_{10}), a precipitação em superfície horizontal (R_h) foi medida por um udómetro abrigado por um vidro protector. Na fachada das torres foram instalados pluviómetros com uma área de recolha de $0.2 \times 0.2\text{m}^2$ e executados de acordo com as recomendações mencionadas no ponto 3.7. A maior parte dos dispositivos foi instalada na direcção sudoeste, dado ser esta a direcção predominante do vento. Os dados foram recolhidos em períodos de 1 minuto e feita a sua média para intervalos de 10 minutos.

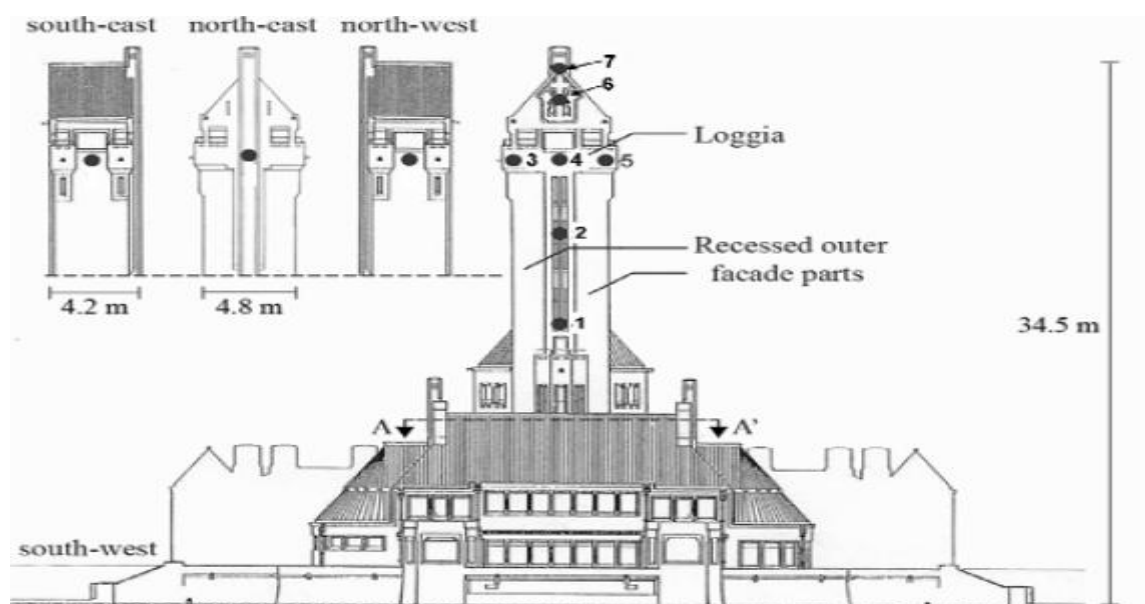


Figura 6.6 - Fachada Sudoeste do edifício Hunting Lodge St. Hubertus [21]

As simulações de CFD foram feitas com diferentes espectros de velocidade do vento e precipitação em superfície vertical, mais concretamente para valores de $U_{10} = 1, 2, 3, 5$ e 10 m/s e para $R_h = 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25$ e 30 mm/h . A carta de incidência η e o coeficiente α foram calculados para cada ponto na fachada com uma resolução de $0.08 \times 0.08 \text{ m}^2$ para todas as possíveis combinações de U_{10} e R_h , os valores de α teóricos para todos os modelos são usados em conjunto com a seguinte expressão para calcular a intensidade de chuva incidente para cada intervalo:

$$R_{wdr} = \alpha \cdot U_{10} \cdot R_h^{0.88} \cdot \cos \theta \quad (6.5)$$

- R_{wdr} Intensidade da chuva incidente (mm/h);
 α Coeficiente de chuva incidente;
 U_{10} Velocidade do vento a 10 m de altura (m/s);
 R_h Intensidade da chuva em superfície horizontal (mm/h);
 θ Ângulo entre a direcção do vento e a normal à fachada.

Os valores teóricos de α para o método ISO e SB foram calculados usando as equações (6.2 e (6.3). Realça-se o facto de nenhum propor factor de parede (W) ou RDF que se enquadrem no perfil geométrico da fachada em estudo. No método SB foram adoptados os valores do esquema da situação que configura $H \gg W$ e na norma ISO o factor W adoptado foi o correspondente á terceira linha da Figura 4.9, onde se prevê um edifício de vários com cobertura plana. Estas duas circunstâncias constituem normalmente apenas aproximações sofríveis á realidade.

Para cada modelo foi posteriormente calculada a quantidade acumulada de chuva incidente S_{wdr} , multiplicando R_{wdr} pelo respectivo intervalo temporal

$$S_{wdr} = \sum (R_{wdr} \cdot \Delta T) \quad (6.6)$$

- S_{wdr} Quantidade acumulada de chuva incidente (mm);
 R_{wdr} Intensidade da chuva incidente (mm/h);
 ΔT Intervalo temporal;

Uma vez mais os dois métodos semi-empíricos mostram as suas limitações face ao CFD. Em primeiro lugar a geometria do edifício não se enquadra nem nos modelos propostos pela ISO nem SB. O método ISO revelou-se incapaz de traduzir a variação de α na direcção da largura da fachada. O factor RDF do método SB ao adoptar apenas intervalos de valores, ao invés de valores discretizados, origina ambiguidades em algumas partes da fachada, conduzindo a uma maior imprecisão. Mais uma vez apenas os modelos em CFD conseguiram traduzir o efeito bloqueador do vento

7 CONCLUSÕES

Ao longo desta dissertação foram analisadas as três principais vertentes de investigação no tema da quantificação da chuva incidente: (i) os métodos experimentais; (ii) os métodos semi-empíricos e (iii) os métodos numéricos. Os métodos experimentais continuam a ser o principal elemento de recolha de dados, pelo que são indissociáveis das outras duas vertentes de investigação. Em termos de aparelhos de medição da quantidade de chuva incidente foram analisados diversos tipos de pluviómetros. Em virtude dos resultados obtidos, conclui-se que o modelo tipo TUE-II é o mais adequado e preciso até à data. A incorporação do limpador de superfície na sua área de recolha minora grandemente os erros decorrentes da água aderente. Este aspecto é uma das principais fontes de erros destes tipos de dispositivos. A correlação feita entre os aparelhos TUE-I e TUE-II demonstra resultados favoráveis em relação ao segundo, que recolhe aproximadamente o dobro da água. Relativamente ao material que deve ser empregue no revestimento da área de recolha destes equipamentos, contrariamente ao expectável, os materiais hidrófugos não se revelaram adequados, sendo recomendável o uso de outros materiais, tais como folha de vidro, ou em alternativa, PMMA ou PVC. Também no sentido de minorar os erros dos ensaios concluiu-se que a adopção de reservatórios no interior das paredes e a restrição da sua ventilação permitem mitigar os efeitos provenientes da evaporação da água. Para os pluviómetros equipados com recipientes basculantes foi descrita uma fórmula numérica para a quantificação do erro total. A respeito da influência de dois fenómenos meteorológicos distintos como são o tipo cumuliforme e o estratiforme não foi ainda possível produzir resultados conclusivos.

Relativamente aos equipamentos responsáveis pela medição de chuva em superfície horizontal, foram analisados três tipos de aparelhos: udómetros de recipiente basculante, udómetros de capacitância e disdrómetros. A comparação entre os dois primeiros é favorável ao segundo, udómetros de capacitância, em virtude de proporcionarem um registo contínuo de dados e com capacidade superior de resolução. Sendo estes aparelhos particularmente susceptíveis aos efeitos do vento, conclui-se pela necessidade da construção de uma barreira protectora que force que o fluxo de vento em torno do udómetro ocorra na direcção o mais horizontal possível, minorando a sua deflexão. Paralelamente foi analisado um aparelho relativamente novo, o disdrómetro, que recorre a mecanismos electrónicos de funcionamento. O seu uso faculta o acesso a um espectro mais alargado de informações, permitindo fazer a distinção entre gotas líquidas e outros tipos de partículas. Permite também monitorizar e registar o tamanho e velocidade das partículas incidentes. Apesar das aparentes vantagens do uso do disdrómetro relativamente aos udómetros, um estudo comparativo efectuado na Escócia aponta conclusões em sentido oposto. Nesse caso particular a performance do disdrómetro foi inferior, pelo que se continua a sugerir o uso de udómetros, quer na vertente de recipientes basculantes quer de capacitância com auto-sifonagem. Foi também mencionada a existência de um projecto de investigação com disdrómetro sónico, mais económico que qualquer dos dispositivos anteriores, o qual por ainda se encontrar em fase de testes, não constitui de momento uma solução viável.

Salienta-se a limitada aplicabilidade do método experimental, na medida em que medições efectuadas em fachadas de um edifício, dificilmente poderão ser extrapoladas para outras localizações. Destaca-se também a relevância dos ensaios com recurso a túneis de vento, sendo uma importante fonte experimental para fornecer contributos na investigação de padrões de molhagem e no estudo da influência de diversas concepções arquitectónicas sobre esses padrões.

O DRI tem como principais objectivos fornecer indicações preliminares para a indústria sobre o grau de severidade meteorológica a que uma dada edificação estará exposta. Ainda pode ser útil para

enquadrar procedimentos experimentais acerca das condições a simular sobre um modelo de teste adequado ao meio em que se insere. A sua possível integração num modelo híbrido, conjugado com o CFD, poderá ser um futuro desenvolvimento nesta área. Foi alvo de análise a última versão ISO 15927-3 e comparada com o procedimento proposto por Straube e Burnett. Analisados os dois procedimentos o modelo ISO constitui-se como aquele que melhor consegue implementar e traduzir a influência dos parâmetros relevantes, com mais ênfase ao aspecto da topografia. No entanto ambos os métodos exibem limitações consideráveis, que são particularmente salientes quando comparados com os métodos numéricos.

Os métodos numéricos sob a forma de CFD, assumem-se como uma técnica globalmente superior aos dois métodos semi-empíricos. Em primeiro lugar são aplicáveis a todo o tipo de configurações geométricas, onde os métodos semi-empíricos apresentam apreciáveis limitações. Os métodos numéricos CFD permitem uma melhor implementação dos parâmetros influentes, especialmente ao nível da modelação do fluxo de vento em torno da envolvente do edifício. Este método consegue ainda reproduzir o efeito bloqueador do vento, sob influência do binómio altura e comprimento da fachada, ao contrário do que se verifica nos processos semi-empíricos, onde apenas a altura parece ter influência. Estes procedimentos revestem-se de um grau de complexidade elevado, com custos de implementação mais elevados, daí decorrendo uma limitação à sua extensa aplicação. Os métodos híbridos onde se combinam os CFD com DRI e ensaios em túneis de vento constituem-se como uma alternativa válida ainda que relativamente inexplorada.

7.1 Propostas para futuros desenvolvimentos

A continuação de ensaios experimentais revela-se como uma componente essencial, sendo uma importante fonte de dados para futura calibração dos restantes métodos. Com respeito aos aparelhos de medição, apesar de terem sido feitos grandes progressos na sua investigação, nos quais resultaram um conjunto de recomendações de boas práticas para a sua construção, continua a não existir nenhum documento normativo que efectivamente estabeleça regras para a sua elaboração. Como consequência, continuarão a existir tantos equipamentos quantos os investigadores a trabalhar no tema. Ainda relativamente aos aparelhos, no caso particular dos que medem a precipitação em superfície horizontal, devem ser conduzidos mais ensaios comparativos entre os udómetros e os disdrómetros, a fim de aferir aquele que mais se adequa tema cada caso. O surgimento do disdrómetro do tipo acústico, de baixo custo, afigura-se como uma alternativa promissora e que permitirá de certa forma alargar o número de contribuições experimentais. Sugerem-se ainda futuras investigações no sentido de apurar as diferenças nos padrões de molhagem de edifícios, decorrentes de fenómenos cumuliformes e estratiformes. Seria igualmente benéfico a continuação dos estudos em túneis de vento, que se revelam importantes para a avaliação do impacto dos detalhes arquitectónicos sobre os padrões de molhagem. Lamentavelmente, não se encontram disponíveis estruturas deste género em Portugal.

Ao nível dos métodos semi-empíricos a norma ISO 15927-3 apresenta-se como um produto com um desempenho bastante aceitável. O método SB, comparativamente à norma ISO, apresenta determinadas limitações, recomenda-se que no parâmetro RDF, sejam adoptadas especificações idênticas às da norma ISO. Em primeiro lugar o parâmetro RDF apenas é aplicável a três configurações geométricas de edifícios, pelo que se sugere a sua extensão a um leque de configurações mais alargado. Igualmente se sugere a adopção de uma campanha experimental para obter valores discretizados na fachada, à semelhança da norma ISO. Como concluído anteriormente os

valores de RDF, apresentados sob a forma de intervalos, introduzem elevadas discrepâncias nos resultados obtidos.

No capítulo dos métodos numéricos, o uso dos procedimentos baseados em CFD revelaram-se até à data uma ferramenta mais potente e fiável no estudo dos efeitos da chuva incidente. No entanto, para além de serem trabalhosos, exigem grande componente financeira para a sua implementação. O método híbrido CFD-DRI tendo sido já validado, apresenta resultados promissores pelo que se sugere a continuação desta linha de investigação. Também a integração de dados experimentais, provenientes de ensaios em túneis de vento, nos modelos CFD permite de certa forma simplificar o seu processo. Tudo aponta para que novos desenvolvimentos científicos sobre esta área passarão por uma crescente integração dos métodos semi-empíricos em conjugação com os numéricos.

Referências Bibliográficas

- 1 – AMERICAN SOCIETY CORPS OF ENGINEERS STANDARD - ASCE 710 – *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*. Reston, ASCE, 2010.
- 2 – BASKARAN, A.; BROWN, W.C. – *Dynamic Evaluation of the Building Envelope for Wind and Wind-Driven Rain Performance*. Journal of Thermal Insulation and Building Envelope, nº 18, págs. 261-275. Saga Publications, 2006.
- 3 – BEGUIN, D. – *Étude pour la France du risque de mouillage par la pluie des parois verticales des constructions*. Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Cahier 2106. Paris, 1986.
- 4 – BENGHUIJS, W. *et al.* – *Field test of low cost disdrometer in a tropical environment*. TU Delft, s/d.
- 5 – BEST, A.C. – *The Size Distribution of Raindrops*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume 76, págs. 16-36. Royal Meteorological Society, 1950.
- 6 – BLAZEK, J. – *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Amesterdão, Elsevier, 2001.
- 7 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *Driving rain on building envelopes- I: numerical estimation and full-scale experimental verification*. Journal of Thermal Env. & Building Science, nº 24(1), págs. 61-85. Sage Publications, 2000.
- 8 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *Driving rain on building envelopes-II: representative experimental data for driving rain estimation*. Journal of Thermal Environmental & Building Science, nº 24(2), págs. 89-110, 2000. Sage Publications, 2000.
- 9 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *Spatial and temporal distribution of driving rain on a low rise building*. Wind and Structures, Volume 5, págs. 441-462. Techno-Press, 2002.
- 10 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *A simplified approach for quantifying driving rain on buildings*. Proceedings of the Conference Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX. 2004.
- 11 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *A review of wind-driven rain research in building science*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 92 (13), págs. 1079-1130. Elsevier, 2004.
- 3 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *High Resolution wind driven rain measurements on a low-rise building- experimental data for model development and model validation*. Journal of Wind and Industrial Aerodynamics Engineering, nº 93, págs. 905-928. Elsevier, 2005.
- 13 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *On the accuracy of wind driven rain measurements on buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 41, págs. 1798-1810. Elsevier, 2006.
- 14 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *On the validity of the cosine projections in wind-driven rain calculations on buildings*. Building and Environment, nº 41(9), págs. 1182-1189. Elsevier, 2006.

- 15 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *Validation of CFD simulations of wind-driven rain on a low-rise building facade*. Building and Environment, nº 42(7), págs. 101-127. Elsevier, 2007.
- 16 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *Guidelines for the required time resolution of meteorological input data for wind-driven rain calculations on buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , nº 96(5), págs. 621-634. Elsevier, 2008.
- 17 – BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. – *Overview of three state-of-the-art wind-driven assessment models and comparison based on model theory*. Building and Environment, Volume 45, nº 3, págs 691-703. Elsevier, 2010
- 18 – BLOCKEN, B. *et al.* – *Full-scale driving rain simulation in the Jules Verne climatic wind tunnel*.2000
- 19 – BLOCKEN, B. *et al.* – *A combined CFD-HAM approach for wind-driven rain on building facades*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 95, págs. 585-607. Elsevier, 2007.
- 20 – BLOCKEN, B. *et al.* – *Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades*. Atmospheric Environment, Volume 44, nº 14, págs. 1714-1725. Elsevier, 2010.
- 21 – BLOCKEN, B. *et al.* –*Intercomparison of wind-driven rain models based on a case study with full scale measurements*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 99, nº 4, págs. 448-549. Elsevier, 2011.
- 22 – BRE – *The assessment of wind over topography*. Building Research Establishment, nº 283. Reino Unido, 1984.
- 23 – BRITISH STANDARDS INSTITUTE –DD 93–*Methods for assessing exposure to wind-driven rain*. Londres, British Standards Institution, 1984.
- 24 – BRITISH STANDARDS INSTITUTE – BS 8104 – *Code of practice for assessing exposure of walls to wind driven rain*. Londres, British Standards Institution, 1994.
- 25 – CANADIAN COMMISSION ON BUILDING AND FIRE CODES – *National Building Code Volume 1*. Ottawa, National Research Council of Canada, 2005
- 26 – CHAND, I.; BHARGAVA, P.K. – *Estimation of driving rain index for India*. Building and Environment, Volume 37, nº 5, págs. 549-554. Elsevier, 2002.
- 27 – CHOI, E.C.C. –*Numerical simulation of wind-driven rain falling onto a 2-D building*. Asia Pacific Conference on Computational Mechanics, págs 1721-1728. Hong Kong, 1991.
- 28 – CHOI, E.C.C. - *Simulation of wind driven rain around a building*. . Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 46 e 47, págs. 721-729. Elsevier, 1993.
- 29 – CHOI, E.C.C. - *Determination of wind driven rain intensity on building faces*. . Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 51, págs. 55-69. Elsevier, 1994.

- 30 – CHOI, E.C.C. – *Wind driven rain on buildings facades and the driving rain index*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 53, págs. 1-17. Elsevier, 1999.
- 31– CHOI, E.C.C. – *Wind-driven rain and driving rain coefficient during thunderstorms and non-thunderstorms*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 89(3-4), págs. 293-308. Elsevier, 2001.
- 32 – DE JONG, Stijn – *Graduation Stijn de Jong*. Delft, 2010.
- 33 – DINGLE, A.N.; LEE, Y. – *Terminal fall speeds of raindrops*. Journal of Applied Meteorology, Volume 11, págs. 877-879. Agosto, 1972.
- 34 – ERCOFTAC – *Special interest group on quality and trust in industrial CFD-Best Practice Guidelines*. Bruxelas, ERCOFTAC, 2000.
- 35 – EUROPEAN COMITEE FOR STANDARDISATION (CEN) – *Hygrothermal performance of buildings- Calculation and presentation of climatic data- Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*. CEN, 1997.
- 36 – GIONGO, M. *et al.* – *Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC : índices de chuva dirigida e métodos semi empíricos*. Ambiente Construído, Volume 11, nº 1, págs. 7-23. . Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído , 2011
- 37 – HANGAN, H. – *Wind-driven rain studies. A C-FD-E approach*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, nº 81, págs. 323-331. Elsevier, 1999.
- 38 – HENRIQUES, F.M.A. – *Quantification of wind driven rain on vertical surfaces*. Comunicação à 6th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Japão, Outubro de 1993.
- 39 – HENRIQUES, F.M.A. – *Acção da Humidade em Paredes- Formas de manifestação , Critérios de quantificação e análise de soluções de reparação*. Lisboa, IST, 1992.
- 40 – HOGBERG *et al.* – *A comparison of driving rain measurements with diferent gauges*. Procedures of the 5th Symposium Building Physics in the Nordic countries. Gotemburgo, 1999.
- 41 – HOPPESTAD, S. – *Slagren I Norge*. Norwegian Building Research Institute. Oslo, 1955.
- 42 – INCULET, D.; SURRY, D. – *Simulation of wind driven rain and wetting patterns on buildings*. Canada Housing Information Center, Technical Series, págs 96-213. Canada Mortgage and Housing Corporation, 1995.
- 43 – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 15927-3- *Hygrothermal performance of buildings- Calculation and presentation of climatic data- Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*. Geneva, ISO, 2009.
- 44 – JANSSEN, H. *et al.* – *Wind-driven rain as a boundary condition for HAM simulations: Analysis of simplified modelling approach*. Building and Environment, Volume 42, nº 4, págs. 1555-1567. Elsevier, 2006.

- 45 – JÚNIOR, C.M.M.; CARASEK, H. – *Índices de chuva dirigida direcional e análise de humedecimento em fachadas de edifício multipavimento em Goiânia*. Ambiente Construído, Volume 11, nº 3, págs. 23-27. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2011
- 46 – KRISTENSEN, L. – *The Cup Anemometer*. Riso National Laboratory. Roskilde, 1993.
- 47 – KUMAPERUMAL, A. et al. – *Analyzing wind driven rain on a building façade using the laser precipitation monitor (LPM)*. Glasgow, Centre for Research on Indoor Climate and Health, School of Engineering, Science & Design, Glasgow Caledonian University, s/d.
- 48 – LACY, R.E. – *Climate and building in Britain*. Meteorological Society, Volume 105,
- 49 – LIMA, M.G.; MORELLI, F. – *Mapa brasileiro de chuva dirigida: algumas considerações*. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, nº 6. Florianópolis, 2005.
- 50 – MARSH, P. – *Air and air penetration of buildings*. Lancaster, The Construction Press Ltd, 1977.
- 51 – MUALEM, Y.; ASSOULINE, S. – *Mathematical model for rain drop distribution and rainfall kinetic energy*. Trans American Society of Agricultural Engineering, nº 29(2), págs. 494-500. 1986.
- 52 – NORE *et al.* – *A dataset of wind driven rain measurements on a low rise test building in Norway*. Building and Environment, nº 42(5), págs. 2150-2165. Elsevier, 2007.
- 53 – PAIVA, J. V. – *Humidade nas edificações*. Lisboa, LNEC, 1969.
- 54 – ROUSSEAU, Jacques – *Simulation of wind driven rain and wetting pattern on buildings*. Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, 1999.
- 55 – STRAUBE, John – *Simplified prediction of driving rain on buildings: ASHRAE 160P and WUFI 4.0*. Building Science Digest, nº148. Building Science Press, 2010.
- 56 – STRAUBE, J.; BURNETT, E.F.P. – *Driving rain and masonry veneer*. Proceedings of an ASTM Symposium on water leakage through building facades, págs 73-87. Orlando, 1996.
- 57 – STRAUBE, J.; BURNETT, E.F.P. – *Simplified prediction of driving rain on Buildings*. Procedures of International Building Physics Conference, págs. 375-382. Eindhoven, 2000.
- 58 – STROPPA, D. G. *et al.* – *Measuring contact angles on sessile drop test samples*. Welding Journal. AWS, 2010.
- 59 – SUMNER, G. *et al.* – *Precipitation : Process and Analysis*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume 115, nº 487, págs. 709-710. Royal Meteorological Society, 1988.
- 60 – TANG, W. *et al.* – *Erosion of limestone building surfaces caused by wind driven rain*. Atmospheric Environment, Volume 38, nº 33, págs. 5589-5599. Elsevier, 2004.
- 61 – VAN GIESEN, N. *et al.* – *Affordable acoustic disdrometer: Design, Calibration, Tests*. American Geophysical Union, 2009.
- 62 – VAN MOOK, F.J.R. – *Driving rain on building envelopes*. Ph.D thesis. Buildings Physics Group (FAGO), Eindhoven University of Technology. Eindhoven, Eindhoven University Press, 2002.

63 – WILSON, D. J. – *Airflow around buildings*. ASHRAE Handbook of Fundamentals. 1989

64 – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO-Nº 8 – Guide to meteorological instruments and methods of observation. Geneva, 2008.

65 – www.151.100.120.244/personale/marzano/LabRadioMet.htm (acedido em 25/02/2012).

66 – www.bom.gov.au (acedido em 25/02/2012).

67 – www.novalynx.com (acedido em 25/02/2012).

68 – www.switches-indicators-gauges.seotechnologies.com.au (acedido em 25/02/2012).