

REVISTA

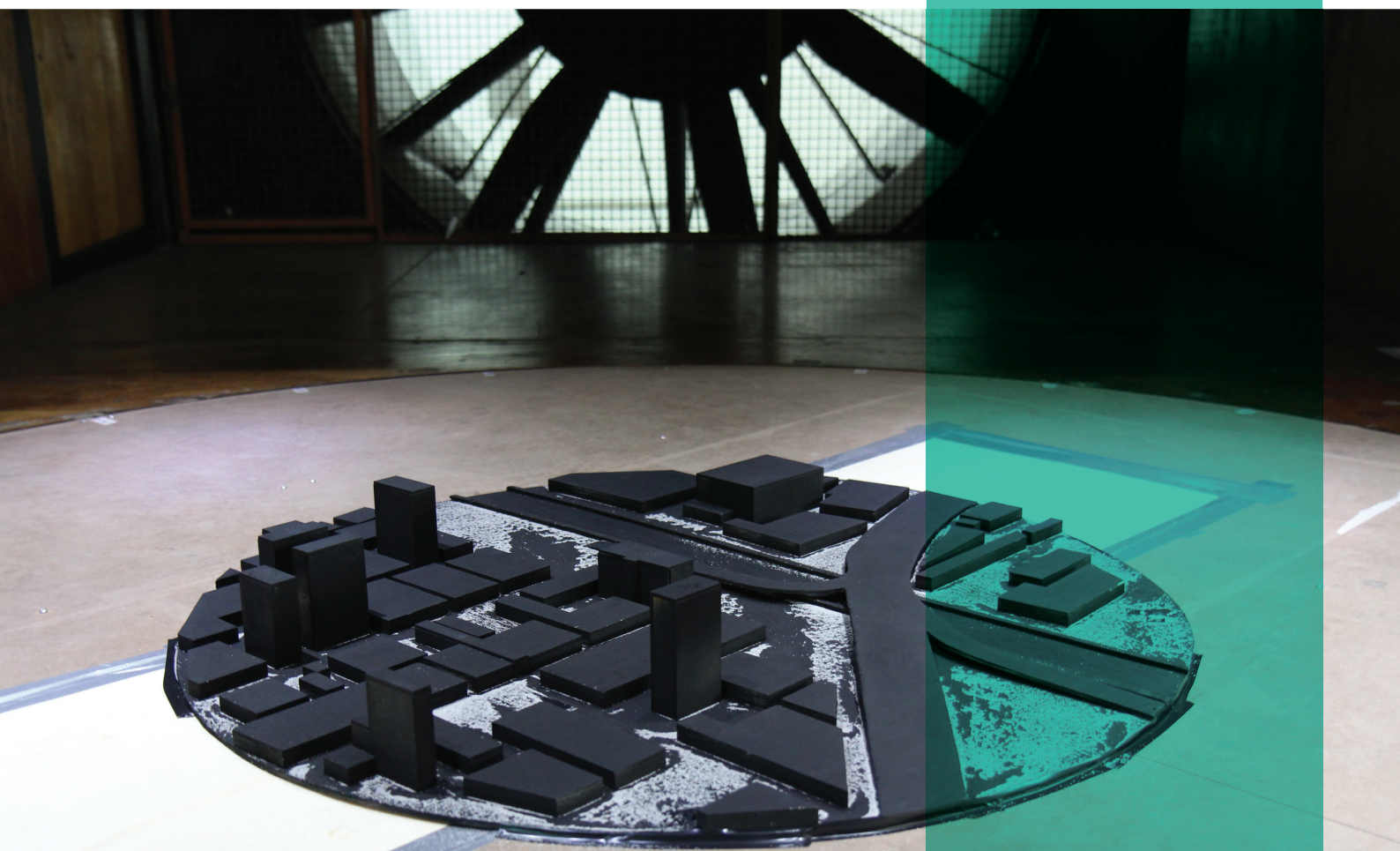
IPT

Tecnologia
e inovação

07

ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

Abril/2018



ÁGUA

Pagamento por
Serviços Ambientais
é ferramenta
estratégica

CONFORTO DE PEDESTRES

Túnel de vento é
usado para estudo
de ambientes
urbanos

CONSTRUÇÃO CIVIL

Estudo de
caso avalia
desempenho de
revestimento sintético



REVISTA IPT | Tecnologia e Inovação

v.1, n.7, abril, 2018

Quadrimestral

Conselho Editorial

Adriana Camargo de Brito

Alex Fedozzi Vallone

Alexandre Muselli Barbosa

Ana Carolina Carneiro

Célia Aparecida Lino dos Santos

Claudia Echevengúá Teixeira

Cyntia Matteucci

Denis Bruno Virissimo

Gilder Nader

Juliana Lopes Cardoso

Rima Yehia

Conselho técnico administrativo

Edna Baptista dos S. Gubitoso

Zehbour Panossian

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

Créditos técnicos

ARTE E DIAGRAMAÇÃO:

Augusto Max Colin
Mariana Barbosa Firigato
Marina de Almeida Nunes

REVISÃO:

Edna Baptista dos S. Gubitoso
Zehbour Panossian

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830

#07

Revista IPT:
Tecnologia
e inovação

Artigos técnicos

SUMÁRIO

p. 06	Análise de desempenho do revestimento sintético texturizado de paredes com umidade constante
p. 28	Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras
p. 41	Medição em túneis de vento da velocidade do ar próxima à parede para estudos de conforto de pedestres
p. 59	Critérios para a priorização de microbacias hidrográficas: subsídios à implantação de esquemas de pagamentos por serviços ambientais hídricos
p. 85	Uma estimativa do efeito das incertezas dos padrões na incerteza das curvas de calibração em química analítica

EDITORIAL



Fernando José Gomes Landgraf
Diretor presidente do IPT

Chegamos à sétima edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação' reunindo cinco artigos técnicos produzidos por seus pesquisadores. Cada estudo aborda temas de interesse no campo da pesquisa, desenvolvimento e inovação. Seus pesquisadores compartilham, desta forma, o conhecimento tecnológico produzido no Instituto.

Abre esta edição artigo intitulado 'Análise de desempenho do revestimento sintético texturizado de paredes com umidade constante'. A autoria é dos pesquisadores Alexandre Cordeiro dos Santos¹, Leandro Augusto e Osmar Hamilton Becere. Apresenta resultados de estudo de caso realizado pela equipe do Laboratório de Materiais de Construção Civil. O objetivo principal é analisar o desempenho de revestimento sintético texturizado para diagnosticar as causas da ocorrência de bolhas no revestimento.

Na sequência, apresenta-se artigo intitulado 'Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras', do pesquisador Renato Vergnhanini Filho. Pioneira no Brasil, a metodologia de cálculo desenvolvida pelo Laboratório de Engenharia Térmica é baseada em normas dos Estados Unidos (ASME) e Alemanha (DIN). É utilizada em trabalhos para a indústria envolvendo o uso eficiente de combustível.

Segue-se o artigo 'Medição em túneis de vento da velocidade do ar próxima à parede para estudos de conforto de pedestres', dos pesquisadores Gabriel Borelli Martins, André Barsaglini da Costa, Paulo José Saiz Jabardo e Gilder Nader. Ferramenta útil ao estudo do ambiente urbano é o túnel de vento que permite, por meio de ensaios em modelos reduzidos, avaliar condições de conforto ambiental, de dispersão de contaminantes e também de carga de vento nas estruturas. Esse trabalho vem sendo desenvolvido pela equipe do Laboratório de Vazão, com foco em conforto de pedestres sob a ação mecânica do vento.

Artigo intitulado 'Critérios para a priorização de microbacias hidrográficas: subsídios à implantação de esquemas de pagamentos por serviços ambientais hídricos' vem na sequência. O estudo realizado por uma equipe multidisciplinar do IPT, liderada pela pesquisadora Priscila Ikematsu, apresenta o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) como instrumento econômico estratégico e promissor, especialmente quanto ao fomento à proteção e à restauração de ecossistemas e seus serviços, como a garantia da disponibilidade qualiquantitativa da água.

Finalmente, e igualmente importante, segue o artigo 'Uma estimativa do efeito das incertezas dos padrões na incerteza das curvas de calibração em química analítica'. O autor é o pesquisador Ricardo Rezende Zucchini, do Laboratório de Referências Metrológicas. O trabalho apresenta uma investigação da influência desses padrões na incerteza das curvas analíticas. Utiliza para isso a simulação pelo método de Monte Carlo, aplicado a um exemplo clássico da literatura.

Análise de desempenho do revestimento sintético texturizado de paredes com umidade constante

Performance analysis of the textured synthetic coating of walls with constant humidity

Alexandre Cordeiro dos Santos^{a*}, Leandro Augusto^a
e Osmar Hamilton Becere^a

^a Laboratório de Materiais de Construção Civil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: alexcord@ipt.br

Palavras-chave:
inspeção, revestimento sintético texturizado, umidade, manifestação patológica.

Keywords:
inspection, synthetic resin coating, textured synthetic coating, moisture, pathological manifestation.

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de um estudo de caso realizado pela equipe técnica do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC do IPT cujo objetivo principal foi analisar o desempenho de revestimento sintético texturizado, visando diagnosticar as causas da ocorrência de bolhas (estufamento) no revestimento. Com base na inspeção realizada em campo e em resultados de ensaios realizados em laboratório, constatou-se que a ocorrência das bolhas (estufamento) é decorrente da presença de umidade acima de limites aceitáveis no substrato de aplicação (emboço) do revestimento sintético texturizado, oriunda de ascensão capilar e/ou da infiltração de água através de fissuras. Essa manifestação patológica tem se tornado comum nas construções resultado da inobservância quanto à limitação de uso desse tipo de revestimento sobre substratos sujeitos a umidade por ascensão capilar ou de outras fontes.

Abstract

This paper presents the results of a case history carried out by the technical team of the IPT Laboratory for Civil Construction Materials whose main objective was to analyze the performance of textured synthetic coatings aiming at diagnosing the causes of blistering which occurred when they were exposed to a constant-humidity environment. Based on the field inspection and laboratory test results, the pathologic manifestation was attributed to the presence of excess moisture in the cementitious substrate of the textured synthetic coating coming from the capillary water and/or of the infiltration of water through cracks. This type of occurrence has been intensified lately due the non-observance of the limitations of the use of this type of coatings on substrates exposed to moisture coming from capillary absorption or from other sources.

1 Introdução

Os revestimentos sintéticos texturizados (RST), conhecidos no mercado brasileiro como "textura acrílica", são constituídos essencialmente pelos mesmos componentes das tintas imobiliárias: resinas acrílicas ou estireno-acrílicas, pigmentos, cargas minerais e aditivos, porém com cargas de maiores dimensões para proporcionar o efeito texturizado. Esse tipo de revestimento foi introduzido no Brasil na década de 1960 e devido ao histórico de durabilidade, inúmeras opções de texturas e nuances de cores, facilidade de aplicação e adequação às tecnologias construtivas locais, conquistou grande espaço na construção civil (BECERE, 2007). Os revestimentos sintéticos texturizados se diferem das tintas imobiliárias basicamente nos seguintes aspectos:

- a. agregam às fachadas efeitos estéticos impossíveis de serem obtidos com as tintas imobiliárias de acabamento liso (**Figura 1**);

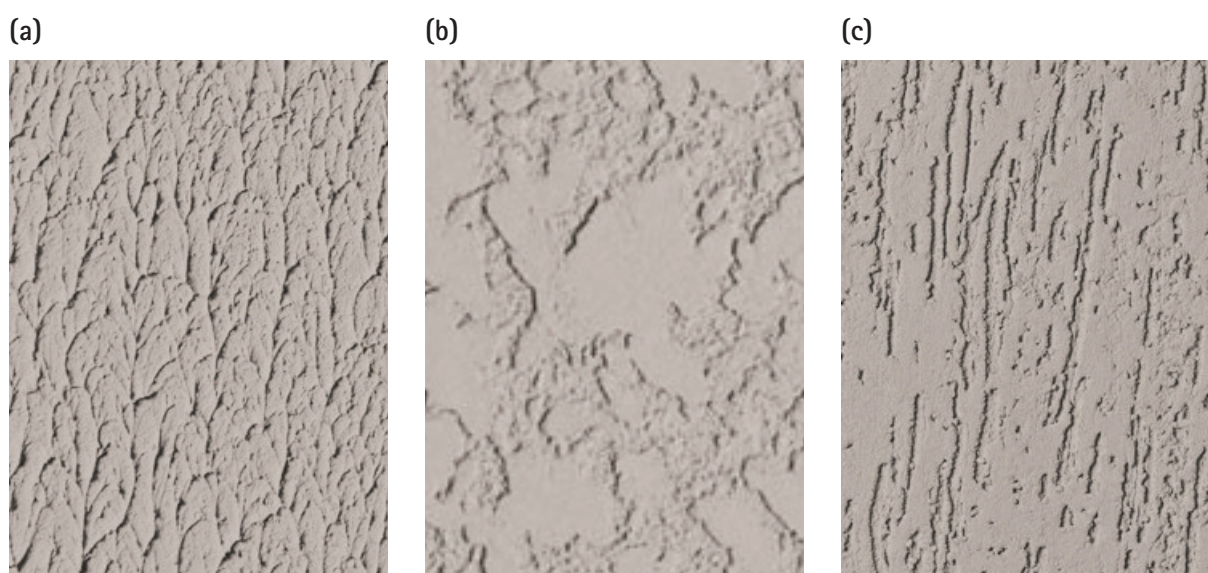


Figura 1 – Exemplos de texturas possíveis de serem obtidas com os revestimentos sintéticos texturizados. Em (a) rolado; (b) travertino e (c) riscado.

Fonte: Artgran (2017).

- b. possuem maior capacidade de correção de irregularidades superficiais do substrato e de preenchimento de fissuras superficiais, dispensando o uso de massa niveladora, por serem constituídos com agregados de maiores dimensões, resultando em camadas de maior espessura (da ordem de 0,5 mm a 3 mm);
- c. possuem maior elasticidade, o que os tornam capazes de dissimular fissuras de até certos limites no substrato. Essa propriedade está estritamente relacionada com a qualidade e o tipo da resina utilizada e também com a distribuição granulométrica das cargas;

- d. possuem maior resistência à penetração de chuvas devido à maior espessura da camada, bem como maior resistência ao intemperismo, não só pelas características do produto, mas também porque a texturização disfarça as alterações superficiais ocasionadas pelo intemperismo e as torna menos visíveis;
- e. proporcionam economia nos custos de mão de obra, uma vez que a sua obtenção requer apenas uma demão, além do selador.

Como todo e qualquer revestimento de fachadas, os revestimentos sintéticos texturizados também estão sujeitos a diversos agentes de degradação, tais como, poluição do ar, umidade, microrganismos, temperatura, radiação solar e radiação ultravioleta, agentes estes que variam em função da localização geográfica da edificação, bem como de ciclos diários e anuais em virtude da sua própria natureza. Desses agentes, a umidade é o que mais causa degradação nesse tipo de revestimento. Segundo Karagiannis et al. (2015), a água, ao penetrar no material de construção, pode causar degradação de emboços e de pinturas de base polimérica, corrosão de armaduras, criptoflorescências, entre outras manifestações patológicas. A presença de umidade nos materiais de construção do envelopamento da edificação também pode contribuir para a ocorrência de condensações no interior da edificação, elevar o risco de desenvolvimento de fungos emboloradores e tornar o ambiente insalubre para os ocupantes, com consequentes riscos a sua saúde e conforto (SHOEMAKER; HOUSE, 2006; WEINHOLD, 2007; LOURENÇO; LUSO; ALMEIDA, 2006; PIETRZYK, 2015; CARRER et al., 2015; HUANG et al., 2015).

As principais fontes de umidade nas edificações são a chuva incidente, ascensão capilar e, esporadicamente, vazamentos em tubulações de água e/ou esgoto. Dentre essas fontes de umidade, a que mais prejudica os revestimentos sintéticos texturizados aplicados sobre emboços ou diretamente sobre elementos de alvenaria é, sem dúvida, a umidade de ascensão capilar, facilmente identificada quando começa o surgimento de bolhas (estufamento) ou descolamento do revestimento. Esse tipo de anomalia normalmente decorre da elevada absorção capilar dos emboços quando em contato com uma fonte de umidade, uma vez que estes normalmente não recebem qualquer tratamento hidrofugante, e da limitação de difusão do vapor através dos revestimentos sintéticos texturizados, condições estas que não permitem um processo adequado de secagem da parede.

Vários autores destacaram que a umidade acumulada durante algum tempo compromete a durabilidade de um material de construção civil (ROUSSEAU; DALGLIESH, 2004) fato que pode ser agravado, uma vez que o fenômeno do aumento do teor de umidade é dependente do equilíbrio entre o fluxo ascendente de água a partir da base da parede por capilaridade e a perda de água por evaporação. Ou seja, o conteúdo da umidade não é determinado apenas pela água absorvida pelo material, mas também pela quantidade de água que se evapora, fenômeno conhecido como processo de secagem (HALL; HOFF, 2002). Agostino (2013); Silva, Ghisi e Lamberts (2016) e Littia et al. (2015) afirmam que o processo de secagem de um material de construção é crucial para os elementos construtivos que compõem o invólucro da edificação. Combinado com a fase de molhagem, o processo de secagem regula as condições de isolamento térmico do invólucro da edificação, podendo interferir na eficiência energética e consequentemente impactar positivamente ou negativamente os custos de manutenção e a vida útil da edificação, bem como o conforto dos usuários.

No estudo de caso deste artigo, o desempenho do revestimento sintético texturizado analisado foi comprometido devido à ocorrência de bolhas (estufamento) nas regiões do sistema de revestimento das fachadas (emboço + revestimento sintético texturizado), quando em contato direto com solo úmido, predominantemente em áreas de jardins. Também foi observado que esse tipo de manifestação patológica em regiões do sistema de revestimento ocorre quando em contato com pavimento permeável, piso drenante, pisos cerâmicos, rochas ornamentais ou outros pisos nos quais ocorre a penetração de água de chuva ou dos processos de limpeza, que atingem o emboço através das juntas e/ou rejuntas permeáveis. Apesar do aumento desse tipo de manifestação patológica, que aumenta sensivelmente nos períodos chuvosos, o assunto tem sido tratado de forma incipiente, tanto na fase de projeto quanto durante a execução do revestimento, uma vez que não são previstas soluções construtivas para evitar esse tipo de ocorrência, cuja correção resulta em custos elevados.

1.1 Objetivo do trabalho

Apresentar os resultados de um estudo de caso que consistiu em analisar o desempenho de revestimento sintético texturizado, visando diagnosticar as causas da ocorrência de bolhas (estufamento) no revestimento, que no caso em questão estava submetido à umidade constante.

2. Metodologia do trabalho

O trabalho consistiu de três atividades principais: inspeção visual, coleta de amostras e ensaios laboratoriais.

2.1 Inspeção visual

O trabalho consistiu primeiramente da inspeção visual das regiões do sistema de revestimento da edificação em estudo, constituído por chapisco + emboço + revestimento sintético texturizado, que apresentava destacamentos e/ou bolhas (estufamentos). Esse tipo de anomalia estava restrito às regiões localizadas nas platibandas¹ da laje de cobertura da piscina social do edifício e nas paredes da piscina social, ambas localizadas no pavimento térreo.

Por ocasião da inspeção, constatou-se que as regiões das platibandas afetadas pela presença de bolhas (estufamentos) estavam em processo de recuperação; no entanto, foi possível verificar a presença de fissuras no emboço da face externa da platibanda imediatamente abaixo da capa de muro, falhas de acabamento do emboço junto à laje, locais estes que permitiram a entrada de água, bem como o pedrisco presente na região estava com excesso de umidade devido a chuvas que ocorreram em dias anteriores **(Figuras 2 e 3)**.

¹ Platibanda: mureta construída na parte mais alta das paredes externas de uma construção, para proteger e ornamentar a fachada.



Figura 2 – Vista do teto da piscina. As setas indicam regiões do revestimento em processo de recuperação.
Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 3 – Região da Figura 2. Contato do sistema de revestimento com o pedrisco que apresentava umidade excessiva.
Fonte: elaborado pelos autores.

Por sua vez, nas paredes da piscina social, constatou-se, após remoção do revestimento sintético texturizado, que o emboço estava com umidade excessiva quando comparado ao emboço de uma região aparentemente sã, ocasionado pelo fato do sistema de revestimento manter contato direto com o solo do jardim. Cabe ressaltar que nessa região, devido ao uso do sistema de irrigação da vegetação do jardim, o solo mantém-se com umidade elevada (**Figuras 4 e 5**).



Figura 4 - Bolhas no revestimento na região do jardim devido ao excesso de umidade do solo.
Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 5 - Região da Figura 4 vista de outro ângulo. Remoção da bolha com lâmina cortante.
Fonte: elaborado pelos autores.

2.2 Coleta de amostras

A coleta de amostras foi realizada em duas regiões do sistema de revestimento, sendo uma da região sã (sem bolhas) e outra de uma região com bolhas (**Figura 6**). As amostras dessas regiões foram extraídas com auxílio de serra copo diamantada. Imediatamente após a extração, essas amostras foram acondicionadas em embalagens hermeticamente fechadas e encaminhadas ao LMCC do IPT, para fins de determinação dos seus teores de umidade.



Figura 6 – Em vermelho, região com presença de bolhas (estufamento) e, em azul, região sem anomalia. Em laboratório, foi determinado o teor de umidade do emboço dessas amostras. Ensaio E10. Fonte: elaborado pelos autores.

Para subsidiar a investigação, também foram coletadas duas amostras do sistema de revestimento (emboço + revestimento sintético texturizado) com objetivo de avaliar propriedades relacionadas à absorção de água por capilaridade e a transmissão de vapor de água (transmitância e camada de ar equivalente). Uma amostra foi coletada da parede da casa de máquinas (laje de cobertura - orientação Norte – **Figura 7**) e a outra amostra de parede localizada na mesma laje com orientação para o Oeste (**Figura 8**), regiões estas onde foi aplicado o mesmo revestimento empregado nas platibandas e paredes da piscina social. Essas amostras foram encaminhadas ao LMCC do IPT para a realização dos referidos ensaios. As **Figuras 7 e 8** mostram a região de retirada das amostras.



Figura 7 – Parede da casa de máquinas. Área do círculo indica o local de extração dos corpos de prova para realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de propriedades de transmissão de vapor de água. Ensaios E3, E5, E7 e E9.
Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 8 – Parede da platibanda da cobertura. Área do círculo: local de extração dos corpos de prova para realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de propriedades de transmissão de vapor de água. Ensaio E4, E6, E8 e E9.
Fonte: elaborado pelos autores.

2.3 Ensaios realizados e métodos empregados

Os ensaios realizados restringiram-se a medir propriedades relacionadas ao comportamento do sistema de revestimento frente à ação de água. Foram realizados os ensaios de determinação da absorção de água por capilaridade e de determinação de propriedades de transmissão de vapor de água (permeância e camada de ar equivalente) do sistema de revestimento sintético texturizado (emboço + revestimento) e somente do emboço após a remoção do revestimento sintético texturizado.

Os métodos de ensaios foram definidos em função do conhecimento sedimentado das bibliografias internacionais, que estabelecem o equilíbrio higroscópico como o requisito mais importante para avaliação desse tipo de revestimento. Também foi considerado que no Brasil predominam regiões de exposição alta e severa à chuva dirigida, ou seja, que a maior parte do seu território apresenta índices pluviométricos e ventos elevados. Dessa forma, buscou-se com esses ensaios verificar se o revestimento sintético texturizado analisado pode contribuir em minimizar os efeitos associados à incidência da água, seja de chuva incidente ou mesmo de outras fontes, limitando a penetração de água no substrato e permitindo a difusão do vapor de água. Essa propriedade, denominada requisito de proteção contra a chuva, é verificada analisando-se os resultados individuais desses ensaios, bem como pelo produto do coeficiente de absorção de água por capilaridade (C_{24h}) e da camada de ar equivalente (S_d).

Por sua vez, realizou-se o ensaio de determinação do teor de umidade do emboço das paredes da piscina com objetivo de comparar os teores de umidade da região com bolhas no revestimento e da região sã.

2.3.1 Determinação da absorção de água por capilaridade

O ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da norma EN ISO 15148: 2002, *Hygrothermal Performance of Buildings Materials and Products: Determination of Water Absorption Coefficient by Partial Immersion*. (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2002). De acordo com essa norma, primeiramente as faces laterais dos corpos de prova são impermeabilizadas e a face com revestimento é colocada em contato com a água. Após períodos pré-determinados, são registradas as massas de água absorvida pelos corpos de prova. O coeficiente de capilaridade C é obtido pela **Equação 1**:

$$C = \frac{M}{(S \cdot \sqrt{t})} \quad (1)$$

Onde:

C = coeficiente de capilaridade em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$;

M = massa de água absorvida após um tempo t em kg;

S = área do corpo de prova em m^2 ;

t = tempo em contato com a água em h.

Para realização do ensaio, os corpos de prova coletados na obra foram segmentados nas dimensões aproximadas de 10 cm x 15 cm. A absorção de água por capilaridade desses corpos de prova foi determinada de duas formas:

- a. do sistema de revestimento sintético texturizado (emboço + revestimento). Esse ensaio está identificado como **E1** e **E2**;
- b. somente do emboço, após a remoção do revestimento sintético texturizado. Esse ensaio está identificado como **E3** (**E1** sem o RST) e **E4** (**E2** sem o RST).

2.3.2 Determinação de propriedades de transmissão de vapor de água

O ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da norma EN ISO 12572: 2001, *Hygrothermal Performance of Buildings Materials and Products: Determination of Water Vapour Transmission Properties* (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001a).

O ensaio foi realizado numa condição de contorno 23-0/85 que representa uma temperatura de 23 °C e umidade relativa do ar de 0 a 3 % no interior do recipiente e de (85 ± 3) % na câmara de ensaio. O dessecante utilizado na realização do ensaio foi cloreto de cálcio (CaCl_2).

Foram determinadas as seguintes propriedades de transmissão de vapor:

- I. **Permeabilidade – δ_p (kg/(m.s.Pa))**: quantidade de vapor que passa por unidade de superfície de um material de espessura unitária, por unidade de tempo e quando entre as suas faces se estabelece uma diferença de pressão unitária;
- II. **Permeância – W_p (kg/(m².s.Pa))**: quantidade de vapor que passa por unidade de superfície de um material com uma espessura determinada, por unidade de tempo e quando entre as suas faces se estabelece uma diferença de pressão unitária;
- III. **Camada de ar equivalente – S_d (m)**: grandeza de caráter prático que indica a espessura (em metros) de uma camada de ar em repouso que oferece a mesma resistência à difusão do vapor de água que a resistência à difusão do vapor de água da amostra analisada.

Conforme recomendações da norma EN ISO 12572: 2001 – Anexo E: “[...] para películas muito finas, cuja espessura não é possível determinar por meios convencionais, não é usual referir-se à sua permeabilidade. Para esses casos apresenta-se a permeância ou a resistência ao vapor de água (inverso da permeância)” (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001a). Incluem-se, também, nesses casos, as películas frágeis ou quebradiças, conforme NP EN ISO 7783-2: 2001 – Tintas e vernizes. Materiais e esquemas de pintura para rebocos exteriores e betão. Parte 2: Determinação e classificação da velocidade de transmissão de vapor de água (permeabilidade) (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001b).

Para a realização do ensaio, os corpos de prova coletados na obra foram segmentados nas dimensões aproximadas de 8,0 cm de diâmetro.

A determinação de propriedades de transmissão de vapor de água foi realizada de duas formas:

- a. do sistema de revestimento sintético texturizado (emboço + revestimento). Esse ensaio foi identificado como **E5 e E6**;
- b. somente do emboço, após a remoção do revestimento sintético texturizado (três corpos de prova do **E5** e três corpos de prova **E6**). Esse ensaio foi identificado como **E7**.

2.3.3 Determinação do teor de umidade

O ensaio foi realizado conforme diretrizes da norma ABNT NBR 13.528: 2010 – Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

Para a realização do ensaio, foram utilizados os corpos de prova nas dimensões conforme foram coletados na obra (50 mm, ou seja, diâmetro da serra copo diamantada). O ensaio foi identificado como **E10** e os corpos de prova foram identificados da seguinte forma:

- a. região do revestimento com bolha (estufamento): CP 1, CP2 e CP 3.
- b. região sã do revestimento: CP 4, CP 5 e CP 6.

3. Resultados dos ensaios

3.1 Determinação da absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos constam das **Tabelas de 1 a 4**. Nas **Figuras de 1 a 4**, está ilustrada graficamente a evolução da absorção de água por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}).

Tabela 1 – Resultados de absorção de água por capilaridade – Ensaio E1.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/m ²)							
	15 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h	24 h	48 h
1	37	59	69	112	177	261	513	754
2	74	107	131	175	269	403	813	1203
3	42	61	79	79	127	171	320	458
4	61	86	122	179	288	420	829	1167
Média	53	78	100	136	215	314	619	895

Fonte: elaborado pelos autores.

A partir dos dados de ensaio, obteve-se o valor do coeficiente de capilaridade $C_{24h} = 0,13 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$.

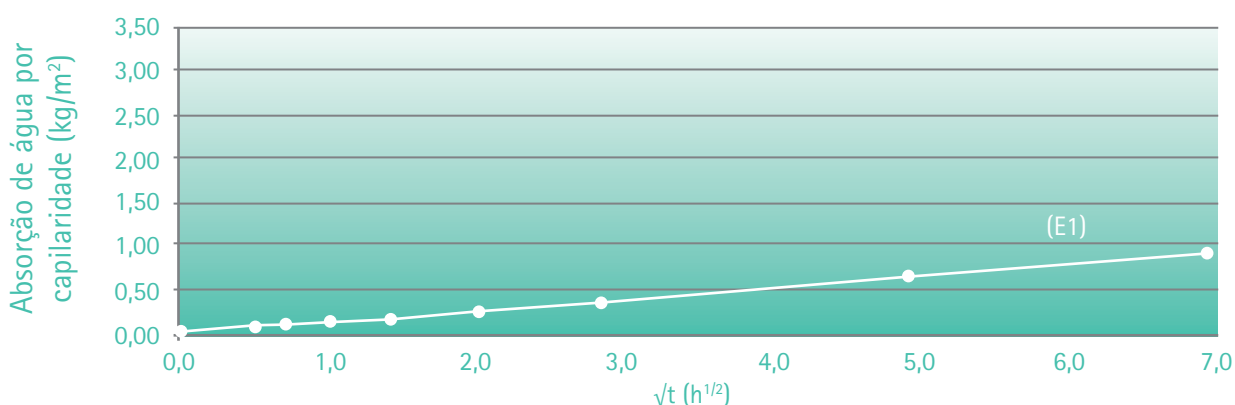


Figura 1 – Absorção de água por capilaridade em função da \sqrt{t} (E1).

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 2 – Resultados de absorção de água por capilaridade – Ensaio E2.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/m ²)							
	15 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h	24 h	48 h
1	40	52	46	61	78	104	195	297
2	50	50	62	61	87	118	244	399
3	43	54	50	146	91	122	261	419
4	48	53	58	70	93	125	278	436
Média	45	52	54	85	87	117	245	388

Fonte: elaborado pelos autores.

A partir dos dados de ensaio obteve-se o valor do coeficiente de capilaridade $C_{24h} = 0,05 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$.

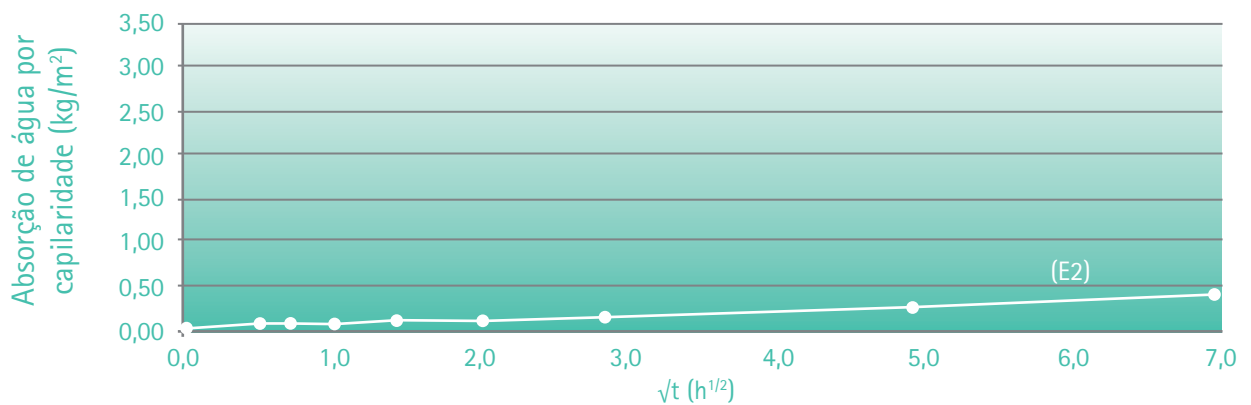


Figura 2 – Absorção de água por capilaridade em função da \sqrt{t} (E2).

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 3 – Resultados de absorção de água por capilaridade – Ensaio E3.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/m ²)							
	15 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h	24 h	48 h
1	2103	3013	5508	5524	6070	6146	6258	6364
2	936	1474	2232	3307	4807	6005	6660	6730
3	780	1221	2017	3162	5030	7170	9421	9670
4	1909	2794	3947	5227	6022	6123	6237	6355
5	1579	2261	3092	4259	5971	6625	6736	6829
Média	1462	2153	3359	4296	5580	6414	7062	7190

Fonte: elaborado pelos autores.

A partir dos dados de ensaio obteve-se o valor do coeficiente de capilaridade $C_{24h} = 3,36 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$.

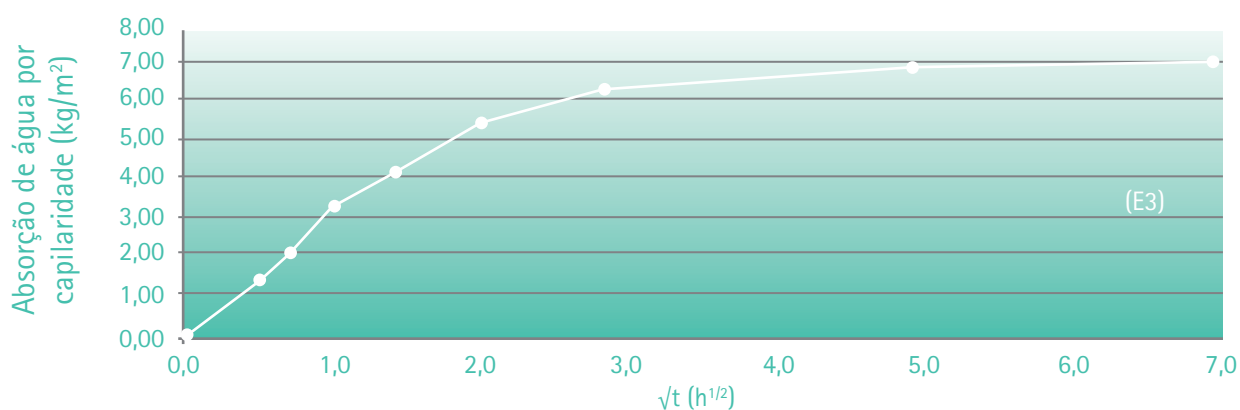


Figura 3 – Absorção de água por capilaridade em função da \sqrt{t} (E3).

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 4 – Resultados de absorção de água por capilaridade – Ensaio E4.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/m ²)							
	15 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h	24 h	48 h
1	1212	1853	2763	3834	4518	4589	4690	4775
2	319	486	710	1087	1654	2268	3236	3620
3	2546	3503	3995	4095	4187	4211	4281	4287
4	283	445	698	1120	1748	2398	3296	3533
Média	1090	1572	2042	2534	3027	3367	3876	4054

Fonte: elaborado pelos autores.

A partir dos dados de ensaio obteve-se o valor do coeficiente de capilaridade $C_{24h} = 2,22 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$.

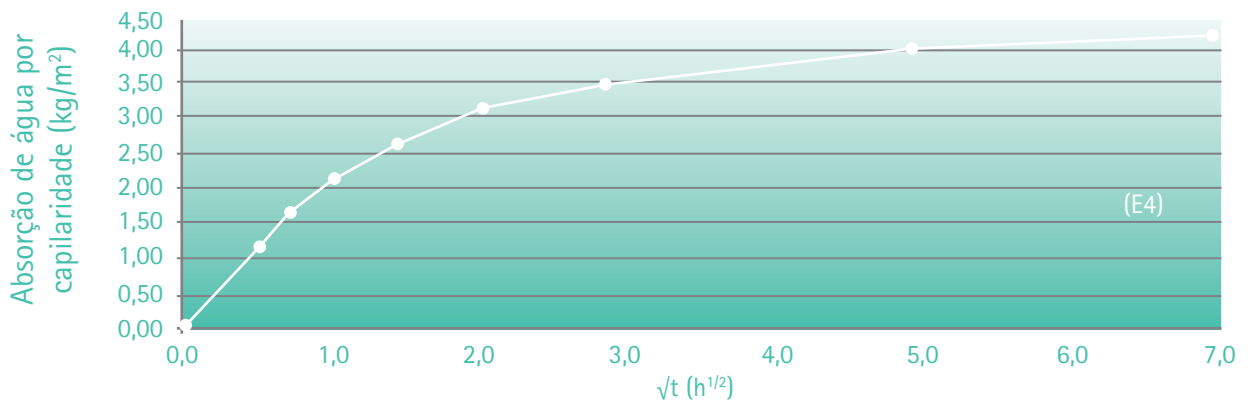


Figura 4 – Absorção de água por capilaridade em função da \sqrt{t} (E4).

Fonte: elaborado pelos autores.

3.2 Propriedades de transmissão de vapor de água e, de proteção contra a chuva

Os resultados da permeância (W) e da camada de ar equivalente (S_d) estão apresentados nas Tabelas de 5 a 7.

Tabela 5 – Resultados de propriedades de transmissão de vapor do revestimento – Ensaio E5.

CP	Permeância (kg/(m ² .s.Pa))	Camada de ar equivalente (m)
1	2,04E-10	0,74
2	1,39E-10	1,23
3	1,97E-10	0,77
4	1,90E-10	0,81
5	1,90E-10	0,81
Média	1,84E-10	0,89

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 6 – Resultados de propriedades de transmissão de vapor do revestimento – Ensaio E6.

CP	Permeância (kg/(m ² .s.Pa))	Camada de ar equivalente (m)
1	2,37E-10	0,59
2	2,20E-10	0,66
3	1,32E-10	1,30
4	1,97E-10	0,77
5	2,24E-10	0,64
Média	2,02E-10	0,83

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 7 – Resultados de propriedades de transmissão de vapor do revestimento – Ensaio E7.

CP	Permeância (kg/(m ² .s.Pa))	Camada de ar equivalente (m)
1	7,39E-10	0,29
2	6,29E-10	0,34
3	6,34E-10	0,34
4	6,35E-10	0,34
5	8,35E-10	0,26
Média	6,94E-10	0,33

Fonte: elaborado pelos autores.

O produto da absorção de água por capilaridade (C_{24h}) e da camada de ar equivalente (S_d), para avaliação do requisito de proteção contra a chuva, é apresentado na **Tabela 8**.

Tabela 8 – Resultados do produto de $C_{24h} \times S_d$.

Amostra	C_{24h} (kg/(m ² . h ^{1/2}))	S_d (m)	$C_{24h} \times S_d$ (kg/(m.h ^{1/2}))
E3	0,13	0,89	0,1
E4	0,05	0,83	0,0
E5	3,36	0,33	1,1
E6	2,22	0,33	0,7

Fonte: elaborado pelos autores.

3.3 Determinação do teor de umidade

Os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 9**.

Tabela 9 – Determinações do teor de umidade – Ensaio E8.

CP	Teor de umidade (%) da região com estufamento	CP	Teor de umidade (%) da região sem estufamento
1	9	4	5
2	9	5	5
3	9	6	4

Fonte: elaborado pelos autores.

4 Análise dos resultados

4.1 Critérios mínimos de desempenho de referência

Inexistem no Brasil requisitos e critérios mínimos de desempenho estabelecidos para os revestimentos sintéticos texturizados. Dessa forma, considerando o tipo de revestimento em análise e as condições de exposição da edificação na cidade de São Paulo, utilizaram-se como parâmetro de avaliação dos resultados obtidos os seguintes critérios mínimos de desempenho:

- a. **absorção de água por capilaridade:** de acordo com a norma *DIN 18558: 1985 - Synthetic resin plasters* (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V., 1985), o coeficiente de capilaridade (C_{24h}) deve ser $\leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$. Esse critério, na Alemanha, é considerado para os revestimentos de ligantes sintéticos quando se destinam à aplicação em edificações localizadas em regiões com precipitações anuais acima de 800 mm e em regiões com índice de precipitação inferior, mas com alta incidência de ventos (costas litorâneas, montanhas altas e médias) e, também, em edifícios altos e expostos. É importante frisar que para essas condições de exposição além do coeficiente $C_{24h} \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ também são estabelecidos limites para a **permeabilidade ao vapor de água**, expressos na forma de camada de ar equivalente (S_d), que deve ser $\leq 2,0 \text{ m}$, e o produto de $C_{24h} \times S_d$ que deve ser $\leq 0,2 \text{ (kg/m.h}^{1/2})$.

Comentário: considerando os valores apresentados na **Tabela 8** e os referidos critérios, o revestimento sintético texturizado, quando avaliado isoladamente, atendeu aos critérios de absorção de água por capilaridade, de camada de ar equivalente e na relação produto de $C_{24h} \times S_d$. Essa relação, também conhecida como requisito de proteção contra a chuva indica se o revestimento possui condições necessárias para a evaporação do vapor de água de forma a manter o equilíbrio higroscópico. Os valores obtidos, $0,1 \text{ kg}/(\text{m.h}^{1/2})$ e $0,0 \text{ kg}/(\text{m.h}^{1/2})$, são indicativos de que o revestimento apresenta condições necessárias para a evaporação do vapor de água até certos limites. Em condições em que ocorre a elevação do teor de umidade no substrato por ascensão capilar ou por falhas no revestimento (por exemplo, fissuras), as condições de secagem podem ficar comprometidas e provocar a minoração da resistência de aderência deste ao substrato, o surgimento de bolhas e posterior descolamento do revestimento.

- b. **teor de umidade do emboço:** apesar de não haver critérios estabelecidos quanto ao teor de umidade de argamassas de emboço, é considerado aceitável pelo meio técnico que o emboço apresente teores de umidade inferiores a 2,5 %.

Comentário: nos corpos de prova removidos da região do revestimento que apresentava bolha (estufamento) o teor de umidade medido foi de praticamente o dobro da umidade medida na região sã do revestimento, 9 % e 5 % (**Tabela 9**) respectivamente. Considerando esse valor, ambos os emboços avaliados estão com umidade excessiva. É provável que na região considerada sã, o revestimento esteja apresentando condições necessárias para a evaporação do vapor de água, porém se o teor de umidade continuar no mesmo patamar ou aumentar poderá vir a ocorrer bolhas (estufamentos).

5. Considerações

Conforme atestam diversos trabalhos acadêmicos, a umidade é, dentre os diversos agentes de degradação que interferem na durabilidade dos revestimentos sintéticos texturizados, o que mais causa manifestações patológicas a este tipo de revestimento. O processo de secagem por evaporação ou difusão de vapor atua na interface do substrato com o revestimento gerando tensões que causam as bolhas (estufamento) e conseqüentemente o descolamento do revestimento, fenômeno constatado no estudo de caso em análise.

Cabe ressaltar que há outros agentes que também causam degradações nesse tipo de revestimento, que são os agentes biológicos (microrganismos) e a degradação por radiação ultravioleta (UV), todavia, o surgimento de manifestações patológicas devido a esses agentes demora mais tempo para ocorrer. Também, é muito comum encontrar manifestações patológicas nesse tipo de revestimento decorrente de anomalias no substrato de aplicação, sendo as mais comuns a aplicação desse tipo de revestimento sobre substratos pulverulentos ou de baixa resistência superficial, presença de gesso na argamassa de revestimento (sulfoaluminato de cálcio - etringita), excesso de fissuras no substrato e, também, substrato com excesso de sais solúveis.

A ocorrência de uma manifestação patológica pode estar relacionada à ação de um ou mais desses agentes de degradação atuando juntos ou isoladamente. Nesse caso, as bolhas (estufamento) verificadas no revestimento sintético texturizado das platibandas e paredes da piscina coberta decorre da presença de umidade no emboço devido aos seguintes fatores:

- a. **Entrada de água através de fissuras:** a infiltração de água por fissuras encontradas na argamassa de emboço da platibanda do prédio da piscina (lado externo), que deu origem a ocorrência das bolhas (estufamentos) no revestimento sintético texturizado na parte interna;
- b. **Falhas de acabamento do emboço:** em algumas regiões das platibandas, cujo sistema de revestimento é constituído por emboço + revestimento sintético texturizado, há falhas no encontro do sistema de revestimento com a laje ("pé de parede"), ou seja, nesse local ocorre o acúmulo de água de chuva que ascende pelo emboço por capilaridade;
- c. **Camada de pedrisco:** na parte externa da platibanda frontal (beiral), constatou-se uma camada de pedrisco espessa (aproximadamente 8 cm), diferentemente da encontrada no lado interno da platibanda que era da ordem de 3 cm a 4 cm. A camada de pedrisco muito espessa dificulta o escoamento da água da chuva e prejudica o processo de secagem por evaporação dessa região. Nessa condição, o sistema de revestimento fica mais tempo em contato com a umidade que ascende ao emboço por capilaridade;

- d. **Contato do sistema de revestimento com umidade do solo:** nas regiões de jardins a umidade do solo ascende ao emboço mantendo essa região constantemente úmida. Conforme mostram os resultados de determinação do teor de umidade (**Tabela 9**), na região com bolhas o teor de umidade estava em torno de 9 % e na região sã o teor de umidade estava em torno de 5 %. Em épocas chuvosas ou durante o processo de irrigação, é bem provável que os teores de umidade nessa região fiquem ainda mais elevados e certamente comprometem o desempenho do revestimento sintético texturizado.

Para corroborar essa afirmação, os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade mostraram valores de $0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ e $0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ (**Tabelas 1 e 2**) considerados de baixa absorção de água por capilaridade. Esses valores indicam que a entrada da água no emboço não ocorreu através do revestimento sintético texturizado, pois este possui baixa capilaridade. Para comparação, nos corpos de prova sem o revestimento sintético texturizado (emboço) os valores foram $3,36 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ da **Tabela 3** e $2,22 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ da **Tabela 4**. Quando analisados juntamente com as propriedades de transmissão de vapor de água (**Tabelas 5, 6 e 7**), os resultados indicam que o revestimento sintético texturizado (**Tabela 8 – E3 e E4**), além de reduzir consideravelmente a entrada de água no emboço, permite o estabelecimento das condições necessárias para a evaporação do vapor de água, ou seja, apresenta equilíbrio higroscópico. Porém, se o teor de umidade do emboço aumentar acima de certos limites, por exemplo, no caso de ascensão capilar, o desempenho do revestimento sintético texturizado poderá ser comprometido.

6. Conclusão

As análises obtidas nesse estudo de caso indicam que os revestimentos sintéticos texturizados não são indicados para aplicação em substratos sujeitos à umidade constante. Em situações, como a do estudo de caso, onde a substituição do revestimento não era possível, alguns procedimentos corretivos podem ser adotados a fim de mitigar a situação. Cabe ressaltar, no entanto, que a durabilidade do revestimento sintético texturizado dessas regiões pode ser comprometida, uma vez que mesmo após a interrupção das fontes de umidade as condições ambientais favorecem a ação de outros agentes de degradação tais como o desenvolvimento de microrganismos.

7 Referências

AGOSTINO, D. D. Moisture dynamics in an historical masonry structure – the Cathedral of Lecce (South Italy). **Building and Environment**, v. 63, p. 122–133, 2013. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.02.008

ARTGRAN. **Encontre o seu produto**. Disponível em: <<http://www.artgran.com.br/produtos>>. Acesso em: 17 dez. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BECERE, O. H. **Revestimentos de ligantes sintéticos**: proposta de métodos de ensaios para avaliação de desempenho. 2007. 202 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2007.

CARRER, P.; WARGOCKI, P.; FANETTI, A.; BISCHOF, W.; FERNANDES, E.; HARTMANN, T.; KEPHALOPOULOS, S.; PALKONEN, S.; SEPPÄNEN, O. What does the scientific literature tell us about the ventilation–health relationship in public and residential buildings?. **Building Environment**, v. 94, n. 1, p. 273–286, Dec. 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.08.011.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. **DIN 18558**: Synthetic resin plasters; terminology, requirements, application. Berlin: DIN, 1985.

HALL, C.; HOFF, W. D. **Water transport in brick, stone and concrete**. London: Taylor & Francis Group, 2002.

HUANG, K. T.; HUANG, W. P.; LIN, T. P.; HWANG, R. L. Implementation of green building specification credits for better thermal conditions in naturally ventilated school buildings. **Building and Environment**, v. 86, p. 141–150, Apr. 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.01.006

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12572**: Hygrothermal performance of building materials and products -- Determination of water vapour transmission properties. Geneve: ISO, 2001a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15148**: Hygrothermal performance of building materials and products -- Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Geneve: ISO, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **NP EN ISO 7783–2**: Tintas e vernizes. Materiais e esquemas de pintura para rebocos exteriores e betão. Parte 2: Determinação e classifi-

cação da velocidade de transmissão de vapor de água (permeabilidade). Geneve: ISO, 2001b.

KARAGIANNIS, N.; KAROGLU, M.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. Building materials capillary rise coefficient: concepts, determination and parameters involved, new approaches to building pathology and durability. In: DELGADO, J. M. P. Q. (Ed.). **New approaches to buildings pathology and durability**. Singapore: Springer, 2016. p. 27-44.

LITTIA, G.; KHOSHDEL, S.; AUDENAERT, A.; BRAET, J. Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings. **Building and Environment**, v. 105, p. 393-411, 2015. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.049

LOURENÇO, P. B.; LUSO, E.; ALMEIDA, M. G. Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 223-234, 2006. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.01.001

PIETRZYK, K. A systemic approach to moisture problems in buildings for mould safety modelling. **Building and Environment**, v. 86, p. 50-60, 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.12.013

ROUSSEAU, M. Z.; DALGLIESH, W. A. Selected findings of an IRC study of the wetting and drying potentials of wood-frame walls exposed to different climates. In: WORLD BUILDING CONGRESS, 16., 2004, Toronto, Canada. **Proceedings...** Rotterdam: CIB, 2004.

SHOEMAKER, R. C.; HOUSE, D. E. Sick building syndrome (SBS) and exposure to water-damaged buildings: time series study, clinical trial and mechanisms. **Neurotoxicology and Teratology**, v. 28, p. 573-588, Sept./Oct. 2006. DOI: 10.1016/j.ntt.2006.07.003

SILVA, A. S.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55. **Building and Environment**, v. 102, p. 95-115, 2016. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.03.004

WEINHOLD, B. A spreading concern inhalational health effects of mold. **Environmental Health Perspectives**, v. 115, n. 6, p. A300-A305, 2007.

Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras

Simplified methodology for calculating the thermal efficiency of boilers

Renato Vergnhanini Filho^{a*}

^a Laboratório de Engenharia Térmica, Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: vergnhan@ipt.br

Palavras-chave:

rendimento térmico de caldeiras; combustão industrial; caldeiras.

Keywords:

thermal efficiency of boiler; industrial combustion; boiler.

Resumo

Define-se rendimento térmico de uma caldeira como sendo a fração da potência liberada na câmara de combustão que é transferida ao fluido de trabalho. Não havendo metodologia normalizada no Brasil para o cálculo do rendimento de caldeiras, costuma-se utilizar normas de outros países. A metodologia de cálculo desenvolvida pelo Laboratório de Engenharia Térmica (LET) do IPT é baseada nas normas dos Estados Unidos (ASME) e Alemanha (DIN), e vem sendo utilizada em trabalhos realizados para a indústria envolvendo o uso eficiente de combustível.

Abstract

The thermal efficiency of a boiler is defined as the fraction of the power released in the combustion chamber which is transferred to the working fluid. Since there is no standard methodology in Brazil for the calculation of boiler efficiency, international standards are usually used. The calculation methodology developed by the Laboratory of Thermal Engineering (LET) of IPT is based on the American (ASME) and German (DIN) standards, and it has been used in industry work involving the efficient use of fuel.

1 Introdução

As caldeiras são equipamentos comumente encontrados na indústria para a geração de vapor, seja para aquecimento, seja para a geração de energia elétrica. No caso mais comum, a caldeira é um trocador de calor onde há a transferência de calor dos gases quentes - produzidos pela queima de um combustível - para a água. A água, ao receber calor, aquece-se e vaporiza-se, daí o nome "caldeira de vapor", "gerador de vapor" ou, simplesmente, "caldeira" (Figura 1).

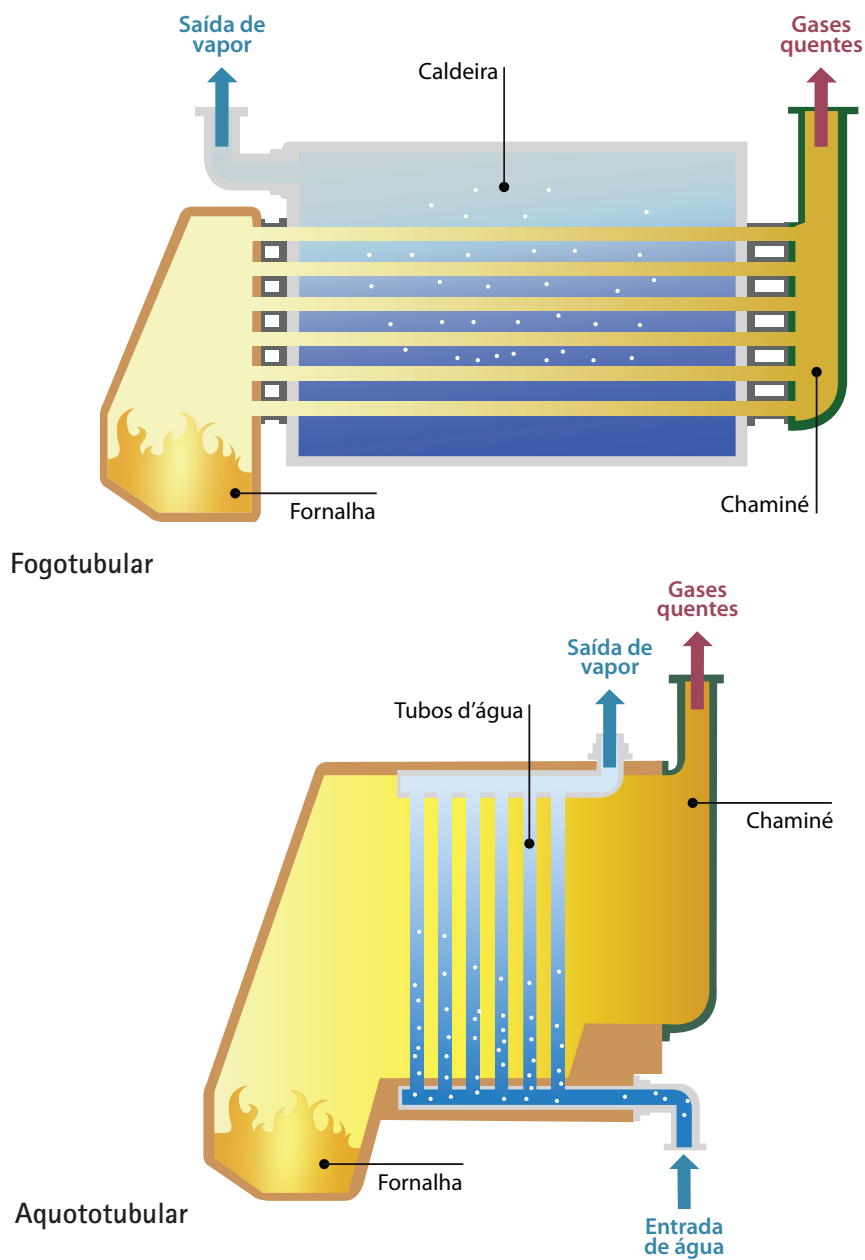


Figura 1 – Diagrama simplificado de caldeiras.

Fonte: portal São Francisco.

Na operação das caldeiras, por questões financeiras, ambientais ou estratégicas, é cada vez mais importante a preocupação com a eficiência energética, sendo o cálculo do seu rendimento térmico a forma de avaliação comumente utilizada. De maneira simplista, define-se rendimento térmico, ou eficiência térmica, de uma caldeira como sendo a fração da potência liberada na câmara de combustão que é transferida ao fluido de trabalho (água - vapor).

Não há metodologia normalizada no Brasil para o cálculo do rendimento de caldeiras. Costuma-se utilizar normas de outros países, geralmente dos Estados Unidos (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 1999) ou da Alemanha (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 1996), que serão designadas neste texto simplesmente por "norma ASME" e "norma DIN", respectivamente.

Dentro desse contexto, o LET desenvolveu metodologia simplificada para o cálculo do rendimento térmico de caldeiras baseada nas normas ASME e DIN. A metodologia desenvolvida foi publicada em um manual elaborado para a Comgás sobre o uso racional do gás natural na indústria que, por sua vez, foi apresentado pelo LET num importante evento promovido pela Associação Brasileira de Engenharia Química (ABEQ), (VERGNHANINI FILHO; SILVA, 2012).

2 Metodologia de cálculo do rendimento térmico de caldeiras desenvolvida pelo LET

Na **Figura 2**, apresenta-se esquema simplificado dos principais fluxos de água, vapor, ar, combustível, gases de combustão, água de purga e cinzas de uma caldeira típica, dotada de pré-aquecedores de ar e água ("economizador"), e com sistema em via seca de retirada de cinzas (material particulado orgânico proveniente da queima incompleta do combustível somado ao inorgânico presente no combustível) dos gases de combustão.

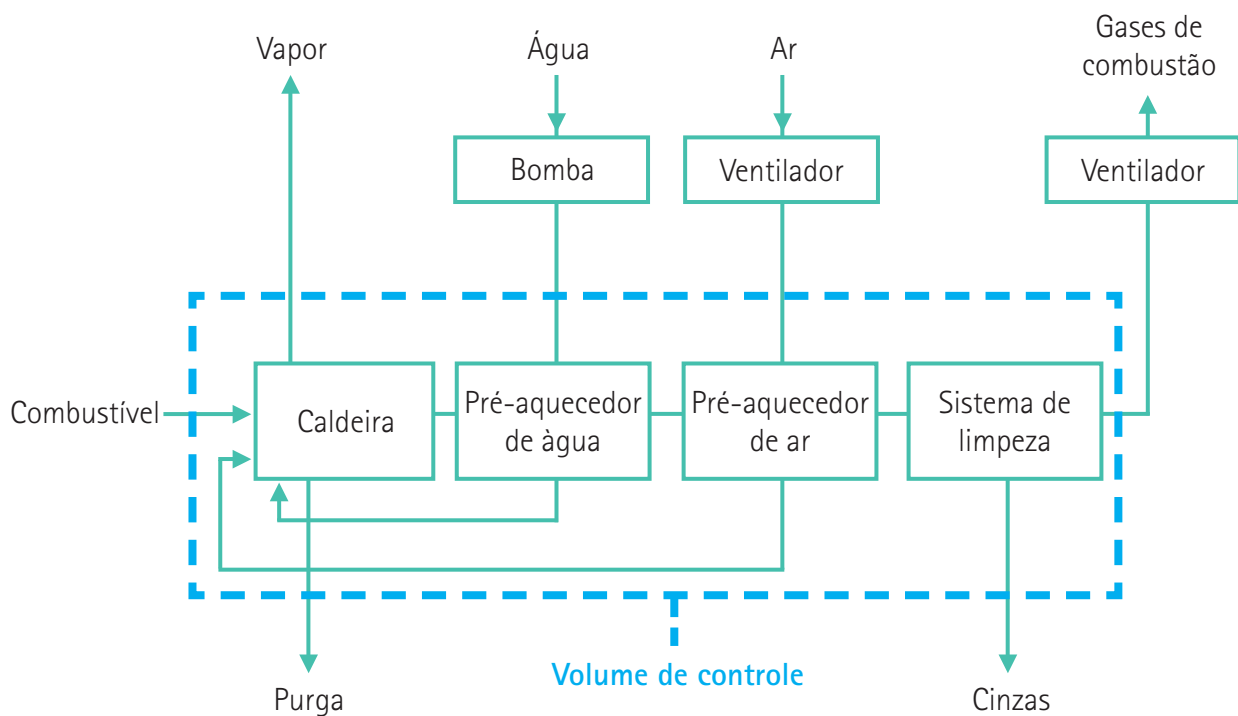


Figura 2 - Fluxograma simplificado da caldeira.

Fonte: elaborado pelos autores.

No fluxograma apresentado:

- a linha pontilhada representa as fronteiras do objeto de estudo;
- o objeto de estudo considerado é comumente denominado de volume de controle (VC) na literatura técnica;
- a fronteira de um volume de controle é cruzada pelas assim denominadas correntes materiais, através das quais entra ou sai matéria para o VC;
- a bomba de água, os ventiladores de ar e de combustão estão fora do volume de controle, ou seja, não serão consideradas no cálculo de rendimento as parcelas de energia elétrica referentes ao acionamento desses equipamentos.

2.2 Balanço energético na caldeira

O balanço energético na caldeira (na verdade, no VC definido anteriormente) operando em regime permanente (regime de operação em que não há alteração significativa das variáveis de processo ao longo do tempo) pode ser escrito de forma simplificada como:

$$E_f = E_u + P \quad (1)$$

Onde:

E_f = potência fornecida à caldeira em kJ/h;

E_u = potência útil absorvida pela água em kJ/h;

P = potência não aproveitada em kJ/h.

O rendimento pode ser determinado através do denominado "método direto", ou "método da entrada e saída", pela expressão:

$$\eta_{MD} = E_u / E_f \quad (2)$$

Onde:

η_{MD} (adim.) = rendimento térmico pelo método direto.

O rendimento pode, também, ser determinado pelo denominado "método indireto", ou "método das perdas", através da **Equação 3** ou da **Equação 4**, obtidas da substituição da **Equação 1** na **Equação 2**.

$$\eta_{MI} = 1 - (P / E_f) \quad (3)$$

$$\eta_{MI} = E_u / (E_u + P) \quad (4)$$

Onde:

η_{MI} (adim.) = rendimento térmico pelo método indireto.

No cálculo do rendimento da caldeira pelo método direto, ou pelo indireto, é necessário que seja definido qual poder calorífico do combustível (PC) será utilizado, o superior (PCS) ou o inferior (PCI). Para uma mesma situação, os valores de rendimento calculados com base no PCI e no PCS são diferentes. No método proposto pela norma ASME, é utilizado o PCS , enquanto o PCI é empregado na metodologia apresentada pela norma DIN.

Nos cálculos de rendimento mostrados adiante, será utilizado o PCI . Portanto, nas equações apresentadas nos itens seguintes, deve-se entender que η_{MD} ou η_{MI} são calculados com base no PCI . Tendo-se calculado o rendimento base PCI , pode-se obter o rendimento base PCS , multiplicando-se o valor encontrado pelo PCI e dividindo-se pelo PCS .

2.2 Potência fornecida

A principal potência fornecida ao processo é a energia química do combustível; as demais são as entalpias associadas aos fluxos de combustível e de ar de combustão. A potência fornecida é calculada pela equação:

$$E_f = m_c * PCI_c + m_c * Cp_c * (T_c - T_{REF.}) + m_{AR} * Cp_{AR} * (T_{AR} - T_{REF.}) \quad (5)$$

Onde:

m_c = vazão mássica do combustível em kg/h;

PCI_c = poder calorífico inferior do combustível em kJ/kg;

$T_{REF.}$ = temperatura de referência em °C; as normas ASME e DIN adotam o valor de 25 °C;

T_c = temperatura de entrada do combustível na caldeira em °C;

Cp_c = calor específico médio do combustível entre a temperatura de entrada na caldeira e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C);

m_{AR} = vazão mássica do ar de combustão em kg/h;

T_{AR} = temperatura do ar de combustão na entrada do volume de controle em °C;

Cp_{AR} = calor específico médio do ar entre a temperatura de entrada na caldeira e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C).

2.3 Potência útil

A potência útil é a potência transferida à água e é calculada pela equação:

$$E_u = m_v * h_v - m_{H_2O} * h_{H_2O} \quad (6)$$

Onde:

m_v = vazão mássica de vapor gerado em kg/h; num cálculo menos rigoroso, pode-se substituir esse termo por " m_{H_2O} (kg/h)";

h_v = entalpia específica do vapor gerado em kJ/kg;

m_{H_2O} = vazão mássica de água fornecida à caldeira em kg/h;

h_{H_2O} = entalpia específica da água de alimentação da caldeira em kJ/kg.

2.4 Potência não aproveitada

A potência não aproveitada corresponde à somatória de uma série de perdas que ocorrem no processo e é calculada pela expressão:

$$P = P_{gases} + P_{CO} + P_{MPO} + P_{purgas} + P_{cinzas} + P_{ambiente} \quad (7)$$

Onde:

P_{gases} = potência perdida associada aos gases de combustão em kJ/h;

P_{CO} = potência não aproveitada associada à presença de CO nos gases de combustão em kJ/h;

P_{MPO} = potência não aproveitada associada à presença de carbono nos sólidos presentes nos gases de combustão em kJ/h;

P_{purgas} = potência perdida por purgas em kJ/h;

P_{cinzas} = potência perdida associada à retirada de cinzas do processo em kJ/h;

$P_{ambiente}$ = potência perdida para o ambiente em kJ/h.

Potência não aproveitada associada aos gases de combustão (P_{gases})

A perda de potência pelos gases efluentes é calculada pela expressão:

$$P_{gases} = m_{gases} * C_{p_{gases}} * (T_{gases} - T_{REF.}) \quad (8)$$

Onde:

m_{gases} = vazão mássica de gases de combustão em kg/h;

T_{gases} = temperatura dos gases de combustão em °C;

$C_{p_{gases}}$ = calor específico médio dos gases de combustão entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C).

Potência não aproveitada devido à presença de CO nos gases de combustão (P_{CO})

A perda de potência devido ao fato de parte do carbono do combustível ter sido convertida a CO, e não a CO₂, é calculada pela expressão:

$$P_{CO} = V_{gases} * f_{CO} * PCI_{CO} \quad (9)$$

Onde:

V_{gases} = vazão volumétrica de gases de combustão (volume nas CNTP - 0 °C e 101,3 kPa) em m³/h;

f_{CO} = fração volumétrica de CO dos gases de combustão;

PCI_{CO} = poder calorífico inferior do CO (volume nas CNTP - 0 °C e 101,3 kPa) em kJ/m³.

Potência não aproveitada devido à presença de carbono nos gases de combustão (P_{MPO})

A perda de potência devido ao fato de parte do carbono do combustível não ter sido oxidada, nem a CO e nem a CO₂, e que deixa o processo via gases de combustão é calculada pela expressão:

$$P_{MPO} = V_{gases} * C_{MP} * f_{CMP} * PCI_C \quad (10)$$

Onde:

C_{MP} = concentração de sólidos dos gases (volume nas CNTP - 0 °C e 101,3 kPa) em kg/m³;

f_{CMP} = fração mássica de carbono dos sólidos dos gases;

PCI_c = poder calorífico inferior do carbono em kJ/kg.

Potência não aproveitada devido às purgas da caldeira (P_{purgas})

A perda de potência devido ao fato de parte da água não deixar a caldeira na forma de vapor é calculada pela expressão:

$$P_{purgas} = m_p * Cp_{H2O} * (T_i - T_{H2O}) \quad (11)$$

Onde:

m_p = vazão mássica média de água purgada da caldeira (purgas contínuas) ou vazão média fictícia de água purgada (para purgas descontínuas) em kg/h;

Cp_{H2O} = calor específico médio da água entre a temperatura de entrada na caldeira e a de saturação, à pressão constante em kJ/(kg °C);

T_i = temperatura de saturação da água na pressão da caldeira em °C;

T_{H2O} = temperatura da água na entrada da caldeira em °C.

Potência não aproveitada devido à retirada de cinzas do processo (P_{cinzas})

Há perda de potência na retirada de cinzas pelo sistema de limpeza de gases porque o material deixa o volume de controle numa temperatura acima da ambiente e porque esse material possui carbono não oxidado do combustível. Essa perda é calculada pela expressão:

$$P_{cinzas} = m_{cinzas} * Cp_{cinzas} * (T_{cinzas} - T_{REF.}) + m_{cinzas} * fC_{cinzas} * PCI_c \quad (12)$$

Onde:

P_{cinzas} = potência perdida associada à retirada de cinzas do processo em kJ/h;

m_{cinzas} = vazão mássica das cinzas em kg/h;

T_{cinzas} = temperatura das cinzas em °C;

Cp_{cinzas} = calor específico médio das cinzas entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C);

fC_{cinzas} = fração mássica de carbono das cinzas.

Potência não aproveitada associada às trocas de calor entre a superfície externa da caldeira e o ar ambiente ($P_{ambiente}$)

Essa perda decorre do fato da temperatura da superfície externa da caldeira ser superior à do ar ambiente, o que produz uma transferência de calor da caldeira para o meio. Tal calor rejeitado para o meio não é aproveitado sendo, portanto, uma perda de energia.

O cálculo dessa perda é difícil, sendo necessário o conhecimento das áreas, temperaturas e emissividades das superfícies externas dos elementos internos ao volume de controle, além da temperatura e velocidade do ar ambiente ao redor desses elementos. A norma ASME fornece um roteiro completo para o cálculo.

Alternativamente, essa perda pode ser estimada através de expressões empíricas. A norma DIN apresenta a seguinte expressão:

$$P_{ambiente} = C * (Eu)^{0,7} \quad (13)$$

Onde:

$P_{ambiente}$ = potência perdida para o ambiente em kJ/h;

C (adimensional) = coeficiente de valor igual a 0,0113 para caldeiras convencionais operando com óleo combustível ou gás natural, de valor 0,0220 para carvão mineral tipo antracito e de valor 0,0315 para carvão tipo linhito; o valor é igual a 0,0315 para caldeiras de leito fluidizado.

3 Emprego da metodologia de cálculo desenvolvida pelo LET

Nos trabalhos de campo realizados pelo LET, a metodologia de cálculo desenvolvida tem levado a valores consistentes de rendimento térmico de caldeiras operando com diferentes combustíveis.

A aplicação do método para caldeiras a carvão mineral, em particular, foi realizada uma única vez e envolveu dois equipamentos da empresa Braskem, unidade de Trinfo-RS. O trabalho realizado teve início com o acompanhamento durante quinze dias das principais variáveis operacionais das caldeiras, utilizando-se instrumentação do LET e cativa dos equipamentos. Foram coletadas amostras de combustível e de cinzas para análises químicas e físicas nos laboratórios do IPT.

Os resultados obtidos no levantamento foram utilizados no cálculo do rendimento das caldeiras pelos dois métodos, chegando-se a valores bastante consistentes. Foi, então, configurado um programa que, anexado ao sistema supervisor das caldeiras, permitiu que os valores obtidos fossem disponibilizados em tempo real à equipe de operação, possibilitando ajustes e conseqüente redução no consumo de combustível.

Os bons resultados alcançados no desenvolvimento desse trabalho permitiram a sua apresentação em dois eventos nacionais: um da área de engenharia química (VERGNHANINI FILHO; BUENO; RORATO, 2010) e outro específico sobre produção, conversão e aplicações do carvão mineral (VERGNHANINI FILHO, 2017).

A aplicação do método para caldeiras a gás natural foi realizada em cerca de quarenta equipamentos instalados em empresas clientes da Comgás situadas nas Regiões Metropolitanas de São Paulo (RMSP) e de Campinas (RMC). Os dados necessários para os cálculos foram levantados experimentalmente utilizando o laboratório móvel do LET (**Figura 3**).

O monitoramento das caldeiras mostrou que aproximadamente metade delas, as que possuem economizador ou, menos comum, pré-aquecedor de ar instalado, o rendimento térmico é satisfatório, entre 91 % e 95 %, base *PCI*, sendo as de maior rendimento aquelas que operam com excesso de ar reduzido, ou seja, teor de O₂ dos gases próximo de 1,5 %. Nas demais caldeiras, o rendimento se situou entre 84 % e 91 %.

Nas indústrias, que tiveram suas caldeiras monitoradas, foi realizado seminário com o objetivo de apresentar e debater os resultados obtidos, e as técnicas possíveis de serem aplicadas para reduzir o consumo de combustível dos equipamentos. Foram apontadas desde estratégias de custo zero e aplicação imediata, como modificações nos procedimentos operacionais do equipamento até medidas de médio prazo, envolvendo troca e aquisição de equipamentos e instrumentos.

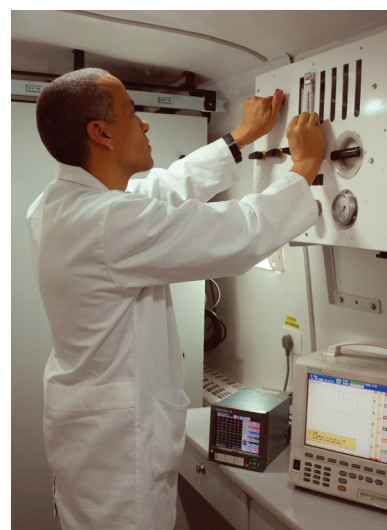


Figura 3 – Laboratório móvel do LET.
 Fonte: elaborado pelos autores.

4 Disseminação de conhecimento

A difusão da metodologia de cálculo desenvolvida tem sido feita nos trabalhos realizados para a indústria, mas também por meio da participação do LET em eventos e da apresentação do tema "Balanços de massa e energia em processos industriais de combustão" no curso "Combustão Industrial", que vem sendo ministrado regularmente pelo Laboratório desde 1986 nas modalidades aberta e *in-company*.

5 Referências

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME PTC 4-1998**: Fired steam generators. New York, 1999. (revision of ASME PTC 4.1 - 1964).

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. **DIN 1994-02**: Acceptance testing of steam generators. Berlin, 1996 (updated version of the DIN 1942).

PORTAL SÃO FRANCISCO. Colégio São Francisco. **Motor a vapor – caldeira**. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/mecanica/motor-a-vapor>>. Acesso em: 05 jan. 2018.

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia de cálculo do rendimento térmico de caldeiras operando com carvão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 5., 2017, Criciúma. **Anais...** Criciúma: Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) e Rede Carvão, 2017.

VERGNHANINI FILHO, R.; BUENO, P. R. B.; RORATO, M. A. Metodologia de cálculo e de acompanhamento on-line do rendimento térmico de caldeiras multicomcombustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 18, 2010, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: ABEQ, 2010.

VERGNHANINI FILHO, R.; SILVA, J. R. N. M. Manual sobre o uso racional do gás natural em equipamentos de combustão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19., 2012, Búzios. **Anais...** São Paulo: ABEQ, 2012.

Medição em túneis de vento da velocidade do ar próxima à parede para estudos de conforto de pedestres

Near wall measurements for pedestrian comfort studies in wind tunnels

Gabriel Borelli Martins^{a*}, André Barsaglini da Costa^a,
Paulo José Saiz Jabardo^a, Gilder Nader^a

^a Laboratório de Vazão, Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: gborelli@ipt.br

Palavras-chave:

ação do vento em pedestres;
conforto de pedestres;
túnel de vento.

Keywords:

*pedestrian-level wind action;
pedestrian comfort; wind tunnel.*

Resumo

O ambiente urbano está em constante transformação e seu planejamento adequado é fundamental para garantir a qualidade de vida da população. Uma ferramenta útil no estudo do ambiente urbano é o túnel de vento, que permite, por meio de ensaios em modelos reduzidos, avaliar condições de conforto ambiental, de dispersão de contaminantes e, também, de carga de vento nas estruturas. Esse trabalho tem foco em conforto de pedestres devido à ação mecânica do vento. O objetivo foi elaborar um compêndio de algumas técnicas experimentais utilizadas no túnel de vento do IPT para o estudo da ação do vento no nível dos pedestres em ambientes abertos, cada qual com suas limitações e vantagens de acordo com o problema a ser estudado. As técnicas analisadas e as conclusões obtidas foram: a erosão de areia é útil em uma análise preliminar e qualitativa de zonas planas de grande extensão; a anemometria de fio quente pode ser utilizada sempre e também é importante na investigação de efeitos de rajada, embora as medições sejam intrusivas e demoradas; os sensores Irwin, que foram desenvolvidos especificamente para o estudo de conforto de pedestres, devem ser cuidadosamente fabricados e calibrados, mas podem ser instalados em vários pontos ao longo do piso do modelo.

Abstract

The urban environment is dynamic and is constantly changing. Therefore, a proper planning is required in order to guarantee individuals' well-being. A useful tool to study the urban environment is the wind tunnel which allows, through scaled-model testing, the

evaluation of pedestrian comfort and pollutant dispersion as well as the evaluation of wind action on structures. This paper is focused on the pedestrian-level comfort due to wind mechanical action on outdoor spaces. The main goal was to compare experimental techniques used with this purpose in IPT's wind tunnel. The analyzed techniques and the obtained conclusion were: the sand erosion technique is useful when studying large flat areas from the qualitative point of view; hotwire anemometers are always useful, especially when gusts must be taken into account, although they can be highly intrusive and time consuming; Irwin sensors, developed specifically for near-wall measurements concerning pedestrian comfort studies, must be carefully manufactured and calibrated but can be installed in a large number of points along the model floor.

1 Introdução

O escoamento do vento em ambientes urbanos é constantemente alterado por novas construções. A interação destas construções com o vento atmosférico resulta em regiões de baixa velocidade em que existe a possibilidade da formação de ilhas de calor e a dificuldade na dispersão de contaminantes; e regiões de alta velocidade no nível dos pedestres onde há a possibilidade de desconforto e o risco de acidentes (BLOCKEN; CARMELIET, 2004). Túneis de vento são ferramentas extremamente úteis no estudo desses problemas, oferecendo possibilidade de planejamento do ambiente construído. A investigação experimental de problemas que envolvem a ação do vento em pedestres traz, contudo, certas dificuldades e desafios, apresentados e discutidos nesse artigo.

Primeiramente, é importante distinguir o conforto devido à ação mecânica do vento, abordado neste trabalho, do conforto térmico. O estudo de conforto térmico em ambientes abertos sujeitos à ação do vento é bastante complexo, envolvendo diversas variáveis, sejam elas variáveis ambientais, como velocidade, temperatura e umidade ou variáveis relacionadas aos indivíduos, como metabolismo e vestimenta. O conforto pela ação mecânica do vento leva em consideração apenas o efeito do vento nas pessoas. Na maioria dos casos, estando as vestimentas adequadas às condições climáticas, os critérios de conforto térmico são respeitados se a ação do vento em si não trouxer problemas de conforto (LAWSON, 1975).

A primeira grande dificuldade na análise de conforto devido à ação do vento em pedestres diz respeito aos critérios que devem ser adotados. Não existe consenso quanto ao critério ideal e diversos trabalhos tratam do assunto, seja na proposição ou na comparação de critérios de conforto, como Blocken e Carmeliet (2004), Melbourne (1978), Bottema (1993), Koss (2006), Willemsen e Wisse (2007) e Stathopoulos (2009). Os trabalhos de Bottema (1993) e Koss (2006) tratam de critérios de conforto e trazem diversas comparações bastante interessantes. De modo geral, os critérios se resumem à estipulação de uma velocidade limite, considerando ou não rajadas, e à probabilidade de ultrapassar essa velocidade, como mostrado pelas **Equações 1 e 2**:

$$U_{eq} = \bar{U} + g\sigma_U \leq U_{lim} \quad (1)$$

$$P(U_{eq} \geq U_{lim}) \leq P_{lim} \quad (2)$$

Nestas equações, U_{eq} é a velocidade equivalente, ou velocidade de rajada, uma vez que é definida como a soma da velocidade média \bar{U} com o produto do desvio padrão da velocidade σ pelo fator de pico g . O fator de pico está relacionado com o período da rajada. U_{lim} , por sua vez, é o limite de velocidade considerado que em tese varia de acordo com a atividade praticada e com o critério (conforto ou perigo). A probabilidade de se exceder a velocidade limite é representada pelo termo $P(U_{eq} \geq U_{lim})$ da **Equação 2**. Novamente, em cada critério, seja ele de conforto ou de perigo, são dados valores limites de probabilidade de se exceder a velocidade limite (P_{lim}).

Métodos numéricos e experimentais são empregados para a determinação das velocidades locais que, em conjunto aos dados meteorológicos e ao critério adotado, determinam as condições locais de conforto. Tratando especificamente dos métodos experimentais, a complexidade dos modelos e a necessidade da medição de velocidade próxima da superfície (da ordem de 5 mm em modelos de escala 1:200) faz com que técnicas específicas de medição sejam empregadas nestes casos.

Este trabalho traz uma revisão de três técnicas e métodos de medição utilizados no estudo da velocidade do vento na altura de pedestres em modelos em escala reduzida. Inicialmente, o método de erosão de areia será apresentado. Embora esse forneça apenas uma aproximação dos valores de velocidade, é muito útil no estudo de áreas planas muito extensas, principalmente na identificação de zonas que devem ser mais bem estudadas. Em seguida, são abordadas técnicas de medição com anemômetros de fio quente, sendo identificadas suas vantagens e limitações. Finalmente, será apresentado um sensor diferencial de pressão desenvolvido por Irwin (1981), que atualmente é muito utilizado por laboratórios do mundo todo no estudo da ação mecânica do vento em pedestres por meio de ensaios em túnel de vento de modelos reduzidos (IRWIN, 1981; WU, STATHOPOULOS, 1994). Novamente, suas vantagens e limitações serão abordadas.

2 Necessidades impostas no estudo experimental de conforto de pedestres

Parte do estudo da ação mecânica do vento em pedestres, quando considerado ambientes urbanos abertos, é feita experimentalmente com modelos reduzidos em túneis de vento que simulam a camada limite atmosférica. Nas últimas décadas, a modelagem numérica, por meio de *softwares* de Fluidodinâmica Computacional (CFD, do acrônimo em inglês *Computational Fluid Dynamics*), demonstrou ser uma importante ferramenta de projeto e vem sendo utilizada de maneira complementar as técnicas experimentais (BLOCKEN; CARMELIET, 2004). Neste artigo, apenas a modelagem experimental será tratada, com enfoque em algumas técnicas comumente empregadas.

É importante ressaltar a necessidade de medidores omnidirecionais em estudos que envolvam a determinação da velocidade próxima à parede de modelos em escala reduzida de ambientes urbanos. Não se sabe de antemão a direção e o sentido do escoamento em cada ponto do modelo. Técnicas de visualização poderiam ser empregadas com este objetivo, contudo o trabalho envolvido para o mapeamento do escoamento nos diversos pontos do modelo para diversos ângulos de incidência do vento, sem considerar as altas intensidades de turbulência envolvidas, sugerem que essa não seja a melhor alternativa. Além disto, esse procedimento provavelmente implicaria em incertezas de medição adicionais. Desse modo, o ideal é trabalhar com sensores omnidirecionais.

Outra necessidade é a capacidade de medir grandes áreas de forma eficiente. Caso medidas pontuais sejam feitas, são necessários diversos sensores para medição simultânea ou um sistema automatizado de movimentação da sonda. Isto é importante para reduzir o tempo de ensaio, que pode ser bastante grande, dependendo da área que deve ser analisada. Novamente, uma alternativa que pode ser empregada para reduzir o tempo de ensaio, é a utilização prévia de técnicas de visualização para reduzir a área de estudo.

Sensores ópticos podem ser utilizados, desde que meçam as três componentes de velocidade. Apresentam a vantagem de não serem intrusivos. Contudo, em muitos casos, não há janela óptica para que sejam empregados. Além disso, o controle da densidade de partículas é, no geral, difícil devido às características geométricas dos modelos, à proximidade da parede e à turbulência. Sendo assim, embora técnicas ópticas possam ser ótimas alternativas em alguns casos, não serão tratadas neste trabalho pelos motivos descritos acima.

3 Técnica de erosão de areia

A técnica de erosão de areia é extremamente útil para investigar grandes áreas. Embora seja uma técnica substancialmente qualitativa, alguma informação quantitativa pode ser obtida (JABARDO et al., 2005). De qualquer forma, zonas críticas que necessitem de maiores investigações podem ser identificadas para posterior análise com outros medidores, como anemômetros de fio quente (LIVESEY et al., 1992).

A técnica consiste em espalhar uma fina camada de areia, de granulometria conhecida, o mais uniformemente possível na superfície do modelo. Uma foto é tirada antes do início do teste e posteriormente o ensaio é realizado em diferentes velocidades do vento. Cada velocidade é mantida constante no túnel de vento por alguns minutos e os padrões de erosão são registrados. Os grãos de areia se desprendem da superfície pelo fenômeno de erosão, que basicamente está ligado à velocidade de atrito na superfície do modelo, definido na **Equação 3**:

$$u_{*,0} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3)$$

Onde:

$u_{*,0}$ = velocidade de atrito na superfície do modelo em m/s;

τ_0 = tensão de cisalhamento na superfície do modelo em N/m²;

ρ = densidade do ar em kg/m³.

O diâmetro do grão de areia normalizado, d^+ , definido na **Equação 4**, é bastante pequeno, menor que 5, o que indica que os grãos se encontram na subcamada viscosa, como mostrado no gráfico da **Figura 1** ($y^+ < 5$), que apresenta a velocidade normalizada pela velocidade de atrito em função da distância normalizada (da mesma forma que foi feito para d^+). Sendo assim, a erosão independe do perfil de velocidades (JABARDO et al., 2005).

$$d^+ = \frac{u_* d}{\nu} \quad (4)$$

Onde:

u_* = velocidade de atrito em m/s;

d = diâmetro do grão de areia em m;

ν = viscosidade cinemática em m²/s.

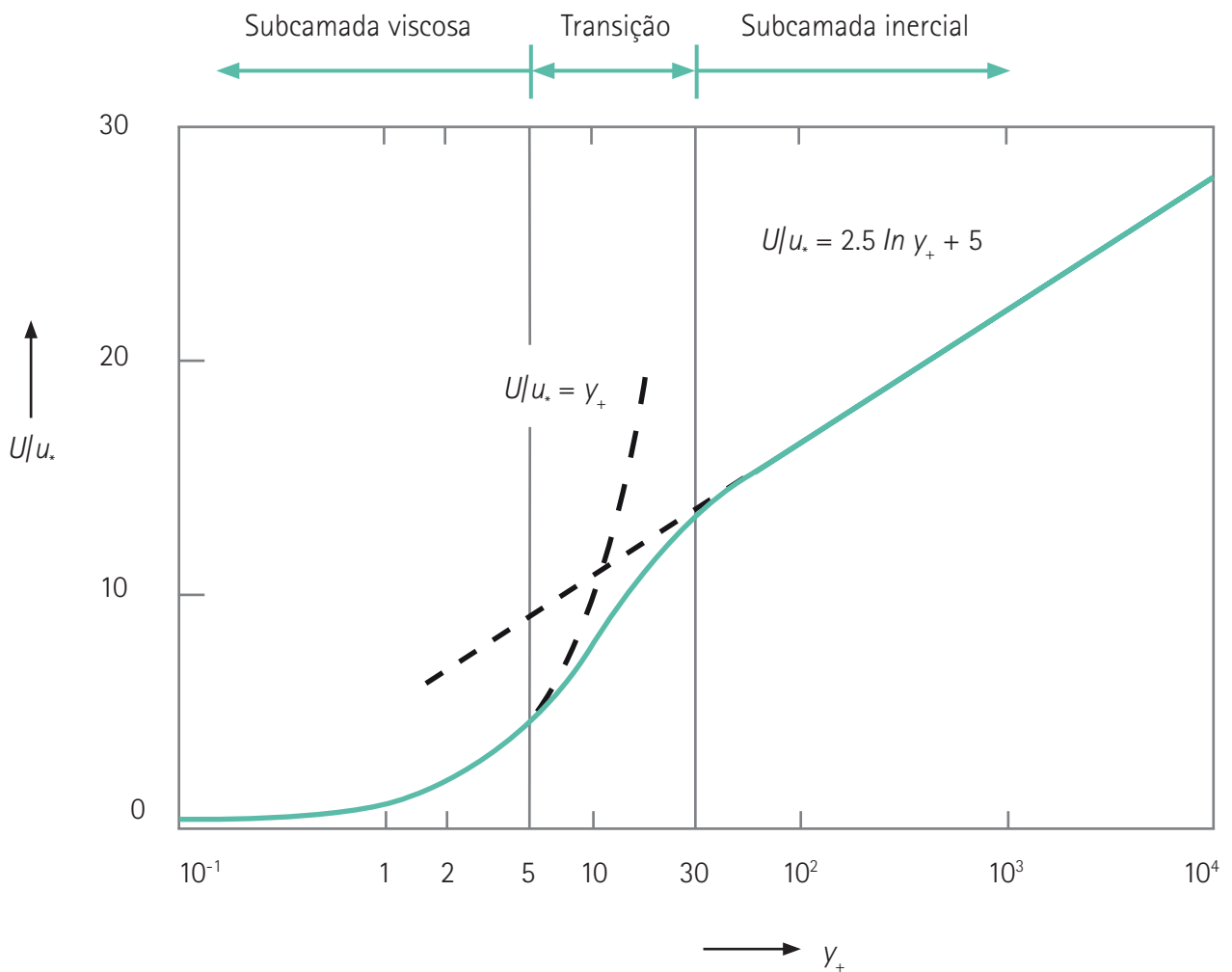


Figura 1 – Lei da parede.

Fonte: adaptado de Tennekes e Lumley (1972).

Para saber o valor aproximado da velocidade, inicialmente se determina a velocidade para a qual o fenômeno de erosão ocorre. Segundo Livesey et al. (1992), a velocidade limiar de desprendimento dos grãos de areia é de difícil determinação e depende, dentre outros fatores, do diâmetro dos grãos, rugosidade do modelo e turbulência local. Outra limitação do método é que deve ser aplicado apenas para terrenos planos. Caso seja necessário reproduzir as inclinações do terreno no modelo reduzido, não é recomendável utilizar a técnica de erosão.

Procedimentos básicos de processamento de imagem podem ser utilizados para facilitar a análise dos resultados obtidos nos ensaios em túnel de vento. No Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica (TVCLA) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo foi desenvolvido um procedimento que adota técnicas simples de processamento de imagem para aplicação nas figuras de erosão. Esse procedimento foi empregado por Oliveira et al. (2015a) e Oliveira et al. (2015b). Nesses trabalhos, foi realizado um estudo dos efeitos da verticalização de uma parcela da região leste da cidade de São Paulo (de acordo com o plano diretor da cidade) nas velocidades do vento no nível dos pedestres.

O procedimento consiste em separar as regiões de interesse por meio de máscaras, limiarizar a imagem (transformar a imagem inicial de 256 níveis de intensidade para uma imagem de dois níveis de intensidade a partir da escolha de um limiar de tom de cinza), aplicar um operador de dilatação para eliminar espaços vazios indesejados entre os grãos de areia, aplicar um operador de erosão de mesma dimensão que o operador dilatação para recuperar as bordas dos padrões de erosão originais, rotular a imagem, unir todas as imagens em uma figura apenas (com mapa de cores ou de contorno) e, finalmente, suavizar a figura resultante por meio da convolução de filtros lineares com o formato mostrado na **Equação 5**.

$$r(i,j)=\sum_{l,m} f(i+l,j+m)k(l,m) \quad (5)$$

Na **Equação 5**, $r(i,j)$ é o valor do pixel na posição (i,j) , resultante da soma ponderada dos pixel da imagem original $f(i+l,j+m)$. Os coeficientes deste tipo de filtro são dados pela matriz $k(l,m)$. O exemplo mais simples deste tipo de matriz é dado abaixo, na **Equação 6**.

$$k = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

A **Figura 2** mostra duas imagens originais dos ensaios. A **Figura 2a** corresponde ao modelo antes do início dos ensaios e a **Figura 2b** corresponde ao padrão formado após o ensaio com velocidade do vento de 13,3 m/s na altura escolhida como referência.

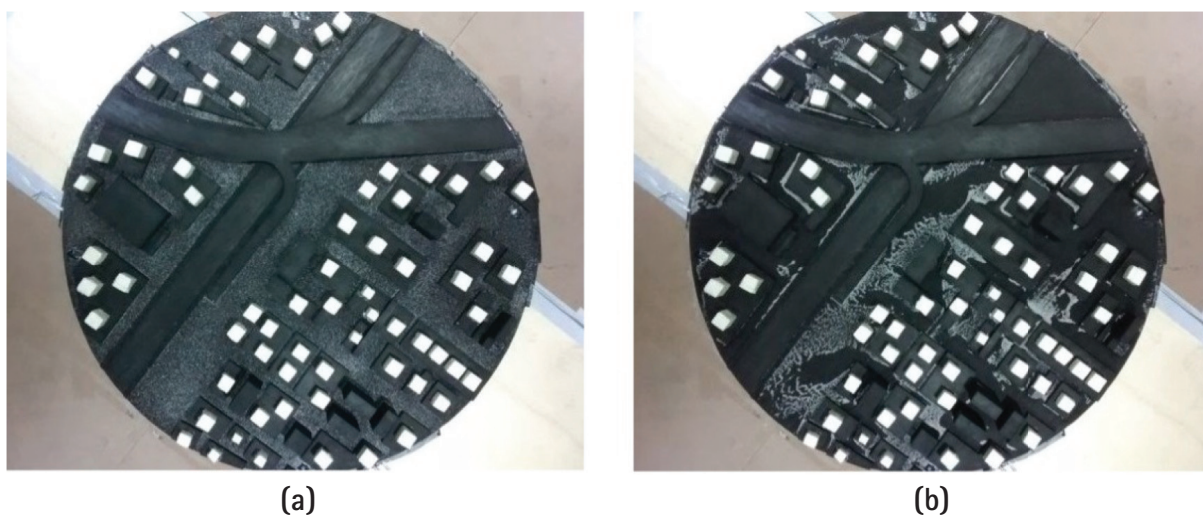


Figura 2 – Exemplos de imagens brutas do ensaio de erosão: (a) antes do início dos ensaios e (b) após o ensaio com velocidade de referência no túnel de vento de 13,3 m/s.

Fonte: elaborado pelos autores.

Na **Figura 3** é mostrada a máscara que foi aplicada nas imagens da **Figura 2**. Em seguida, foi feita a limiarização e aplicados operadores de dilatação e erosão. A aplicação desses operadores nessa sequência se chama fechamento e tem o objetivo de eliminar alguns espaços indesejados, como mostrado na **Figura 4**. Os resultados são mostrados nas imagens da **Figura 5**.



Figura 3 – Máscara aplicada nas imagens da Figura 2. As regiões em branco são as descartadas.
Fonte: elaborado pelos autores.

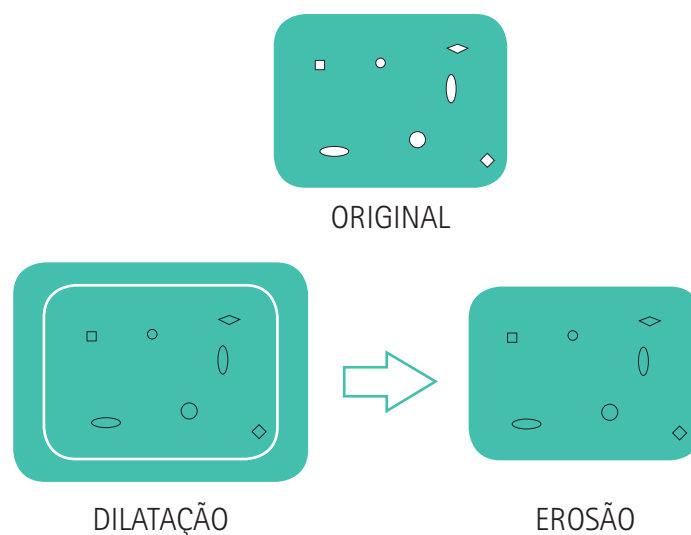


Figura 4 – Operadores dilatação e erosão aplicados em sequência para eliminar vazios.
Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 5 – Imagens da Figura 2 após aplicação da máscara e das operações de limiarização, dilatação e erosão.
Fonte: elaborado pelos autores.

Após o processamento de todas as imagens, é possível atribuir a cada uma delas valores correspondentes, neste caso, a valores adimensionais de velocidade. O resultado é mostrado na **Figura 6** (após suavização). As regiões em vermelho correspondem às maiores velocidades no protótipo que podem ser desconfortáveis ou perigosas para os pedestres, ao passo que as regiões amarelas mais claras correspondem a zonas de baixa velocidade que podem representar problemas, sobretudo no que diz respeito à dispersão de contaminantes.



Figura 6 – Figura final após rotular todas as imagens do ensaio. Velocidades mais altas em vermelho e mais baixas em amarelo.
Fonte: elaborado pelos autores.

4 Medição de velocidade próxima à superfície com anemômetros de fio quente

A anemometria de fio quente ainda é muito utilizada hoje, sobretudo no estudo de turbulência, mesmo com a evolução de técnicas ópticas não invasivas, tais como o LDA (*Laser Doppler Anemometry* – Anemometria a laser por efeito Doppler) e o TR-PIV (*Time-resolved PIV* – Sistema óptico de velocimetria por imagem de partículas).

A proximidade da parede traz consigo alguns efeitos na medição da velocidade com anemômetros de fio quente. Como tratado por Lanspeary (1997), esses efeitos são de origem aerodinâmica e térmica.

No que diz respeito à aerodinâmica, a própria geometria do suporte e dos prolongadores do filamento (sonda) influem no escoamento. Esses efeitos são considerados quando é realizada a calibração, contudo, não são os mesmos de quando a sonda é aproximada da superfície do modelo, resultando em erros de medição. Krishnamoorthy et al. (1985) mostram que a orientação e o posicionamento da sonda são importantes na medição da velocidade próxima à parede. No geral, a necessidade de inclinação do suporte (para medições muito próximas da parede) expõe sua maior parte, bem como os prolongadores, a uma região de maior quantidade de movimento, defletindo parte do escoamento para a superfície do modelo (LANSPEARY, 1997). Outro ponto que deve ser observado é que perto da parede, diferentemente das condições de calibração, a taxa de cisalhamento é grande, podendo aumentar ainda mais a distorção no campo de velocidades ao redor do filamento (KRISHNAMOORTHY et al., 1985).

Considerando escala do modelo de 1:200, as medições de velocidade no nível dos pedestres devem ser feitas a aproximadamente 5 mm, correspondente a 1 m na escala do protótipo (escala real). Como os ensaios são conduzidos à maior velocidade possível, visando a obter o maior número de Reynolds, pode-se considerar que $y^+ \gg 5$, e, portanto, desprezar efeitos térmicos devido à proximidade da parede.

Embora anemômetros de fio quente sejam boa alternativa para a medição da velocidade próxima à superfície do modelo, algumas dificuldades são observadas para a aplicação tratada neste trabalho. Primeiramente, uma sonda omnidirecional é necessária, ou um anemômetro de três filamentos que faça a medição simultânea das três componentes ortogonais da velocidade, como o mostrado na **Figura 7**, uma vez que a direção do escoamento normalmente não é conhecida. Além disso, o grande número de pontos de medição em conjunto com o estudo para vários ângulos de incidência do vento, que muitas vezes é necessário, tornam os ensaios muito demorados. Isso ocorre mesmo que seja adotado um sistema automático para o posicionamento da sonda, uma vez que, na maioria dos casos, edifícios e outras construções reproduzidas no modelo reduzido fazem com que o ensaio tenha que ser pausado diversas vezes para reposicionamento da sonda no sistema automático de posicionamento.



Figura 7 – Anemômetro de fio quente 3D.
Fonte: elaborado pelos autores.

De qualquer forma, anemômetros a fio quente são bastante úteis. Caso o desvio padrão das três componentes ortogonais do vetor velocidade ou o tensor das tensões de Reynolds na altura dos pedestres seja de interesse, esse instrumento se apresenta, possivelmente, como a melhor opção.

5 Medição de velocidade com sensores Irwin

Tradicionalmente, o sensor omnidirecional desenvolvido por Irwin é composto de duas tomadas de pressão, sendo uma na altura da superfície do modelo e outra um pouco acima (IRWIN, 1981). Pode-se correlacionar, como exposto por Irwin (1981), a diferença de pressão entre essas duas tomadas com a velocidade do escoamento. O desenho técnico deste sensor é mostrado na **Figura 8**.

A grande vantagem dos sensores Irwin, além de serem sensores omnidirecionais, é que podem ser empregados em grande número concomitantemente aos ensaios de medição de pressão na fachada de edifícios. Não é incomum que estudos de conforto de pedestre sejam acompanhados de estudos de carregamento estático do vento e de comportamento dinâmico de edificações. Em todos esses casos, transdutores piezoresistivos de múltiplas tomadas de pressão são utilizados. Sendo assim, o tempo total de ensaio é significativamente reduzido. Esse tipo de sensor é capaz de medir não apenas as velocidades médias, mas também, como será indicado mais à frente, as variações de velocidade de baixa frequência.

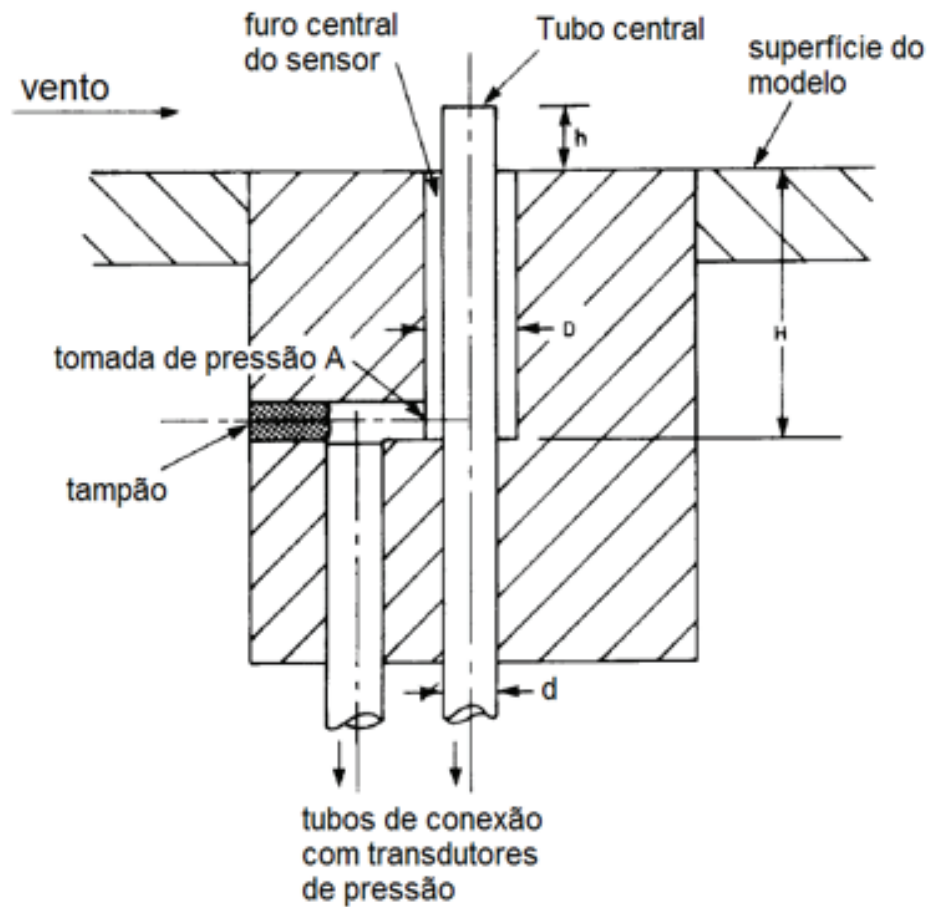


Figura8 – Desenho técnico do sensor Irwin.
 Fonte: Adaptado de Irwin (1981).

O princípio de medição deste tipo de sensor é análogo ao de medidores de tensão de cisalhamento como o tubo de Preston (IRWIN, 1981). Pensando em uma camada limite turbulenta, a região próxima da parede obedece a uma lei universal do tipo mostrado na **Equação 7**.

$$U = u_* f\left(\frac{u_* z}{\nu}\right) \quad (7)$$

Onde:

U = velocidade média em m/s;

u_* = velocidade de atrito em m/s;

z = distância da parede em m;

ν = viscosidade cinemática em m²/s.

Na **Equação 7**, f é uma função universal que, como explicado por Irwin (1981), compreende a subcamada viscosa, a região cuja lei logarítmica é válida e a região de transição. Todas estas regiões estão identificadas na **Figura 1**.

Como o perfil de velocidades médio segue uma lei universal, é de se esperar que a distribuição de pressão média em um obstáculo também siga uma lei universal. Sendo assim, a diferença de pressão entre dois pontos do obstáculo pode ser relacionada com a velocidade de atrito e , consequentemente, com a tensão de cisalhamento, a exemplo dos tubos de Preston. Levando-se em consideração a **Equação 7**, pode-se isolar u_* e obter a velocidade em função da diferença de pressão entre os dois pontos de medição do sensor.

Uma relação simples entre velocidade e variação de pressão instantâneas no obstáculo é a **Equação 8** (IRWIN, 1981; WU; STATHOPOULOS, 1994).

$$Q = \alpha + \beta \sqrt{\Delta p} \quad (8)$$

Onde:

Q = módulo de velocidade em m/s;

p = pressão em Pa;

α e β = coeficiente de calibração.

Foi utilizada a nomenclatura Q e não U para a velocidade, pois este sensor não é capaz de medir a direção do escoamento (notação condizente à notação adotada pelas referências deste trabalho). Sensores Irwin multifuros podem ser empregados caso a direção do escoamento seja de interesse (PALOMBI, COOK, 2010).

Contudo, para a determinação dos valores instantâneos de velocidade, alguns cuidados devem ser tomados. Os valores de Δp devem ser filtrados com um filtro passa baixa, que elimina os componentes do sinal de pressão com frequências superiores a $1/T$, de modo que a relação $Tu_* / h \gg 1$ seja verdadeira, sendo T o período e h a altura de medição. Conforme o valor de Tu_* / h se aproxima de 1, o perfil de velocidade média tende a se distanciar da lei da parede (IRWIN, 1981). Sendo assim, existe um limite na medição da flutuação da velocidade. Além disso, como indicado por Wu e Stathopoulos (1994) e Irwin et al. (1979), nos casos em que a resposta em frequência é importante, deve-se trabalhar com mangueiras curtas (da ordem de 170 mm para taxa de amostragem de 100 Hz), restritores que aumentem o amortecimento ou correções no sinal digital por meio de função de transferência oriunda de calibração prévia (IRWIN; COOPER; GIRARD, 1979). Caso contrário, diferenças consideráveis são observadas na amplitude e na fase dos sinais de pressão.

Alguns comentários adicionais podem ser feitos no que diz respeito aos sensores Irwin. As diferenças de pressão envolvidas são muito baixas, de modo que tais sensores não são indicados para a medição de velocidades abaixo de 3 m/s (IRWIN, 1981), pois a diferença de pressão é menor que 5 Pa. Isto não costuma ser problemático para investigações de conforto de pedestres devido à ação mecânica do vento em túneis de vento. Trabalha-se com a maior velocidade possível no interior do túnel e as velocidades de interesse neste tipo de estudo são as mais altas. A interferência entre sensores é verificada quando um sensor se encontra na esteira do outro à distância inferior a $12d$ (vide **Figura 8**). A altura h protuberante do sensor deve, preferencialmente, ser a própria altura de medição da velocidade, diferentemente do indicado por Irwin (1981). Erros tendem a aparecer quando a altura de medição da velocidade é diferente de h (WU, STATHOPOULOS, 1994).

Alguns sensores Irwin foram confeccionados para serem testados e utilizados em estudos de conforto de pedestres no TVCLA do IPT. Os desenhos técnicos foram confeccionados a partir das indicações do trabalho de Irwin (1981). Um dos sensores, pronto para uso, é mostrado na **Figura 9**.



Figura 9 – Sensor Irwin utilizados nos testes iniciais.
Fonte: elaborado pelos autores.

Os sensores foram montados em uma placa plana na saída de um dos túneis de vento do IPT, que possui seção de testes de 0,5 m de largura por 0,5 m de altura para calibração, como mostrado na **Figura 10**. A **Figura 11**, por sua vez, mostra como o sensor deve ser instalado na superfície do modelo. Inicialmente, foi realizada uma verificação com um sistema de varredura de pressão por múltiplos canais, com 16 canais, sensores piezoresistivos, modelo DSA 3217 fabricado pela *Scanivalve*.

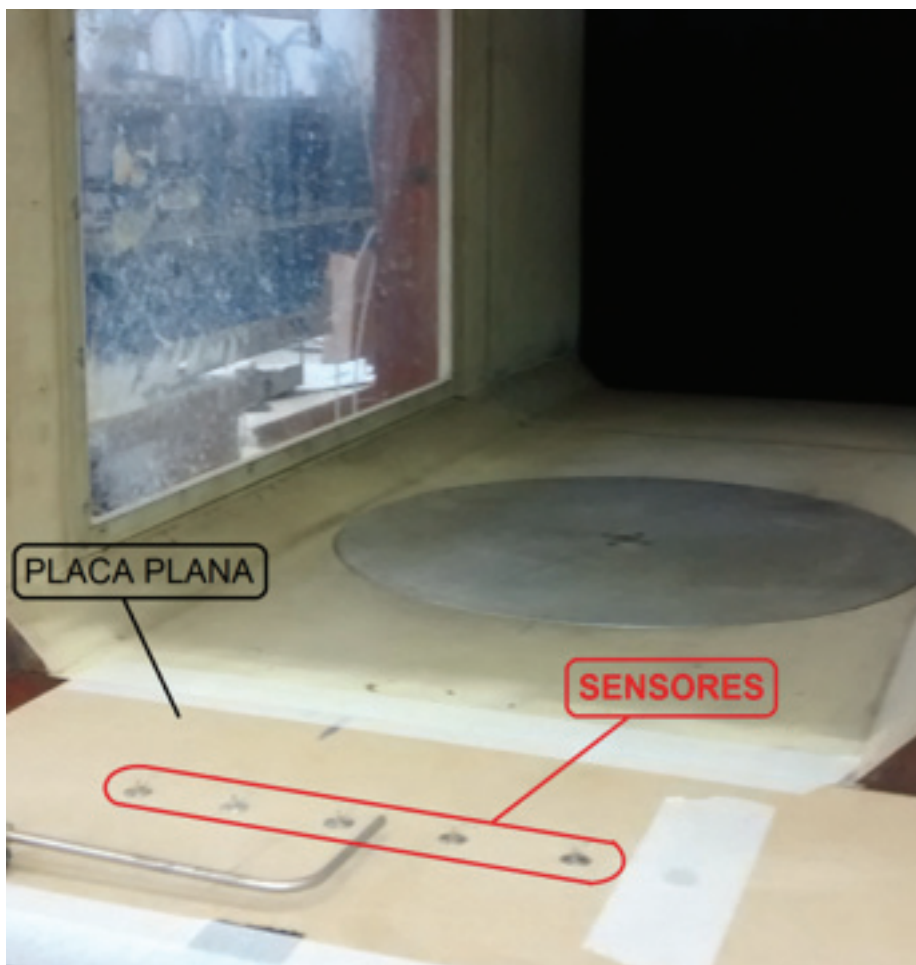


Figura 10 - Sensores Irwin montados em placa plana na saída de um dos túneis de vento do IPT.
Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 11 - Detalhes de sensores montados em placa plana da saída do túnel de vento.
Fonte: elaborado pelos autores.

Por simplicidade, a **Equação 7** foi utilizada e os valores de velocidade foram medidos com um tubo de Pitot. As diferenças de pressão foram então medidas para diversas velocidades e incidências do vento. Percebeu-se que alguns sensores não apresentavam comportamento omnidirecional, ao passo que outros apresentavam, como o mostrado na **Figura 12**. Parte do motivo para este comportamento em alguns sensores está relacionado com a qualidade da fabricação dos mesmos. Os resultados sugerem que há necessidade de melhor controle dimensional e cuidado na fixação dos sensores na superfície do modelo. A fixação do tubo protuberante, por exemplo, mostrou-se problemática. O furo por onde este elemento é fixado apresenta certa folga e para fixação foi utilizada cola epóxi. Talvez o melhor seja um ajuste por interferência, de modo que haja melhor centralização do tubo protuberante com o furo na superfície do sensor, o que, por sua vez, melhoraria a omnidirecionalidade do sensor Irwin.

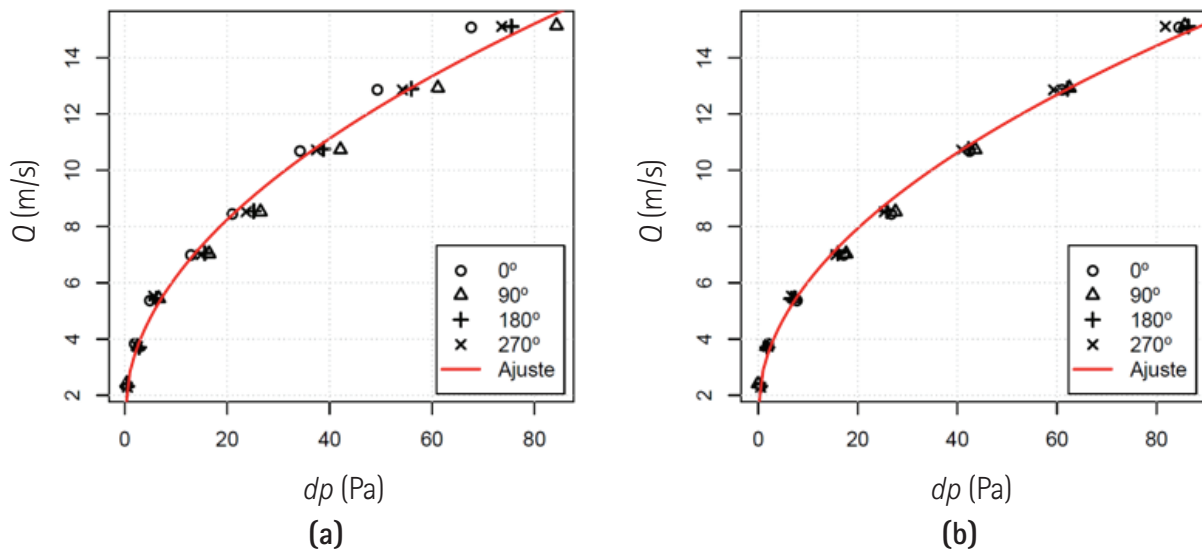


Figura 12 – Valores médios obtidos para quatro ângulos de incidência do vento e ajuste empregado no (a) sensor 1 e no (b) sensor 2.

Fonte: elaborado pelos autores.

6 Conclusões

Este trabalho discutiu algumas técnicas de medição voltadas para estudos de conforto de pedestres utilizando modelos reduzidos em túneis de vento. A partir do que foi exposto, algumas conclusões puderam ser tiradas.

Ensaio de erosão de areia podem ser empregados em modelos sem topografia, principalmente na identificação de zonas críticas pensando em risco de acidentes e no conforto de pedestres (velocidades elevadas) e pensando na dispersão de contaminantes e na formação de ilhas de calor (velocidades baixas). É uma técnica qualitativa particularmente interessante para investigação de grandes áreas.

Anemômetros de fio quente são instrumentos importantes, neste tipo de estudo e devem ser utilizado quando há necessidade de menores tempos de resposta na medição. Ademais, costumam ser empregados na calibração dos sensores Irwin.

Os sensores Irwin foram desenvolvidos especificamente para a aplicação em estudos de conforto de pedestres em ambientes externos. Sua fabricação requer certo cuidado, mas é relativamente simples. Podem ser empregados em grande quantidade se utilizado conectados a um sistema de varredura de pressão por múltiplos canais, reduzindo-se assim, de forma significativa, o tempo total de ensaio. Sua limitação está no tempo de resposta, uma vez que é indicado apenas para velocidades médias e resposta de baixa frequência, e na medição de velocidades baixas, abaixo de 3 m/s, o que não costuma ser problemático na aplicação discutida. Embora o valor de 3 m/s tenha sido encontrado na literatura, alguns testes realizados mostraram que o ideal é trabalhar com velocidades mais altas uma vez que a diferença de pressão encontrada para estas velocidades é inferior a 5 Pa.

7 Agradecimentos

Agradecemos a colaboração dos técnicos da oficina mecânica do IPT pela fabricação dos sensores Irwin utilizados neste trabalho. Além disso, gostaríamos de agradecer à engenheira Paula Bregiatto de Oliveira por ter realizado os ensaios de erosão de areia durante o seu período de estágio no IPT.

8 Referências

BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. Pedestrian wind environment around buildings: literature review and practical examples. **Journal of Thermal Envelope and Building Science**, v. 28, n. 2, p. 107-159, 2004.

BOTTEMA, M. **Wind climate and urban geometry**. 1993. Tese (Doutorado) - Technical University Eindhoven, Eindhoven, 1993.

IRWIN, H. P. A. H. A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 7, n. 3, p. 219-239, 1981.

IRWIN, H. P. A. H.; COOPER, K. R.; GIRARD, R. Corrections of distortion effects caused by tubing systems in measurements of fluctuating pressures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 5, n. 1-2, p. 93-107, 1979.

JABARDO, P. J. S. J. et al. Influence of integral length scales on sand erosion techniques. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 18., 2005, Ouro Preto. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2005.

KRISHNAMOORTHY, L. V. et al. Effect of wire diameter and overheat ratio near a conducting wall. **Experiments in Fluids**, v. 3, n. 3, p. 121-127, 1985.

KOSS, H. H. On differences and similarities of applied wind comfort criteria. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 94, n. 11, p. 781-797, 2006.

LANSPEARY, P. V. **Establishing very low speed, disturbance-free flow for anemometry in turbulent boundary layers**. 1997. Tese (Doutorado) - The University of Adelaide, Adelaide, 1997.

LAWSON, T. V. The effect of wind on people in the vicinity of buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4., 1975, London. **Proceedings...** Cambridge: Cambridge University Press, 1975.

LIVESEY, F. et al. Enhanced scour tests to evaluate pedestrian level winds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 44, n. 1-3, p. 2265-2276, 1992.

MELBOURNE, W. H. Criteria for environmental wind conditions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 3, n. 2-3, p. 241-249, 1978.

OLIVEIRA, P. B. et al. Consequences of verticalization. In: INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE, 31., 2015, Bologna, Italy. **Proceedings...** Bologna: PLEA, 2015a.

OLIVEIRA, P. B. et al. Impacts of urban verticalization in the vicinity of FATEC Tatuapé. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 14., Porto Alegre, Brazil. **Proceedings...** Porto Alegre: PUCRS, 2015b.

PALOMBI, E.; COOK, N. Development and application of a directional Irwin sensor. In: UK CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 9., 2010, Bristol. **Proceedings...** London: Wind Engineering Society, 2010.

STATHOPOULOS, T. Wind and comfort. In: EUROPEAN & AFRICAN CONFERENCE ON WIND ENGINEERING (EACWE), 5., Florence, Italy, 2009. **Proceedings...** Kanagawa: IAWE, 2009.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge: MIT Press, 1972.

WILLEMSSEN, E.; WISSE, J. A. Design for wind comfort in the Netherlands: Procedures, criteria and open research issues. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 9, p. 1541-1550, 2007.

WU, H.; STATHOPOULOS, T. Further experiments on Irwin's surface wind sensor. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 53, n. 3, p. 441-452, 1994.

Crerios para a priorização de microbacias hidrográficas: subsídios  implantaço de esquemas de pagamentos por serviços ambientais hídricos

Criteria for priority catchments: support to implementation of payment for environmental services in watersheds

Priscila Ikematsu^a, Ana Cândida Melo Cavani Monteiro^a, Aline Ribeiro Machado^b, Alessandra Gonçalves Siqueira^c, Deborah Terrell^a, Luiz Gustavo Faccini^a, Mariana Hortelani Carnesecca Longo^b, Nadia Franqueiro Correa^a, Priscilla Moreira Argentin^a e Tatiana Luiz dos Santos Tavares^a

a Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Seção Sustentabilidade de Recursos Florestais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

c Seção de Geotecnia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: priscilal@ipt.br

Palavras-chave:

pagamento por serviços ambientais, PSA, rea prioritária, recursos hídricos; Joanópolis.

Keywords:

payment for environmental services; priority area; water resource; PES; Joanópolis.

Resumo

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)  um instrumento economico estratégico e promissor para o fomento  proteção e  restauração de ecossistemas e seus serviços, como a garantia da disponibilidade qualiquantitativa da gua. A voluntariedade na transação entre as partes é uma das premissas dos acordos, o que pode resultar em investimentos em áreas com baixa relevância na provisão dos serviços ambientais hídricos. Nesse contexto, o trabalho objetivou identificar áreas prioritárias para os investimentos em PSA-hídrico no município de Joanópolis - SP, na escala da microbacia hidrográfica, por meio da seleção de crerios biofísicos e geoambientais. As variáveis foram selecionadas a partir da consulta a trabalhos de referência, das características da área de estudo, da viabilidade de representação espacial dos dados e de reuniões técnicas com equipe multidisciplinar. O método desenvolvido reuniu os crerios em dois grupos: um para representar o potencial hídrico natural de cada microbacia hidrográfica, onde investimentos em ações de proteção e conservação ambiental devem ser aplicados; e outro indicando o grau de degradação das mesmas, onde devem ser promovidas ações de recuperação florestal. Pressupõe-se que melhores benefícios em termos hídricos podem ser alcançados se os recursos em ações de proteção/conservação ou recuperação/restauração forem aplicados em áreas com alta prioridade de acordo com a metodologia proposta.

Os resultados auxiliam no suporte à tomada de decisão na definição das áreas estratégicas para os investimentos em PSA, contribuindo com a gestão dos recursos hídricos, planejamento ambiental e conhecimento científico.

Abstract

Payment for Environmental Services (PES) is a strategic economic tool to promote the protection and recovery of ecosystems and their services, such as ensuring the availability of water. PES schemes must be initiated with the voluntary participation of the providers which may result in investments in lands that are at low risk of degradation or have little influence over hydrological changes. In this context, this paper aims at identifying priority areas for the investments on PES in watersheds, in the catchment scale, based on selection of biophysical and geoenvironmental criteria. The study area was the municipality of Joanópolis, São Paulo State, which lies within the Cantareira System, one of the main water supply systems of the Metropolitan Region of São Paulo City. Different variables were selected based on the literature review, on the characteristics of the studied area, on the possibility of mapping in the work scale and on technical meetings with a multidisciplinary team. The method consisted of gathering the criteria into two groups: one representing the natural potential of each catchment, where investments in environmental protection and conservation actions should be applied; and another group indicating the degradation status of each catchment, where forest recovery activities should be promoted. It is expected that better hydrological benefits may be achieved if investments in conservation or recovery actions are applied in high priority areas defined by the methodology. The results can be used to support a decision making for investments in PES strategic areas, contributing to the management of water resources, the environmental planning and the scientific knowledge.

1 Introdução

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) inclui entre seus limites, de forma aproximada, uma bacia hidrográfica com balanço hídrico preocupante (a Bacia do Alto Tietê), resultado da oferta natural restrita por ser uma região de cabeceiras e pela elevada demanda devido à grande população e às atividades econômicas que abriga. Além disso, por ser o maior aglomerado urbano do país, as reservas de água hoje existentes estão submetidas a intensos impactos advindos da expansão urbana, afetando a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos utilizados para o abastecimento público (IKEMATSU, 2014; JACOBI; CIBIM; LEAO, 2015; TAGNIN, 2015). Como a demanda atual é maior do que a oferta natural dos sistemas existentes, há a necessidade de importar água da Bacia do Rio Piracicaba, a qual é utilizada para a operação de um importante sistema produtor de água da RMSP – o Sistema Cantareira.

Entre o final de 2013 e 2014, uma redução significativa no volume de precipitação ocorreu nas áreas de contribuição do Sistema Cantareira, afetando diretamente o volume de água armazenado nos reservatórios que o compõem (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2015). As opções para o enfrentamento dessa situação, na época, foram emergenciais, como a redução de vazão da água disponibilizada e a transferência de água tratada de outros Sistemas Produtores por meio de obras pontuais (SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS, 2015), mas existem estratégias inovadoras que devem ser exploradas para prevenir e minimizar os efeitos de eventos climáticos críticos, que tendem a ser cada vez mais recorrentes.

Entre os instrumentos existentes para a gestão ambiental e de recursos hídricos nas áreas de mananciais, destaca-se o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que é considerado um mecanismo promissor e estratégico para o fomento à proteção e à restauração de ecossistemas e dos seus serviços (INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, 2015), como a garantia da disponibilidade qualitativa e quantitativa da água. O PSA é baseado nos princípios do usuário-pagador e provedor-recebedor (**Figura 1**), ou seja, aqueles que se beneficiam dos serviços ambientais prestados (como os usuários de água) devem pagar por eles. Por outro lado, aqueles que contribuem para a geração dos serviços ecossistêmicos (como os proprietários de terra a montante) devem ser compensados por proporcioná-los (WUNDER, 2005; PAGIOLA; PLATAIS, 2007; GUEDES; SEEHUSEN, 2011; PAGIOLA; VON GLEHN; TAFFARELLO, 2012). A voluntariedade na transação entre as partes e a correta definição do serviço ambiental objeto do pagamento são algumas das premissas dos acordos de PSA (WUNDER, 2005).

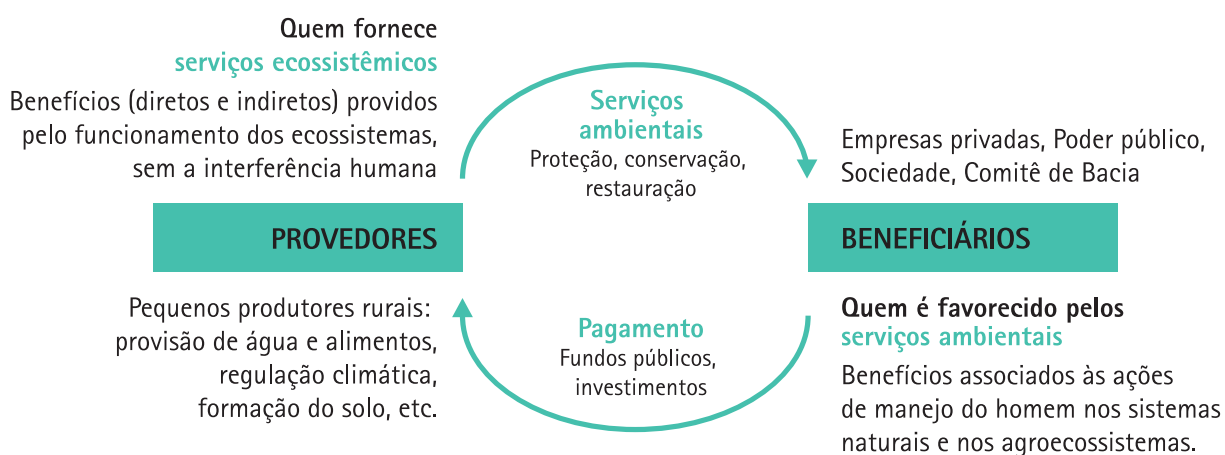


Figura 1 – Esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

Fonte: elaborado pelos autores.

De maneira geral, os acordos de PSA podem ser divididos em quatro grandes fases, conforme apresentado na **Figura 2**. As experiências de PSA-hídrico no Brasil encontram-se em diferentes fases de execução (POCIDONIO; TURETTA, 2012; GJORUP et al., 2016) e ainda existem dificuldades de ordem técnica, econômica, institucional e legal (VEIGA NETO; GAVALDÃO, 2011) para a sua implementação. Entre os desafios técnicos, destacam-se a identificação de áreas prioritárias (PAGIOLA et al., 2004; ROBERTSON; WUNDER, 2005; MELO, 2007; SANTOS; VIVIAN, 2012; LIMA et al., 2013; PRADO, 2014; GJORUP et al., 2016) e os processos de monitoramento por meio de indicadores ambientais (BERNARDES; SOUZA JUNIOR, 2010; VEIGA NETO; GAVALDÃO, 2011; ELOY; COUDEL; TONI, 2013; LIMA et al., 2013), que são ausentes ou deficientes, tanto em relação à água, quanto em relação às práticas de conservação e restauração florestal executadas.

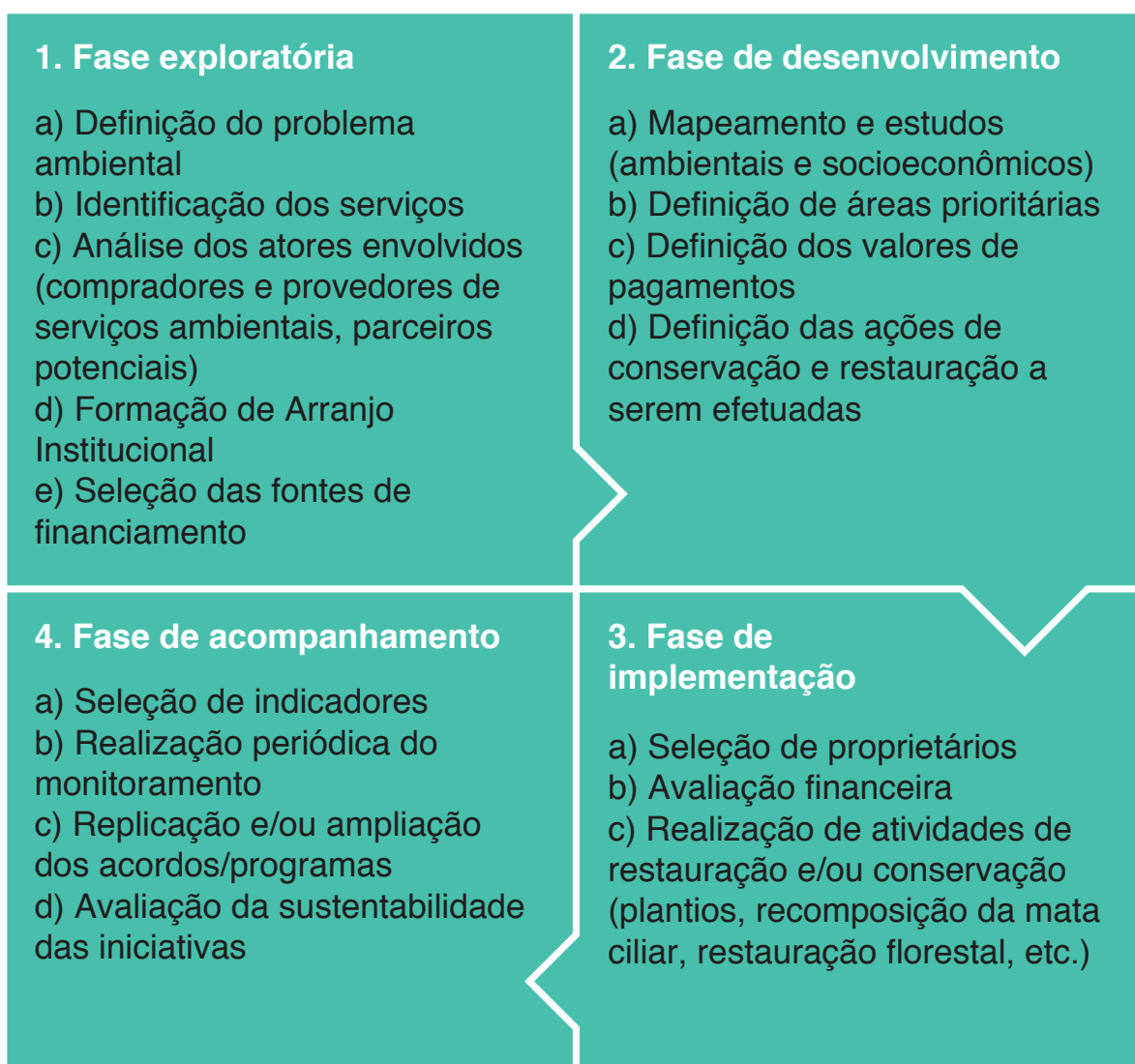


Figura 2 – Fases de elaboração de acordos de PSA.

Fonte: adaptado de Guedes e Seehusen (2011); Terceira Via (2011); Veiga Neto e Gavalvão (2011).

Em relação à identificação de áreas prioritárias nas fases iniciais dos acordos, Gjorup et al. (2016) mencionam que a seleção de áreas para PSA é realizada por meio do emprego direto de critérios previamente determinados para a bacia hidrográfica, município ou outros tipos de áreas de interesse definidos, a priori, pelo programa. Os autores destacam, ainda, que a análise espacial e a análise integrada do conjunto dos critérios de priorização ainda são práticas pouco empregadas. Além disso, o caráter voluntário dos acordos pode resultar em investimentos em áreas com baixa relevância na provisão dos serviços ambientais hídricos.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou desenvolver uma abordagem de priorização de microbacias hidrográficas, a partir de critérios biofísicos e geoambientais, como subsídio ao desenvolvimento dos acordos de PSA-hídrico, tendo como estudo de caso o município de Joanópolis, estado de São Paulo, Brasil, um dos doze municípios inseridos no Sistema Cantareira (Figura 3).

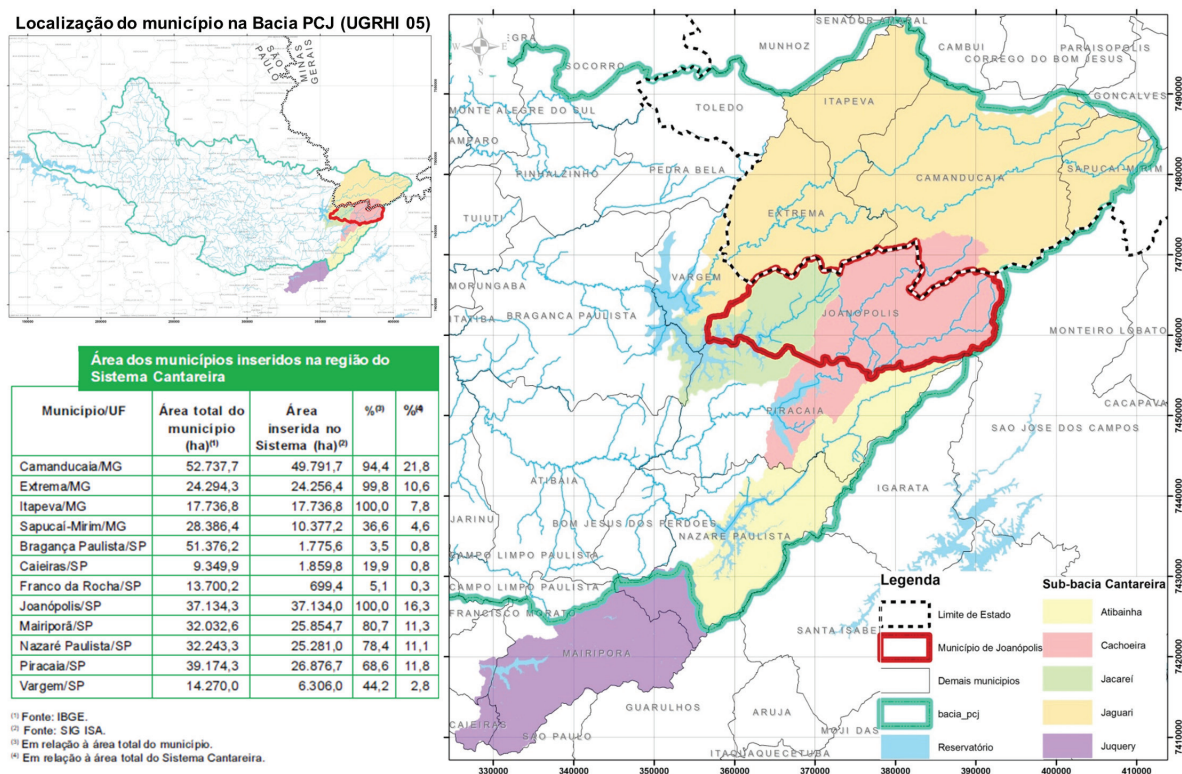


Figura 3 – Localização do município de Joanópolis na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 05 e no Sistema Cantareira.

Fonte: Whately e Cunha (2007).

2 Procedimentos Metodológicos

O trabalho foi focado na avaliação dos serviços ambientais hídricos na área de estudo, ou seja, aqueles relacionados aos processos hidrológicos para o suprimento de água para usos diversos, em quantidade e qualidade adequadas, dada a importância desse serviço no contexto de Joanópolis e do Sistema Cantareira. Além disso, considerou-se um possível investimento na escala municipal, pois as iniciativas de PSA para proteção de recursos hídricos têm sido, em maior parte, lideradas por prefeituras municipais e pelas empresas municipais de água (VEIGA NETO; GAVALDÃO, 2011).

A abordagem em serviços ambientais hídricos indica a necessidade de adotar a bacia hidrográfica como unidade de análise, tendo sido selecionada a escala da microbacia hidrográfica para o desenvolvimento do método. Três softwares foram empregados para a delimitação das microbacias. O TerraView Hidro 4.1.0 (RENNÓ et al., 2008) foi utilizado para a extração da rede de drenagem, a partir da base cartográfica vetORIZADA, na escala 1:10 000 (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DE SÃO PAULO, 1979). O Hydroflow 0.9 (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO, 2007) foi utilizado para classificar as drenagens segundo Strahler (1952), fornecendo informações para definir microbacias de ordem 4, 5 e 6 no município de Joanópolis. Por fim, o ArcGis 10.3.1 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2018) foi empregado para a elaboração do modelo digital de elevação e para o refinamento dos resultados, suavização de entorno de unidades cartografadas e eliminação de microbacias muito pequenas.

A seleção dos critérios de priorização partiu da premissa de que a microbacia hidrográfica possui um potencial natural para o provisionamento de serviços ambientais hídricos, o qual é afetado quando a bacia é submetida a pressões antrópicas, sendo essas transições bruscas ou não. Deste modo, dois conjuntos de ações podem ser aplicados por meio dos acordos de PSA em bacias hidrográficas: práticas de conservação/preservação, como a proteção de remanescentes florestais; e práticas de recuperação/restauração de áreas degradadas, como aquelas voltadas ao restabelecimento da cobertura vegetal com fins de proteção hídrica (SEEHUSEN; PREM, 2011).

Assim, a metodologia foi desenvolvida de forma a analisar essas duas condições nas microbacias hidrográficas: o seu potencial natural para o fornecimento de serviços ambientais hídricos, a partir dos critérios sintetizados no **Quadro 1**; e o respectivo grau de degradação pela ação antrópica, por meio da análise integrada dos critérios resumidamente descritos no **Quadro 2**. A escolha dos temas foi feita a partir da consulta a trabalhos de referência, das características da área de estudo, da viabilidade de representação espacial dos dados geoambientais e de reuniões técnicas com equipe multidisciplinar.

Quadro 1 – Critérios selecionados para a análise do potencial natural e síntese do método (continua).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Potencial de circulação das águas subterrâneas	Extração dos lineamentos na área de estudo, por meio de fotointerpretação em mosaicos georreferenciados, definição das classes dos lineamentos, a partir da extensão total de cada lineamento e a sua orientação em azimute e classificação de acordo com a favorabilidade à condução de água; cálculo da densidade de lineamentos; e elaboração do mapa de condicionamento estrutural à circulação das águas subterrâneas, a partir da análise integrada da densidade de lineamentos com a classe dos lineamentos, conforme metodologia descrita por Carvalho et al. (2014). Classificação das microbacias conforme a predominância da classe de condicionamento identificada (Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa).	Quanto maior o potencial de recarga e circulação, maior a quantidade de água em circulação na área e, assim, maior deve ser a prioridade da microbacia para PSA de conservação.
Densidade de Nascentes	Vetorização das curvas de nível e rede de drenagem das cartas topográficas (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DE SÃO PAULO, 1979), na escala 1:10 000 para geração do modelo digital de elevação e extração automática dos cursos d'água e nascentes. Validação do método a partir da verificação do canal e das quebras no relevo nas cartas topográficas 1:10 000 e 1:25 000; da consulta às ortofotos digitais (EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO, 2011), para a diferenciação dos canais fluviais, pluviais e artificiais, bem como a identificação de áreas com vegetação típica e clareiras na paisagem; e consulta às informações do Cadastro Ambiental Rural (CAR), para consulta de dados de verdade terrestre. Cálculo da densidade de drenagem em cada microbacia e classificação qualitativa em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme valores obtidos.	Quanto maior o número de nascentes por unidade de área, maior o número de pontos de formação de um determinado curso d'água, maior contribuição ao curso d'água principal e maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.
Padrão morfométrico da microbacia	Cálculo da Densidade de drenagem (Dd = razão entre o comprimento total de todos os canais e a área de drenagem total); do Índice de circularidade (Ic = razão entre a área de drenagem e o seu perímetro ao quadrado); e do Índice de Sinuosidade do Canal Principal (Is = razão entre o comprimento do rio principal e a distância vetorial entre os pontos extremos do talvegue). Classificação final feita com base na soma ponderada dos valores atribuídos a cada sub-bacia [Prioridade = $(Dd*1) + (Ic*1) + (Is*2)$]. Classificação qualitativa em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme valores obtidos.	Quanto mais alongada for a microbacia (menor Índice de drenagem circularidade) e quanto maior a sua densidade de drenagem e índice de sinuosidade, melhores são as condições à produção hídrica e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.

Quadro 1 – Critérios selecionados para a análise do potencial natural e síntese do método (continuação).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Suscetibilidade à erosão	Análise integrada das classes de solos (OLIVEIRA et al., 1999) e das classes de declividade na área de estudo (0 a 6 %: áreas planas ou com relevo suavemente ondulado; 6 % a 20 %: áreas com relevo ondulado; 20 % a 30 %: áreas com relevo ondulado ou fortemente ondulado; 30 % a 50 %: áreas com relevo fortemente ondulado a montanhoso; e maior que 50 %: áreas de relevo montanhoso e escarpado). A matriz de correlação adotada foi construída a partir de metodologia apresentada por Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2011). A classificação de cada microbacia foi determinada conforme a predominância da classe de suscetibilidade (Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa).	Quanto maior a suscetibilidade à erosão, maior a quantidade de sedimentos que podem atingir os mananciais, cursos d'água e reservatórios; e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.
Regime de chuvas	Elaboração do mapa de isoietas, por meio dos dados de chuva obtidos no banco de dados hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016a) no município de Joanópolis e municípios vizinhos. Para cada posto pluviométrico, foram calculados os dados mensais de chuva de uma série histórica de 30 anos e as falhas de preenchimento foram corrigidas pelo método da ponderação regional. As isolinhas foram determinadas a partir da média do total anual de cada estação e a classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto maior o índice pluviométrico da bacia, maior a entrada de água no sistema, maior a tendência ao carreamento de sedimentos em áreas sem práticas conservacionistas, e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.

Fonte: elaborado pelos autores.

Quadro 2 – Critérios selecionados para a análise do grau de degradação e síntese do método (continua).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Potencial à geração de sedimentos	A potencialidade à produção de sedimentos foi determinada por meio do cruzamento das classes de suscetibilidade à erosão (pedologia versus declividade) e de uso e ocupação do solo (COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL, 2013) no município de Joanópolis. As classes de uso do solo foram agrupadas conforme o seu potencial de fornecimento de sedimentos. A matriz de correlação adotada foi construída a partir de metodologia apresentada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (2011). A classificação de cada microbacia foi determinada conforme a predominância da classe de potencial à geração de sedimentos (Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa).	Quanto maior o potencial à produção de sedimentos, maior influência na qualidade da água; menor a capacidade de armazenamento de água no reservatório e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.
Área impermeabilizada	A influência da área impermeabilizada no ciclo hidrológico foi analisada a partir de informações do mapa de uso e ocupação da terra elaborado pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental (2013). Foram consideradas áreas impermeabilizadas as seguintes classes de uso e ocupação do solo: Área Edificada (em diferentes estágios de ocupação: consolidado, em consolidação e rarefeito); Loteamentos e grandes equipamentos (indústrias, Estação de Tratamento de Água e Esgoto, área institucional). A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto mais impermeabilizada, maior a alteração na condição e no volume do escoamento superficial e subterrâneo, devido à diminuição da área de alimentação do aquífero e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.
Densidade de vegetação arbórea ripária	A densidade de vegetação arbórea presente na área ripária foi obtida por meio da proporção das áreas que possuem cobertura vegetal com predomínio de porte arbóreo em uma zona (buffer) de 100 m ao redor de corpos hídricos. A cobertura vegetal foi obtida por meio de consulta ao mapeamento elaborado pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental (2013). Foram consideradas as seguintes classes para a ocorrência de vegetação arbórea: mata; capoeira; Floresta Ombrófila Densa; Floresta Estacional Semidecidual; Cerradão (Savana florestada); e reflorestamento. A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto menor a quantidade de vegetação arbórea ripária, maior a ausência de vegetação composta por árvores que atuam como barreira linear entre as superfícies terrestres e aquáticas e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.

Quadro 2 – Critérios selecionados para a análise do grau de degradação e síntese do método (continuação).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Ocorrência de Vegetação Florestal	A área com vegetação arbórea em todo o município de Joanópolis foi obtida do mapa de uso e ocupação do solo elaborado pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental (2013). A vegetação arbórea são as classes de uso e ocupação do solo que possuem cobertura vegetal com predomínio de porte arbóreo: mata; capoeira; Floresta Ombrófila Densa; Floresta Estacional Semidecidual; Cerradão (Savana florestada), Reflorestamento. A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto menor a área com vegetação florestal, maior é a alteração nos processos de infiltração, transpiração e evapotranspiração, as quais são fortemente relacionadas à produção de água e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.
Demanda de água	A demanda de água foi calculada a partir do cadastro de outorgas do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016b). A priorização foi feita com base na quantidade de pontos e respectiva vazão outorgada em cada microbacia hidrográfica, a fim de obter uma visão espacial e setorial dos direitos de uso da água assegurados na microbacia. A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto maior a vazão outorgada, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação, pois maior é a estimativa de demanda de água para atendimento aos diversos setores usuários dos recursos hídricos na bacia.

Fonte: elaborado pelos autores.

Algoritmos disponíveis nos softwares ArcGis 10.3.1, SPRING e TerraView (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2018; CÂMARA et al., 1996; RENNÓ et al., 2008) foram utilizados para o cálculo das variáveis e espacialização dos resultados em cada um dos dois grupos (Potencial Natural e Grau de Degradação). Posteriormente, uma análise individual dos resultados de cada critério foi realizada e as microbacias hidrográficas foram classificadas em cinco intervalos qualitativos de prioridade para PSA-hídrico, cujos limiares foram definidos a partir da análise estatística dos resultados. Atribuiu-se um valor numérico para cada classe (1 – Muito baixo; 2 – Baixo; 3 – Médio; 4 – Alto; e 5 – Muito Alto) a fim de viabilizar a análise integrada (*overlay*) das informações.

A classificação da prioridade final foi obtida a partir da sobreposição dos mapas temáticos de cada critério, permitindo a visualização espacial das informações sistematizadas. Em ambos os casos, foi feita a soma dos valores atribuídos a cada classe de prioridade e, em seguida, a verificação dos resultados para determinar os limiares de três classes qualitativas (Alta, Média e Baixa), indicando a prioridade para PSA-hídrico, em cada um dos dois grupos.

Deve-se ressaltar que a seleção dos critérios representativos dos dois conjuntos de informações é útil para subsidiar a fase exploratória dos acordos de PSA na escala regional de trabalho (1:25 000 ou menor) e não contemplam aqueles aplicados à elegibilidade, que é uma etapa específica. A metodologia pode ser replicada ou adaptada conforme particularidades da região a ser estudada, mas pode e deve ser refinada a partir da ampliação da discussão com outros atores-chave no processo, os quais possuem conhecimento mais arraigado sobre o contexto social, econômico e político da região.

Uma síntese da proposta para a priorização das microbacias hidrográficas está apresentada na **Figura 4**.

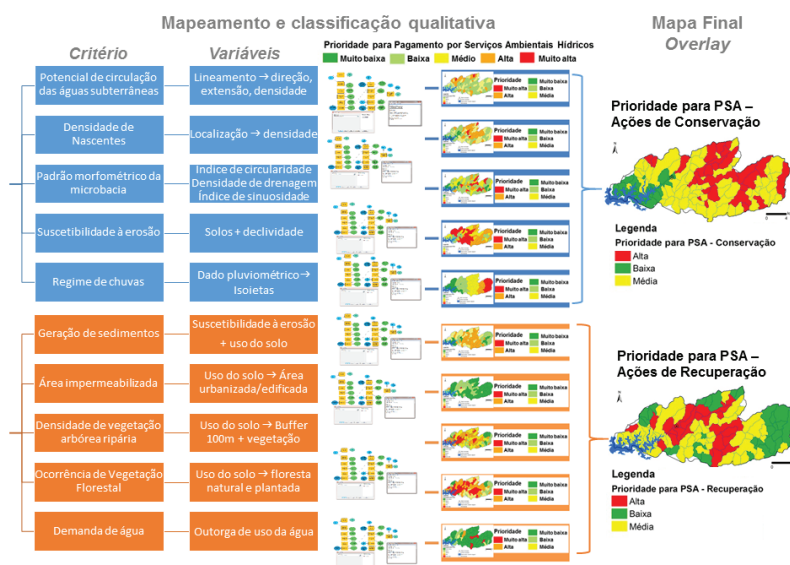
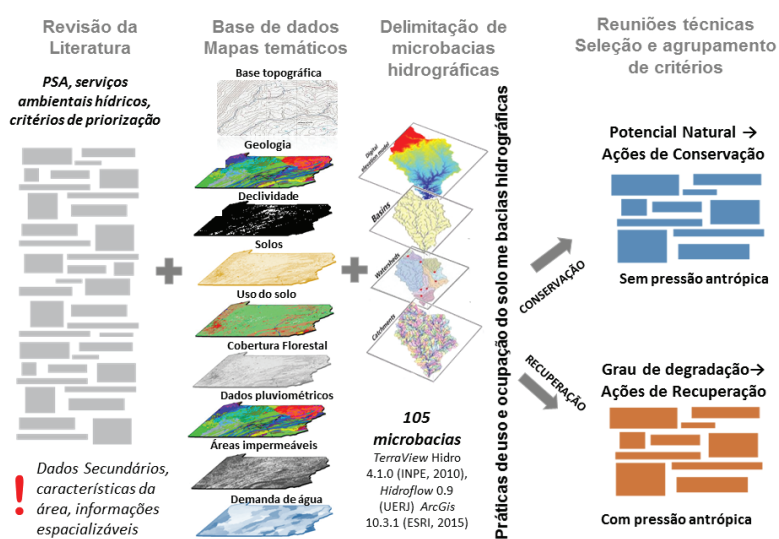


Figura 4 – Síntese do método desenvolvido no âmbito do projeto.

Fonte: elaborado pelos autores.

3 Resultados e Discussão

O método proposto é uma ferramenta que contribui para tomada de decisão estratégica de priorização de áreas para programas de PSA, levando em consideração dois aspectos distintos: o potencial natural das microbacias hidrográficas para conservação e o grau de degradação das microbacias para a recuperação, conforme detalhado a seguir.

3.1 Potencial natural das microbacias hidrográficas: PSA de conservação

O potencial natural das microbacias hidrográficas foi resultado da análise integrada de cinco critérios: potencial de circulação das águas subterrâneas; densidade de nascentes; padrão morfométrico da microbacia; suscetibilidade à erosão e regime de chuvas.

O primeiro critério, "Potencial de circulação das águas subterrâneas", foi avaliado cartograficamente por meio do mapa de condicionamento estrutural à circulação das águas subterrâneas, o qual foi resultado da análise da densidade de lineamentos e da classe dos lineamentos (direção x extensão), conforme metodologia apresentada por Carvalho et al. (2014). As áreas de muito alta e alta prioridade ocorrem em regiões com elevada densidade de lineamentos, onde o maciço rochoso pode se apresentar mais fraturado e com maior favorabilidade à circulação da água, reunindo características estruturais que condicionam maior fluxo d'água subterrânea. A conservação dessas áreas é fundamental, pois são regiões indicativas de maior probabilidade de circulação de água na bacia hidrográfica. A **Figura 5** ilustra os procedimentos adotados para a determinação desse critério.

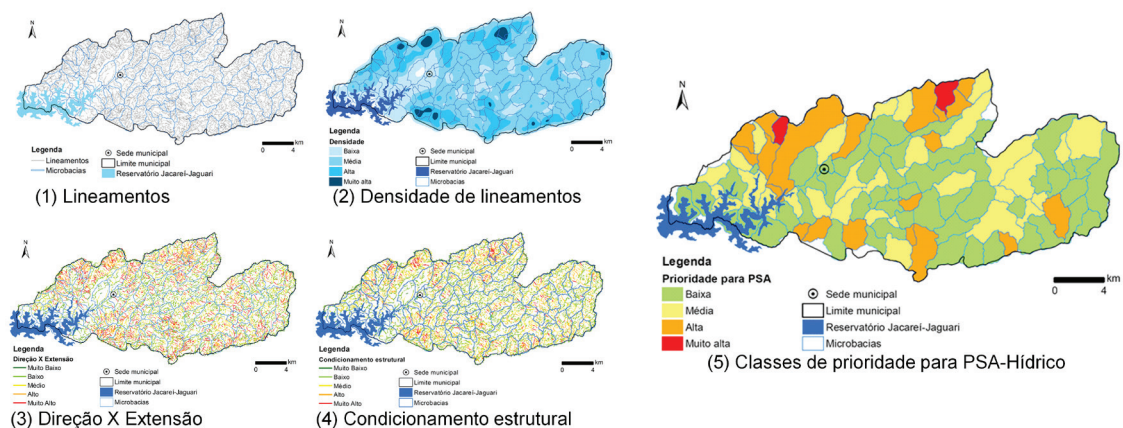


Figura 5 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Potencial de circulação das águas subterrâneas".

Fonte: elaborado pelos autores.

A importância das nascentes no potencial natural e na manutenção da qualidade e regulação da disponibilidade dos recursos hídricos foi o segundo critério, avaliado por meio da "Densidade de nascentes" em cada microbacia (N° de nascentes por km^2). As áreas de muito alta e alta prioridade ocorrem nas regiões que apresentaram maior número de pontos de formação de um determinado curso d'água. A conservação dessas áreas é fundamental para assegurar a continuidade temporal dos processos de infiltração, percolação, armazenamento e exfiltração das águas pluviais, de acordo com o ritmo natural do sistema (CALHEIROS et al., 2004; CARMO; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2014). O método desenvolvido para o mapeamento semiautomático e validação dessas feições deve ser destacado, pois permitiu a verificação de características do terreno favoráveis à sua ocorrência, as quebras no relevo, a diferenciação dos canais fluviais, pluviais e artificiais, bem como a identificação de áreas com vegetação típica e clareiras na paisagem. A utilização dos dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) também agregou informações importantes para a validação do mapeamento. A **Figura 6** ilustra alguns procedimentos adotados, bem como o mapa final classificado.

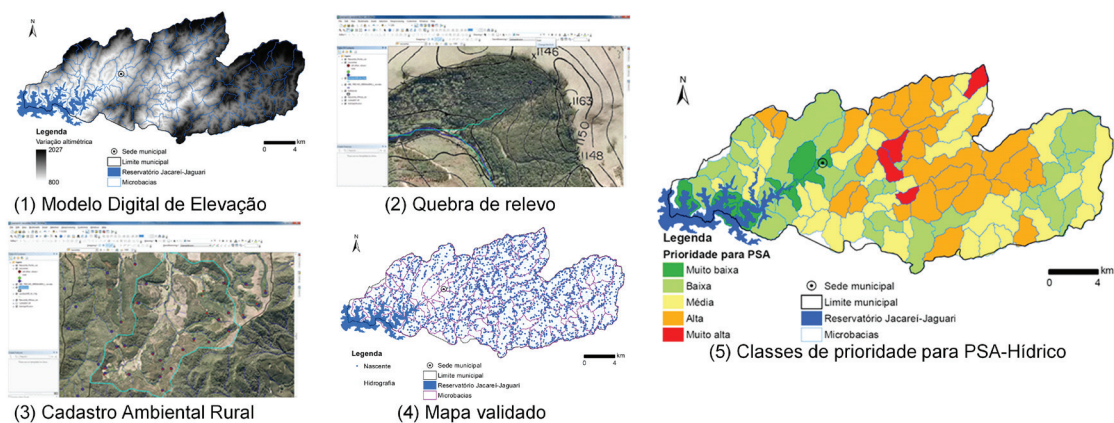


Figura 6 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Densidade de nascentes".
Fonte: elaborado pelos autores.

O terceiro critério foi obtido por meio da caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, que é uma ferramenta importante para subsidiar o planejamento territorial visando à preservação ambiental e à manutenção da produção de água em quantidade e qualidade (NARDINI et al., 2013). A classificação final das microbacias hidrográficas por meio da análise conjunta dos parâmetros Densidade de drenagem (*Dd*); Índice de circularidade (*Ic*) e Índice de Sinuosidade do Canal Principal (*Is*) indicou a ocorrência de áreas de alta e muito alta prioridade espalhadas no município de Joanópolis, associadas às características físicas que facilitam o transporte hídrico superficial e diminuem o carreamento de sedimentos (maior *Dd* e *Is*; e menor *Ic*). A análise combinada desses dados morfométricos forneceu subsídios para mapear áreas com maior potencial de armazenamento de água no solo, associada à regulação hídrica da microbacia. A **Figura 7** ilustra os mapas intermediários e o mapa final para o cálculo desse critério.

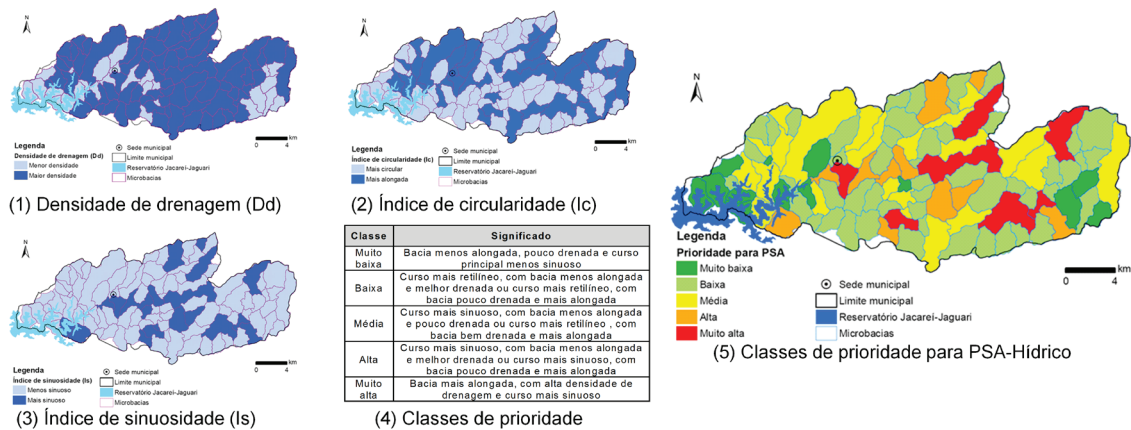


Figura 7 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério “Padrão morfométrico das microbacias hidrográficas”.

Fonte: elaborado pelos autores.

A análise da suscetibilidade à erosão e sua influência na qualidade e na regularização da oferta de água foi feita a partir do cruzamento dos diferentes tipos de solo e classes de declividade, conforme metodologia apresentada por Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2011). A classificação final das microbacias hidrográficas indicou que a prioridade alta e muito alta está associada às regiões de relevo mais acidentado, onde predominam argissolos e cambissolos. A proteção dessas áreas é fundamental, pois são regiões que funcionam como fonte de sedimentos que podem ser transportados pelas águas da chuva e têm como destino final os leitos de córregos e rios, causando o assoreamento dos cursos d'água, o qual, por sua vez, contribui com a alteração dos processos de inundação, entre outras consequências. A **Figura 8** apresenta os produtos intermediários e o mapa final para esse critério.

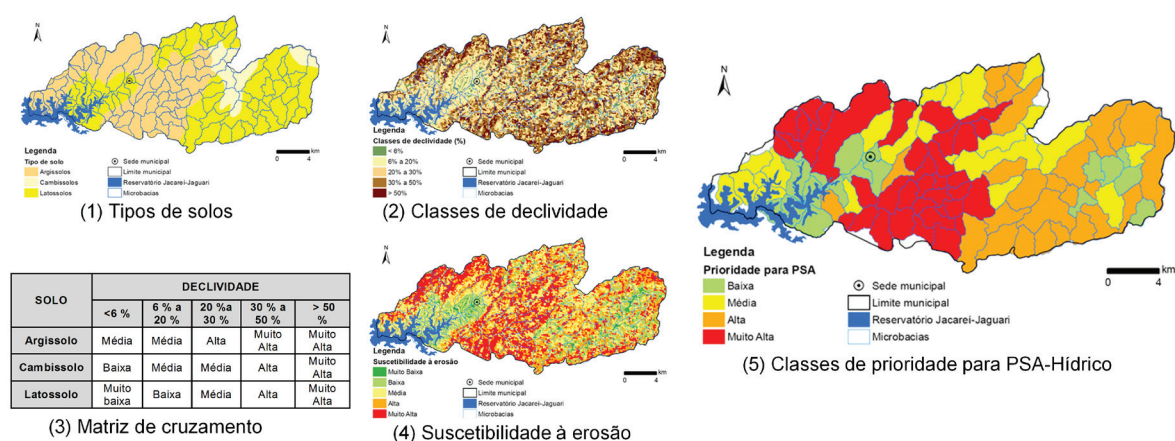


Figura 8 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Susceptibilidade à erosão".
 Fonte: elaborado pelos autores.

O entendimento da distribuição do regime de chuvas em uma bacia hidrográfica foi feito por meio da análise das isoietas (isolinhas com mesmo valor de altura pluviométrica) elaboradas a partir dos dados disponibilizados no banco de dados do Departamento de Águas e Energia elétrica (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016a). A classificação das microbacias por esse critério indicou que as áreas de alta e muito alta prioridade estão associadas às regiões com maiores índices pluviométricos, pois a chuva é tanto um fator desencadeante do carreamento de sedimentos, quanto responsável pela magnitude de entrada de água no sistema e o seu potencial de circulação na sub-bacia (MELO, 2007). A **Figura 9** apresenta o mapa de isoietas e o mapa final para esse critério.

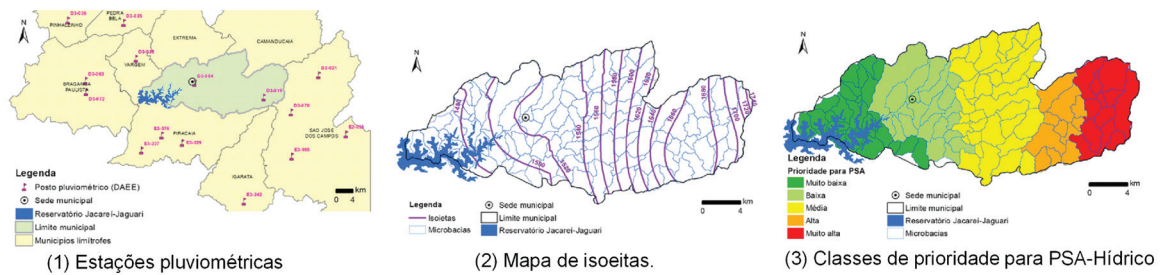


Figura 9 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério “Regime de chuvas”.

Fonte: elaborado pelos autores.

A **Figura 10** mostra o resultado da análise integrada do conjunto de parâmetros que representa o potencial natural das microbacias hidrográficas no município de Joanópolis. Os resultados mostraram que predominam áreas de alta e média prioridade para PSA voltados à conservação, ou seja, à manutenção das condições ambientais, de acordo com os critérios avaliados. Nas áreas de alta prioridade, estima-se que a aplicação de procedimentos relacionados aos serviços ambientais de proteção/conservação pode resultar em maior retorno no fornecimento de serviços ecossistêmicos associados à água. Entre as ações a serem aplicadas podem ser citadas: a conservação de florestas nativas existentes e dos remanescentes de vegetação (preservados ou em regeneração/restauração); ações de conservação do solo; elaboração de planos de manejo nas microbacias hidrográficas para identificação de corredores de biodiversidade; e elaboração de planos de manejo florestal para a exploração sustentável com geração de renda advinda de florestas nativas.

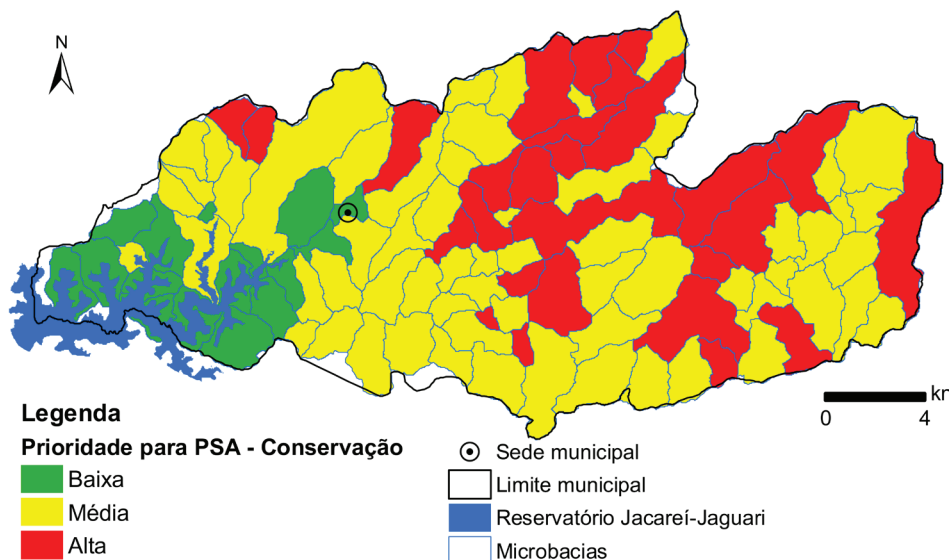


Figura 10 – Prioridade para PSA de conservação: microbacias hidrográficas classificadas conforme integração dos resultados obtidos para a definição do seu potencial natural.

Fonte: elaborado pelos autores.

3.2 Grau de degradação microbacias hidrográficas: PSA de recuperação

O grau de degradação das microbacias hidrográficas foi analisado a partir da análise integrada de cinco critérios: potencial para a geração de sedimentos, área impermeabilizada, densidade de vegetação arbórea ripária, ocorrência de vegetação florestal e demanda de água.

O primeiro critério foi calculado a partir da análise do potencial de aporte de sedimentos aos mananciais e cursos d'água. Os resultados indicaram que as áreas de alta prioridade ocorrem em microbacias que possuem suscetibilidade à erosão e uso e ocupação do solo favoráveis aos processos de assoreamento de cursos d'água e de reservatórios de abastecimento. Nessas áreas, o processo de transporte dos sedimentos pode resultar, em longo prazo, em maior turbidez nos rios, que tendem a ficar mais rasos e com menor volume de água na época de estiagem. Em casos extremos, pode culminar no desaparecimento total de pequenos cursos d'água e nascentes (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2008). Assim, as microbacias hidrográficas que apresentarem as maiores extensões de áreas potenciais à produção de sedimentos representam locais onde o PSA de recuperação deve ser priorizado. A **Figura 11** ilustra os mapas intermediários elaborados para o cálculo desse critério e o mapa final classificado.

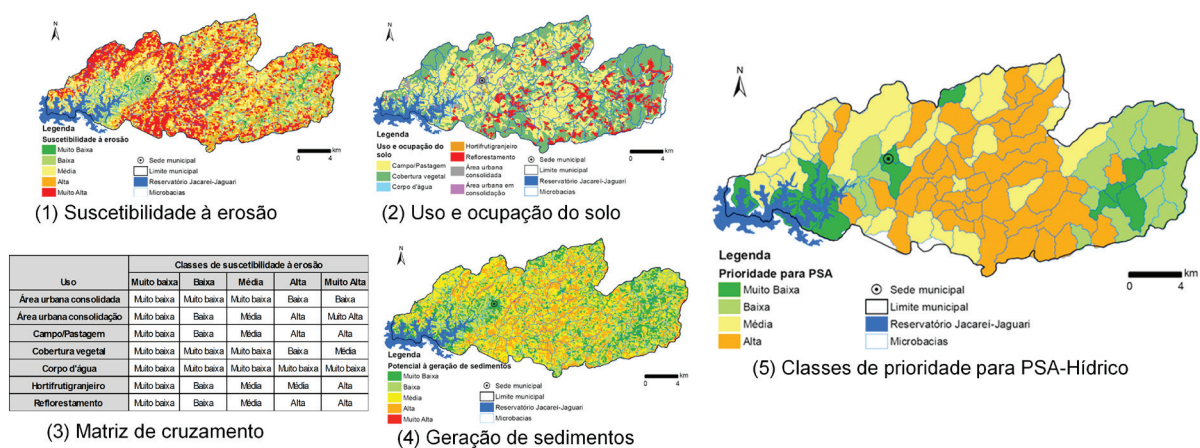


Figura 11 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério “Potencial para geração de sedimentos”.

Fonte: elaborado pelos autores.

A área impermeabilizada foi o segundo critério avaliado. O município de Joanópolis apresenta uma pequena área urbanizada e poucas áreas edificadas em seu território. Assim, as áreas de muito alta e alta prioridade para PSA de recuperação em relação a esse critério foram pouco significativas, mas indicam regiões com maior alteração na condição e no volume do escoamento superficial e subterrâneo da água na bacia hidrográfica devido à diminuição da área de alimentação do aquífero resultante da precipitação, infiltração e escoamento superficial e subterrâneo. Cabe ressaltar que, atualmente, o PSA é focado em áreas rurais, sendo um conceito ainda pouco explorado em área urbana (WOODRUFF; BENDOR, 2016). Assim, trata-se de um parâmetro que necessita de mais estudos quanto à aplicabilidade em acordos de PSA, principalmente em relação à questão hídrica. A **Figura 12** apresenta o mapa final para esse critério.

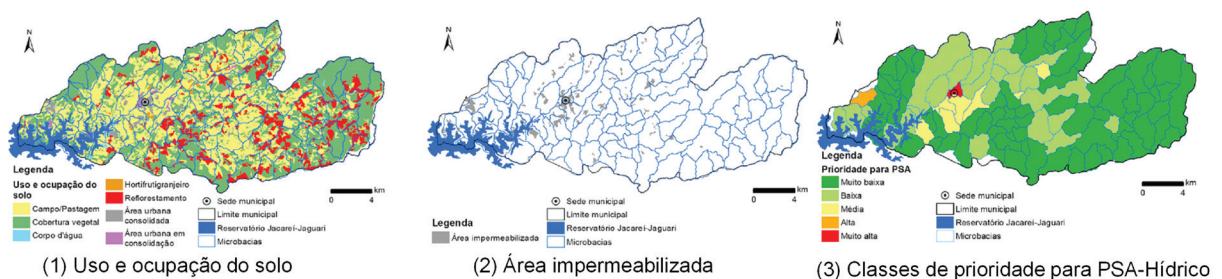


Figura 12 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Área impermeabilizada".
 Fonte: elaborado pelos autores.

A vegetação ripária composta por árvores atua como barreira linear entre as superfícies terrestres e aquáticas, estabilizando as margens dos cursos d'água, o que aumenta a retenção dos sedimentos resultantes da erosão hídrica em zonas adjacentes. Nesse sentido, as áreas de alta e muito alta prioridade para PSA de recuperação estão associadas às regiões com menor quantidade de vegetação arbórea ripária. Nessas áreas, a revegetação deve ser realizada de forma recuperar a função ambiental da zona ripária de proteção dos recursos hídricos, cuja atuação varia com a densidade das faixas de vegetação, com o estado de desenvolvimento das árvores e arbustos, com a época do ano (devido às épocas menos ativas das plantas) e, ainda, com a diversidade de plantas. A **Figura 13** apresenta o mapa final classificado para esse critério.

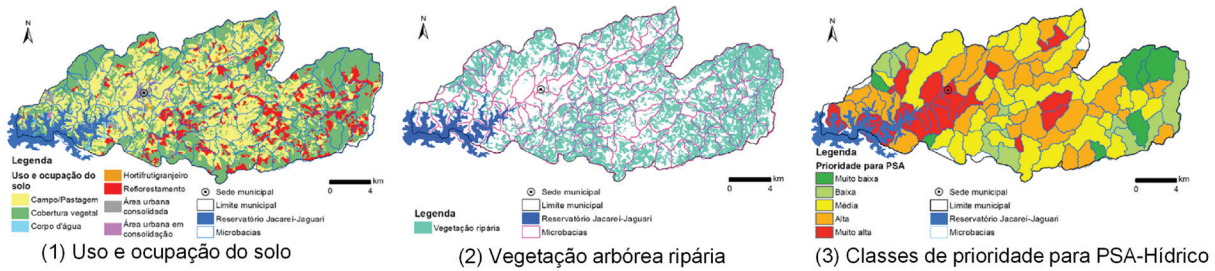


Figura 13 - Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Densidade de vegetação arbórea ripária".

Fonte: elaborado pelos autores.

As áreas com cobertura vegetal também foram analisadas, dada a sua importância no ciclo hidrológico. De maneira geral, os impactos do desmatamento na quantidade de água são complexos e dependem de uma série de fatores (clima, características locais, escala da bacia, entre outros). Um dos efeitos diretos do desmatamento é a redução da evapotranspiração, diminuição do fluxo de água em direção à atmosfera e maior contribuição para escoamento superficial (SILVA, 2013). Desse modo, as áreas de alta e muito alta prioridade para PSA de recuperação ocorrem nas microbacias com menor porcentagem de vegetação arbórea em relação à sua área total, onde é maior a alteração nos processos de infiltração, transpiração e evapotranspiração na bacia hidrográfica. A **Figura 14** apresenta o mapa final para esse critério.

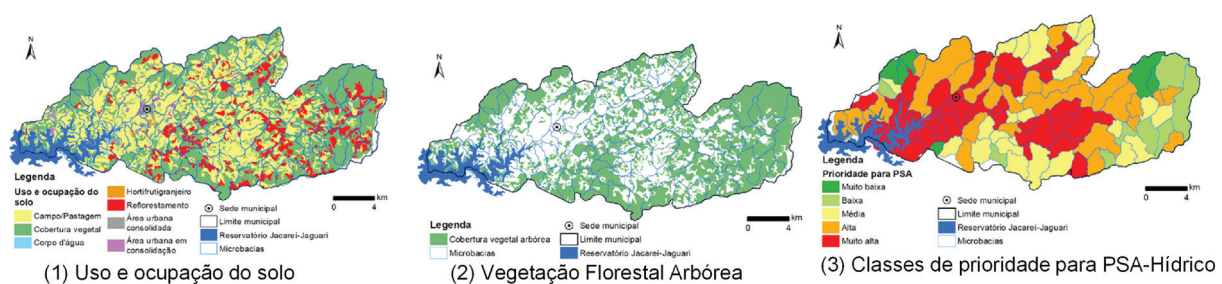


Figura 14 - Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Ocorrência de Vegetação Florestal".

Fonte: elaborado pelos autores.

Por fim, a "demanda de água" foi analisada por meio das vazões outorgadas no município de Joanópolis, disponibilizadas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016b). As áreas de alta e muito alta prioridade para PSA de recuperação ocorreram nas microbacias com maiores valores de vazão outorgada, as quais estão concentradas em áreas agrícolas, dado o uso para irrigação. Nessas regiões, maior é a previsão de retirada de água do sistema para atender os diversos usos e usuários. A **Figura 15** apresenta os mapas com as vazões outorgadas e o mapa classificado para esse critério.

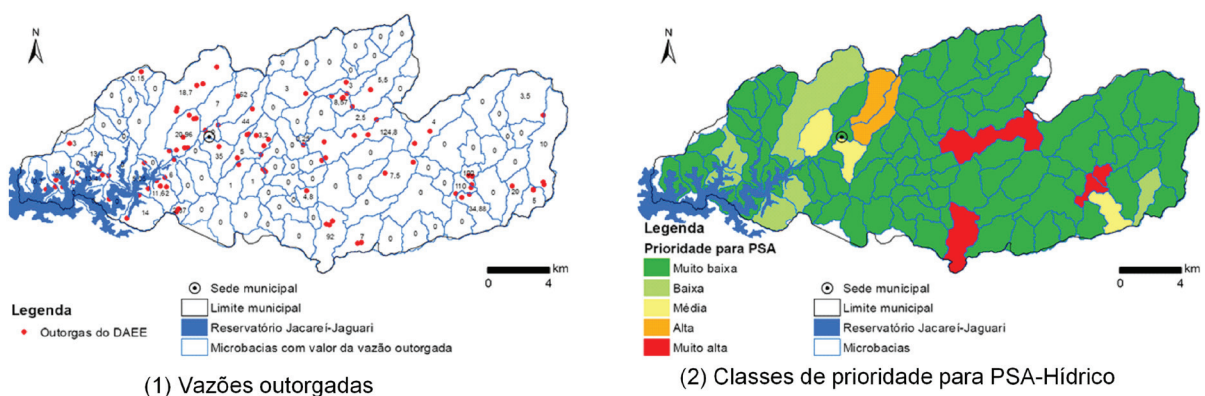


Figura 15 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Demanda de água".
 Fonte: elaborado pelos autores.

A **Figura 16** apresenta o resultado obtido a partir da análise integrada do conjunto de parâmetros selecionados para representar o grau de degradação das microbacias. Os resultados indicaram predominância de áreas com alta e muito alta prioridade de PSAs voltados à recuperação. As microbacias com baixa prioridade são áreas com remanescentes florestais em diferentes estágios de regeneração com pouca ou nenhuma ocupação antrópica. Nas áreas de alta prioridade, conforme critérios considerados, estima-se que a aplicação de serviços ambientais de recuperação pode resultar em maior retorno no fornecimento de serviços ecossistêmicos associados à água. Entre as ações nesse sentido podem ser citadas: a adoção de boas práticas ambientais, como as que resultem em redução da erosão; restauração das áreas de nascentes e matas ciliares com espécies nativas, incluindo as áreas de reserva legal e áreas de preservação permanente; e adequação agrícola, com conversão de pastagem degradada para sistema silvopastoril e agroflorestal.

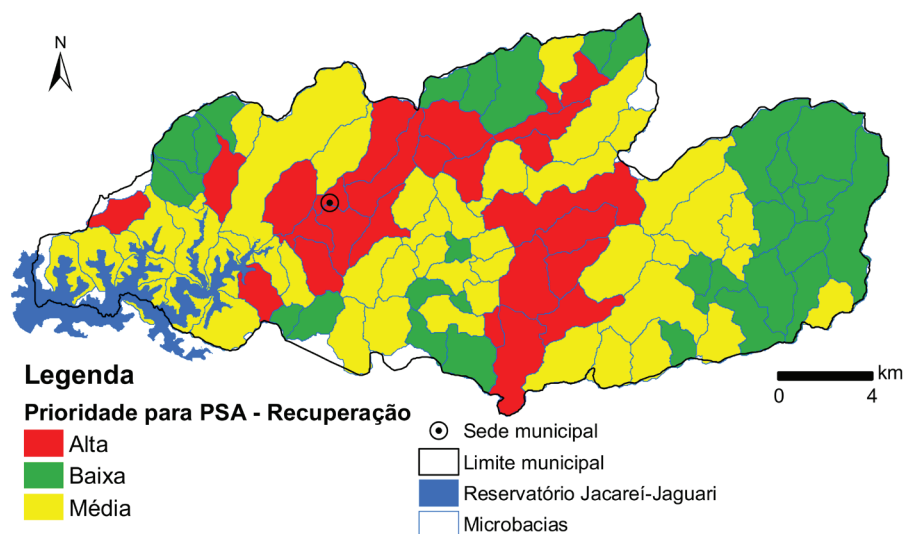


Figura 16 – Prioridade para PSA de recuperação: Microbacias hidrográficas classificadas conforme integração dos resultados obtidos a definição do seu grau de degradação.

Fonte: elaborado pelos autores.

4. Conclusões

O método desenvolvido inova ao estudar critérios em dois grupos: um para avaliar o potencial natural das microbacias e indicar áreas prioritárias para PSA de conservação; e outro para analisar o grau de degradação e apontar áreas prioritárias para PSA de recuperação. A metodologia apresentada é adaptativa, no sentido de poder ser replicada ou modificada conforme particularidades da região a ser estudada e ampliada se novos conhecimentos forem incluídos ao estudo, sendo uma ferramenta para a fase de desenvolvimento na elaboração de acordos de PSA.

Pressupõe-se que melhores benefícios em termos hídricos podem ser alcançados se os recursos em ações de proteção/conservação ou recuperação/restauração forem aplicados em áreas com alta prioridade de acordo com o método proposto, aumentando o efeito positivo da relação custo-benefício e reduzindo riscos de investimentos nos acordos de PSA-hídrico. Os resultados representam um instrumento para suporte à tomada de decisão na definição das áreas estratégicas para os investimentos em PSA, tanto voltados à conservação quanto à recuperação dos sistemas de provisão de água na região de interesse. A priorização de áreas e as recomendações geradas nesse estudo poderão ser úteis para o aperfeiçoamento das iniciativas de PSA nos Comitês de Bacia Hidrográfica e do próprio Governo do estado de São Paulo, por trazer informações efetivas para a gestão dos recursos hídricos e planejamento ambiental.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio ao IPT – FIPT pelo financiamento do Projeto de Capacitação N°500106A/(PTC 1031/15): "Critérios para a priorização de microbacias formadoras do Sistema Cantareira no município de Joanópolis, SP, com foco no Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)".

6. Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Ministério do Meio Ambiente. **Boas práticas e modernas tecnologias em irrigação**. Brasília: ANA, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Ministério do Meio Ambiente. **Encarte Especial sobre a Crise Hídrica: Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2014**. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2015.

BERNARDES, C.; SOUSA JUNIOR, W. C. Pagamento por serviços ambientais: experiências relacionadas à água. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, 5., 2010, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: ANPPAS, 2010. Disponível em <<http://www.anppas.org.br/encontro5/cd/artigos/GT9-522-502-20100831170114.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2016.

CALHEIROS, R. O. et al. **Preservação e recuperação das nascentes**. Piracicaba: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ - CTRN, 2004. 40p.

CÂMARA, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CARMO, L. G.; FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Áreas de preservação permanente no entorno de nascentes: conflitos, lacunas e alternativas da legislação ambiental brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 34, n. 2, p. 275-293, maio/ago. 2014.

CARVALHO, A. M. et al. Aplicação de métodos de interpretação de imagens na caracterização de modelo de circulação das águas subterrâneas em aquíferos fraturados e avaliação de impactos hidrogeológicos da construção de túneis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18., 2014, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABAS, 2014.

COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL. Instituto Geológico. Secretaria do Meio Ambiente. **Mapa de uso e cobertura da terra da UGRHI 5 (PCJ) na escala de 1:25.000.** São Paulo: CPLA/IG/SMA, 2013. Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br/cpla/mapa-de-uso-e-ocupacao-da-terra-ugrhi-5-pcj/>. Acesso em: 12 fev. 2016.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de dados hidrológicos:** postos pluviométricos. São Paulo: DAEE, 2016a. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>>. Acesso em: 13 set. 2016.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Outorgas:** conceitos e banco de dados. São Paulo: DAEE, 2016b. Disponível em: <http://www.dae.sp.gov.br/index.php?option=com_content&id=68:outorga>. Acesso em: 20 out. 2016.

ELOY, L.; COUDEL, E.; TONI, F. Implementando pagamentos por serviços ambientais no Brasil: caminhos para uma reflexão crítica. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 4, n. 1, p. 21-42, jul./dez. 2013.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. **Ortofotos digitais, articuladas de acordo com as cartas 1: 5.000, obtidas a partir de voo fotogramétrico analógico na escala 1:30.000.** São Paulo: Emplasa, 2011.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Desktop 10.3.1.** Redlands: ESRI, 2018. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>>. Acesso em: 1 abr. 2018.

GUEDES, F. B.; SEEHUSEN, S. E. (Org.). **Pagamentos por Serviços Ambientais na Mata Atlântica:** lições aprendidas e desafios. Brasília: MMA, 2011.

GJORUP, A. F. et al. Análise de procedimentos para seleção de áreas prioritárias em programas de pagamento por serviços ambientais hídricos. **Revista Ambiente Água**, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 225-238, 2016.

IKEMATSU, P. **Conflitos e desafios na gestão da Bacia Hidrográfica do Reservatório Guarapiranga.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Secretaria do Meio Ambiente do Rio de Janeiro. Mananciais e Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). **Boletim Águas & Território**, n. 8, jan. 2015.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DE SÃO PAULO. **Cartas Planialtimétricas – município de Joanópolis, Escala 1:10.000.** São Paulo: IGC, 1979.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Diretrizes e ações para prevenção e controle dos impactos decorrentes dos processos erosivos na Bacia do Alto Tietê UGRHI 06.** São Paulo: IPT, 2011. (Relatório Técnico, 122.617-205).

JACOBI, P. R.; CIBIM, J.; LEAO, R. S. Crise hídrica na Macrometrópole Paulista e respostas da sociedade civil. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 27-42, 2015.

LIMA, A. P. M. et al. Pagamento por Serviços Ambientais Hídricos no Brasil: experiências iniciais e os desafios do monitoramento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

MELO, A. L. **Serviços Ambientais Hidrológicos desempenhados por Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) da Mata Atlântica: marco teórico para pagamentos por serviços ambientais na bacia hidrográfica do rio São João, RJ.** 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

NARDINI, R. C. et al. Análise morfométrica e simulação das áreas de preservação permanente de uma micobacia hidrográfica. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 687-699, 2013.

OLIVEIRA, J. B. de. et. al. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

PAGIOLA, S.; PLATAIS, G. **Payments for environmental services: from theory to practice.** Washington: World Bank, 2007.

PAGIOLA, S. et al. **Pago por servicios de conservación de la biodiversidad en paisajes agropecuarios.** Washington, DC: World Bank, 2004. (Environment Department Paper, n. 96).

PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C. TAFFARELLO, D. (Org.). **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil.** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2012. 336 p.

POCIDONIO, E. A. L.; TURETTA, A. P. D. **Programas de pagamento por serviços ambientais no Brasil.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. 25 p. (Embrapa Solos, Documentos, 150).

PRADO, R. B. Ferramentas de apoio aos PSA-Hídricos no Brasil em desenvolvimento pela Embrapa e parceiros. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, 2., 2014, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: RedeVale/ UniVale, 2014. (Mesa Redonda). Disponível em: <http://www.redevale.ita.br/iisrhps/documentos/IISRHPS_Mesa_Redonda_I_RachelPrado.pdf>. Acesso 15 jun. 2016.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008. ISSN 0034-4257, DOI: 10.1016/j.rse.2008.03.018

ROBERTSON, N.; WUNDER, S. **Fresh tracks in the forest: assessing incipient payments for environmental services initiatives in Bolivia**. Bogor, Indonesia: CIFOR, 2005.

SANTOS, R. F.; VIVAN, J. L. **Pagamento por serviços ecossistêmicos em perspectiva comparada: recomendações para tomada de decisão**. Brasília: Projeto apoio aos diálogos Setoriais União Europeia-Brasil. 2012. Disponível em: <http://sectorialogues.org/sites/default/files/mmaa_-_publicacao_-_4_conv.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

SEEHUSEN, S. E.; PREM, I. Por que pagamentos por serviços ambientais?. In: BECKER, F. G.; SEEHUSEN, S. E. (Org.). **Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, 2011. p. 15-54.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS. Comitê de Crise Hídrica. **Plano de Contingência para o Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo – PCAA**. São Paulo: SSRH/CCH, 2015. Disponível em: <[http://www.saneamento.sp.gov.br/Arquivos/Planos/Plano%20de%20Conting%C3%AAAnica%20\(datado\).pdf](http://www.saneamento.sp.gov.br/Arquivos/Planos/Plano%20de%20Conting%C3%AAAnica%20(datado).pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2016.

SILVA, J. M. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba**. 2013. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

TAGNIN, R. A. **A natureza e o espaço da água e sua presença na Macrometrópole Paulista**. 2015. 255 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

TERCEIRA VIA. **Cooperação e desenvolvimento. estudo técnico de viabilidade de pagamento por serviços ambientais para proteção da água para o Sub- Sistema Cantareira**. Joanópolis: Terceira Via, 2011.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO. **Hydroflow Software**. Rio de Janeiro: UERJ, 2007. Disponível em: <<http://www.labgis.uerj.br/hydroflow/index.htm/>>. Acesso em: 1 abr. 2018.

VEIGA NETO, F. C.; GAVALDÃO, M. Iniciativas de PSA de conservação dos recursos hídricos na Mata Atlântica. In: BECKER, F. G.; SEEHUSEN, S. E. (Org.). **Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, 2011. p. 123-182.

WHATELY, M.; CUNHA, P. **Cantareira 2006: um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2007.

WUNDER, S. **Payments for environmental services: some nuts and bolts**. Jakarta, Indonésia: Center for International Forestry Research, 2005. (CIFOR Occasional Paper, n. 42).

WOODRUFF, S. C.; BENDOR, T. K. Ecosystem services in urban planning: Comparative paradigms and guidelines for high quality plans. **Landscape and Urban Planning**, v. 152, p. 90-100, Aug. 2016. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2016.04.003

Uma estimativa do efeito das incertezas dos padrões na incerteza das curvas de calibração em química analítica

An estimate of the effect of the uncertainty of the standards in the uncertainty of the calibration curves in analytical chemistry

Ricardo Rezende Zucchini ^{a*}

^a Laboratório de Referências
Metrológicas, Instituto de
Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo S.A.,
São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: zucchini@ipt.br

Palavras-chave:

incerteza; calibração;
simulação numérica;
simulação de Monte Carlo.

Keywords:

*uncertainty; calibration;
numerical simulation;
Monte Carlo simulation.*

Resumo

Curvas de calibração analíticas são importantes fontes de incerteza dos resultados de medições em química. As estimativas de incerteza geralmente desconsideram as incertezas herdadas dos padrões utilizados para construir as curvas, principalmente devido a dificuldades matemáticas. Neste trabalho, é apresentada uma investigação da influência das incertezas dos padrões na incerteza das curvas analíticas, utilizando a simulação pelo método de Monte Carlo aplicado a um exemplo clássico da literatura.

Abstract

Analytical calibration curves are important sources of uncertainty in the results of measurements in chemistry. Uncertainty estimates generally disregard the uncertainties inherited from the standards used to construct the curves mainly due to mathematical difficulties. This paper presents an investigation of the influence of the uncertainties of the standards on the uncertainty of calibration curves using the simulation by the Monte Carlo method applied to a classic example in literature.

1 Introdução

Curvas de calibração analíticas são modelos matemáticos utilizados para converter sinais analíticos em concentrações. Geralmente são construídas por meio de regressão numérica pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), gerando tanto modelos lineares quanto não lineares.

É usual estimar a incerteza da curva de calibração analítica desconsiderando o efeito das incertezas dos padrões usados para preparar a curva, chamados usualmente de pontos de curva. Essa prática baseia-se na hipótese de que a variabilidade do sinal analítico em geral é muito maior que a incerteza dos pontos de curva de calibração (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008a; ELLISON; WILLIAMS, 2012).

Essa simplificação é válida frequentemente e matematicamente conveniente, porém a hipótese deixará de ser válida quando a relação entre a incerteza dos padrões e a variabilidade de sinal analítico for suficientemente grande.

Neste trabalho, avaliamos o impacto de ignorar as incertezas dos padrões ao realizar a estimativa da incerteza devida à curva de calibração analítica, utilizando os dados do conhecido Exemplo A5 do Guia Eurachem CITAC (ELLISON; WILLIAMS, 2012).

2 Procedimento Metodológico

A estimativa da incerteza de uma curva de calibração analítica depende de algumas fontes bem conhecidas, sendo as mais importantes, conforme Ellison e Williams (2012):

- a. variabilidade aleatória no sinal analítico;
- b. incerteza no modelo matemático utilizado para descrever a curva de calibração;
- c. incerteza das concentrações dos padrões (pontos de curva);
- d. incertezas da preparação dos padrões.

2.1 Estimativa sem as incertezas dos padrões

A incerteza da curva de calibração é estimada utilizando-se a variância de predição do modelo matemático utilizado na regressão, técnica recomendada pelo Guia Eurachem CITAC (ELLISON; WILLIAMS, 2012) e pelo ISO GUM (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008a).

A curva analítica linear representada pela **Equação 1**, pode ser obtida pelo MMQ utilizando j repetições de leituras das intensidades para cada uma das i concentrações dos padrões:

$$I(C) = a + bC \quad (1)$$

Onde:

I = intensidade do sinal;

C = concentração (mg/L);

a = intercepto;

b = inclinação.

Então, a incerteza padrão da determinação da concentração de uma amostra desconhecida, C_x , que foi obtida utilizando a curva analítica em p repetições pode ser estimada pela **Equação 2**:

$$u(C_x) = \frac{s}{b} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(C_x - \bar{C})^2}{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}\right)} \quad (2)$$

Sendo s calculado pela **Equação 3**:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_j - (a + bC_j))^2}{n-2}} \quad (3)$$

Onde:

C_x = concentração da amostra x (mg/L);

$u(C_x)$ = incerteza padrão da concentração da amostra x (mg/L);

S = desvio padrão residual (mg/L);

\bar{C} = média geral das concentrações dos padrões (mg/L);

c_i = concentração do padrão i (mg/L);

p = número de medições para determinar C_x ;

n = número de medições para realizar a calibração;

I_j = intensidade do sinal na leitura j .

A incerteza expandida da concentração de uma amostra desconhecida, C_x , pode ser estimada pela **Equação 4**:

$$U(C_x) = k \cdot \frac{s}{b} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(C_x - \bar{C})^2}{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}\right)} \quad (4)$$

Onde:

$U(C_x)$ = incerteza expandida da concentração da amostra x (mg/L);

k = fator de abrangência.

Esta abordagem é simples, porém só inclui as incertezas a) e b) do item 2, faltando as incertezas das concentrações dos padrões e as incertezas de preparação dos mesmos padrões.

2.2 Estimativa incluindo incertezas dos padrões

Para obter uma estimativa de incertezas mais completa, é necessário assumir que além da variabilidade experimental do sinal analítico, as concentrações dos pontos de curva não são valores exatos, possuindo incertezas. Desta forma, não é possível utilizar o MMQ para encontrar o modelo matemático da curva analítica, por este não ser capaz de resolver este problema (DANZER, 2007).

Há alternativas, por exemplo, o método dos Mínimos Quadrados Ortogonais ou OLS (do inglês *Orthogonal Least Squares*), a Regressão por Componentes Principais ou PCR (do inglês *Principal Component Regression*) e a simulação de Monte Carlo ou MCS (do inglês *Monte Carlo Simulation*). OLS e PCR são técnicas matematicamente mais complexas (BESALÚ; JULIAN-ORTIZ; POGLIANI, 2010) e teoricamente resolvem este problema, mas na prática dependem de aproximações (WALD, 1940; MANDEL, 1984; SHARAF; ILLMAN; KOWALSKI, 1986; DANZER, WAGNER; FISCHBACHER, 1995).

A simulação pelo método de Monte Carlo (MCS) é uma alternativa que tem sido utilizada mais frequentemente, tendo sido empregada há bastante tempo (COX; HARRIS; SIEBERT, 2003), inclusive no suplemento do ISO GUM de 2008 (ISO/IEC Guide 98-3:2008 / Supplement 1; 2008b) e na edição mais recente do Guia Eurachem CITAC (ELLISON; WILLIAMS, 2012).

Os princípios básicos da simulação de Monte Carlo podem ser revisados em textos como, por exemplo, de Sobol (1994), Kalos e Whitlock (2004) ou Thomopoulos (2013). Destaca-se que já foram feitos esforços com o objetivo de prover especificações técnicas para o software empregado na avaliação de incertezas utilizando a simulação de Monte Carlo (COX; HARRIS, 2008). Basicamente, utilizam-se valores simulados de sinal analítico e de concentrações, considerando valores e desvios padrão experimentais e, assumem-se distribuições de probabilidade adequadas. O MCS gera grandes conjuntos de números simulados que podem ser coletados e analisados para estudo estatístico.

Neste trabalho, foi realizada a estimativa de incertezas empregando a Simulação de Monte Carlo (MCS), considerando sua simplicidade e exatidão. A **Figura 1** ilustra o MCS sendo utilizado. O método gera pontos sinal x concentração com as distribuições especificadas. Os pontos permitem traçar curvas de calibração (retas coloridas) pelo MMQ. Um número de intensidades de sinal (amostras simuladas) é gerado e as concentrações são calculadas pelas equações das curvas. O processo continua por vários ciclos e, no final, é produzida uma base de dados estatísticos de concentrações e sinais que permitem estimar as incertezas para diferentes níveis de concentração.

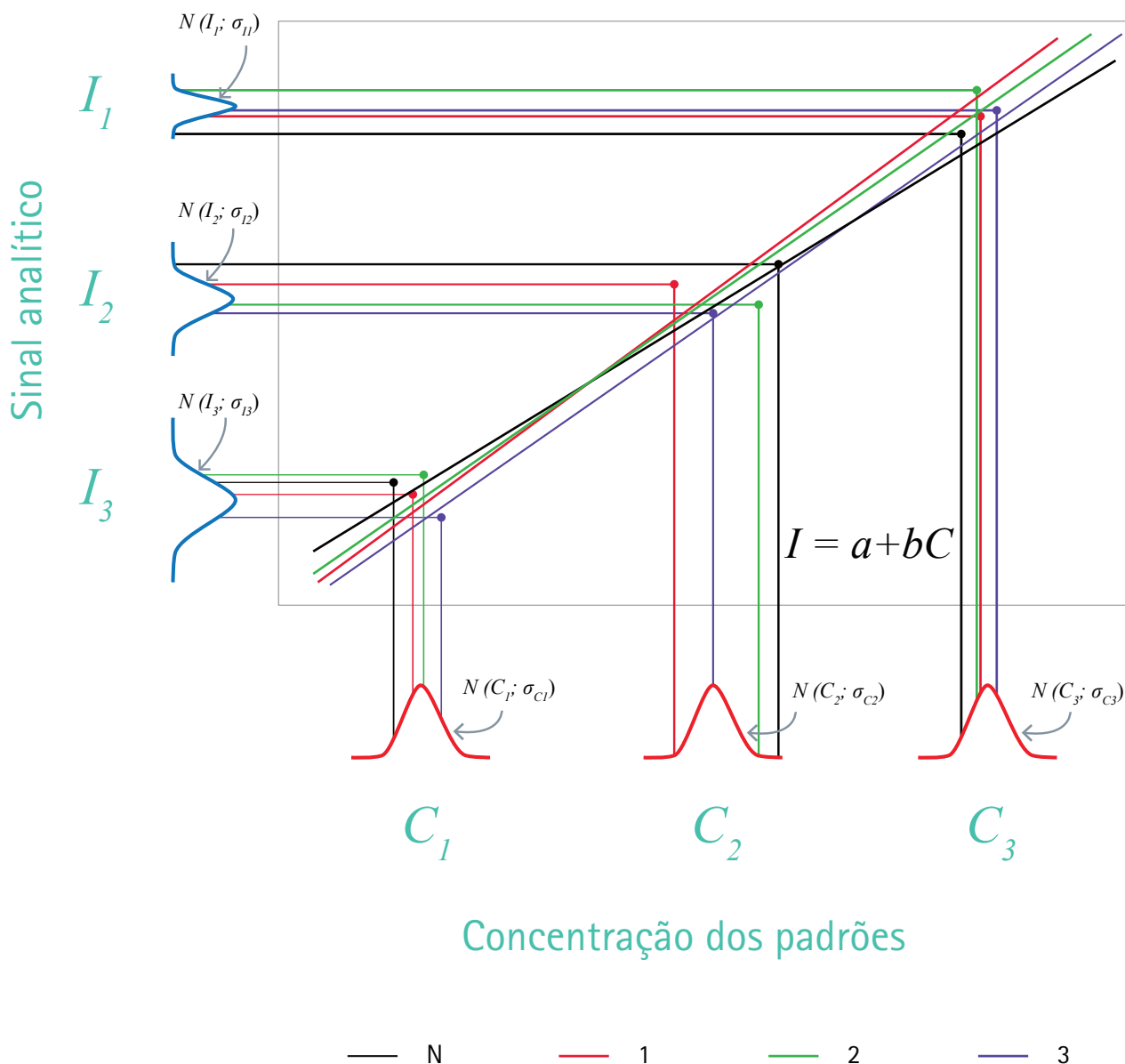


Figura 1 - Algumas curvas de calibração analítica geradas pela simulação MCS.
Fonte: elaborado pelo autor.

2.3 Estudo de caso

O ponto de partida desta simulação foi o conjunto de dados da curva de calibração apresentada no Exemplo A5 do Guia EURACHEM/CITAC, utilizada para a determinação de cádmio lixiviado de um material cerâmico, por espectrometria de absorção atômica.

No exemplo, foram preparados gravimetricamente cinco padrões de curva, os quais foram lidos três vezes, para o estabelecimento de uma curva de calibração. Os dados e resultados das leituras são apresentados na **Tabela 1**:

Tabela 1 – Dados experimentais do Exemplo A5 do Guia Eurachem/CITAC.

Concentração de Cd (mg/L)	Leituras de intensidades (adimensional)		
	1	2	3
0,1	0,028	0,029	0,029
0,3	0,084	0,083	0,081
0,5	0,135	0,131	0,133
0,7	0,180	0,181	0,183
0,9	0,215	0,230	0,216

Fonte: elaborado pelo autor.

Além destes dados experimentais, são incluídas incertezas dos padrões na forma de diferentes porcentagens das concentrações dos padrões. No modelo são estabelecidas as incertezas dos pontos de curva ($u_{padrões}$) numericamente iguais a 0,01 %; 0,5 %; 1 %, 2 % e 5 % das concentrações dos padrões ($c_{padrões}$). O estabelecimento das incertezas como porcentagens dos valores é uma convenção que foi adotada neste trabalho por conveniência e simplicidade de análise dos resultados obtidos por simulação.

A qualidade do processo de simulação depende de alguns fatores, entre eles a escolha de distribuições realistas para as variáveis simuladas, o tratamento dos erros de arredondamento, a aleatoriedade dos valores gerados e o número de repetições escolhido. Neste trabalho, foi utilizado o software Excel 2010, com distribuições normais para todas as variáveis simuladas, e o processo deve ser repetido ao menos 50 000 vezes. A **Figura 2** ilustra o processo de simulação utilizado neste trabalho.

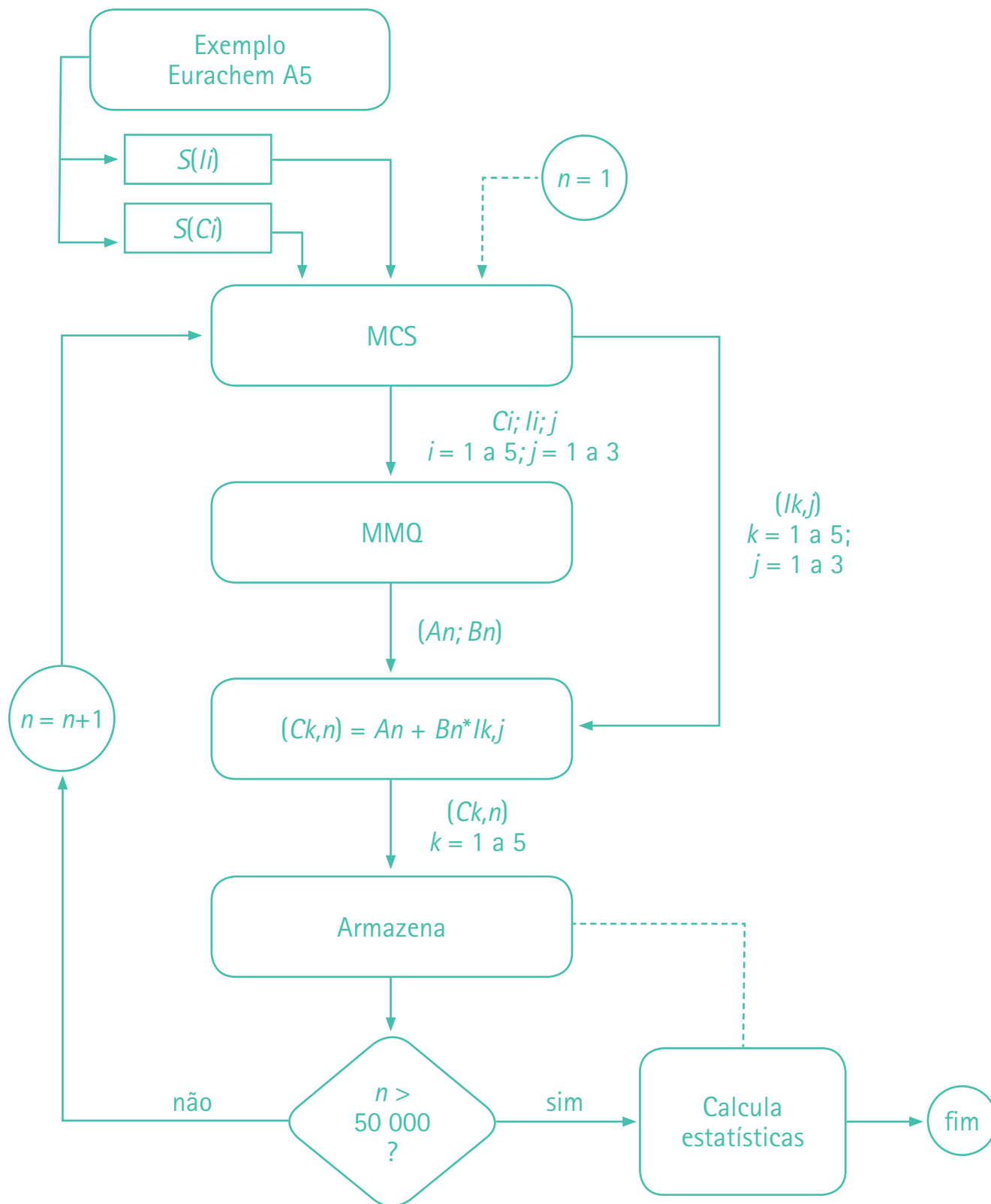


Figura 2 - Fluxograma da simulação do problema da incerteza das curvas de calibração pelo método de Monte Carlo.

Fonte: elaborado pelo autor.

3 Resultados e discussão

Foram feitas estimativas de incertezas das curvas de calibração tanto pelo método convencional, sem incluir incertezas dos padrões, quanto por simulação MCS, incluindo as incertezas dos padrões em alguns níveis.

3.1 Estimativa convencional

A curva de calibração analítica dos dados do Exemplo A5 do Guia Eurachem CITAC, obtida pelo MMQ entre as intensidades e as concentrações resulta na **Equação 5**:

$$I = 0,0087 + 0,2410 \cdot C \quad (5)$$

As estimativas de incertezas convencionais devidas às curvas de calibração para os resultados de concentração foram calculadas considerando-se três repetições, com fator de abrangência 2. Utilizando a **Equação 4**, é possível calcular a incerteza expandida da concentração C_x utilizando a **Equação 6**:

$$U(C_x) = 2 \cdot \frac{0,005486}{0,241} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{15} + \frac{(C_x - 0,5)^2}{1,237}\right)} \quad (6)$$

Na **Tabela 2** apresentamos os cálculos de incertezas expandidas para cinco níveis de concentração, no caso os mesmos níveis dos padrões, por simplicidade.

Tabela 2 – Estimativas de incertezas convencionais. Desconsidera incertezas de padrões.

C (mg/L)	uc (mg/L)	Uc (95 %) (mg/L)	Uc/C (%)
0,100	0,017	0,033	33,1
0,300	0,015	0,030	10,0
0,500	0,014	0,029	5,8
0,700	0,015	0,030	4,3
0,900	0,017	0,033	3,7

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 Estimativa incluindo incertezas dos pontos de curva

Para realizar a estimativa das incertezas devidas à curva de calibração incluindo as incertezas devidas aos padrões, foram feitas simulações pelo método de Monte Carlo (**Tabelas de 3 a 7**). A simulação considerou todas as distribuições dos valores de entrada como gaussianas, com seus desvios padrão característicos. A simulação foi realizada com 50 000 repetições das variáveis do modelo.

Tabela 3 - Estimativas de incertezas por MCS ($u_{padrões} = 0,01 \% c_{padrões}$).

C (mg/L)	uc (mg/L)	Uc (95 %) (mg/L)	Uc/C (%)
0,100	0,005	0,010	10,3
0,300	0,005	0,009	3,0
0,500	0,007	0,014	2,8
0,700	0,010	0,020	2,8
0,900	0,027	0,052	5,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Estimativas de incertezas por MCS ($u_{padrões} = 0,5 \% c_{padrões}$).

C (mg/L)	uc (mg/L)	Uc (95 %) (mg/L)	Uc/C (%)
0,100	0,005	0,011	10,7
0,300	0,005	0,009	3,0
0,500	0,007	0,014	2,9
0,700	0,010	0,020	2,9
0,900	0,027	0,053	5,9

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Estimativas de incertezas MCS ($u_{padrões} = 1 \% c_{padrões}$).

C (mg/L)	uc (mg/L)	Uc (95 %) (mg/L)	Uc/C (%)
0,100	0,006	0,012	11,6
0,300	0,005	0,009	3,1
0,500	0,008	0,015	3,0
0,700	0,011	0,022	3,1
0,900	0,027	0,054	5,9

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Estimativas de incertezas por MCS ($u_{padrões} = 2 \% c_{padrões}$).

C (mg/L)	uc (mg/L)	Uc (95 %) (mg/L)	Uc/C (%)
0,100	0,007	0,015	14,7
0,300	0,006	0,011	3,6
0,500	0,009	0,017	3,5
0,700	0,013	0,026	3,7
0,900	0,029	0,057	6,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Estimativas de incertezas por MCS ($u_{padrões} = 5 \% c_{padrões}$).

C (mg/L)	uc (mg/L)	Uc (95 %) (mg/L)	Uc/C (%)
0,100	0,014	0,028	28,2
0,300	0,009	0,018	6,2
0,500	0,015	0,029	5,8
0,700	0,024	0,047	6,7
0,900	0,041	0,081	9,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se adicionalmente que em todos os casos estudados as distribuições de concentrações obtidas pelo método de Monte Carlo se apresentaram de acordo com distribuições gaussianas e, portanto, simétricas.

3.3 Discussão

Na **Figura 3**, são apresentadas as incertezas expandidas devidas à curva de calibração obtida tanto pelo método convencional (ISO GUM ou Eurachem-CITAC) quanto pela simulação Monte Carlo, considerando incertezas dos padrões entre 0 % e 5 % das concentrações dos padrões.

Observa-se que a estimativa de incerteza da curva pelo GUM é maior que as estimativas por MCS nas concentrações baixas e médias, sendo superada nas concentrações mais altas. Além disto, as estimativas pelo GUM variam menos com as concentrações do que as pelo MCS. Observa-se também que a incerteza MCS aumenta fortemente de 2 % para 5 % em todas as concentrações.

Comparando-se a incerteza GUM com a MCS em 0 %, ambas supondo ausência da incerteza dos padrões, percebe-se que a estimativa GUM é exagerada em 80 % das concentrações.

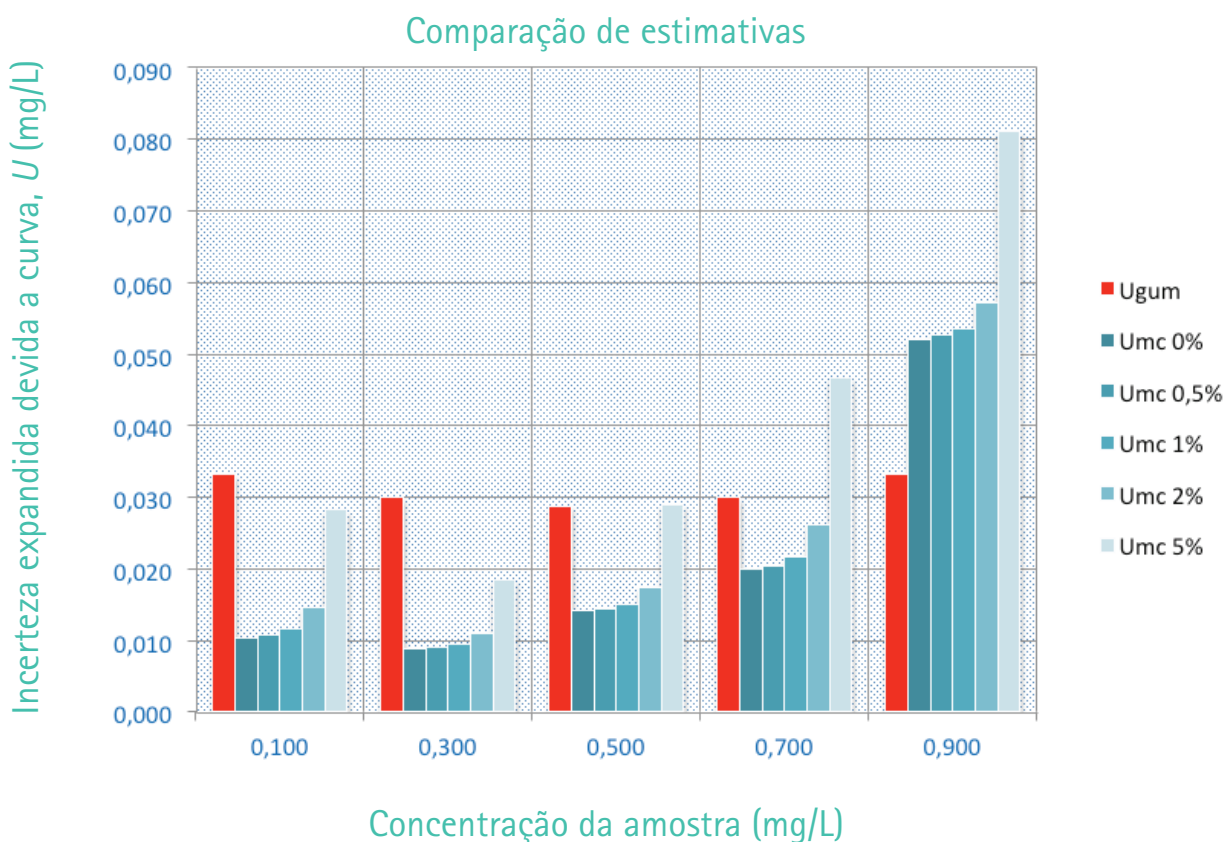


Figura 3 – Comparativo de estimativas das incertezas expandidas devidas à curva de calibração.

Fonte: elaborado pelo autor.

Se fizermos um cálculo da relação entre as incertezas pelo GUM e pelo MCS, em função das incertezas dos padrões e das concentrações é possível ver as regiões onde o GUM gera estimativas maiores que a realidade (pessimistas) e estimativas menores que a realidade (otimistas). A **Figura 4** apresenta esta informação para os dados deste estudo apenas. Nessa figura, a região azul mostra estimativas pessimistas da incerteza devida à curva de calibração produzida pelo GUM. A região vermelha mostra a região otimista demais, ou seja, o GUM estima incertezas menores que a realidade. A região branca é a mais realista.

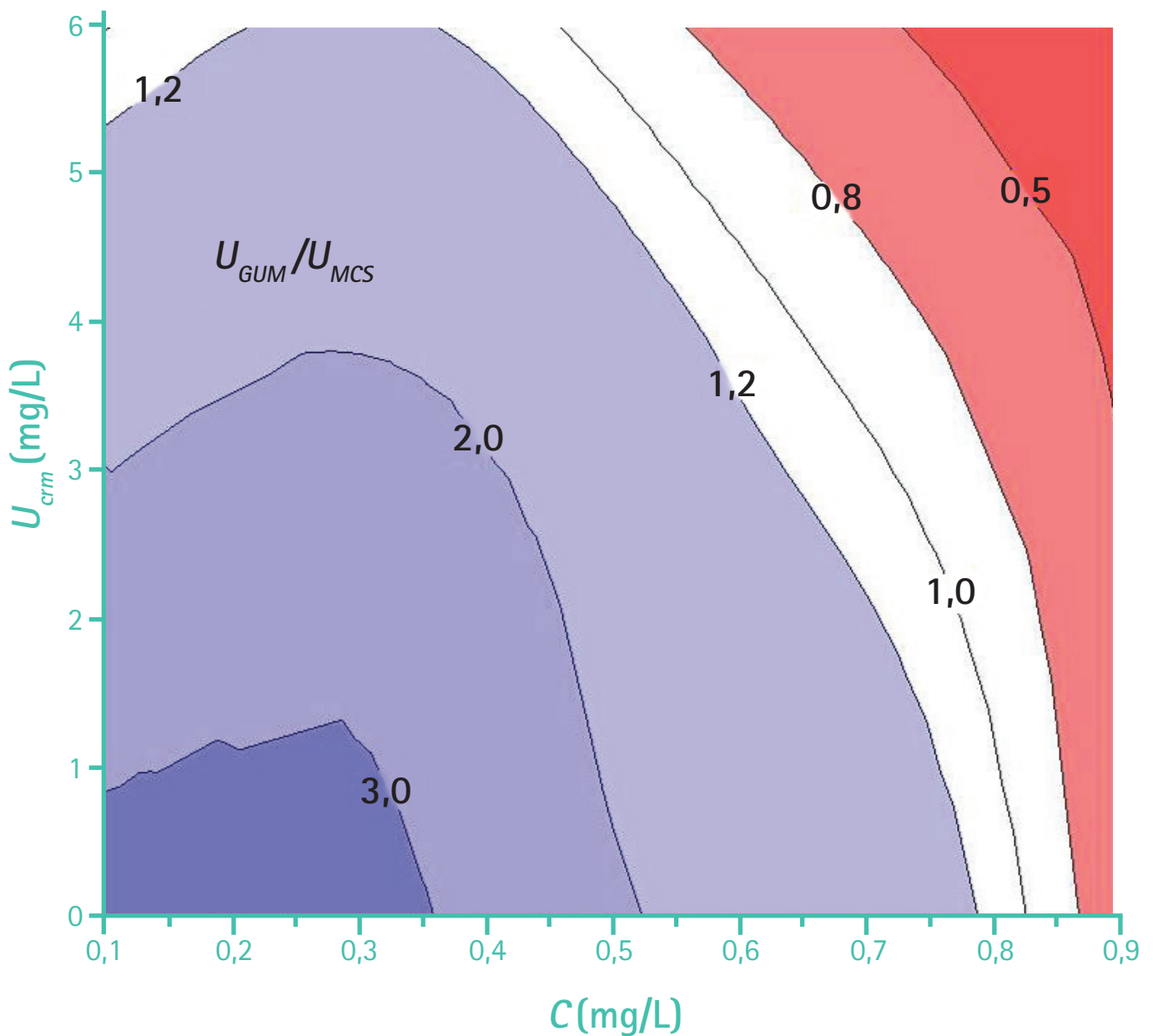


Figura 4 - Mapeamento da relação entre a incerteza pelo ISO GUM e por simulação de Monte Carlo.
Fonte: elaborado pelo autor.

4 Conclusões

Para o exemplo estudado, é possível concluir que o uso da estimativa de incerteza da curva de calibração analítica pelo modelo do ISO GUM, ou do Eurachem/CITAC, assumindo a hipótese de ausência de incertezas nos padrões, gera resultados maiores que os simulados (mais realistas) em cerca de 60 % dos casos. Para concentrações mais altas, e quando a incerteza dos padrões também é mais alta, a estimativa GUM apresenta-se menor que a simulada.

O uso de estimativas de incerteza maiores que as reais muitas vezes é entendido como uma prática segura, do ponto de vista do laboratório que gera os resultados de análise, porque prevê uma faixa de variabilidade maior ao redor dos valores obtidos. Por outro lado, estes valores com maior incerteza são também metrologicamente mais pobres, por terem menor resolução, digamos assim, sendo menos úteis para uma boa caracterização de materiais, para decidir sobre atendimento de especificações, para verificar o cumprimento de limites legais, etc.

5 Referências

BESALÚ, E.; JULIÁN-ORTIZ, J. V.; POGLIANI, L. Ordinary and orthogonal regressions in QSAR/QSPR and chemistry-related studies. **MATCH Communications in Mathematical Computer Chemistry**, v. 63, p. 576-583, 2010.

COX, M. G., P. HARRIS and B. R. L. SIEBERT. Evaluation of measurement uncertainty based on the propagation of distributions using Monte Carlo simulation. **Measurement Techniques**, v. 46, n. 9, p. 824-833, 2003.

COX, M. G., P. M. HARRIS. **Software specifications for uncertainty evaluation**. Teddington: National Physical Laboratory, Sept. 2006; Revised/corrected Nov. 2008. (NPL Report DEM-ES-010; CMSC 40/04 revised).

DANZER, K.; WAGNER, M.; FISCHBACHER, C. Calibration by orthogonal and common least squares - theoretical and practical aspects. **Fresenius Journal on Analytical Chemistry**, v. 352, n. 5, p. 407-412, 1995.

DANZER, K. **Analytical chemistry: theoretical and metrological fundamentals**. Berlin: Springer, 2007. 315 p. ISBN 3540359885.

ELLISON, S. L. R.; WILLIAMS, A. (Eds). **Eurachem/CITAC Guide: quantifying uncertainty in analytical measurement**. 3. ed. London: Eurachem, 2012. ISBN 978-0-948926-30-3.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC Guide 98-3:2008 (JCGM/WG1/100) Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995 with minor corrections)**. Geneve, 2008a. 120 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl 1:2008 (JCGM/WG1/101)**: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Geneve, 2008b. 88 p.

KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. A. **Monte Carlo methods**. New York: Wiley, 2004. 195 p. ISBN-10: 0-471-89839-2.

MANDEL, J. Fitting straight lines when both variables are subject to error. **Journal of Quality Technology**, v. 16, n. 1, p. 1-14, 1984.

SHARAF, M. A.; ILLMAN, D. L.; KOWALSKI, B. R. **Chemometrics**. New York: Wiley, 1986. 332 p.

SOBOL, I. M. **A Primer for Monte Carlo Method**. Boca Raton: CRC Press, 1994. 126 p. ISBN 0-8493-8673-X

THOMOPOULOS, N.T. **Essentials of Monte Carlo Simulation: Statistical Methods for Building Simulation Models**. New York: Springer, 2013. 174 p. DOI 10.1007/978-1-4614-6022-0

WALD, A. The fitting of straight lines if both variables are subject to error. **Annual Mathematical Statistics**, v. 11, n. 3, p. 284-300, 1940.

IPT
Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo

Av. Prof Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - Butantã - São Paulo - SP
CEP 05508-901

Central de Relacionamento com o Cliente

(11) 3767-4102 / 4456 / 4091

ipt@ipt.br

www.ipt.br

Redes sociais

twitter.com/@iptsp

youtube.com/IPTbr

facebook.com/iptsp

