



III ENCONTRO NACIONAL I ENCONTRO LATINO-AMERICANO

Gramado, RS, 4 a 7 de julho de 1995

TÉCNICAS DE VALIDAÇÃO DE PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Paulo Smith Schneider, Eng. Mecânico, Dr.

Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos - Depto Eng- Mecânica - UFRGS

Rua Sarmento Leite 425, 90050-170, Porto Alegre, RS

Tel. : (051) 228 16 33 r. 3165 Fax : (051) 226 03 21 e-mail : pss@vortex.ufrgs.br

RESUMO

Este artigo trata das técnicas empregadas para a validação de programas de simulação do comportamento térmico de edificações. Apresenta inicialmente uma revisão de vários procedimentos clássicos encontrados na literatura, aplicáveis na sua maioria à programas já desenvolvidos. Logo após descreve procedimentos suplementares, na maior parte constituídos por testes de consistência, elaborados ao longo do desenvolvimento do programa de simulação COBRA. Estes focalizam a modelização dos fenômenos ou sistemas elementares, e verificam se os comportamentos esperados são encontrados, baseado numa análise de bom senso físico. Estes testes de consistência constituem uma forma rápida e barata de verificação de algoritmos e sub rotinas. A validação completa de um programa de simulação, entretanto, deverá incluir o maior número possível de testes.

ABSTRACT

This paper shows some techniques to validate simulation softwares of thermal behavior of buildings. It presents a review of some classical proceedings from the literature, well feted to already finished softwares. Later on it describes some new proceedings; or logical tests, worked out during the development of a simulation software called COBRA. This tests concern the modeling of phenomena or physical systems, and they search to verify known behaviors, based on physical knowledge. They are a cheap and rapid way of verifying algorithms and subroutines. The complete validation of a simulation software shall, however, include the biggest number of tests as possible.

PALAVRAS-CHAVE

Comportamento térmico de edificações, Simulação, Validação

INTRODUÇÃO

Validar um programa de simulação do comportamento térmico de edificações é uma tarefa complexa. A grande diversidade de parâmetros e de variáveis envolvidas na edificação faz com que a análise da influência de cada um deles seja bastante difícil de ser realizada. A este fato somam-se as incertezas geradas pela modelização da realidade física da edificação. Segundo IRVING, a finalidade da validação é de estabelecer a exatidão das soluções produzidas, de determinar os campos de valores para os quais os modelos são válidos e de adapta-los aos domínios de aplicação. Este mesmo autor salienta que o

tempo dedicado à validação de grandes programas de simulação pode ultrapassar os 60% do tempo total de desenvolvimento.

Dedicamos a parte inicial deste trabalho à uma revisão de sistemáticas de validação consagradas, dirigidas especificamente à programas de térmica de edificações. À seguir, passamos ao objeto principal deste artigo, que é de apresentar alguns procedimentos de validação que foram elaboradas ao longo do desenvolvimento de um programa de simulação do comportamento térmico de edificações [SCHNEIDER]. Estes procedimentos são essencialmente compostos pôr testes de consistência, baseados no comportamento teórico esperado dos fenômenos e dos sistemas físicos modelizados. Estes testes podem ser empregados tanto na fase de desenvolvimento de novas rotinas de um programa como também para um programa pronto. Em ambos os casos a execução dos procedimentos de teste não envolvem conhecimentos de programação específicos, mas principalmente conhecimentos ligados ao comportamento físico da edificação.

2 REVISÃO DAS TÉCNICAS DE VALIDAÇÃO

As técnicas que serão apresentadas à seguir resultam de experiências consagradas de validação de programas de simulação do comportamento térmico de edificações. JUDKOFF, que dirigiu pesquisas neste âmbito no Instituto de Pesquisa em Energia Solar (SERI), propõe três modalidades de testes de verificação :

1- Analítica : os resultados de soluções numéricas são comparados à soluções exatas, tomadas como referências. Estes testes envolvem algoritmos ou sub-rotinas de cálculo, e procuram avaliar a exatidão dos esquemas numéricos em função das discretizações empregadas e dos erros de truncatura. É um procedimento relativamente barato, mas não envolve a qualidade da modelização física propriamente dita, além de ser restrito aos casos onde a solução analítica é conhecida.

2- Empírica : os dados completos de simulação são comparados com resultados experimentais. Esta etapa é considerada pelo autor como a mais importante, pois o programa é confrontado à realidade física que ele se propõe reproduzir. Os dados obtidos pôr medições são tomados como referência, apesar de suas incertezas, e permitem a validação de, qualquer tipo de código de cálculo, independentemente de sua complexidade. O alto custo de obtenção de medidas de boa qualidade limita a utilização deste teste.

3- Comparativa : trata-se de comparar os resultados oriundos de vários programas similares, onde nenhum deles é utilizado como referência. A dispersão das respostas é causada principalmente pelas diferenças entre os modelos utilizados (finesa de cálculo e complexidade da representação dos fenômenos), e pêlos erros de manipulação dos usuários (interpretação dos dados de entrada, digitação, etc.).

Além destes, IRVING propõe alguns testes adicionais :

- Teste de adaptação individual : baseia-se na constatação que os programas devem ser adaptados ou voltados à realidade da simulação, e conter modelos mais refinados dos fenômenos ou sistemas que são preponderantes numa dada edificação. O conceito de qualidade dos modelos [BRAU] passa a ser importante. Como exemplo, sabe-se que um modelo de predição de aportes solares construído sob hipóteses grosseiras pode ter pouca influência sobre a qualidade global dos resultados de uma edificação pouco exposta ao sol.

- Teste de normalização : aplicados aos testes comparativos de programas, onde o desenvolvimento de especificações pode colaborar na quantificação dos erros dos modelos.

- Testes estatísticos : esta possante ferramenta pode auxiliar na **a)** estimação da exatidão das soluções numéricas, **b)** na comparação tanto entre resultados experimentais e simulados ou entre vários resultados simulados, e **c)** na análise de sensibilidade dos modelos.

3 TESTES DE CONSISTÊNCIA

Apresentamos aqui uma sistemática de testes e de verificações elaborada ao longo do desenvolvimento do programa COBRA [SCHNEIDER]. Este programa simula o comportamento térmico de edificações 'múltiplas' horizontais ou verticais, sendo que suas principais capacidades de predição são :

- Evolução livre das temperaturas dos ambientes internos da edificação, bem como de sua estrutura
- Trocas de ar por ventilação natural entre os vários ambientes (internos e externos) O cálculo pode ser feito separadamente, quando as temperaturas são conhecidas, como acoplado à seqüência térmica
- Cálculo de carga térmica de climatização (refrigeração e calefação)
- Acompanhamento de ciclos de regulação

Os testes são essencialmente qualitativos, e foram criados à partir da verificação do comportamento de certos fenômenos físicos dos sistemas que compõem as edificações, quando submetidas à determinadas condições de simulação. Os erros são identificados basicamente pela confrontação dos resultados simulados contra uma lógica de comportamento, que representa em última análise o bom senso físico. Dentre os testes de consistência elaborados, uma atenção especial é dada aos comportamentos em regime estacionário. Os testes nestas condições são os primeiros a serem avaliados, *pois o regime dinâmico é uma superposição do regime estacionário. Desta forma, além dos testes isolados, propomos uma metodologia de verificações.

3.1 Testes em regime estacionário

O regime permanente é uma passagem obrigatória para qualquer seqüência de cálculo no programa COBRA, antes deste passar as simulações em regime dinâmico. Esta prática permite estabelecer um campo de valores dos principais parâmetros de simulação (temperatura e pressão), coerentes tanto com os estímulos externos (condições climáticas e ambientais) como com os internos (cargas internas e de operação). Assim sendo, os dados lidos no primeiro passo de tempo de simulação servem para o cálculo do regime estacionário, e o restante dos dados para sua evolução dinâmica. Nesta primeira etapa é feita a maior parte das verificações propostas, como segue :

3.1.1 Verificação do comportamento condutivo da estrutura

Os testes aqui propostos envolvem paredes compostas por um só material (mono-camada), ou por vários materiais (multi-camada) sempre homogêneos, isotrópicos e com propriedades termo-físicas constantes. Supomos também que o fluxo de calor através das paredes seja unidirecional, calculado por métodos capazes de fornecer as temperaturas no interior da parede, além das temperaturas e dos fluxos de calor nas fronteiras (métodos de estado). Os testes adaptados à estas hipóteses de modelização são :

a) *Uma parede mono-camada (figura I) de espessura e deve aleixar passar a mesma quantidade de calor q e apresentar o mesmo perfil de temperaturas que uma parede multi-camada de mesma espessura total e onde cada camada é constituída pelo mesmo material, e em contato perfeito (resistência de contato nula).*

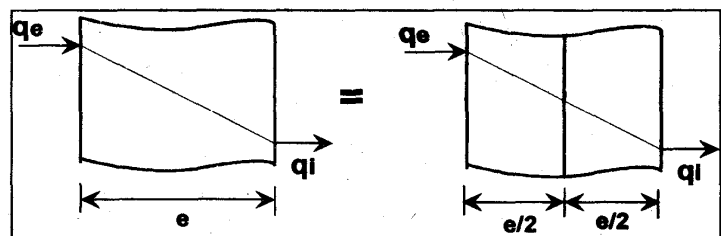


Figura I - Equivalência entre uma parede mono-camada e outra de duas paredes, ambas com mesma espessura e materiais.

b) *O perfil de temperaturas de uma camada qualquer de material deverá ser sempre linear. No caso de paredes multi-camadas, a inclinação de cada uma das retas de temperaturas será sempre mais acentuada quanto mais resistivo for o material.*

3.1.2 Verificação do comportamento radiativo das paredes

Pelas superfícies internas e externas da edificação acontecem trocas radiativas no espectro térmico (ondas longas, $\lambda > 2.5\mu\text{m}$), e visível (ondas curtas $\lambda < 2.5\mu\text{m}$). Para ambos os casos, consideramos que as superfícies se comportam

como corpos cinzas com emissão e reflexão difusas. Apresentamos à seguir os testes relativos as trocas radiativas no interior de ambientes fechados, modelizadas pelo método de 'radiosidades' no programa COBRA, mas que são igualmente válidos para qualquer outro método mais simplificado.

a) Quando as diversas superfícies internas das peças estão à temperaturas diferentes (figura II), as trocas térmicas entre as superfícies que se 'enxergam' (fator de forma não nulo) no espectro das ondas longas devem provocar uma diminuição desta diferença de temperaturas. O teste aqui consiste em verificar este comportamento, comparando uma dada simulação à outra onde apenas os fluxos radiativos em ondas longas são anulados. Entre os vários artifícios possíveis para anular este fluxos, sugerimos zerar a emissividade ϵ , de todas as superfícies internas.

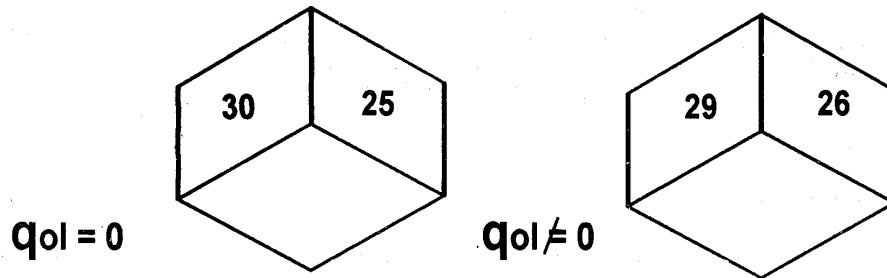


Figura II- Comportamento esquemático de trocas radiativas em ondas longas

b) A mesma técnica de verificação pode ser empregada para as trocas radiativas internas, causadas pela penetração da radiação solar. Tanto COBRA como a maioria dos programas de simulação admite que a fração direta desta radiação seja distribuída no piso da peça, enquanto que a fração difusa é associada as superfícies vidradas. Estas duas classes de superfícies sofrem um sobre-aquecimento (figura III), que deverá ser atenuado pelas trocas radiativas.

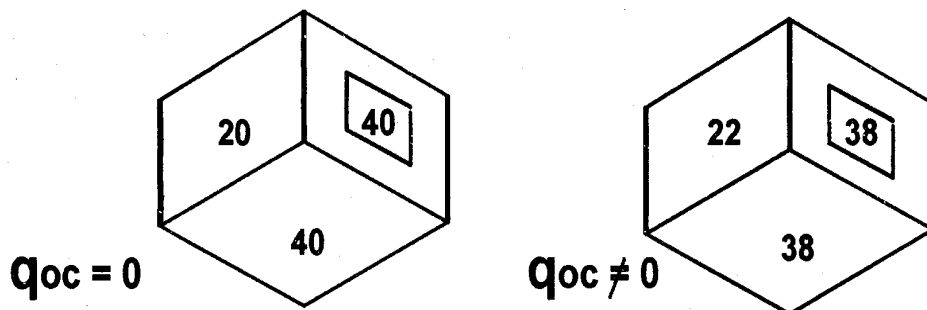


Figura III- Comportamento esquemático trocas radiativas em ondas curtas

3.1.3 Verificação das trocas convectivas de superfície

No programa COBRA, assim como em boa parte dos códigos de simulação existentes, estas trocas são expressas por intermédio do coeficiente de transmissão de calor por convecção h_{cv} , dados por correlações do tipo $h_{cv} = a(T_s - T_a)^b$ [ASHRAE], onde T_a e T_s são as temperaturas do ar e das superfícies de uma parede, e a , b e n são parâmetros da correlação.

a) Um primeiro teste consiste em supor uma parede composta por uma única camada de material homogêneo, em posição tanto horizontal como vertical, e forçar que os parâmetros a , b e n das superfícies opostas sejam iguais entre si. Neste caso, os valores dos coeficientes h_{cv} , deverão coincidir.

As lajes, ou paredes horizontais, apresentam trocas convectivas diferentes entre suas superfícies (piso e teto), segundo a direção do fluxo de calor.

b) Assim sendo, num regime de fluxo ascendente os valores de h_{cv} do piso deverão ser sempre superiores aos do teto.

3.1.4 Verificação das trocas por ventilação natural

Os fluxos de ar neste caso são gerados tanto por tiragem térmica como por ação do vento, e passam à través dos ambientes da edificação por intermédio de pequenas e grandes aberturas. As pequenas aberturas são as fissuras, tubos, condutos de serviço defeitos de vedação, etc. As grandes aberturas são os vãos de comunicação, representados aqui unicamente pelas aberturas verticais entre ambientes, internos.

Os testes com pequenas aberturas colocadas entre ambientes **cujas temperaturas do ar sejam diferentes** (fenômeno de tiragem térmica exclusivamente) devem provocar os seguintes comportamentos:

a) Fluxos de massa nulos, se houver alguma peça com apenas uma abertura.

b) Os fluxos de massa provenientes de um ambiente com 1 temperatura mais elevada (figura IV) devem passar pelas aberturas mais altas, assim como os fluxos provenientes de um ambiente mais resfriado devem passar pelas aberturas mais baixas.

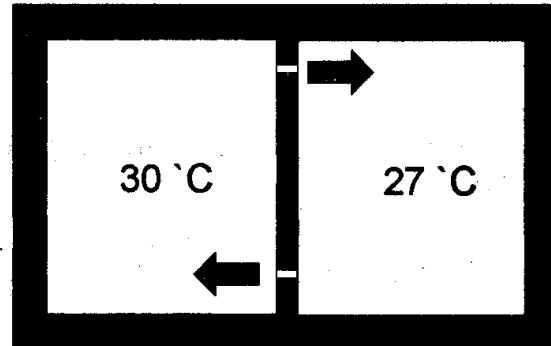


Figura IV- Sentido dos fluxos de ar entre duas peças à temperaturas diferentes

Ainda para as pequenas aberturas, onde todos os ambientes estejam a **mesma temperatura**, devemos obter os seguintes comportamentos:

c) Haverá fluxos de massa entre as peças onde as aberturas estiverem em diferentes alturas

d) Utilizando dados climáticos com vento exterior, todos os fluxos de massa deverão partir de locais onde a ação do vento provoque sobrepressões nas fachadas.

As grandes aberturas verticais internas, sujeitas exclusivamente ao fenômeno de tiragem térmica, devem provocar os seguintes comportamentos:

f) A homogeneização das temperaturas dos ambientes em contato.

g) O fluxo de massa que parte de um ambiente mais quente deyerá passar pela parte superior do eixo neutro de escoamento.

h) Óbvio demais, mas vale sempre a pena ser salientado, o balanço de massa em cada ambiente deve ser sempre nulo ($\sum m' = 0$).

3.2 Testes em regime transitório

O primeiro passo de tempo de simulação no programa COBRA calcula o regime permanente, através da anulação de todos os efeitos capacitivos dos materiais. O regime transitório segue após, levando em conta a inércia da edificação, tendo como ponto de partida os dados calculados em o regime permanente. Como primeiro teste em regime dinâmico sugere-se:

a) Construir um arquivo dados de entrada (climático + cargas internas) com todos os repelidos ao longo do tempo e calcular o regime permanente com o primeiro passo de tempo. Logo após o programa passa ao regime dinâmico, mas com os mesmos dados de entrada do regime permanente. Como as respostas dos dois regimes devem ser idênticas, pode-se identificar as eventuais falhas na formulação do regime transitório.

b) A resposta em regime dinâmico à uma excitação em 'degrau' (de uma temperatura, exemplo da figura V) deve obedecer à uma estabilização assintótica em relação ao novo regime permanente.

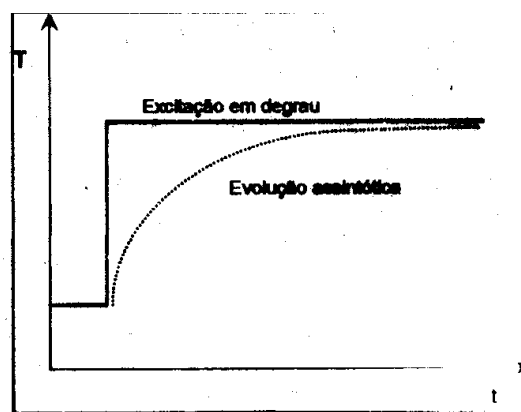


Figura V- Evolução assintótica da temperatura do ar de uma peça em resposta à excitação em degrau.

A simetria de uma edificação pode ser bem explorada nos aspectos geométricos, dos aportes externos e de ventilação natural.

c) A evolução das temperaturas internas simuladas para duas peças simétricas por exemplo, devem ser iguais se estas tiverem mesmas : dimensões, tipos de revestimento, condições de fronteira, aportes internos, conexões de ventilação.

3.3 Testes das estratégias de regulação

Quando assume-se a modelização do tipo 'perfeita' para a regulação (ausência de inércia dos sistemas de potência e controle) devemos verificar os seguintes comportamentos:

a) A sensibilidade da resposta de uma operação de regulação ao longo do tempo em função da potência de climatização instalada. Uma pequena potência disponível de refrigeração deverá levar mais tempo para atingir a temperatura de comando que para o caso de uma potência disponível superior.

b) Se a potência de climatização instalada é inferior à carga de regulação necessária, logo deve-se verificar que a temperatura de comando não será atingida.

4 CONCLUSÃO

Os procedimentos de validação apresentados neste artigo formam um conjunto extenso, e nem sempre é possível de aplicá-los na sua totalidade à um programa de simulação.

Quanto aos testes clássicos, salientamos que as validações analíticas podem ser utilizadas ainda durante a etapa de desenvolvimento, pois aplicam-se à sub-rotinas específicas, como à de condução de calor através de paredes; por exemplo. Já os testes de validação experimental e comparativo necessitam de programas já prontos, ou em estado de desenvolvimento já avançado.

As técnicas de validação propostas neste artigo, e desenvolvidas ao longo da elaboração do programa COBRA, são aplicáveis à partir do desenvolvimento de cada etapa. Elas formam um conjunto de testes de consistência tanto dos fenômenos físicos como dos sistemas modelizados, somando-se aos demais procedimentos de validação.

5 BIBLIOGRAFIA

ASHRAE (1993) *ASHRAE Handbook - 1993 Fundamentals*, Atlanta: ASBRAE, 1993, paginação múltipla

BRAU, J. *Validation des Modèles de Calcul par une Etude Experimentale en Ambiance Climatique Simulée*. Tese de doutor de estado : INSA, Lyon, 1980, 295 p.

IRVING, A.D. *Validation of Dynamic Thermal Models, Energy and Buildings*, Vol 10, 1988, p. 213-220

JUDKOFF, R.D. *Validation of Building Energy Analysis Simulation Programs at the Solar Energy Research Institute, Energy and Buildings*, 1988, Vol 10, p. 221-239

SCHNEIDER, P. S. *Comportement Thermo-Aéraulique des Bâtiments: Stratégies de Résolution du Problème Couplé*. Tese de doutorado: INSA, Lyon, 1994, 148 p.