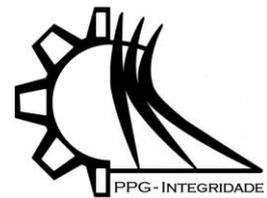




ISSN 2447-6102



Artigo

Análise da Condução de Calor em Paredes de Vedação

Silveira Júnior, M.H. ¹.

¹ Centro Universitário UniBrasil; engmarcioheron@gmail.com

Received: 10/05/2024; Accepted: 30/09/2024; Published: 01/10/2024.

Resumo: Devido à crescente preocupação com o meio ambiente, com a crise de energia gerada pelo consumo excessivo de sistemas de climatização e buscando aumentar satisfação dos seres humanos com o conforto do ambiente construído, tem-se que o estudo da transferência de calor nas edificações torna-se fundamental para que os projetistas possam conceber suas obras seguindo os parâmetros da eficiência energética das edificações. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar 4 configurações de paredes comumente utilizadas na construção civil, sob o ponto de vista da transferência de calor, bem como verificar a melhoria do desempenho térmico das paredes ao se acrescentar alguma estratégia passiva de conforto térmico, representada neste trabalho pela utilização do brise-soleil. A partir da realização dos experimentos, foi possível calcular os valores de fluxo de calor e fluxo médio de calor, bem como estimar a quantidade de calor que atravessou as paredes durante o intervalo de tempo do experimento. Analisando os resultados, pode-se observar a influência da resistência térmica e do fenômeno de inércia térmica no comportamento das paredes, além de se verificar uma melhoria considerável no desempenho das paredes ao se utilizar o brise – soleil.

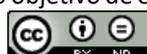
Palavras-Chave: Transferência de Calor. Eficiência Energética. Construção Civil. Experimentos.

Abstract: Due to the growing concern about the environment, with the energy crisis generated by the excessive consumption of air conditioning systems and seeking to increase the satisfaction of human beings with the comfort of the built environment, it is fundamental so that the designers can conceive their works following the parameters of the building energy efficiency. In this context, the main goal of this work is to evaluate 4 wall configurations commonly used in civil construction, from the point of view of heat transfer, as well as to verify the improvement of the thermal performance of the walls by adding some passive strategy of thermal comfort, represented in this work by the use of brise-soleil. From the experiments, it was possible to calculate the values of heat flux and average heat flux, as well as to estimate the amount of heat that went through the walls during the time interval of the experiment. From the results, it is possible to observe the influence of the thermal resistance and the phenomenon of thermal inertia on the behavior of the walls, besides a considerable improvement in the performance of the walls when using brise-soleil.

Key-Words: Heat Transfer. Energy Efficiency. Civil Construction. Experiments.

1. Introdução

No cenário atual, vários fatores têm contribuído para o aumento do consumo de energia no mundo. A disseminação do estilo de vida dos países desenvolvidos pela globalização tem levado muitas sociedades a um ponto onde não é mais possível viver de maneira sustentável. Um desses fatores que causam grande impacto ambiental em nações desenvolvidas é o uso de energia em edificações (SENGER, 2012). Segundo Santin et al. (2009), na Europa, 57% do consumo de energia em edificações destina-se ao aquecimento dos ambientes, 25% destina-se ao aquecimento de água, 11% para iluminação e uso de equipamentos elétricos, e 7% para o preparo de alimentos. No Brasil, o setor governamental tem investido em pesquisas, normalização e legislação para que o consumo energético do País seja reduzido sem prejudicar nosso conforto, com o objetivo de evitar grandes investimentos em geração de energia elétrica.



Este é o caso do PROCEL (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica), com atuação em diferentes esferas da sociedade, visando o uso racional de energia (LAMBERTS et al., 2014). De acordo com o PROCEL, cerca de 20% da produção de energia elétrica no Brasil é utilizada em edifícios comerciais e públicos, enquanto 29% é utilizada em residências. Alguns trabalhos apontam o consumo elevado de energia elétrica no país em condicionamento de ar, mostrando que esse consumo é da ordem de 48% do total em edifícios comerciais e que este valor pode chegar a 70% em edifícios com fachadas envidraçadas, durante o verão (GASPARINI et al., 2006; LAMBERTS et al., 2014). No setor residencial, o consumo de energia devido aos sistemas de condicionamento de ar é da ordem de 7% do total, valor considerado baixo, mas que cresce significativamente com o aumento do poder aquisitivo da população (LAMBERTS et al., 2014). A popularização dos sistemas de condicionamento térmico, aliada a grande oferta de energia disponibilizada a baixo custo no Brasil até então, fez com que a preocupação em se utilizar recursos naturais e materiais benéficos à conservação de calor sejam deixados em segundo plano ao se projetar uma edificação, uma vez que os aparelhos eletrônicos facilitam a climatização de ambientes, independentemente da forma arquitetônica e da orientação solar do edifício (MOTTIN, 2015). No entanto, devido à preocupação com o meio ambiente, aliada a crise de energia gerada pelo excesso de utilização de sistemas de climatização, e a necessidade de satisfação dos seres humanos com o conforto térmico (DOEBBER, 2010), fatores como orientação solar, a forma, os materiais, os sistemas construtivos e alternativas de produção e conservação de energia, devem ser analisados para que se possa obter a racionalização das construções, de maneira a utilizar os recursos naturais disponíveis de maneira sustentável e que esteja de acordo com as necessidades atuais, como a eficiência energética nas edificações. (MOTTIN, 2015). Vale ainda ressaltar que, segundo a NBR 15220-1 (2003), o conforto térmico é definido como sendo um estado de “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente”. De fato, conforme Rocha (2004), o conforto térmico de habitações pode ser garantido, na maior parte dos casos, evitando-se o uso de sistemas de ar condicionado, desta forma economizando energia, desde que o projeto destas seja adequado ao clima. Por esses motivos, o estudo de transferência de calor em edificações faz-se necessário, pois este ajuda a reduzir o desperdício de energia elétrica em ambientes climatizados e melhorando o conforto térmico de ambientes não climatizados (RUPP, 2009). Dando continuidade ao trabalho de Rupp (2009), que analisou a transferência de calor em paredes compostas por tijolos maciços, e de Doebber (2010), que analisou a influência das cores e do uso de Brise-Soleil no impacto térmico de paredes de alvenaria, o presente trabalho pretende analisar a condução de calor em paredes de alvenaria utilizando blocos cerâmicos de 6 e 8 furos, assentadas de maneira deitada e sobre o cutelo, analisando ainda a transferência de calor com e sem a utilização de Brise-soleil. Para isto, foram construídas 4 paredes – teste, rebocadas, as quais foram instrumentadas com sensores de temperatura e expostas a uma fonte de calor em uma de suas faces, visando simular as condições ambientais de uma parede de vedação comum. Com a obtenção dos dados de distribuições de temperaturas em cada parede, foi possível calcular os fluxos de calor atuantes, bem como as quantidades de calor transferida de uma face a outra em cada parede. Uma vez que as quantidades de calor que atravessam as paredes são conhecidas, é possível analisar qual configuração de parede analisada possui maior eficiência em reter o calor incidente, bem como verificar o impacto térmico causado pela utilização do brise – soleil. A escolha das configurações das paredes neste trabalho foi realizada devido ao interesse em se conhecer os fluxos de calor em configurações de paredes amplamente utilizadas na construção civil. A utilização de brise-soleil nas paredes tem por objetivo ser uma alternativa para melhorar o desempenho térmico nas mesmas. Para este trabalho, optou-se por utilizar uma placa cimentícia como brise, devido a sua variedade de aplicações e facilidade de obtenção.

2. Materiais e Métodos

Com o objetivo de conhecer o comportamento térmico de algumas configurações de paredes de alvenaria, foram construídas 4 paredes de tijolos cerâmicos, utilizando blocos de 6 e de 8 furos, sendo que estas foram construídas e avaliadas conforme as figuras 1, 2, 3, e 4. Uma vez obtido os dados experimentais de temperatura ao longo do tempo de cada parede, foi possível determinar os valores de fluxo de calor atuante em cada configuração de parede, bem como os valores de fluxos médios de calor e quantidade de calor.

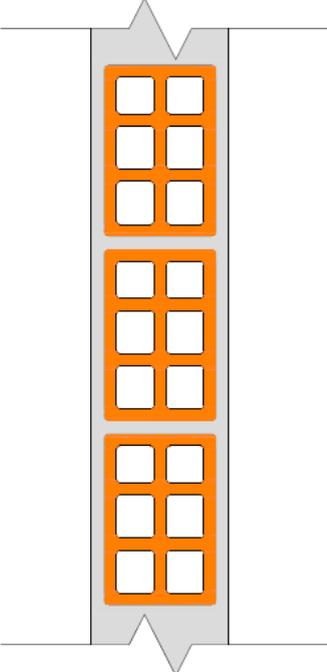
Descrição	Ilustração
Parede 01	
<p>Parede de blocos cerâmicos assentados na dimensão de 9 cm, revestida com argamassa externa e internamente.</p> <p>Dimensões do bloco: 9x14x24 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de revestimento: 1 cm.</p> <p>Espessura total da parede: 11,00 cm.</p>	

Figura 1. Descrição das paredes construídas para o estudo: (a) Características construtivas da Parede 01; (b) Ilustração da Parede 01.

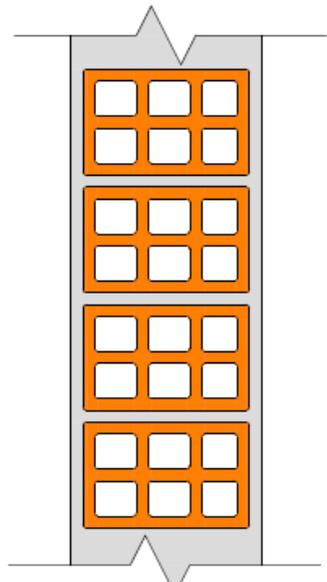
Descrição	Ilustração
Parede 02	
<p>Parede de blocos cerâmicos assentados na dimensão de 14 cm, revestida com argamassa externa e internamente.</p> <p>Dimensões do bloco: 9x14x24 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de revestimento: 1 cm.</p> <p>Espessura total da parede: 16,00 cm.</p>	

Figura 2. Descrição das paredes construídas para o estudo: (a) Características construtivas da Parede 02; (b) Ilustração da Parede 02.

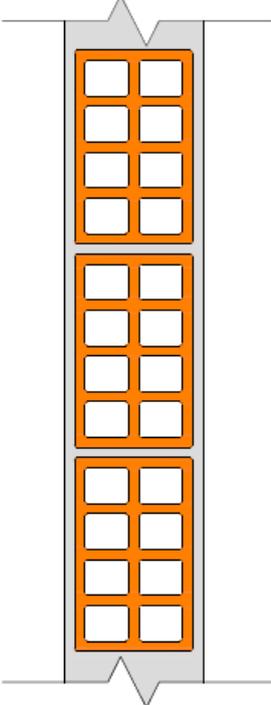
Descrição	Ilustração
<p>Parede 03</p>	
<p>Parede de blocos cerâmicos assentados na dimensão de 11,5 cm, revestida com argamassa externa e internamente.</p> <p>Dimensões do bloco: 11,5x19x24 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de revestimento: 1 cm.</p> <p>Espessura total da parede: 13,50 cm.</p>	

Figura 3. Descrição das paredes construídas para o estudo: (a) Características construtivas da Parede 03; (b) Ilustração da Parede 03.

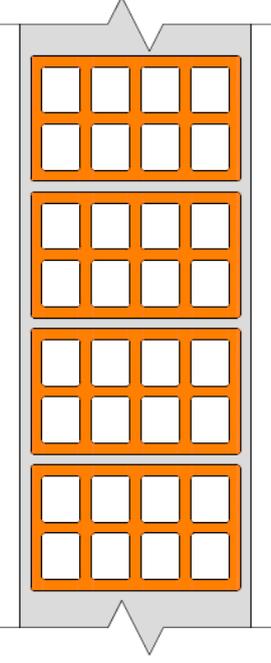
Descrição	Ilustração
<p>Parede 04</p>	
<p>Parede de blocos cerâmicos assentados na dimensão de 19 cm, revestida com argamassa externa e internamente.</p> <p>Dimensões do bloco: 11,5x19x24 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm.</p> <p>Espessura da argamassa de revestimento: 1 cm.</p> <p>Espessura total da parede: 21,00 cm.</p>	

Figura 4. Descrição das paredes construídas para o estudo: (a) Características construtivas da Parede 04; (b) Ilustração da Parede 04.

Para a construção das paredes foram utilizados tijolos de 6 furos, com dimensões de 9x14x24 centímetros, e tijolos de 8 furos, com dimensões de 11,5x19x24 centímetros. Para a execução do assentamento dos blocos cerâmicos e do reboco foi utilizado o produto Rebokor, da fabricante Inkor, que nada mais é do que uma massa pronta para reboco e assentamento. Segundo o fabricante, para preparar a argamassa deve-se colocar de 3,1 a 3,3 litros de água para 20 kg do produto, havendo ainda uma tolerância de se utilizar 20% a mais de água, dependendo das condições climáticas. O rendimento médio do produto é de 16 kg/m², para camadas de 1 cm de espessura, sendo que o consumo real pode variar dependendo da aplicação.

Para a realização deste trabalho foi utilizado um aquecedor de ambientes compacto da marca Powner, de 2000 Watts de potência, com o intuito de simular o comportamento da radiação térmica solar que atinge as paredes de vedação. O aquecedor conta com opções de potência de 1000 Watts e 2000 Watts, além de possuir termostato.

Para a aferição de temperaturas no brise foram utilizados 2 multímetros digitais com pares térmicos, modelo ET-2082C, da fabricante Minipa. Segundo a fabricante, este multímetro possui as seguintes aplicações: medições de indutância, tensão AC e DC, corrente AC e DC, resistência, temperatura, capacitância, frequência, testes de diodo, continuidade e hFE. Os termopares inclusos no multímetro podem realizar medições de temperatura na faixa de -20 °C a 250 °C.

Foi utilizado como brise uma placa cimentícia plana de 6 milímetros de espessura. De acordo com fabricantes deste material, suas aplicações são diversas, podendo-se citar: paredes externas e internas (áreas secas e úmidas); paredes para cisternas, steel frame e outros sistemas de fechamento; fechamentos externos; módulos construtivos (residencial, comercial e industrial); enclausuramento de estruturas; revestimentos decorativos; paredes curvas; fachadas; brises; paredes diafragma; beirais; sidings; divisórias sanitárias; shafts; forros; caixilharias.

O sistema de aquisição de dados é composto basicamente por um Arduino Uno recebendo sinais de 4 sensores de temperatura modelo DS18B20 da Maxim. Estes sensores de temperatura não necessitam de circuitos eletrônicos externos complexos ao Arduino Uno, possuindo apenas um resistor conectado em paralelo entre os pinos de dados dos sensores e os pinos de alimentação deles. Este circuito simples é necessário para o correto funcionamento do barramento de dados 1 wire dos sensores (o circuito é demonstrado no seu datasheet). Este barramento de dados permite a comunicação entre inúmeros sensores e uma porta de entrada digital de um microcontrolador, onde cada sensor possui um endereço único, no caso, foi usada uma porta digital do Arduino Uno para a leitura de 4 sensores.

As leituras dos dados de temperatura fornecidas pelos sensores são coletadas pelo aquisitor de dados, e então enviadas através de comunicação serial para um computador pessoal. A figura 5 ilustra o esquema de ligação dos sensores no Arduino Uno.

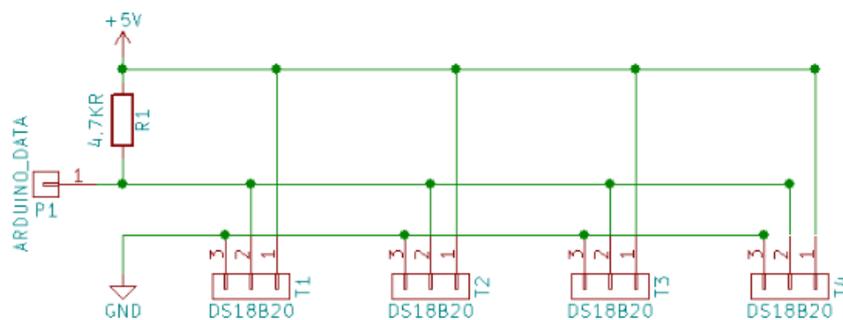


Figura 5. Esquema de ligação dos sensores no Arduino Uno.

Antes da realização dos testes experimentais, as paredes passaram pelos seguintes procedimentos de preparo:

- Após serem construídas, as paredes foram mantidas em repouso durante 45 dias, para que o processo de cura da argamassa fosse realizado, e também para que as paredes perdessem qualquer excesso de umidade que eventualmente pudessem conter.
- Em seguida, foram realizados 4 furos em cada parede, alinhados na mesma posição em relação a vertical (eixo y), e com espaçamento de 2 cm dentre si, na direção horizontal (eixo z), em relação a superfície das paredes. Cada furo possui uma profundidade diferente, na direção da largura das paredes, sendo que um furo é raso, de modo a ficar na superfície externa da parede, enquanto outro furo é profundo, de modo a atingir a interface da superfície interna das paredes. Os outros 2 furos possuem profundidades intermediárias. Os furos foram feitos de modo e ficarem em direção paralela ao fluxo de calor (eixo x) e no sentido a face que estará em contato com a fonte de calor. Os furos foram realizados utilizando-se uma broca de 10 mm e em seguida foram aspirados com um aspirador, de modo a remover qualquer detrito e poeira que pudesse vir a interferir com os resultados dos experimentos. A notação dos eixos é a seguinte: x = largura/espessura da parede; y = altura da parede; z = comprimento da parede.
- Foram inseridos 4 sensores de temperatura nas paredes ao longo de suas espessuras (eixo x), sendo um sensor em contato com a superfície externa ($x = 0$), e outro sensor em contato com a superfície interna ($x = L$), além dos outros 2 sensores inseridos e profundidades diferentes de modo a obter as medições da temperatura interna das paredes. As imagens das paredes já construídas, juntamente com os esquemas de inserção dos sensores encontram – se nas figuras 6 a 9. Cabe salientar que devido ao formato dos sensores, as posições indicadas nas figuras abaixo são aproximadas.

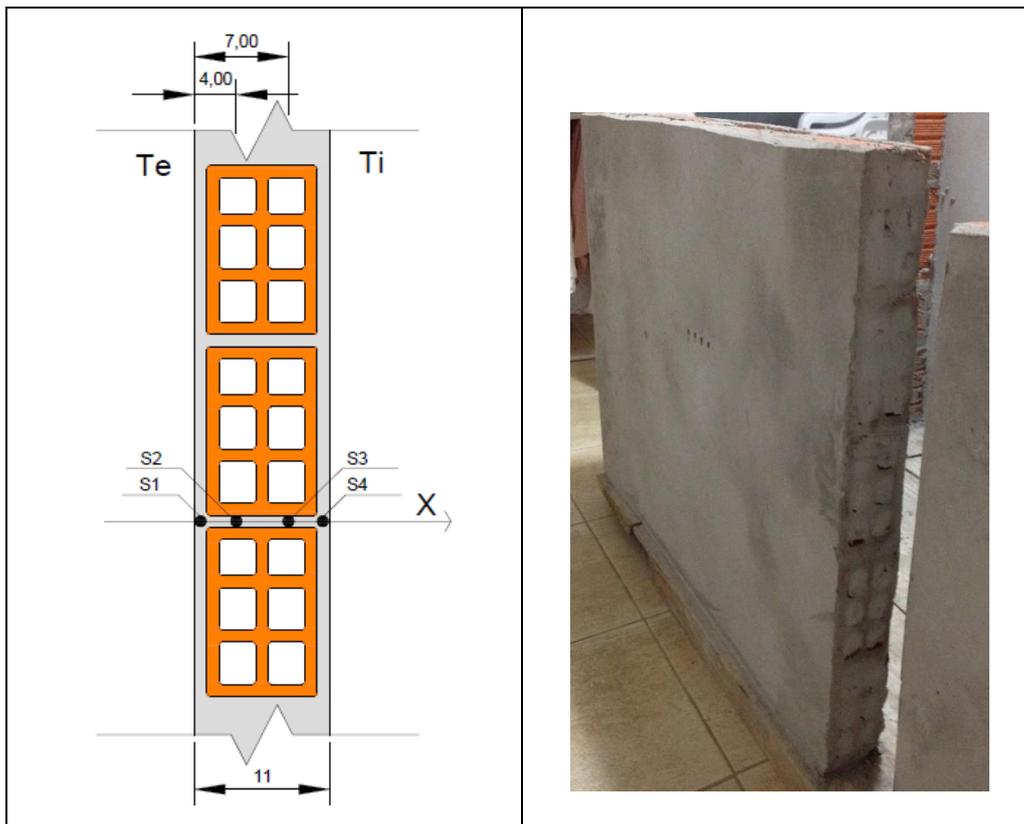


Figura 6. Parede 01: (a) Esquema de inserção dos sensores; (b) Foto real da parede construída.

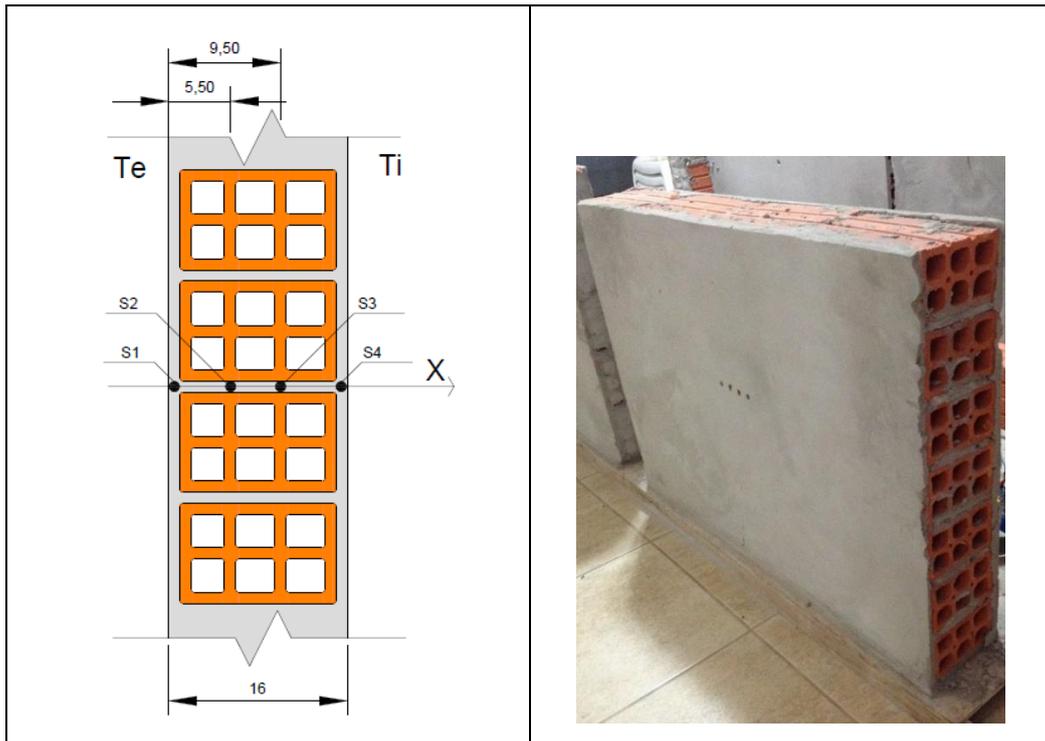


Figura 7. Parede 02: (a) Esquema de inserção dos sensores; (b) Foto real da parede construída.

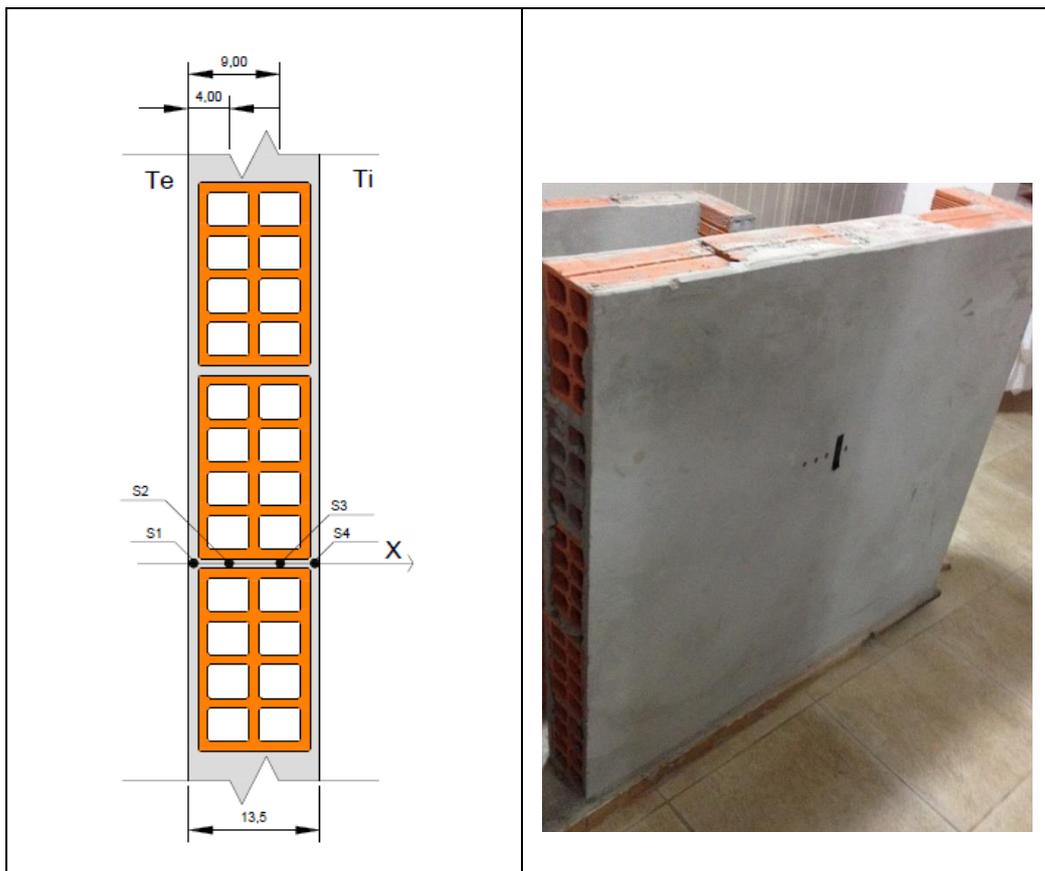


Figura 8. Parede 03: (a) Esquema de inserção dos sensores; (b) Foto real da parede construída.

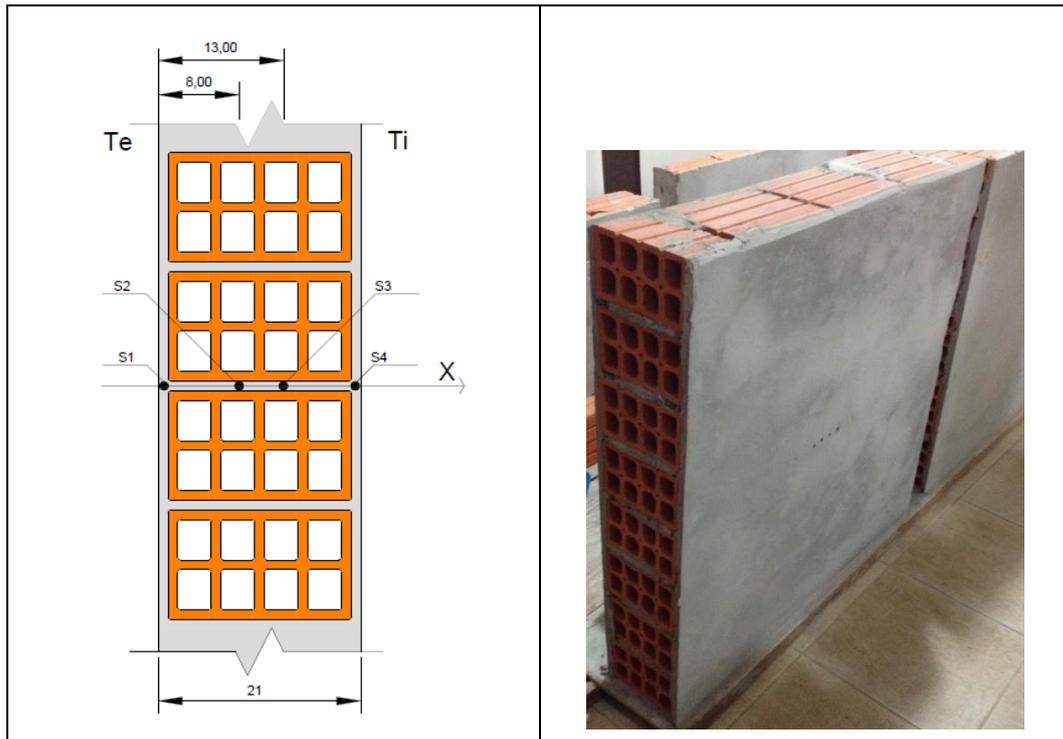


Figura 9. Parede 04: (a) Esquema de inserção dos sensores; (b) Foto real da parede construída.

Para a realização dos experimentos com a utilização do brise – soleil, foram utilizados dois multímetros com pares térmicos para aferição de temperaturas, os quais foram fixados nas faces externa e interna do brise, com o intuito de verificar a diminuição da temperatura da frente de calor que atinge as paredes. A figura 10 retrata a fixação dos pares térmicos em ambas as faces do brise. Para todos os experimentos com utilização do brise, adotou-se o afastamento de 4 centímetros da face da parede. O brise foi posicionado de modo a ter o seu centro na mesma linha da furação das paredes.



Figura 10. Posicionamento e instrumentação do brise para a realização dos experimentos.

Para a realização dos ensaios, o aquecedor foi acoplado a um tronco de cone de 35 centímetros de comprimento, feito de papel cartão e revestido com papel alumínio em seu interior, com o objetivo de otimizar a passagem de calor do aquecedor para as paredes, de modo a tentar minimizar as perdas de energia para o ambiente. A montagem experimental pode ser observada na figura 11.



Figura 11. Acoplamento do aquecedor na parede em estudo.

Para a execução dos ensaios, foram executados os seguintes procedimentos:

- 1º Passo: Realizar o acoplamento do aquecedor com a parede a ser analisada, devidamente instrumentada com os sensores de temperatura, e quando da utilização do brise, com os pares térmicos dos multímetros, tomando cuidado para que os furos estejam alinhados com os pares térmicos e com o centro do aquecedor.
- 2º Passo: Leitura inicial de cada sensor no instante $t = 0$.
- 3º Passo: Acionamento e regulagem da fonte de calor em função do tempo, de acordo com a escala de temperatura definida (4 estágios de temperatura – Tabela 1), sendo que, o sistema aquisitor de dados foi programado para realizar leituras a cada 1 minuto, desde o instante inicial ($t = 0$) até o instante final ($t = 8$ horas). Para a modelagem matemática do experimento, utilizou-se dados de temperatura de intervalos de tempo de 30 em 30 minutos. Para os experimentos que utilizaram o brise – soleil, as leituras nos multímetros foram realizadas de 30 em 30 minutos. Nos instantes de mudança de estágio de temperatura, as leituras de temperaturas em cada sensor ocorriam imediatamente antes da mudança.

Tabela 1. Estágios de temperatura do ensaio.

Estágio de Temperatura	Tempo (h)	Regulagem	Intensidade de Calor
1	2	Acionamento I (1000 W)	Baixa
2	2	Acionamento II (2000 W)	Média
3	2	Acionamento I (1000 W)	Baixa
4	2	Desativação	Sem intensidade de calor

A figura 12 ilustra o experimento em andamento.



Figura 12. (a) Experimento em andamento; (b) Leitura dos sensores no Monitor Serial.

Com a obtenção experimental dos dados de distribuição de temperaturas das paredes ao longo do tempo, foi possível realizar a modelagem matemática para a obtenção dos valores de Fluxo e Quantidade de Calor. Para isso foi necessário distinguir a superfície externa de superfície interna:

- Superfície externa da parede é a superfície na qual incide o calor gerado pelo aquecedor, de modo a simular as condições ambientais da face da parede em contato com o ambiente exterior.
- Superfície interna da parede é a superfície exposta às condições ambientais do interior das edificações.

O fluxo de calor por unidade de área é definido pela Lei de Fourier (equação 1):

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

É importante salientar que o sinal de menos é necessário para indicar que o calor é sempre transferido no sentido da diminuição das temperaturas. Para determinar o fluxo de calor em regime permanente em uma parede, o sentido do fluxo de calor em função da diferença de temperatura externa e interna é representado na figura 13.

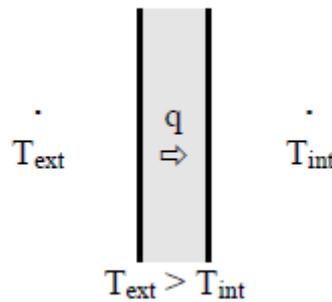


Figura 13. Direção do fluxo de calor em uma parede.

Na transferência de calor em paredes, pode – se considerar dois pontos: um x_1 localizado na superfície interna da parede, e outro x_2 localizado na superfície externa. Portanto teremos que $dt = T_{ext} - T_{int}$ e $dx = x_2 - x_1 = L$, onde L é a espessura da parede analisada. Desta maneira, a Lei de Fourier pode ser escrita conforme equação 2:

$$q'' = k \frac{(T_{ext} - T_{int})}{L} \quad (2)$$

Onde q'' é o Fluxo térmico por unidade de área [W/m^2] e k é a Condutividade térmica do material [$W/m.K$].

Segundo Lamberts et al. (2014), a resistência térmica de um material é sua propriedade de resistir à passagem do calor. Da mesma maneira que uma resistência elétrica está associada a condução de eletricidade, uma resistência térmica pode ser associada à condução de calor (INCROPERA; DEWITT, 2011). Quanto mais espesso um material for, maior será a sua resistência a transmissão de calor. Da mesma forma, quanto maior for a condutividade térmica (k) de um material, maior será a quantidade de calor transferida entre as suas faces, e assim, menor será sua resistência térmica (LAMBERTS et al., 2014). Portanto, a equação que determina a resistência térmica é:

$$R = \frac{L}{k} \quad (3)$$

A resistência térmica de um material heterogêneo é calculada a partir da soma das resistências térmicas de cada elemento que compõe esse material. Esta soma pode ser feita em série ou em paralelo, conforme a disposição das camadas do mesmo (LAMBERTS, 2014). Para uma parede composta por n camadas de materiais, a resistência térmica é expressada da seguinte maneira:

$$R_t = R_{se} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{k_i} + R_{si} \quad (4)$$

Onde R_t é a Resistência térmica total [$m^2.K/W$], R_{se} é a Resistência térmica superficial externa [$m^2.K/W$], R_{si} é a Resistência térmica superficial interna [$m^2.K/W$], e é a Espessura da camada do material [m] e k é a Condutividade térmica de cada camada do material [$W/m.K$].

Considerando as propriedades termo físicas das paredes sendo fixas, uma forma equivalente a Lei de Fourier para o cálculo do fluxo de calor em uma parede é a seguinte:

$$q'' = U \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (5)$$

Onde U é a transmitância térmica da parede [$W/m^2.K$], sendo definida como o inverso da resistência térmica total da parede, ou seja, $U = 1/R_t$.

A quantidade de calor que atravessa uma superfície S , por metros quadrados é obtida multiplicando o fluxo de calor pelo intervalo de tempo, conforme equação 6.

$$Q = q'' \cdot dt \quad (6)$$

Onde Q é a Quantidade de calor [J/m^2] e dt é o Intervalo de tempo [s].

Os cálculos das resistências e transmitâncias térmicas das paredes encontram-se no anexo A.

3. Resultados

3.1. Distribuição de Temperaturas das Paredes

Após os ensaios experimentais, foi possível analisar a distribuição de temperaturas das paredes ao longo de suas espessuras. Os gráficos das distribuições de temperatura das paredes em função do tempo encontram-se dispostos nas figuras 14 a 21:

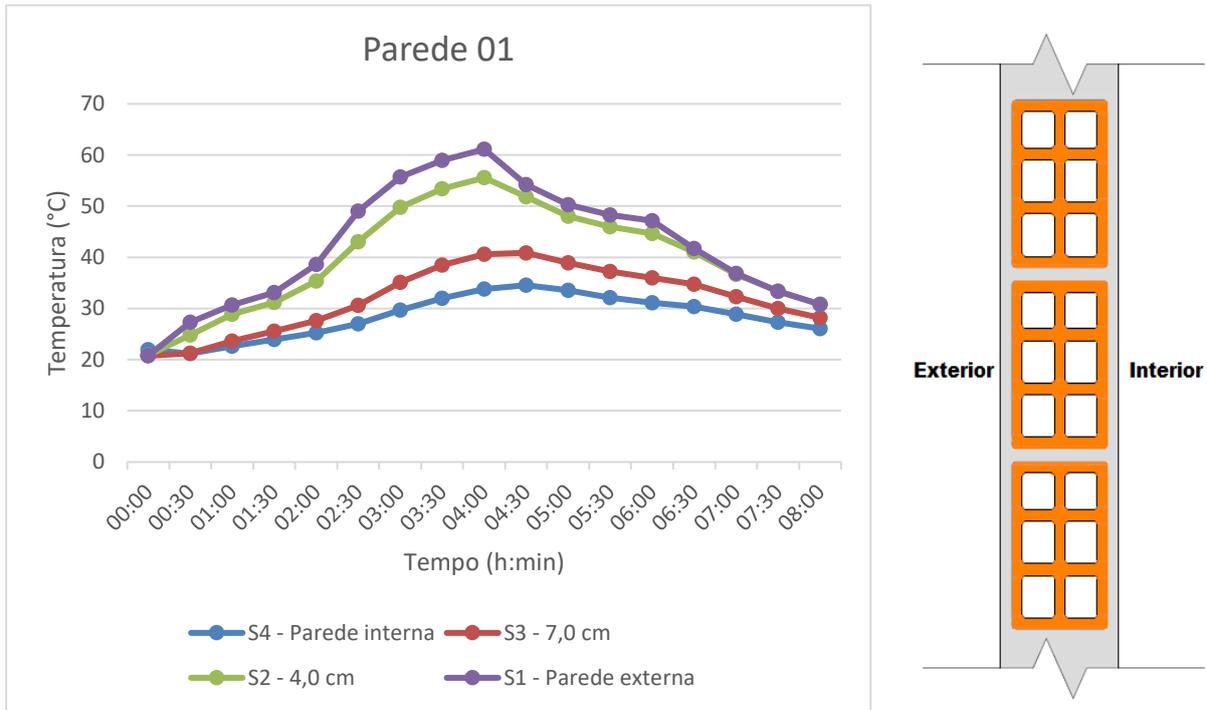


Figura 14. Parede 01: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

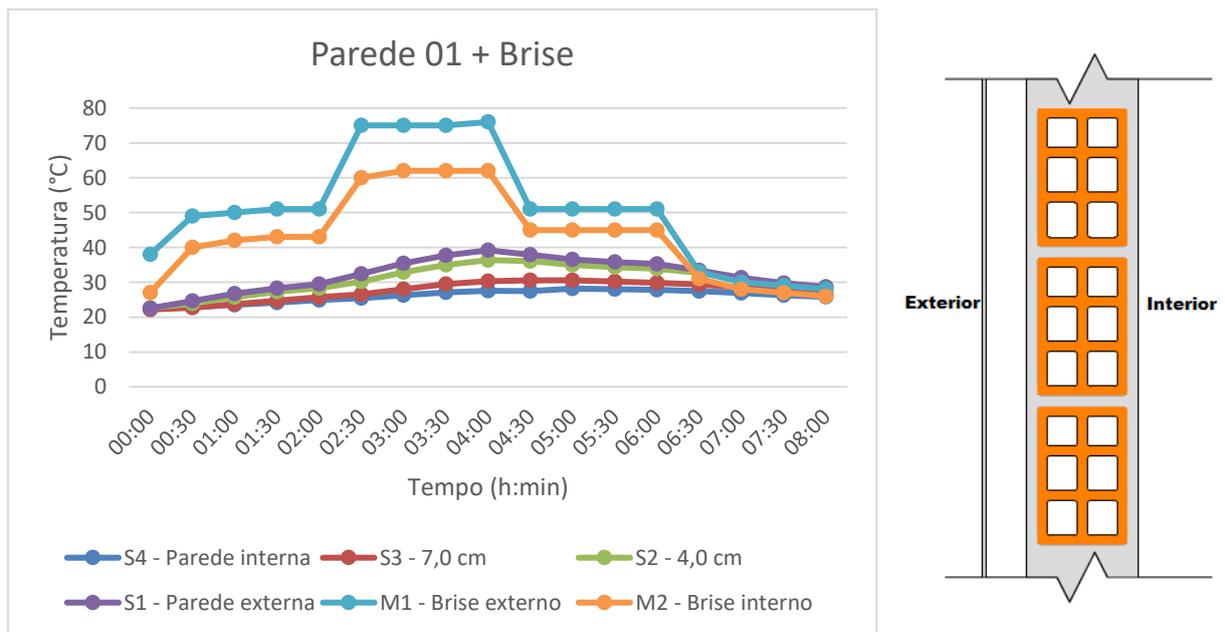


Figura 15. Parede 01 com Brise: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

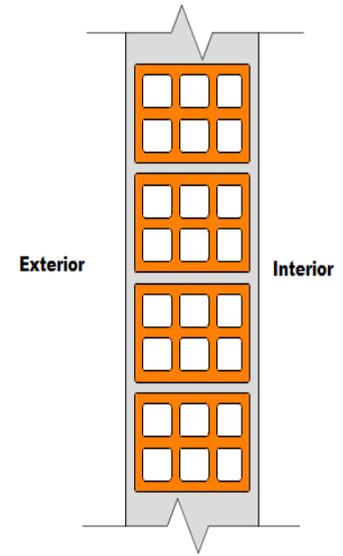
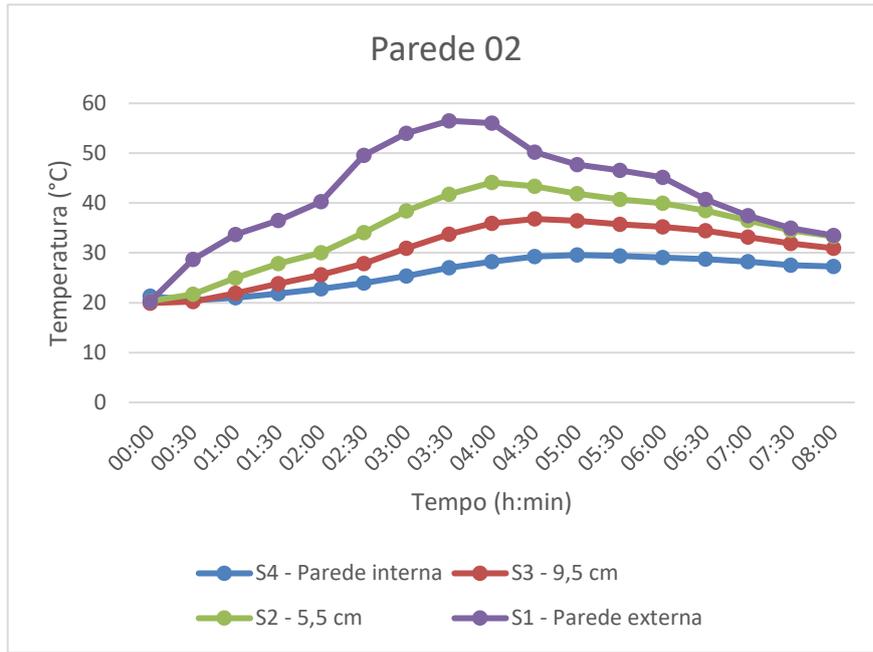


Figura 16. Parede 02: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

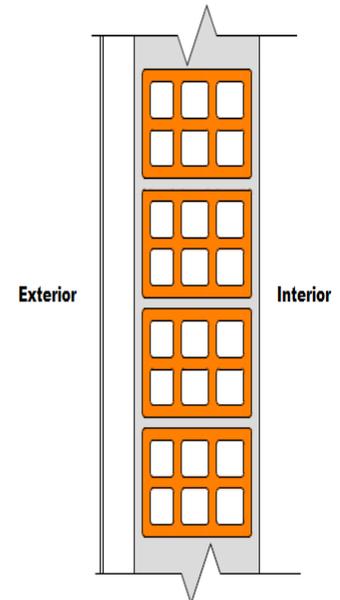
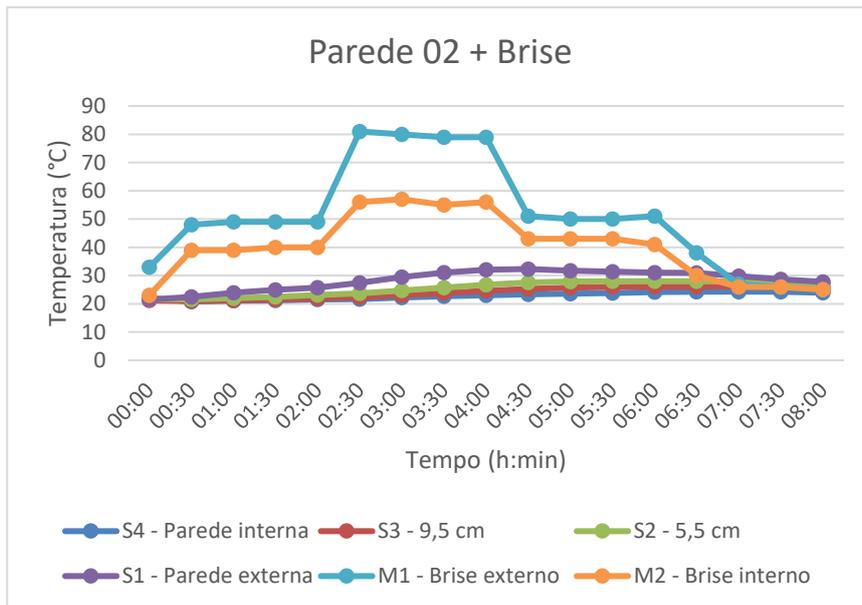


Figura 17. Parede 02 com Brise: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

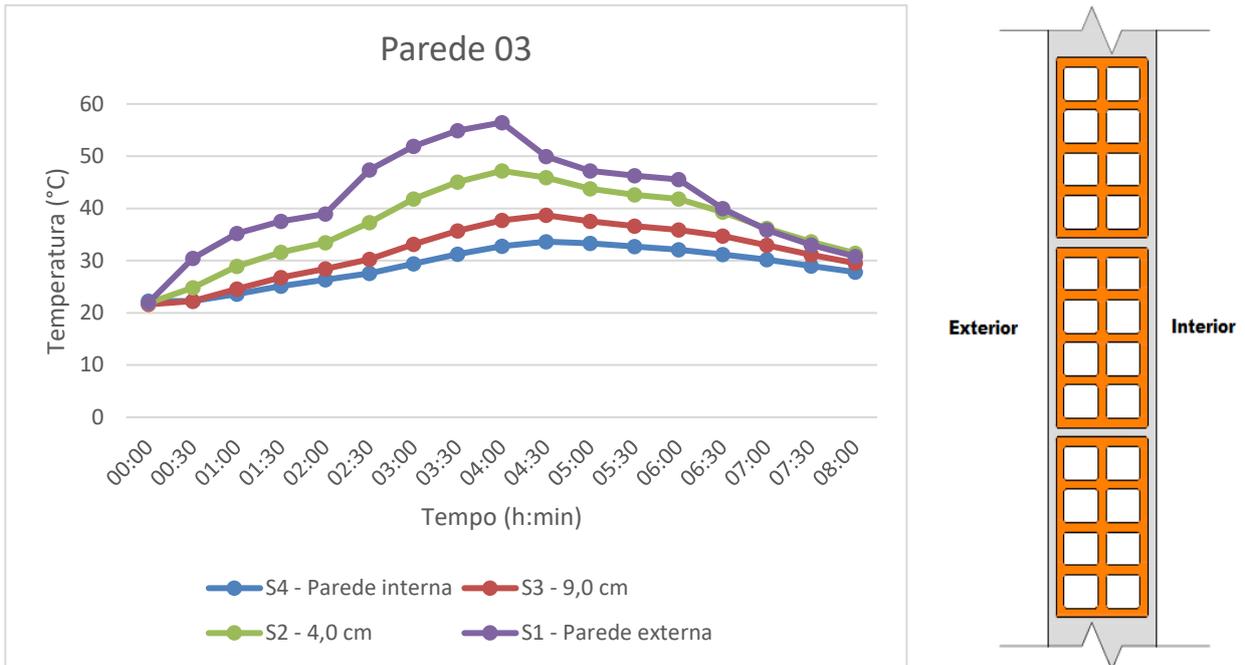


Figura 18. Parede 03: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

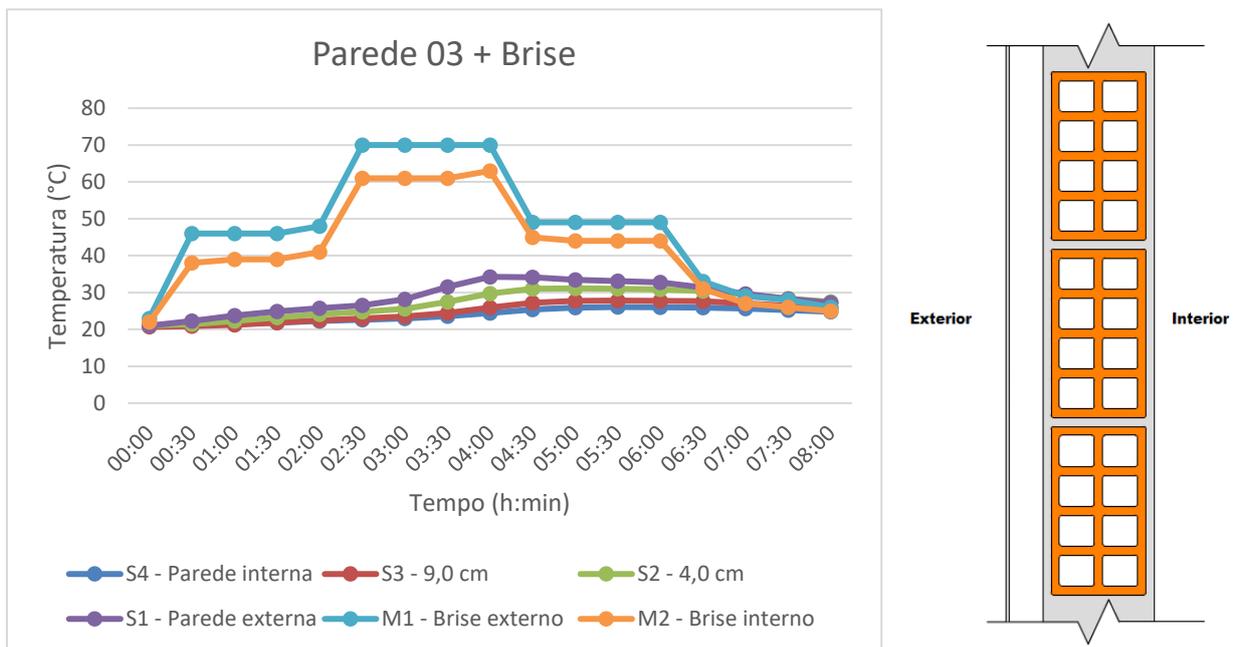


Figura 19. Parede 03 com Brise: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

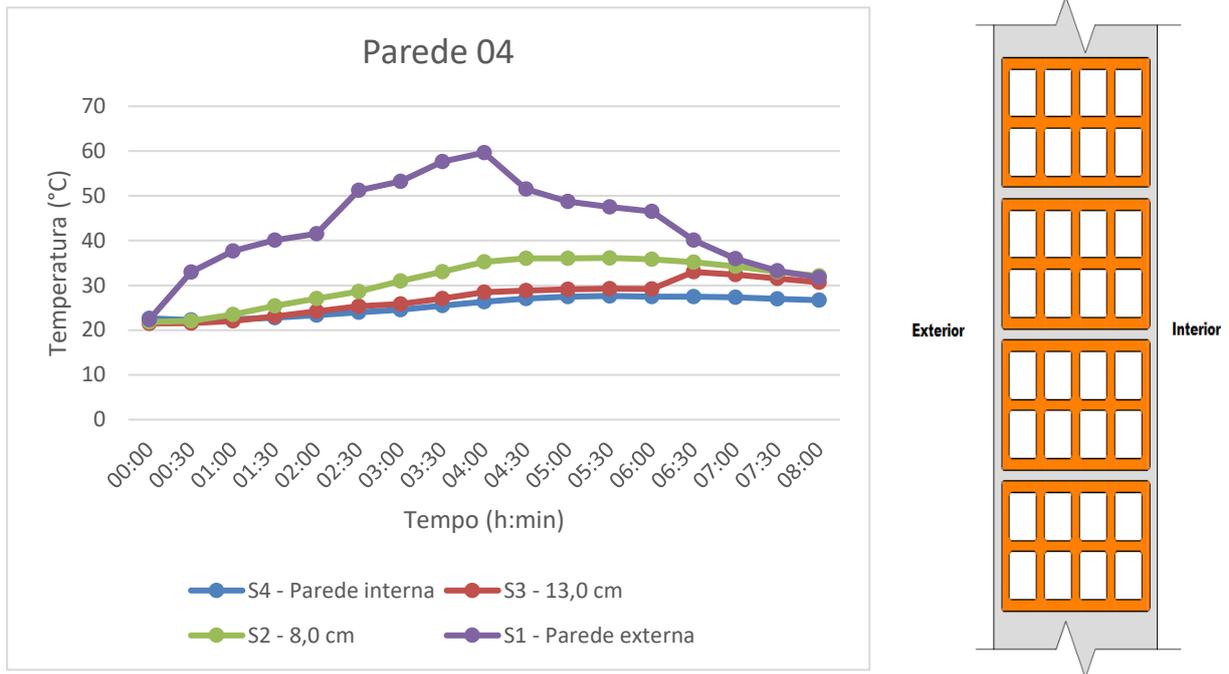


Figura 20. Parede 04: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

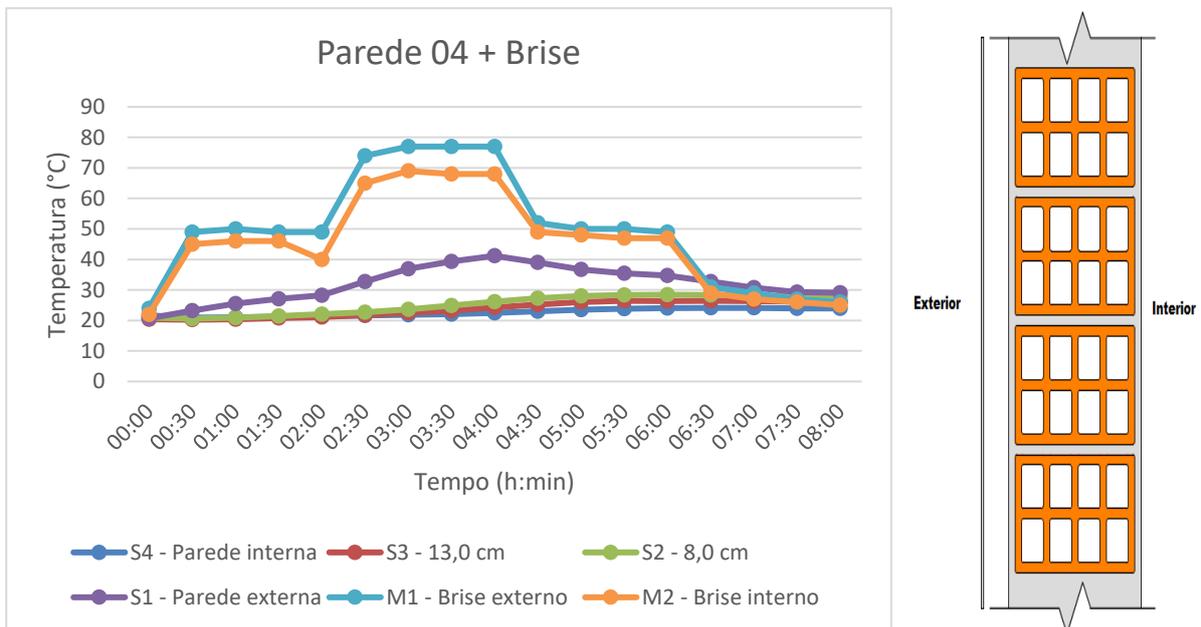


Figura 21. Parede 04 com Brise: (a) Distribuição de temperaturas ao longo do experimento; (b) Ilustração da parede.

Com a elaboração dos gráficos de distribuição de temperatura, foi possível verificar como cada parede se comportou durante as 8 horas de experimento. Pode-se perceber que com a utilização do brise – soleil, a temperatura na face exterior da parede ficou dentro de 20°C e 30°C inferior aos casos sem a utilização do brise. É possível constatar também que, quanto mais espessa é a parede, menos acentuadas são as curvas de distribuição de temperatura dos sensores próximos a face interna das paredes, indicando que, com o aumento da resistência térmica da parede, os

impactos devido às variações e picos e temperatura que ocorrem na face externa das paredes tornam-se menos perceptíveis no lado interno das mesmas.

3.2. Fluxo de Calor nas Paredes

Com a obtenção da distribuição de temperatura em função do tempo de cada parede, foi possível calcular o fluxo de calor que atravessa as mesmas, a partir do seu lado externo até o seu lado interno. O conhecimento dos valores de fluxo de calor atuantes em cada parede é necessário para que se possa determinar seu comportamento térmico, bem como para estimar a quantidade de calor que a atravessou no intervalo de tempo do experimento. Os gráficos dos fluxos de calor podem visualizados nas figuras 22 a 25.

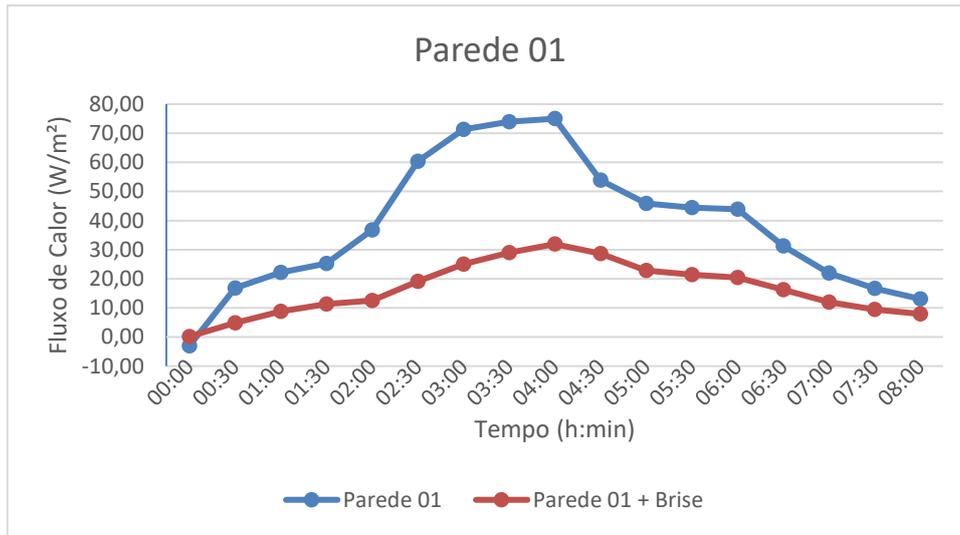


Figura 22. Fluxo de calor na Parede 01 com e sem a utilização de Brise.

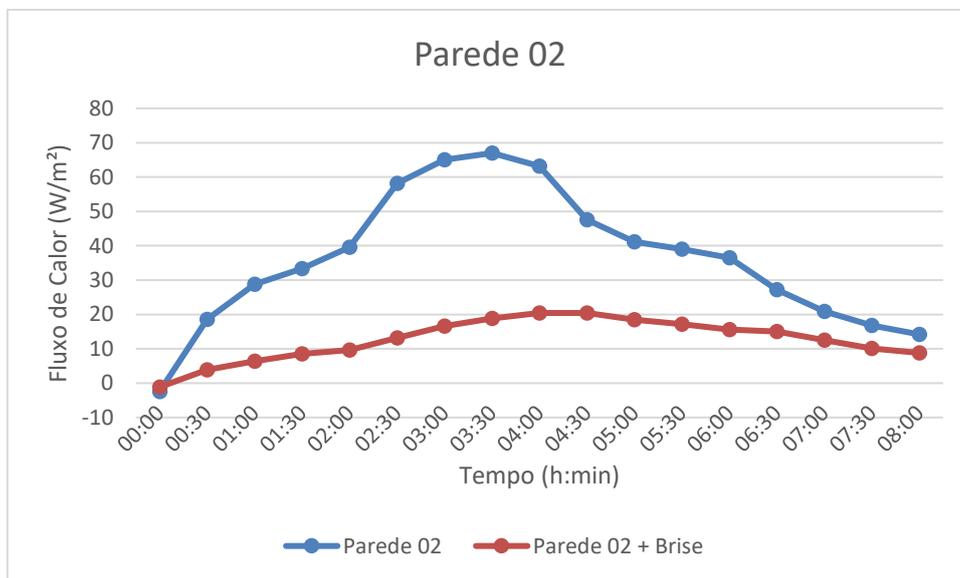


Figura 23. Fluxo de calor na Parede 02 com e sem a utilização de Brise.

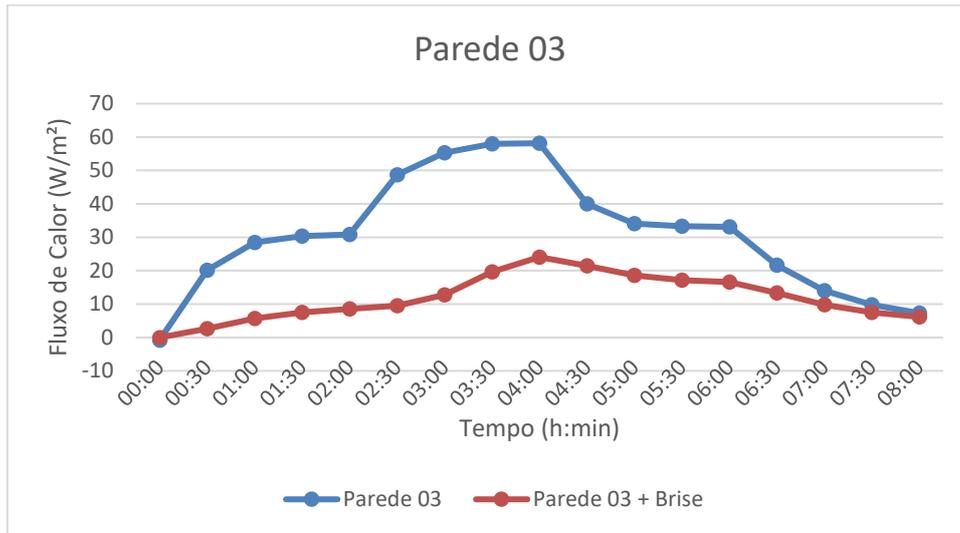


Figura 24. Fluxo de calor na Parede 03 com e sem a utilização de Brise.

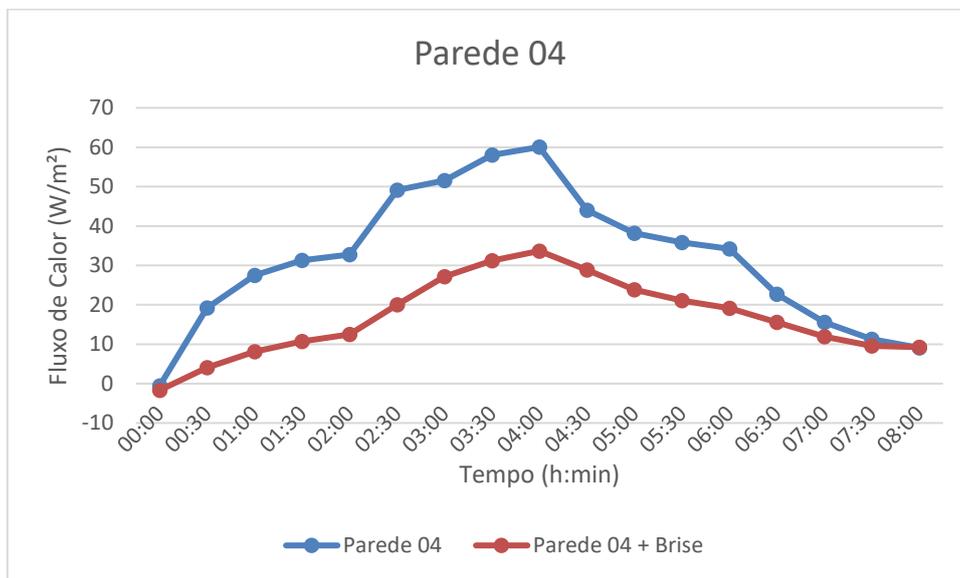


Figura 25. Fluxo de calor na Parede 04 com e sem a utilização de Brise.

A partir da determinação dos fluxos de calor em cada parede, foi possível calcular o fluxo médio de calor de cada parede, aplicando a média aritmética dos valores de fluxo encontrados anteriormente. A partir do fluxo médio, calculou-se a quantidade de calor média que atravessou cada parede durante 8 horas de duração dos experimentos.

Tabela 2. Fluxo Médio de Calor e Quantidade de Calor.

Parede	Fluxo Médio de Calor (W/m²)	Quantidade de Calor (J/m²)
01	38,206	1100320,009
02	36,157	1041321,363
03	30,731	885047,717
04	31,764	914802,048
01 + Brise	16,565	477079,708
02 + Brise	12,616	363342,901
03 + Brise	11,824	340543,736
04 + Brise	16,765	482830,848

4. Discussão

Para o estudo do comportamento térmico de paredes, os cálculos de fluxos de calor são extremamente relevantes, uma vez que, sob a ótica da transferência de calor, paredes com valores de fluxos térmicos menores são as que mantêm as condições do ambiente interno menos variáveis. No estudo em questão, vale a pena ressaltar os resultados de fluxo médio de calor da parede 04, que para o caso sem a utilização do brise, obteve resultado semelhante ao da parede 03, enquanto que no caso em que o brise foi utilizado, a parede obteve resultados semelhantes ao da parede 01. A hipótese do autor para explicar o comportamento térmico da parede 04 é a de que, devido a sua espessura ser muito maior que as demais paredes, sua resistência térmica, bem como sua capacidade térmica também são muito maiores, de modo que esta parede consegue acumular uma quantidade maior de energia.

Este acúmulo de energia é responsável por gerar o efeito de inércia térmica, o qual se fez presente durante o experimento, de modo que, no intervalo de tempo do experimento em que as paredes deveriam perder temperatura, a parede em questão resfriou a uma taxa menor que as demais, fazendo com que sua temperatura ficasse levemente mais elevada. Devido a isso, no cálculo de fluxo médio de calor, este incremento de temperaturas no período de resfriamento da parede 04 em relação as outras, fez com que seu resultado fosse semelhante as outras paredes supracitadas. Recomenda-se, para a melhor caracterização do comportamento térmico de paredes espessas, utilizar um intervalo de tempo maior durante a realização do experimento.

Outra observação pode ser feita ao se comparar os resultados das paredes 02 e 03, onde pode ser visto que mesmo que a parede 02 seja mais espessa que a parede 03, esta obteve um desempenho térmico superior. A hipótese do autor é que devido a diferença de dimensões entre os blocos de 6 e 8 furos, o tamanho das câmaras de ar deste último é superior ao do bloco de 6 furos, o que pode ser suficiente para que sua resistência térmica também seja superior.

A quantidade de calor pode ser vista como um balanço da energia que entra e sai das paredes durante um intervalo de tempo. Seu valor é obtido multiplicando-se o fluxo de calor médio pelo intervalo de tempo considerado no experimento. Quanto menores forem os valores de Q , menor será a carga térmica dos ambientes internos, ou seja, quanto menos calor for transferido da face externa para a face interna das paredes, melhor será o seu desempenho térmico. A tabela 3 abaixo mostra a classificação de cada parede estudada em relação ao seu desempenho térmico.

Tabela 3. Classificação das paredes quanto ao desempenho térmico.

Classificação	Parede	Q (J/m ²)
1°	03 + Brise	340543,736
2°	02 + Brise	363342,901
3°	01 + Brise	477079,708
4°	04 + Brise	482830,848
5°	03	885047,717
6°	04	914802,048
7°	02	1041321,363
8°	01	1100320,009

5. Conclusões

Considera-se que o objetivo desta pesquisa foi alcançado, uma vez que foi possível avaliar diferentes configurações de paredes, variando a tipologia e disposição dos blocos cerâmicos que as compõe, bem como verificar de maneira quantitativa os efeitos causados pela utilização do brise-soleil, sob o ponto de vista da transferência de calor em edificações. A partir dos ensaios experimentais para a obtenção das distribuições de temperatura em cada parede, foi possível calcular seus respectivos valores de fluxo de calor, fluxo médio e quantidade de calor.

De modo geral, a metodologia adotada mostrou-se adequada para realizar a caracterização do comportamento térmico das paredes, com ressalvas aos casos referentes a parede 04, a qual apresentou de maneira significativa efeitos de inércia térmica, os quais certamente tiveram influência sobre os seus resultados. Porém, adotando um intervalo de tempo maior para o experimento, acredita-se que haveria uma melhoria destes resultados.

Pode-se observar que o melhor desempenho térmico foi o da parede 03, tanto nos casos com a utilização do brise-soleil, quanto sem. Ainda, verificando os gráficos de distribuições de temperatura, fica evidente que a utilização

do brise reduz consideravelmente a transferência de calor para o interior das paredes, sendo que este isolamento ocorre já nas suas primeiras camadas.

Vale a pena salientar que a avaliação realizada neste trabalho não dispensa a análise específica que deve ser realizada para cada edificação, de modo a estudar as demais variáveis intervenientes no ambiente construído, porém, esta avaliação contribui de modo a apontar as possíveis soluções construtivas que podem ser utilizadas tendo em vista a eficiência energética das edificações. Destaca-se também que frequentemente, edificações que adotam soluções construtivas de baixo custo inicial tendem a consumir muito mais energia com o decorrer do tempo, obtendo conseqüentemente, custos financeiros maiores do que edificações eficientes energeticamente, as quais possuem investimentos iniciais mais elevados.

Referências

1. SENGER, S. C. T.; Determinação das Propriedades Térmicas de Materiais de Construção Através do Método do Regime Regular e sua Aplicação na Transferência de Calor de Paredes. 2012. 119p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí, 2012.
2. SANTIN, O. G.; ITARD, L.; VISSCHER, H. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, 2009, pp 1223–1232.
3. LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. São Paulo: PW Editores, 2014. 382 p.
4. GASPARINI, R. R.; MOURA, L. M.; JABUR, A. S.; Análise do Uso da Lã de Vidro como Isolante Térmico em Edificações. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído - ENTAC 2006. 8p. Florianópolis. 2006.
5. MOTTIN, M. H.; Isolamento Térmico em Fachadas pelo Exterior: Redução do Consumo Energético da Edificação para fins de Conforto Térmico. Lajeado, 2015. 121p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates. 2015.
6. DOEBBER, A. T. N.; Estudo Para Redução do Impacto Térmico em Paredes de Alvenaria: Influência das Cores e do uso do Brise – Soleil. 2010. 120 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. NBR 15220-1. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.
8. ROCHA, A. M. Avaliação das condições de conforto térmico ao calor em edificações habitacionais multipavimentadas na cidade de Ijuí - RS. Ijuí – RS, 2004. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.
9. RUPP, R. F. Análise da transferência de calor em paredes compostas por tijolos maciços. 2009. 119 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.
10. MAXIM. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer- DATASHEET COMPLETE. Maxim Integrated Products, 2015.
11. INCROPERA, F. P.; DE-WITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos. 2011. 672p.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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. NBR 15220-2. Rio de Janeiro, 2003. 21 p.

$$R_b = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,09}{0,90} + \frac{0,01}{1,15} = 0,1174 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

SEÇÃO C (Reboco + Tijolo + Ar + Tijolo + Ar + Tijolo + Reboco):

$$A_c = 0,03 \times 0,24 = 0,0072 \text{ m}^2$$

$$R_c = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} =$$

$$= \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + \frac{0,01}{1,15} = 0,3707 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE:

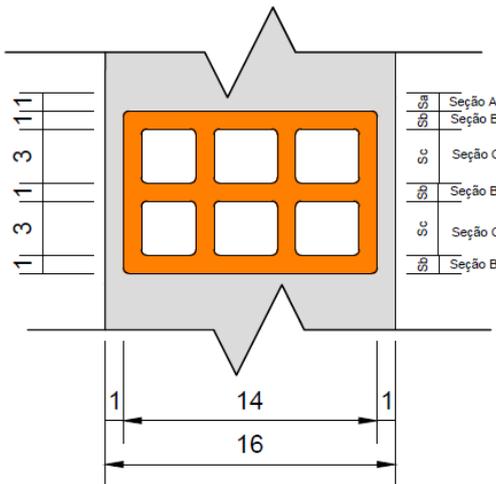
$$R_{parede} = \frac{A_a + 4 A_b + 3 A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{4A_b}{R_b} + \frac{3A_c}{R_c}} = \frac{0,0039 + 4 \times 0,0024 + 3 \times 0,0072}{\frac{0,0039}{0,0956} + \frac{4 \times 0,0024}{0,1174} + \frac{3 \times 0,0072}{0,3707}} = 0,1942 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

$$R_{total} = R_{si} + R_{parede} + R_{se} = 0,13 + 0,1942 + 0,04 = 0,3642 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

TRANSMITÂNCIA TÉRMICA:

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{0,3642} = 2,745 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

PAREDE 02:



SEÇÃO A (Reboco + Argamassa + Reboco):

$$A_a = 0,01 \times 0,24 + 0,01 \times 0,10 = 0,0034 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{k_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,14}{1,15} + \frac{0,01}{1,15} = 0,139 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

SEÇÃO B (Reboco + Tijolo + Reboco):

$$A_b = 0,01 \times 0,24 = 0,0024 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,14}{0,90} + \frac{0,01}{1,15} = 0,1729 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

SEÇÃO C (Reboco + Tijolo + Ar + Tijolo + Ar + Tijolo + Ar + Tijolo + Reboco):

$$A_c = 0,03 \times 0,24 = 0,0072 \text{ m}^2$$

$$R_c = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} +$$

$$0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + \frac{0,01}{1,15} = 0,5418 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE:

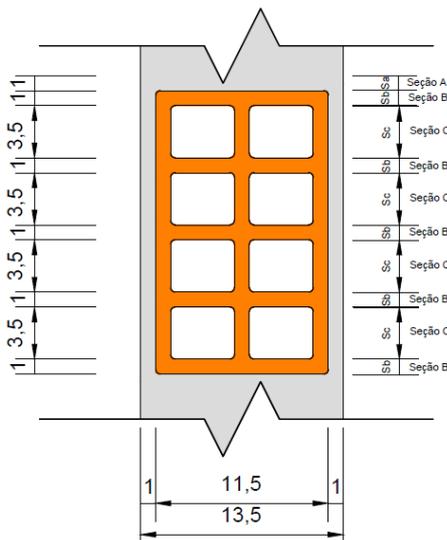
$$R_{parede} = \frac{A_a + 3 A_b + 2 A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{3A_b}{R_b} + \frac{2A_c}{R_c}} = \frac{0,0034 + 3 \times 0,0024 + 2 \times 0,0072}{\frac{0,0034}{0,139} + \frac{3 \times 0,0024}{0,1729} + \frac{2 \times 0,0072}{0,5418}} = 0,2702 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

$$R_{total} = R_{si} + R_{parede} + R_{se} = 0,13 + 0,2702 + 0,04 = 0,4402 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

TRANSMITÂNCIA TÉRMICA:

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{0,4402} = 2,271 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

PAREDE 03:



SEÇÃO A (Reboco + Argamassa + Reboco):

$$A_a = 0,01 \times 0,24 + 0,01 \times 0,20 = 0,0044 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{k_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,115}{1,15} + \frac{0,01}{1,15} = 0,1174 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

SEÇÃO B (Reboco + Tijolo + Reboco):

$$A_b = 0,01 \times 0,24 = 0,0024 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,115}{0,90} + \frac{0,01}{1,15} = 0,1451 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

SEÇÃO C (Reboco + Tijolo + Ar + Tijolo + Ar + Tijolo + Reboco):

$$A_c = 0,035 \times 0,24 = 0,0084 \text{ m}^2$$

$$R_c = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} +$$

$$\frac{0,01}{1,15} = 0,3707 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE:

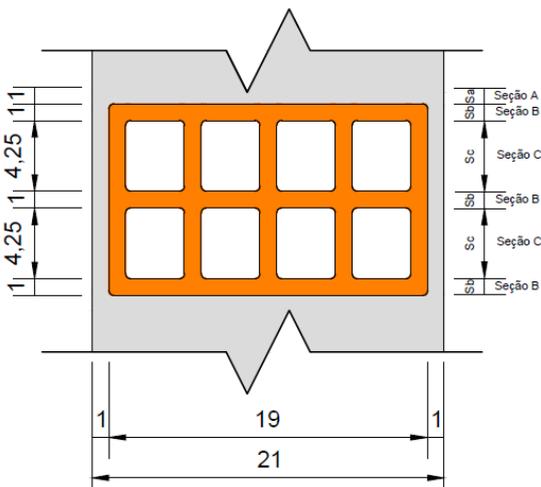
$$R_{parede} = \frac{A_a + 5 A_b + 4 A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{5A_b}{R_b} + \frac{4A_c}{R_c}} = \frac{0,0044 + 5 \times 0,0024 + 4 \times 0,0084}{\frac{0,0044}{0,1174} + \frac{5 \times 0,0024}{0,1451} + \frac{4 \times 0,0084}{0,3707}} = 0,2372 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

$$R_{total} = R_{si} + R_{parede} + R_{se} = 0,13 + 0,2372 + 0,04 = 0,4072 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

TRANSMITÂNCIA TÉRMICA:

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{0,4072} = 2,455 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

PAREDE 04:



SEÇÃO A (Reboco + Argamassa + Reboco):

$$A_a = 0,01 \times 0,24 + 0,01 \times 0,115 = 0,00355 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{k_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,19}{1,15} + \frac{0,01}{1,15} = 0,1826 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

SEÇÃO B (Reboco + Tijolo + Reboco):

$$A_b = 0,01 \times 0,24 = 0,0024 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} + \frac{0,19}{0,90} + \frac{0,01}{1,15} = 0,2285 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

SEÇÃO C (Reboco + Tijolo + Ar + Tijolo + Ar + Tijolo + Ar + Tijolo + Reboco):

$$A_c = 0,04 \times 0,24 = 0,0096 \text{ m}^2$$

$$R_c = \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{k_{cerâmica}} + \frac{e_{reboco}}{k_{reboco}} = \frac{0,01}{1,15} +$$

$$\frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + \frac{0,01}{1,15} = 0,7129 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

RESISTÊNCIA TÉRMICA DA PAREDE:

$$R_{parede} = \frac{A_a + 3 A_b + 2 A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{3A_b}{R_b} + \frac{2A_c}{R_c}} = \frac{0,00355 + 3 \times 0,0024 + 2 \times 0,0096}{\frac{0,00355}{0,1826} + \frac{3 \times 0,0024}{0,2285} + \frac{2 \times 0,0096}{0,7129}} = 0,3849 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

$$R_{total} = R_{si} + R_{parede} + R_{se} = 0,13 + 0,3849 + 0,04 = 0,5549 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

TRANSMITÂNCIA TÉRMICA:

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{0,5549} = 1,802 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$