UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

CONTRIBUIÇÕES PARA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO
TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES

Texto Sistematizado,
apresentado ao Instituto de Arquitetura
e Urbanismo da Universidade de São Paulo,
para inscrição no Concurso Público de Títulos
e Provas visando à obtenção do Título de
Livre-Docente, na Área de Arquitetura,
Urbanismo e Tecnologia

PROFA. DRA. KARIN MARIA SOARES CHVATAL

AGOSTO 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Daniel e ao Tom, meus amores, por estarem sempre ao meu lado e fazerem tudo ter um sentido. Agradeço também por todo o apoio e incentivo nas semanas de finalização deste trabalho.

A todos os funcionários do IAU, por todo o apoio de sempre, durante todos esses anos. Cada um, em sua função, teve um papel relevante para que esse trabalho se realizasse ao longo de todo esse tempo. Fica aqui um agradecimento especial à Brianda, da Biblioteca do IAU, que gentilmente se ofereceu para ajudar na organização das referências bibliográficas, e que fez um trabalho minucioso e de qualidade. Ao Pedro, do LCA, pela importante ajuda na parte experimental das pesquisas, na montagem da Mesa d'Água e na reforma do Heliodon, e também ao Dibo, do Laboratório de Maquetes, que tem sempre colaborado conosco, com disposição e eficiência.

Agradeço também a todos os colegas docentes do IAU, pela convivência e aprendizado durante todos esses anos, e por me trazerem uma diversidade tão rica de visões dentro da Arquitetura e do Urbanismo. Agradeço especialmente aos colegas com quem tive colaboração em pesquisa. Ao Márcio, pela oportunidade de participação no projeto FINEP/INOVATEC e à Lúcia, pelo projeto do Minha Casa, Minha Vida. À Rosana e à Kelen, que trabalham na área de Conforto Ambiental, agradeço pelas discussões sempre proveitosas, sobre nossos trabalhos. À Rosana, pela franqueza e honestidade, e à Kelen, pela disponibilidade em sempre contribuir. Agradeço também aos colaboradores externos ao IAU, que viabilizaram muitos dos trabalhos aqui apresentados. Ao Victor, pela sua curiosidade e vontade de sempre entender como as coisas funcionam. Ao Gilder, Gabriel e Paulo, do IPT, por terem sido receptivos ao nosso primeiro contato, por todo o aprendizado proporcionado e por terem dado todo o apoio necessário nos ensaios no Túnel de Vento. I would also like to thank Ranji and Joe, from NCSU, for their motivation and clarity of vision, which has helped us so much.

Agradeço também a todos os meus alunos, pois foi por meio de sua dedicação e vontade de aprender, que este trabalho se tornou possível. Aos que já não estão mais por aqui: Maiara, Giovana, Tamiris, Ana Ligia, Amanda, Nicole, Vanessa, Paula, Gustavo, Daniel, Thais, Natália, Leticia e Tássia. E aos que ainda permanecem (ou com os quais ainda tenho trabalhos em andamento), obrigada pela confiança e disposição: Ana Paula, Pilar, Hector, Carol, Michele, Rosi, Vanessa, Camila e Fernanda.

Finalmente, fica o reconhecimento pelo apoio financeiro concedido pela USP (por meio de seus programas de bolsas), FIPAI, CAPES, CNPq, FINEP e FAPESP.

***“Science is always wrong. It never solves a problem without
creating ten more.”***

George Bernard Shaw

RESUMO

Este Texto Sistematizado reúne as principais pesquisas conduzidas desde o ingresso na USP. São trabalhos que possuem temáticas variadas, mas com uma característica em comum: trazem contribuições para a avaliação do desempenho termoenergético de edificações. Primeiramente, tem-se as pesquisas referentes aos primeiros anos de trabalho, que estudaram o potencial de uso de variados métodos de avaliação do desempenho termoenergético de espaços construídos, com foco no ensino de Graduação. Em seguida, há o estudo sobre uma importante Norma publicada em 2013, que inclui, entre outras exigências, procedimentos para a avaliação do desempenho térmico de habitações, a ABNT NBR 15575. Na sequência, tendo em vista a necessidade de desenvolvimento de ferramentas simples para a avaliação do desempenho térmico de edificações nas fases iniciais de projeto, é apresentado o processo de elaboração de metamodelos (equações obtidas por meio de análise de regressão múltipla) que visam a esse objetivo, voltados a habitações de interesse social naturalmente ventiladas. Segue-se então com as pesquisas concluídas recentemente, que visam contribuir para a avaliação do desempenho termoenergético de edificações por meio da simulação computacional dinâmica, com foco no programa *EnergyPlus*. Finalmente, têm-se os trabalhos que trataram especificamente da avaliação do desempenho termoenergético de saletas comerciais de modo misto, que fazem uso tanto da ventilação natural por meio de janelas operáveis quanto de sistemas artificiais de condicionamento. As principais contribuições desses trabalhos se referem à elaboração de fontes de consulta úteis para a adoção dos métodos estudados de avaliação do desempenho, na Graduação; à avaliação do procedimento simplificado da ABNT NBR 15575; à descrição do procedimento de elaboração dos metamodelos para habitações naturalmente ventiladas, e aos próprios metamodelos em si; à avaliação das variadas alternativas de modelagem, incluindo as referentes ao zoneamento térmico, inserção de construções, ventilação natural, e os estudos detalhados, baseados em ensaios experimentais, relacionados ao pré-processador *Slab* e ao impacto de proteções solares nas taxas de renovação de ar; e finalmente, à avaliação do potencial de economia de energia de saletas comerciais de modo misto no Brasil, incluindo a influência dos parâmetros de projeto, tendo em vista o equilíbrio entre eficiência energética e conforto visual.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Heliodon, com três arcos fixos e carrinho móvel, disponível no ano de 2009, no Laboratório de Conforto Ambiental do antigo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), atual IAU.	7
Figura 2 - Desenhos da maquete do estudo dirigido.	8
Figura 3 – Vista superior do Heliodon.	9
Figura 4 – Detalhes do Heliodon após a reforma. Lâmpadas fixas acionadas individualmente.	10
Figura 5 – Mesa d'Água disponível no Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo do IAU/USP. Mesa e exemplo de visualização de ensaio em planta.	11
Figura 6- Ensaios efetuados na Mesa d'Água.	12
Figura 7 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do <i>Workshop</i> ZEMCH 2015.	16
Figura 8 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do <i>Workshop</i> ZEMCH 2015.	17
Figura 9 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do <i>Workshop</i> ZEMCH 2015.	18
Figura 10 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do <i>Workshop</i> ZEMCH 2015.	19
Figura 11 – Temperatura máxima do ar na sala da habitação, para o dia típico de verão.	31
Figura 12 – Temperatura mínima do ar no quarto 2 da habitação, para o dia típico de inverno	32
Figura 13 – Planta baixa e corte da habitação simulada.	43
Figura 14: Testes efetuados para análise dos materiais e construções virtuais.	45
Figura 15 –Comparação entre os resultados da simulação com uso dos materiais e construções virtuais e reais, para São Paulo.	45
Figura 16– Validação dos modelos de regressão que predizem o desconforto por calor e por frio nas três cidades estudadas.	48

Figura 17 – Modelos simulados ($M_{1:1}$).	58
Figura 18 – Modelos simulados (M_B).	59
Figura 19 – Modelos simulados ($M_{2:1}$).	60
Figura 20. Ilustração dos componentes móveis e fixos do modelo.	64
Figura 21. Exemplificação: encaixes macho-fêmea para os dispositivos tipo veneziana para os três tamanhos de janela.	64
Figura 22- Coeficientes de pressão para todos os pontos medidos na janela intermediária (1x1,6m), para todos os casos estudados.	67
Figura 23 - Diferença entre o CP médio da janela do quarto 1, com tamanho intermediário, para os casos com (E2_1x1.6) e sem (R_1x1.6) varanda, em função do ângulo de incidência do vento.	68
Figura 24 - Faixas de diferença porcentual das taxas de renovação de ar dos casos com (E2_1x1.6) e sem (R_1x1.6) varanda, janelas intermediárias, na orientação Norte-sul.	68
Figura 25 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (E2_1x1.6) e sem (R_1x1.6) varanda, do quarto 2, com janelas intermediárias e orientação Norte-Sul.	69
Figura 26 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos com (E2_1x1.6) e sem (R_1x1.6) varanda, com janelas intermediárias na orientação Norte-Sul.	70
Figura 27- Células-teste do IAU.	76
Figura 28 – Edifício analisado.	83
Figura 29 – Geometrias das saletas comerciais estudadas	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Exigências da ABNT NBR 15575 para as aberturas para ventilação das salas de estar e dormitórios, segundo o procedimento simplificado.	25
Quadro 2- Exigências para as propriedades termofísicas das paredes externas e da cobertura prescritas pela ABNT NBR 15575.	26
Quadro 3- Critério de avaliação de desempenho térmico para as condições de verão, de acordo com o método de simulação da ABNT NBR 15575.	27
Quadro 4- Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno, de acordo com o método de simulação da ABNT NBR 15575.	28
Quadro 5- Casos de estudo.	65
Quadro 6 - Resumo dos principais impactos nos CP, nas taxas de renovação de ar e nas temperaturas internas pela presença dos elementos estudados.	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 ESTUDO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO ESPAÇO CONTRUÍDO VOLTADOS AO ENSINO	3
2.1 Orientações, supervisões e produção	3
2.2 Estudos sobre o Heliodon e a Mesa d'Água	5
2.3 Estudos sobre programas computacionais de apoio ao projeto	12
2.4 Avaliação do Workshop ZEMCH 2015	14
2.5 Considerações finais	20
3 ANÁLISE DAS EXIGÊNCIAS DA ABNT NBR 15575 QUANTO AO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES	21
3.1 Orientações, supervisões e produção	21
3.2 Introdução	23
3.3 Síntese dos procedimentos simplificado e de simulação	24
3.3.1 Procedimento simplificado	24
3.3.2 Procedimento de simulação	26
3.4 Análise do procedimento simplificado	28
3.5 Análise do procedimento de simulação	33
3.6 Considerações finais	34
4 ELABORAÇÃO DE METAMODELOS PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES	37
4.1 Orientações, supervisões e produção	37
4.2 Contextualização	38
4.3 Introdução	39
4.4 Método	40
4.4.1 Definição das variações paramétricas	41
4.4.2 Simulações paramétricas	45
4.4.3 Regressão multivariada	46

4.5 Resultados	47
4.5.1 Metamodelos	47
4.5.2 Aplicação dos metamodelos	49
4.6 Considerações finais	49
 5 CONTRIBUIÇÕES PARA A MODELAGEM DE EDIFICAÇÕES EM PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO	 51
5.1 Orientações, supervisões e produção	51
5.2 Introdução	53
5.3 Comparações entre diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social	55
5.4 Contribuições para a modelagem da ventilação natural em habitações	60
5.5 Impacto de proteções solares e muros na ventilação natural e nas temperaturas interiores de habitações	62
5.6 Contribuições para a modelagem da temperatura do solo	72
5.7 Considerações finais	76
 6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS DE MODO MISTO	 79
6.1 Orientações, supervisões e produção	79
6.2 Introdução	80
6.3 Temperaturas de acionamento de ventiladores e do ar condicionado	81
6.4 Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com a adoção do modo misto	82
6.5 Integração da ventilação e iluminação naturais em edifícios de escritório de modo misto	85

6.6 Considerações finais	88
7 CONCLUSÕES	91
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE A	
APÊNDICE B	
APÊNDICE C	
APÊNDICE D	
APÊNDICE E	

1 INTRODUÇÃO

Este Texto Sistematizado reúne as principais pesquisas conduzidas desde o ingresso na USP, em setembro de 2008. São trabalhos que possuem temáticas variadas, mas com uma característica em comum: trazem contribuições para a avaliação do desempenho termoenergético de edificações. Essa é uma questão de relevância no cenário mundial, frente às preocupações atuais de redução do consumo de energia e de emissões de dióxido de carbono, devido às mudanças climáticas. O presente Capítulo (Introdução) apresenta a estrutura de todo o Texto Sistematizado, bem como o conteúdo de cada Capítulo.

O Capítulo 2 apresenta as pesquisas que se iniciaram nos primeiros anos de trabalho, e que estudaram o potencial de uso de variados métodos de avaliação do desempenho termoenergético de espaços construídos, com foco no ensino de Graduação. Dois desses métodos são o Heliodon e a Mesa d'Água, equipamentos de laboratório que permitem o estudo em modelos reduzidos, e que se referem a dois aspectos essenciais para a configuração do desempenho termoenergético: a incidência solar e a ventilação natural, respectivamente. Outros desses métodos são programas computacionais simples de apoio ao projeto, além do utilizado na experiência com o *Workshop ZEMCH (Zero Energy Mass Custom Home)*, realizado na Pós-graduação, que tratou do projeto de habitações de energia zero.

No Capítulo 3 tem-se o estudo sobre uma importante Norma publicada em 2013, que inclui, entre outras exigências, procedimentos para a avaliação do desempenho térmico de habitações, a ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Os métodos de avaliação dessa Norma foram analisados em um projeto de pesquisa (FINEP/INOVATEC), sendo o procedimento simplificado o meu enfoque de estudo. Em seguida, no Capítulo 4, tendo em vista a necessidade de desenvolvimento de ferramentas simples para a avaliação do desempenho térmico de edificações nas fases iniciais de projeto, é apresentado o processo de elaboração de metamodelos (equações obtidas por meio de análise de regressão múltipla) que visam a esse objetivo, voltados a habitações de interesse social naturalmente ventiladas.

Já o Capítulo 5 congrega as pesquisas mais recentes, que visam contribuir para a avaliação do desempenho termoenergético de edificações por meio da simulação computacional dinâmica. Essas contribuições se referem à modelagem de variados aspectos nos arquivos de entrada desses programas que influenciam nos seus resultados, tendo em vista as incertezas atreladas a esse processo. Trata-se da determinação das zonas térmicas, de parâmetros relacionados à ventilação natural (temperaturas de controle, horário de abertura das janelas, influencia de proteções solares e muros), das trocas de calor com o solo, entre outros. São estudos comparativos, que se baseiam somente em simulações computacionais ou também em dados experimentais.

Finalmente, no Capítulo 6, têm-se os trabalhos que trataram especificamente da avaliação do desempenho termoenergético de edifícios de escritórios. O objeto de estudo é o edifício de escritórios de modo misto, que faz uso tanto da ventilação natural, quanto de sistemas mecânicos de resfriamento, e mais especificamente, a saleta comercial, que geralmente possui janelas operáveis e equipamento de ar condicionado do tipo Split. Avalia-se o seu potencial de economia de energia e o seu desempenho, considerando de forma conjugada tanto o conforto visual quanto o consumo energético.

Todos os Capítulos se iniciam com uma breve apresentação do período no qual os trabalhos foram conduzidos, seu vínculo a projetos de pesquisa e, caso aplicável, seus principais colaboradores externos. Também possuem uma primeira seção (Orientações, Supervisões e Produção) onde constam as referencias bibliográficas desses trabalhos, bem como são indicadas as orientações e supervisões a eles relacionadas. A última seção de cada Capítulo, intitulada Considerações Finais, resume as suas principais contribuições. Ao final do Texto Sistematizado, têm-se as Referencias Bibliográficas e um Apêndice correspondente a cada Capítulo, onde constam os textos de suas publicações (artigos e capítulos de livros), na íntegra.

2 ESTUDO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO ESPAÇO CONTRUÍDO VOLTADOS AO ENSINO

As primeiras atividades de pesquisa analisaram variados métodos de avaliação do desempenho termoenergético de edificações e do espaço urbano, que são adotados nas disciplinas de Conforto Ambiental na Graduação. Referem-se principalmente a orientações de iniciação científica. Entre 2009 e 2011, procurou-se contribuir para o funcionamento do Heliodon, equipamento disponível no Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do IAU, para o estudo da insolação no espaço construído, além de se ter feito um estudo sobre ferramentas computacionais simples de apoio ao projeto. Posteriormente, entre 2014 e 2015, houve o estudo sobre a Mesa d'Água, outro equipamento do LCA, que permite a visualização da ventilação natural em modelos reduzidos.

Em 2015, houve a oportunidade de participação no *Workshop ZEMCH (Zero Energy Mass Custom Home)*, para alunos da Pós-Graduação, em conjunto com a Universidade de Melbourne, Austrália. O objetivo era o projeto de habitações de interesse social de energia quase zero, industrializadas e customizadas. A avaliação dessa experiência pelos professores participantes é também aqui apresentada.

2.1 Orientações, supervisões e produção

Orientações

1. Rosilene Regolão. *Estudo do potencial de utilização do Heliodon em projetos arquitetônicos*. Iniciação científica. 2009.
2. Maiara Fuzatti Nicolau. *Conforto ambiental e projeto arquitetônico: estudo de metodologias de apoio*. Iniciação científica. 2009-2010.
3. Ana Ligia de Campos Mendes. *Estudo para reforma do Heliodon e elaboração de procedimentos para o seu uso*. Iniciação científica. 2010-2011.
4. Amanda Cristina Ikegami Rolim. *A mesa d'água como ferramenta didática para o estudo qualitativo da ventilação natural no ambiente construído*. Iniciação científica. 2014-2015.

Artigos de congressos, periódicos ou capítulos de livros

*** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, no Apêndice A.*

BUENO, C.; CHVATAL, K. M. S. Possibilidades de aplicação de ferramentas de análise da ventilação natural durante a concepção de projetos arquitetônicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (SBQP), 2009, São Carlos, SP. *Anais...* São Carlos: EESC-USP, 2009.

CHVATAL, K. M. S. et al. Exploration of the ZEMCH Workshop USP 2015. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ZERO ENERGY MASS CUSTOM HOME (ZEMCH) NETWORK, 4., 2015, Lecce. *Proceeding...* Lecce: ZEMCH Network, 2015.

CHVATAL, K. M. S.; NICOLAU, M. F. Simple computational tools to help the design of low energy buildings. In: RENEWABLE ENERGY 2010 CONFERENCE, 2010, Yokohama, Japan. *Proceedings...* Yokohama, Japan: The Renewable Energy 2010 Organizing Committee, 2010.

CHVATAL, K. M. S.; REGOLÃO, R. Estudo do Potencial de utilização do heliodon em projetos arquitetônicos. In: CONFERENCIA LATINOAMERICANA DE ENERGIA SOLAR (ISES-CLA), 4., 2010, Cusco, Peru. *Anais...* Lima, Peru: APES, 2010.

MARQUES, T. H. T.; REGOLÃO, R.; CHVATAL, K. M. S. Aplicação de ferramentas simplificadas de projeto voltadas ao desempenho térmico em uma habitação de interesse social. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (SBQP), 2., 2011, Rio de Janeiro. *Anais....* Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.

NICOLAU, M. F.; CHVATAL, K. M. S. Análise de programas computacionais simples de apoio a projetos bioclimáticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 2010, Canela, RS. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2010.

ROLIM, A. C. I.; CHVATAL, K. M. S. A mesa d'água como ferramenta didática para o estudo qualitativo da ventilação natural no ambiente construído. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (SIICUSP), 23., 2015, São Paulo. *Anais...* São Paulo: USP, 2015.

Dissertações, relatórios e manuais

*** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, na página <http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/professora-karin/>*

MENDES, A. L. *Estudo para reforma do heliodon e elaboração de procedimentos para seu uso, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para o Programa Ensinar com Pesquisa da USP*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2010.

NICOLAU, M. F. *Conforto ambiental e projeto arquitetônico: estudo de metodologias de apoio, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para o Programa Ensinar com Pesquisa/USP*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC-USP, 2010.

REGOLÃO, R.; CHVATAL, K. M. S. *Manual de Utilização: Heliodon*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2009.

REGOLÃO, R. *Estudo do Potencial de utilização do heliodon em projetos arquitetônicos, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para a FIPAI-Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2009.

ROLIM, A. C. I. *A mesa d'água como ferramenta didática para o estudo qualitativo da ventilação natural no ambiente construído, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para o CNPq/PIBIC/USP*. São Carlos: IAU-USP, 2015.

ROLIM, A. C. I.; CHVATAL, K. M. S. *Manual Técnico da Mesa d'Água*. IAU-USP: São Carlos, 2015.

2.2 Estudos sobre o Heliodon e a Mesa d'Água

No ensino de Conforto Ambiental, as ferramentas de visualização dos fenômenos físicos no espaço construído contribuem significativamente para o seu melhor entendimento. O Heliodon e a Mesa d'Água são duas dessas ferramentas, que tratam, respectivamente, da visualização, em modelos reduzidos, da incidência solar e do fluxo de ar

devido à ventilação natural. As análises da insolação e da ventilação natural são essenciais para que se tenha como resultado final espaços construídos adequados do ponto de vista do conforto térmico.

O **Heliodon** era um equipamento que se encontrava disponível no Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) do antigo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), atual IAU. Como ele apresentava algumas dificuldades de funcionamento, foram supervisionadas duas orientações científicas que o trataram como objeto de estudo. A primeira, referente aos produtos (CHVATAL; REGOLÃO, 2010, REGOLÃO; CHVATAL, 2009, REGOLÃO, 2009) e a segunda, que corresponde à seguinte referência: MENDES, 2010.

O objetivo principal do primeiro trabalho (CHVATAL; REGOLÃO, 2010) foi estudar o potencial didático do Heliodon na avaliação da incidência solar de edificações e projetos urbanos, considerando-se especificamente o tipo de equipamento que tínhamos no LCA (Heliodon com três arcos fixos, correspondentes aos equinócios e solstícios de verão e inverno, e um carrinho com uma lâmpada móvel, Figura 1). Foi feito o acompanhamento do uso do equipamento pelos alunos de graduação, em especial durante o seu projeto de final de curso, além de entrevistas com professores de Projeto e de Paisagismo. A pesquisa teve os seguintes resultados.

- Manual (REGOLÃO; CHVATAL, 2009) que permite o uso do Heliodon de forma autônoma pelos alunos, e que é usado até a presente data.
- Roteiro dirigido (REGOLÃO, 2009), elaborado para auxiliar o entendimento do movimento aparente do sol em diversas latitudes, utilizado desde então nas aulas da Graduação. Esse roteiro faz uso de uma maquete especialmente criada para tal, que possui um elemento deslizante que pode ser encaixado no teto ou nas paredes, de modo a simular o comportamento de dispositivos de proteção horizontais e verticais (Figura 2).
- Identificação das limitações do equipamento: presença de apenas um carrinho de luz, que tinha que ser trocado de arco para cada época do ano; mesa reclinável pequena (90 cm de diâmetro) para maquetes de grande porte e análises restritas apenas aos equinócios e solstícios.

Figura 1 - Heliodon, com três arcos fixos e carrinho móvel, disponível no ano de 2009, no Laboratório de Conforto Ambiental do antigo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), atual IAU.
Fonte: Adaptado de Regolão (2009)

Figura 2 - Desenhos da maquete do estudo dirigido.
Fonte: Chvatal e Regolão (2010)

A segunda iniciação científica (MENDES, 2010) visou à elaboração de uma proposta de reforma do equipamento existente, além de efetuar o levantamento das suas dimensões (Figura 3). A principal alteração proposta se referiu à retirada do carrinho e à sua substituição por lâmpadas halógenas em pontos fixos. Essa reforma foi conduzida posteriormente, no ano de 2012, com a ajuda do recém-contratado técnico do LCA, Pedro Mattia. Os arcos foram trocados, para permitir a instalação das lâmpadas em pontos fixos, sendo seu acionamento individual feito através de um controle colocado na lateral do equipamento (Figura 4).

Figura 4 – Detalhes do Heliodon após a reforma.
Lâmpadas fixas acionadas individualmente.
Fonte: arquivo pessoal.

Quanto à **Mesa d'Água**, ela foi construída a partir de projetos prontos, fornecidos por alguns laboratórios de Conforto Ambiental do Brasil, que tinham como principal referência o equipamento do Laboratório de Conforto (Labcon) da Universidade Federal de Santa

Catarina (Figura 5). Ela é um equipamento hidráulico onde a água escoa em velocidade uniforme sobre uma placa de vidro transparente (mesa), junto a um indicador (contraste). A maquete é colocada sobre essa placa, e a solução, em contato com a mesma, possibilita a visualização dos desvios do fluxo, bem como da formação de vórtices e esteiras. O fluxo de água simula, portanto, o fluxo de ar devido à ventilação natural em edificações ou no espaço urbano, possibilitando análises qualitativas. Essa visualização é feita em duas dimensões (planta ou corte). Compõem o equipamento um sistema hidráulico, outro elétrico, reservatórios e tubulações (ROLIM, 2015).

Figura 5 – Mesa d'Água disponível no Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo do IAU/USP.

Mesa e exemplo de visualização de ensaio em planta.

Fonte: arquivo pessoal.

O objetivo da iniciação científica vinculada à Mesa d'Água (ROLIM; CHVATAL, 2015, ROLIM, 2015) foi, da mesma forma que o primeiro estudo voltado ao Heliodon, avaliar o potencial de utilização do equipamento como ferramenta didática, com foco na avaliação qualitativa da ventilação natural, em edificações e no espaço urbano. Buscou-se uma análise criteriosa dos ensaios realizados no equipamento e obteve-se como produto final um Manual para o seu uso (ROLIM; CHVATAL, 2015), que é atualmente utilizado. Para evitar qualquer dano a esse equipamento, ele não pode ser utilizado no LCA sem o auxílio do técnico. A leitura do Manual permite o entendimento do seu funcionamento, e de sugestões práticas para que os ensaios possam ser eficientes (materiais que podem ser adotados, o que observar nos ensaios, como a maquete deve ser posicionada, entre outros).

Foram ensaiadas na Mesa várias situações correspondentes a desenhos esquemáticos do fluxo de ar no espaço construído disponíveis na literatura (em corte ou em planta), mantendo-se as mesmas proporções e verificando-se se os resultados correspondiam, qualitativamente, ao que era indicado nessas referências (ROLIM, 2015 [Figura 6]). Com isso, foi possível o entendimento e a descrição dos efeitos do vento nos ambientes externo e interno pela aluna, e a reprodução desses ensaios nas aulas de Conforto Ambiental.

Figura 6- Ensaios efetuados na Mesa d'Água
Fonte: adaptada de Rolim (2015)

2.3 Estudos sobre programas computacionais de apoio ao projeto

Assim como as ferramentas de visualização em maquetes, programas computacionais simplificados podem auxiliar na compreensão dos fenômenos físicos e nas análises de conforto ambiental. Possuem as vantagens de não demandarem conhecimento especializado, estarem disponíveis gratuitamente e serem de uso relativamente fácil. Verificou-se a existência de vários desses programas, tanto a nível nacional quanto

internacional, o que motivou a orientação de uma iniciação científica que analisasse o seu potencial (NICOLAU, 2010, NICOLAU; CHVATAL, 2010, CHVATAL; NICOLAU, 2010).

O enfoque se deu nos programas relacionados ao desempenho térmico, visual e eficiência energética das edificações. Foram estudados 14 programas em português e 14 em inglês, todos disponíveis gratuitamente (NICOLAU, 2010). Para cada um deles foi elaborada uma ficha completa de caracterização, de acordo com os seguintes aspectos: nome, referência bibliográfica, disponibilidade (online ou carregamento através de senha), língua, nível de dificuldade, validação do programa (se aplicável), tipo de análise feita, exemplos de resultados, dados de entrada, existência de banco de dados e outros comentários adicionais específicos. Essas análises foram apresentadas em dois congressos: um nacional, para os programas em português (NICOLAU; CHVATAL, 2010) e outro internacional, para os em inglês (CHVATAL; NICOLAU, 2010). Essa pesquisa forneceu uma documentação de grande validade para consulta, facilitando a identificação das vantagens e desvantagens dos programas, e fomentou o seu uso, tanto nas disciplinas de Conforto da Graduação quanto na Pós-Graduação.

Em seguida, houve a continuidade do interesse nessa temática, por meio de dois trabalhos conduzidos com alunos em disciplinas de Pós-Graduação, os quais resultaram em dois artigos em congressos nacionais (BUENO; CHVATAL, 2009; MARQUES; REGOLÃO; CHVATAL, 2011). O primeiro trabalho (BUENO; CHVATAL, 2009) concentrou-se nos programas de análise da ventilação natural em edificações. Foram avaliadas 13 ferramentas, desde as mais simples, para análise dos dados climáticos e construção da rosa dos ventos, até as que consideram simulação dinâmica. Esses programas foram classificados de forma similar à pesquisa anterior. Foi também feita uma descrição de como eles se inserem nas variadas etapas de projeto, avaliando-se o seu potencial de uso e suas limitações.

Finalmente, no segundo trabalho (MARQUES; REGOLÃO; CHVATAL, 2011), foi avaliado o desempenho térmico de uma residência térrea por meio de uma série de ferramentas simples de análise, selecionadas livremente pelos alunos conforme fosse identificada a sua necessidade de uso. As duas pesquisas anteriores, sobre programas computacionais (gerais e de ventilação natural) foram adicionadas ao referencial teórico fornecido aos alunos, de modo a auxiliar nas suas escolhas. O trabalho também propõe

alterações no projeto original a partir do que foi observado nas avaliações. Através da descrição do exemplo prático, o artigo demonstra como ferramentas simplificadas de análise quantitativa e qualitativa podem ser utilizadas para avaliar o desempenho térmico de projetos não complexos, como habitações de interesse social. Esse artigo é uma referência adotada na disciplina de Conforto Ambiental nas Edificações, da Graduação, que auxilia os alunos na elaboração do projeto final dessa disciplina.

2.4 Avaliação do *Workshop* ZEMCH 2015

Embora seja uma experiência de ensino na Pós-graduação, também se desdobrou em experiência de pesquisa. Nesse *Workshop*, no qual participaram alunos do IAU e da UNIMELB (University of Melbourne, Austrália) e professores de ambas as instituições, foram projetadas habitações de interesse social industrializadas e customizadas, que levassem em consideração o conceito de energia zero. Foi uma experiência de ensino muito produtiva, que resultou em um artigo de congresso internacional (CHVATAL et al., 2015). Essa iniciativa faz parte de um contexto maior, no qual se vincula uma rede de pesquisadores voltados ao conceito ZEMCH: *Zero Energy Mass Custom Home*, ou seja, habitações de energia zero industrializadas e customizadas.

O objetivo da disciplina era o desenvolvimento do projeto desse tipo de habitação que considerasse as especificidades nacionais. O Programa consistiu em aulas preparatórias pré *Workshop*, conduzidas separadamente para os alunos no Brasil e na Austrália, onde foram apresentados os conceitos teóricos e as ferramentas necessárias para avaliação do desempenho energético dos projetos, durante a sua concepção. Em seguida, houve o *Workshop*, com duração de uma semana (5 dias), durante o dia todo, onde grupos de alunos de ambos os países desenvolveram os projetos, apoiados por estratégias didáticas que garantiam a obtenção de produtos intermediários. Os pôsteres dos projetos finais dos quatro grupos participantes são apresentados nas Figuras 7, 8, 9 e 10. O encerramento da disciplina, para os alunos brasileiros, se deu com a entrega e apresentação de monografias adicionais, que tratavam de temas derivados do assunto da disciplina.

Todo o processo e as estratégias didáticas adotadas são descritos em (CHVATAL et al., 2015). Os resultados foram avaliados por meio dos projetos finais apresentados pelos grupos de estudantes no último dia de *Workshop*. Essa avaliação permite o aprimoramento do processo em suas versões futuras, já que há previsão de sua continuidade. Os principais destaques se referem à visita ao conjunto habitacional efetuada no início da semana, que facilitou a identificação dos problemas existentes nesse tipo de projeto e guiou a proposição de soluções nos trabalhos, e à necessidade de desenvolvimento de ferramentas simplificadas de análise energética de habitações voltadas ao clima e contexto brasileiros. Uma das metodologias utilizadas nesse *Workshop* (diagrama FAST, para a definição das prioridades do projeto), passou a ser adotada durante o desenvolvimento do trabalho final da disciplina de Conforto Ambiental nas Edificações.

GROUP:
Francisco Carlos (F.C.)
Lorena de Souza (L.S.)
Mônica Figueiredo (M.F.)
Luan de Almeida

TUTOR:
Maurício Augusto (M.A.)
Juliana Lima (J.L.)
Luan Carlos (L.C.)
Kleber de Almeida (K.A.)

Figura 7 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do *Workshop* ZEMCH 2015.
Fonte: adaptada Chvatal et al. (2015)

Figura 8 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do *Workshop* ZEMCH 2015.
Fonte: adaptada Chvatal et al. (2015)

Figura 9 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do Workshop ZEMCH 2015.

Fonte: adaptada Chvatal et al. (2015)

Figura 10 – Pôster do projeto final do grupo A, participante do Workshop ZEMCH 2015.

Fonte: adaptada Chvatal et al. (2015)

2.5 Considerações finais

As pesquisas sobre métodos de avaliação do desempenho termoenergético de espaços construídos trataram do estudo do Heliodon e da Mesa d'Água, criando Manuais que fornecem instruções para o seu uso, além de terem desenvolvido práticas que são adotadas em sala de aula nas disciplinas de Conforto Ambiental, como o estudo dirigido sobre insolação ou os testes da ventilação natural em variadas configurações geométricas. Adiciona-se o fato de ter sido possível, com isso, efetuar a reforma do Heliodon, tornando-o mais acessível. Já o estudo dos programas computacionais permitiu o mapeamento dos recursos disponíveis, fornecendo um banco de informações também adotado nos trabalhos das disciplinas.

Finalmente, a participação no *Workshop ZEMCH (Zero Energy Mass Custom Home)*, da Pós-graduação, permitiu a sua avaliação, sendo identificados seus aspectos positivos e os com necessidade de melhoria, frente ao ensino da análise do desempenho termoenergético desse tipo de edificação, nos climas brasileiros.

3 ANÁLISE DAS EXIGÊNCIAS DA ABNT NBR 15575 QUANTO AO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES

Neste Capítulo são apresentados os resultados referentes à participação no Projeto de pesquisa FINEP/INOVATEC, entre 2011 e 2013, intitulado *Desenvolvimento de métodos e metodologias para avaliação de desempenho de tecnologias inovadoras no âmbito do Sistema Nacional de Avaliação Técnica, SINAT*, coordenado pelo Prof. Márcio Minto Fabrício, do IAU, e no qual participaram pesquisadores de várias instituições nacionais. A minha meta foi a análise dos procedimentos simplificado e de simulação da ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) relativos ao desempenho térmico de habitações (com foco no primeiro). Como o procedimento simplificado considera limites para a transmitância térmica das paredes e das coberturas, essa pesquisa teve interface com outro projeto, apoiado pela FAPESP (Auxílio à Pesquisa Individual), intitulado *Influência da redução da transmitância térmica da envoltória exterior no desempenho térmico e energético de edifícios no Brasil*, do qual fui pesquisadora responsável entre 2010 e 2012.

3.1 Orientações, supervisões e produção

Orientações

1. Tássia Marques. *Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP*. Mestrado. 2013.
2. Daniel Polistchuki. *Aperfeiçoamento da NBR 15575 e ao SINAT*. Iniciação científica. 2012-2013.
3. Vanessa Damasceno. *Contribuições para o aperfeiçoamento das exigências de desempenho térmico para habitações da NBR 15575*. Iniciação científica. 2012-2013.

Supervisões

1. Natalia Calvi. *Participação no Sub-Projeto 4/ Rede FINEP. Aperfeiçoamento da NBR 15575 e ao SINAT*. Bolsita DTI / CNPq. 2011-2012.

Artigos de congressos, periódicos ou capítulos de livros

*** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, no Apêndice B.*

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, 2014.

CHVATAL, K. M. S.; RORIZ, V. F. Avaliação do desempenho térmico de habitações segundo a ABNT NBR15575. In: FABRICIO, M. M.; ONO, R. (Org.). *Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: manutenção e percepção dos usuários*. [Porto ALEGRE]: ANTAC, 2015, p. 41-54.

MARQUES, T. H. T.; CHVATAL, K. M. S. A review of the Brazilian NBR15575 Norm: applying the simulation and simplified methods for evaluating a social house thermal performance. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN, 4., 2013, San Diego, USA. *Proceedings...* San Diego, USA: Society for Modeling and Simulation International, 2013.

Dissertações, relatórios e manuais

*** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, na página*
<http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/professora-karin/>

MARQUES, T. H. T. *Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP*. 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

3.2 Introdução

A descrição da Norma ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) apresentada nas seções 3.2 e 3.3 baseia-se nas seguintes publicações: Chvatal e Roriz (2015), Chvatal (2014) e Marques e Chvatal (2013). O última delas (MARQUES; CHVATAL, 2013) se refere à uma versão da Norma não revisada, anterior à vigente atualmente. No entanto, as partes desse documento utilizadas para esse trabalho são iguais às da versão atual.

Ambas as versões apresentam pequenas diferenças entre si, embora a maior parte do texto tenha sido mantida. De qualquer forma, o presente trabalho se refere somente à versão vigente.

A ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) estabelece um conjunto de exigências (tanto qualitativas quanto quantitativas) para que se garanta o adequado desempenho das habitações. O seu objetivo final é atender às necessidades do usuário, as quais, por sua vez, se traduzem nos seguintes aspectos:

- (a) segurança (segurança estrutural, contra fogo, no uso e na operação);
- (b) habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico, acústico e lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade, acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico); e
- (c) sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental).

Ela causou grande impacto no setor da construção civil no momento da publicação de sua primeira versão, em 2008. A partir de então, seguiu-se um período de discussões para modificação de seu texto original, até resultar na versão atual, publicada em 19 de fevereiro de 2013.

São estabelecidas pela Norma duas alternativas para a avaliação do desempenho térmico de habitações: os procedimentos simplificado e de simulação. A intenção é a obtenção de um desempenho classificado ao menos como mínimo por um dos dois procedimentos. Há também um procedimento de medição em edificações ou protótipos construídos, mas que é caracterizado apenas como complementar e de caráter informativo, não sendo tratado neste texto.

Na época da pesquisa, havia poucos trabalhos que avaliavam a ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), inclusive porque ela ainda encontrava-se em discussão, não tendo sido aprovada a sua versão final. Os poucos estudos existentes identificavam incongruências entre essa Norma e o Regulamento de eficiência energética para habitações, o RTQ-R (LOURA; ASSIS; BASTOS, 2011; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012), e entre os seus procedimentos simplificado e de simulação (BRITO et al., 2012). Também foi identificada grande variabilidade nos resultados devido à aplicação do método de simulação, dependendo dos valores adotados para os dados de entrada (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2013). Esses trabalhos, portanto, apontavam para a necessidade de estudos mais aprofundados sobre esse tema.

3.3 Síntese dos procedimentos simplificado e de simulação

3.3.1 Procedimento simplificado

O procedimento simplificado se resume no cumprimento de áreas mínimas de ventilação (Quadro 1) e no atendimento de exigências relativas às propriedades termofísicas das paredes externas e coberturas, em função da zona bioclimática na qual a habitação se encontra, de acordo com a ABNT NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). (Quadro 2). Ou seja, uma edificação, para ser aprovada, tem que atingir o desempenho mínimo para cada um dos três aspectos: paredes, coberturas e aberturas. As paredes e as aberturas somente podem ser classificadas com o desempenho mínimo (a única opção existente para ambas), enquanto que a cobertura pode apresentar o desempenho mínimo, intermediário ou superior.

Quadro 1- Exigências da ABNT NBR 15575 para as aberturas para ventilação das salas de estar e dormitórios, segundo o procedimento simplificado.

Fonte: adaptada de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013)

A = área de abertura efetiva/ área do piso x 100 (%)	
Zonas bioclimáticas 1 a 7	Zona bioclimática 8
$A \geq 7\%$	regiões nordeste e sudeste: $A \geq 8\%$
	região norte: $A \geq 12\%$
<p>Observações:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Zonas 1 a 6: devem poder ser vedadas no período de frio 2. As aberturas para ventilação das salas de estar e dormitórios devem atender à legislação específica do local da obra (Código de Obras, Sanitários, ou outros). Caso não haja exigência legal, as porcentagens deste Quadro devem ser adotadas. 	

Quadro 2- Exigências para as propriedades termofísicas das paredes externas e da cobertura prescritas pela ABNT NBR 15575

Fonte: adaptada de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013)

			Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8			
				$\alpha \leq 0.6$	$\alpha > 0.6$		
Paredes (desempenho mínimo/M)	U (W/m².K)	M	≤ 2.5	≤ 3.7	≤ 2.5		
	CT (kJ/m².K)	M	Zonas 1 a 7: CT ≥ 130				
Coberturas (desempenho mínimo/M, intermediário/I e superior/S)	U (W/m².K)		Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
				$\alpha \leq 0.6$	$\alpha > 0.6$	$\alpha \leq 0.4$	$\alpha > 0.4$
		M	≤ 2.3	≤ 2.3	≤ 1.5	$\leq 2.3.FT$	$\leq 1.5.FT$
		I	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.0	$\leq 1.5.FT$	$\leq 1.0.FT$
		S	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.5	$\leq 1.0.FT$	$\leq 0.5.FT$

U: transmitância térmica / CT: capacidade térmica / α : absorptância

O fator de transmitância, FT, é definido na ABNT NBR 15220. Ele é adimensional, e permite um valor-limite mais alto de U, caso o ático seja ventilado (somente para as zonas 7 e 8). Para coberturas não ventiladas, FT=1.

3.3.2 Procedimento de simulação

A ABNT NBR 15575 recomenda o uso do programa de simulação dinâmica *EnergyPlus* (ESTADOS UNIDOS, 2013), embora possibilite a adoção de outras ferramentas similares, desde que validadas pela ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2011). Os dados climáticos devem corresponder ao que a Norma denomina como “dias típicos de projeto de verão e de inverno” (exceto para as zonas bioclimáticas 6 a 8, que são dispensadas da avaliação de inverno). Ela fornece um Anexo com esses dados para vinte e seis capitais brasileiras.

Cada ambiente, inclusive o ático, deve ser simulado como uma zona térmica, na orientação de implantação. Caso esta não esteja definida, ou para ou para conjuntos habitacionais e edifícios multipavimentos, deve-se adotar, para o dia típico de verão, a janela

do quarto ou da sala voltada ao oeste, e a outra face, se possível, ao norte. Para o dia típico de inverno, a janela do quarto ou da sala deve estar voltada para o sul, e a outra face, se possível, ao leste. A taxa de ventilação deve ser constante e igual a 1 renovação de ar por hora. A absorvância da cobertura deve ser de acordo com o material adotado. Já para as paredes, caso a cor exterior não esteja definida, devem-se usar valores para as absorvâncias de 0,3, 0,5 e 0,7.

Os critérios para a classificação dos níveis de desempenho se dão em função da diferença entre a temperatura mínima do ar na sala e nos quartos e a temperatura mínima do ar no exterior, para o inverno, ou tomando-se como referência a temperatura máxima, para o verão (Quadros 3 e 4).

Caso o edifício não atinja o desempenho mínimo para o verão, é possível refazer as simulações, considerando uma das opções abaixo:

- (a) adoção de proteção solar interna ou externa que reduza ao menos 50% da radiação solar direta;
- (b) adoção de uma taxa de ventilação igual a 5 renovações de ar por hora; ou
- (c) combinação das duas opções acima.

Quadro 3- Critério de avaliação de desempenho térmico para as condições de verão, de acordo com o método de simulação da ABNT NBR 15575
Fonte: adaptada de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013)

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
Insuficiente	$T_{i,max} > T_{e,max}$	$T_{i,max} > T_{e,max}$
Mínimo	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
Intermediário	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ} \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^{\circ} \text{C})$
Superior	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ} \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ} \text{C})$
$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação ($^{\circ}\text{C}$) $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação ($^{\circ}\text{C}$)		

Quadro 4- Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno, de acordo com o método de simulação da ABNT NBR 15575

Fonte: adaptada de ABNT (2013)

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
Insuficiente	$T_{i,min} < (T_{e,min} + 3^{\circ} \text{ C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado.
Mínimo	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ} \text{ C})$	
Intermediário	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^{\circ} \text{ C})$	
Superior	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^{\circ} \text{ C})$	
$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação (°C)		
$T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação (°C)		

3.4 Análise do procedimento simplificado

A análise do procedimento simplificado da ABNT NBR 15575, descrita em Marques (2013), Marques e Chvatal (2013) e Chvatal (2014), consistiu na principal contribuição do Projeto FINEP/INOVATEC.

O estudo de Marques (2013) apontou que as exigências do procedimento simplificado (áreas mínimas de ventilação, Quadro 1, e propriedades termofísicas da envolvente, Quadro 2) não estão de acordo com o que é requisitado para esses mesmos parâmetros, por uma Norma já existente, a ABNT NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). Essa foi a primeira norma que tratou do desempenho de habitações no Brasil, embora se restrinja às habitações unifamiliares de interesse social, e não tenha exercido o mesmo impacto no setor da construção civil, como a ABNT NBR 15575.

Ainda quanto às áreas mínimas de ventilação (prescritas Quadro 1), pontua-se a também a inadequação desse tipo de exigência em garantir a eficiência da ventilação natural, dado que esta é função também de outros fatores (frequência, velocidade e direção predominante do vento, posicionamento das aberturas, porosidade das partições internas, entre outros) (CHVATAL; RORIZ, 2015).

Já quanto às exigências das paredes externas e coberturas, a sua avaliação é mais bem explorada em Marques (2013), Marques e Chvatal (2013) e Chvatal (2014).

O método consistiu na avaliação do desempenho térmico de habitações de interesse social com variados valores das propriedades termofísicas indicadas no Quadro 2 para as paredes externas e a cobertura. Dessa forma, foi possível verificar se os níveis de desempenho obtidos de acordo com o procedimento simplificado eram refletidos também no de simulação. O procedimento de simulação utilizou o programa *EnergyPlus* e os *dias típicos de projeto*, conforme exigido pela Norma. Adicionalmente, também foi feita a simulação anual. Os primeiros trabalhos (MARQUES; CHVATAL, 2013 e MARQUES, 2013) consideraram o clima de São Carlos (zona bioclimática 4), enquanto o terceiro (CHVATAL, 2014), três zonas distintas, representando os climas mais quentes (Manaus, zona 8), mais frios (Curitiba, zona 1) e intermediários (São Paulo, zona 3) do Brasil.

O principal resultado desses trabalhos é a verificação de incongruência entre os procedimentos simplificado e de simulação da Norma. Considera-se que procedimentos simplificados são previstos em regulamentações para facilitar a análise de edifícios menores, menos complexos e com características mais padronizadas, reservando-se a análise computacional para construções mais elaboradas. No entanto, deve haver coerência entre ambos os métodos, de modo que:

- o nível de desempenho obtido via simulação seja igual ou superior ao obtido de forma simplificada;
- o impacto de alterações nas propriedades termofísicas da envolvente (transmitância e capacidade térmicas e absorvância), que são os parâmetros responsáveis pela classificação do nível de desempenho no procedimento simplificado (Quadro 2), seja de certa forma refletido no nível de desempenho por meio de simulação.

No entanto, foram identificados casos nos quais o nível de desempenho obtido por simulação era abaixo do mínimo, enquanto que, no método simplificado, este era atendido. Essa incongruência ocorreu porque se notou grandes discrepâncias entre os resultados de ambos os procedimentos, em função de mudanças na transmitância térmica e na absorvância (nos testes efetuados, a capacidade térmica constante não apresentou uma influência tão significativa quanto esses dois parâmetros).

As Figuras 11 e 12 ilustram o tipo de resultado encontrado. Esse tipo de resultado foi observado para todos os climas. Cada ponto dos gráficos representa a temperatura máxima (ou mínima) do ar na sala da habitação, no dia típico de verão (ou inverno), em São Paulo/SP, com uma distinta combinação de transmitância térmica (U) e absorptância (α) da cobertura. A capacidade térmica é mantida constante. Como os níveis de desempenho via simulação são estabelecidos em função da diferença entre as temperaturas máxima (ou mínima) interior e exterior, no gráfico são delimitadas áreas coloridas correspondentes a cada um deles (desempenhos mínimo, intermediário, superior e insuficiente). Também o nível de desempenho da cobertura, para cada combinação de U e α , de acordo com o procedimento simplificado, é indicado pelas abreviações (NA: não atende, M: mínimo, I: intermediário e S: superior). Nota-se a variabilidade do nível de desempenho obtido via simulação, em função da combinação de U e α (Figuras 11 e 12). No verão, vê-se também como absorptâncias menores permitem valores de U bastante elevados (Figura 11). Além disso, os níveis de desempenho pelo procedimento de simulação, em cada ponto, para o inverno e o verão, diferem bastante entre si. Essa influência tão significativa da absorptância no verão, e os diferentes comportamentos para o verão e para o inverno não são refletidos na avaliação pelo procedimento simplificado (Quadro 2), que impede qualquer cobertura com U maior que $2,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Isso gera avaliações equivocadas, que contribuem para a continuidade da crença, no setor da construção civil, de que envoltentes com menor U apresentam sempre melhor desempenho. Ressalta-se que o mesmo efeito foi notado para as simulações anuais, considerando-se ganhos internos e taxa de renovação de ar devido à ventilação.

nível de desempenho pelo procedimento simplificado

NA: não atende / M:mínimo / I: intermediário / S: superior

nível de desempenho pelo procedimento de simulação

$$U_{\text{par exterior}} = 2,11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \text{ e } \alpha_{\text{par exterior}} = 0,9$$

Figura 11 – Temperatura máxima do ar na sala da habitação, para o dia típico de verão

Fonte: adaptada de (CHVATAL, 2014)

nível de desempenho pelo procedimento simplificado

NA: não atende / M: mínimo / I: intermediário / S: superior

nível de desempenho pelo procedimento de simulação

$$U_{\text{par exterior}} = 2,11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \text{ e } \alpha_{\text{par exterior}} = 0,9$$

Figura 12 – Temperatura mínima do ar no quarto 2 da habitação, para o dia típico de inverno

Fonte: adaptada de (CHVATAL, 2014)

Resultados similares referentes à influência da transmitância e da absorptância foram também observados nos trabalhos em andamento na época, referentes ao projeto FAPESP citado no início deste Capítulo (RORIZ; CHVATAL; CAVALCANTI, 2009; CHVATAL, 2010; CHVATAL; ROSSI, 2011; para edificações comerciais). Esses resultados haviam sido corroborados, na época, por outras pesquisas, que também estudaram a influência desses parâmetros tanto no Brasil quanto em outros climas (MASOSO; GROBLER, 2008; MELO; LAMBERTS, 2008; CARLO; LAMBERTS, 2008), incluindo a pesquisa que havia sido conduzida no Doutorado, para países do sul europeu (CHVATAL, CORVACHO, 2009).

Finalmente, discute-se também a falta de representatividade desse procedimento ao não considerar outros elementos do edifício que influenciam no seu desempenho, como a área envidraçada. Isso também pode levar à interpretação equivocada de que o desempenho de uma habitação é resultado somente do seu sistema construtivo.

3.5 Análise do procedimento de simulação

Congrega-se nesta seção as críticas que fizemos a esse procedimento, presentes em Marques e Chvatal (2013) e Chvatal (2014), além do indicado por outros autores, apresentado em Chvatal e Roriz (2015):

- a análise através do dia típico de projeto apresenta uma série de limitações. Os dados da Norma são incompletos e não há uma metodologia estabelecida para a sua definição. Há arquivos climáticos disponíveis para uma série de cidades brasileiras para a análise anual (RORIZ, 2012), além do que assim é possível a consideração da duração dos períodos de verão e de inverno, de forma a equilibrar as exigências para ambas as estações.
- Os critérios para as orientações mais desfavoráveis não necessariamente implicam nas situações com pior desempenho térmico, conforme indicam Sorgato et al. (2012), ao apresentarem o exemplo de Florianópolis, onde a orientação leste é mais crítica que a oeste, devido ao maior índice de nebulosidade do céu, à tarde.
- A habitação é simulada em condições que não representam a sua realidade de uso: sem ganhos internos e taxa de infiltração de apenas uma renovação de ar por hora

Sorgato, Melo e Lamberts (2013). Não é permitida a adoção de outras formas de modelagem da ventilação natural mais complexas (modelos de rede, como o módulo *Airflow Network*, do *EnergyPlus*, ou programas CFD, *Computational Fluid Dynamics*).

- A Norma indica que a simulação deve ser feita para absorvâncias correspondentes às cores clara (0,3), média (0,5) e escura (0,7). Estudos mostram que em alguns casos essa percepção pode ser enganosa, pois uma cor tida como escura pode absorver menos radiação que outra superfície com cor mais clara (DORNELLES, 2008; RORIZ; CARAM; RORIZ, 2011). O correto seria o uso apenas do termo “absortância”.
- Há muitas incertezas na modelagem, sendo a temperatura do solo um dos parâmetros de grande influência, especialmente em habitações térreas.
- O método não permite a incorporação de estratégias de condicionamento passivo.
- As alterações propostas na simulação para que o desempenho mínimo seja atingido (no sombreamento e nas taxas de renovação de ar) não representam, necessariamente, alterações no projeto da edificação.
- Esse procedimento não tem relação com o método proposto pelo Regulamento RTQ-R (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012), que trata da eficiência energética de habitações, nem com a Norma ABNT NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), que trata do desempenho térmico de habitações de interesse social.

3.6 Considerações finais

A ABNT NBR 15575 é uma importante Norma que surgiu nos últimos anos, no cenário da construção civil no Brasil. As pesquisas apresentadas nesta seção identificam necessidades específicas para o aprimoramento de seus métodos de cálculo, de modo que eles reflitam o atual estado da arte.

De forma geral, o que se observou é que há incongruências entre o nível de desempenho obtido pelos procedimentos simplificado e de simulação. Os limites do procedimento simplificado não representam o impacto das propriedades termofísicas da envolvente de forma integrada, levando ao falso entendimento de que quanto menor o U da

envolvente, melhor o desempenho. Além disso, ele avalia o desempenho total do edifício se atendo somente às paredes e à cobertura, enquanto há outros parâmetros que o influenciam. Quanto ao procedimento de simulação, este deve possibilitar o equilíbrio entre as exigências de verão e inverno, e permitir a construção de um modelo computacional que represente de forma mais adequada a habitação a ser analisada, incentivando a adoção de soluções que contribuam efetivamente para a melhora do desempenho (aspectos a serem aprimorados: consideração da ventilação natural, dos ganhos internos, das trocas com o solo e de estratégias passivas).

4 ELABORAÇÃO DE METAMODELOS PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES

Este Capítulo congrega três Mestrados, desenvolvidos entre os anos de 2013 a 2015, que contribuíram para a elaboração de metamodelos que permitem a análise do conforto térmico de uma determinada habitação de interesse social naturalmente ventilada. Estas pesquisas foram desenvolvidas em colaboração com um grupo de professores da North Carolina State University (NCSU/EUA), que tem interesse na aplicação de métodos estatísticos em variados contextos, incluindo o desempenho termoenergético de edificações.

4.1 Orientações, supervisões e produção

Orientações

4. Ana Paula Favretto. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of opaque envelope*. Mestrado. 2013-2016.
5. Camila Anchieta. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of solar incidence and shading devices*. Mestrado. 2013-2016.
6. Michele Rossi. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation*. Mestrado. 2013-2016.

Artigos de congressos, periódicos ou capítulos de livros

**** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, no Apêndice C.**

FAVRETTO, A. P. O. et al. Assessing the impact of zoning on the thermal comfort analysis of a naturally ventilated house during early design. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 14., 2015, Hyderabad, India. *Proceedings...*Hyderabad, India: IBPSA, 2015.

Dissertações, relatórios e manuais

*** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, na página <http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/professora-karin/>*

ANCHIETA, C. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of solar incidence and shading devices*. 2016. 156 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

FAVRETTO, A. P. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of opaque envelope*. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

ROSSI, M. M. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation*. 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

4.2 Contextualização

Com o encerramento da participação no projeto FINEP/INOVATEC, apresentada no Capítulo anterior, identificou-se a necessidade de desenvolvimento de métodos simplificados mais adequados para a avaliação do desempenho térmico de habitações. Esta pesquisa, que congrega os trabalhos de Favretto (2016), Rossi (2016) e Anchieta (2016), se enquadra nesse contexto, pois trata da criação de modelos simplificados de análise do desempenho térmico, obtidos por meio de análise estatística de regressão.

No entanto, a proposta não foi criar modelos que pudessem ser diretamente incorporados à ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Optou-se por abordar o assunto de uma forma genérica, com o foco em habitações naturalmente ventiladas, e na elaboração dos modelos simplificados para apoio nas fases de concepção de projeto. Essa etapa é essencial para garantir boas condições térmicas internas

e carece de ferramentas que auxiliem nesse processo. Essa opção era mais adequada às limitações da pesquisa, no momento (possibilidade de orientação somente de Mestrados e primeiro trabalho em colaboração com o grupo de professores da NCSU/EUA). Além disso, a experiência com o desenvolvimento desses modelos seria útil para qualquer tipo de situação na qual métodos desse tipo fossem desenvolvidos.

4.3 Introdução

Os programas de simulação dinâmica computacional se constituem em excelentes ferramentas de análise do desempenho termoenergético de edificações. Eles são utilizados principalmente nas fases finais de projeto, quando o edifício já está definido, para avaliar o atendimento a certas exigências de regulamentos ou certificações (HOBBS et al., 2003; MORBITZER, 2003; HENSEN et al., 2004; RIZOS, 2007; STRUCK; HENSEN; KOTEK, 2009; HYGH et al., 2012). No entanto, é nas etapas iniciais de concepção projetual que ferramentas desse tipo trariam um maior benefício, devido à maior flexibilidade para se explorar variadas alternativas, as quais por sua vez possuem um maior impacto no desempenho final. A dificuldade de utilização desses programas nessa fase se deve à necessidade de tempo e de conhecimento especializado para a inserção dos dados e análise dos resultados, o que acaba por não ser viável no processo de concepção (WESTPHAL, 2007).

Para a solução dessa questão, encontram-se na literatura algumas alternativas, como por exemplo propostas de interfaces simplificadas de simulação e modelos (equações) simplificados baseados em análises estatísticas de regressão (HYGH, 2011). Westphal e Lamberts (2007) consideram que equações obtidas por meio dessas análises de regressão (geralmente obtidas por meio de uma grande quantidade de simulações computacionais paramétricas) podem ser úteis no processo de decisão de projeto, em suas fases iniciais. Na literatura encontra-se uma série de trabalhos desse tipo, que indicam os benefícios dessas equações em predizer de forma confiável e ao mesmo tempo simplificada e rápida, o desempenho dos edifícios (LAMBERTS, 2001; SIGNOR; WESTPHAL; LAMBERTS, 2001; CARLO; LAMBERTS, 2008; CATALINA; VIRGONE; BLANCO, 2008; LAM et al., 2010; EISENHOWER et al., 2012; HYGH et al., 2012; WU; SUN, 2012; KOROLIJA et al., 2013; CATALINA; IORDACHE; CARACALEANU, 2013). Destaca-se que os Regulamentos Nacionais de Eficiência Energética,

tanto para habitações (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012) quanto para edificações comerciais (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2010), desenvolveram esse tipo de modelo para obtenção de seus métodos simplificados de análise. O diferencial da pesquisa em questão é o fato dela tratar de habitações naturalmente ventiladas, sem nenhum tipo de condicionamento artificial, o que implicou em algumas diferenças no desenvolvimento dessas equações, em relação à maior parte dos trabalhos anteriores.

4.4 Método

O método baseou-se em um estudo anterior conduzido pela equipe da NCSU (HYGH et al., 2012), voltado para edificações comerciais artificialmente condicionadas, em climas dos EUA. A ideia geral é a condução de uma grande quantidade de simulações computacionais paramétricas de habitações naturalmente ventiladas, por meio de um programa de simulação dinâmica de avaliação do desempenho térmico (no caso desta pesquisa, o *EnergyPlus* (ESTADOS UNIDOS, 2014)). As variações paramétricas devem contemplar todos os parâmetros que influenciam no desempenho térmico desse tipo de edificação e que são definidos durante a fase inicial de concepção do projeto. Por meio dos resultados dessas simulações e de seus dados de entrada, são aplicados métodos estatísticos que efetuam análises de regressão, de modo a correlacionar o desempenho térmico do edifício, mensurado através de um determinado índice, com os parâmetros variados. As equações resultantes das análises de regressão permitem, então, prever o desempenho térmico do edifício, sem a necessidade de novas simulações.

De forma mais detalhada, o método foi constituído por 3 etapas.

- Definição das variações paramétricas. Nesta etapa foram definidas as características dos edifícios e os parâmetros que foram alterados nas simulações, bem como a sua faixa de variação.

- Simulações paramétricas.
- Regressão multivariada. Compreendeu a aplicação de métodos estatísticos para a obtenção das equações para a previsão do desempenho térmico de edificações similares às simuladas, além da validação dessas equações.

Na sequência é apresentada a síntese de cada uma dessas etapas.

4.4.1 Definição das variações paramétricas

Nesta etapa é que as principais limitações do trabalho foram definidas, pois, quanto mais parâmetros fossem variados nas habitações simuladas, mais complexo seria o posterior desenvolvimento das equações. Procurou-se estabelecer um equilíbrio entre o tempo disponível para a conclusão dos Mestrados, o diferencial frente à literatura existente e os principais parâmetros a serem considerados, de modo que fossem selecionados aqueles que tivessem maior impacto no desempenho térmico de habitações naturalmente ventiladas. Além disso, devido à inerente complexidade e às incertezas das simulações, era necessário definir como os edifícios seriam modelados no *EnergyPlus* (EP), incluindo os parâmetros que permaneceriam fixos. Para tal, cada Mestrado se concentrou em uma categoria de dados de entrada. Favretto (2016), tratou das propriedades termofísicas dos fechamentos opacos, Rossi (2016), dos dados de entrada relativos à ventilação natural e Anchieta (2016), dos dados de entrada relativos às proteções solares.

Sendo assim, o trabalho concentrou-se em uma determinada habitação de interesse social térrea e isolada (sem geminação) e definiu-se que esta geometria permaneceria fixa, variando-se nas simulações apenas a dimensão das janelas dos ambientes de maior permanência (sala e quartos). A residência estudada representa as características desse tipo habitação no Brasil (Figura 13). Ela foi criada por meio de uma coleta de projetos em vários estados, onde foram classificadas várias de suas características (área total, proporção comprimento/largura da planta baixa, quantidade de ambientes, área de janelas, existência ou não de proteções solares, seu tipo e dimensões, entre outros). A partir dessa geometria, alterou-se a sua área de superfície envidraçada¹, área efetiva de abertura para ventilação¹,

¹ Somente para os ambientes de maior permanência (sala e quartos).

orientação em relação ao norte, clima, transmitância e capacidade térmicas (U e CT) das paredes externas, internas e da cobertura, absorptância das superfícies exteriores do telhado e das paredes e o tipo (horizontal ou vertical) e as dimensões dos dispositivos de proteção solar das janelas. Essas alterações corresponderam a 24 parâmetros, identificados como os parâmetros-chave, manipulados durante a fase de concepção, e que configuram o desempenho térmico da edificação. A faixa de variação de cada parâmetro compreendeu valores mínimos e máximos que ultrapassavam os limites usualmente adotados nesses habitações. Com relação à variação do clima, foram escolhidas as cidades de Curitiba, São Paulo e Manaus (representantes das zonas bioclimáticas mais fria, mais quente e intermediária). Os ganhos internos permaneceram fixos, ([retirados] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012), bem como o tipo de vidro (incolor, de 4 mm). A ventilação natural foi simulada por meio do Módulo *Airflow Network*, considerando-se os coeficientes de pressão médios fornecidos pelo programa (geometria retangular), e a abertura das janelas das 7:00 às 22:00 horas, durante todo o ano, caso a temperatura interior fosse maior que a exterior e também maior que a temperatura de conforto (estabelecida pelo método adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013)).

Figura 13 – Planta baixa e corte da habitação simulada

Fonte: Adaptada de Favretto (2016).

Ressaltam-se aqui alguns testes desenvolvidos com o objetivo de simplificar os modelos computacionais a serem simulados, de modo a agilizar o processo de simulação paramétrica sem prejudicar a confiabilidade dos resultados.

O **primeiro teste** consistiu na redução da quantidade de zonas térmicas da habitação, de cinco (cada ambiente correspondendo a uma zona térmica) para duas (sala-cozinha, banheiro e quartos reunidos em uma única zona, mais o ático) (FAVRETTO et al., 2015). A habitação em questão foi simulada em quadro climas (incluindo-se os três escolhidos para esta pesquisa), alterando-se a sua orientação em relação ao norte, e com as duas opções de modelagem para as zonas térmicas. Foram comparadas a temperatura interna do ar e a operativa, bem como os graus-hora de desconforto por frio e por calor² obtidos pelas duas formas de modelagem, sendo a diferença entre ambas considerada pequena. Isso possibilitou o uso do modelo com uma quantidade menor de zonas nas simulações desta pesquisa.

O **segundo teste**, efetuado no Mestrado que tratou da envolvente opaca (FAVRETTO, 2016), propôs a inserção de materiais e construções denominados de “virtuais” no EP, ou seja, que não representam nenhum material real. Eles foram especialmente criados para facilitar a alteração de forma independente da transmitância, U, e da capacidade térmica, CT (tanto das paredes quanto da cobertura). Essa proposta foi validada através de quatro séries de simulações da habitação escolhida, cada uma delas nos três climas de estudo, onde se comparou os resultados utilizando-se a modelagem com os materiais e construções virtuais, com os utilizando materiais reais com o mesmo valor de U e CT, considerando toda a faixa de variação prevista na pesquisa para essas propriedades. No primeiro teste (Figura 14), piso e cobertura permaneceram adiabáticos, e a troca de calor ocorreu através das paredes, apenas. No segundo teste, foram as paredes que permaneceram adiabáticas, ao invés da cobertura. No terceiro teste, apenas o piso, e no quarto, as simulações foram conduzidas da mesma forma que seriam nas simulações paramétricas da pesquisa. Os resultados indicaram o baixo erro encontrado (Figura 15, exemplo de São Paulo), possibilitando a adoção dessa proposta nas simulações.

² Graus-hora de desconforto por frio e por calor totais anuais calculados em função dos limites superior e inferior de conforto estabelecidos pela abordagem adaptativa descrita na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), correspondentes a 80% dos usuários satisfeitos com as condições térmicas do ambiente.

Figura 14: Testes efetuados para análise dos materiais e construções virtuais
Fonte: Favretto (2016).

Figura 15 –Comparação entre os resultados da simulação com uso dos materiais e construções virtuais e reais, para São Paulo.
Fonte: adaptada de Favretto (2016).

4.4.2 Simulações paramétricas

As simulações paramétricas foram conduzidas por meio do Método de Monte Carlo (HELTON, 1993, SALTELLI, 2001). Esse método permitiu a criação aleatória de variadas

combinações dos 24 parâmetros alterados, de modo que estas tivessem representatividade estatística. O processo de criação de um código para a aplicação do método e da rodagem das simulações de forma automática foi feito pela equipe da NCSU, com apoio da equipe brasileira para a identificação da forma de descrição dos dados a serem alterados no arquivo de entrada padrão do EP (formato *idf*).

Finalmente, após uma série de testes para a confirmação do correto funcionamento do processo de simulação automática, foram efetuadas 30000 simulações no total (10000 para cada clima), utilizando-se um cluster disponível na NCSU. Os dados de entrada de cada combinação (valores assumidos para cada um dos 24 parâmetros) foram organizados em um arquivo no formato CSV, para cada clima (cada linha correspondente a uma simulação). O mesmo foi feito para os seus graus-hora de desconforto por calor e por frio totais anuais³.

4.4.3 Regressão multivariada

Uma parte dos resultados (60%) foi utilizada para a elaboração das equações de regressão, enquanto a restante (40%) foi empregada na sua validação. Essa parte do trabalho também contou com o auxílio da equipe da NCSU.

Os modelos de regressão também foram denominados de “metamodelos”, de acordo com o encontrado na literatura para estudos semelhantes. O programa utilizado para a sua elaboração foi Matlab® (MATHWORKS, 2013). Os 24 parâmetros de entrada constituíram as variáveis “X” e os graus-hora de desconforto por calor e por frio, as variáveis “Y”. Para cada clima, foram elaborados dois metamodelos, para prever o desempenho devido ao calor e ao frio (y = graus-hora de desconforto por calor e por frio totais anuais, respectivamente). Utilizou-se a regressão do tipo *stepwise*, além de vários ajustes para se obter os resultados mais acurados: adição de termos cruzados, inversos e quadráticos, através de vários testes para se obter as melhores combinações, e adição de um limite (*floor*), para evitar valores negativos.

³ Graus-hora de desconforto por frio e por calor totais anuais calculados em função dos limites superior e inferior de conforto estabelecidos pela abordagem adaptativa descrita na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), correspondentes a 80% dos usuários satisfeitos com as condições térmicas do ambiente.

As equações de regressão foram validadas para os casos restantes (40%), para os quais foram também aplicados os metamodelos, utilizando-se os dados de entrada dos 24 parâmetros. Os resultados foram comparados obtendo-se o seu coeficiente de determinação (R^2) que, quanto mais próximo for de 1, representa o menor erro.

Finalmente, houve a aplicação dos metamodelos em alguns casos que não haviam sido simulados, considerando-se variações paramétricas em alguns de seus dados de entrada, a fim de verificar a sua sensibilidade frente a determinadas alterações. A intenção novamente foi verificar a confiabilidade dos metamodelos criados em efetuar análises rápidas de edificações, e identificar aspectos que necessitam de melhoria.

4.5 Resultados

4.5.1 Metamodelos

Os resultados apresentam, de forma geral, uma boa concordância entre os graus-hora de desconforto por calor e por frio, previstos pelos metamodelos criados e as simulações, representada pelo coeficiente de determinação (R^2) (Figura 16). Exceção se faz aos graus-hora de desconforto por calor em São Paulo e Curitiba, que apresentaram coeficientes de determinação menores. Esses metamodelos demandam um aperfeiçoamento futuro, que contemple uma análise de sensibilidade dos atuais parâmetros, e a possível inclusão de novos parâmetros de entrada que influenciam no desconforto por calor.

Figura 16– Validação dos modelos de regressão que predizem o desconforto por calor e por frio nas três cidades estudadas.

Fonte: Rossi (2016).

4.5.2 Aplicação dos metamodelos

Cada pesquisa de Mestrado explorou a sensibilidade dos metamodelos frente a alguns dos parâmetros de entrada relacionados ao seu assunto de enfoque: propriedades termofísicas da envolvente (FAVRETTO, 2016), ventilação natural (ROSSI, 2016) ou dispositivos de proteção solar (ANCHIETA, 2016). Em geral, as equações foram capazes de prever o comportamento das edificações conforme o esperado. Com relação à envolvente opaca, para as três cidades, o impacto de alterações no U , CT e α , tanto para o desconforto por frio, quanto por calor, foi o mesmo observado na pesquisa citada no Capítulo anterior, que avaliou o procedimento simplificado da ABNT NBR 15575 (CHVATAL, 2014). Com relação à ventilação natural e às proteções solares, as maiores incongruências foram observadas para as cidades de São Paulo e Curitiba. Para a ventilação natural, a principal incongruência encontrada foi o aumento do desconforto por calor, somente em São Paulo, devido ao acréscimo da área de abertura para ventilação (de 50 para 100% da área da janela). Quanto às proteções solares, tanto o desconforto por frio, quanto o por calor, apresentaram uma influência mais baixa do que a esperada em função da adição de dispositivos de proteção solar, em São Paulo e Curitiba. Essas incoerências podem ser resultado tanto da insuficiência das equações em prever o desempenho do edifício de forma adequada, devido ao baixo coeficiente de determinação (R^2), quanto de uma insensibilidade do metamodelo ao parâmetro em questão.

4.6 Considerações finais

Considera-se a pesquisa um importante passo na criação de metamodelos obtidos por análise de regressão em habitações naturalmente ventiladas, tendo em vista os poucos estudos com enfoque nesse tipo de edificação, na literatura. Obteve-se um coeficiente de determinação R^2 próximo de 1 (um) para os metamodelos que preveem o desconforto por calor na cidade de Manaus e o desconforto por frio em São Paulo e Curitiba. Já os resultados para o desconforto por calor nessas duas últimas cidades indicam a necessidade de aperfeiçoamento das equações, possivelmente com a inclusão de novos parâmetros de entrada ou a alteração dos existentes, de modo que eles representem de forma mais significativa o desempenho da edificação. Estudos mais recentes (VERSAGE, 2015, MELO et

al., 2016) também indicam que outros métodos alternativos à regressão linear múltipla, como as redes neurais artificiais, podem implicar em um menor erro.

5 CONTRIBUIÇÕES PARA A MODELAGEM DE EDIFICAÇÕES EM PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO

Os trabalhos que conduzi, apresentados neste Capítulo, estão quase todos vinculados a Mestrados encerrados em 2017. Todos eles trazem contribuições para o aperfeiçoamento da modelagem de edificações em programas de simulação computacional, sendo que a maioria se refere a habitações. Este é um assunto que também se relaciona a alguns Doutorados em andamento. Todas essas pesquisas estão congregadas em um projeto para o qual está se preparando a resubmissão à FAPESP (Auxílio à Pesquisa Individual), devido ao indeferimento na primeira tentativa. Os colaboradores externos dos trabalhos aqui apresentados são o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP), no qual foram realizados os ensaios no Túnel de Vento, e a equipe de professores da North Carolina State University (NCSU/EUA), mencionada no Capítulo anterior.

5.1 Orientações, supervisões e produção

Orientações

7. Tássia Marques. *Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP*. Mestrado. 2011-2013.
8. Hector Fabian Marin Castaño. *Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea*. Mestrado. 2015-2017.
9. María del Pilar Casatejada Gil. *Simplificações na modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico EnergyPlus..* Mestrado. 2015-2017.
10. Vanessa Aparecida Caieiro da Costa. *Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab*. Mestrado. 2015-2017.

Artigos de congressos, periódicos ou capítulos de livros

*** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, no Apêndice D.*

CASATEJADA, M. P.; CHVATAL, K. M. S. ; RANJITHAN, R. Assessing the impact of zoning on the thermal comfort analysis of a naturally ventilated house during early design considering closed internal doorse. In: PLEA INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 33., 2017, Edimburgo. *Proceedings...* Edimburgo: PLEA, 2017. v.1.

Disponível

em:

<http://nceub.org.uk/PLEA2017/proceedings/PLEA2017_proceedings_volume_I.pdf>.

Acesso em: 24 ago. 2017.

CASATEJADA, M. P.; CHVATAL, K. M. S. Comparação entre os horários habituais e recomendados de abertura tanto de janelas quanto de portas internas em habitações brasileiras. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 14., 2017, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú: ANTAC, 2017.

CHVATAL, K. M. S.; MARQUES, T. H. T. Avaliação de diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social no Programa de simulação de desempenho térmico Energyplus. *Revista Tecnológica*, Maringá, v. 25, n.1, p. 67-79, 2016. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/28690/17130>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

COSTA, V. C.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade heat transfer in Energyplus simulation program. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 117-135, Jul. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000300117&lng=en&nrm=iso>. Access em: 22 ago. 2017.

MARÍN, H. F.; CASATEJADA, M. P.; CHVATAL, K. M. S. Impacto da temperatura de controle na operação das janelas e no conforto térmico para uma habitação de interesse social naturalmente ventilada em São Carlos – SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2016.

Dissertações, relatórios e manuais

**** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, na página**
<http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/professora-karin/>

CASATEJADA, M. P. *Simplificações na modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico EnergyPlus*. 2017. 142 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

COSTA, V. A. C. C. . *Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab*. 2017. 172 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017

COSTA, V.; CHVATAL, K. *Manual do Slab. Versão 1* . 2017. Disponível em <<http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/professora-karin/>>. Acesso em 28 set. 2017.

MARÍN CASTAÑO, H. F. *Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea*. 2017. 178 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

5.2 Introdução

Nos últimos anos tem havido um crescente aprimoramento dos programas de simulação computacional do desempenho termoenergético de edificações, que são cada vez mais utilizados não somente no ambiente acadêmico, mas também profissional. Essas ferramentas permitem a avaliação de alternativas de projeto desde a etapa de concepção, trazendo ganhos econômicos, de eficiência energética e de desempenho térmico (MORBITZER, 2003; HENSEN et al., 2004; WESTPHAL, 2007; STRUCK; HENSEN, 2007; SCHLUETER; THESELING, 2009; HYGH et al., 2012).

A Norma ABNT NBR 15575, Edificações habitacionais – Desempenho (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), assim como os regulamentos brasileiros –

Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, o RTQ-C (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2009) e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, o RTQ-R (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012) –, indicam o método de simulação como forma de avaliar o desempenho e a eficiência energética de edificações, respectivamente.

Esses programas de simulação são baseados em algoritmos de cálculo complexos, que consideram todos os fluxos de calor que ocorrem no edifício. Apresentam grande quantidade de dados de entrada, os quais se referem ao modelo que representa o edifício real. Esse processo é passível de uma série de incertezas, e muitos estudos indicam que isso pode alterar significativamente a avaliação final do projeto (LOMAS; EPPEL, 1992; WIT; AUGENBROE, 2002; MACDONALD, 2002; WIT, 2004; BATISTA; LAMBERTS; GUTHS, 2011; SILVA et al., 2014).

É evidente, portanto, a necessidade de estudos que contribuam para a correta modelagem de edificações nesses programas, reduzindo as incertezas atreladas a esse processo e aos seus resultados. A experiência com a construção dos metamodelos apresentada no Capítulo anterior também identificou a necessidade de aperfeiçoamento do processo de simulação e da construção dos arquivos de entrada, motivando as pesquisas que tratassem desse tema.

Os trabalhos relatados na sequência utilizaram o *EnergyPlus* (EP) (ESTADOS UNIDOS, 2016a) .

5.3 Comparações entre diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social

Esta seção engloba três trabalhos (CHVATAL; MARQUES, 2016, CASATEJADA; CHVATAL; RANJITHAN, 2017; CASATEJADA, 2017) que tratam de comparações entre diversas alternativas de modelagem de habitações de interesse social em programas de simulação.

No primeiro trabalho (CHVATAL; MARQUES, 2016) verificou-se a diferença no desempenho térmico simulado entre alternativas de modelagem para as quais habitualmente surgem dúvidas durante o processo de elaboração do arquivo de entrada, quando se avalia habitações. O estudo foi conduzido em São Carlos/SP, para duas tipologias, obtidas junto a dois importantes agentes promotores habitacionais, Caixa Econômica Federal (CEF) e Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) : uma habitação uni familiar térrea isolada e uma multifamiliar, situada em um pavimento intermediário de um edifício. Obtiveram-se os seguintes resultados, com relação aos aspectos analisados.

- Consideração dos caixilhos. A diferença nos graus-hora de desconforto (por calor ou por frio), para as duas tipologias, entre as opções com ou sem o caixilho não são maiores que 5%. Vê-se que esse detalhamento na inserção dos dados não seria necessário, a não ser que a diferença observada nos graus-hora⁴ fosse relevante para o caso em estudo.
- Consideração dos beirais e da veneziana. Foram identificadas diferenças maiores que 5% nos graus-hora de calor¹, ao não se considerar os beirais como superfícies de sombreamento (máximo de +9,2%, para a casa térrea) ou devido à ausência da veneziana (+21,2%, na residência multifamiliar). Já quando houve supressão de ambos no arquivo de entrada, chegou-se a uma diferença de +22,9% (para o edifício multipavimentos). O mesmo raciocínio feito para os caixilhos poderia ser considerado para os beirais e a veneziana, com a tendência de inserção desses elementos na geometria, pelas maiores diferenças encontradas.

⁴ Graus-hora de desconforto por frio e por calor totais anuais calculados em função dos limites superior e inferior de conforto estabelecidos pela abordagem adaptativa descrita na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), correspondentes a 80% dos usuários satisfeitos com as condições térmicas do ambiente.

- Uso das medidas das superfícies considerando as faces internas ou externas dos elementos (paredes, lajes, etc). A diferença entre ambas as opções é em torno de 5%, para as duas tipologias. Como não se sabe qual seria a mais correta, uma sugestão seria adoção das medidas dos eixos (intermediárias).
- Temperatura do solo. Aspecto avaliado somente para a habitação em contato com o solo. Notou-se grande diferença entre as duas alternativas de modelagem estudadas: temperatura do solo igual à temperatura média mensal externa, ou o seu cálculo através do pré-processador *Slab*. O maior impacto foi sentido nos graus-hora totais anuais de desconforto por calor¹ na sala, que aumentou em 38,3% ao se utilizar o *Slab*. Neste caso, apenas estudos com medições reais indicariam a alternativa mais adequada. Outros estudos também indicaram a relevância desse parâmetro (BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011; LARSEN, 2011; ANDOLSUN et al., 2012;), além do próprio Manual do EP (LBNL, 2012).

Essas informações fornecem ao especialista uma ideia mais precisa do impacto que certas opções relativas à modelagem apresentam, nas condições estudadas, permitindo-o tomar decisões mais bem fundamentadas.

O segundo (CASATEJADA; CHVATAL; RANJITHAN, 2017) e o terceiro estudos (CASATEJADA, 2017) são uma continuação do teste de redução da quantidade de zonas térmicas de uma habitação, apresentado no Capítulo 4 (FAVRETTO et al., 2015), que permitiu a simplificação das simulações paramétricas para a elaboração dos metamodelos. Estes trabalhos também foram conduzidos em conjunto com a equipe da NCSU. O objetivo foi ampliar a pesquisa, de modo que mais geometrias e formas de uso da habitação fossem estudadas. O foco foi verificar se esse tipo de simplificação poderia ser útil nas fases iniciais do projeto, quando se necessita de agilidade no processo de análise.

- Estudo 2 (CASATEJADA; CHVATAL; RANJITHAN, 2017). Feito para a mesma habitação de Favretto et al. (2015), mencionado no Capítulo anterior, nas cidades de Manaus, Curitiba e São Paulo, representando as zonas bioclimáticas mais quente, mais fria e intermediária, respectivamente. Verificou-se se a diferença entre as mesmas formas de configuração das zonas térmicas (com duas e cinco zonas), mas para diferentes possibilidades de fechamento das portas internas (o que não havia ainda sido

explorado): sempre abertas, sempre fechadas ou fechadas somente à noite. Os parâmetros restantes foram os mesmos adotados anteriormente (habitação naturalmente ventilada, com construções usuais). A necessidade desse estudo surgiu após uma pesquisa de campo (CASATEJADA; CHVATAL, 2017, [citada na seção 5.4]) que identificou que alguns usuários tem o hábito de fechar as portas à noite. Considerou-se que isso poderia alterar a diferença encontrada anteriormente, devido à redução da troca de ar entre os ambientes, ocasionando maior diferença de temperatura entre eles.

- Estudo 3 (CASATEJADA, 2017). Considerou variadas possibilidades de geometria, a partir da mesma área útil da habitação do estudo 2 e de Favretto et al. (2015) (Figura 13) e dos mesmos cômodos (sala e cozinha conjugadas, dois quartos e banheiro). Definiram-se todas as proporções possíveis para a planta baixa (relação entre largura e comprimento, 1:1, 2:1 e 1,5:1), de modo a possibilitar o aproveitamento do espaço interno (Figuras 17 a 19). Para cada uma dessas proporções, investigou-se variadas distribuições internas para os ambientes, considerando as exigências do Programa Minha Casa Vida (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2016; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Isso resultou em um total de 9 geometrias, que foram simuladas com variadas posições das janelas e orientação, considerando três níveis de exposição aos ventos e ao sol (de “a”, melhor, a “c”, pior). Os horários de abertura e fechamento das janelas e das portas internas simulados foram obtidos por meio da pesquisa de campo apresentada na seção 5.4 (CASATEJADA; CHVATAL, 2017).
- Ambos os estudos utilizam a mesma metodologia de análise dos resultados do estudo anterior (FAVRETTO et al., 2015). São fornecidas as diferenças médias e absolutas observadas para as temperaturas do ar e operativa e o consequente impacto nos graus-hora totais anuais de calor e de frio. As diferenças entre os modelos com duas e cinco zonas são maiores conforme as portas internas permanecem fechadas por mais tempo, nos climas mais frios (São Paulo e Curitiba), nas comparações com os ambientes menores e também com aqueles com menor área de envolvente voltada ao exterior. A decisão de optar por uma das duas opções

depende das especificidades do caso a ser simulado. No entanto, o estudo conclui que, para análises nas fases iniciais de projeto, esta simplificação pode ser adotada.

Figura 17 – Modelos simulados (M_{1:1}).
Fonte: Casatejada (2017).

Figura 18 – Modelos simulados (M_B).

Fonte: Casatejada (2017).

Figura 19 – Modelos simulados ($M_{2:1}$).

Fonte: Casatejada (2017).

5.4 Contribuições para a modelagem da ventilação natural em habitações

Esta seção compreende dois estudos pontuais (MARÍN; CASATEJADA; CHVATAL, 2016, CASATEJADA; CHVATAL, 2017), que visam contribuir para a modelagem da ventilação natural no *EnergyPlus*, através do módulo *Airflow Network*. Este módulo se baseia em um “modelo

em rede”, que considera a trajetória do ar no interior do edifício devido às diferenças de pressão externas (ALLARD, 2002). Não se trata de um modelo detalhado para o estudo da ventilação (não fornece nem a velocidade, nem a distribuição do fluxo de ar, por exemplo), mas apresenta resultados confiáveis (ESTADOS UNIDOS, 2016a), sendo uma segura estimativa das renovações de ar em cada ambiente do edifício. Através do *EP-Airflow Network*, portanto, é possível quantificar o impacto desses elementos externos à fachada nas renovações de ar e no consequente desempenho térmico do edifício, permitindo a predição do potencial de resfriamento da ventilação.

O **primeiro estudo** (MARÍN; CASATEJADA; CHVATAL, 2016) é resultado de um exercício feito em uma disciplina da Pós-Graduação. Teve como objetivo comparar o impacto na operação das janelas e na avaliação do conforto térmico de uma habitação de interesse social (HIS) naturalmente ventilada, devido à modelagem de diferentes temperaturas de controle para a sua abertura e fechamento. A metodologia compreendeu simulações computacionais da HIS na cidade de São Carlos/SP, com três opções de controle para a abertura das janelas, que poderiam ocorrer a qualquer hora do dia e do ano:

- C1: Temperatura interna do ar > Temperatura de conforto ([segundo a ASHRAE 55] ASHRAE, 2013).
- C2: Temperatura interna do ar > Limite inferior de conforto ([segundo a ASHRAE 55] ASHRAE, 2013).
- C3: 20 °C, segundo o estabelecido pelo RTQ-R (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012)
- Para as três opções acima, as janelas eram abertas somente quando a temperatura interna do ar fosse maior que a externa.

Os maiores graus-hora de desconforto por calor e por frio corresponderam às maiores (C1) e menores (C3) temperaturas de controle, respectivamente. No verão, as janelas abriram principalmente à noite em todas as situações, indicando esse como o período propício para a ventilação. No inverno, isso ocorreu ocasionalmente somente para os casos com menores temperaturas (C2 e C3), sendo que, quanto menor a temperatura de controle, mais similaridade foi observada nos padrões de ventilação ao longo do ano.

O **segundo estudo** (CASATEJADA; CHVATAL, 2017) comparou os horários nos quais os usuários abrem e fecham habitualmente as janelas e as portas internas nas habitações brasileiras com os mais adequados para garantir o conforto térmico, obtidos via simulação. Primeiramente, foram aplicados 500 formulários online em pessoas aleatórias que residem por todo o território nacional. De forma resumida, identificou-se que a maioria dos entrevistados costuma abrir as janelas durante o dia e fechá-las à noite, com maior duração do período de abertura no verão. Em relação às portas internas, 50% das pessoas as mantêm abertas durante todo o dia, enquanto outros 50%, em sua maioria, as fecha apenas à noite. Em seguida, foram realizadas simulações de uma habitação de interesse social naturalmente ventilada, em três cidades brasileiras (Curitiba, São Paulo e Manaus). A ventilação foi permitida ao longo das 24 horas do dia, em todos os meses do ano, em função da temperatura de controle de 20°C (RTQ-R, ref.) ((INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012) . Assim, permitiu-se o aproveitamento da ventilação natural em mais períodos ao longo do ano, em comparação a outras possibilidades de controle, da mesma forma que o estabelecido no estudo anterior (MARÍN; CASATEJADA; CHVATAL, 2016). Os resultados apresentaram incongruência entre o melhor período para a remoção de calor na habitação no verão (à noite) e os hábitos dos usuários (abertura predominantemente durante o dia). Quanto ao inverno, notou-se que os usuários dos climas mais frios (São Paulo e Curitiba), costumam reduzir o período de aberturas das janelas durante o dia, ou até mantê-las fechadas durante a semana, o que foi de encontro às simulações.

5.5 Impacto de proteções solares e muros na ventilação natural e nas temperaturas interiores de habitações

Em climas quentes e úmidos, a adoção conjunta da ventilação natural e de dispositivos de sombreamento representa uma importante solução de projeto para se alcançar um melhor desempenho térmico das edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS , 2005; CANDIDO et al., 2010;). Os dispositivos de proteção solar são mais eficientes quando colocados externamente ao edifício, por bloquearem a incidência direta de radiação solar nas superfícies envidraçadas (OLGYAY, 1998). No entanto, quando a

ventilação se dá pela ação dos ventos, elementos externos às fachadas podem alterar significativamente o fluxo de ar no interior, devido à alteração da distribuição de pressão do ar na envoltória (OLGYAY, 1998; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008). Esse também é o caso dos muros localizados no perímetro dos terrenos, e frequentemente adotados por razões de segurança, privacidade ou de demarcação de propriedade (TRAMONTANO; SANTOS, 1999; MALARD et al., 2002; MENEGUETTI; BELOTO, 2016).

A literatura apresenta alguns trabalhos sobre o impacto de elementos externos na ventilação, como as varandas e/ou elementos de sombreamento (CHAND; KRISHAK, 1971; HIEN; ISTIADJI, 2003; PRIANTO; DEPECKER, 2002), as sacadas (CHAND; BHARGAVA; KRISHAK, 1998; MONTAZERI; BLOCKEN 2013) e os muros (CHANG, 2006, CHANG; CHENG, 2009). No entanto, há poucos estudos que tratam especificamente do seu impacto nos coeficientes de pressão (CP)⁵, nas renovações de ar e no desempenho térmico do edifício como um todo, considerando também a contribuição do sombreamento.

Nesse sentido tem-se o estudo de (MARÍN CASTAÑO, 2017), que se trata de uma dissertação recentemente defendida. O seu objetivo geral foi avaliar o impacto de proteções solares e muros adicionados a uma habitação de interesse social térrea, em Natal/RN, tanto nos CP e nas renovações de ar devido à ação dos ventos, quanto nas temperaturas interiores. A habitação foi a mesma já definida em Favretto et al. (2015). O método consistiu em três etapas:

(1) estudos experimentais no Túnel de Vento do IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Figuras 20 e 21), para a obtenção dos coeficientes de pressão das variadas geometrias estudadas, escolhidas em função da revisão da literatura. Estas compreenderam a habitação (Figura 13) com três áreas de janela, sem e com os seguintes elementos externos: proteções horizontais básica, afastada e do tipo veneziana; proteções do tipo L, varandas e muro no perímetro do terreno (Quadro 5). O posicionamento das aberturas e o dimensionamento

⁵ Os coeficientes de pressão são uns dos principais dados de entrada do Módulo *Airflow Network* do EP (e de outros “modelos em rede”), pois descrevem a pressão exercida pelo ar em cada ponto das faces externas do edifício (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). Podem ser obtidos por meio de ensaios experimentais em túnel de vento, simulações em *softwares* baseados na dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) ou por bases de dados para algumas geometrias específicas, como por exemplo, as desenvolvidas por Quan et al. (2007) e disponíveis em página web (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

desses elementos levou em consideração a redução dos ganhos solares e a exposição a diferentes condições de aproveitamento dos ventos predominantes.

(2) simulação dessas geometrias por meio do *EnergyPlus*/Módulo *Airflow Network*, em duas orientações (norte-sul e leste-oeste), utilizando os CP medidos no túnel.

(3) análise do impacto da adição dos elementos externos nos coeficientes de pressão das janelas, nas renovações de ar por hora dos ambientes obtidas pelo EP e nas temperaturas interiores.

Figura 20. Ilustração dos componentes móveis e fixos do modelo
Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017), p. 100

Figura 21. Exemplificação: encaixes macho-fêmea para os dispositivos tipo veneziana para os três tamanhos de janela.

Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017), p. 100

Combinação dos parâmetros variados				Casos
Elementos externos à fachada		Tamanho de janelas (m)	Orientação
Sem elementos externos (R)		1X1,2	N1	R_1X1,2_N1
			N2	R_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	R_1X1,6_N1
			N2	R_1X1,6_N2
		1X2	N1	R_1X2_N1
			N2	R_1X2_N2
Horizontais	Básico (H1)	1X1,2	N1	H1_1X1,2_N1
			N2	H1_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	H1_1X1,6_N1
			N2	H1_1X1,6_N2
		1X2	N1	H1_1X2_N1
			N2	H1_1X2_N2
	Afastado (H2)	1X1,2	N1	H2_1X1,2_N1
			N2	H2_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	H2_1X1,6_N1
			N2	H2_1X1,6_N2
		1X2	N1	H2_1X2_N1
			N2	H2_1X2_N2
Veneziana (H3)	1X1,2	N1	H3_1X1,2_N1	
		N2	H3_1X1,2_N2	
	1X1,6	N1	H3_1X1,6_N1	
		N2	H3_1X1,6_N2	
	1X2	N1	H3_1X2_N1	
		N2	H3_1X2_N2	
Especiais	Tipo "L" (E1)	1X1,2	N1	E1_1X1,2_N1
		1X1,6	N1	E1_1X1,6_N1
		1X2	N1	E1_1X2_N1
	Varanda (E2)	1X1,2	N1	E2_1X1,2_N1
			N2	E2_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	E2_1X1,6_N1
	N2	E2_1X1,6_N2		
1X2	N1	E2_1X2_N1		
	N2	E2_1X2_N2		
Muros de fechamento	Muro (RM)	1X1,2	N1	RM_1X1,2_N1
			N2	RM_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	RM_1X1,6_N1
			N2	RM_1X1,6_N2
		1X2	N1	RM_1X2_N1
			N2	RM_1X2_N2
	Varanda + Muro (E2_M)	1X1,2	N1	E2M_1X1,2_N1
			N2	E2M_1X1,2_N2
		1X1,6	N1	E2M_1X1,6_N1
			N2	E2M_1X1,6_N2
	1X2	N1	E2M_1X2_N1	
	N2	E2M_1X2_N2		
* Combinações ensaiadas no túnel de vento de CLA (etapa 2, fase 1, ver item 3.3.1).			* Casos simulados (etapa 2, fase 2, ver item 3.3.2).	

Quadro 5- Casos de estudo.
Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017).

As Figuras 22 a 26 apresentam exemplos do tipo de resultado encontrado. A Figura 22 representa, em uma escala de cores, os intervalos dos coeficientes de pressão medidos no túnel, para cada ponto da janela do quarto 1, de tamanho intermediário (nela foram medidos 12 pontos), para cada ângulo de incidência do vento, para todos os elementos externos considerados. O mesmo tipo de figura foi obtida para cada combinação mensurada no túnel. Já as Figuras seguintes (23 a 26) se referem somente ao impacto da varanda, quando as janelas possuem dimensões intermediárias. Figuras similares foram elaboradas para todos os outros elementos externos.

Na Figura 23, tem-se a diferença entre os CP dos casos com e sem varanda, considerando-se o coeficiente de pressão médio da janela (média aritmética entre os pontos medidos). Identifica-se nesse gráfico os efeitos observados devido à adição da varanda, de redução ou aumento da sobrepressão ou da sucção e os ângulos de incidência nos quais isso ocorre. Em seguida, por meio das simulações, identificou-se se esses efeitos eram percebidos nas taxas de renovação de ar da habitação (Figura 24) . Finalmente, verificou-se o impacto do elemento externo nas temperaturas interiores (Figuras 25 e 26), identificando-se tanto o efeito de redução da temperatura devido ao sombreamento quanto o seu eventual aumento, nos casos em que a taxa de renovação de ar era reduzida.

Figura 22- Coeficientes de pressão para todos os pontos medidos na janela intermediária (1x1,6m), para todos os casos estudados.

Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017), p. 120

Figura 23 - Diferença entre o CP médio da janela do quarto 1, com tamanho intermediário, para os casos com (E2_1x1.6) e sem (R_1x1.6) varanda, em função do ângulo de incidência do vento.
Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017)

Figura 24 - Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar dos casos com (E2_1x1.6) e sem (R_1x1.6) varanda, janelas intermediárias, na orientação Norte-sul.
Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017)

Figura 26 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos com (E2_1x1.6) e sem (R_1x1.6) varanda, com janelas intermediárias na orientação Norte-Sul.

Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017)

Tendo-se em conta o tipo de análise apresentado nas figuras acima, no Quadro 6 tem-se o resumo dos principais impactos observados pela presença dos elementos estudados.

Desta forma, e a partir das análises destes impactos foi possível concluir que:

- A variação no tamanho de janela não alterou a grandeza dos impactos observados pela presença dos elementos externos à fachada na habitação estudada.
- Nas simulações, permitiu-se a abertura das janelas em qualquer horário, caso as condições para a ventilação natural fossem favoráveis. No entanto, em todas elas, as janelas só foram abertas no período noturno.
- Para os dispositivos horizontal básico (H1) e para a a varanda (E2) o impacto observado na maior parte dos ângulos de incidência foi a redução, tanto da sobrepressão quanto da sucção. Isso se refletiu no fluxo de ar, que foi reduzido em torno de 25%, e no consequente aumento da temperatura interior no período noturno. No entanto, ao longo do ano, este incremento na temperatura ocorreu em menor intensidade, quando comparado à redução da temperatura interior durante o dia, causada pelo sombreamento. Com isso, o acréscimo dos dispositivos horizontal básico (H1) e da varanda (E2) sempre reduziu o desconforto total na habitação ao longo do ano.

Casos	Impacto nos Cps	Orient.	Impacto nas Renovações de ar	Impacto nas temperaturas internas	Impacto (Ti) predominante
H1		N1	25%		0,1°C
		N2	25%		0,2°C
H2		N1	25%		0,1°C
		N2	25%		0,1°C
H3		N1	25%		0,1°C
		N2	25%		0,1°C
E1		N1	25%		0,1°C
E2			25%		0,1°C
			25%		0,3°C
RM		N1	50%		0,2°C
		N2	50%		0,2°C
E2_M		N1	75%		0,2°C
		N2	75%		0,2°C
Aumento Diminuição Período diurno Período noturno
Sobrepressão Sobrepressão Sucção Sucção Inversão da sobrepressão					

Quadro 6 - Resumo dos principais impactos nos CP, nas taxas de renovação de ar e nas temperaturas internas pela presença dos elementos estudados.

Fonte: MARÍN CASTAÑO (2017), p. 165

- Para o dispositivo horizontal afastado (H2) o efeito foi similar ao identificado para o básico e a varanda, exceto para a orientação N2 (leste-oeste). Nela, o sombreamento não foi suficiente para superar o efeito de aumento de temperatura durante à noite, devido à redução da ventilação. Ou seja, as proteções solares horizontais afastadas só foram eficientes na orientação N1 (Norte-Sul).
- Para o dispositivo de proteção do tipo “L” (E1), o resultado final foi muito parecido aos do horizontal básico (H1) e da varanda (E1), com a diferença de que, em alguns ambientes, houve até a elevação das taxas de renovação de ar, e a consequente redução da temperatura interior.

- O dispositivo de sombreamento do tipo veneziana (H3) foi o que apresentou melhor desempenho térmico. Para a maior parte dos ângulos de incidência do vento houve aumento da sobrepressão ou da sucção, ocorrendo um aumento das taxas de renovação de ar para a maioria dos ambientes, fazendo com que no período noturno se registrasse um decréscimo nas temperaturas internas, que foi somado ao efeito do sombreamento diurno. Convertendo-se no dispositivo que apresentou melhor desempenho térmico entre os dispositivos de sombreamento estudados, pois, as reduções nas temperaturas internas podem ocorrer tanto devido ao sombreamento, quanto graças ao aumento do fluxo de ar à noite.
- Os casos com muro foram, entre todos os elementos estudados, os que tiveram maior impacto nos CP, sendo a inversão da sobrepressão o efeito mais evidente, o que significou que em todos os ângulos de incidência ocorreu sucção na envoltória. Tal fenômeno foi observado na diminuição da taxa de renovação de ar entre 50 e 75% para os casos com muro (RM) e o caso de varanda mais muro (E2_M) respectivamente. O impacto maior nas temperaturas internas foi o seu aumento no período noturno, limitando o potencial da ventilação natural na remoção de calor da edificação. Com isso, de forma contrária ao observado anteriormente para a maior parte das proteções solares, o acréscimo do muro no perímetro do terreno ocasionou o aumento do desconforto na habitação.

5.6 Contribuições para a modelagem da temperatura do solo

Esta seção se refere a um Mestrado recentemente defendido (COSTA, 2017) cujo objetivo principal foi identificar a forma mais adequada para a modelagem dos parâmetros relacionados às trocas de calor entre o piso e o solo em uma edificação térrea no programa de simulação de desempenho *EnergyPlus*, com o uso do pré-processador *Slab*.

O fluxo de calor entre a laje de piso em contato com o solo e o solo em si é um dos aspectos de maior influência no desempenho térmico e energético das edificações

térreas. Esse fluxo de calor pode ser calculado através de variados modelos físicos nos programas computacionais de desempenho termoenergético, e por exemplo, no *EnergyPlus-EP* (ESTADOS UNIDOS, 2016a) isso pode ser feito com o auxílio do programa auxiliar *Slab* (ESTADOS UNIDOS, 2016b). O método de cálculo do *Slab* é baseado nos trabalhos de Bahnfleth (1989) e Clements (2004). Além disso, o "Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais" (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2012) também indica a necessidade de uso do *Slab* para as simulações de edificações em contato com o solo, quando se utiliza o *EnergyPlus*.

O *Slab* calcula a temperatura de interface entre o piso e o solo, que deve ser inserida no EP para se proceder às simulações. Silva, Almeida e Ghisi (2017) indicaram que a temperatura do solo é um dos aspectos de maior influência nas simulações com o EP, ao efetuarem uma análise de sensibilidade para uma residência em Florianópolis. Esses autores também indicaram que esse dado de entrada é um dos que apresenta maior incerteza nos resultados de desempenho térmico. Tem-se uma série de dúvidas sobre a modelagem do *Slab* e seus dados de entrada. Há alguns estudos que trataram desse tema (BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011; LARSEN, 2011; ANDOLSUN et al., 2012) e que identificam a necessidade de mais pesquisas. Isso é uma realidade especialmente no Brasil, onde usualmente não se utiliza isolamento no piso e muitos edifícios são naturalmente ventilados.

No trabalho a que se refere este Capítulo (COSTA, 2017), primeiramente foi avaliado o impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o solo e o piso de uma habitação de interesse social térrea naturalmente ventilada no programa *EnergyPlus*, em São Carlos/SP, somente através de simulação computacional (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017). Todos os ambientes dessa edificação foram reunidos em uma única zona térmica, sendo o ático uma zona adicional. O foco se deu no pré-processador *Slab*, suas distintas formas de operação e a sua comparação com outras opções. Para tal, foi feito um estudo detalhado de todos os seus dados de entrada, buscando-se as referências principais nas quais ele é baseado (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004). Como resultado parcial, foi elaborado um Manual para uso desse programa (COSTA; CHVATAL, 2017). Quanto às simulações, elas indicaram que a

adoção da temperatura do solo igual à média exterior do ar, ao invés do Slab, resultou na redução de 26.2 % dos graus-hora totais de desconforto anuais (calor mais frio)⁶. A adoção do objeto *Site: Ground Domain*, alternativo ao uso do *Slab*, gerou um impacto ainda maior (-44 % no desconforto total para o método de diferenças finitas e -55.2 % para o método de KusudaAchenbach). As simulações indicaram a necessidade do procedimento de convergência, o qual não é conduzido automaticamente pelo programa. No que se refere aos dados de entrada do Slab, as propriedades termofísicas do solo foram que apresentaram a maior influência, com redução de 57.5 % do desconforto para o solo seco, e aumento de 25 % para o solo úmido, ambos comparados com o solo com umidade intermediária. Já a evapotranspiração foi o segundo dado de maior impacto, sendo a sua desativação na simulação correspondente à redução do desconforto total anual em 23,8%. A modelagem da área do perímetro e do centro da laje de piso separadamente apareceram em terceiro lugar, com redução do desconforto em 6,7% e em último, com baixo impacto, o comprimento do domínio horizontal e o tempo de iteração (diferenças nos graus hora totais de desconforto anuais, em módulo, menores ou iguais a 0,5%).

Na sequência, a pesquisa efetuou medições da temperatura do solo em uma célula-teste. Todo o procedimento detalhado, inclusive para a instalação dos equipamentos, é apresentado em (COSTA, 2017). Foram utilizadas células-teste disponíveis no IAU (Figura 27), e medidos os seguintes dados, de junho a dezembro de 2016: temperatura e umidade relativa do ar no ático, temperatura e umidade relativa do ar no interior da célula, temperatura superficial de todas as superfícies internas da célula (quatro paredes, teto e piso; neste último, tanto em seu centro geométrico quanto em seu perímetro), temperatura da interface piso e solo, temperatura do solo abaixo da célula-teste, em três profundidades diferentes (0,30m, 0,60m e 0,90m) e temperatura superficial do solo no exterior da célula-teste (a 0,05m da superfície). De forma resumida, notou-se que as temperaturas da interface piso e solo e as superficiais do piso têm forte relação com a evolução da temperatura do ar interna, apresentando, no entanto, menores amplitudes. A amplitude é gradativamente

⁶ Graus-hora de desconforto por frio e por calor totais anuais calculados em função dos limites superior e inferior de conforto estabelecidos pela abordagem adaptativa descrita na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), correspondentes a 80% dos usuários satisfeitos com as condições térmicas do ambiente.

reduzida, atingindo o seu valor mínimo (amplitude diária média de 0,22 °C) a 0,90 m de profundidade. Verificou-se também que as diferenças entre as temperaturas médias mensais da interface piso e solo e as do ar externo se situaram, para o período medido, entre -0,88°C a +0,03°C. Portanto, o uso da temperatura externa média mensal como temperatura do solo em avaliações de desempenho pode ser uma alternativa para a simplificação das simulações, desde que se tenha ciência dessa diferença.

Finalmente, foram feitas simulações paramétricas das trocas térmicas pelo piso da célula-teste com o pré-processador *Slab*, considerando variados dados de entrada (albedo, propriedades termofísicas do piso e do solo, e acionamento ou não da evapotranspiração). Foi rodado apenas o *Slab*, adotando-se como temperatura interna do ar os valores medidos, e obtendo-se dessa forma a temperatura na interface piso e solo. Essa temperatura foi comparada com a mensurada, identificando-se os casos com maior concordância entre simulações e medição. Verificou-se que o modelo de menor erro (+0,0021°C) era congruente com as características do piso e do solo em questão, demonstrando a confiabilidade do método de cálculo do *Slab*. Foram obtidas também duas equações por meio de regressão linear múltipla. A primeira, para estimar o erro (variável resposta), frente às variações dos parâmetros de entrada (R^2 igual a 0,78). A segunda, para verificar o grau de correlação entre os parâmetros alterados e a temperatura da interface piso e solo gerada pelo *Slab* (R^2 igual a 0,99, e correlação válida somente para a célula-teste em questão). A análise dessas equações indicou que o programa *Slab* modela adequadamente a temperatura do solo, desde que os dados de entrada sejam apropriados. Os parâmetros identificados como de maior influência foram as propriedades do solo, a evapotranspiração, o albedo e a temperatura média mensal do ar interna (calculada pelo EP).

Figura 27- Células-teste do IAU.

Fonte: COSTA (2017).

5.7 Considerações finais

Tendo em vista a complexidade da modelagem de edificações em programas de simulação computacional do desempenho termoenergético, este grupo de trabalhos teve como objetivo contribuir com esse processo, por meio de variados estudos relacionados aos seus dados de entrada, tendo sido estudado especificamente o programa *EnergyPlus*.

Quanto à simulação de habitações de interesse social térreas ou similares, verificou-se o impacto de certos detalhamentos na inserção de dados, como a consideração dos caixilhos, dos beirais e das venezianas, e também de simplificações na inserção das zonas térmicas. Analisou-se também a diferença entre a adoção das medidas internas ou externas das paredes. Na simulação da sua ventilação natural pelo módulo *Airflow Network*, avaliou-se a influência de distintas temperaturas de controle para a abertura das janelas. Esses estudos, baseados na comparação entre alternativas de modelagem somente via simulação, fornecem a diferença entre as opções consideradas, cabendo ao especialista tomar as decisões com base nas necessidades específicas de análise do edifício em questão.

Verificou-se também, por meio de pesquisa de campo, os horários habituais de abertura e fechamento de janelas e portas internas, em variados climas do Brasil, dado que pode ser utilizado nas simulações de habitações, para uma previsão mais próxima da realidade do comportamento dos usuários.

Por meio de medições em Túnel de Vento, avaliou-se o efetivo impacto de um muro, ao longo do perímetro do terreno, e de variados modelos de dispositivos de proteção solar (horizontal básico, afastado, do tipo veneziana, em L e varandas), tanto nos coeficientes de pressão, quanto na taxa de renovação de ar e nas temperaturas interiores de uma habitação de interesse social, em Natal/RN. Esse é um resultado relevante, quando se trata da avaliação do desempenho térmico dessas habitações. Verificou-se que os dispositivos horizontal básico, afastado e a varanda reduzem a taxa de renovação de ar à noite, quando ocorre ventilação natural, causando um leve decréscimo da temperatura interior. No entanto, como o efeito do sombreamento ao longo do dia é bastante acentuado, a sua adição na habitação reduz sempre o desconforto por calor, de forma significativa (exceto para o dispositivo afastado, na orientação leste-oeste). O dispositivo em L apresentou um efeito similar, no entanto, em certos ambientes, houve até um aumento da taxa de renovação de ar, intensificando ainda mais o seu efeito de redução do desconforto. Esse efeito de elevação da taxa de renovação também ocorreu com o dispositivo do tipo veneziana, que se apresentou como o mais eficiente dentre todos os estudados, por reduzir o desconforto tanto devido ao incremento da ventilação, quanto pelo sombreamento. Quanto ao muro, o resultado foi o oposto, tendo-se observado uma elevação significativa no desconforto da habitação com a sua adição no perímetro do terreno, devido à redução significativa da taxa de renovação de ar.

Finalmente, por meio de simulações e também de medições em célula-teste, avaliou-se a forma mais adequada de se modelar as trocas térmicas entre uma edificação e o solo, com foco no pré-processador *Slab*. Identificou-se os parâmetros de maior influência e o impacto de variadas alternativas de uso do programa.

6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS DE MODO MISTO

Neste Capítulo têm-se as pesquisas relacionadas a edifícios de escritórios, desenvolvidas de 2011 a 2016, e que tratam de uma importante estratégia para reduzir o seu consumo energético: a ventilação híbrida. São abordados dois Mestrados já concluídos que tratam dessa temática, sendo o primeiro conduzido entre 2011 e 2014 e o segundo, entre 2014 e 2016.

6.1 Orientações, supervisões e produção

Orientações

11. Rosilene Regolão Brugnera. *Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com estratégias de ventilação híbrida*. Mestrado. 2011-2014.
12. Caroline Santesso. *Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto*. Mestrado. 2014-2016.

Artigos de congressos, periódicos ou capítulos de livros

**** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, no Apêndice E.**

BRUGNERA, R. R. ; RORIZ, V. ; CHVATAL, K. M. S. Temperatura de acionamento de condicionadores de ar e ventiladores. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 12., ENCONTRO LATIIONAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC), 8., 2013, Brasília, DF. *Anais...* Brasília, DF: ANTAC, 2013.

Dissertações, relatórios e manuais

**** O texto desses documentos encontra-se, na íntegra, na página**

<http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/professora-karin/>

BRUGNERA, R. R. *Potencial de economia de energia em edifícios com estratégias de ventilação híbrida*. 2014. 120 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SANTESSO, C. A. *Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto*. 2017. 172 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

6.2 Introdução

Edifícios com “estratégia de ventilação híbrida” ou “de modo misto” fazem uso tanto da ventilação natural quanto de sistemas mecânicos de refrigeração como meios de proporcionar conforto térmico. Dentre suas vantagens, destacam-se a redução do consumo de energia e a alta satisfação por parte dos usuários (BRAGER; RING; POWELL, 2000; ROWE; DINH, 2001). Suas limitações se devem aos locais com ruído, poluição e/ou poeira excessivos.

No cenário internacional, muitos trabalhos indicam a economia de energia devido a essa estratégia em edificações de escritórios (ROWE, 2003; MENASSA; TAYLOR; NELSON, 2013; HU; KARAVA, 2014). Essas pesquisas englobam abordagens diversas, fazendo referência tanto a estudos de caso de edifícios específicos, com sistemas complexos de ventilação natural, quanto à sua modelagem em programas computacionais.

Brager, Ring e Powell (2000) alertam que sistemas muito complexos de condicionamento artificial de ar e de ventilação natural podem gerar um aumento de custo do edifício. Adicionalmente, Ezzeldin e Rees (2013) informam que é possível se economizar energia com a combinação de estratégias simples de ventilação híbrida. Os

autores verificaram que, em edifícios de modo misto, localizados em cidades representativas do clima árido, quando os usuários têm o controle das janelas e uma atitude mais consciente, é possível economizar mais de 40% da energia anual consumida pelo sistema mecânico, simplesmente por se alternar com o uso da ventilação natural (EZZELDIN; REES, 2013).

No cenário nacional, o trabalho de Rupp e Ghisi (2012, 2013) trata de edifícios de escritórios com janelas operáveis na cidade de Florianópolis/SC. Eles compararam, via simulação, vários modelos de salas de escritórios com diferentes modos de operação de climatização (ar condicionado constante/modo misto) e iluminação (artificial/natural). Os modelos analisados continham três diferentes geometrias (relação entre a largura e proporção do ambiente L:P, de 1:1, 1:2, 2:1), três tamanhos de salas por geometria (pequenas (P) até 12 m²; médias (M) até 76 m² e; grandes (G) até 473 m²); quatro orientações (norte, sul, leste e oeste) e; percentual de área de abertura da janela (PAF) variando de 10 a 100%. Os autores obtiveram uma redução entre 21,7 e 64,9% no consumo total (incluindo equipamentos, ar condicionado e iluminação) dos modelos comparando-se casos operando com o modo misto e iluminação natural complementada pela artificial com casos com o ar condicionado constante e iluminação artificial.

6.3 Temperaturas de acionamento de ventiladores e do ar condicionado

Primeiramente foi feita uma pesquisa de campo (BRUGNERA; RORIZ; CHVATAL, 2013) em salas de escritórios da área administrativa do IAU, com o intuito de aferir o comportamento dos usuários em relação às temperaturas de acionamento de ventiladores e aparelhos condicionadores de ar. Foram medidas a temperatura e a umidade relativa do ar em quatro salas com janelas operáveis (duas com ar condicionado e duas com ventiladores), de janeiro a março de 2012. Foram também coletados os dados externos de temperatura do ar, por meio do Sistema de Coleta de Dados Ambientais (SINDA, 2013). Além disso, os usuários dessas salas responderam diariamente a um questionário, onde informavam a que horas ligavam e/ou

desligavam os equipamentos (ventiladores e ar condicionado) e abriam e/ou fechavam as janelas e/ou as portas.

Os resultados indicaram que o acionamento, tanto do ventilador, quanto do ar condicionado, se deu em condições semelhantes (temperatura do ar interna entre 25 a 26°C). Também notou-se que todas as temperaturas de acionamento, tanto dos ventiladores quanto do ar condicionado, se encontraram na faixa de conforto térmico previsto pela ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010). Ou seja, os usuários geralmente não deixam a temperatura aumentar de modo que esta cause total desconforto, ao contrário, eles se antecipam e ligam os aparelhos a partir do momento em que sentem que a temperatura aumenta um pouco. Isso pode acontecer devido à facilidade de terem o controle sobre tais equipamentos, acionando-os assim que sentem o mínimo de desconforto.

6.4 Potencial de economia de energia em edifícios de escritórios com a adoção do modo misto

No primeiro trabalho (BRUGNERA, 2014), o objetivo principal foi avaliar o potencial de economia de energia devido à adoção da estratégia de ventilação híbrida, em dois climas brasileiros distintos: São Carlos/SP e Natal/RN. A única pesquisa que havia sido encontrada, na época, no Brasil, sobre esse tipo de edifício, era a de Rupp e Ghisi (2012, 2013), citada na Introdução, e voltada ao clima de Florianópolis/SC.

O método detalhado encontra-se em Brugnera (2014). Ele consistiu em simulações computacionais ([por meio do *EnergyPlus*] ESTADOS UNIDOS, 2012) do consumo energético de um edifício de saletas comerciais existente em São Carlos (Figura 28), oriundo da pesquisa de (CARRIÈRES, 2007), sendo representativo de um tipo de edificação que é encontrado em todo o Brasil. As saletas comerciais pertencem a edifícios considerados de médio padrão, e são ambientes de modo misto, onde os usuários costumam ter livre acesso às janelas operáveis e ao equipamento de ar condicionado, geralmente do tipo *Split*. A fim de se analisar distintas configurações

para essa edificação, variou-se a sua orientação em relação ao sol e seu PAF (porcentual de abertura na fachada principal, de 30 e 50%).

Figura 28 – Edifício analisado.

Fonte: Brugnera (2014).

Para se obter o potencial de economia, o edifício foi simulado em três cenários: (1) com a possibilidade de acionamento do ar condicionado em todo o período ocupado e as janelas sempre fechadas (temperaturas de controle para aquecimento e

resfriamento iguais a 18 e 25 °C); (2) somente com ventilação natural, que ocorreu sempre no período ocupado, quando a temperatura interna era maior que 20 °C e também maior que a externa (3) modo misto, com a possibilidade de abertura das janelas quando a temperatura interior estivesse entre 20 °C (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, 2010) e 25 °C e fosse menor que a externa. A temperatura de controle de 25 °C para o acionamento do ar condicionado foi obtida por meio de uma pesquisa de campo feita no verão, na qual se avaliou quando o ar condicionado era ligado em salas similares à do estudo, localizadas no IAU (BRUGNERA; RORIZ; CHVATAL, 2013).

Para os três cenários utilizou-se o módulo *Airflow Network* do EP, considerando-se os coeficientes médios de pressão por fachada (geometria retangular), as portas internas sempre fechadas e as janelas com 100% de abertura efetiva, em função dos controles acima mencionados. Os ganhos internos foram modelados considerando-se 4 pessoas e 4 computadores, além dos ganhos devido à iluminação artificial, por meio de um sistema dimerizável e energeticamente eficiente, que funcionou como complemento à iluminação natural. A iluminância em cada ponto do plano de trabalho foi simulada por meio do programa Daysim (NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA, 2010).

Os resultados indicaram o seguinte:

- para o cenário com ventilação natural, há predominância do desconforto por calor, em São Carlos, em relação ao frio. Já em Natal, há somente desconforto por calor, o qual é bem mais elevado.
- Em São Carlos, nesse tipo de edificação, que é ocupada durante o dia, não há necessidade de aquecimento, pois esse modo nunca precisou ser acionado, mesmo no inverno.
- Para o cenário com o ar condicionado operando durante o período de ocupação e as janelas sempre fechadas, notou-se que, tanto para São Carlos quanto para Natal, ele é acionado para resfriamento em todos os meses do ano (inclusive no inverno, em São Carlos).

- A adoção do modo misto se constitui como uma melhor alternativa para a redução do consumo energético em São Carlos, do que em Natal. O seu potencial de economia situou-se em torno de 30% do consumo do ar condicionado, em São Carlos, valor coerente com outros encontrados na literatura (RUPP; GHISI, 2012, 2013). Já em Natal, as janelas não abriram, pois a temperatura interior encontrava-se sempre acima da de controle (25 °C). Com o aumento dessa temperatura para 27 °C, as janelas passaram a abrir algumas horas, proporcionando uma economia aproximada de 15% no consumo do ar condicionado.
- A adoção do modo misto, para São Carlos, em contraponto à ventilação natural somente, reduziu os graus-hora de desconforto por calor totais anuais⁷ entre 75 e 84%, configurando-se como uma importante estratégia.
- Todas as observações acima são válidas para saletas comerciais com características similares à analisada: área útil de 32 m², ventilação unilateral, PAF entre 30 ou 50%, sem dispositivos de proteção solar, abertura efetiva de 100% e portas internas fechadas.

6.5 Integração da ventilação e iluminação naturais em edifícios de escritórios de modo misto

No segundo trabalho (SANTESSO, 2017) foram exploradas mais variações geométricas para as saletas comerciais, com foco em um clima no qual a ventilação híbrida seria eficiente (São Paulo/SP), conforme constatado previamente. Adicionou-se a análise do conforto visual, além da avaliação do consumo energético, devido à escassez de trabalhos que considerassem ambos os aspectos nesse tipo de edificação (na procura que havia sido feita, somente havia sido encontrado o trabalho de Rupp e Ghisi, 2012). Foram feitas simulações considerando-se apenas dois cenários: com ar condicionado durante todo o período ocupado e com a estratégia de ventilação híbrida. O objetivo era avaliar a influência de parâmetros de projeto nesse tipo de

⁷ Graus-hora de desconforto por frio e por calor totais anuais calculados em função dos limites superior e inferior de conforto estabelecidos pela abordagem adaptativa descrita na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), correspondentes a 80% dos usuários satisfeitos com as condições térmicas do ambiente.

edificação, identificando as melhores soluções do ponto de vista de conforto visual e eficiência energética.

Considerou-se uma saleta comercial similar à do estudo anterior, com uma janela na fachada principal e porta interna voltada a um corredor, mas com área útil de 36 m^2 , que corresponde à área média para essas salas na cidade de estudo, segundo levantamento efetuado em BUILDINGS (2016). Foi investigada toda a faixa de variação possível para as proporções dessa saleta, a partir da mesma área (1:3, 1:2, 1:1, 2:1 e 3:1; relação entre as suas largura e profundidade), alterando-se também o seu PAF, percentual de abertura na fachada (10, 40, 70 e 100%), e orientação em relação ao sol (norte, sul, leste e oeste) (Figura 29).

Figura 29 – Geometrias das saletas comerciais estudadas
Fonte: Santesso (2017)

O método, cuja descrição detalhada encontra-se em Santesso (2017), apresentou algumas semelhanças em relação ao estudo anterior. Utilizou-se o

EnergyPlus e módulo *Airflow Network*, e a iluminação natural foi simulada pelo programa DIVA-for-Rhino (SOLEMMMA, 2014), considerando-se a sua complementação por um sistema energeticamente eficiente e dimerizável. O controle de abertura e fechamento das janelas e do acionamento do ar condicionado foi o mesmo adotado anteriormente. Os ganhos internos e o sistema construtivo não diferiram significativamente do que já havia sido adotado no estudo da seção anterior.

A avaliação do conforto visual considerou o parâmetro UDI (do inglês, *useful daylight illuminance*, ou seja, iluminância útil da luz natural), proposto por Nabil e Mardaljevic (2005, 2006). Considera-se que há risco de desconforto visual por ofuscamento, devido à intensa quantidade de luz natural no ambiente, quando, em um determinado ponto da sala (na altura do plano de trabalho), a iluminância encontra-se acima de 2000 lux ($UDI > 2000$). Assim, obteve-se a porcentagem de horas ocupadas do ano, para cada ponto da malha do plano de trabalho, em que o UDI era maior que 2000 lux.

Os resultados são descritos abaixo.

- Foi possível atingir, em todas as saletas comerciais analisadas, para as maiores aberturas na fachada (PAF's de 40, 70, 100%), uma redução entre 33,7 e 51,2% do consumo do ar condicionado para resfriamento, ao se comparar as mesmas salas utilizando um sistema de climatização constante. Diferencia-se desse conjunto apenas a menor área de abertura na fachada (PAF de 10%), que apresentou menores reduções, entre 1,7 e 30,2%.
- A forma da sala e o PAF foram os dois principais parâmetros de projeto que influenciaram tanto no consumo de energia quanto no conforto visual. A forma da sala se mostrou essencial para a decisão da área envidraçada na fachada.
- As salas menos profundas e mais largas (2:1 até 3:1) devem ter áreas de janela menores, para que se obtenha um menor consumo energético e menor risco de ofuscamento. O menor PAF estudado foi o de 10%. No entanto, essa área não satisfaz a necessidade de contato visual com o exterior, e, portanto, caberia ao projetista tentar estabelecer a dimensão mínima possível, observando sempre que o consumo do ar condicionado aumenta com o

aumento do PAF, bem como o risco de ofuscamento, especialmente para pontos próximos à janela.

- Para salas mais quadradas (1:1), pode-se utilizar janelas com PAF's maiores (até 40%), para se conseguir menor consumo energético. Porém, em salas com essa forma, não é fácil conciliar os requisitos de conforto visual. Apesar da janela como PAF de 40% fornecer o menor consumo de energia para o ar condicionado, há o alto risco de ofuscamento, tanto em pontos próximos à janela (1,20 m), quanto até nos mais afastados (2,4 m). O maior risco de ofuscamento pode fazer com que o usuário tenha que se adaptar, mudando de posição na sala ou utilizando proteções solares e persianas, por exemplo. Estas últimas podem diminuir a eficiência da ventilação e iluminação naturais.
- As salas mais estreitas e profundas (1:2 até 1:3) apresentaram um consumo menor de energia, inclusive com janelas maiores (valores com PAF's próximos de 40 a 100%). Contudo, essas áreas de abertura na fachada correspondem a um elevado risco de ofuscamento nos pontos próximos à janela, tendo-se o mesmo problema já observado para as salas quadradas (1:1).

6.6 Considerações finais

Os trabalhos deste Capítulo se referem a saletas comerciais de modo misto, que possuem janelas operáveis e equipamento de ar condicionado do tipo *Split*. Primeiramente, avaliou-se o potencial de economia de energia para as cidades de São Carlos/SP e Natal/RN, com a adoção de estratégias de ventilação híbrida. Essa opção se mostrou mais eficiente para a cidade de São Carlos/SP, quando obteve-se uma economia em torno de 30% do consumo do ar condicionado, e uma redução do desconforto, em comparação ao uso apenas da ventilação natural, entre 75 e 84%. Já para Natal/RN, essa estratégia não se mostrou eficiente porque as temperaturas internas encontraram-se quase sempre acima de 25 °C, que era a temperatura de controle para o acionamento do ar condicionado. Ao se alterar essa temperatura de controle para 27 °C, obteve uma redução de 15% desse consumo.

Em seguida, foi estudada a influência de variados parâmetros de projeto desse tipo de edificação (formato da sala, PAF e orientação solar), tanto no seu desempenho energético quanto visual, para a cidade de São Paulo/SP. Notou-se que as salas menos profundas e mais largas devem ter a mínima área de janela possível (desde que se permita ao usuário o contato visual com o exterior), para que se obtenha um menor consumo energético e menor risco de ofuscamento. Já as salas mais estreitas e profundas permitem áreas de janela um pouco maiores, pois apresentam um consumo menor de energia para os PAFs intermediários, no entanto, deve-se sempre observar o risco de ofuscamento, que pode ser elevado nos pontos próximos à janela (ou até a uma certa distância da mesma).

7 CONCLUSÕES

O texto apresentado reflete a trajetória de amadurecimento nas atividades de pesquisa, que se iniciaram com as orientações de Iniciação Científica, passaram pelos primeiros Projetos de Pesquisa (FINEP/INOVATEC), e prosseguiram com a inserção na Pós-graduação e as orientações de Mestrado. Nesse período, houve o estabelecimento de vínculos com colaboradores externos, sendo os principais, a equipe da NCSU e o IPT. O tema que permeia todos os trabalhos é a avaliação do desempenho termoenergético de edificações. Sintetiza-se a seguir, as principais contribuições dessas pesquisas.

- Com relação aos métodos para avaliação do desempenho termoenergético de espaços construídos (Heliodon, Mesa d'Água e programas computacionais simples de apoio ao projeto): estudo do seu potencial de uso, elaboração de Manuais ou fontes de consulta e descrição de exemplos de sua aplicação, para fins didáticos (Graduação).
- Com relação ao método adotado no *Workshop* ZEMCH: análise de todo o processo, de modo a contribuir para que em suas versões futuras haja uma avaliação mais adequada do desempenho termoenergético das propostas de habitações.
- Identificação das necessidades de melhoria do procedimento simplificado da ABNT NBR 15575, para a avaliação do desempenho térmico de habitações, tendo sido um dos primeiros estudos que avaliou essa Norma.
- Metamodelos (equações) para uso nas fases iniciais de projeto, que permitem a avaliação do desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea e isolada, representativa do que é usualmente construído no Brasil (válidos para a análise do desconforto por calor, em Manaus, e por frio, em São Paulo e Curitiba).
- Descrição do processo de elaboração dos metamodelos voltados a habitações naturalmente ventiladas, que são escassos na literatura, incluindo as simplificações de zoneamento térmico e de inserção das construções no programa de simulação *EnergyPlus*.

- Quantificação do impacto de variadas alternativas de modelagem de habitações de interesse social ventiladas, térreas e isoladas (ou similares) em programas de simulação computacional, no seu desempenho térmico: consideração dos caixilhos, dos beirais, das venezianas, uso das medidas internas ou externas das paredes, simplificação do zoneamento térmico e opções quanto à temperatura de controle das janelas.
- Quantificação do impacto de muros e de proteções solares variadas na ventilação natural e nas temperaturas interiores de uma habitação, na cidade de Natal/RN. Esta pesquisa traz informações relevantes e completas, que podem contribuir de variadas formas em análises do desempenho térmico de edificações similares (quantificação do impacto nos coeficientes de pressão e nas taxas de renovação de ar e de como isso se reflete nas temperaturas interiores, além da própria avaliação da eficiência dos elementos estudados).
- Estudo do pré-processador *Slab*, do *EnergyPlus*, tendo sido verificado o impacto de variadas alternativas de modelagem e identificados os parâmetros de maior influência, frente a um estudo experimental.
- Estudo do potencial de adoção de estratégias de ventilação híbrida em saletas comerciais nas cidades de São Carlos/SP e Natal/RN, e avaliação, para a cidade de São Paulo/SP, da influência de variados parâmetros de projeto dessas saletas no seu desempenho energético e em seu conforto visual. A relevância dessas pesquisas se dá pelos poucos trabalhos que tratam tanto da ventilação híbrida no Brasil, quanto da integração entre conforto visual e ventilação natural nesse tipo de edifício (com janelas operáveis).

Quanto às perspectivas futuras, têm-se as primeiras orientações de Doutorado, que por se encontrarem em andamento não fizeram parte deste texto, mas que também se relacionam à avaliação do desempenho termoenergético de edificações. Na primeira delas (aluna Rosilene Brugnera), o objeto de estudo é um edifício de escritórios do tipo panorâmico, e a intenção é a avaliação do seu desempenho de uma forma mais completa, incluindo tanto o consumo de energia quanto os impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida. Para isso, serão comparadas algumas soluções de fachada, em diferentes contextos climáticos do Brasil. O segundo e o terceiro trabalhos (alunas

Camila Grassi e Caroline Santesso, respectivamente) também tratam de edifícios de escritórios, mas no caso, de saletas comerciais de modo misto. No caso da segunda pesquisa, pretende-se contribuir para a avaliação mais adequada do desempenho termoenergético desse tipo de edificação via simulação, por meio da criação de um algoritmo que simule o comportamento do usuário frente à operação das janelas e do ar condicionado, nas cidades de São Carlos e São Paulo, o qual será baseado em medições experimentais ao longo de um ano. Já o terceiro trabalho pretende criar metamodelos que permitam a análise do desempenho energético desse tipo de edificação nas fases iniciais de projeto. Finalmente, a última pesquisa (aluna Michele Rossi) visa efetuar um estudo do impacto das características projetuais de diferentes dispositivos de sombreamento no desempenho da ventilação natural em um modelo genérico, por meio de testes no Túnel de Vento e de simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*), de modo a auxiliar na consideração desses elementos de forma mais apropriada nas avaliações de desempenho.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD, F. *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James & James. 2002.

ANCHIETA, C. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of solar incidence and shading devices*. 2016. 156 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

ANDOLSUN, S. et al. EnergyPlus vs DOE-2.1e: the effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code houses in four climates of the US. *Energy and Buildings*, Lausanne, v. 52, p. 189–206, Sept. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.012>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: ASHRAE, 2010.

ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: ASHRAE, 2013.

ASHRAE. *Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*. Atlanta: ASHRAE, 2011. Disponível em: <https://www.ashrae.org/.../docLib/.../2004715124811_347.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220: desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho*. Rio de Janeiro, 2013.

BAHNFLETH, W. P. *Three-Dimensional Modelling of Heat Transfer From Slab Floors*. Thesis (University of Illinois, Urbana, 1989.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 79-97, dez. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212011000400007>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. *Introdução à ventilação natural*. Maceió: EDUFAL, 2008.

BRAGER, G. S.; RING, E.; POWELL, K. Mixed-mode ventilation: Hvac meets Mother Nature. *Engineered Systems*, Troy, MI, p. 60-70, May 2000.

BRITO, A. C. et al. Contribuições para o aprimoramento da NBR 15575 referente ao método simplificado de avaliação de desempenho térmico de edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: ENTAC, 2012.

BRUGNERA, R. R. ; RORIZ, V. ; CHVATAL, K. M. S. Temperatura de acionamento de condicionadores de ar e ventiladores. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 12., ENCONTRO LATIOMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC), 8., 2013, Brasília, DF. *Anais...* Brasília, DF: ANTAC, 2013.

BRUGNERA, R. R. *Potencial de economia de energia em edifícios com estratégias de ventilação híbrida*. 2014. 120 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BUENO, C.; CHVATAL, K. M. S. Possibilidades de aplicação de ferramentas de análise da ventilação natural durante a concepção de projetos arquitetônicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (SBQP), 2009, São Carlos, SP. *Anais...* São Carlos: EESC-USP, 2009.

BUILDINGS. *Primeira empresa brasileira especializada em pesquisa imobiliária corporativa*. 2016. Disponível em: <<http://www.buildings.com.br>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. *Programa Minha Casa Minha Vida*. 2016. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/voce/habitacao/minha-casa-minha-vida/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

CÂNDIDO, C. et al. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. *Building and environment*, Oxford, v. 45, p. 222-229. 2010.

CARLO, J.; LAMBERTS, R. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: effect of different variables on electricity consumption. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 40, Issue 10, p. 2002-2008, 2008.

CARRIÈRES, K.R. M. *Desempenho Térmico e Consumo Energético de Edifícios de Escritórios em São Carlos, SP*. 2007. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

CASATEJADA, M. P. *Simplificações na modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico EnergyPlus*. 2017. 142 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

CASATEJADA, M. P.; CHVATAL, K. M. S. ; RANJITHAN, R. Assessing the impact of zoning on the thermal comfort analysis of a naturally ventilated house during early design considering closed internal doors. In: PLEA INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 33., 2017, Edimburgo.

Proceedings... Edimburgo: PLEA, 2017. v.1. Disponível em:

<http://nceub.org.uk/PLEA2017/proceedings/PLEA2017_proceedings_volume_1.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2017.

CASATEJADA, M. P.; CHVATAL, K. M. S. Comparação entre os horários habituais e recomendados de abertura tanto de janelas quanto de portas internas em habitações brasileiras. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 14., 2017, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú: ANTAC, 2017.

CATALINA, T.; IORDACHE, V.; CARACALEANU, B. Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 57, p. 302–312, Feb. 2013.

CATALINA, T.; VIRGONE, J.; BLANCO, E. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 40, n. 10, p. 1825–1832, Jan. 2008.

CHAND, I.; BHARGAVA, P. K.; KRISHAK, N. L. V. Effect of balconies on ventilation inducing aeromotive force on low-rise buildings. *Building and Environment*, Oxford, v. 33, n. 6, p. 385–396, 1998.

CHAND, I.; KRISHAK, N. L. V. Laboratory studies of the effect of louvers on room air motion. *Building Science*, Oxford, v. 6, n. 4, p. 247–252, 1971.

CHANG, W. R. Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building. *Building and Environment*, Oxford, v. 41, n. 5, p. 549–556, 2006.

CHANG, W. R.; CHENG, C. L. Modulation of Cross Ventilation in a Residential Building Using a Porous Hedge. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Taiwan, v. 30, p. 409-417, 2009.

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, 2014.

CHVATAL, K. M. S. et al. Exploration of the ZEMCH Workshop USP 2015. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ZERO ENERGY MASS CUSTOM HOME (ZEMCH) NETWORK, 4., 2015, Lecce. *Proceeding...* Lecce: ZEMCH Network, 2015.

CHVATAL, K. M. S. The effect on energy consumption of buildings with higher thermal resistance in hot climates. In: RENEWABLE ENERGY 2010 CONFERENCE,

2010, Yokohama, Japan. *Proceedings...* Yokohama, Japan: The Renewable Energy 2010 Organizing Committee, 2010.

CHVATAL, K. M. S.; CORVACHO, M. H. P. The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption. *Journal of Building Performance Simulation*, Abingdon, v. 2, p. 267-282, 2009.

CHVATAL, K. M. S.; MARQUES, T. H. T. Avaliação de diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social no Programa de simulação de desempenho térmico Energyplus. *Revista Tecnológica*, Maringá, v. 25, n.1, p. 67-79, 2016. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/28690/17130>. Acesso em: 24 ago. 2017.

CHVATAL, K. M. S.; NICOLAU, M. F. Simple computational tools to help the design of low energy buildings. In: RENEWABLE ENERGY 2010 CONFERENCE, 2010, Yokohama, Japan. *Proceedings...* Yokohama, Japan: The Renewable Energy 2010 Organizing Committee, 2010.

CHVATAL, K. M. S.; REGOLÃO, R. Estudo do Potencial de utilização do heliodon em projetos arquitetônicos. In: CONFERENCIA LATINOAMERICANA DE ENERGIA SOLAR (ISES-CLA), 4., 2010, Cusco, Peru. *Anais...* Lima, Peru: APES, 2010.

CHVATAL, K. M. S.; RORIZ, V. F. Avaliação do desempenho térmico de habitações segundo a ABNT NBR15575. In: FABRICIO, M. M.; ONO, R. (Org.). *Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: manutenção e percepção dos usuários*. [Porto ALEGRE]: ANTAC, 2015, p. 41-54.

CHVATAL, K. M. S.; ROSSI, M. M. The effect of distinct ventilation strategies on thermal performance of buildings with high thermal resistance in Brazil. In: ROOMVENT CONFERENCE , 12., 2011, Trondheim, Noruega. *Proceedings...* Trondheim: NTNU, 2011.

CLEMENTS, E. Three Dimensional Foundation Heat Transfer Modules for Whole-Building Energy Analysis. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2004.

COSTA, V. A. C. C. Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador *Slab*. 2017. 172 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

COSTA, V. C.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade heat transfer in Energyplus simulation program. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 117-135, Jul. 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000300117&lng=en&nrm=iso. Access em: 22 ago. 2017.

COSTA, V.; CHVATAL, K. Manual do Slab. Versão 1 . 2017. Disponível em <<http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/professora-karin/>>. Acesso em 28 set. 2017.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment*, Oxford, v. 44, n. 10, p. 2027–2036, 2009.

DORNELLES, K. A. *Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA*. Campinas: [s.n.], 2008.

EISENHOWER, B. et al. A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 47, p. 292–301, Apr. 2012.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. EnergyPlus. Version 8.1.0. Washington, 2014. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm>. Acesso em: 08 jan. 2014.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. EnergyPlus. Version 8.5.0. Washington, 2016. Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>>. Acesso em: 08 ago. 2017.

ESTADOS UNIDOS. Department of energy. *EnergyPlus: building energy simulation software*. Washington, 2013.

ESTADOS UNIDOS. Department of energy. Slab. Version .75. Washington, 2016b. Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

EZZELDIN, S.; REES, S. J. The potential for office buildings with mixed-mode ventilation and low energy cooling systems in arid climates. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 65, p. 368–381, Oct. 2013.

FAVRETTO, A. P. O. et al. Assessing the impact of zoning on the thermal comfort analysis of a naturally ventilated house during early design. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 14., 2015, Hyderabad, India. *Proceedings...*Hyderabad, India: IBPSA, 2015.

FAVRETTO, A. P. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of opaque envelope*. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

HELTON, J. C. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal. *Reliability Engineering & System Safety*, Barking ,v. 42, n. 2-3, p. 327–367, jan. 1993. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832093900971>>. Acesso em: 25 set. 2015.

HENSEN, J. et al. Building performance simulation for better design: some issues and solutions. In: PLEA INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 21., 2004, Eindhoven, Netherlands. *Proceedings...* Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2004.

HIEN, W. N.; ISTIADJI, A. D. Effects of external shading devices on daylighting and natural ventilation. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 8., 2003, Eindhoven, Netherlands. *Proceedings...* Eindhoven, Netherlands: IBPSA, 2003. p. 475–482.

HOBBS, D. et al. Experience of using building simulation within the design process of an architectural practice. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 8., 2003, Eindhoven, Netherlands. *Proceedings...* Eindhoven, Netherlands: IBPSA, 2003. p. 491-498.

HU. J.; KARAVA, P. Model predictive control strategies for buildings with mixed-mode cooling. *Building and Environment*, Oxford, v. 71, p. 233–244, 2014.

HYGH, J. S. et al. Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. *Building and Environment*, Oxford, v. 57, p. 165–175, 2012.

Disponível em: <http://www4.ncsu.edu/~jfdecaro/papers/Hygh_etal_2012.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017

HYGH, J. S. et al. Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. *Building and Environment*, Oxford, v. 57, p. 165-175. Nov. 2012.

HYGH, J. S. *Implementing energy simulation as a design tool in conceptual building design with regression analysis*. 2011. 50 p. Thesis (Master of Science)- Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria n. 18, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética edificações residenciais (RTQ-R). Rio de Janeiro: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria n. 372, de 17 de setembro de 2010. Requisitos Técnicos da Qualidade Para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Rio de Janeiro: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria n. 18, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade - RTQ para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2012. Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>>. Acesso em: mar. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria n. 163, de 08 de junho de 2009. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Rio de Janeiro Rio de Janeiro: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2009. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001462.pdf>>. Acesso: 10 mar. 2013.

KOROLIJA, I. et al. Regression models for predicting UK office building energy consumption from heating and cooling demands. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 59, p. 214–227, Apr. 2013.

LAM, J. C. et al. Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates. *Energy Conversion and Management*, Oxford, v. 51, n. 12, p. 2692–2697, Dec. 2010.

LARSEN, S. F. Modelización de la Transferencia de Calor al Suelo en los Programas de Simulación Térmica de Edificios EnergyPlus y SIMEDIF. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Salta, Argentina, v. 15, p. 27–34, 2011.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. EnergyPlus Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. California, May, 2012.

LOMAS, K. J.; EPPEL, H. Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 19, n. 1, p. 21–44, 1992. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90033-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90033-D)>. Acesso em: ago. 2017.

LOURA, R. M.; ASSIS, E. S.; BASTOS, L. E. G. Análise Comparativa Entre Resultados de Desempenho Térmico de Envoltórias de Edifício Residencial Gerados Por Diferentes Normas Brasileiras. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2011, Búzios. *Anais...* Búzios: ANTAC, 2011.

MACDONALD, I. A. *Quantifying the effects of uncertainty in building simulation*. 2002. 253 p. Thesis (Doctor of Philosophy)-Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2002. Disponível em: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/PhD/macdonald_thesis.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2017.

MALARD, M. L. et al. Avaliação pós-ocupação, participação de usuários e melhoria de qualidade de projetos habitacionais: uma abordagem fenomenológica com o apoio do Estado. In: ABIKO, A. K.; ORNSTEIN, S. W. (Ed.). *Inserção Urbana e*

Avaliação Pós-ocupação (APO) da habitação de Interesse Social. São Paulo: FAUUSP, 2002. (Coletânea Habitare/FINEP, 1), p. 242-267.

MARÍN CASTAÑO, H. F. *Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea*. 2017. 178 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MARÍN, H. F.; CASATEJADA, M. P.; CHVATAL, K. M. S. Impacto da temperatura de controle na operação das janelas e no conforto térmico para uma habitação de interesse social naturalmente ventilada em São Carlos – SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MARQUES, T. H. T. *Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP*. 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MARQUES, T. H. T.; CHVATAL, K. M. S. A review of the Brazilian NBR15575 Norm: applying the simulation and simplified methods for evaluating a social house thermal performance. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN, 4., 2013, San Diego, USA. *Proceedings...* San Diego, USA: Society for Modeling and Simulation International, 2013.

MARQUES, T. H. T.; REGOLÃO, R.; CHVATAL, K. M. S. Aplicação de ferramentas simplificadas de projeto voltadas ao desempenho térmico em uma habitação de interesse social. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (SBQP), 2., 2011, Rio de Janeiro. *Anais....* Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.

MASOSO, O. T.; GROBLER, L. J. A new and innovative look at anti-insulation behaviour in building energy consumption. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 40, n. 10, 2008, p. 1889-1894, 2008.

MATHWORKS. Matlab. Version R2013a. Natick, MA, 2013. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/new_products/release2013a.html>. Acesso: 22 ago. 2017.

MELO, A. P. et al. Development and analysis of a metamodel to represent the thermal behavior of naturally ventilated and artificially air-conditioned residential buildings. *Energy and Buildings*, Lausanne, v.112, p. 209-221, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.021>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Opaque envelope parameters versus energy consumption in commercial buildings in Brazil. *Journal of Building Performance Simulation*, Abingdon, v. 1, n. 4, p. 237-244, 2008.

MENASSA, C. C.; TAYLOR, N.; NELSON, J. A framework for automated control and commissioning of hybrid ventilation systems in complex buildings. *Automation in Construction*, Amsterdam, v. 30, p. 94-103, 2013.

MENDES, A. L. *Estudo para reforma do heliodon e elaboração de procedimentos para seu uso, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para o Programa Ensinar com Pesquisa da USP*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2010.

MENEGUETTI, K. S.; BELOTO, G. E. Entre a rua e o muro: a construção de uma interface nos condomínios horizontais fechados. *Paisagem e Ambiente*, São Paulo, n. 37, p. 35-49, jul. 2016. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/paam/article/view/102893>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, Oxford, v. 60, p. 137–149, 2013.

MORBITZER, C. A. *Towards the Integration of Simulation into the Building Design Process*. 2003. 260 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, 2003. Disponível em: <http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/PhD/morbitzer_thesis.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*, London, v. 37, n. 1, p. 41–59, 2005.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, Lausanne, v. 38, n. 7, p. 905–913, 2006.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA. Harvard University. DAYSIM, Version 3.1. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Alemanha, 2010.

NICOLAU, M. F. *Conforto ambiental e projeto arquitetônico: estudo de metodologias de apoio, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para o Programa Ensinar com Pesquisa/USP*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC-USP, 2010.

NICOLAU, M. F.; CHVATAL, K. M. S. Análise de programas computacionais simples de apoio a projetos bioclimáticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 2010, Canela, RS. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2010.

OLGYAY, V. *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático*. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

PRIANTO, E.; DEPECKER, P. Characteristic of airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity: a case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region. *Energy and Buildings*, Lausanne, v. 34, n. 4, p. 401–409, 2002.

QUAN, Y. et al. TPU aerodynamic database for low-rise buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 12., 2007, Cairns, Australia. *Proceedings...* Cairns, Australia: Australasian Wind Engineering Society, 2007.

REGOLÃO, R. *Estudo do Potencial de utilização do heliodon em projetos arquitetônicos, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para a FIPAI-Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2009.

REGOLÃO, R.; CHVATAL, K. M. S. *Manual de Utilização: Heliodon*. São Carlos: Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2009.

RIZOS, I. *Next generation energy simulation tools: Coupling 3D sketching with energy simulation tools*. 2007. 99 p. Thesis (Master of Science) - Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, 2007. Disponível em: <http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2007/Rizos.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017.

ROLIM, A. C. I. *A mesa d'água como ferramenta didática para o estudo qualitativo da ventilação natural no ambiente construído, Relatório Final de Bolsa de Iniciação Científica apresentado para o CNPq/PIBIC/USP*. São Carlos: IAU-USP, 2015.

ROLIM, A. C. I.; CHVATAL, K. M. S. A mesa d'água como ferramenta didática para o estudo qualitativo da ventilação natural no ambiente construído. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (SIICUSP), 23., 2015, São Paulo. *Anais...* São Paulo: USP, 2015.

ROLIM, A. C. I.; CHVATAL, K. M. S. *Manual Técnico da Mesa d'Água*. IAU-USP: São Carlos, 2015.

RORIZ, M. *Arquivos climáticos de municípios brasileiros*. 2012. Disponível em: <http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Sobre_os_arquivos_EPW.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017.

RORIZ, M.; CHVATAL, K. M. S.; CAVALCANTI, F. S. Sistemas construtivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto. In: ENCONTRO NACIONAL (ENCAC), 10., ENCONTROS NACIONAL E LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC), 6., 2009, Natal. *Anais...* Natal: [s.n.], 2009.

RORIZ, V. F.; CARAM, R.; RORIZ, M. Absortâncias e emitâncias efetivas de superfícies: um método para estimá-las e exemplos de suas importâncias. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 11., 2011, Búzios. *Anais...* Búzios: ANTAC, 2011.

ROSSI, M. M. *Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation*. 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

ROWE, D. A study of a mixed mode environment in 25 cellular offices at the University of Sydney. *International Journal of Ventilation*, Coventry , v.1, n. 4, p. 53-64, 2003.

ROWE, D.; DINH, C. T. An experiment with hybrid ventilation: a more sustainable approach to thermal comfort. *Architectural Science Review*, Sydney, v. 44, n. 2, p. 127-133, 2001.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, p. 75–86, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212013000400006>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Sizing Window Areas for Daylighting and Hybrid Ventilation in Commercial Buildings. In: INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE ON SUSTAINABLE ARCHITECTURE + URBAN DESIGN, 28., 2012, Lima, Peru. *Proceedings...* Lima, Peru: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012, p. 1–6.

SALTELLI, A. *Mathematical and Statistical Methods: Sensitivity Analysis*. London: John Wiley & Sons, 2001.

SANTESSO, C. A. Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto. 2017. 172 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SCHLUETER, A.; THESSELING, F. Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in Construction*, Amsterdam, v. 18, n. 2, p. 153–163, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.07.003>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

SIGNOR, R.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings in 14 Brazilian cities. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 7., 2001, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro, Brasil: IBPSA, 2001.

SILVA, A. S. et al. Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 103-117, out. /dez. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000400008>>. Acesso em: 23 ago. 2017.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 289–303, mar. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100136>>. Acesso em: mar. 2017.

SINDA. Sistema de Coleta de Dados Ambientais. Disponível em: <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>>. Acesso em 17/03/2013.

SOLEMMA. DIVA-for-Rhino Solemma LLC, 2014. Disponível em: <<http://diva4rhino.com>>. Acesso em: 31 jul. 2014.

SORGATO, M. J. et al. *Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública*. Florianópolis: Labee, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2015. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/notas_tecnicas/NT_15575_FINAL.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do Método de Simulação de Desempenho Térmico da Norma NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2013, Brasília. *Anais...* Brasília: ANTAC, 2013.

STRUCK, C.; HENSEN, J. L. M. On supporting design decisions in conceptual design addressing specification uncertainties using performance simulation. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 10., 2007, Beijing, China. *Proceedings...* Beijing, China: IBPSA, 2007. p. 1434-1439.

STRUCK, C.; HENSEN, J.; KOTEK, P. On the Application of Uncertainty and Sensitivity Analysis with Abstract Building Performance Simulation Tools. *Journal of Building Physics*, London, v. 33, n. 1, p. 5–27, 15 jul. 2009.

TRAMONTANO, M.; SANTOS, D. M. Atrás dos muros: unidades habitacionais em condomínios horizontais fechados. In: CONGRESSO INTERNACIONAL EL HABITAR, 2., 1999, Buenos Aires. *Anales...* Buenos Aires: [s.n], 1999.

VERSAGE, R. S. *Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente*. 2015. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

WESTPHAL, F. S. *Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais*. 2007. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R. Regression analysis of electric energy consumption of commercial buildings in Brazil. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 10., 2007, Beijing, China. Proceedings... Beijing, China: IBPSA, 2007, p. 1543–1550.

WIT, M. S. de. Uncertainty in building simulation. In: MALKAWI, A. M.; AUGENBROE, G. (Ed.). *Advanced Building Simulation*. New York: Spon Press, 2004. p. 25-59. Disponível em: <http://117.3.71.125:8080/dspace/bitstream/DHKTDN/7136/1/4887.advanced%20building%20simulation.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2017.

WIT, S. M. de; AUGENBROE, G. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings*, Amsterdam, v. 34, n. 9, p. 951-958, 2002.

WU, S.; SUN, J. Q. Two-stage regression model of thermal comfort in office buildings. *Building and Environment*, Oxford, v. 57, p. 88–96, Nov. 2012.

APÊNDICE A