XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

AVALIAÇÃO DE FLUXOS DE CALOR EM EDIFICAÇÕES E SUA COMPARAÇÃO A REGISTROS COM FLUXÍMETROS

Victor F. Roriz (1); Pedro Mattia (2); Rosana M. Caram (3)
(1) Doutor, Pós-Doutorando em Arquitetura e Urbanismo, vfroriz@gmail.com
(2) Bacharel em Física, Técnico do Laboratório de Conforto Ambiental, pedro.mattia@usp.br.
(3) Doutora, Professora do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, rcaram@sc.usp.br
Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Arquitetura e Urbanismo, São Carlos-SP

RESUMO
Existem diversos métodos para a avaliação dos Fluxos de calor em uma edificação, com diferentes complexidades e incertezas. Mesmo propriedades físicas básicas dos sistemas construtivos, como a Transmitância Térmica (U) podem ser estabelecidas por diferentes procedimentos, incluindo estimativas por cálculo direto, análises por simulação e registros por medição. Cada método com uma aplicação indicada. Mas qual é a variação entre estes resultados e qual a forma de se reduzir os erros relacionados, não é uma informação evidente, principalmente considerando que na natureza os fluxos não são estacionários, como estabelecem os modelos mais simples de avaliação desta grandeza. Este trabalho apresenta diferentes métodos normatizados de avaliação desta grandeza (Transmitância - U), discute diferentes métodos de cálculo da transmitância experimental e apresenta dados de referência medidos. Observa-se boa correlação entre os resultados obtidos, porém que existem detalhes nos procedimentos que podem causar grandes diferenças, principalmente para registros em regiões tropicais. Detalhes estes que poderiam ser incluídos aos procedimentos de norma. Tendo em vista que estes resultados podem alterar totalmente as avaliações de desempenho térmico e energético das edificações e os estudos que utilizam de simulação térmica computacional destas áreas, considera-se que estas análises sejam de alta abrangência e relevância.
Palavras-chave: Transmitância, fluxímetros, fluxos de calor, atraso térmico.

ABSTRACT
There are several methods for evaluating heat flows in a building, with different complexities and uncertainties. Even the intervening basic physical properties such as the Thermal Transmittance of a wall (U) can be established by different procedures, including estimates by direct calculation, computational simulation analyzes and measurement records. Each method with an indicated application. But what is the variation between these results and how to reduce the related errors is not an evident information, especially considering that in nature the flows are not stationary as establish the simplest models of evaluation of this greatness. This work presents different standard methods of evaluation of this magnitude (Transmittance - U), discusses different methods of calculating experimental transmittance and presents measured reference data. There is a good correlation between the results obtained, however, that there are details in the procedures that can cause great differences, especially for records in tropical regions. Details which should be included in the standard procedures. Whereas these results may totally change the thermal and energetic performance evaluations of the buildings and the studies that use computational thermal simulation of these areas, these analyzes are considered of high comprehensiveness and relevance.
Keywords: Transmittance, flowmeters, heat flows, thermal lag.

1. INTRODUÇÃO

Os fluxos de calor são determinantes no desempenho termo-energético das edificações, logo, sua correta avaliação é imprescindível para toda a área e foco fundamental dos estudos correlatos. O entendimento da dinâmica de entrada e saída de calor de uma edificação é a real ciência para a avaliação dos quesitos térmicos e consequentemente energéticos de um edifício. Entre as formas de se quantificar estes fluxos existem métodos diversos, com diferentes complexidades e incertezas. Desde processos numéricos simples a complexas medições *in loco*. Mesmo as propriedades físicas fundamentais como a Transmitância Térmica dos sistemas construtivos (U) podem ser estabelecidas por vários processos de cálculo e embora os resultados calculados sejam aceitáveis para as normas técnicas aplicáveis à construção e diversos propósitos correlacionados, a medição destes valores deveria ser preferível quando disponível, caso obtida de acordo com os padrões normativos apropriados (KOSMINA, 2016).

Atualmente, existem diversos processos de avaliação que permitem uma análise dos fluxos de calor, sendo o mais comum a simulação computacional. Amplamente difundido, este método de estudo tem uma resposta rápida e permite análises paramétricas com grande número de testes e opções. Por outro lado, a criação de um modelo de simulação de uma edificação é uma tarefa complexa. A real representação de um edifício, com todos os seus detalhes arquitetônicos e construtivos, sistemas e rotinas de operação, dificilmente poderia ser implementada em um programa de simulação, assim o usuário precisa simplificar os dados de entrada, adequando-os à capacidade de descrição do software. Neste caminho, surgem dúvidas acerca do que pode ser simplificado ou qual elemento do edifício precisa ser detalhado (WESTPHAL, 2007). A modelagem está sujeita a centenas de hipóteses simplificativas assumidas tanto pelo usuário, quanto pelo software, para se traduzir a realidade nos modelos de simulação (PEDRINI, 1997; ROYAPOOR; ROSKILLY, 2015; WIT, 2012). Diversos estudos indicam que existem diferenças significativas entre resultados de simulações e os valores medidos em edifícios reais e mostram a necessidade de melhoria nestes processos (PEREIRA, 2009; RAFTERY; KEANE; O'DONNELL, 2011; ROYAPOOR; ROSKILLY, 2015; Mendonça et al, 2009) por isso, é imprescindível calibrar modelos de simulação baseados em dados monitorados (TAHERI; MAHDAVI, 2014).

A calibração é um processo que ajusta os valores dos parâmetros para minimizar o erro (previsão) com base na saída do modelo e um conjunto de dados observados, através de testes de tentativa e erro ou de buscas sistemáticas (ZECHMAN; RANJI RANJITHAN, 2007). Por sua vez, os registros com medições reais dos fluxos de calor no Brasil ainda são escassos, dificultando a criação de uma base de dados para comparação confiáveis, ou mesmo uma indicação de quais os resultados de simulação são admissíveis e quais são absurdos. Desta forma, descolando os casos reais dos resultados meramente teóricos. Assim, muito se caminha em processos de simulação e análises por medição, porém, além de avaliar a modelagem é preciso avaliar o método de medição das grandezas avaliadas e garantir um número de medições estatisticamente representativo.

Este trabalho faz parte de um estudo maior, que busca métodos automatizados de calibração e ferramentas de apoio estatístico para este fim. Aqui aborda-se uma parte fundamental do trabalho, a avaliação da transmitância e suas correlações com os processos de registro e análise dos fluxos de calor por condução em uma parede de um edifício real.

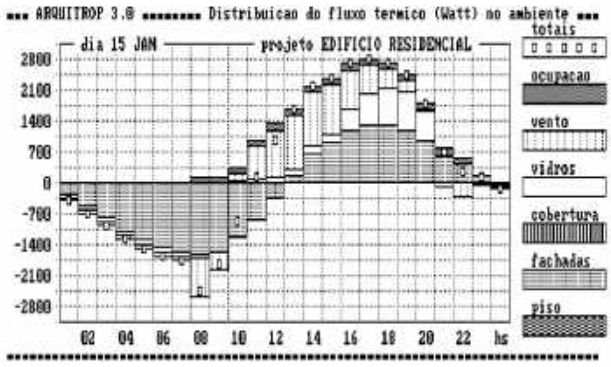


Figura 1 – Fluxos de Calor em um dia (BRUM; ASSIS, 2001)

A Figura 1 ilustra o balanço de fluxos de calor que ocorre em um ambiente. A cada hora os efeitos dos diversos fluxos (positivos e negativos) se somam às condições do ambiente, levando a uma alteração nas temperaturas. Atualmente diversos softwares, mais complexos e completos que o ali aplicado, utilizam destes mesmos princípios de análise e nos permitem uma indicação dos resultados de projetos submetidos a climas e condições de uso específicos. Uma vez que, internamente às paredes, os fluxos de calor ocorrem

exclusivamente por condução e estes têm grande relevância no desempenho termoenergético das edificações, estes fluxos constituem uma excelente referência para se verificar a similaridade entre dados medidos e simulados.

A determinação experimental da transmitância ou da resistência térmica das paredes *in loco* apresenta sempre problemas práticos. As atividades experimentais neste sentido são conduzidas usualmente em laboratórios; usando protótipos de paredes e elementos em escala (PENG; WU, 2008). No entanto, a resistência térmica da parede determinada *in loco* pode apresentar um desvio significativo da resistência determinada a partir de protótipos. Este desvio deve-se não só às inevitáveis diferenças entre os fornecimentos dos mesmos materiais feitos em diferentes períodos, mas também às inevitáveis diferenças nas condições de construção de paredes. Estabelecer as dimensões exatas das camadas de materiais em um edifício real requereria métodos destrutivos e em grande número, para se avaliar sua variação, algo inviável na maioria dos casos. Outro ponto de diferenciação é a consideração e a influência do conteúdo de umidade nos fenômenos de transferência de calor (ORDENES; GUTHS; LAMBERTS, 2005). Além disso, se por um lado, o cálculo da resistência térmica a partir de dados *in loco* representa condições realistas ("em serviço"), por outro lado, as medições de campo da temperatura e do fluxo de calor podem não alcançar a precisão obtida em aparelhos e condições de laboratório (ASTM, 1995). Desta forma, este trabalho busca apresentar a avaliação dos fluxos de calor por condução em uma parede real através da estimativa de sua Transmitância Térmica através de diferentes métodos de avaliação e comparar os diferentes resultados obtidos.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é o de comparar diferentes métodos de estimativa da Transmitância Térmica de uma parede. Inclui-se nesta avaliação a apresentação de dados de referência medidos, a avaliação de diferentes métodos de cálculo da transmitância experimental e sua relação com o atraso térmico, além da comparação dos valores medidos aos de referência normativas da NBR 15220 (ABNT, 2003) e de publicações correlatas como o guia orientativo do CBIC (2014).

3. MÉTODO

Como mencionado no item 1, os fluxos de calor internos a um elemento construtivo ocorrem por condução e podem ser estimados pela transmitância térmica deste elemento e das condições de temperaturas internas e externas a ele. Em uma condição real o processo de avaliação de medições *in loco* pode ser guiado por diferentes normas e referências. Como apresentado nas normas ISO 7345 (2018) e 9869 (2014), a transmitância térmica de um elemento de construção (U) é definida como a "taxa de fluxo de calor dividido pela área e pela diferença de temperatura entre os arredores de cada lado de um sistema". Em princípio, o valor U pode ser obtido medindo a taxa de fluxo de calor através de um elemento com um medidor de fluxo de calor, juntamente com as temperaturas em ambos os lados do elemento. Assim, uma estimativa do valor de U é obtida por (Equação 5):

$$U = \frac{\sum q}{\sum (T_i - T_e)} \qquad \text{Equação 5}$$

Onde:
q - densidade do fluxo de calor, W/m^2;
T_e - temperatura do ar externo, ° C
T_i - temperatura do ar interno, ° C

No entanto, esta definição é válida apenas para condições estacionárias, ou seja, se todos estes elementos fossem fixos, o que não ocorre usualmente em situações reais. Por outro lado, existem maneiras de superar essa dificuldade (KOSMINA, 2016):

A. Impor condições estacionárias pelo uso de uma caixa quente e uma fria. Este método é comumente usado no laboratório (ISO 8990), mas é dificilmente aplicado em campo;
B. Usando uma teoria dinâmica para levar em conta as flutuações da taxa de fluxo de calor e temperaturas na análise dos dados registrados (ORDENES; GUTHS; LAMBERTS, 2005; ROULET; GASS; MARKUS, 1983) .
C. Assumindo valores médios da taxa de fluxo de calor e temperaturas durante um período suficientemente longo de tempo.

Este último é amplamente utilizado, mas pode levar a longos períodos de medição e está sujeito a erros inerentes ao processo. Este método é considerado válido se o sistema analisado tiver as seguintes características:

1) As propriedades térmicas dos materiais e os coeficientes de transferência de calor são constantes ao longo das temperaturas que ocorrem durante o teste. Algo relativamente comum nos sistemas construtivos usuais;

2) A variação no calor armazenado no elemento é insignificante quando comparado à quantidade de calor passando pelo elemento. Esta questão é mais complexa, principalmente considerando sistemas mais massivos e de alta inércia.

Para elementos leves, caso não sejam submetidos à radiação solar, os 2 últimos métodos (B e C) resultam em bons resultados quando aplicados aos dados obtidos em curtos períodos de medição (6 a 12 horas). Portanto, uma noite seria o suficiente para obter resultados confiáveis. Por outro lado, para elementos mais pesados, se a temperatura interna for constante antes e durante a medição, tanto o método clássico (C) como o método dinâmico (B) proporcionam resultados estáveis no mesmo tempo de medição. Se a temperatura interna não for constante, ou se fontes de calor variáveis (por exemplo, radiação solar) forem importantes, o método dinâmico fornecerá resultados confiáveis em um tempo de medição mais curto do que o método clássico (ROULET; GASS; MARKUS, 1983).

Kosmina (2016) indica as seguintes condições para uma estimativa próxima do valor real:

a) O conteúdo de calor do elemento é o mesmo no final e no início da medição (mesmas temperaturas e mesma distribuição de umidade);
b) O sensor de fluxo não está exposto à radiação solar direta.
c) A condutividade térmica (λ) do elemento é constante durante o teste.

Segundo a ISO 9869 (2014), para elementos leves (por exemplo, paredes com estrutura de madeira), que têm capacidade térmica específica por área, inferior a 20 kJ/(m^2.K), recomenda-se que a análise seja realizada apenas em dados adquiridos à noite (a partir de 1 h após o pôr do sol até o nascer do sol), para evitar os efeitos da radiação solar. O teste pode ser interrompido quando os resultados após três noites subsequentes não diferirem em mais de ± 5%, caso contrário, deve continuar.

Para elementos mais pesados (por exemplo, paredes de alvenaria), que tenham capacidade térmica específica por área superior a 20 kJ/(m^2.K), a análise deve ser realizada durante um período que é um múltiplo inteiro de 24 h. O ensaio terminará apenas quando estiverem preenchidas as seguintes condições:

Condição 1 - a duração do teste excede 72 horas (três dias) se a temperatura estiver estável em torno do medidor de fluxo de calor, caso contrário, a duração pode ser muito maior, no entanto, a duração real do ensaio deve ser determinada aplicando critérios aos valores obtidos no decurso do ensaio. Estes valores devem ser obtidos sem interromper o processo de aquisição de dados.

Em edifícios com grandes capacidades de calor, a transmitância térmica média de um componente pode ser obtida por medição durante um período extenso (não menos de 96 horas) ou a transmitância aparente da peça pode ser estimada por uma análise dinâmica.

Condição 2 - o valor de R obtido no final do ensaio não se desvia em mais de ± 5% do valor obtido 24 h antes;

Condição 3 - o valor R obtido pela análise dos dados do primeiro período de tempo durante INT(2xDT/3) não se desvia em mais de ± 5% dos valores obtidos dos dados do último período de tempo da mesma duração. DT é a duração do teste em dias; INT é a parte inteira;

A fórmula a seguir (Equação 6) é usada para calcular os valores de R:

$$R = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se} \quad \text{m²K/W} \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:
U - Transmitância Térmica
R_{si} - resistência superficial interna, R_{si} = 0.13 para paredes
R_{se} - resistência superficial externa, R_{se} = 0.04 para paredes
Um elemento não descrito na referência, mas que é verificável nos exemplos apresentados por Kosmina (2016) é a constância dos fluxos em relação à direção. Aparentemente os casos apresentados se referem a condições de inverno onde os fluxos apresentam pouca variação em valores absolutos e nenhuma diferença

em direção, sempre partindo do interior em direção ao exterior da edificação. Esta análise é importante, pois demonstra as condições a que estão pensados os testes. No momento em que se têm inversão dos fluxos de calor, algo muito frequente nos casos de registros no Brasil, os valores poderiam ser computados erroneamente e todo o processo poderia ser calculado equivocadamente.

A ASTM C 1155 – 95 (ASTM, 1995) que apresenta dois Métodos "Padrão" para determinar a resistência térmica de componentes do envelope das construções a partir dos dados *in loco,* limita a aplicação dos métodos ali descritos, a construções de tipo leves ou médias, com variações da temperatura interna de menos de 3 K. As construções mais pesadas em que se aplicaria esta prática, seriam as de 440 kg/m^2 assumindo que todos os elementos maciços na construção civil tenham um calor específico de cerca de 0,9 kJ/kg.K. Esta norma apresenta exemplos de construção que incluem: uma parede de tijolos maciços (considerado de 390 kg/m^2), uma camada de isolamento e blocos de concreto na camada interna e uma laje de concreto (de 76 mm) com cobertura isolada (240 kg/m^2). A norma afirma ainda que existem conhecimento e experiência insuficientes para estender a prática a construções mais pesadas.

Processos similares de avaliação da transmissão por condução são possíveis. Rasooli e Itard (2018), por exemplo, consideram o uso de dois medidores de fluxo de calor, um em cada face do elemento construtivo a ser medido. Esta disposição permitiria uma avaliação mais rápida e possivelmente a correção de questões relativas à inércia. Outra questão presente no texto é a adoção de temperaturas superficiais na avaliação em lugar das temperaturas do ar, internas e externas (condutância térmica da parede). A instalação de medidores de fluxo de calor no interior das construções considera que esta face tem uma maior estabilidade das temperaturas (decorrente da inércia das construções), o que facilitaria a análise e o processo de convergência. Porém a condição de se ter 2 sensores de fluxo poderia auxiliar na verificação da condição de que o fluxo de calor "entrando" na parede é condizente ao "que sai", demonstrando a proximidade do experimento ao caso de fluxo e condições estacionárias.

Uma forma adicional de se avaliar o fluxo através das paredes é possível pelas informações obtidas pelo atraso térmico. Considerando a resistência calculável através da Equação 3 (ABNT, 2003), é possível se relacionar a transmitância ao atraso (φ), verificado experimentalmente.

$$\varphi = 0{,}7284.\sqrt{R_t.C_T} \qquad \text{Equação 3}$$

3.1. Edificação em estudo

A edificação adotada na pesquisa (Figura 2), pela disponibilidade e simplicidade, foi de único ambiente, sem trânsito de pessoas e sem produção interna de calor. Um depósito com aproximadamente 15 m^2. Edificação térrea, com esquadrias de 2 m^2 com venezianas. As paredes são constituídas por blocos cerâmicos tipo 8 furos, revestido por argamassa e pintura látex. As coberturas são em telha de fibrocimento sobre ático e forro de PVC. Vale lembrar que estes sistemas construtivos são semelhantes aos aplicados em construções de interesse social do Brasil (MARQUES, 2013). Implantada no centro da quadra, conta com 2 paredes expostas (S e L), uma sombreada por varanda (N) e uma de geminação (O). Como referências normativas do processo de medição foram adotadas as indicações das normas ASTM C 1155 (1995) e C 1046 (2001) além da ABNT NBR 15575 (2013) que indica avaliações sem ocupação ou cargas térmicas adicionais internas e com baixa ventilação (1 ren/h), coerente com o caso em que sejam mantidas portas e janelas fechadas. Outras referências a se mencionar deste processo são a ISO 9869 (2014), que indicam requisitos para as faixas de medição, precisão dos equipamentos e apresentam posições de sensores e métodos de registros.



Figura 2 – Locação e Vista

A construção foi avaliada quanto à suas dimensões e registrados elementos de influência como edifícios vizinhos e arbustos com efeitos de sombreamento. Referências construtivas de espessuras de materiais e absortâncias de superfícies registradas para avaliações posteriores.

3.2. Medição das Temperaturas e Fluxos de Calor por condução

A medição foi feita por cerca de um mês conforme indicação de Castro et al (2017) e em período único. Este processo poderia ser alternado ao procedimento de análise, caso tivesse disponibilidade ou fosse necessário pela dinâmica das medições. A montagem e manuseio de sensores do monitoramento (Figura 3), é sempre um elemento de complexidade desta pesquisa e foi facilitada por um treinamento técnico realizado com os fornecedores destes equipamentos para instalação e programação dos sensores.

Para captação dos dados de temperaturas do ar e temperaturas superficiais, foi utilizado um sistema de aquisição de dados Campbell, composto por um registrador de dados modelo CR10X, um multiplexador AM16/32, sensores tipo termopares tipo cobre-constantan montados e protegidos contra radiação (Figura 4) e placas de fluxo de calor Hukseflux (Figura 5). No Brasil, estes últimos sensores (placas de fluxo) ainda não têm tanta difusão quanto os primeiros (termopares) mas agregam importante melhoria no processo de registro e avaliação.

Para a base de dados de avaliação registrou-se as temperaturas e fluxos em intervalos de aproximadamente 2,5 min. Medição registrada em arquivo CR10XPB_Table1.dat. Os dados foram então aglomerados, calculados como a média dos valores registrados na última hora, criando assim a base horária com dias completos entre 15-07-2018 (01:00) a 16-08-2018 (24:00) (para facilitar avaliação e programação).

Na instalação das placas de fluxo de calor no interior da edificação, além de se utilizar a pasta térmica para reforçar a troca de calor entre a parede e o sensor, também o conjunto foi aderido com fita pintada na sua superfície externa com a mesma tinta das paredes do recinto, com o objetivo de manter os valores de troca de calor mais próximo possível das características locais.

A Norma ASTM C 1046-95 (2001) indica o uso da termografia infravermelha com esta técnica para localizar locais apropriados para os sensores, a menos que as condições de superfície sejam conhecidas, o que se confirma nesse caso, já que se trata de uma construção simples.



Figura 3 – Conjunto registrador de temperaturas composto por fonte de alimentação PS12, registrador CR10X e multiplexador AM16/32 conectado aos termopares



Figura 4 – Termopares e Placas de fluxo de calor instalados nas paredes.

3.3. Avaliação das características construtivas de referência

No caso de elementos compostos de camadas não homogêneas, como no caso das paredes que são compostas por blocos cerâmicos; tendo, portanto, uma série de câmaras de ar e septos, utilizou-se os métodos de cálculo apresentados na NBR 15220 (ABNT, 2003), para calcular a Transmitância e Capacidade térmica do elemento. Outra publicação de referência e indicativa para o método são as definições apresentadas pelo Building Research Establishment (BRE Scotland) (ANDERSON, 2006). Cada seção (Tabela 1) contribui com uma parcela na resistência e capacidade térmica do elemento e isso e ponderado pela área. O processo de cálculo foi resumido e exemplificado nas Figuras 6 e 7. Considerou-se os septos admissíveis segundo a NBR 15270 (ABNT, 2005).

Tabela 1 - Cidades e latitudes simuladas e arquivos climáticos utilizados.

Espess. e [m]		Elemento	Espess. e [cm]	Densid. ρ [kg/m^3]	Condutiv λ [W/(m.K)]	Calor Esp. c [kJ/(kg.K)]	Resistência r [(m^2.K)/W]	Capacidade Térmica CT [kJ/(m2.K)]
0.025		Argamassa	2.5	2000	1.15	1	0.0217	50.0
0.09		Argamassa	9	2000	1.15	1	0.0783	180.0
0.007		Cerâmica	0.7	1600	0.9	0.92	0.0078	10.3
0.006		Cerâmica	0.6	1600	0.9	0.92	0.0067	8.8
0.09		Cerâmica	9	1600	0.9	0.92	0.1000	132.5
0.025		Argamassa	2.5	2000	1.15	1	0.0217	50.0
		Câmara de Ar	< 2	-	-	-	0.14	0
		Câmara de Ar	2 a 5	-	-	-	0.16	0
		Câmara de Ar	> 5	-	-	-	0.17	0
		Superficial Interna		-	-	-	0.13	0
		Superficia Externa		-	-	-	0.04	0

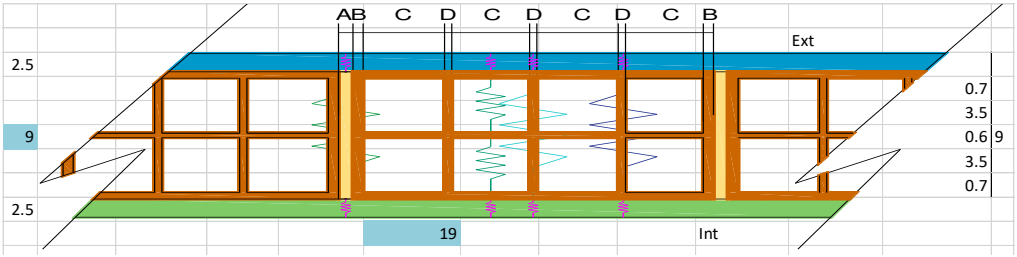


Figura 5 – Modelo para Cálculo da resistência equivalente.

					19					
	1	0.7	4.0	0.6	4.0	0.6	4.0	0.6	4.0	0.7
Camada	Secao A	Secao B	Secao C	Secao D	Secao C	Secao D	Secao C	Secao D	Secao C	Secao B
1	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217
2	0.0783	0.1000	0.0078	0.1000	0.0078	0.1000	0.0078	0.1000	0.0078	0.1000
3			0.16		0.16		0.16		0.16	
4			0.0067		0.0067		0.0067		0.0067	
5			0.16		0.16		0.16		0.16	
6			0.0078		0.0078		0.0078		0.0078	
7	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217
Soma R	**0.1217**	**0.1435**	**0.3857**	**0.1435**	**0.3857**	**0.1435**	**0.3857**	**0.1435**	**0.3857**	**0.1435**
Área	**39**	**13.3**	**75.1**	**11.4**	**75.1**	**11.4**	**75.1**	**11.4**	**75.1**	**13.3**
Área/R	**320.36**	**92.70**	**194.58**	**79.45**	**194.58**	**79.45**	**194.58**	**79.45**	**194.58**	**92.70**

Rt= **400.00** / **1522.44** = **0.2627** [(m2.K)/W]

RT= 0.4327

U = 2.31 [W/(m2.K)]

Figura 6 – Cálculo da resistência equivalente.

	1	0.7	4.0	0.6	4.0	0.6	4.0	0.6	4.0	0.7
Camada	Secao A	Secao B	Secao C	Secao D	Secao C	Secao D	Secao C	Secao D	Secao C	Secao B
1	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
2	180.0	132.5	10.3	132.5	10.3	132.5	10.3	132.5	10.3	132.5
3			0.0		0.0		0.0		0.0	
4			8.8		8.8		8.8		8.8	
5			0.0		0.0		0.0		0.0	
6			10.3		10.3		10.3		10.3	
7	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Ct	**280.0**	**232.5**	**129.4**	**232.5**	**129.4**	**232.5**	**129.4**	**232.5**	**129.4**	**232.5**
Área	**39**	**13.3**	**75.1**	**11.4**	**75.1**	**11.4**	**75.1**	**13.3**	**75.05**	**11.4**
Área/Ct	**0.14**	**0.06**	**0.58**	**0.05**	**0.58**	**0.05**	**0.58**	**0.06**	**0.58**	**0.05**

CT= **400.0** / **2.72** = **147.06** [kJ/(m2.K)]

Figura 7 – Cálculo da Capacidade Térmica

Estes valores são coerentes com os publicados na NBR 15220, reproduzidos no Guia CBIC (2014) sendo que as diferenças obtidas estão possivelmente relacionadas às características de espessuras internas consideradas. Neste material os valores publicados são: Transmitância Térmica da Parede (U) = 2.49 W/m^2.K, Capacidade Térmica (CT) = 158 KJ;(m^2.K).

4. RESULTADOS

4.1. Dados medidos

Os valores de temperatura e os fluxos de calor medidos são resumidos na Tabela 2. Foram editados e considerou-se a média dos valores das temperaturas do ar medida, interna e externa ao ambiente estudado. Também foram considerados os valores dos fluxos de calor medido. Foram analisados os valores absolutos dos parâmetros acima.

Tabela 2 – Resumo de dados medidos

	TExtAr (°C)	TIntAr (°C)	ΔT	IΔTI	FluxoN (W/m²)	FluxoS (W/m²)	IFluxoNI	IFluxoSI
Média	19.35	20.09	0.74	3.68	0.34	-7.64	10.66	26.50
Máxima	30.18	24.08	8.52	10.93	33.50	63.28	82.10	67.50
Mínima	7.88	14.56	-10.93	0.00	-82.10	-67.50	0.00	0.01

As Figuras 8 e 9 apresentam a evolução das médias horárias para o período para as temperaturas superficiais internas e externas (TSupN e TExtN ; TSupS e TExtS), temperaturas internas e externas do ar (TIntAr e TExtAr) e para os fluxos de calor nas paredes (FluxoN e FluxoS). Observa-se neste "Dia Médio", a diferença significativa entre os fluxos nas paredes Norte e Sul. A discrepância entre estes valores é atribuída ao fato de que a parede Norte é protegida por uma varanda e lateralmente por outra parede (Figura 2) e consequentemente não recebe insolação direta e é mais protegida do efeito do vento. Observa-se ainda a clara correlação entre as temperaturas superficiais e os fluxos de calor bastante evidente quando se observa as curvas TExtS e FluxoS na Figura 10.

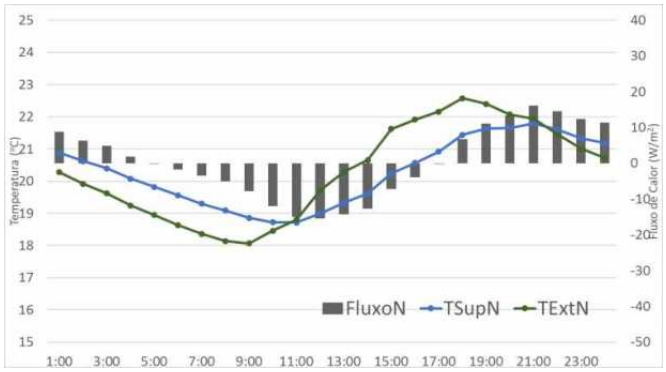


Figura 8 - Temperaturas x Fluxos: Parede Norte

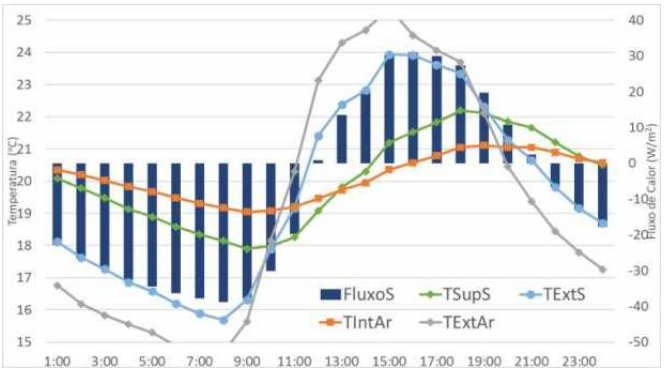


Figura 9 - Temperaturas x Fluxos: Parede Sul

4.2. Atraso térmico e transmitância

Considerando as temperaturas médias horárias do ar apresentadas na Figura 9 é possível se verificar que o atraso térmico médio no período medido ficou em 04h38min (ou 4,63 horas). Observa-se ainda que enquanto a amplitude externa média ficou em 10,7 °C a interna foi de 2,07 °C. A aplicação da Equação 3 apresentada na Tabela 3, depende do valor da capacidade térmica (obtida conforme a Figura 7) e usualmente caso seja viável se calcular este parâmetro o cálculo da transmitância também é possível pelo método apresentado no item 3.3, porém a compatibilidade entre estes métodos de avaliação (medição e cálculo) é altamente relevante.

Tabela 3 – Aplicação da Equação 3

φ (h)	CT (KJ/(m2.K))	Rt ((m2.K)/W)	RT ((m2.K)/W)	U ((W/(m2.K))
4.63	147.06	0.28	0.45	2.25

Observa-se que a diferença entre a transmitância obtida pelo modelo de cálculo de 2.31 (Figura 6), a tabelada de 2.49 (NBR 15220) e a estimada pelo atraso térmico de 2.25 (Tabela 3) são relativamente coerentes entre si. Indicando erros pouco significativos nestes processos.

4.3. Procedimentos normatizados e variações

O método de trabalhar as variáveis medidas interfere grandemente nos resultados obtidos. A Tabela 4 apresenta algumas opções de análise dos dados medidos. Para o caso medido, considerando diretamente os valores registrados de temperaturas do ar e fluxos de calor e as Equações 1 e 2, os resultados são os

apresentados na primeira coluna de resultados da Tabela 4. Caso se considere o cálculo com base nos valores absolutos de temperaturas e dos fluxos os resultados são os apresentados na 2ª coluna. Na opção de se considerar além da avaliação em valores absolutos, como também restringindo as análises apenas as com situações de temperaturas internas dentro de um intervalo de ±1,5 ºC ao redor da média (20.09 ºC) os resultados são os mostrados na 3ª coluna. Desprezando os momentos registrados entre as 06 h e 18 h as duas últimas colunas são obtidas no caso de se considerar intervalo o de ±1,5 ºC ao redor da média obtém-se os resultados apresentados na 5ª coluna. A primeira linha de resultados se refere aos registros de diferenças de temperaturas internas e externas. A segunda linha às referências relativas à parede Norte enquanto a última linha trata do registro da parede Sul. Como pode-se notar os valores de Transmitância obtidos relativos à parede Norte (sem insolação direta) são os mais próximos aos de referência tabelada de 2.49 (NBR 15220).

Tabela 4 – Aplicação da Equações 1 e 2 e variações

	Medido		Absoluto Medido		Absoluto em 3K		Absoluto Noturno		Absoluto Not. em 3K	
$\Sigma\Delta T$	14550.1	U	72732.1	U	44616.8	U	33307.9	U	19818.7	U
Σq_N	6796.5	0.47	210567.4	2.90	113460.3	2.54	104364.1	3.13	51327.0	2.59
Σq_S	-150984.0	-10.38	523548.6	7.20	311157.8	6.97	232646.5	6.98	138372.3	6.98

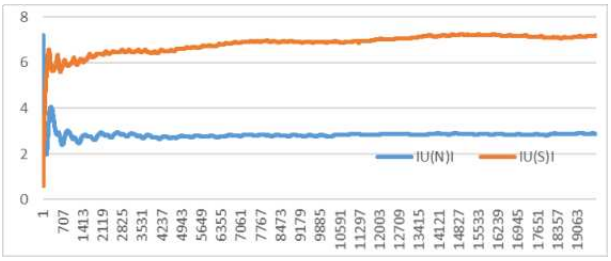


Figura 10 – Convergência de Transmitâncias

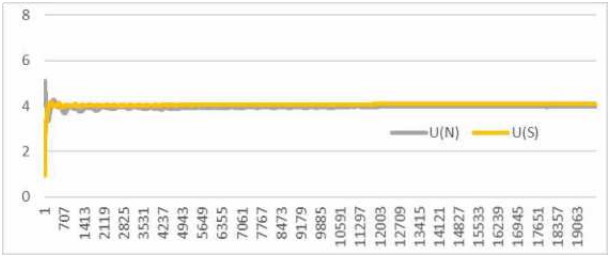


Figura 11 – Convergência de Transmitâncias com medição de temperaturas superficiais

A evolução na avaliação destes valores é exemplificada na Figura 10, onde se observa que para o 3º caso (Absoluto em 3K) a evolução do valor calculado ao passo que se incrementa os valores medidos. Neste caso, em aproximadamente 6000 registros os valores estão praticamente estabilizados. Considerando que estes foram feitos a cada 2.5 minutos, são necessários aproximadamente 10 dias para a avaliação.

Considerando as temperaturas superficiais e adotando as resistência superficiais internas e externas indicadas anteriormente (0,13 e 0,04) é possível estimar valores de Transmitância como apresentado na Tabela 5, que segue as mesmas referências de método de análise apresentadas para a Tabela 4. Vale observar (Figura 11) que a convergência ocorre mais rapidamente e que existe uma maior homogeneidade entre os valores registrados, entretanto, estes convergem para valores diferentes dos estimados pelos métodos anteriores, com valores obtidos significativamente mais distantes aos de referência tabelada de 2.49 (NBR 15220). Possivelmente a adoção de valores de Resistências superficiais fixas estimadas tenha correlação com este fato. Para ter uma equivalência entre as transmitâncias calculadas com as temperaturas superficiais (Tabela 5) e com as temperaturas do ar (Tabela 4) as Resistências superficiais deveriam ser maiores, considerando o caso da avaliação da parede Norte e os registros no caso Absoluto em 3K em destaque, por exemplo, estas deveriam somar 0.2887 m^2.K/W em lugar dos 0.17 tabelados.

Tabela 5 – Aplicação da Equações 1 e 2 e variações a temperaturas superficiais

	Absoluto Medido			Absoluto em 3K			Absoluto Noturno			Absoluto Noturno em 3K		
		Rp	U		Rp	U		Rp	U		Rp	U
$\Sigma\Delta T_N$	16998.4	0.0807	3.99	8869.0	0.1046	3.64	6350.5	0.0608	4.33	3271.5	0.0817	3.97
Σq_N	210567.4			84809.4			104364.1			40052.6		
$\Sigma\Delta T_S$	38729.4	0.0740	4.10	17712.6	0.0854	3.92	17958.6	0.0772	4.05	9156.0	0.0803	3.99
Σq_S	523548.6			207501.9			232646.5			113956.7		

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível destacar que mesmo os elementos mais fundamentais adotados nas avaliações de desempenho das edificações e os métodos de estudo aplicáveis são passíveis de verificação e de melhorias. No caso da Transmitância Térmica das Paredes existem imprecisões nos métodos de análise

que poderiam gerar erros em análises e dificilmente se teria conclusões realistas. Assim os estudos com medições reais e as informações apoiadas nestas bases de dados deveriam ser priorizadas.

O Procedimento apresentado na NBR 15220 e os valores tabelados de propriedades têm uma boa correlação com os registrados *In Loco*, entretanto, pequenas diferenças nas espessuras dos septos ou a disposição das câmaras de ar podem levar a diferenças significativas. Assim a especificação dos sistemas construtivos em estudos e avaliações de norma não deveriam adotar valores genéricos e sim avaliar dados específicos para o caso.

Nos processos de medição, análises com dados adquiridos com paredes sem radiação solar direta convergem para valores próximos aos estimados conforme a NBR 15220 e considerar registros apenas dentro do intervalo de temperaturas de ±1,5 ºC ao redor da média leva a uma melhor adequação dos valores medidos aos calculados. Por outro lado, restringir a análise aos dados coletados à noite não levaram a melhores resultados. Nos casos estudados foram necessários cerca de 10 dias de registros para se obter a estabilidade de dados. Caso se estude a transmissão por condução utilizando medidas de temperaturas superficiais, é possível minimizar o efeito da insolação e reduzir o tempo de medição necessário, porém, a aplicação de resistências superficiais tabeladas, não leva a cálculos de transmitância coerentes sendo necessário adotar valores da ordem de 70% a mais que estes para se obter a equivalência. Estes resultados nitidamente indicam a necessidade de estudos mais aprofundados nos temas e grande relevância ao tópico discutido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. *ABNT NBR 15270-2: Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos*. . [S.l: s.n.]. , 2005

ABNT. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. 2003.

ABNT. *NBR 15575-1 2013 Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio*. . [S.l.]: ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. , 2013

ANDERSON, B. *Conventions for U-value calculations 2006 edition*. . [S.l: s.n.], 2006. Disponível em: <www.bre.co.uk>. Acesso em: 27 mar. 2019.

ASTM. *ASTM C 1155: Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data*. . [S.l: s.n.], 1995. Disponível em: <https://civilengineersstandard.com/wp-content/uploads/2018/11/C-1155.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2019.

ASTM. *ASTM C1046-95 Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*. *Practice*. [S.l: s.n.], 2001. Disponível em: <http://arnisco.com/astm/PDF/C1046.PDF>. Acesso em: 27 mar. 2019.

BRUM, C. S.; ASSIS, E. S. DE. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO EM CONFORTO TÉRMICO NO ENSINO DE GRADUAÇÃO DA ESCOLA DE ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. 2001, [S.l: s.n.], 2001.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). *Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013*. [S.l: s.n.], 2014.

CASTRO, N. *et al. COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE MUROS A PARTIR DE DATOS MEDIDOS*. . [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2017/topico8artigo16.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2019.

ISO. *ISO 7345: Thermal performance of buildings and building components — Physical quantities and definitions*. . [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:7345:ed-3:v1:en>.

ISO. *ISO 9869-1: Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1_ Heat flow meter method*. . [S.l: s.n.], 2014. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9869:-1:ed-1:v1:en>.

KOSMINA, L. Guide to In-situ U-value measurement of walls in existing dwellings In-situ measurement of U-value. 2016. Disponível em: <https://www.bre.co.uk/filelibrary/In-situ-measurement-of-thermal-resistance-and-thermal-transmittance-FINAL.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2018.

ORDENES, M.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. Estimativa de propriedades termofísicas em campo usando modelos de transferência de calor e umidade Estimation of field thermo-physical using heat and moisture transfer models A. *Ambiente Construído*, v. 10, p. 19–35, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ac/v10n4/a03v10n4.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2019.

PENG, C.; WU, Z. In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction. *Energy and Buildings*, v. 40, n. 11, p. 2076–2082, 2008.

RASOOLI, A.; ITARD, L. In-situ characterization of walls' thermal resistance: An extension to the ISO 9869 standard method. *Energy and Buildings*, v. 179, n. September, p. 374–383, 2018.

ROULET, C.; GASS, J.; MARKUS, I. IN-SITU U-VALUE MEASUREMENT : RELIABLE RESULTS IN SHORTER TIME BY DYNAMIC INTERPRETATION OF MEASURED DATA. 1983, [S.l: s.n.], 1983. Disponível em: <https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1985 B3 papers/057.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2019.