



AVALIAÇÃO TEÓRICA DE DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES DE ADOBE, BLOCO DE CONCRETO E BLOCO CERÂMICO

Obede Borges Faria¹, Célia Neves²

¹Prof. Dr. – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP
Av. Eng. Luiz E. C. Coube, 14-01 CEP 17033-360 Bauru-SP, (+55) 14 3103-6112;
obede.faria@gmail.com

²Rede Ibero-Americana PROTERRA/Rede TerraBrasil, cneves2012@gmail.com

Palavras-chave: desempenho térmico de paredes, adobe, bloco de concreto, bloco cerâmico, NBR 15220/2005.

Resumo

É muito comum, mesmo em eventos científicos cujo tema é a arquitetura e construção com terra, ouvirem-se afirmações categóricas sobre a superioridade da terra como material de construção, do ponto de vista do desempenho térmico, em detrimento de outros materiais. Na maioria das vezes, esta é uma afirmação leviana, porque carece de sólida investigação científica, baseada em estratégias metodológicas adequadas.

Para contribuir com o preenchimento desta lacuna, neste trabalho é apresentada uma avaliação teórica do desempenho térmico de paredes de adobes, comparadas com paredes de blocos de concreto e de blocos cerâmicos, dois materiais de vedação tidos como convencionais, no Brasil. Esta avaliação foi realizada com base na norma brasileira NBR 15220/2005 (*“Desempenho térmico de edificações”*, composta por 5 partes), aplicada a um estudo de caso realizado com 3 protótipos de habitação de interesse social, construídos com estes materiais no campus de Bauru-SP, da UNESP (Universidade Estadual Paulista), como parte de um projeto de pesquisa financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

Os resultados encontrados apontaram para a superioridade do adobe no que diz respeito à capacidade térmica (C_T) e ao atraso térmico (ϕ). No entanto, notou-se sua desvantagem, no que diz respeito à resistência térmica (R_T), transmitância térmica (U) e fator de ganho de calor solar (FS_o). De uma forma global, pode-se afirmar que a parede de adobe avaliada mostrou-se mais vantajosa com relação à maioria dos parâmetros de conforto analisados, já que os parâmetros nos quais ficou em desvantagem levam em consideração as mesmas variáveis (arranjadas de diferentes formas). Cabe salientar que estas vantagens são relativas e, em alguns casos, não muito significativas, porque dependem da espessura das paredes.

1. INTRODUÇÃO

Muito se comenta sobre as qualidades térmicas das paredes de terra, assim como sobre sua superioridade quando comparadas com outros materiais, tomando-se por base apenas a experiência sensorial e subjetiva de quem ocupa ambientes construídos com este material. No entanto, são escassos os textos científicos que tratam deste tema, resultantes de sólidos e criteriosos trabalhos de pesquisa, baseados em experimentações, de acordo com normas técnicas de referência.

Em um dos raros trabalhos encontrados sobre o tema, Porta-Gándara et al (2002) avaliam o desempenho comparativo de construções de adobe e de blocos de concreto, na Baixa Califórnia do Sul (México), no que diz respeito ao consumo de energia para climatização destas construções, mantendo-se a temperatura interna em 26°C. Note-se que se trata de uma região tropical, semelhante às condições brasileiras, porém no hemisfério norte. As paredes de adobe tinham espessura de 25 cm e as de bloco de concreto, 10 cm. O principal resultado da pesquisa é mostrado nas figuras 1 e 2, de onde se pode observar que o ambiente de concreto consumiu 5 vezes mais energia que o de adobes, cuja espessura de paredes era de 2,5 vezes a de concreto.

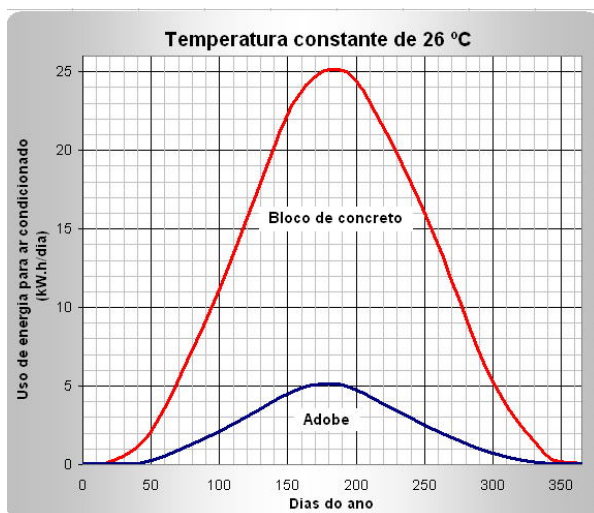


Figura 1. Consumo de energia com refrigeração, para manter a temperatura interna da construção em 26 °C, ao longo do ano (adaptado de Porta-Gândara et al, 2002).

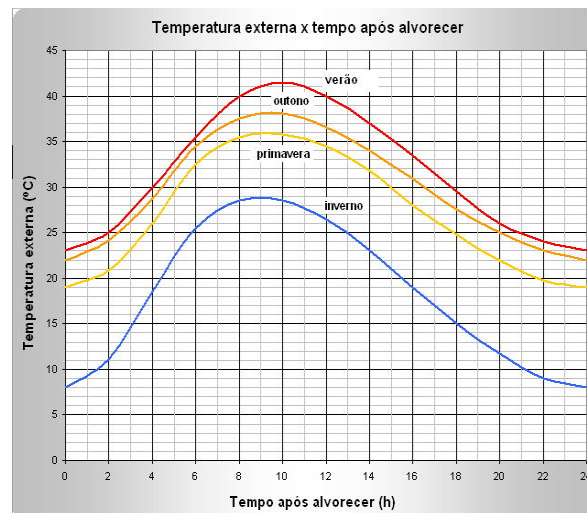


Figura 2. Variação da temperatura externa, após o alvorecer, para as 4 estações do ano. (adaptado de Porta-Gândara et al, 2002).

No presente trabalho é apresentada uma síntese do “Capítulo 10” de Faria (2007), relatório de um projeto de pesquisa financiado pela FAPESP, em continuidade à pesquisa de doutorado do autor (Faria, 2002). Parte deste projeto foi apresentada por Faria *et al.* (2007). No projeto foram construídos três protótipos de habitação de interesse social (HIS), compostos por uma sala-cozinha, um banheiro e um dormitório (com área útil de 50 m²), um com adobes, outro com blocos de concreto e outro com blocos cerâmicos. O objetivo do projeto foi avaliar a aplicação de adobe na produção de HIS e fazer uma avaliação comparativa de custos e conforto térmico com dois materiais convencionais.

Na figura 3 é apresentada uma vista panorâmica da face norte dos protótipos, na qual estavam posicionadas as paredes cegas, para aumentar a superfície de incidência do sol e destacar as diferenças de comportamento dos materiais de vedação. Pelo mesmo motivo, as paredes foram pintadas na cor grafite. As janelas estavam voltadas para a face sul.



Figura 3. Vista geral da face norte dos três protótipos: adobes (A), blocos de concreto (C) e blocos cerâmicos (B). (adaptado de Faria, 2007).

Dentre outros aspectos, foi avaliado o desempenho térmico teoricamente, de acordo com a norma brasileira NBR 15220-2 (ABNT, 2005), e medidos alguns destes parâmetros experimentalmente, através de instrumentação adequada dos protótipos, com sistema de aquisição de dados informatizado. No presente trabalho é apresentada apenas a avaliação teórica, como exemplo de aplicação da metodologia proposta pela norma.

2. PARÂMETROS DE DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES, SEGUNDO A NBR 15220-2 (ABNT, 2005)

Segundo a norma brasileira NBR 15220-2 (ABNT, 2005), ainda pouco utilizada, os principais parâmetros de desempenho térmico de paredes são: **a) Resistência térmica** (de superfície a superfície, ou de ambiente a ambiente); **b) Transmitância térmica**; **c) Capacidade térmica**; **d) Atraso térmico**; e **e) Fator de ganho de calor solar**. Neste item são apresentados os conceitos e as principais equações para o cálculo destes parâmetros e, a seguir, os seus cálculos para os três tipos de material de vedação utilizados nos protótipos (adobe, blocos de concreto e blocos cerâmicos).

Os parâmetros apresentados a seguir constituem uma síntese das definições da NBR 15220-2 (ABNT, 2005), voltadas à situação da presente pesquisa.

2.1 Resistência térmica de um componente

A resistência térmica (**R**) de uma camada homogênea de material sólido, é determinada pela equação 1.

$$R = e/\lambda \quad (1)$$

onde: **R** : resistência térmica da camada ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
e : espessura da camada (m)
 λ : condutividade térmica do material ($\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$)

A resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano (**R_t**), constituído de **camadas homogêneas**, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela equação 2.

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn} \quad (2)$$

onde: **R_t** : resistência térmica, de superfície a superfície do componente ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
R_{ti} : resistência térmica da camada “i” do componente ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
R_{ari} : resistência térmica da camada de ar “i” do componente ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

A resistência térmica do componente, de ambiente a ambiente, ou resistência térmica total (**R_T**), é dada pela equação 3.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (3)$$

onde: **R_T** : resistência térmica, de ambiente a ambiente ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
R_t : resistência térmica, de superfície a superfície do componente ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
R_{se} : resistência superficial externa, obtida da *tabela A.1* da norma ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
R_{si} : resistência superficial interna, obtida da *tabela A.1* da norma ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

A resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano (**R_t**), constituído de **camadas não homogêneas**, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela equação 4.

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (4)$$

onde: **R_t** : resistência térmica, de ambiente a ambiente ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
A_a, A_b, ..., A_n : áreas de cada seção (m^2)
R_a, R_b, ..., R_n : resistência térmica de superfície a superfície, para cada seção ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)

2.2 Transmitância térmica de componentes

A transmitância térmica (ou *coeficiente global de transferência de calor*) de componentes (**U**), ambiente a ambiente, é dada pela equação 5.

$$U = 1/R_T \quad (5)$$

onde: U : resistência térmica da camada ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
 R_T : resistência térmica, de ambiente a ambiente ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)

2.3 Capacidade térmica de componentes

A capacidade térmica de componentes (C_T), com **camadas homogêneas** é dada pela equação 6.

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (6)$$

onde: C_T : capacidade térmica do componente ($\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 e_i : espessura da camada i^{a} (m)
 c_i : calor específico do material da camada i^{a} ($\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$)
 ρ_i : densidade de massa aparente do material da camada i^{a} (kg / m^3)

A capacidade térmica de componentes (C_T), com camadas **não homogêneas** é dada pela equação 7.

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (7)$$

onde: C_T : capacidade térmica, de ambiente a ambiente ($\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 $A_a, A_b, \dots, A_n$: áreas de cada seção (m^2)
 $C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$: capacidades térmicas do componente, para cada seção ($\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)

2.4 Atraso térmico de componentes

O atraso térmico (φ) de uma placa **homogênea** (constituída por um único material), com espessura “e” e submetida a um regime térmico variável e senoidal, com período de 24h, é dada pela equação 8.

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_T \cdot C_T} \quad (8)$$

onde: φ : atraso térmico (h)
 C_T : capacidade térmica do componente ($\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 R_T : resistência térmica do componente ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)

No caso de componente **heterogêneo** (formado por diferentes materiais, superpostos em “n” camadas paralelas às faces perpendiculares ao fluxo de calor), o atraso térmico varia conforme a ordem das camadas e pode ser calculado pela equação 9.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \quad (9)$$

onde: φ : atraso térmico (h)
 R_t : resistência térmica de superfície a superfície do componente ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 $B_1 = 0,226 B_0 / R_t$ $B_0 = C_T - C_{T\text{ext}}$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left[\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_t} \right] \cdot \left(R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right) \text{ (considerar } B_2 \text{ nulo caso seja negativo)}$$

C_T : capacidade térmica total do componente ($\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 $C_{T\text{ext}}$: capacidade térm. da camada mais externa do componente ($\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 R_{ext} : resist. térm. da última camada do componente, junto à face externa ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 λ_i : condutividade térmica do material da camada i^{a} ($\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$)
 ρ_i : densidade de massa aparente do material da camada i^{a} (kg / m^3)
 c_i : calor específico do material da camada i^{a} ($\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$)

2.5 Fator de ganho de calor solar de elementos opacos

O fator de ganho de calor solar de elementos opacos, ou apenas fator solar de elementos opacos (FS_o), é dado pela equação

$$FS_o = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} \quad (10)$$

onde: FS_o : fator solar de elementos opacos (%)
 U : transmitância térmica do componente ($m^2.K / W$)
 α : absorptância á radiação solar – função da cor (**tabela B.2** da norma)
 R_{se} : resistência superficial externa (**tabela A.1** da norma)

OBS: Quando se respeitar um limite de fator solar, para uma determinada região climática (NBR 15220-3), pode-se determinar o máximo valor de α em função do fator solar e da transmitância térmica, de acordo com a equação 11.

$$\alpha \leq FS_o / (4 \cdot U) \quad (11)$$

Com este cálculo, pode-se escolher a cor mais adequada à pintura das paredes.

3. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES PARA OS TRÊS MATERIAIS

Neste item são apresentados os cálculos dos parâmetros descritos no item anterior, para cada um dos três materiais de vedação: adobe, tijolo cerâmico alveolar (“baiano” de 8 furos) e blocos de concreto.

3.1 Paredes de adobe, rebocadas em ambas as faces

Na figura 4 são apresentadas as características geométricas das paredes do protótipo construído com adobes de 11,3 cm x 13 cm x 26,8 cm (dimensões médias).

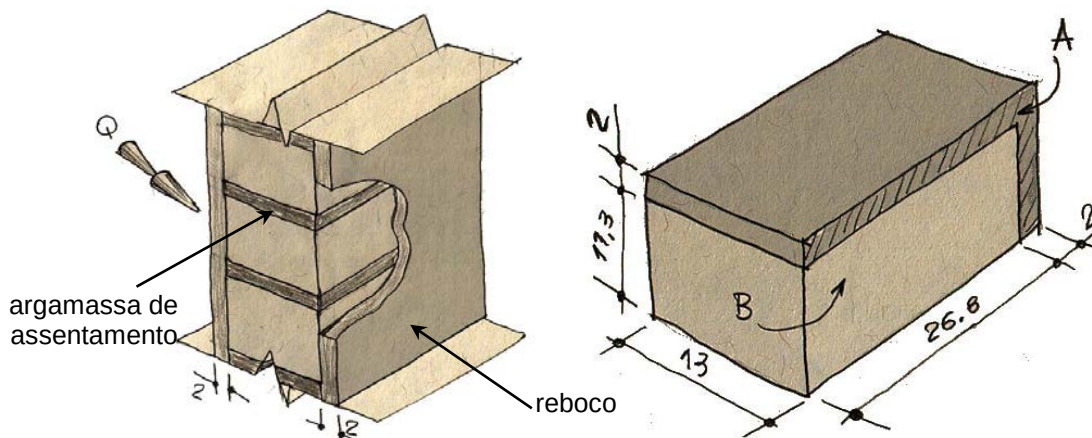


Figura 4. Representação esquemática da parede de adobe e do elemento isolado, com suas características geométricas.

a) Resistência térmica da parede (superfície a superfície)

SEÇÃO A (reboco + argamassa + reboco)

Pelas equação 1 e 2, considerando-se $\lambda_{reboco} = \lambda_{argamassa} = 1,15 \text{ W/mK}$ (da tabela B.3 da norma), tem-se:

$$R_a = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \Rightarrow R_a = 0,1478 \text{ (m}^2.K) / W$$

A área da seção A, é calculada por $A_a = (0,02 \times 0,268) + (0,02 \times 0,133) \Rightarrow A_a = 0,0080 \text{ m}^2$

SEÇÃO B (reboco + adobe + reboco)

Dos materiais listados na tabela B.3, o que mais se aproxima do adobe ($\rho_{ap} \approx 1.700 \text{ kg/m}^3$) é o tijolo cerâmico, com ρ_{ap} entre 1.600 e 1.800 kg/m^3 , pode-se considerar $\lambda_{adobe} = 1,00 \text{ W/mK}$. Cabe salientar que Battistelle (2002) encontrou, experimentalmente, resultado muito próximo deste, para condutividade térmica ($\lambda_{adobe \text{ Battistelle}} = 0,98 \text{ W/mK}$); assim como Stulz (2000).

A área da seção B, é calculada por $A_b = (0,113 \times 0,268) \Rightarrow A_b = 0,0303 \text{ m}^2$

Pelas equação 1 e 2, tem-se:

$$R_b = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{adobe}}{\lambda_{adobe}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \Rightarrow R_b = 0,1648 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$$

Portanto, pela equação 4, a resistência térmica (R_t) da parede, superfície à superfície, será:

$$\underline{R_t = 0,1609 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}}$$

b) Resistência térmica total (de ambiente a ambiente)

Considerando-se, da tabela A.1 (para fluxo horizontal), que $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$ e $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$, a resistência térmica total (R_T), de ambiente a ambiente, calculada pela equação 3, será:

$$\underline{R_T = 0,3309 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}}$$

c) Transmitância térmica

A transmitância térmica (U) da parede, calculada pela equação 5, será: $\underline{U = 3,02 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}}$

d) Capacidade térmica da parede

Da tabela B.3, da norma, tem-se:

$$\begin{aligned} c_{reboco} = c_{argamassa} &= 1,00 \text{ kJ/(kg.K)} & c_{adobe} &= 0,92 \text{ kJ/(kg.K)} \\ \rho_{reboco} = \rho_{argamassa} &= 2.000 \text{ kg/m}^3 & \rho_{adobe} &= 1.700 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

SEÇÃO A (reboco + argamassa + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Ta} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} \Rightarrow C_{Ta} = 340 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

SEÇÃO B (reboco + adobe + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Tb} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{adobe} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} \Rightarrow C_{Tb} = 283,32 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Portanto, pela equação 7, a capacidade térmica da parede será: $\Rightarrow \underline{C_T = 293 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}}$

e) Atraso térmico da parede

Considerando-se que:

$$\begin{aligned} R_{ext} = R_{reboco} &= 0,02/1,15 = 0,0174 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W} \text{ (da equação 1)} \\ R_t &= 0,1609 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W} & C_T &= 293 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)} \\ C_{Text} = C_{Treboco} &= (0,02 \cdot 1,00 \cdot 2000) = 40 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

Da equação 9, tem-se: $B_0 = 253 \text{ kJ / (m}^2 \cdot \text{K)}$ $B_1 = 355,36$ $B_2 = 8,91$

Portanto, o atraso térmico da parede (ϕ) será dado por:

$$\phi = 1,382 \cdot 0,1609 \cdot \sqrt{355,36 + 8,91} \Rightarrow \underline{\phi = 4,24 \text{ horas}}$$

f) Fator de ganho de calor solar

Considerando-se que:

$$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W} \text{ (da tabela A.1)} \quad \alpha = 0,97 \text{ (da tabela B.2)} \quad U = 3,02 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

O fator de ganho de calor solar (FS_o) da parede pode ser calculado pela equação 10: $\Rightarrow FS_o = 11,7 \%$

De acordo com a NBR 15220-3, a construção se situa na Zona Bioclimática 3; portanto, recomendam-se (paredes pesadas): $U \leq 2,20 W/(m^2.K)$ $\phi \geq 6,5$ horas $FS_o \leq 3,5 \%$

Dessa forma, o limite máximo de absorvância recomendado pode ser calculado pela equação 11: $\Rightarrow \alpha \leq 0,29$

OBS: Portanto, para se respeitar este limite, de acordo com a tabela B.2, as paredes deveriam ser pintadas de branco ($\alpha=0,20$) ou de amarelo ($\alpha=0,20$). No presente trabalho, as paredes foram pintadas na cor grafite, justamente para evidenciar ao máximo as diferenças de comportamento térmico entre os três materiais (adobe, concreto e cerâmico), na etapa de aquisição de dados experimentais ("medições").

3.2 Paredes de blocos de concreto, rebocadas em ambas as faces

Na figura 5 são apresentadas as características geométricas das paredes do protótipo construído com blocos de concreto com duas células.

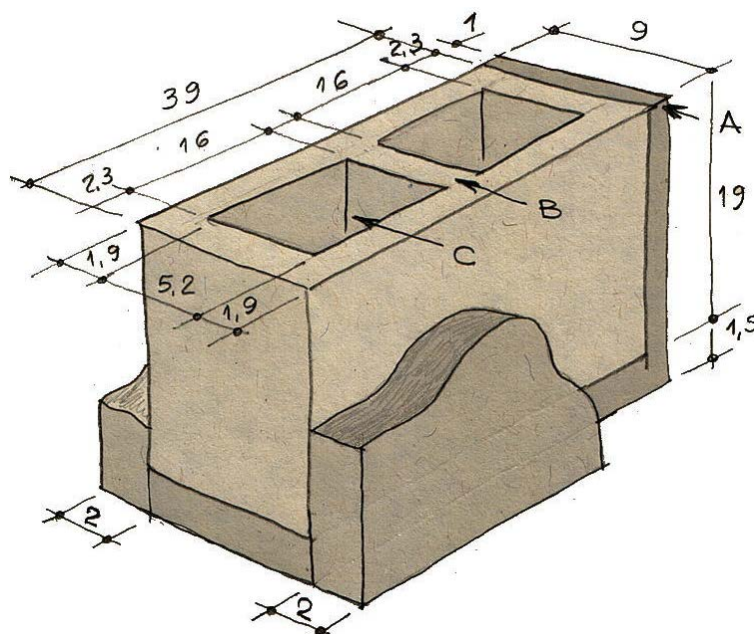


Figura 5. Representação esquemática da parede de blocos de concreto e do elemento isolado, com suas características geométricas.

a) Resistência térmica da parede (superfície a superfície)

SEÇÃO A (reboco + argamassa + reboco)

Pelas equação 1 e 2, considerando-se $\lambda_{reboco} = \lambda_{argamassa} = 1,15 W/mK$ (da tabela B.3 da norma), tem-se:

$$R_a = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \Rightarrow R_a = 0,1130 (m^2.K)/W$$

A área da seção A, é calculada por: $A_a = (0,015 \times 0,39) + (0,01 \times 0,205) \Rightarrow A_a = 0,0079 m^2$

SEÇÃO B (reboco + concreto + reboco)

Da tabela B.3, as características do concreto normal são:

$$\rho_{ap} = 2.400 kg/m^3 ; \lambda_{concreto} = 1,75 W/mK.$$

A área da seção B, é calculada por: $A_b = (0,023 \times 0,190) \Rightarrow A_b = 0,0044 m^2$

Pelas equação 1 e 2, tem-se:

$$R_b = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \Rightarrow R_b = 0,1434 (m^2.K)/W$$

SEÇÃO C (reboco + concreto + câmara de ar + concreto + reboco)

Para a câmara de ar, da tabela B.1 (para superfície de alta emissividade, espessura da câmara de ar > 5cm, fluxo horizontal), tem-se $R_{ar} = 0,17 (m^2.K)/W$.

A área da seção C, é calculada por: $A_c = (0,160 \times 0,190) \Rightarrow A_c = 0,0304 m^2$

Pelas equação 1 e 2, tem-se:

$$R_c = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + R_{ar} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \Rightarrow R_c = 0,2184 (m^2.K)/W$$

Como cada elemento da parede é composto por **1 seção A**, **3 seções B** e **2 seções C**, pela equação 4, a resistência térmica (R_t) da parede, superfície a superfície, será:

$$R_t = \frac{A_a + (3 \cdot A_b) + (2 \cdot A_c)}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{(3 \cdot A_b)}{R_b} + \frac{(2 \cdot A_c)}{R_c}} \Rightarrow R_t = 0,1860 (m^2.K)/W$$

b) Resistência térmica total (de ambiente a ambiente)

Considerando-se, da tabela A.1 (para fluxo horizontal), que $R_{se} = 0,04 (m^2.K)/W$ e $R_{si} = 0,13 (m^2.K)/W$, a resistência térmica total (R_T), de ambiente a ambiente, calculada pela equação 3, será: $R_T = 0,04 + 0,1860 + 0,13 \Rightarrow R_T = 0,3560 (m^2.K)/W$

c) Transmitância térmica

A transmitância térmica (U) da parede, calculada pela equação 5, será:

$$U = \frac{1}{0,3560} \Rightarrow U = 2,81 W/(m^2.K)$$

d) Capacidade térmica da parede

Da tabela B.3, da norma, tem-se:

$$c_{reboco} = c_{argamassa} = 1,00 kJ/(kg.K) \quad c_{concreto} = 1,00 kJ/(kg.K)$$

$$\rho_{reboco} = \rho_{argamassa} = 2.000 kg/m^3 \quad \rho_{concreto} = 2.400 kg/m^3$$

SEÇÃO A (reboco + argamassa + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Ta} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} \Rightarrow C_{Ta} = 260 kJ/(m^2.K)$$

SEÇÃO B (reboco + concreto + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Tb} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{concreto} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} \Rightarrow C_{Tb} = 296 kJ/(m^2.K)$$

SEÇÃO C (reboco + concreto + câmara de ar + concreto + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Tc} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{concreto} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{concreto} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco}$$

Desprezando-se a capacidade térmica do ar, tem-se:

$$\Rightarrow C_{Tc} = 171,2 kJ/(m^2.K)$$

Como cada elemento da parede é composto por **1 seção A**, **3 seções B** e **2 seções C**, pela equação 7, a resistência térmica (R_t) da parede, superfície à superfície, será:

$$C_T = \frac{A_a + (3 \cdot A_b) + (2 \cdot A_c)}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{(3 \cdot A_b)}{C_{Tb}} + \frac{(2 \cdot A_c)}{C_{Tc}}} \Rightarrow \underline{C_T = 190 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

e) Atraso térmico da parede

Considerando-se que:

$$R_{ext} = R_{reboco} = 0,02/1,15 = 0,0174 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W (da equação 1)}$$

$$R_t = 0,1860 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W} \quad C_T = 190 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$C_{Text} = C_{Treboco} = (0,02 \cdot 1,00 \cdot 2000) = 40 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\text{Da equação 9, tem-se: } B_0 = 150 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad B_1 = 182,26 \quad B_2 = 1,37$$

Portanto, o atraso térmico da parede (ϕ) será dado por:

$$\phi = 1,382 \cdot 0,1860 \cdot \sqrt{182,26 + 1,37} \Rightarrow \underline{\phi = 3,48 \text{ horas}}$$

f) Fator de ganho de calor solar

Considerando-se que:

$$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W (da tabela A.1)} \quad \alpha = 0,97 \text{ (da tabela B.2)} \quad U = 2,81 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

O fator de ganho de calor solar (FS_o) da parede pode ser calculado pela equação 10: $\Rightarrow \underline{FS_o = 10,90 \%}$

De acordo com a NBR 15220-3, a construção se situa na Zona Bioclimática 3; portanto, recomendam-se (paredes pesadas): $U \leq 2,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad \phi \geq 6,5 \text{ horas} \quad FS_o \leq 3,5 \%$

Dessa forma, o limite máximo de absorvância recomendado pode ser calculado pela equação 11: $\alpha \leq 3,5/(4 \cdot 2,81) \Rightarrow \alpha \leq 0,31$

OBS: Portanto, para se respeitar este limite, de acordo com a tabela B.2, as paredes deveriam ser pintadas de amarelo ($\alpha=0,30$) ou de branco ($\alpha=0,20$). No presente trabalho, as paredes foram pintadas na cor grafite, justamente para evidenciar ao máximo as diferenças de comportamento térmico entre os três materiais (adobe, concreto e cerâmico).

3.3 Paredes de blocos cerâmicos (8 furos), rebocadas em ambas as faces

Na figura 6 são apresentadas, esquematicamente, as características geométricas das paredes do protótipo construído com blocos cerâmicos de 8 furos, observando-se que foi necessário (para simplificar os cálculos) fazer uma simplificação da seção do tijolo, como mostrado no desenho menor (canto superior esquerdo da figura).

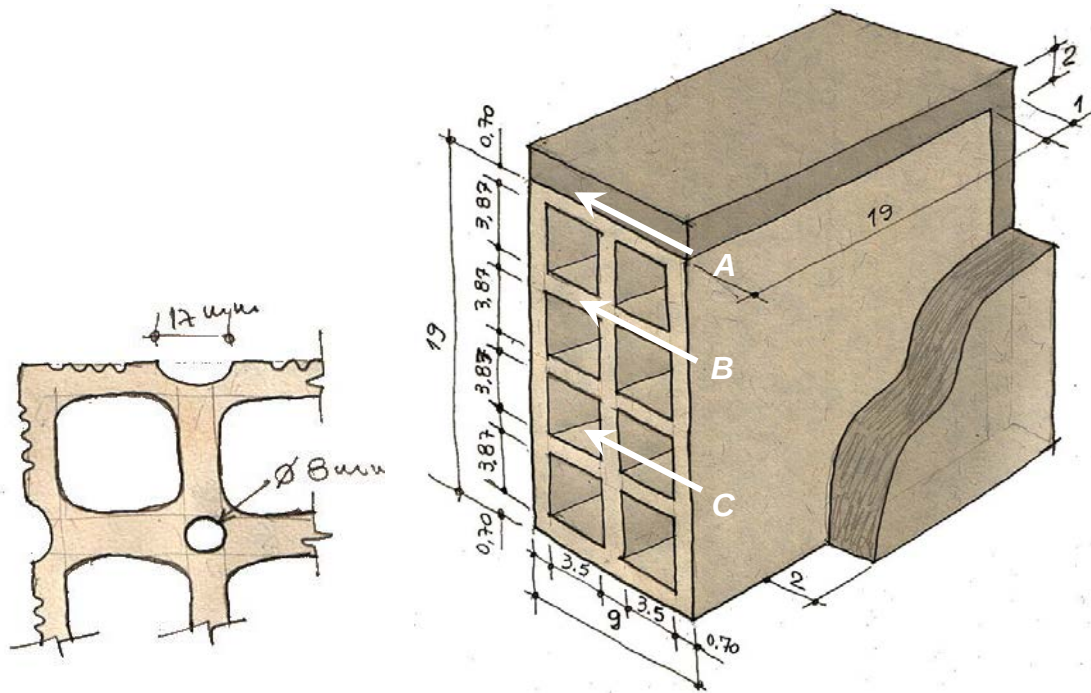


Figura 6. Representação esquemática da parede de bloco cerâmico e do elemento isolado, com suas características geométricas e seções (A, B e C), vendo-se à esquerda os detalhes da seção real do bloco.

a) Resistência térmica da parede (superfície a superfície)

SEÇÃO A (reboco + argamassa + reboco)

Pelas equação 1 e 2, considerando-se $\lambda_{\text{reboco}} = \lambda_{\text{argamassa}} = 1,15 \text{ W/mK}$ (da tabela B.3 da norma), tem-se:

$$R_a = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} \Rightarrow R_a = 0,1130 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$$

A área da seção A, é calculada por: $A_a = (0,010 \times 0,19) + (0,02 \times 0,200) \Rightarrow A_a = 0,0059 \text{ m}^2$

SEÇÃO B (reboco + cerâmica + reboco)

Da tabela B.3, as características da cerâmica média são: $\rho_{\text{cerâmica}} = 1.600 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,90 \text{ W/mK}$.

A área da seção B, é calculada por: $A_b = (0,007 \times 0,190) \Rightarrow A_b = 0,0013 \text{ m}^2$

Pelas equação 1 e 2, tem-se:

$$R_b = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} \Rightarrow R_b = 0,2459 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$$

SEÇÃO C (reboco + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + reboco)

Para a câmara de ar, da tabela B.1 (para superfície de alta emissividade, espessura da câmara de ar < 5cm, fluxo horizontal), tem-se $R_{\text{ar}} = 0,16 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$.

A área da seção C, é calculada por: $A_c = (0,0387 \times 0,190) \Rightarrow A_c = 0,0074 \text{ m}^2$

Pelas equação 1 e 2, tem-se:

$$R_c = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \Rightarrow R_c = 0,3781 (m^2.K)/W$$

Como cada elemento da parede é composto por **1 seção A**, **5 seções B** e **4 seções C**, pela equação 4, a resistência térmica (R_t) da parede, superfície à superfície, será:

$$R_t = \frac{A_a + (5 \cdot A_b) + (4 \cdot A_c)}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{(5 \cdot A_b)}{R_b} + \frac{(4 \cdot A_c)}{R_c}} \Rightarrow R_t = 0,2676 (m^2.K)/W$$

b) Resistência térmica total (de ambiente a ambiente)

Considerando-se, da tabela A.1 (para fluxo horizontal), que $R_{se} = 0,04 (m^2.K)/W$ e $R_{si} = 0,13 (m^2.K)/W$, a resistência térmica total (R_T), de ambiente a ambiente, calculada pela equação 3, será: $R_T = 0,04 + 0,2676 + 0,13 \Rightarrow R_T = 0,4376 (m^2.K)/W$

c) Transmitância térmica

A transmitância térmica (U) da parede, calculada pela equação 5, será:

$$U = \frac{1}{0,4376} \Rightarrow U = 2,29 W/(m^2.K)$$

d) Capacidade térmica da parede

Da tabela B.3, da norma, tem-se:

$$\begin{aligned} c_{reboco} = c_{argamassa} &= 1,00 \text{ kJ/(kg.K)} & c_{cerâmica} &= 0,92 \text{ kJ/(kg.K)} \\ \rho_{reboco} = \rho_{argamassa} &= 2.000 \text{ kg/m}^3 & \rho_{cerâmica} &= 1.600 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

SEÇÃO A (reboco + argamassa + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Ta} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} \Rightarrow C_{Ta} = 260 \text{ kJ/(m}^2.K)$$

SEÇÃO B (reboco + cerâmica + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Tb} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} + (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reboco} \Rightarrow C_{Tb} = 90 \text{ kJ/(m}^2.K)$$

SEÇÃO C (reboco + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + reboco)

Pela equação 6, tem-se:

$$C_{Tc} = (e \cdot c \cdot \rho)_{reb} + (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâm} + C_{Tar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâm} + C_{Tar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâm} + (e \cdot c \cdot \rho)_{reb}$$

Desprezando-se a capacidade térmica do ar, tem-se: $\Rightarrow C_{Tc} = 111 \text{ kJ/(m}^2.K)$

Como cada elemento da parede é composto por **1 seção A**, **5 seções B** e **4 seções C**, pela equação 7, a resistência térmica (R_t) da parede, superfície à superfície, será:

$$C_T = \frac{A_a + (5 \cdot A_b) + (4 \cdot A_c)}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{(5 \cdot A_b)}{C_{Tb}} + \frac{(4 \cdot A_c)}{C_{Tc}}} \Rightarrow C_T = 116 \text{ kJ/(m}^2.K)$$

e) Atraso térmico da parede

Considerando-se que:

$$R_{ext} = R_{reboco} = 0,02/1,15 = 0,0174 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W (da equação 1)}$$

$$R_t = 0,2676 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} \quad C_T = 116 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$C_{Text} = C_{Trebo} = (0,02 \cdot 1,00 \cdot 2000) = 40 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Da equação 9, tem-se: $B_0 = 76 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$ $B_1 = 64,19$ $B_2 = -13,43$

Como $B_2 < 0$, a norma recomenda considerá-lo nulo. Portanto, o atraso térmico da parede (φ) será dado por: $\varphi = 1,382 \cdot 0,2676 \cdot \sqrt{64,19 + 0} \Rightarrow \varphi = \underline{\underline{2,96 \text{ horas}}}$

f) Fator de ganho de calor solar

Considerando-se que:

$$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W (da tabela A.1)} \quad \alpha = 0,97 \text{ (da tabela B.2)} \quad U = 2,29 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

O fator de ganho de calor solar (FS_o) da parede pode ser calculado pela equação 10: $FS_o = 100 \cdot 2,29 \cdot 0,97 \cdot 0,04 \Rightarrow \underline{\underline{FS_o = 8,89 \%}}$

De acordo com a NBR 15220-3, a construção se situa na Zona Bioclimática 3; portanto, recomendam-se (paredes pesadas): $U \leq 2,20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ $\varphi \geq 6,5 \text{ horas}$ $FS_o \leq 3,5 \%$

Dessa forma, o limite máximo de absorvência recomendado pode ser calculado pela equação 11: $\alpha \leq 3,5/(4 \cdot 2,29) \Rightarrow \alpha \leq 0,38$

OBS: Portanto, para se respeitar este limite, de acordo com a tabela B.2, as paredes deveriam ser pintadas de amarelo ($\alpha=0,30$) ou de branco ($\alpha=0,20$). No presente trabalho, as paredes foram pintadas na cor grafite, justamente para evidenciar ao máximo as diferenças de comportamento térmico entre os três materiais (adobe, concreto e cerâmico).

Na tabela 1 é apresentado um resumo dos resultados dos parâmetros calculados, para cada uma das três paredes (adobe, blocos de concreto e bloco cerâmico de 8 furos), para que se possa mais facilmente comparar o desempenho dos três materiais.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros de desempenho térmico das paredes com os três materiais.

PARÂMETROS	MATERIAIS (espessura das paredes)		
	Adobe (17 cm)	Concreto (13 cm)	Cerâmico (13 cm)
$R_t \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$	0,1609	0,1860	0,2676
$R_T \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$	0,3309	0,3560	0,4376
$U \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$	3,02	2,81	2,29
$C_T \text{ (kJ/m}^2\cdot\text{K)}$	293	190	116
$\varphi \text{ (horas)}$	4,24	3,48	2,96
$FS_o \text{ (%)}$	11,7	10,90	8,89

R_t Resistência térmica do componente, de superfície à superfície

R_T Resistência térmica do componente, de ambiente a ambiente

U Transmitância térmica do componente

C_T Capacidade térmica da parede

φ Atraso térmico da parede

FS_o Fator de ganho de calor solar da parede

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos resultados apresentados por Porta-Gándara *et al.* (2002) (figuras 1 e 2), poder-se-ia concluir que a parede de adobe é 5 vezes mais isolante térmica que a de blocos de concreto, no entanto, como sua espessura é 2,5 vezes a de concreto, essa vantagem deve ser consideravelmente minorada. Esse fato ajuda a explicar a afirmação dos leigos de que “a casa de terra é muito mais confortável que a de outros materiais”, já que nessa afirmativa não é levado em consideração o fato de que, normalmente, as paredes de terra são muito mais espessas que as produzidas com os materiais convencionais. A seguir, são

apresentadas algumas considerações sobre os resultados obtidos com o presente trabalho e que estão resumidos na tabela 1. Considerando-se que as espessuras das camadas de revestimento foram iguais, 2 cm para todas as paredes, os adobes possuíam espessura de 13 cm, 44% maior que a dos blocos de concreto e os blocos cerâmicos, ambos com 9 cm. Portanto, as comparações entre estes dois últimos pode ser direta e entre eles e o adobe devem ser ponderadas.

De acordo com as definições da norma NBR 15220-1 (ABNT, 2005), quanto menor a **resistência térmica** do elemento (R_t ou R_T), maior será sua condutividade térmica. Considerando-se que é desejável que o componente seja o mais isolante térmico possível, o adobe mostrou-se desvantajoso com relação a este parâmetro, já que sua R_T foi 7,1% inferior à da parede de concreto e 24,4% inferior à da parede de blocos cerâmicos. Considerando-se que a espessura da parede de adobes é maior que as outras duas, esta desvantagem aumenta.

Com relação à **transmitância térmica** do componente (U), como este parâmetro é o inverso de R_T , quanto maior seu valor, maior será a condutividade térmica do componente e é válida a mesma avaliação desvantajosa para o adobe.

Como **capacidade térmica** (C_T) é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema, pode-se afirmar que quanto maior seu valor, melhor o desempenho térmico do componente (melhor isolante térmico será). Com relação a este parâmetro a parede de adobe se mostrou significativamente vantajosa, com C_T 54,2% superior à da parede de concreto e 152,6% superior à da parede de blocos cerâmicos.

Como **atraso térmico** (ϕ) depende da capacidade térmica do componente é o tempo transcorrido entre uma variação térmica de um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo, submetido a um regime periódico de transmissão de calor, pode-se afirmar que quanto maior seu valor, melhor seu desempenho térmico. Com relação a este parâmetro a parede de adobe também se mostrou vantajosa, com ϕ 21,8% superior à da parede de concreto e 43,2% superior à da parede de blocos cerâmicos.

Como o **fator de ganho de calor solar** da parede (FS_o) é diretamente proporcional à transmitância térmica, multiplicada por dois coeficientes que não dependem do material (α e R_{SE} , da equação 10), é válida a mesma avaliação desvantajosa para o adobe.

De uma forma global, pode-se afirmar que a parede de adobe avaliada mostrou-se mais vantajosa com relação à maioria dos parâmetros de conforto analisados, já que os parâmetros nos quais ficou em desvantagem levam em consideração as mesmas variáveis (arranjadas de diferentes formas). A parte experimental do projeto de pesquisa, citado na introdução deste artigo, foi concluída e confirmou-se esta avaliação teórica. Concluindo, cabe salientar que estas vantagens são relativas e, em alguns casos, não muito significativas. Portanto, recomenda-se muita prudência e avaliação científica, antes de afirmar que as paredes de terra são muito superiores, em termos de conforto, que as de outros materiais. Há que ser levada em consideração também a geometria das paredes, principalmente sua espessura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-1 Desempenho térmico de edificações*. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT. 8p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-2 Desempenho térmico de edificações*. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT. 32p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-3 Desempenho térmico de edificações*. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT. 30p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-4 Desenpenho térmico de edificações*. Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro: ABNT. 10p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-5 Desenpenho térmico de edificações*. Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluxométrico. Rio de Janeiro: ABNT. 10p.

Battistelle, R. A. G. (2002). *Análise da viabilidade técnica do resíduo de celulose e papel em tijolos de adobe*. São Carlos. 176p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Faria, O. B. (2002). *Utilização de macrófitas aquáticas na produção de adobe: um estudo de caso no Reservatório de Salto Grande (Americana-SP)*. São Carlos, 200p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. (Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-10022003-103821/>).

Faria, O. B. (2007). *Utilização de macrófitas aquáticas e sedimento do Reservatório de Salto Grande (Americana-SP) na produção de adobe, visando seu aproveitamento na construção de habitação de interesse social*. Bauru, 345p. Relatório científico final de pesquisa (Processo FAPESP nº 03/12460-4).

Faria, O. B.; Garcia, A. R.; Falavigna, J. P. T.; Ramos, S. C. (2007). *Caracterização de adobe, produzido com sedimento lacustre e biomassa de Eichhornia Crassipes, e sua utilização na construção de habitação de interesse social mais sustentável*. In: ATP Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 5., 2007, Aveiro. *Anais...* Aveiro (Portugal): Universidade de Aveiro, 2007. CD-ROM. p.1 - 12

Porta-Gándara, M. A.; Rubio, E.; Fernández, J. L. (2002). Economic feasibility of passive ambient confort in Baja California dwellings. *Building and Environment*. Amsterdam: Elsevier, v. 37, n. 10, p. 993-1001, out. 2002. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locat/buildenv>>. Acesso em: 05 mar. 2012.

Stulz, R. (2000). *Roofing primer: a catalogue of potential solutions*. St. Gallen (Switzerland): SKAT. 395p. ISBN3908001927.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo financiamento da pesquisa; aos técnicos do Laboratório de Construção Civil e do Laboratório de Mecânica dos Solos do DEC/FEB-UNESP; e, aos alunos orientados de Trabalho de Graduação, pelo apoio com os ensaios.

Curriculo

Obede Borges Faria. Engenheiro Civil; Mestre em Arquitetura e Urbanismo - Tecnologia do Ambiente Construído; Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental; Professor do Departamento de Engenharia Civil (*Faculdade de Engenharia de Bauru*, da *UNESP - Universidade Estadual Paulista*); Presidente do Conselho Municipal de Habitação de Bauru-SP; Membro da Rede Ibero-Americana PROTERRA; Membro de comitês científicos de vários periódicos. Currículo completo em <http://lattes.cnpq.br/2435383614704158>

Célia Neves. Engenheira Civil; Mestre em Engenharia Ambiental Urbana; Coordenadora da *Rede TerraBrasil*; Coordenadora do Proyecto de Investigación PROTERRA/HABYTED/CYTED, já finalizado; Membro da Rede Ibero-Americana PROTERRA; Consultora; Pesquisadora aposentada do CEPED – *Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Universidade do Estado da Bahia*. Currículo completo em <http://lattes.cnpq.br/4056186394947507>).