

Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas para teste acelerado de degradação

Maria Luiza de S. Rezende^{1,†}

*Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia de Produção
Bairro Universitário, P – 58429-900 Campina Grande, Paraíba, Brasil*

Rute Eires¹, Aires Camões¹, Carlos de Jesus²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P - 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

Entre os principais agentes de degradação em alvenarias externas e seus componentes, a chuva e o vento são considerados responsáveis por até 70% dos casos de infiltração, causando problemas que vão desde problemas estéticos a decomposição de elementos que constituem as fachadas. Apesar dos estudos de erosão se concentrarem na avaliação de blocos de terra, nos elementos a base de cimento Portland, a retirada do hidróxido de sódio livre por lixiviação, aumentando a porosidade, aumenta também a susceptibilidade ao ataque por sulfatos e a carbonatação e, por conseguinte, expõe os compostos cimentícios à decomposição. Por outro lado, o hidróxido de cálcio lixiviado reage com o gás carbônico presente no ar precipitando-se na superfície em forma de crostas brancas, reacção esta denominada de eflorescência. Apesar dos revestimentos protegerem as paredes de intempéries, os rebocos à base de cimento também estão passivos à ocorrência de eflorescência e, por conseguinte, de degradação pela acção de chuvas. Neste trabalho é feita uma breve revisão sobre os ensaios de simulação de chuvas já publicados e, em seguida, apresentada uma proposta de equipamento de ensaio, metodologia para levantamento de dados e validação do teste através da correlação dos parâmetros adoptados com os dados de caracterização de chuvas em Portugal.

Palavras chave: simulador de chuva; erosão; alvenaria.

¹ Professor

[†] Autor da pesquisa (marialuiza.rezende@ufcg.edu.br)

² Engenheiro civil, pesquisador assistente

1. INTRODUÇÃO

Objectivando o estudo da incidência de chuvas dirigidas (chuva associada a velocidade do vento) nas fachadas de edificações, autores têm publicado documentos relatando estudos de caso e métodos de quantificação de índices de exposição, contribuindo assim não só com o avanço da pesquisa nesta área mas também com informações importantes visando contribuir na elaboração de projectos de edificações (Blocken *et al.*, 2010; Rydock, 2007; Lima e Morelli, 2005; Blocken e Carmeliet, 2006).

Considerados responsáveis por até 70% dos casos de infiltração, a chuva e o vento podem causar problemas que vão desde o desgaste aparente, comprometendo a estética das alvenarias externas, ao comprometimento dos materiais que as compõem (Melo Junior e Carasek, 2014). O desgaste das fachadas é dependente das características climatológicas dos locais em que está situada a edificação, logo, o conhecimento prévio das intensidades e direcções segundo as quais as chuvas incidem em maior intensidade, orienta projectistas quanto a escolha de materiais e procedimentos que venham a proteger as fachadas dos efeitos da degradação causada pelas chuvas, aumentando assim vida útil da edificação.

No âmbito da avaliação experimental enquanto sistemas de vedação, o desempenho de alvenarias em relação à permeabilidade e estanqueidade é normatizado (ABNT, 2013; CEN, 1990; CEN, 2011). Porém, no que se refere ao comportamento quando expostas a chuvas, a metodologia de testes propostos (spray tests) por comités de normatização objectivam avaliar a erodibilidade em construções de terra (taipa e blocos de terra comprimidos, estabilizados ou não) (Cid *et al.*, 2011). Tal direccionamento é justificado por se tratar de materiais notoriamente susceptíveis a acção erosiva da chuva. Porém, a crescente tendência actual de aproveitamento de resíduos na fabricação de elementos para alvenarias e argamassas para revestimentos, implica directamente no estudo do desempenho desses novos materiais em condições de uso.

O estudo prévio dos índices de exposição a chuvas dirigidas é uma ferramenta importante, pois, ao indicar o grau de exposição de uma região indica também a necessidade, ou não, da execução de testes de exposição. Para que haja representatividade nos resultados, é necessário que haja correlação entre os parâmetros de exposição em laboratório e as condições climatológicas naturais dificultando o uso de testes de simulação ou de exposição natural, pois, considerando-se o longo tempo de vida útil previsto para vedações verticais externas (ABNT, 2013), exige prolongado tempo de exposição.

Em estudo anterior, Rezende *et al.* (2015) utilizaram o Basic Hydrology System - BHS, fabricado pela *Armfield Corporation, England*, o qual é composto por um conjunto de oito bicos com fluxo de água ajustável e área de exposição de 2 m². Apesar do material testado apresentar resultados coerentes aos esperados, verificou-se que, para simular a precipitação anual de 1300 mm foram necessários 160 minutos, com caudal de 0.02 m³.min⁻¹ distribuída nos 8 bicos. No equipamento proposto por Ogunye e Boussabaine (2002), para simular 10 anos de exposição a chuvas com intensidade de 150 mm.h⁻¹, foram necessárias 120 horas de exposição. Considerando a previsão de vida útil para uma edificação (ABNT, 2013) seriam necessárias 720 horas de exposição ou seja, 30 dias de teste contínuo.

Logo, ensaios acelerados são importantes porém, utilizando padrões coerentes com as características pluviométricas da região para a qual se destina o material a ser testado. Os ensaios de envelhecimento acelerado realizados em laboratórios simulam a acção de agentes de degradação em intensidades muito superiores às esperadas em condições reais de uso (John e Sato, 2006). Porém entendemos que, a intensidade total do agente de degradação aplicado deve ser correspondente à esperada, ao final de um específico período de tempo.

O uso dos testes prescritos em normas internacionais, tomando-os como testes acelerados, torna-se bastante complexo pelo fato de que os parâmetros são específicos para o

país ou região em que são adoptados (Tabela 1), dificultando assim relacioná-los ou adaptá-los a determinada precipitação ou intensidade, pois, excetuando-se o teste preconizado na norma indiana IS 1725 (BIS, 1982), não são disponibilizados dados de caracterização da precipitação.

Tabela 1 – Parâmetros de testes de erosão referenciados em normas internacionais.

| Normas Técnicas | IS 1725 (BIS,1982) | NZS 4298 (SNZ,1998) | SLS 1382 (SLSI,2009) | E2 395-10 (ASTM,2010) | HB 195 (EBAA,2001) | Bulletin5 (Middleton, 1987) |
|---|-----------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Área exposta (Ø mm) | - | 150 | 150 | 150 | 70-150 | 150 |
| Tempo de ensaio (min) | 120 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Dist. de aplicação (mm) | 180 | 470 | 500 | 470 | 470 | 470 |
| Pressão (kPa) | 147 | 0 - 50 | 50 | 0 - 50 | 0 - 50 | 0 - 50 |
| Diâmetro saída do bico (Ø mm) | 100 | 153 | - | 153 | - | - |
| Velocidade final (m.s ⁻¹) | 6.5 | - | - | - | - | - |
| Intensidade de chuva (mm.h ⁻¹) | 15 - 30 | - | - | - | - | - |
| Diâmetro da gota (Ø mm) | 2 - 4 | - | - | - | - | - |

Adaptado de Cid-Falceto *et al.* (2012), Espanha.

Entretanto, observando-se os dados da Tabela 1 verifica-se que a pressão de saída do *spray* no teste IS 1725 (*Indian Bureau of Indian Standards*) é três vezes maior do que a aplicada nos outros testes e a distância de aplicação 2.6 vezes menor logo, apresenta-se como o mais erosivo. Experimentalmente, isto foi comprovado por Cid-Falceto *et al.* (2012) ao testar a erodibilidade de blocos de terra através da metodologia proposta pelas normas IS 1725 (Índia) e pela SLS 1382 (Sri Lanka). Os dados do *Bulletin 5 Spray Test* foram relacionados por Heathcote (1995) a 85 anos de precipitação em Sydney, sendo também citado pelo autor que o bico utilizado no teste tem efeito muito erosivo recomendando um modelo que proporcionasse distribuição mais uniforme do jacto de água.

De acordo com Dunkerley (2008), alguns dados publicados de intensidade e precipitação de chuvas apresentam muitas vezes discrepâncias que podem vir a subestimar, ou superestimar, os resultados obtidos, ocasionando assim que alguns testes sejam considerados excessivamente severos ou que não reproduzam os efeitos reais de degradação. Houben e Guillaud (1994), *apud* Ogunye e Boussabain (2002), ao comparar os resultados de paredes expostas a condições naturais e a testes acelerados de degradação verificaram que a erosão em condições naturais foi insignificante em relação à promovida pelos testes. Dad (1985), após extensa pesquisa experimental, observou que o jacto perpendicular à face a ser avaliada resulta em maior perda de massa do que iria ocorrer na prática e que, utilizando-se 30° de inclinação, poderiam ser obtidos resultados mais realistas. O autor também argumenta que a orientação do jacto na horizontal não é compatível com a precipitação natural, recomendando que este, para melhor simulação, deveria ser utilizado na vertical como o fez Ola e Mbata (1990), Dad (1985) e Ogunye e Boussabaine (2002).

Considerando todas as observações relatadas nos parágrafos anteriores, neste trabalho é proposto um sistema para ensaio acelerado de exposição a chuvas, no qual são determinados os principais parâmetros de influência e a sua correlação com a precipitação e intensidade admitidas para a localidade de Penhas Douradas, situada a 1300 m de altitude na Serra de Estrela, Portugal. Foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção do

Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, campus Azurém, Guimarães. O objectivo principal foi apresentar uma metodologia simples e de fácil implementação, inicialmente proposta para Portugal, mas, segundo a qual o teste possa ser adaptado a diferentes características pluviais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Levantamento dos dados pluviométricos

Os dados (precipitação anual média e velocidade média dos ventos a 10 m de altura) foram disponibilizados pelo IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) e pelo WMO (*World Meteorological Organization*) sendo calculados os índices de chuva dirigida (DRI) utilizando-se a eq.(1), estabelecida pelo CIB (*Conseil International du Batiment*) (Giongo *et al.*, 2011).

$$DRI = V.P.10^{-3} \quad (1)$$

Onde:

DRI = Índice de chuvas dirigidas ($m^2.s^{-1}$)

V = Velocidade média anual do vento ($m.s^{-1}$) a 10 m (altura) e

P = Precipitação média anual (mm).

Interpolando-se os valores de DRI calculados para 18 localidades portuguesas, elaborou-se o mapa de chuvas dirigidas de Portugal (Figura 1), segundo a classificação de Chand e Barghava (2002) descrita na tabela 2.

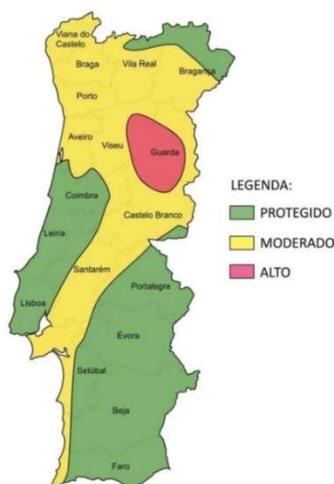


Figura 1 – Mapa de chuvas dirigidas de Portugal.

Tabela 2 – Classificação do grau de exposição proposta por Chand e Bhargava (2002).

| Grau de exposição | DRI ($m^2.s^{-1}$) |
|-------------------|----------------------|
| Protegido | $DRI \leq 3$ |
| Moderado | $3 < DRI \leq 7$ |
| Alto | $7 < DRI \leq 11$ |
| Severo | $11 < DRI$ |

Como pode ser observado na Figura 1, aproximadamente 50% da extensão territorial de Portugal apresenta grau de exposição moderado a alto, justificando assim o uso de testes para avaliar a degradação decorrente da exposição a chuvas. A região Sul, onde foi mais

difundida a técnica de construção em terra, pode ser considerada protegida, diferenciando da região Norte, cujo grau de exposição é moderado e onde prevaleciam as construções em pedra. O maior valor de precipitação anual (1715 mm) e de índice de exposição a chuvas dirigidas ($DRI = 7.39 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) foram verificados para a estação climatológica de Penhas Douradas, distrito de Guarda, os quais foram tomados como referência para a calibração do teste de exposição.

2.2 Descrição do equipamento de teste

A estrutura e disposição dos elementos que compõem o equipamento para testes estão ilustradas na Figura 2.

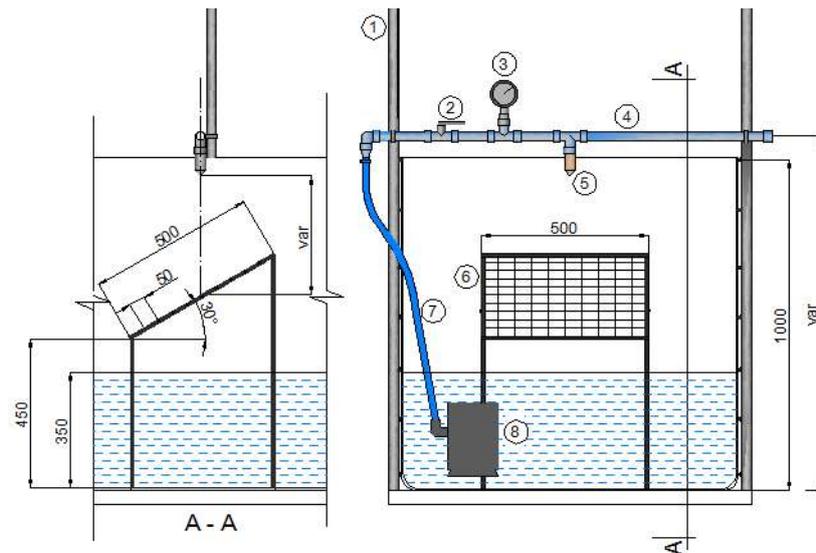


Figura 2 – Simulador de chuvas para teste de degradação (medidas em mm).

- 1 - Estrutura vertical de apoio em tubos de PVC rígido ($\text{Ø}1''$) composta de dois apoios verticais fixados no tanque de teste;
- 2 - Válvula de passagem;
- 3 - Medidor de pressão (capac. máx. 600 kPa);
- 4 - Tubulação horizontal para a água em tubo de PVC rígido ($\text{Ø}1''$), rosqueável, fixada nos apoios verticais através de braçadeiras que permitem variar a distância de aplicação do jacto. Toda a tubulação possui o mesmo diâmetro para evitar perda de pressão entre as ligações.
- 5 - Bico - *Full Cone Spray*-HH30-30100, (abertura de saída 6.3mm) fabricante *Spraying Systems Co.* posicionado centralmente em relação à face do provete a ser ensaiado.
- 6 - Plataforma de apoio para os provetes em cantoneiras em aço inox (10 mm x 10 mm) e malha vazada (50 mm x 50 mm) para permitir o escoamento da água. Para evitar o deslocamento do provete devido a inclinação da mesa de apoio, uma peça de fixação regulável foi adicionada, o que permite também variar a distância de aplicação sendo mantida a mesma pressão.
- 7 - Bomba submersa. O nível mínimo de água foi estabelecido em função do desempenho da bomba.
- 8 - Mangueira flexível ($\text{Ø}1''$)

2.3 Determinação dos parâmetros de calibração

Foi tomado como referencial para a determinação dos parâmetros de calibração, o maior valor de DRI verificado, o qual foi de $7.39 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ referente à cidade de Penhas Douradas. Segundo a relação proposta por Henriques (1993) *apud* Heathcote (1995) 1 DRI corresponde a $116 \text{ litros} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, logo, para o DRI de $7.39 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ têm-se $14.26 \text{ litros} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$. Para a vazão de $14.26 \text{ litros} \cdot \text{min}^{-1}$, a pressão de saída da água no bico foi de 45 kPa, o que está coerente com os valores de pressão adoptados para os testes de erosão referendados pelas normas internacionais. Utilizando-se o *Flow Pellet Test* (aplicado a altura de 1.70 metros) (Figura 3) foi mensurado o ângulo de saída do jato (22°) e o diâmetro médio das gotas ($D_{50} = 4.8 \text{ mm}$), o que está coerente com os dados fornecidos pelo fabricante do bico. De acordo com as referências técnicas da *Spraying Systems Co.*[®], menores valores de pressão proporcionam gotas de diâmetros maiores e menores caudais produzem menores gotas.

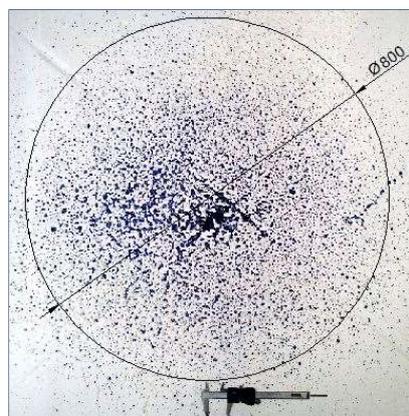


Figura 3 – Imagem da distribuição das gotas obtida através do *Flow Pellet Test*.

Para melhor visualização, aumentando o contraste, foi adicionado pigmento azul a água do teste. O jacto foi accionado por 1-2 segundos e o material (farinha de trigo) posto a secar por 24 horas após o que foi peneirado e colocado em estufa ($105 \pm 5^\circ \text{ C}$) por 24 horas para então ser feita a classificação granulométrica (Figura 4). A concentração de gotas, após o fechamento do registo de passagem, foi desprezada.

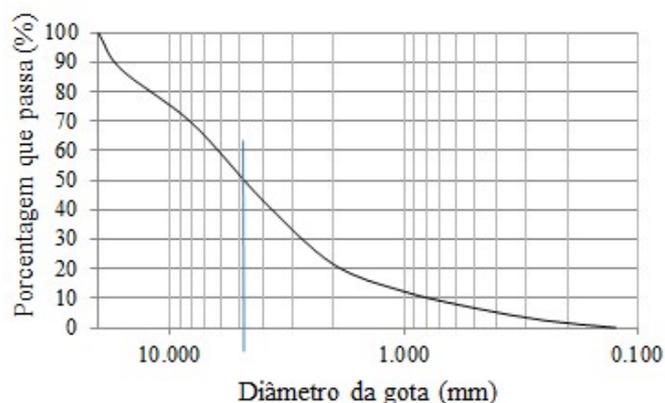


Figura 4 – Curva de distribuição granulométrica das gotas.

Com relação a distância de aplicação, sendo o jacto cónico, a área atingida irá depender da altura do vértice (saída do jacto) e, considerando-se $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ as dimensões da face dos provetes a serem ensaiados, foi avaliada a distância segundo a qual a

área de alcance do jato, e por conseguinte toda a força de impacto deste, estivesse dentro dos limites da face do provete (Figura 5).

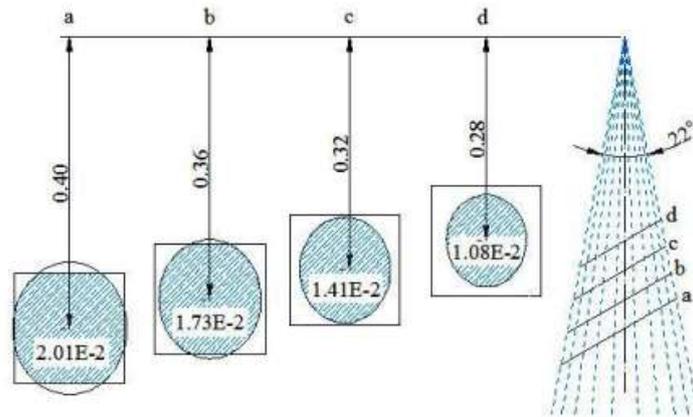


Figura 5 – Relação distância (mm) de saída do jato e área impactada.

Verifica-se, observando a Figura 5, que a distâncias superiores a 320 mm a amplitude do jato ultrapassa os limites da face do provete, atingindo também as arestas, o que pode intensificar a perda de massa pelo fato de que as mesmas são mais susceptíveis a erosão. É também de fácil dedução de que, se temos o caudal constante, quanto maior a área atingida menor será a concentração da energia de impacto e, portanto, menor a capacidade de erosão a qual, sendo mensurada por meio da energia cinética, é dependente da velocidade final e esta se relaciona com a distância percorrida. A velocidade final das gotas, desprezando-se as perdas pelo atrito do ar, para as distâncias analisadas foi calculada segundo a eq. (2) e a energia cinética segundo a eq. (3).

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gS} \quad (2)$$

Em que:

v = velocidade final ($m.s^{-1}$),

v_0 = velocidade inicial ($m.s^{-1}$), dada pelo quociente da vazão pela secção de saída do bico,

g = aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$),

S = distância de pulverização (m).

$$E_c = \frac{1}{2}(m.v^2) \times 10^{-6} \quad (3)$$

Em que:

E_c = energia cinética (MJ),

m = massa (kg).

Foi considerado o caudal ($2.38.10^{-4} m^3.s^{-1}$) para determinar a massa de água na unidade de tempo (massa específica da água = $997 kg.m^{-3}$).

2.4 Metodologia de ensaio

Para os testes iniciais, foram ensaiados provetes de concreto (150 mm x 150 mm x 75 mm) cuja composição está descrita na Tabela 3 e que apresentam as características dos concretos destinados à moldagem de blocos vazados para alvenarias.

Tabela 3 – Materiais componentes da mistura avaliada (kg/m³).

| Cimento CM I 42.5R (kg) | Areia (kg) | Brita #10 (kg) | Pó de pedra (kg) | Fator A/C |
|-------------------------|------------|----------------|------------------|-----------|
| 236 | 659 | 631 | 394 | 0.65 |

Para cada provete, 3,5 kg da mistura foram colocados em molde metálico desmontável (150 mm x 150 mm x 150 mm) e a compactação foi obtida através do encaixe de uma peça de nylon e pela aplicação de uma força de 2300 kgf. Esta carga reduziu à metade o volume inicialmente colocado no compartimento do molde prismático. Após 24 horas da moldagem, os provetes foram desmoldados e embalados individualmente em filme de PVC, com a finalidade de evitar a carbonatação. Os testes foram executados aos 28 dias de cura.

A erosão, mensurada pela perda de massa por unidade de área, foi avaliada nos provetes de concreto submetidos ao teste por 120 minutos (Figura 6) e posicionados a 0.40, 0.36, 0.32 e 0.28 metros da saída do jacto, sendo as alturas referenciadas ao centro da face a ser avaliada. O tempo de exposição foi obtido dividindo-se a intensidade (1715 mm) pelo caudal (14.26 litros.min⁻¹). Antes de serem ensaiados os provetes foram secos em estufa (100±5° C) até a constância de massa, procedimento repetido após o ensaio quando então foi calculada a perda de massa decorrente da degradação. Os resultados estão descritos na Tabela 4.



Figura 6 – Bloco de concreto sendo submetido ao teste de degradação.

Tabela 4 – Velocidade, energia cinética e perda de massa em relação a distância de aplicação.

| | | | | |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Distâncias (m) | 0.28 | 0.32 | 0.36 | 0.40 |
| v (m.s ⁻¹) | 7.98 | 8.03 | 8.08 | 8.12 |
| E _c (MJ) | 7.52E-6 | 7.61E-6 | 7.71E-6 | 7.80E-6 |
| Área de impacto (m ²) | 1.08E-2 | 1.41E-2 | 1.73E-2 | 2.01E-2 |
| E _c (MJ.m ⁻²) | 6.99E-4 | 5.41E-4 | 4.45E-4 | 3.89E-4 |
| Perda de massa (%) | 0.86 | 0.47 | 0.35 | 0.42 |

Como pode ser visto nos dados contidos na Tabela 4, a velocidade final e a energia cinética tendem a aumentar quanto maior for a distância de pulverização do jacto. Porém, quando consideramos que a energia é distribuída na área impactada, a energia cinética por unidade de área reduz, justificando os resultados de perda de massa reduzirem com o aumento da distância. Entretanto, para as distâncias de 0.40 m e 0.36 m os resultados de perda de massa podem ter sido influenciados pela acção sobre as arestas (ver Fig. 5) prejudicando a correlação com a perda de massa ocorrida nas demais distâncias de aplicação. Os gráficos ilustrados na Figura 7 relacionam a distância de aplicação à energia cinética e à perda de massa.

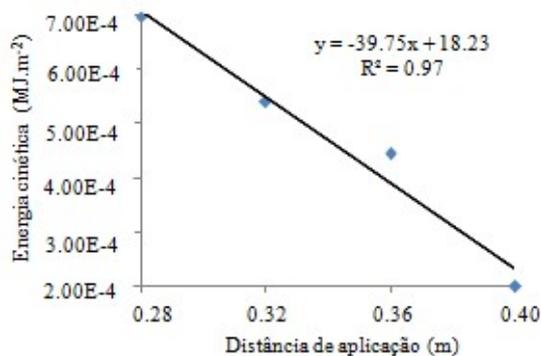


Figura 7a

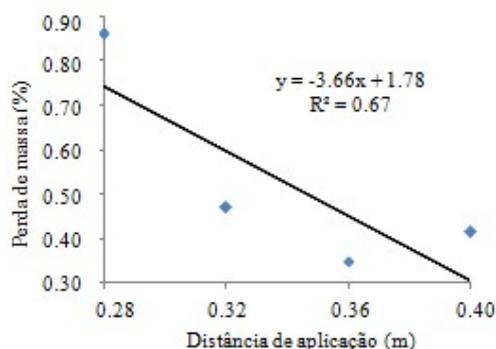


Figura 7b

Figura 7 – Relação entre a distância de aplicação e a energia cinética (Fig.7a) e perda de massa percentual (Fig. 7b).

Os blocos avaliados apresentaram percentuais de perda de massa dentro do limite máximo de 1%, entretanto, quando referenciados a unidade de área atingida, vemos que a erosão verificada a 0.28 m representa 400% maior do que a verificada a 0.36 m, confirmando experimentalmente os resultados encontrados para a energia cinética por unidade de área. Os resultados obtidos para a energia cinética por unidade de área estão coerentes com os publicados por van Dijk *et al.* (2002) para a energia cinética de eventos de chuvas com intensidade de até 50 mm.h⁻¹. Segundo dados citados por Dunkerley (2008), em estudo comparativo de dados pluviométricos publicados, a intensidade de chuvas registada em diversas estações metereológicas na Europa varia entre 40 - 44 mm.h⁻¹.

2.5 Determinação do tempo de exposição

Considerando-se, como já foi mencionado, a maior precipitação média anual de Portugal (1715 mm ou 1715 litros.m⁻²) foi obtida a precipitação relativa a área do provete a ser avaliada. Multiplicando-se o valor resultante pelo tempo que se deseja simular (neste trabalho, foi considerado 50 anos) e dividindo-se pelo caudal obteve-se o tempo de exposição para cada distância (Tabela 5).

Tabela 5 – Cálculo do tempo de exposição.

| P.M.A. (litros.m ⁻²) | Distâncias (m) | Área (m ²) | P.A. relativa à área (litros.min ⁻¹) | Volume total p/ 50 anos (litros) | Caudal (litros.min ⁻¹) | Tempo (minutos) |
|----------------------------------|----------------|------------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 1715 | 0.28 | 1.08E-2 | 18.46 | 922.76 | 14.26 | 65 |
| | 0.32 | 1.41E-2 | 24.15 | 1207.45 | | 85 |
| | 0.36 | 1.73E-2 | 29.68 | 1484.08 | | 104 |
| | 0.40 | 2.01E-2 | 34.39 | 1719.37 | | 121 |

P.M.A.= Precipitação média anual; P.A.= precipitação anual.

Os tempos de exposição calculados (Tabela 5) justificam a diferença entre os valores de perda de massa dos blocos de concretos avaliados no teste inicial (ver Tabela 4), pois foi mantido o período de 120 minutos de exposição para as quatro alturas em que foram avaliados, portanto, para os blocos ensaiados a 0.28 m, 0.32 m e 0.36 m a exposição correspondeu a períodos superiores a 50 anos.

2.6 Validação dos resultados

A validação dos resultados foi feita por meio da comparação com a energia cinética da chuva natural, que foi calculada em função da intensidade por meio da equação proposta por Foster *et al.* (1981) (Eq. 4):

$$E_c = (0.119 + 0.0873 \cdot \log I) \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

Em que:

E_c = energia cinética, em $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$

I = intensidade de chuva, em $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$

Foi assumido $I = 42 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, como a média dos valores de intensidade na Europa de acordo com dados citados por Dunkerley (2008). Os valores encontrados estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Energia cinética prevista para a chuva natural e para o teste em laboratório.

| Chuvas naturais | | | Teste em laboratório | | | | |
|---|--|---|----------------------|--|-----------------------------------|--------------------------|--|
| E_c ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) | E_c Anual ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) | E_c 50 anos ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) | Distâncias (m) | E_c ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | Duração do teste (segundos) | Perda de massa (%) | E_c Total ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) |
| 2.61E-5 | 4.47E-2 | 2.24 | 0.28 | 6.99 E-4 | 3900 | 0.33 | 2.73 |
| | | | 0.32 | 5.41E-4 | 5100 | 0.32 | 2.76 |
| | | | 0.36 | 4.45E-4 | 6240 | 0.33 | 2.78 |
| | | | 0.40 | 3.89E-4 | 7260 | 0.40 | 2.82 |

Conforme pode ser observado na Tabela 6, os valores de energia cinética nas condições estabelecidas para a simulação de chuvas foram em média 23.8% acima do valor estimado para 50 anos de chuvas naturais o que, para um teste que se propõe a avaliar a degradação, corresponde a uma boa margem de segurança. Por outro lado, neste trabalho, foram desprezadas as perdas de energia pela força de atrito exercida pelo ar nas gotas de água, sendo considerado que a energia mecânica total da gota de água permanece constante em toda a trajetória até o impacto. Verifica-se também que os resultados de perda de massa obtidos experimentalmente estão coerentes com os valores de energia cinética calculados para 50 anos.

3. CONCLUSÕES

No desenvolvimento de um simulador de chuva os parâmetros pressão, caudal e propriedades do jacto estão intrinsecamente relacionados e uma pequena alteração, como a variação de pressão, pode acarretar prejuízo no desempenho do teste, pois, acarreta alteração em todos os outros. Não podemos, entretanto, fixar o desempenho apenas por estes parâmetros, pois, como foi visto no item anterior, para um mesmo padrão de pulverização (cônico) a distância de aplicação se relaciona inversamente à energia cinética por unidade de área, sendo, portanto, dependente da área da face do provete a ser avaliado. Neste trabalho, podemos concluir que, para provetes com 150 mm x 150 mm de face exposta, a distância de aplicação mais adequada é 32 mm.

Outro ponto importante com relação à distância de aplicação é a área de cobertura do jacto que não pode ultrapassar os limites da face do provete a ser avaliado sem, no entanto, atingir as arestas deste por serem elas mais susceptíveis a degradação por erosão. A utilização de dispositivos para limitar a área pode ser eficiente quanto a isolar a área afectada pelo jacto entretanto, torna bastante complexa a correlação entre a energia desprendida e a erosão

decorrente desta. Quando consideramos toda a amplitude do jacto incidindo sobre a face podemos desprezar o fato de que a distribuição das gotas não ser uniforme (mesmo utilizando-se um jacto tipo cone cheio) tendendo a ser mais dispersa nas extremidades logo, toda a energia pode ser relacionada à consequente degradação.

A caracterização das gotas do jacto (diâmetro médio e distribuição granulométrica) é indubitavelmente indispensável na simulação de chuvas, mas, entendemos que a avaliação por meio de simulação das exactas características da chuva natural, como se obtém utilizando-se simuladores para estudo da erosão de solos, exige tempo prolongado de exposição.

O teste e a metodologia proposta mostraram-se eficientes em simular a energia cinética de chuvas incidentes em vedações verticais externas. Tendo em vista que o potencial erosivo da chuva é medido em função da energia cinética, podemos afirmar que utilizando a metodologia proposta é possível acelerar a erodibilidade causada pela chuva em alvenarias externas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (248888/2013-7) e à cooperação de todos os integrantes do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, onde foi realizado todo o trabalho experimental.

REFERÊNCIAS

ABNT - Edificações habitacionais - Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVE. NBR 15575-4. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro (2013).

ASTM. Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems. ASTM E2392 / E2392M-10e1. *American Society for Testing and Materials* (2010).

BIS. Specification for soil based blocks used in general building construction. IS 1725. *Indian Bureau of Indian Standards* (1982).

Blocken B., Carmeliet J. On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings. *Building and Environment*, 41(16), 1798-1810 (2006).

Blocken B., Dezsö G., Beek J., Carmeliet J. Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades. *Atmospheric Environment*, 44, 1714-1725. (2010).

CEN - Methods of test for mortar for masonry – Part 15: Determination of driving rain resistance of rendering mortars. PrEN 1015-15. *European Committee for Standardization*, Brussels (1990).

CEN – Specifications for masonry units. EN 771. *European Committee for Standardization*, Brussels (2011).

Chand I., Bhargava P.K. Estimation of driving rain index for India. *Building and Environment*, 37(5), 549-554 (2002).

Cid-Falceto J, Mazarron F.R., Cañas I. Assessment of compressed earth blocks made in Spain: international durability tests. *Construction and Buildings Materials*, 37, 738-745 (2012).

Cid-Falceto J., Mazarron F.R., Cañas I. The earth building normative documents in the world. *Informes de la Construcción*, 63(523), 159-169 (2011).

Cid-Falceto J., Mosquera P., Marcos F., Perucho C.C., Cañas I. Approximation to earth material from international normative.. In: *International Conference of Agricultural Engineering*, Valencia, ES (2012).

Dad M. The use of Cement Stabilized Soil for low cost housing in developing countries. PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne(1985).

Dunkerley D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. *Hydrological Processes*, 22, 4415-4435 (2008).

EBAA. Earth building book. In: Australia EBAA, editor. Draft for comment. *Earth Building Association of Australia* (2001).

Foster G.R., McCool D.K., Renard K.G., Moldenhauer W.C. Conversion of the universal soil loss equation to SI units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36, 355-359 (1981).

Giongo M., Paradatz I.J., Lambertz R. Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC: índices de chuva dirigida e métodos semiempíricos. *Ambiente Construído*, 11(1), 7-23 (2011).

Heathcote, K.A. Durability of earth wall buildings. *Construction and building materials*,9(3), 185-189 (1995).

John V.M., Sato N.M.N. Durabilidade de componentes da construção. In: *Construção e Meio Ambiente*. Editores: Miguel Aloysio Sattler e Fernando Oscar Ruttkay Pereira. ANTAC, Coleção Habitar, 7, 20-57, Porto Alegre (2006).

Lima M.G., Morelli F. Mapa Brasileiro de Chuva Dirigida: algumas considerações. In: *International Symposium on Mortars Technology 1*. Florianópolis, SC (2005).

Melo Junior C.M., Carasek H. Relationship between the deterioration of multi-story buildings facades and the driving rain. *Revista de la construcción*, 13(1),64-73 (2014).

Middleton G. Bulletin 5. Earth Wall Construction. In: 1992 rbSLM, editor. NorthRyde (Australia): *CSIRO Division of Building, Construction and Engineering* (1987).

Ogunye F.O., Boussabaine H. Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment. *Construction and Building Materials*, 16, 173-180 (2002)

OgunyeF.O., Boussabaine H. Diagnosis of assessment methods for weather ability of stabilized compressed soil blocks. *Construction and Buildings Materials*, 16, 163-172 (2002).

Ola S.A., Mbata A. Durability of soil-cement for building purpose – Rain erosion resistance test. *Construction and Building Materials*,4(4), 182-187 (1990).

Rezende M.L.S., Nascimento J.W.B., Neves G.A., Ferreira H.C. The effect of metakaolin on the durability of concrete hollow blocks used in masonry: evaluation of degradation caused by driving rain. *REM: Revista Escola de Minas*,68(1), 21-27 (2015).

Rydock P.J. A framework for using a present weather observation method to calculate a driving rain wall factor at any location. *Building and Environment*, 42, 1229-1235 (2007).

SLSI. Specification for compressed stabilized earth blocks. Part 2: Test Methods. SLS 1382-2. *Sri Lanka Standards Institution* (2009).

SNZ. Materials and workmanship for earth buildings. NZS 4298. *Standards New Zealand* (1998).

van Dijk A.I.J.M., Bruijnzeel L.A., RosewellC.J. Rainfall intensity – kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261, 1-23 (2002).

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Normais Climatológicas (1971-2000). Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>

WMO - World Meteorological Organization – Undata. Disponível em: <http://data.un.org/Data.aspx?d=CLINO&f=ElementCode%3a39>

Spraying Systems Co[®] Referências Técnicas. Disponível em: http://www.spray.com/cat70pt/cat70ptpdf/ssco_cat70pt_a.pdf