

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE LAJES MACIÇAS E NERVURADAS, DESTINADAS A LAJES DE COBERTURA, SEGUNDO A NBR 15575:2013 E NBR 15220:2005.

Willian Silveira Pedro (1), Elaine Guglielmi Pavei Antunes (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)williansilveira10@hotmail.com, (2)elainegpa@unescc.net.

RESUMO

A eficiência energética de uma edificação habitacional está relacionada a um correto entendimento e aplicação de diretrizes construtivas, a fim de garantir um padrão mínimo de qualidade para a edificação, e assim, atender aos requisitos da Norma de Desempenho, que regulamenta as edificações habitacionais. Esta pesquisa apresenta através do método de cálculo simplificado o desempenho térmico de lajes de cobertura para a Zona Bioclimática 2, sendo elas uma laje maciça em concreto armado e lajes nervuradas, ora com blocos em EPS - Poliestireno Expandido, ora com blocos cerâmicos. Com a aplicação do método de cálculo simplificado pela ABNT NBR 15220:2005, que resulta nos valores de resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar, os mesmos são comparados com os critérios de desempenho mínimo da ABNT NBR 15575:2013.

Conforme análise dos resultados pode-se concluir que as lajes de cobertura em estudo não atendem a todos os requisitos exigidos por Norma, sendo que apenas a Laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido com espessura de 20 cm conseguiu atingir a todos os valores referentes aos critérios de desempenho térmico.

Palavras-Chave: Laje de Cobertura, Desempenho térmico, Laje maciça em concreto armado, Lajes nervuradas.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está passando por um período de transição com relação à avaliação dos requisitos de desempenho, buscando com esta mudança, métodos construtivos e soluções mais sustentáveis para o conforto e segurança das edificações habitacionais. A implementação da Norma de Desempenho de edificações habitacionais - ABNT NBR 15575, que entrou em vigor em julho de 2013, trouxe consigo novas adequações e requisitos para o setor da construção civil. Segundo a ABNT NBR 15575-1:2013, a forma de estabelecimento do desempenho é comum e internacionalmente pensada por meio da definição de requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação, os quais

sempre permitem a mensuração clara do seu cumprimento. “A necessidade crescente de informações sobre a adequabilidade e o desempenho de novos produtos, e técnicas construtivas fez com que surgisse a necessidade da avaliação do desempenho destas soluções”. (SORGATA; MELO; LAMBERTS, 2013 p.14).

A ABNT NBR 15575:2013 estabelece critérios mínimos de avaliação das edificações, repassando assim, maior proteção para o proprietário da unidade habitacional, além de uma visão mais criteriosa de seu imóvel, dividindo as responsabilidades entre os envolvidos.

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2013), caso o morador verifique algum problema em sua casa ou apartamento, ele terá um critério objetivo para responsabilizar ou não a construtora ou incorporadora que lhe vendeu o imóvel.

Diante disso, a ABNT NBR15575:2013 especifica o nível de segurança e conforto que cada subsistema: estrutura, piso, vedações, cobertura e instalações da edificação deve proporcionar, com isso, o processo produtivo da construção civil deve estar alinhado com a sustentabilidade, conforto ambiental e redução de energia, portanto, obriga os responsáveis a realizarem um estudo mais rigoroso na fase de projeto e conhecimentos mais amplos dos materiais empregados para execução do imóvel, já que um dos itens mencionados da Norma é inerente a habitabilidade e a necessidade do conforto térmico as edificações.

O projeto, principalmente arquitetônico da edificação deve estar adequado a cada Zona Bioclimática do Brasil, conforme especifica a ABNT NBR 15220-3:2005, para que o conforto térmico esteja de acordo com o estabelecido por Norma. O ambiente deve oferecer um conforto térmico adequado ao conforto térmico humano, independente do clima externo (FROTA; SCHIFFET, 2006).

Chvatal (1998 apud PAIXÃO, 2011) afirma que ao considerar o clima local durante a realização do projeto, é possível proporcionar conforto térmico sem a utilização de equipamentos para condicionamento artificial do ambiente, por meio da escolha correta dos materiais de construção, disposição adequada das aberturas e sombreamentos, garantindo insolação e ventilação adequadas.

Para Lambert; Dutra e Pereira (2014), os materiais de construção têm uma forte influência sobre as condições de conforto do ambiente interior. A especificação dos

materiais exige o entendimento de suas propriedades e de sua adequação as características plásticas do projeto.

“Por outro lado, a intervenção humana, expressa no ato de construir suas cidades, altera as condições climáticas locais - clima urbano - das quais, por sua vez, também depende a resposta térmica de suas edificações.” (FROTA; SCHIFFET, 2006 p.17).

Para um projeto de edificações é importante o conhecimento acerca do clima local, com isso utilizar os materiais adequados e evitar assim o desconforto ambiental e problemas patológicos decorrentes a variação de temperatura.

Conforme aborda Thomaz (1989) todos os materiais empregados nas construções estão sujeitos à deformação térmica com o aumento de temperatura, e as contrações com a sua redução. A intensidade desta variação dimensional, para uma dada variação de temperatura, varia de material para material, podendo-se considerar, salvo algumas exceções, que as movimentações térmicas dos materiais de construção são praticamente as mesmas em todas as direções.

Para o autor acima citado, as coberturas planas estão mais expostas às mudanças térmicas naturais do que os parâmetros verticais das edificações; ocorrem, portanto, movimentos diferenciados entre os elementos horizontais e verticais. Além disso, podem ser mais intensificados pelas diferenças nos coeficientes de expansão térmica dos materiais construtivos desses componentes.

Segundo Loturco (2005) devido à localização e à grande superfície de exposição, a laje de cobertura aquece mais que o restante da edificação, deformando mais rapidamente. A alvenaria não acompanha a deformação térmica e resiste à movimentação, ocasionando a fissura.

Por conseguinte, devem-se propor soluções preventivas para que estes problemas patológicos não venham a ocorrer, por exemplo, fazer o isolamento térmico da laje de cobertura. “O isolamento térmico tem a função de impedir que os raios solares incidam diretamente na laje. Além de evitar a deformação térmica, minimiza o desconforto no interior do edifício.” (LOTURCO, 2005).

Ainda como forma de prevenção, a ABNT NBR 15220-3:2005, apresenta diretrizes construtivas para Sistemas de Cobertura (SC) para cada Zona Bioclimática brasileira, onde cabe ao projetista à utilização dos conceitos bioclimáticos na elaboração do projeto, associado à escolha correta e fundamentada dos materiais construtivos, com isso, terá uma redução no consumo de energia, conforto ambiental e minimizar problemas patológicos.

Os Sistemas de Cobertura (SC) devem atender a requisitos e critérios mínimos de desempenho térmico e transmitância térmica (U) exigida pela NBR 15575-5:2013 e verificado pelo método de cálculo simplificado da NBR 15220-2:2005, seguindo assim as definições, símbolos e unidades das NBR15220-1:2005 e NBR 15220-3:2005.

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar o desempenho térmico de uma laje maciça em concreto armado e de lajes nervuradas, ora com preenchimento com blocos em EPS- Poliestireno Expandido, ora com blocos cerâmicos, sendo elas destinadas a serem de cobertura com exposição direta ao fluxo descendente de calor. Para tal será realizado o método de cálculo simplificado conforme procedimento apresentado na ABNT NBR 15220-2:2005.

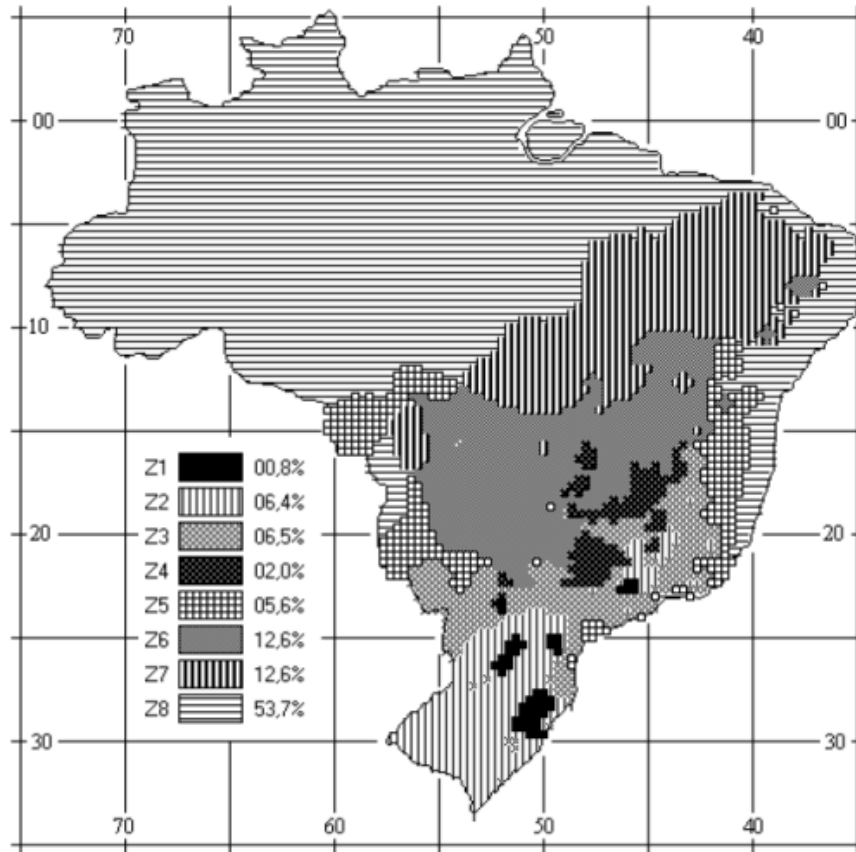
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MÉTODOS DE CÁLCULO

Conforme a ABNT NBR 15220:2005 pode-se aplicar um método simples de avaliação do desempenho térmico de elementos construtivos. O método incide na indicação de limites para as propriedades térmicas, associados à proposição de estratégias bioclimáticas, sendo estas variáveis relacionadas à Zona Bioclimática em questão.

A ABNT NBR 15220-3:2005, estabelece oito Zonas Bioclimáticas brasileiras, conforme a Figura 1, e para tal, definem-se recomendações e diretrizes construtivas para edificações. Neste estudo, considerou-se a região com Zona Bioclimática 2, onde se encontra a cidade de Urussanga - Santa Catarina, segundo a classificação apresentada por Norma, Figura 2.

Figura 1: Zoneamento bioclimático brasileiro.



Fonte: NBR 15220-3:2005.

Figura 2: Relação de algumas cidades cujos climas foram classificados.

UF	Cidade	Estrat.	Zona
PR	Paranaguá	BCFIJ	3
PR	Ponta Grossa	ABCFI	2
PR	Rio Negro	ABCFI	2
RJ	Angra dos Reis	FIJ	8
RJ	Barra do Itabapoana	CFIJ	5
RJ	Cabo Frio	FIJ	8

UF	Cidade	Estrat.	Zona
SC	Lages	ABCF	1
SC	Laguna	ABCFI	2
SC	Porto União	ABCFI	2
SC	São Francisco do Sul	CFIJ	5
SC	São Joaquim	ABCFE	1
SC	Urussanga	ABCFI	2

Fonte: NBR 15220-3:2005.

Avaliou-se três tipologias de lajes de cobertura, com base na resistência térmica superficial descendente Figura 3, e características específicas de cada laje Figura 4:

Figura 3: Resistência térmica superficial interna e externa.

R_{si} ($m^2 \cdot K/W$)			R_{se} ($m^2 \cdot K/W$)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇒	⇑	⇓	⇒	⇑	⇓
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: NBR 15220-2:2005.

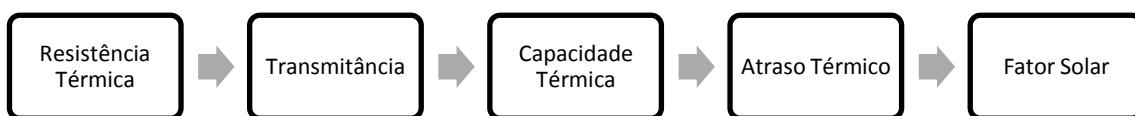
Figura 4: Características das lajes.

Tipo de Laje	Material de Preenchimento	Densidade de Massa Aparente - (ρ)	Condutividade térmica (λ)	Calor específico (c)	Densidade de Massa Aparente - Concreto	Modulação da Laje
		[Kg/m ³]	[W/(m.K)]	[kJ/(kg.K)]	[Kg/m ³]	[cm]
EPS	Poliestireno Expandido	15-35	0,04	1,42	2200-2400	54 x 30 x 12
Pré-Moldada	Bloco Cerâmico	1300-1600	0,90	0,92	2200-2400	54 x 30 x 12
Maciça	Concreto	2200-2400	1,75	1,00	2200-2400	54 x 30 x 12

Fonte: Do autor.

O método de cálculo simplificado, utilizado para verificação do desempenho térmico das lajes de cobertura, apresentado pela ABNT NBR 15220-2:2005, seguiu os passos demonstrados na Figura 5.

Figura 5 – Sequência de cálculo para o método simplificado.



Fonte: Do autor.

2.1.1 Resistência térmica

É o somatório das resistências superficiais (interna e externa) e de todas as camadas que compõe o material, sendo assim, tem a função de medir a capacidade de resistir à passagem de calor. É expressa pela equação (1).

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad \text{equação (1)}$$

Em que: R_T é a resistência térmica total (m². K/W);

R_{se} é a resistência superficial externa;

R_{si} é a resistência superficial interna;

R é a resistência total das camadas, onde para camadas homogêneas, é expressa pela equação (2):

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{equação (2)}$$

Em que: e é a espessura da camada

λ é a condutividade térmica característica de cada material (W/m.K);

R_t , para componentes com camadas homogêneas e não homogêneas a resistência térmica é expressa pela equação (3):

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad \text{equação (3)}$$

Em que: R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de cada seção (a, b, ...n);

A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção;

2.1.2 Transmitância

É o inverso da resistência térmica total, onde terá a função de medir o coeficiente global da transferência de calor, conforme a equação (4):

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{equação (4)}$$

Em que: U é a transmitância térmica (W/m². K);

R_T é a resistência térmica total (m². KW);

2.1.3 Capacidade térmica

Terá a função de medir a quantidade de calor necessária para variar a temperatura do sistema, sendo materiais distintos ou não para uma mesma fonte de calor.

A capacidade térmica para camadas homogêneas é expressa pela equação (5):

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot C_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot C_i \cdot \rho_i \quad \text{equação (5)}$$

Em que: C_T capacidade térmica total kJ (m².K);

λ é a condutividade térmica característica de cada material (W/m.K);

ρ é a densidade de massa aparente (kg/m³);

c é o calor específico do material (J/kg.K);

Para camadas homogêneas e não homogêneas, a capacidade térmica é calculada pela equação (6):

$$C_t = \frac{Aa + Ab + \dots + An}{\frac{Aa}{CTa} + \frac{Ab}{CTb} + \dots + \frac{An}{CTn}} \quad \text{equação (6)}$$

Em que: CTa, \dots, CTn são as capacidades térmicas de cada seção;

Aa, Ab, \dots, An são as áreas de cada seção;

2.1.4 Atraso térmico

Fluxo de calor para áreas externas onde a radiação solar será direta acontecerá da parte externa para interna, onde a diferença de calor na parte interna não será sentida instantaneamente, com isso o cálculo tem a função de medir o tempo (horas) que levará para a parte interna sentir o este fluxo de calor, ocorrendo assim um atraso térmico, onde para camadas homogêneas esse pode ser estimado pela equação (7) ou equação (8):

$$\varphi = 1,382. e. \sqrt{\frac{\rho.C}{3,6.\lambda}} \quad \text{equação (7)}$$

ou ainda por:

$$\varphi = 0,7284. \sqrt{Rt. CT} \quad \text{equação (8)}$$

Em que: φ o atraso térmico (h);

e a espessura da placa (m);

λ condutividade térmica do material (W/m.K);

ρ é a densidade de massa aparente do material (kg/m³);

c é o calor específico do material (J/kg.K);

Rt é a resistência térmica de superfície a superfície (m².KW);

CT é a capacidade térmica do componente (J/K);

Para n camadas de diferentes elementos perpendiculares ao fluxo o valor pode ser estimado pela equação (9):

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

Em que: B1 e B2 são calculados pela equação (10), equação (11):

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{Rt} \quad \text{equação (10)}$$

$$B_2 = 0,205 \left(\frac{\lambda \cdot \rho \cdot c}{Rt} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) \quad \text{equação (11)}$$

Sendo “ext” uma referência à última camada do componente.

B₀ é dado pela equação (12);

$$B_0 = CT - CT_{ext} \quad \text{equação (12)}$$

Em que: CT é a capacidade térmica total do componente;

CT_{ext} é a capacidade térmica da camada externa do componente.

2.1.5 Fator solar

Representa a razão entre a taxa de radiação solar transmitida através de um componente e a taxa de radiação solar total incidente em sua superfície externa, ou seja, sua função é medir o ganho de calor solar em porcentagem de penetração.

Para superfícies opacas o fator solar é estimado pela equação (13):

$$F_{So} = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} \quad \text{equação (13)}$$

Em que: FSo é o fator solar de superfícies opacas (porcentagem);

α é absorvância à radiação solar (função da cor);

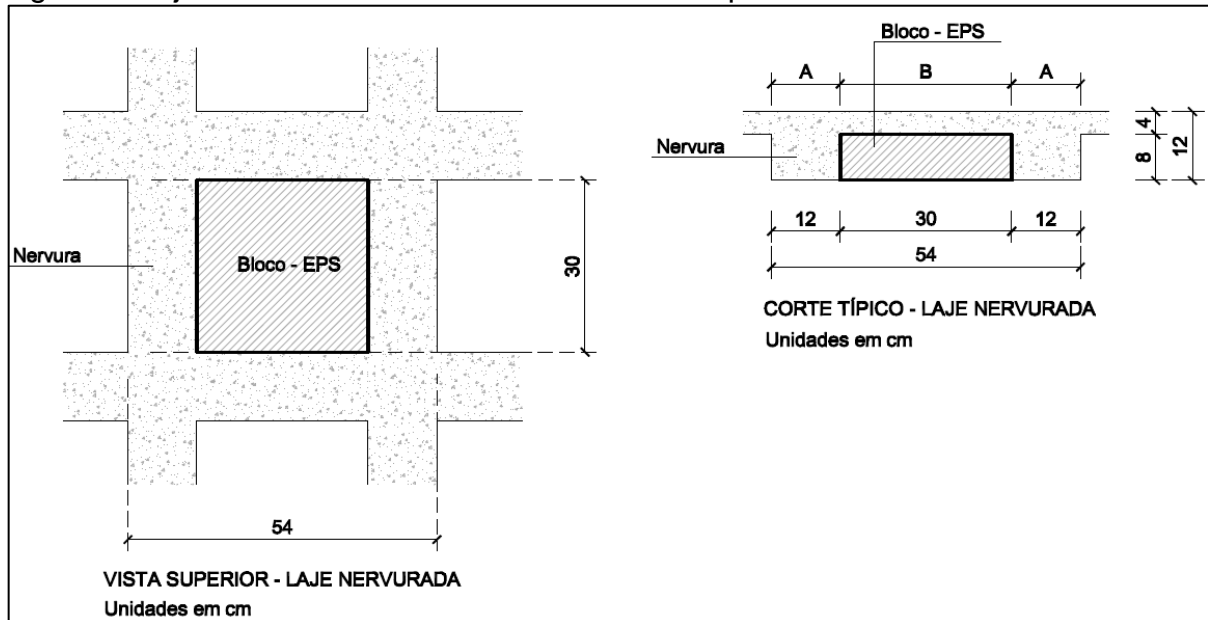
Rse é a resistência superficial externa (admitida constante 0,04);

U é a transmitância térmica do componente;

3. CÁLCULO DO DESEMPENHO TÉRMICO DAS LAJES

3.1 EPS: NERVURA EM CONCRETO ARMADO COM PREENCHIMENTO EM BLOCO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

Figura 6: Laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido.



Fonte: Do autor.

3.1.1 Cálculo da resistência térmica

- Resistência Térmica (A): 12 cm de Concreto

$$\text{Área (A)} = 0,12 \times 0,30 = 0,036\text{m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,12}{1,75} = 0,06857(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

- Resistência Térmica (B): 30 cm de Concreto e EPS

$$\text{Área (B)} = 0,30 \times 0,30 = 0,09\text{m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + \frac{e_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} = \frac{0,04}{1,75} + \frac{0,08}{0,04} = 2,0229(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

$$R_t = \frac{2 \cdot A_a + A_b}{\frac{2 \cdot A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} = \frac{2 \cdot 0,036 + 0,09}{\frac{2 \cdot 0,036}{0,06857} + \frac{0,09}{2,0229}} = \frac{0,072 + 0,09}{1,05 + 0,0445} = \frac{0,162}{1,0945} = 0,1480(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

$$R_T = R_{si} + R_{se} + R_t = 0,17 + 0,04 + 0,1480 = 0,358(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

3.1.2 Cálculo da transmitância térmica

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,358} = 2,7933 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

3.1.3 Cálculo da capacidade térmica

Concreto:

$$CTa = (e.c.\rho) = 0,12 \cdot 1 \cdot 2400 = 288 \text{ kJ} (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Concreto e EPS:

$$CTb = (e.c.\rho) + (e.c.\rho) = 0,04 \cdot 1 \cdot 2400 + 0,08 \cdot 1,42 \cdot 30 = 96 + 3,41 = 99,41 \text{ kJ} (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$CT = \frac{2Aa + Ab}{\frac{2Aa}{CTa} + \frac{Ab}{CTb}} = \frac{0,072 + 0,09}{\frac{0,072}{288} + \frac{0,09}{99,41}} = \frac{0,162}{2,5E-4 + 9,05E-4} = 140,26 \text{ kJ} (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

3.1.4 Cálculo do atraso térmico

$$B0 = CT - Ctext = 140,26 - (0,04 \cdot 1,00 \cdot 2400) = 44,26.$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{B0}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{44,26}{0,1480} = 67,59$$

$$B2 = 0,205 \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \rho \cdot Cext}{Rt} \right) \cdot \left(Rext - \frac{Rt - Rext}{10} \right) =$$

$$B2 = 0,205 \cdot \left(\frac{1,75 \cdot 2400 \cdot 1,00}{0,1480} \right) \cdot \left(\frac{0,04}{1,75} - \frac{0,1480 - 0,0229}{10} \right) = 60,44$$

$$\Phi = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1} + B2 = 1,382 \cdot 0,1480 \cdot \sqrt{67,59} + 60,44 \quad \Phi = 2,31 \text{ horas}$$

3.1.5 Cálculo do fator solar

$$FS0 = U \cdot \alpha \cdot Rse = 2,7933 \cdot 0,75 \cdot 4 = 8,38\%$$

A fim de proporcionar informações fez-se o cálculo para lajes com distintas espessuras, apresentada na Tabela 1.

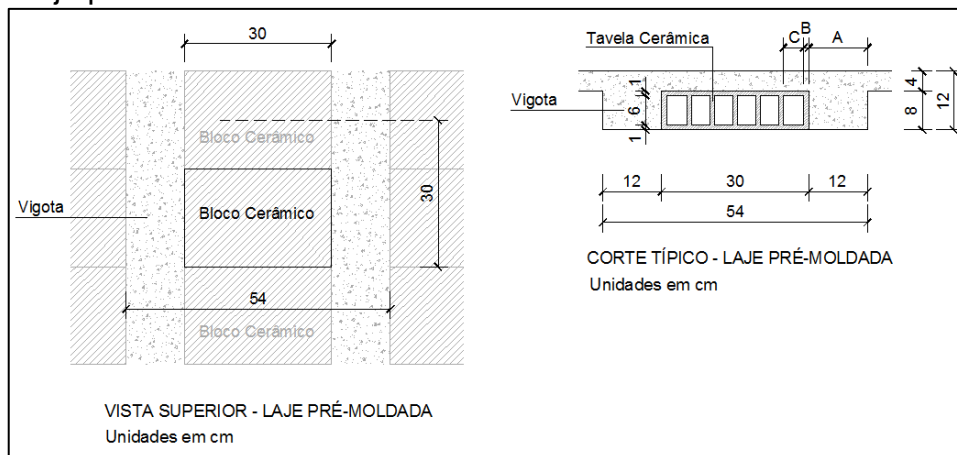
Tabela 1: Variação de espessuras para laje com EPS.

Modulação - cm	Camada de EPS - cm	Camada de Concreto - cm	RT (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	CT (kJ/m ² .K)	ψ Horas	FSO
54 x 30 x 10	7	3	0,3336	3,00	107,98	1,80	8,99%
54 x 30 x 15	8	7	0,3932	2,54	223,43	3,48	7,63%
54 x 30 x 20	15	5	0,4578	2,18	187,92	3,16	6,50%
54 x 30 x 25	18	7	0,5193	1,93	256,20	4,29	5,78%

Fonte: Do autor.

3.2 PRÉ-MOLDADA: NERVURADA COM VIGOTA PRÉ-FABRICADA DE CONCRETO ARMADO COM PREENCHIMENTO EM BLOCO CERÂMICO

Figura 7: Laje pré-moldada com bloco cerâmico.



Fonte: Do autor.

3.2.1 Cálculo da resistência térmica

- Resistência Térmica (A): 12 cm de Concreto

$$\text{Área (A)} = 0,12 \times 0,30 = 0,036\text{m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,12}{1,75} = 0,06857(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$$

- Resistência Térmica (B): 1 cm de Concreto e Cerâmica

$$\text{Área (B)} = 0,01 \times 0,30 = 0,003\text{m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,04}{1,75} + \frac{0,08}{0,90} = 0,1117(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$$

- Resistência Térmica (C): 3,7 cm Concreto, Cerâmica, Ar, Cerâmica

$$\text{Área (C)} = 0,042 \times 0,30 = 0,0126\text{m}^2$$

$$R_c = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + A_r + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,04}{1,75} + \frac{0,01}{0,90} + 0,18 + \frac{0,01}{0,90} = 0,2251 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$R_t = \frac{2 \cdot A_a + 7 \cdot A_b + 6 \cdot A_c}{\frac{2 \cdot A_a}{R_a} + \frac{7 \cdot A_b}{R_b} + \frac{6 \cdot A_c}{R_c}} = \frac{2 \cdot 0,036 + 7 \cdot 0,003 + 6 \cdot 0,0126}{\frac{2 \cdot 0,036}{0,06857} + \frac{7 \cdot 0,003}{0,1117} + \frac{6 \cdot 0,0126}{0,2251}} =$$

$$\frac{0,072 + 0,021 + 0,0756}{1,05 + 0,1880 + 0,3359} = \frac{0,168}{1,574} = 0,1071 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$R_T = R_{si} + R_{se} + R_t = 0,17 + 0,04 + 0,1071 = 0,3171 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

3.2.2 Cálculo da transmitância térmica

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,3171} = 3,1536 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

3.2.3 Cálculo da capacidade térmica

Concreto:

$$C_{Ta} = (e \cdot c \cdot \rho) = 0,12 \cdot 1 \cdot 2400 = 288 \text{ kJ (m}^2 \cdot \text{K)}$$

Concreto e Cerâmica:

$$C_{Tb} = (e \cdot c \cdot \rho) + (e \cdot c \cdot \rho) = 0,04 \cdot 1 \cdot 2400 + 0,08 \cdot 0,92 \cdot 1500 = 96 + 110,4 = 206,4 \text{ kJ (m}^2 \cdot \text{K)}$$

Concreto, Cerâmica, Ar, Cerâmica:

$$C_{Tc} = (e \cdot c \cdot \rho) + (e \cdot c \cdot \rho) + A_r + (e \cdot c \cdot \rho) =$$

$$0,04 \cdot 1 \cdot 2400 + 0,01 \cdot 0,92 \cdot 1500 + 0,18 + 0,01 \cdot 0,92 \cdot 1500 = 96 + 13,8 + 0,18 + 13,8 = 123,78 \text{ kJ (m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$C_T = \frac{2A_a + 7A_b + 6A_c}{\frac{2A_a}{C_{Ta}} + \frac{7A_b}{C_{Tb}} + \frac{6A_c}{C_{Tc}}} = \frac{0,072 + 0,021 + 0,0756}{\frac{0,072}{288} + \frac{0,021}{206,4} + \frac{0,0756}{123,78}} = \frac{0,1686}{2,5E-4 + 1,02E-4 + 6,11E-4}$$

$$= 175,08 \text{ kJ (m}^2 \cdot \text{K)}$$

3.2.4 Cálculo do atraso térmico

$$B_0 = C_T - C_{\text{text}} = 175,08 - (0,04 \cdot 1 \cdot 00 \cdot 2400) = 79,08.$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t} = 0,226 \cdot \frac{79,08}{0,1071} = 166,87$$

$$B2 = 0,205 \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \rho \cdot C_{ext}}{R_t} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) =$$

$$B2 = 0,205 \cdot \left(\frac{1,75 \cdot 2400 \cdot 1,00}{0,1071} \right) \cdot \left(\frac{0,04}{1,75} - \frac{0,1071 - 0,0229}{10} \right) = 115,97$$

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B1} + B2 = 1,382 \cdot 0,1071 \cdot \sqrt{166,87} + 115,97$$

$$\varphi = 2,50 \text{ horas}$$

3.2.5 Cálculo do fator solar

$$F_{So} = U \cdot \alpha \cdot R_{se} = 3,1536 \cdot 0,75 \cdot 4 = 9,5\%$$

A fim de proporcionar informações fez-se o cálculo para lajes com distintas espessuras, apresentada na Tabela 2.

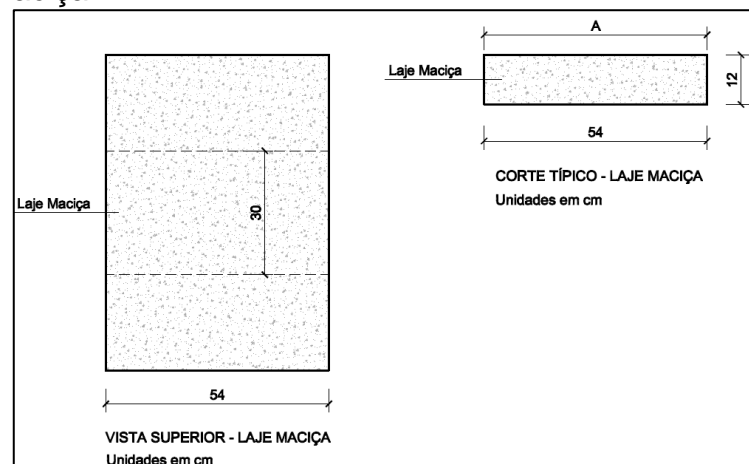
Tabela 2: Variação de espessuras para laje com bloco cerâmico.

Modulação - cm	Camada com Bloco Cerâmico - cm	Camada de Concreto - cm	RT (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	CT (kJ/m ² .K)	ψ Horas	FSo
54 x 30 x 10	7	3	0,3023	3,31	142,61	2,07	9,92%
54 x 30 x 15	8	7	0,3382	2,96	254,84	3,37	8,87%
54 x 30 x 20	15	5	0,3683	2,72	232,30	3,43	8,15%

Fonte: Do autor.

3.3 MACIÇAS: CONCRETO ARMADO

Figura 8: Laje Maciça.



Fonte: Do autor.

3.3.1 Cálculo da resistência térmica

- Resistência Térmica (A): 54 cm de Concreto

$$R_t = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,12}{1,75} = 0,06857 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

$$RT = R_{si} + R_{se} + R_t = 0,17 + 0,04 + 0,06857 = 0,2786 (\text{M}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

3.3.2 Cálculo da transmitância térmica

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,2786} = 3,5898 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

3.3.3 Cálculo da capacidade térmica

$$CT = (e \cdot c \cdot \rho) = 0,12 \cdot 1 \cdot 2400 = 288 \text{ kJ} (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

3.3.4 Cálculo do atraso térmico

$$\varphi = 1,382 \cdot e \cdot \frac{\sqrt{\rho \cdot c}}{3,6 \cdot \lambda} = 1,382 \cdot 0,12 \cdot \frac{\sqrt{2400 \cdot 1}}{3,6 \cdot 1,75} = 3,24 \text{ horas}$$

3.3.5 Cálculo do fator solar

$$F_{So} = U \cdot \alpha \cdot R_{se} = 3,5898 \cdot 0,75 \cdot 4 = 10,77\%$$

A fim de proporcionar informações fez-se o cálculo para lajes com distintas espessuras, apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Variação de espessuras para laje maciça.

Modulação - cm	Camada de Concreto - cm	RT(m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	CT (kJ/m ² .K)	ψ Horas	FSo
54 x 30 x 10	10	0,2671	3,74	240,00	2,70	11,23%
54 x 30 x 15	15	0,2957	3,38	360,00	4,05	10,14%
54 x 30 x 20	20	0,3243	3,08	480,00	5,39	9,25%
54 x 30 x 25	25	0,3529	2,83	600,00	6,74	8,50%

Fonte: Do autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de resistência térmica, transmitância, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar para as três tipologias de laje em estudo estão apresentados na Tabela 4. Cabe ressaltar, novamente, que a comparação entre as distintas lajes deu-se basicamente através da variação do material de preenchimento e manteve-se inalterada a modulação padrão (54 cm x 30 cm x 12 cm).

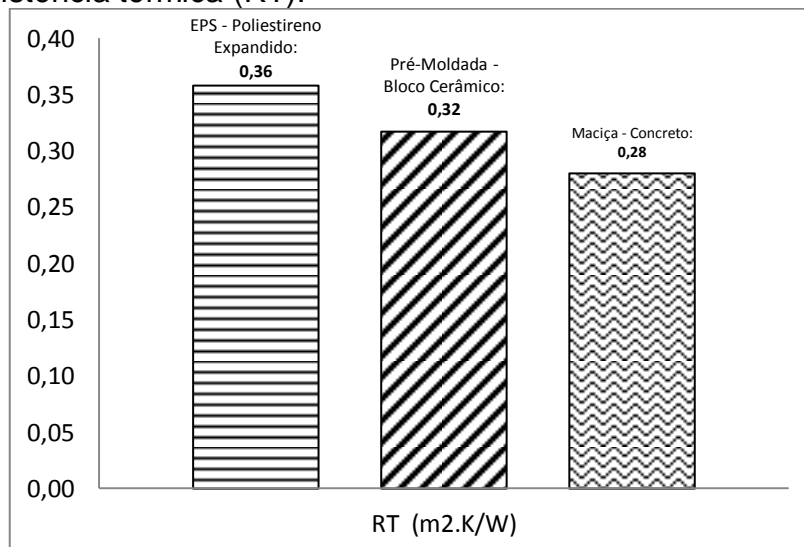
Tabela 4: Resultado do desempenho térmico.

Tipo de Laje	Material de Preenchimento	RT (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	CT (kJ/m ² .K)	φ Horas	FSo	Modulação da Laje (cm)
Nervurada	Poliestireno Expandido	0,36	2,79	140,26	2,31	8,38%	54 x 30 x 12
Nervurada	Bloco Cerâmico	0,32	3,15	175,08	2,50	9,5%	54 x 30 x 12
Maciça	Concreto	0,28	3,59	288,00	3,24	10,77%	54 x 30 x 12

Fonte: Do autor.

Após análise demonstrada na Figura 9, verificou-se que a resistência térmica (RT) da laje maciça em concreto armado foi menor, com relação à laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido e a laje pré-moldada com bloco cerâmico, pois a condutividade térmica da laje maciça é alta com valor de $\lambda = 1,75$ (W/m. K), e assim, proporciona pouca capacidade de resistir à passagem de calor.

Figura 9: Resistência térmica (RT).



Fonte: Do autor.

A ABNT NBR 15575-5:2013 estabelece critérios mínimos de transmitância térmica (U) para cada Zona Bioclimática adotada, ver Tabela 5.

Tabela 5: Critérios de coberturas quanto à transmitância térmica.

Transmitância Térmica (U) - W/m ² . K				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
U ≤ 2,30	α ≤ 0,6	α > 0,6	α ≤ 0,4	α > 0,4
	U ≤ 2,30	U ≤ 1,5	U ≤ 2,30 FT	U ≤ 1,5FT

Fonte: ABNT NBR 15575-5:2013.

Conforme os resultados obtidos na transmitância térmica (U) na Tabela 4, a Laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido apresentou U = 2,79 W/m².k, a laje pré-moldada com bloco cerâmico U = 3,15 W/m².k e a laje maciça em concreto armado U = 3,59 W/m².k, ou seja, não atenderam ao critério de desempenho térmico mínimo exigido pela NBR 15575:2013 de U ≤ 2,30 W/m².k.

A NBR 15220-3:2005 estabelece que para a Zona Bioclimática 2 devam ser atendidas as diretrizes apresentadas nas Tabela 6 e 7.

Tabela 6: Tipos de vedações externas para Zona Bioclimática 2.

Vedações Externas	
Paredes:	Leve
Cobertura:	Leve isolada

Fonte: NBR 15220-3:2005.

Tabela 7: Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa.

Vedações externas		Transmitância Térmica - U W/m ² .K	Atraso Térmico - ψ Horas	Fator Solar - Fso %
Paredes	Leve	U ≤ 3,00	ψ ≤ 4,3	Fso ≤ 5,0
	Leve refletora	U ≤ 3,60	ψ ≤ 4,3	Fso ≤ 4,0
	Pesada	U ≤ 2,20	ψ ≥ 6,5	Fso ≤ 3,5
Cobertura	Leve isolada	U ≤ 2,00	ψ ≤ 3,3	Fso ≤ 6,5
	Leve refletora	U ≤ 2,30.FT	ψ ≤ 3,3	Fso ≤ 6,5
	Pesada	U ≤ 2,20	ψ ≥ 6,5	Fso ≤ 6,5

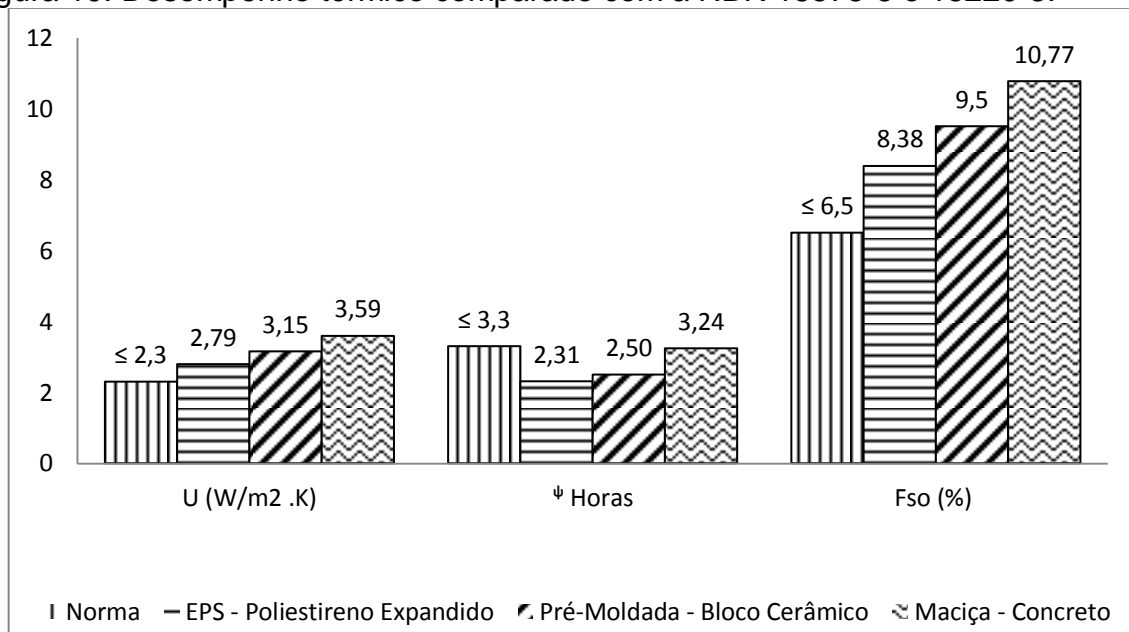
Fonte: NBR 15220-3:2005.

Com a análise do atraso térmico (φ) em horas, onde as lajes estão sujeitas a radiação solar direta com fluxo de calor descendente, todas as lajes de espessura 12 cm atenderam aos critérios estabelecidos pela NBR 15220-3:2005 onde recomenda valor de atraso térmico $\varphi \leq 3,3 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$, sendo elas a Laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido apresentando o resultado de $\varphi = 2,31 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$ a laje pré-moldada com bloco cerâmico com o resultado de $\varphi = 2,05 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$, e a laje maciça em concreto armado com valor $\varphi = 3,24 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$.

Para o fator solar, todas as três lajes em estudo não atingiram o valor de $F_{So} \leq 6,5\%$ exigidas pela NBR 15220-3:2005, sendo que a Laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido resultou em $F_{So} = 8,38\%$, a laje pré-moldada com bloco cerâmico resultou em $F_{So} = 9,5\%$ e a laje maciça com o valor $F_{So} = 10,77\%$.

Segue análise dos resultados sendo comparada com as Normas, Figura 10.

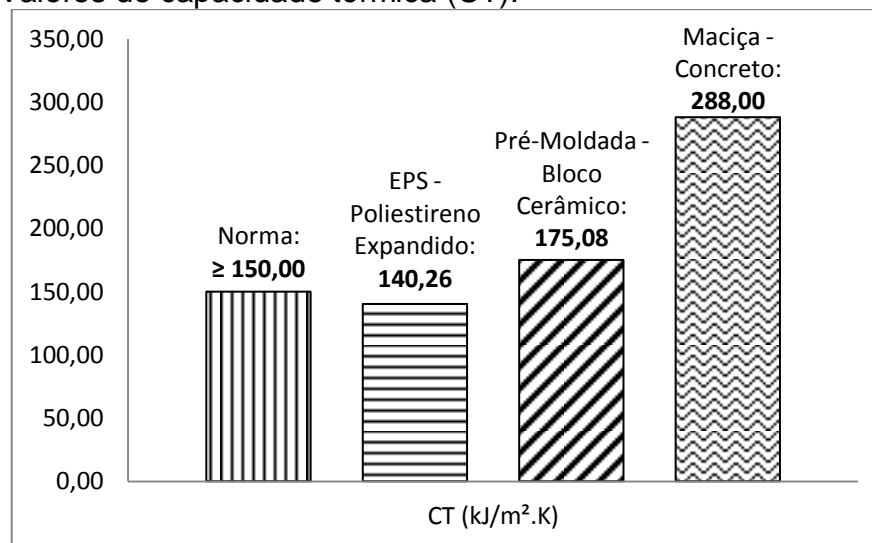
Figura 10: Desempenho térmico comparado com a NBR 15575-5 e 15220-3.



Fonte: Do autor.

A NBR 15575-5:2013 estabelece uma capacidade térmica de $CT \geq 150,00 \text{ kJ} (\text{m}^2 \cdot \text{K})$, sendo que duas lajes estão dentro dos limites exigidos por Norma, a laje pré-moldada com bloco cerâmico com valor de $CT = 175,08 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$ e a laje maciça em concreto armado com valor de $CT = 288,00 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$, contudo a laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido ficou abaixo do exigido por Norma com valor $CT = 140,26 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$, ver Figura 11.

Figura 11: Valores de capacidade térmica (CT).



Fonte: Do autor.

5. CONCLUSÕES

Após análise sobre o desempenho térmico das lajes de cobertura a partir de estudo realizado segundo os critérios das ABNT NBR 15575:2013, NBR 15220:2005 verifica-se que o desempenho térmico varia com a espessura e características dos materiais, que por sua vez influenciam as trocas de calor. A laje maciça em concreto armado, homogênea e densidade de massa aparente alta, mostrou-se a melhor condutora de calor, por outro lado a laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido e a laje pré-moldada com bloco cerâmico, lajes homogêneas e não homogêneas, cujos materiais de preenchimentos são porosos e apresentam uma maior quantidade de ar, são, portanto melhores isolantes térmicos.

A transmitância térmica (U) da laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido aproximou-se ao critério mínimo exigido pela NBR 15575-5:2013, pois sua transferência de calor ficou em $U = 2,79 \text{ W/m}^2.\text{k}$, estando 21,30% acima do valor exigido por Norma, portanto é a laje que possui maior resistência térmica (RT).

Para o atraso térmico (ϕ) em horas às lajes estão dentro do estabelecido por Norma, onde a diferença térmica maior será para laje maciça em concreto armado com valor $\phi \leq 3,3 \text{ KJ/m}^2. \text{K}$, que será o tempo (horas) para alcançar a parte interna da laje sendo o sentido externo para o interno, por outro lado temos a laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido com o valor de $\phi = 2,31 \text{ KJ/m}^2. \text{K}$ onde a diferença térmica será notada com maior rapidez.

Para capacidade térmica (CT) a laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido apresenta valores fora do estabelecido por Norma, pois seu calor específico é alto, portanto a quantidade de calor necessária para variar a temperatura do sistema é baixo com valor de $CT = 140,26 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$, sendo que a Norma estipula em $CT \geq 150,00 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$.

Para as demais espessuras e tipologias de lajes, a laje que atendeu a todos os requisitos exigidos por Norma foi à laje com bloco em EPS – Poliestireno Expandido com espessura de 20 cm, onde seu valor para transmitância térmica $U = 2,18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, capacidade térmica $CT = 187,92 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$, atraso térmico (ϕ) = $3,16 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{K}$ e fator solar (FS_o) = 6,5%.

Ao final verifica-se que nem todas as espessuras atendem aos requisitos exigidos pela ABNT NBR 15575:2013 e NBR15220:2005, para tal faz-se necessário um estudo mais rigoroso dos materiais a serem utilizados no seu preenchimento e/ou estudo de aplicações de isolantes térmicos para melhorar seu desempenho térmico, onde garantirá um conforto ambiental e evitará problemas patológicos.

6.REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Edificações habitacionais – Desempenho**: ABNT NBR 15575-1. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Edificações habitacionais – Desempenho**: ABNT NBR 15575-5. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Desempenho térmico de edificações**. ABNT NBR 15220. Rio de Janeiro, 2005.

CAIXA ECONOMICA FEDERAL. **Casa Azul**: Boas práticas para habitação mais sustentável. São Paulo: Páginas & Letras, 2010.

CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil). **Brasil adota novos padrões de qualidade para construção de casas e apartamentos**. Royal

FROTA, Anésia Barros & SCHIFFER, Sueli Ramos - **Manual De Conforto Térmico**. 7ª Ed. São Paulo: Editora Nobel, 2006. 243 p.

LABERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O.R. – **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Editora ELETROBRAS/PROCEL, 2014. 366 p.

LOTURCO, Bruno. Fissuras no último pavimento. **Téchne**, junho. 2005, Edição 99. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/99/artigo285353-1.aspx>>. Acesso em: 09out. 2015.

PAIXÃO, Rosimary Couto. Avaliação do desempenho térmico de coberturas de policarbonato e acrílico: estudo de caso no campus da UNIMEP em Santa Bárbara Doeste. In: IX Mostra Acadêmica UNIMEP “Ambiente e Sustentabilidade”, 19., 2011, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília: UNIMEP, 2011. Disponível em: < <http://www.unimep.br/phpg/mostraacademica/anais/9mostra/1/100.pdf> > Acesso em: 12set. 2015.

SORGATO, M. J. ; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575. In: CONGRESSO XII Encontro Nacional e VIII Latino americano de Conforto no Ambiente Construído, 12., 2013, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília: ENCAC/ELACAC, 2013. Disponível em: <<http://www.periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/viewFile/12205/8544>> Acesso em: 11set. 2015.

Tulip Brasília Alvorada SHTN trecho 1, cj 1B, Bloco C, 08 abril 2013, Disponível em: <<http://www.cbic.org.br/sites/default/files/Lan%C3%A7amento%20do%20Guia%20Orientativo%20da%20Norma%20de%20Desempenho.pdf>>. Acesso em: 10set. 2015.

THOMAZ, Ercio - **Trincas em Edifícios - Causas, Prevenção e Recuperação**. 1ª Ed. São Paulo: Editora PINI, 2006. 194 p.