

Impacto da adição de argamassa isolante nas propriedades termomecânicas de blocos de concreto de vedação vertical

Impact of the insulating mortar addition on the thermomechanical properties of concrete blocks

¹Débora Pires Gorski, ²Ivan Julio Apolonio Callejas, ³Luciane Cleonice Durante, ⁴Karyna de Andrade Rosseti, ⁵José Vinnicius Ranieri Moreira

¹Engenheira Civil, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, E-mail: (debora_gorski@hotmail.com)

²Doutor em Física Ambiental, Professor Associado I, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, E-mail: (ivancallejas1973@gmail.com)

³Doutora em Física Ambiental, Professor Associado I, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, (luciane.durante@hotmail.com)

³Doutora em Física Ambiental, Professor Adjunto IV, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, (karyna.rosseti@gmail.com)

⁴Graduando em Engenharia Civil, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, FAET, Cuiabá-MT, E-mail: (jvinnicius@gmail.com)

RESUMO: É crescente a preocupação com a economia de energia e com a preservação do meio ambiente nos últimos anos. Como consequência, o tema relacionado a desempenho de edificações tem sido amplamente abordado, incluindo a busca por novos materiais e sistemas construtivos que proporcionem melhor habitabilidade e conforto térmico. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar o impacto da substituição parcial de pó de pedra por argamassa industrializada termoisolante nas propriedades física e mecânica de blocos de concreto de vedação vertical. A metodologia consistiu da realização de ensaios de caracterização dos materiais constituintes, condutividade térmica e resistência mecânica dos blocos confeccionados com a argamassa termoisolante. Inicialmente, foram moldados blocos da família M20 com dimensões 19x19x39cm, a partir do traço de 1:18 (relação cimento: agregados) tradicionalmente utilizado na indústria local. Posteriormente, estes foram confeccionados com substituição no volume do pó de pedra, nos teores de 6%, 12% e 24% de argamassa isolante em relação à massa de pó de pedra. Os resultados evidenciaram que a adição da argamassa isolante no traço dos blocos de concreto, promoveu melhoria no desempenho térmico e influenciou negativamente a resistência mecânica, ocasionando progressiva redução à medida que se elevava a porcentagem de argamassa isolante. Por meio de correlações, foi possível definir que o teor de incorporação de 2% proporciona resistência mecânica adequada e acima do limite normativo, bem como redução média de 9,3% e 40% na condutividade térmica, em relação ao traço de referência e ao valor teórico proposto na norma vigente, respectivamente. Destaca-se, portanto, a importância de caracterizar termicamente os componentes dos sistemas de vedação vertical, considerando os materiais utilizados na região, o que possibilita trabalhar com valores mais realísticos de suas propriedades térmicas.

Palavras Chave: Condutividade térmica. Transmitância térmica. Sistema de Vedação Vertical.

ABSTRACT: The concern about energy conservation and the preservation of the environment have been growing in the last year. As a consequence, the theme related to building performance has been widely researched, including the search for new materials and constructive systems that provide better habitability and thermal comfort. In this sense, this work aims to evaluate the impact of the partial substitution of powdered stone for isolating industrialized mortar on the physical and mechanical properties of concrete blocks. The methodology consisted of the characterization tests of the constituent materials, thermal conductivity and mechanical resistance of the blocks manufactured with the thermal insulating mortar. Initially, blocks of the M20 family model with dimensions 19x19x39cm were dosed with 1:18 trace (relation cement: aggregates) traditionally used in the local industry. Subsequently, the isolation mortar was introduced in dosage, substituting

stone powder in the volume, in the contents of 6%, 12% and 24%, respectively. The results showed that the addition of the insulating mortar in the concrete blocks traced improved thermal performance and negatively influenced the mechanical resistance, causing progressive reduction in the block resistance as the percentage of insulating mortar was increased in the trace. By means of correlations, it was possible to define that the incorporation content of 2% provides adequate mechanical strength, above the normative limit, as well as a mean reduction of 9.3% and 40% in the thermal conductivity, in relation to the reference trace and theoretical value proposed by the Brazilian standard, respectively. Therefore, the research demonstrates the importance of characterizing thermally the building panel components, considering the materials used in the region, making it possible to work with more realistic values of its thermal properties.

Keywords: Thermal conductivity. Thermal transmittance. Vertical panel system.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de vedação vertical e de cobertura de uma edificação tem influência direta na eficiência energética do edifício e no conforto térmico em seu interior, uma vez que, compondo a envoltória, estabelecem as trocas que ocorrem entre este e o meio exterior. Assim sendo, torna-se necessário que os sistemas de vedação vertical proporcionem adequado isolamento térmico, visando manter não somente os níveis de desempenho de acordo com os limites normativos, mas, também, a habitabilidade.

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) define sistema de vedação vertical (SVV) internos e externos como partes que limitam verticalmente a edificação habitacional e seus ambientes, como as fachadas e as paredes ou divisórias internas. No Brasil, esse sistema é tradicionalmente composto por componentes fabricados de argamassas cimentícias e/ou blocos cerâmico ou concreto. Nesse sentido, as propriedades térmicas destes componentes têm forte influência no comportamento térmico da edificação, em especial, a sua transmitância térmica, um parâmetro que fornece capacidade de conduzir energia térmica por unidade de área quando se estabelece uma diferença de temperatura de 1°C (1K) entre suas faces. Desta forma, a determinação das propriedades térmicas de um SVV se torna relevante tema de estudo na área de Engenharia de Materiais, uma vez que pode subsidiar a adequada seleção de componentes construtivos, visando a adequação das edificações ao clima do local em que se inserem.

O bloco de concreto, componente de um SVV, se caracteriza por ser vazado nas faces superior e inferior, destinando-se à execução de alvenaria, com ou sem função estrutural. Sua área líquida é definida como a área média da seção perpendicular aos eixos dos furos, descontadas as áreas médias dos vazios, que deve ser igual ou inferior a 75% da área bruta. A área bruta, por sua vez, é considerada como aquela perpendicular à seção dos eixos dos furos, desconsiderando as áreas dos vazios (ABNT, 2014). Um bloco de concreto é a unidade de alvenaria, constituído por mistura homogeneizada e adequadamente dosada, usualmente composta por materiais como o cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivos, moldado por meio de vibração e prensagem simultâneas.

Observa-se uma tendência de substituição dos blocos cerâmicos pelos blocos de concreto, tanto para uso em alvenarias estruturais como para alvenarias de vedação, em virtude de suas vantagens técnicas, principalmente aquelas proporcionadas pelo controle de qualidade, advindas do seu processo de fabricação (FRASSON JUNIOR, 2000; PINHEIRO, 2018).

Pesquisas recentes têm focado na incorporação de resíduos e materiais isolantes nas misturas destinadas a confecção dos blocos de concreto visando não só aperfeiçoar a suas propriedades térmicas, mas também produzir materiais mais sustentáveis, que ajudem a

reduzir resíduos sólidos agroindustriais ou aqueles produzidos a partir de resíduos de construção civil (RCC).

Rocha et al. (2013) produziram blocos de concreto com incorporação de EVA (etileno acetato de vinila) e constatou que o bloco produzido se apresentou mais leve e com desempenho térmico semelhante ao bloco cerâmico, concluindo pelo potencial de sua aplicação na construção civil, em alvenarias sem função estrutural.

Lima e Iwakiri (2014) avaliaram o potencial de utilização do resíduo do desdobro de toras de *Pinus spp.* em substituição ao agregado miúdo do concreto no traço 1:10, utilizado para a produção de blocos para alvenaria estrutural. Verificaram que a produção de blocos de concreto para uso em alvenarias estruturais é tecnicamente viável em termos físicos e mecânicos com substituição parcial de até 50% em volume do agregado miúdo mineral convencional pelo resíduo de *Pinus spp.* Observaram que a substituição reduziu a condutividade térmica média do concreto produzido, o que proporciona reflexos importantes para o desempenho dos blocos quanto ao conforto térmico dos ambientes construídos.

Gomes et al. (2017) demonstraram a viabilidade de se utilizar os próprios resíduos dos blocos como agregados reciclados para a produção de blocos reciclados de concreto (BRC), visando a otimização do uso de recursos naturais. As substituições dos agregados naturais pelos reciclados nas composições de concreto mostraram-se satisfatórias, atendendo os requisitos de resistência à compressão estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2014). Não foram realizados ensaios de caracterização térmica dos blocos reciclados.

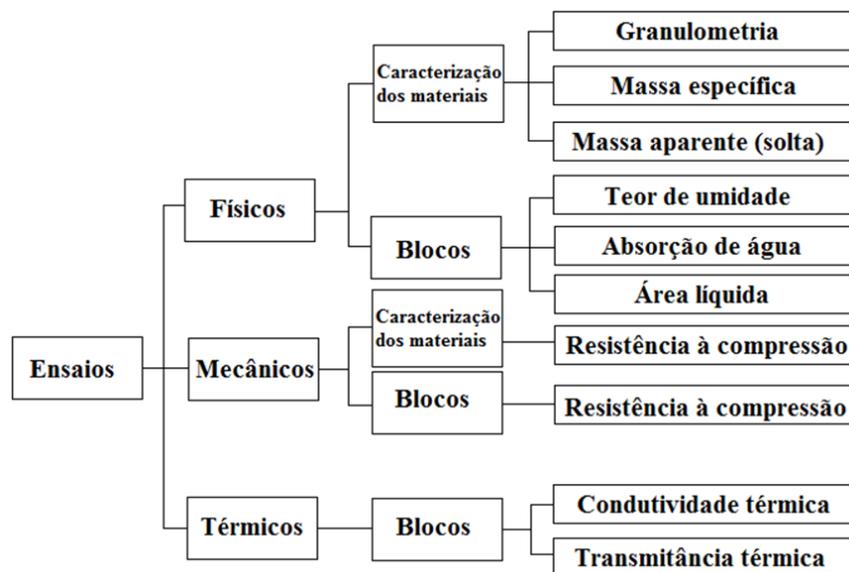
Costa et al. (2018) conduziram uma análise dos desempenhos térmicos e acústicos realizada com blocos de concreto com substituição de 5% e 10%, em peso, do agregado miúdo areia com borracha de pneu com granulometria inferior a 1,18mm (Tyler 14), comparando-os com o convencional. A incorporação da borracha de pneu, além de produzir blocos mais leves, promoveu melhores desempenhos térmicos no que se refere a atenuação da transmissão do calor pelos elementos (cerca de 3,5% e de 13,5%, respectivamente para as incorporações de 5% e 10% de borracha), bem como maiores atenuações sonoras (para a frequência de 250Hz, a atenuação do bloco com 5% de borracha foi cerca 8% mais eficiente e para a incorporação de 10% de borracha, foi de 21%). O resultado decorre da eficiência da borracha, que é reconhecidamente, um melhor material isolante térmico e acústico do que os demais materiais constituintes do bloco de concreto.

Diante deste cenário, estudos que visem melhorar as propriedades térmicas de painéis de vedação são de fundamental importância uma vez que podem proporcionar aos edifícios melhores níveis de desempenho térmico, especialmente a aqueles confeccionados com blocos de concreto, uma vez que apresentam elevada transmitância térmica quanto comparados aos cerâmicos. Sendo assim, este trabalho objetiva avaliar o impacto da substituição parcial de pó de pedra por argamassa industrializada termoisolante nas propriedades física e mecânica de blocos de concreto de vedação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização dos materiais, bem como a dos blocos de concreto produzidos sem e com substituição de argamassa isolante, seguiu o fluxograma indicado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de planejamento dos ensaios



2.1 Aglomerante

Empregou-se o cimento Portland composto CP II – F 32, em virtude da sua adequabilidade para a fabricação de blocos de concreto e devido a sua disponibilização na região da pesquisa. Para a determinação da massa específica do cimento, utilizou-se o Frasco de Le Chatelier, conforme NBR NM 23 (ABNT, 2001) e para determinação da massa aparente (solta), utilizou-se uma adaptação dos procedimentos da NBR NM 45 (ABNT, 2006). Foram também realizados ensaios de determinação da resistência à compressão do cimento aos 3, 7 e 28 dias, conforme as normas NBR 7215 (ABNT, 1996 Versão Corrigida:1997) e NBR 7214 (ABNT, 2012). Na Tabela 1, apresentam-se os valores de massa específica, massa aparente (solta) e resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias estabelecidos pela NBR 11578 (ABNT, 1991).

Tabela 1 – Caracterização do Cimento Portland composto CP II – F – 32

Ensaio	Propriedade	Requisito
Massa específica (g/cm ³)	3,080	-
Massa aparente (solta) (g/cm ³)	1,193	-
Resistência à compressão (3 dias) (MPa)	21,35	≥ 10 MPa
Resistência à compressão (7 dias) (MPa)	26,73	≥ 20 MPa
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	34,78	≥ 32 MPa

2.2 Agregados

Os agregados graúdos (brita) e miúdos (areia) utilizados na produção dos blocos de concreto foram os artificiais, de origem do granito róseo, extraídos na Serra de São Vicente, localizada à 60km da cidade de Cuiabá-MT, Brasil. O pó de pedra utilizado tem origem calcária e é extraído no Distrito de Nossa Senhora da Guia, localizado nas proximidades da referida cidade.

A caracterização granulométrica, indicada na Tabela 2, foi conduzida por meio de agitador mecânico, fazendo-se uso das peneiras da série normal e intermediária, seguindo as prescrições da NBR 7211 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), quando aplicável. Para a massa específica aparente, utilizou-se novamente a adaptação da NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para a determinação da massa específica da areia e do pó de pedra, utilizou-se o Frasco de Chapman, conforme a NBR 9775 (ABNT, 2011). Nota-se que a distribuição

granulométrica da brita, areia e pó de pedra atendem aos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009), dentro da zona utilizável.

Tabela 2 - Valores dos ensaios em agregados miúdos e graúdos

Ensaio	Areia	Brita	Pó de pedra
Massa específica (g/cm ³)	2,541	2,672	2,683
Massa aparente (solta) (g/cm ³)	1,634	1,346	1,512
Diâmetro máximo característico (mm)	2,40	9,5	4,8
Módulo de finura	2,20	5,94	2,61
Absorção de água (%)	-	0,46	-

2.3 Argamassa industrializada

A argamassa industrializada utilizada é fabricada na Turquia, possui propriedades termoisolantes, composta por 50% de cimento branco, perlita expandida, várias rochas vulcânicas, rochas marinhas de células abertas e polímeros (THERMOCOAT, s/d).

Para a sua caracterização, indicada na Tabela 3, foram realizados ensaios para determinação da massa específica, com utilização do Frasco de Chapman conforme a NBR 9775 (ABNT, 2011) e determinação da massa aparente por meio de adaptação da NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para caracterização da resistência mecânica à compressão, utilizou-se a NBR 13279 (ABNT, 2005).

No catálogo técnico do fabricante é indicado condutividade térmica de 0,062 W/mK (considerada baixa), a massa aparente variando de intervalo entre 0,45g/cm³ e 0,65g/cm³ e resistência à compressão entre 1,5-5,0MPa. Nota-se que as propriedades de massa aparente e a resistência à compressão determinadas nos ensaios se inserem dentro da faixa especificada pelo fabricante.

Tabela 3 – Ensaio de caracterização da argamassa industrializada

Argamassa industrializada	
Ensaio	Propriedade
Massa específica (g/cm ³)	1,200
Massa aparente (solta) (g/cm ³)	0,616
Resistência à compressão (7 dias) (MPa)	4,14
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	6,87

2.4 Procedimentos para a Confeção dos blocos de concreto

Na pesquisa foram confeccionados blocos de concreto da família M20 com dimensões padronizadas de 19x19x39cm, com espessura de paredes longitudinais de 2,50cm, produzidos com a utilização de uma vibro-prensa operada no canteiro de uma indústria de artefatos de concreto, atendendo os requisitos da versão da NBR 6136:2014 (ABNT, 2014), uma vez que a pesquisa foi conduzida anteriormente a nova versão.

2.4.1 Traços para produção dos blocos de concreto

Para a produção dos blocos, definiram-se quatro traços em massa a partir do padrão comercial utilizado na indústria de 1:18 (cimento, agregados), ou seja, para cada 1kg de cimento foram utilizados 18kg de agregados.

A argamassa isolante foi incorporada nos traços dos blocos em substituição parcial ao pó de pedra devido a sua similaridade granulométrica, nas proporções de 12,5, 25 e 50% em volume, em virtude da diferença de massa específica existente entre esses materiais. O cálculo dessa substituição considerou que o volume ocupado pelo pó de pedra no interior do concreto passará a ser ocupado pelas partículas de argamassa isolante. Uma vez que no traço de

referência apresentada uma proporção em massa entre os materiais constituintes, inicialmente calcula-se a massa de pó de pedra a ser usada no traço de referência e, em seguida, o cálculo da substituição é efetuado, utilizando-se a massa específica dos materiais envolvidos e a fração de pó de pedra a ser substituída, conforme indicado na Equação 1, em que M_{arg} é a massa da argamassa a ser utilizada no traço (g), $V(\%)$ o percentual do pó de pedra a ser substituído pela argamassa, $M_{pó}$ a massa total de pó de pedra no traço (g), $\rho_{pó}$ a massa específica do pó de pedra (g/cm^3) e ρ_{arg} a massa específica da argamassa isolante (g/cm^3).

$$M_{arg} = V(\%) \cdot \frac{M_{pó}}{\rho_{pó}} \rho_{arg} \quad (1)$$

A Tabela 4 apresenta os valores quantificados para os materiais constituintes para a produção das matrizes cimentícias, com as respectivas substituições quantificadas em massa.

Tabela 4 - Definições de traços utilizados na confecção dos blocos

Traço	Cimento (g)	Areia (g)	Pó de pedra (g)	Brita (g)	Argamassa isolante (g)	Pó de pedra retirado (g)
Padrão	1000	4500	9000	4500	0	0
6% argamassa isolante	1000	4500	8390	4500	245	610
12% argamassa isolante	1000	4500	7780	4500	490	1220
24% argamassa isolante	1000	4500	6560	4500	980	2440

2.4.2 Ensaios de Caracterização dos blocos

2.4.2.1 Caracterização física

A determinação do índice de absorção de água, teor de umidade e área líquida dos blocos, foi conduzida conforme a NBR 12118 (ABNT, 2014). As dimensões dos corpos-de-prova foram medidas com precisão de 0,5mm por meio de uso de paquímetro digital, calculando-se o valor médio de cada dimensão do corpo-de-prova a partir da média de três determinações realizadas em pontos diferentes, uma em cada extremidade e uma no meio. A área líquida, expressa em cm^2 , de cada bloco foi calculada segundo a Equação 2, em que γ é massa específica da água utilizada no ensaio, expressa em g/cm^3 ; h a altura média do corpo de prova medida na direção perpendicular à seção de trabalho, expressa em cm; m_1 a massa saturada do corpo de prova, expressa em kg; e m_2 a massa aparente do corpo de prova, expressa em kg.

$$\text{Área líquida} = \frac{m_1 - m_2}{h \cdot \gamma \cdot 1000} \quad (2)$$

A densidade de massa aparente do bloco foi avaliada dividindo-se a massa seca pela multiplicação da área líquida pela respectiva altura média do bloco.

2.4.2.2 Caracterização mecânica

A resistência à compressão é um dos parâmetros mais importante dentre as características físicas dos blocos de concreto. Os procedimentos para o ensaio de compressão dos blocos foram realizados conforme a NBR 12118 (ABNT, 2014). Para cada traço foram ensaiados 12 blocos, sendo seis aos sete dias e seis aos vinte e oito dias. Os blocos ensaiados foram retificados para regularização das faces de trabalho, seguindo-se sempre as especificações normativas. Durante a execução do ensaio tomou-se cuidado para manter a planicidade dos pratos da prensa e umidade existente nos blocos, visando evitar fatores que pudessem alterar a propriedade de resistência mecânica.

Os valores da resistência à compressão para cada corpo de prova (MPa) foram obtidos dividindo-se a carga máxima observada durante o ensaio, pela média das áreas das duas faces de trabalho (sem desconto das áreas dos furos e reentrâncias) conforme estabelece as normas da NBR 12118 (ABNT, 2014).

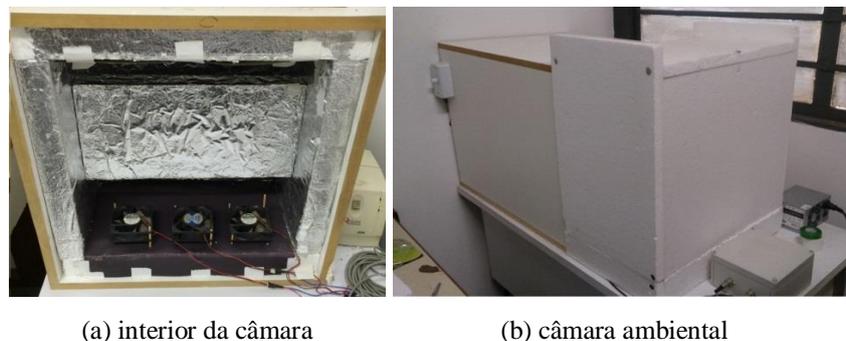
Segundo a NBR 6136 (ABNT, 2014), a determinação do valor característico da resistência à compressão do bloco, admitindo-se o quartil inferior de 5% da distribuição de resistências do lote de blocos, é feita conforme Equação 3, em que $f_{bk,est}$ é a resistência característica estimada do lote; $f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{bn}$ - valores de resistência à compressão dos blocos da amostra, ordenados crescentemente, isto é, f_{b1} é o menor valor obtido e f_{bn} é o maior; $m = n/2$, se n for par, e, igual a $m = (n+1)/2$, se n for ímpar; e, n o número de blocos da amostra.

$$f_{bk,est} = 2 \frac{f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{bm-1}}{m - 1} - f_{bm} \quad (3)$$

2.4.2.3 Caracterização da transmitância térmica

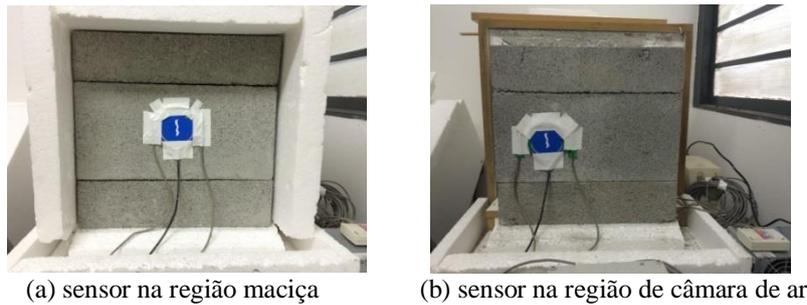
Os ensaios para a determinação de transmitância e condutividade térmica dos blocos foram realizados por meio de um procedimento híbrido, adaptando a técnica da câmara quente protegida conforme NBR 6488 (ABNT, 1980) e a técnica de medição de fluxo de calor estabelecida pela ISO 9869 (ISO, 1994). A Figura 2a ilustra o interior da câmara térmica na qual há uma lâmpada de infravermelho utilizada para geração de calor em seu interior. Com vistas a diminuir a influência do ciclo diário da variação de temperatura do ar, a região onde o corpo de prova é instalado fica revestida por uma câmara ambiental (Figura 2b). Cada ensaio teve duração de três dias, sendo os dados para determinação da transmitância térmica registrados a cada 5 minutos.

Figura 2 – Detalhes da câmara térmica utilizada no ensaio de transmitância térmica



Para cada traço foram realizados dois tipos de medição, uma com os sensores posicionados na parte central dos blocos, onde o material é maciço (Figura 3a) e a outra com os sensores na região onde há câmara de ar entre as duas paredes do bloco (Figura 3b). Dois blocos de concreto foram instalados na face aberta da câmara térmica visando fornecer resistência à passagem do calor desta para a câmara ambiental. Para facilitar o posicionamento dos sensores de medição, um dos blocos foi cortado ao meio no sentido da maior dimensão, obtendo-se duas partes de blocos de dimensões 9,5 x 19,0 x 39,0cm, sendo disposto de forma que o bloco inteiro ficou entre as partes do bloco cortado, o que facilita a colocação dos sensores na região central dos blocos (Figura 3).

Figura 3–Determinação da transmitância térmica na região (a) maciça do bloco e (b) na região com câmara de ar



(a) sensor na região maciça

(b) sensor na região de câmara de ar

A determinação da transmitância térmica (U) foi feita por meio do método da média progressiva conforme estabelecido na referida norma. Para este caso, o valor da transmitância térmica (U_n) é avaliado pela seguinte Equação 4, em que T_{si} é a temperatura interna, T_{se} a temperatura externa, q o fluxo de calor entre os dois lados do elemento testado e j representa cada medição realizada no intervalo de tempo estabelecido para o ensaio do corpo de prova.

$$U_n = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})} \quad (4)$$

O cálculo U_n é feito para cada uma das medições realizadas sucessivamente a partir da primeira (neste caso, a cada cinco minutos). O valor calculado converge assintoticamente para o valor real se forem satisfeitas as condições prescritas pela ISO 9869 (1994) (condição de fluxo estacionário). O valor da transmitância (U) do corpo-de-prova do bloco de concreto, expresso em $W/(m^2K)$ foi avaliado utilizando a média das temperaturas e das taxas de fluxo de calor que atravessa os blocos, em um período representativo de três dias de medição após as condições de fluxo de calor estacionário terem sido alcançadas. Como se está interessado apenas no valor médio final, utilizou-se o conceito de incerteza combinada para estimar o erro introduzido na medição devido ao erro dos sensores e do desvio padrão observado em decorrência da variação ambiental durante as últimas 24 horas do experimento.

A norma NBR ISO 17025 (ABNT, 2005) prescreve que a incerteza da medição pode ser feita assumindo-se o erro de calibração de instrumentos declarado pelos fabricantes, mais o desvio padrão (s.d) do período médio considerado de U_n . A incerteza estatística de medição (incerteza expandida) pode ser estimada assumindo um fator de abrangência (k) igual a 1,96, sendo este um valor típico neste tipo de medição. Este fator leva a um nível de confiança de 95%. O valor de U final pode ser expresso pela Equação 5, em que δU_n representa a incerteza total da estimativa de U_n , denominada de incerteza combinada (BAKER, 2011).

$$U = U_n \pm k \cdot \delta U_n \quad (5)$$

Para o cálculo da transmitância térmica experimental do bloco (U_t), admitiu-se fluxo unidirecional na região maciça e da câmara de ar entre as paredes do bloco, calculando-se a transmitância térmica total conforme procedimentos estabelecidos pela NBR 15220 (ABNT, 2005). A transmitância térmica total do bloco de concreto (U_T) foi avaliada somando-se a transmitância térmica superficial interna e externa do ar. A condutividade térmica dos traços do concreto com o qual o bloco foi confeccionado, expressa em $W/(m.K)$, foi determinada por meio da medição na região sólida da seção, multiplicando-se a espessura do bloco pela sua respectiva transmitância térmica total nessa região (U_n). Para comparar o valor experimental, determinou-se transmitância térmica teórica, adotando-se a condutividade térmica do concreto como igual a $1,75 W/(m.K)$ e seguindo as recomendações indicadas pela NBR 15220 (ABNT, 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização física dos blocos

3.1.1 Dimensões e área líquida

Os valores médios obtidos nas medições das dimensões dos blocos estão indicados na Tabela 5. Nota-se certa variabilidade nas dimensões dos blocos, o que se refletiu na estimativa da área líquida dos blocos. Apesar desta ocorrência, os blocos atendem as prescrições normativas da versão anterior da NBR 6136 (ABNT, 2014) para a família de módulo M-20 nas classes C e D.

Tabela 5 – Dimensões médias dos blocos produzidos nos diferentes traços

Dimensões	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Largura (cm)	19,20	19,20	19,15	19,10
Altura (cm)	19,30	19,25	19,20	19,15
Comprimento (cm)	39,30	39,25	39,25	39,20
Paredes longitudinais (mm)	23	23	23	23
Paredes transversais (mm)	25	25	25	25
Área líquida (cm ²)	332,175	322,982	323,298	332,123

3.1.2 Teor de umidade, absorção de água e densidade de massa aparente

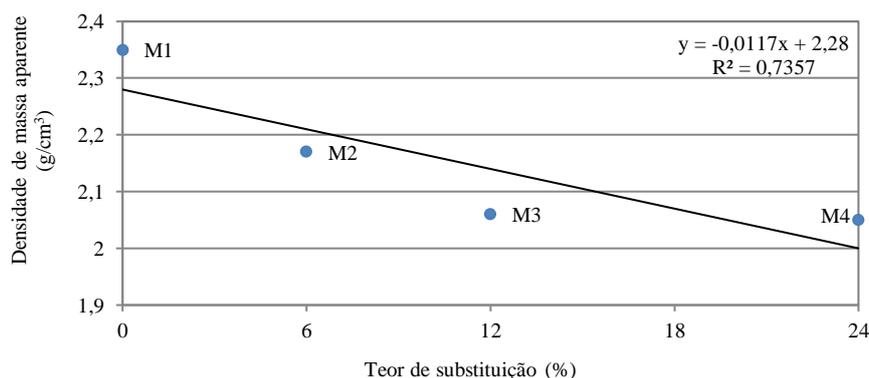
Nota-se diminuição do teor de umidade e elevação da absorção de água à medida que se eleva o teor de adição de argamassa isolante no traço (Tabela 6). Esse comportamento é justificado pela elevação do teor de argamassa isolante na mistura aumentar o índice de vazios dos blocos devido à estrutura dos seus materiais constituintes, proporcionando desta forma maior capacidade da matriz cimentícia em absorver de água. Em contrapartida, o material com maior índice de vazios promove não só maior perda de umidade, mas também proporciona uma matriz mais leve, conforme correlação estabelecida por meio de análise de regressão linear ($R^2=0,7357$) entre o teor de incorporação e densidade de massa aparente (Figura 4). O traço 1 apresentou densidade aparente próxima daquela indicada pela NBR 15220 (ABNT, 2005) de 2,40g/cm³ para concretos. Em termos de atendimento ao requisito normativo, apenas os Traços 1 e 2 atenderam o limite de 13% de absorção de água estabelecido para blocos fabricados com agregados leves (ABNT, 2014).

Tabela 6 – Teor médio de umidade, absorção de água, área líquida e densidade de massa aparente dos blocos

Ensaio	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Teor de umidade (%)	15,846	9,446	8,740	5,663
Absorção de água (%)	9,062	11,798	13,503	13,585
Densidade de massa aparente (g/cm ³) ± d.p	2,35±0,04	2,17±0,02	2,06±0,01	2,05±0,03

d.p - desvio padrão da amostragem

Figura 4 – Relação entre teor de incorporação de argamassa isolante e a densidade de massa aparente.



3.2 Caracterização mecânica à compressão

À medida que se incorpora a argamassa isolante na mistura do bloco, a resistência característica se reduz progressivamente, tanto aos sete quanto aos 28 dias idade (Tabela 7). Constatou-se que, apenas o Traço 1 (de referência) atende ao critério normativo de 2MPa para paredes de vedação sem função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo (Classe D). A redução da resistência era esperada, uma vez que os materiais naturais que constituem a argamassa isolante (perlita expandida, rochas vulcânicas, rochas marinhas de células abertas entre outros) provocam elevação do índice de vazios, trazendo como consequência maior descontinuidade no interior da matriz cimentícia, fato este também induz a maior absorção de água, conforme indicado na Tabela 6.

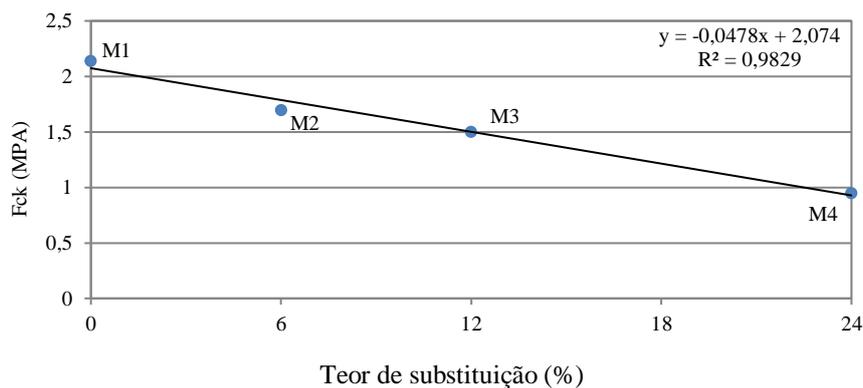
Tabela 7 – Resistência à compressão característica estimada aos 7 dias e 28 dias

Traços	$F_{bk,est.}$ (MPa) 7 dias				$F_{bk,est.}$ (MPa) 28 dias			
	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Média±d.p	1,29±0,04	1,27±0,03	1,12±0,08	0,67±0,07	2,49±0,06	2,00±0,08	1,74±0,03	1,10±0,03
85% Média	1,10	1,08	0,95	0,57	2,13	1,70	1,50	0,95
$\Psi_6 \times f_{b1}$	1,06	1,05	0,85	0,50	2,04	1,64	1,48	0,91
$F_{bk,est.}$	1,10	1,08	0,95	0,57	2,13	1,70	1,50	0,95

d.p - desvio padrão da amostragem

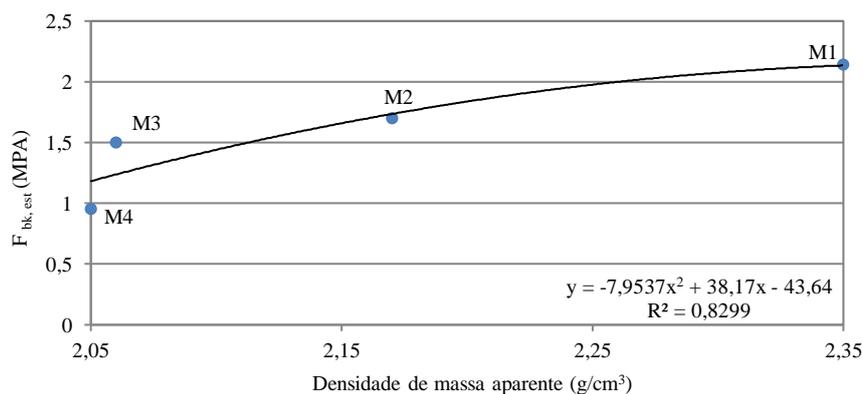
Foi possível estabelecer correlação entre a resistência característica dos blocos com o respectivo teor de substituição parcial de argamassa isolante (Figura 5). A curva de tendência gerada por meio de análise de regressão linear forneceu um adequado ajustamento dos dados pesquisados ($R^2=0,9839$). Por meio dela, foi possível identificar que o teor de substituição visando atender o critério de resistência mecânica seria de apenas 2% de incorporação de argamassa isolante, apresentando este traço uma densidade prevista de acordo com a relação entre teor de substituição e densidade de massa aparente, conforme indicado na Figura 4 de 2,25g/cm³.

Figura 5 – Correlação entre teor de incorporação de argamassa isolante e resistência característica à compressão



Observou-se, também, correlação entre a resistência mecânica e a densidade de massa aparente dos blocos pesquisados (Figura 6), conforme curva de tendência gerada por meio de análise de regressão não linear ($R^2=0,8299$). Nota-se que a substituição parcial de argamassa isolante favorece a diminuição da densidade de massa aparente, o que pode contribuir para a redução da transmitância térmica dos blocos, uma vez que a propagação de calor é diretamente proporcional à densidade de massa aparente e inversamente proporcional aos vazios internos na estrutura da matriz cimentícia.

Figura 6 – Relação entre densidade de massa específica aparente e resistência característica à compressão



3.3 Transmitância e condutividade térmica

Apresenta-se na Figura 7, o comportamento térmico observado durante a realização do ensaio na seção maciça do bloco de concreto confeccionado com o Traço 1. Os valores médios para a temperatura superficial interna (T_{si}) e externa (T_{se}) e para o fluxo de calor (q), após o estabelecimento da condição de fluxo estacionário, durante as 12 horas que antecedem o término do ensaio, podem ser observados na Tabela 8. Nota-se que nesse ensaio a T_{si} alcançou em média $57,55^{\circ}\text{C}$ e a T_{se} $45,05^{\circ}\text{C}$, estabelecendo-se uma diferença média de temperatura superficial (ΔT) entre as faces de $12,5^{\circ}\text{C}$, com fluxo médio de calor atravessando a região maciça de $73,51\text{W/m}^2$. Como os demais ensaios conduzidos se assemelham aos ilustrados na Figura 6 e Tabela 8, apresentam-se na Tabela 9, os dados consolidados para todos os traços nas duas regiões ensaiadas (maciça e da câmara de ar).

Figura 7 – Comportamento térmico das variáveis de temperatura superficial, fluxo de calor e transmitância térmica do bloco de concreto confeccionado com Traço 1 na seção maciça.

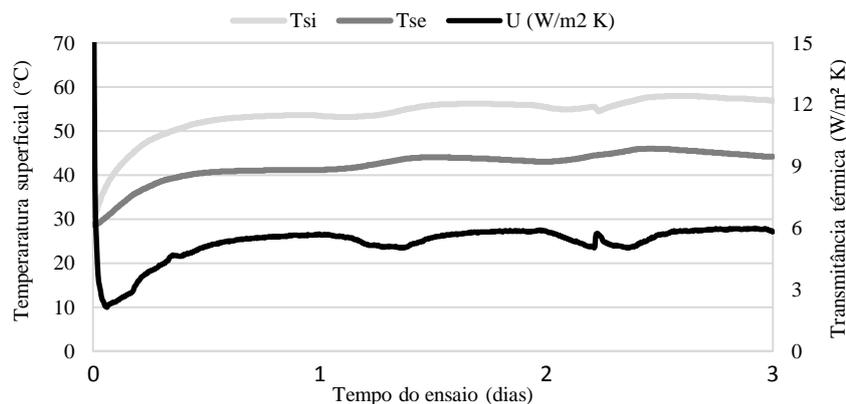


Tabela 8 – Estimativa do valor da transmitância U_n do bloco de concreto de Traço 1 na seção maciça

Sensor	Valores médios	Erro na medição	U_n
ΔT	12,50°C	-	-
Tse	57,55°C	U_{err_Tsi}	6,00 W/m ² K
Tsi	45,05°C	U_{err_Tse}	6,00 W/m ² K
Fluxo de calor	73,51 W/m ²	U_{err_Q}	6,17 W/m ² K
U_n médio	5,88 W/m ² K	Desvio padrão	0,077 W/m ² K
Incerteza δU_n	0,35 W/m ² K	Erro percentual (100. $\delta U_n/U_n$)	5,70%

Nota-se que existe uma tendência de redução da condutividade térmica e da transmitância térmica total com a substituição parcial da argamassa isolante (Tabela 9 e 10), exceção ocorre no Traço 3 que se observa elevação em relação ao traço 2. O valor do Traço 1 apresentou condutividade térmica e transmitância térmica inferior ao valor teórico (2,97 W/m²K) quantificado por meio da NBR 15520 (ABNT, 2005), uma vez que este foi confeccionado com materiais encontrados na região da pesquisa. Isso demonstra a importância de se realizar os ensaios térmicos, pois os mesmos permitem que os elementos ou componentes dos sistemas de vedação possam ser caracterizados de forma mais precisa.

Tabela 9 – Dados de transmitância térmica dos blocos de concreto para todos os traços e seções pesquisadas

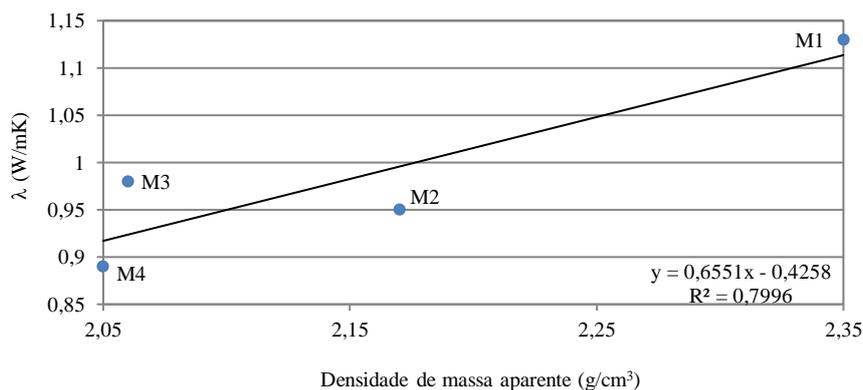
Traço	Seção	U_n médio $\pm \delta U_n$ (W/m ² K)	IC (95%) (W/m ² K)	Condutividade térmica W/(m.K)	U_T (W/m ² K)
1	Maciça	5,88 \pm 0,35	5,19 $\leq U_n \leq$ 6,58	1,00 $\leq \lambda \leq$ 1,26	2,37 $\leq U_T \leq$ 2,64
	Câmara de ar	4,25 \pm 0,27	3,72 $\leq U_n \leq$ 4,78	Não aplicável	
2	Maciça	4,94 \pm 0,32	4,30 $\leq U_n \leq$ 5,57	0,83 $\leq \lambda \leq$ 1,07	1,97 $\leq U_T \leq$ 2,47
	Câmara de ar	3,33 \pm 0,33	2,68 $\leq U_n \leq$ 3,99	Não aplicável	
3	Maciça	5,11 \pm 0,36	4,50 $\leq U_n \leq$ 5,71	0,86 $\leq \lambda \leq$ 1,10	2,20 $\leq U_T \leq$ 2,54
	Câmara de ar	3,76 \pm 0,22	3,31 $\leq U_n \leq$ 4,21	Não aplicável	
4	Maciça	4,62 \pm 0,28	4,06 $\leq U_n \leq$ 5,19	0,78 $\leq \lambda \leq$ 1,00	2,00 $\leq U_T \leq$ 2,42
	Câmara de ar	3,33 \pm 0,27	2,78 $\leq U_n \leq$ 3,88	Não aplicável	
Teórico	Maciça	9,21	-	1,75	2,97
	Câmara de ar	5,30	-	Não aplicável	

Tabela 10 – Valores médios para a densidade aparente, condutividade térmica e transmitância térmica total (U_T)

Blocos	Densidade aparente (g/cm ³)	Condutividade térmica do concreto (W/m.K)	Transmitância térmica dos blocos (W/m ² .K)
Traço 1	2,35	1,13	2,51
Traço 2	2,17	0,95	2,22
Traço 3	2,06	0,98	2,37
Traço 4	2,05	0,89	2,20
Teórico	2,40	1,75	2,97

Foi possível estabelecer correlação linear entre a densidade de massa aparente e a condutividade térmica observada nos blocos pesquisados (Figura 8). Nota-se que substituição parcial de argamassa isolante ocasiona diminuição da condutividade térmica e transmitância térmica dos blocos uma vez que a densidade de massa aparente se reduz e o índice de vazios internos se eleva na estrutura da matriz cimentícia, conforme relatado anteriormente. Para o caso da substituição de 2%, que de acordo com a correlação apresentada na Figura 5 atende ao critério de resistência mecânica, o valor esperado para a condutividade térmica é de 1,05 W/mK, redução de 9,3% em relação ao Traço 1. No entanto, a redução em relação ao valor teórico chega a 40%, ratificando novamente a importância de se realizar os ensaios para a caracterização térmica de elementos e componentes das edificações.

Figura 8 – Comportamento entre densidade de massa aparente e condutividade térmica dos blocos



4. CONCLUSÃO

As caracterizações física e mecânica dos materiais locais utilizados para a fabricação dos blocos atenderam aos requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras. As propriedades de densidade de massa aparente e a resistência mecânica à compressão da argamassa isolante utilizada na pesquisa se inseriram dentro da faixa especificada pelo fabricante.

A substituição parcial do pó de brita por argamassa isolante, devido a seus elementos constituintes, provocou elevação no teor de absorção de água nos blocos de concreto em virtude da elevação do índice de vazios na matriz cimentícia, fazendo com que apenas os Traços 1 e 2 atendessem ao limite de 13% estabelecido em norma. Em contrapartida, os traços com maior índice de vazios promovem não só maior ganho de umidade, mas também proporciona uma matriz mais leve.

A resistência característica dos traços pesquisados reduziu progressivamente à medida que a argamassa isolante foi adicionada à mistura. Apenas o Traço 1 (de referência) atendeu ao critério normativo mínimo de 2MPa para paredes de vedação sem função estrutural na versão anterior da NBR 6136 (ABNT, 2014). No entanto, por meio das correlações

estabelecidas, constatou-se que a substituição de 2% de argamassa isolante no traço de referência seria capaz de proporcionar resistência dentro do limite estabelecido por norma.

Os desempenhos térmicos dos traços com substituição de argamassa isolante foram em média superiores ao do traço de referência, observando-se redução na condutividade e na transmitância térmica. Observou-se elevação da condutividade e transmitância térmica no Traço 3 em relação ao Traço 2, comportamento não esperado, mas ainda assim, com valores inferiores ao de referência. Para a substituição de 2% de argamassa isolante, é esperado uma redução de 9,3% em relação ao Traço 1 e 40% em relação ao valor teórico proposto na norma vigente. Desta forma, conclui-se o quão importante é a caracterização térmica dos elementos e componentes do sistema de vedação vertical com os respectivos materiais utilizados na região, uma vez que isto possibilita trabalhar com valores mais realísticos das propriedades térmicas.

Uma vez comprovado que os impactos da substituição são benéficos sob o ponto de vista térmico, sugere-se que a pesquisa seja conduzida em traços com menores proporções de agregados em relação ao cimento, uma vez que o traço referência adotado na pesquisa se enquadrou no limite de atendimento quanto à recomendação normativa ao quesito mecânico e que a norma versão da norma NBR 6136 não estabelece mais a classe D para blocos, devendo os mesmos atender a resistência mínima de 3MPa.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6488:** Determinação da condutância e transmitância térmica – Método da caixa quente protegida. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento — Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996, Versão corrigida 1997.

_____. **NBR 9775:** Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9935:** Agregado – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12118:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013, Versão corrigida 2014.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220-1:** Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 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, 2005.

_____. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220-4:** Desempenho térmico de edificações. Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13529:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR ISO 17025:** Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.

BAKER, P. Historic Scotland Technical Paper 10: Un values and traditional buildings. In situ measurements and their comparisons to calculated values. Glasgow Caledonian University. 2011.

COSTA, J. A.; JOB, A. E.; OKIMOTO, F.; BARADEL, A.; PEREIRA, N. C.; FIORITI, C. F.; BARTHOLOMEI, C. L. Análises de desempenho térmico e acústico de blocos de concreto com incorporação de borracha de pneu. In: 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 23 ed, 2018, Foz do Iguaçu-PR, Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu: 23º CBECiMat, 2018. p. 2985.

FRASSON JUNIOR, A. **Metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** 2000. 146f, Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GOMES, P. C. C.; PEREIRA, F. A.; UCHÔA, S. B. B.; OLIVEIRA, F. C. de; ALMEIDA, L. H. Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria

fabricação dos blocos. **Ambiente Construído**, v.17, n.3, p. 267-280, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000300267&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 06 mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000300175>.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos da madeira de pinus spp. como substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p.223-235, 2014.

PINHEIRO, G. S. **Alvenaria estrutural em blocos de concreto: aspectos construtivos e pré-dimensionamento**. 2018. 76p. Monografia – Escola Politécnica. Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ROCHA, F. M. D.; MELO, A. B.; SILVA, E. P.; TORRES, S. M. Pré-moldado (bloco EVA) para alvenaria intertravada: projeto, produção, desempenho e simulação de uso em habitação social. **Ambiente Construído**, v.13, n.2, p.47-60, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212013000200005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 06 mar. 2017. Doi <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212013000200005>.

ThermoCoat. Disponível em: <<http://thermocoat.com.br/index.php?id=Fachada>> Acesso em: 25 fev 2019.