DÉBORA CRISTINA ROSA FARIA DA COSTA

CONTÊINERES METÁLICOS PARA CANTEIROS DE OBRAS: ANÁLISE
EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO TÉRMICO E MELHORIAS NA
TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELA ENVOLTÓRIA

SÃO PAULO, 2015

DÉBORA CRISTINA ROSA FARIA DA COSTA

CONTÊINERES METÁLICOS PARA CANTEIROS DE OBRAS: ANÁLISE
EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO TÉRMICO E MELHORIAS NA
TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELA ENVOLTÓRIA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de concentração: Engenharia da
Construção Civil e Urbana

Orientador: Professor Livre-docente
Racine Tadeu Araújo Prado

SÃO PAULO, 2015

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de outubro de 2015.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Costa, Débora Cristina Rosa Faria da
CONTÊINERES METÁLICOS PARA CANTEIROS DE OBRAS: ANÁLISE
EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO TÉRMICO E MELHORIAS NA
TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELA ENVOLTÓRIA / D. C. R. F. Costa --
versão corr. -- São Paulo, 2015.
173 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Contêiner 2.Conforto Térmico 3.Estresse Térmico 4.Tratamento
Térmico 5.Transferência de Calor I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Dedico às mulheres da minha vida, com as quais aprendi e aprendo, e das quais carrego dentro de mim uma parte especial por onde eu for: Florentina, Expedita, Neusa, Cíntia e Joana e todas as demais, Paulas, Isadoras, Letícias, Alessandras, Dinalvas, Tatianas, Gabrielas, Cristinas, Danielas, Raquéis, Camilas, Vanildas, Vanessas, Vivianes, Julianas, Beneditas, Iracemas, Reginas, Micheles, Thaíses, Flávias, Natálias, Carolinas, Beatrizes, Julias, Madalenas e tantas que não cabem aqui. Porque não há de existir limites para nós.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Racine Tadeu Araújo Prado, pelo apoio incomensurável durante todo o processo, pela palavra sábia e oportuna nos momentos difíceis e mais ainda, pela enorme confiança, paciência e também pela autonomia que me concedeu para a realização deste trabalho. Por toda a segurança transmitida e pela orientação responsável e comprometida.

Ao Prof. Dr. Francisco Ferreira Cardoso, por ter me aberto as portas da Escola Politécnica de forma tão acolhedora e pela generosidade e atenção durante todo o meu percurso na Escola.

Aos Profs. Drs. Vanderley John e Eduardo Ioshimoto pelas intervenções pontuais, mas extremamente significativas na minha trajetória pessoal dentro da Escola e na trajetória deste trabalho, propriamente.

Ao Prof. Dr. Arlindo Tribess, pela paciência e importante conhecimento passado na disciplina cursada na Engenharia Mecânica, pelo apoio na concepção do projeto do sistema de medição experimental, pelas conversas e pelo socorro prestado com o empréstimo de equipamento para o experimento.

Ao Prof. Dr. Simões, por disponibilizar o banho térmico para calibragem dos instrumentos e o Laboratório de Térmica da Engenharia Mecânica por tanto tempo para que déssemos conta do trabalho.

À Profa. Dra. Brenda Leite e ao Prof. Dr. Leonardo Marques Monteiro, por terem participado da banca de qualificação e contribuído de forma extremamente construtiva para os rumos que o trabalho tomou.

Ao caríssimo e imprescindível José Carlos Orsi Morel, físico meticoloso e extremamente experiente, pelo apoio na concepção do projeto do sistema de medição, na longa calibração dos sensores, na montagem do experimento durante uma semana de trabalho duro debaixo de sol, pela torcida a cada resultado, a cada conclusão. O experimento não aconteceria sem sua participação. Pelo apoio constante e amizade.

Ao Dr. Marcio Vilela, pela generosidade em compartilhar informações e pela disposição em pensar junto sobre questões que me inquietaram na reta final da pesquisa.

À Patrícia Freitas e ao Rogério Toledo, por todos os socorros prestados em Informática, dentro da Escola e à distância, no experimento.

Às secretárias do Departamento de Engenharia Civil Eliany, Gessimara e Wandrea, pelo pronto auxílio sempre.

Ao Adilson do Laboratório de Construção Civil, pela prestatividade, sempre com simpatia.

Aos colegas do Laboratório de Sistemas Prediais Thiago Garcia, Elaine Ferreira e Monica Camargo, por compartilharem conhecimentos, equipamentos, dicas e atalhos com tanta boa vontade.

À Profa. Dra. Kai Loh, pelo empréstimo do refletômetro e do emissômetro para as análises das propriedades ópticas dos materiais. À Isabela Libório, pela paciência e profissionalismo com que me auxiliou nas análises de refletância e emissividade no Laboratório de Materiais da Escola Politécnica.

Aos colegas da Sala 35 Rogerio Santovito, Rui Barbosa, Nathália de Paula, Flávia Rodrigues de Souza, Beatriz Rodrigues, Julia Raucci e Liz Zanchetta, pelo compartilhamento do espaço sempre de modo respeitoso, pela amizade, pelos ouvidos e pela força enorme nos momentos complicados.

Às colegas Débora Cavalheiro e Lidiane Oliveira, pela solidariedade e pelo compartilhamento de informações preciosas nos vários momentos em que estive perdida na inevitável (?) burocracia institucional.

À parceira inestimável Soldatopo/Fladafi, nas pessoas de Elvio Lorieri, Ricardo Lorieri, Luiz Lorieri e Cinji pela confiança e credibilidade que depositaram no projeto, e pelo apoio na confecção dos contêineres experimentais e toda a infraestrutura necessária para a montagem e manutenção do experimento, bem como do espaço no entorno, durante todo o tempo em que o mesmo se desenvolveu. À Veronilza, sempre fantástica. Ao Gilmar, Gilmarzinho, Jeferson, Isa, Ari, Robson, Virginia, Cida, Damiana, Afonso, Rose, Flavio, Regiane, Aline, Rodrigo, Victor, Sidnil, Felipe, Rafael, Leonardo, Sr. Jairo, Sr. Claudio, Sandro, Nilton, Sr. Zé, Sr. Lima, e a todos os funcionários, sempre gentis, atenciosos e com muita boa vontade para atender às demandas da pesquisa. Um cheiro especial aos amigos Mayra, Azulão, Thompson, Batata, Branquinha, Bandido, Fumaça, Mussarela, Belíssima, Belíssimo, Espeto, Corinthiano, Saifi, que me

presentaram com inúmeros momentos de descontração e alegria durante o experimento.

À parceira Nanotech do Brasil, nas pessoas de Faria, Storani, Wagner, Luciana e Laudo, pela confiança no projeto e parceria na doação e aplicação do revestimento refletivo, e pelo comprometimento em desenvolver soluções que contribuam positivamente para a interação mais harmoniosa do ser humano no ambiente em que vive.

À minha família, Carlos, Neusa, Cíntia e Avenino, pelo apoio incondicional e imprescindível para que eu pudesse caminhar não só no mestrado, mas desde que me entendo por gente.

Ao João e à família Araújo Ramos.

À Edilene, pelos muitos cafés com sorriso.

Aos Professores Doutores Lucila Chebel Labaki e Leonardo Marques Monteiro, por comporem a banca final, juntamente com o Prof. Racine Prado.

À Profa. Dra. Sheyla Serra e Projeto CantechIS, à FINEP e CAPES pelas bolsas concedidas.

À Vanilda, apoio firme no mergulho sem volta que me propus realizar.

À Joana, que do alto de seus 8 anos, esperou com paciência (às vezes, nem tanta) e compreensão chegar o tão esperado dia do “depois do Mestrado”.

À Sorte, Deus, Universo, Destino, Karma, Energia, Vida ou o nome que tiver, isso que minha mente não alcança.

“Felicidade se acha é em horinhas de descuido.”

Guimarães Rosa

RESUMO

Os contêineres metálicos foram desenvolvidos para a utilização no setor de logística e transporte, mas por sua escala adaptável às das edificações e pela mobilidade e praticidade de instalação, tiveram sua utilização apropriada também pelo setor da construção civil. Essas instalações possuem diversas qualidades ambientalmente amigáveis, mas seu aspecto térmico é extremamente insuficiente: sem isolamento térmico, demandam alta carga térmica de refrigeração e aquecimento, no verão e inverno, respectivamente e, conseqüentemente, um alto consumo energético. Tal característica foi crucial para que se determinassem como objetivos da presente pesquisa investigar o comportamento térmico dessas construções metálicas, avaliar seus parâmetros de desempenho, conforto e estresse térmicos, por meio de uma ampla coleta de dados experimentais. O experimento – com duração de um ano - contou com três tipologias de contêiner em escala real, sendo o primeiro em aço Tipo X sem isolamento térmico, o segundo com um isolamento térmico para o fenômeno da condução e o terceiro com isolamento térmico para o fenômeno da radiação. Os diferentes tipos de tratamentos térmicos proporcionaram melhorias à envoltória dos contêineres, chegando a uma diferença nas temperaturas internas de até 9 °C. Constatou-se a extrema necessidade de adequação do tipo de isolamento térmico dos contêineres ao uso a que tais instalações se destinam – escritório ou alojamento, no caso dos canteiros de obras – para que as características da envoltória minimizem de fato a demanda ou mesmo atinjam a eliminação da necessidade de condicionamento artificial.

ABSTRACT

Metal containers were developed to logistics and transportation sector, but as a result of their suitable scale to human occupation, and their mobility and installation convenience, their use was adopted by the construction sector. These installations have many environmentally friendly characteristics, but their thermal performance is extremely unsuitable for habitation: without thermal insulation, the containers have high cooling and heating thermal load, in summer and winter, respectively, and consequently, to achieve thermal comfort, a substantial amount of energy is consumed. This feature was important to determine that the research's objectives were to investigate metallic construction's thermal performance, calculate their thermal performance parameters, thermal comfort and thermal stress through a wide collection of experimental data. The experiment – with duration of one year – was conducted in three real scale containers: all of them made of steel (called steel Type X): the first one had no thermal insulation, the second one had insulation for thermal conduction, and the third had a thermal barrier for radiation. This different types of thermal treatment provided improvement to the containers' envelopes, achieving a difference in internal temperatures about 9 °C. The findings reveal that thermal insulation needs to correctly respond to the container's intended use – office or accommodation, in the case of construction sites– so that the envelope's characteristics can have an impact on minimizing energy demand or even eliminate the container's need for artificial heating and cooling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - SHIPPING CONTAINER GUEST HOUSE BY JIM POTEET, SAN ANTONIO, TEXAS, EUA, 2010.	28
FIGURA 2-2 - CONTAINER CITY, BURO HAPPOLD & CONTAINER CITY, LONDRES, REINO UNIDO, 2002. FONTE:	29
FIGURA 2-3 - KEETWONEN (AMSTERDAM STUDENT HOUSING), TEMPOHOUSING, AMSTERDAM, HOLANDA, 2005-2006. .30	
FIGURA 2-4 – CONTÊINERES METÁLICOS SEM TRATAMENTO TÉRMICO. FONTES:	32
FIGURA 2-5 – CONTÊINERES METÁLICOS COM TRATAMENTO TÉRMICO.	32
FIGURA 2-6 - COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE AS DIFERENTES MODALIDADES DE INSTALAÇÕES PROVISÓRIAS AO LONGO DE SUA UTILIZAÇÃO EM SUCESSIVAS OBRAS, SEGUNDO SAURIN E FORMOSO (2006)	34
FIGURA 4-1 – CORRELAÇÃO ENTRE DIFUSIVIDADE TÉRMICA (A) E EFUSIVIDADE TÉRMICA (B) EM ESCALA LOGARÍTMICA	44
FIGURA 4-2 - CORRELAÇÃO ENTRE DIFUSIVIDADE TÉRMICA (A) E EFUSIVIDADE TÉRMICA (B) EM ESCALA LOGARÍTMICA PARA OS MATERIAIS MAIS COMUNS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.	44
FIGURA 4-3 – FATOR DE AMORTECIMENTO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO MATERIAL.....	48
FIGURA 4-4- ESPECTRO DE RADIAÇÃO PARA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.	49
FIGURA 4-5 - EMISSÃO (RADIAÇÃO), RADIAÇÃO E RADIOSIDADE.	50
FIGURA 4-6 – PROCEDIMENTO DE APOIO PARA ESPECIFICAÇÃO DE ISOLAMENTO TÉRMICO. ADAPTADO DE AL-HOUMOU (2004).....	54
FIGURA 4-7 – PONTO ÓTIMO ENTRE O CUSTO DO ISOLAMENTO TÉRMICO E O CUSTO COM ENERGIA NA EDIFICAÇÃO.	56
FIGURA 4-8 – EFEITO DA MASSA TÉRMICA NA TEMPERATURA INTERNA DA EDIFICAÇÃO.	58
FIGURA 4-9 - CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS ISOLANTES A 10°C EM ESTADO SECO, AMOSTRAS AMADURECIDAS (AGED).	61
FIGURA 4-10 - PROPRIEDADES RADIANTES NO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR E DO INFRAVERMELHO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.	62
FIGURA 4-11 – INSTALAÇÃO DE BARREIRA RADIANTE SOB A COBERTURA E NA PAREDE DE UMA EDIFICAÇÃO.....	65
FIGURA 4-12 – FLUXO DE CALOR NA COBERTURA DE UMA EDIFICAÇÃO.	66
FIGURA 4-13 – COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE CALOR ADVINDO DA COBERTURA EM UMA EDIFICAÇÃO SEM BARREIRA TÉRMICA E COM BARREIRA TÉRMICA.....	67
FIGURA 5-1 – INTERSTÍCIOS NA JUNÇÃO ENTRE COBERTURA E PAREDES VERTICAIS	76
FIGURA 5-2 - ZONA BIOCLIMÁTICA BRASILEIRA N°3 COM A LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE MAIRINQUE.	78
FIGURA 5-3 - MAIRINQUE: MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS.....	78
FIGURA 5-4 - CARTA SOLAR PARA LATITUDE 24° SUL.	79
FIGURA 5-5 - ESTUDO DE SOMBREAMENTO PARA UM CONTÊINER NO SOLSTÍCIO DE VERÃO.	80
FIGURA 5-6 - ESTUDO DE SOMBREAMENTO PARA UM CONTÊINER NO SOLSTÍCIO DE INVERNO.	80
FIGURA 5-7 - ESTUDO DE SOMBREAMENTO PARA UM CONTÊINER NOS EQUINÓCIOS.	80
FIGURA 5-8 - ESTUDO DE SOMBREAMENTO PARA OS TRÊS CONTÊINERES E A CABINE DE CONTROLE NOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS.....	81
FIGURA 5-9 - MARCAÇÃO DOS PONTOS DE LOCAÇÃO, DE ACORDO COM O ESTUDO DE SOMBREAMENTO.....	81

FIGURA 5-10 - LOCAÇÃO FINAL DO CONJUNTO. IMAGEM REALIZADA NO DIA 27/12/2013.	81
FIGURA 5-11 - PIRANÔMETRO “BLACK AND WHITE” EPPLEY.	83
FIGURA 5-12 - DATALOGGER AGILENT 34970A	84
FIGURA 5-13 - INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA ITWH-1080	84
FIGURA 5-14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CADEIA DE MEDIÇÃO COM POSICIONAMENTO DO CONJUNTO EM RELAÇÃO AO NORTE VERDADEIRO. (A) COMPUTADOR, (B) DATALOGGER, (C) BASE DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA, (D) SENSORES METEOROLÓGICOS, (E) PIRANÔMETRO, (F) TERMOPAR PARA MEDIÇÃO DE TBS, (DE 1 A 11) SENSORES PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS E (TG) GLOBO NEGRO COM SENSOR DE TEMPERATURA.	85
FIGURA 5-15 - CONFORTÍMETRO: DATALOGGER DA MARCA DELTA OHM E SUPORTE MONTADO COM AS SONDAS MEDIDORAS DENTRO DO CONTÊINER 1.....	88
FIGURA 5-16 – PARÂMETROS PARA AS RESISTÊNCIAS SUPERFICIAIS EXTERNAS E INTERNAS, SEGUNDO A ABNT-NBR 15220-3 (2005).....	92
FIGURA 5-17- INTERVALO PARA TEMPERATURAS OPERATIVAS ACEITÁVEIS PARA EDIFICAÇÕES NATURALMENTE VENTILADAS FONTE: ASHRAE 55 (2010)	96
FIGURA 6-1 - COMPORTAMENTO DA COBERTURA (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	101
FIGURA 6-2 - COMPORTAMENTO DO PISO (SUPERFÍCIE INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B).....	103
FIGURA 6-3 - COMPORTAMENTO DA FACE OESTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	104
FIGURA 6-4 - COMPORTAMENTO DA FACE NORTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	105
FIGURA 6-5 - COMPORTAMENTO DA FACE LESTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	106
FIGURA 6-6 - COMPORTAMENTO DA FACE SUL (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	106
FIGURA 6-7 - COMPORTAMENTO DO TERMÔMETRO DE GLOBO NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	107
FIGURA 6-8 - MÉDIA MENSAL DE VALORES DE IBUTG (°C) PARA O CONTÊINER 1.....	109
FIGURA 6-9 - NÚMERO DE HORAS/DIA (H/DIA) COM VALORES DE IBUTG ACIMA DE 30°C (MÉDIA MENSAL)	109
FIGURA 6-10 – WCI (WIND CHILL ÍNDICE) – MEDIA MENSAL REGISTRADA NOS MESES DE MAIO, JUNHO, JULHO, AGOSTO, SETEMBRO E OUTUBRO DE 2014.....	111
FIGURA 6-11 – NÚMERO DE HORAS/DIA (H/DIA) CUJO ÍNDICE WCI ATINGIU VALORES INFERIORES A 10°C NO INTERIOR DO CONTÊINER 1.	111
FIGURA 6-12 – TEMPERATURA OPERATIVA (°C) MÉDIA MENSAL NO INTERIOR DO CONTÊINER 1.....	112
FIGURA 6-13 - SENSAÇÃO TÉRMICA SEGUNDO O MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO DA ASHRAE 55 (2010)	113
FIGURA 6-14 - PERCENTUAL TOTAL DE SATISFAÇÃO QUANTO À SENSAÇÃO TÉRMICA, MEDIDO DE DEZEMBRO DE 2013 A DEZEMBRO DE 2014.	115
FIGURAS 6-15 – GRÁFICOS DE DESEMPENHO (TEMPERATURA DE BULBO SECO INTERNAS X TEMPERATURA DE BULBO SECO EXTERNAS)	116

FIGURA 6-16 – NÚMERO DE HORAS POR DIA (MÉDIA MENSAL) EM QUE A ENVOLTÓRIA DO CONTÊINER 1 ATINGE O DESEMPENHO MÍNIMO	117
FIGURA 6-17 - AVALIAÇÃO TÉRMICA DO CONTÊINER 1 SEGUNDO O MÉTODO DOS GRAUS-HORA	118
FIGURA 6-18 – INTERIOR DO CONTÊINER 2 (C2).....	120
FIGURA 6-19 – DISPOSIÇÃO DO ISOLAMENTO TÉRMICO EXISTENTE NAS PAREDES DO CONTÊINER 2	120
FIGURA 6-20 - COMPORTAMENTO DA COBERTURA (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) (A) NO DIA MAIS QUENTE E (B) NO DIA MAIS FRIO.....	121
FIGURA 6-21 - COMPORTAMENTO DO PISO (SUPERFÍCIE INTERNA) (A) NO DIA MAIS QUENTE E (B) NO DIA MAIS FRIO.....	123
FIGURA 6-22 - COMPORTAMENTO DA FACE OESTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	123
FIGURA 6-23 - COMPORTAMENTO DA FACE NORTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B).....	124
FIGURA 6-24 - COMPORTAMENTO DA FACE LESTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	125
FIGURA 6-25 - COMPORTAMENTO DA FACE SUL (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	125
FIGURA 6-26 - COMPORTAMENTO DO TERMÔMETRO DE GLOBO NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	126
FIGURA 6-27 - GRAUS-HORA PARA O CONTÊINER 2	127
FIGURA 6-28- REVESTIMENTO APLICADO SOB CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ADVERSAS PARA A FIXAÇÃO DO PRODUTO	130
FIGURA 6-29 - PROCESSO DE APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO REFLETIVO NO CONTÊINER EXPERIMENTAL	131
FIGURA 6-30- CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO AO LONGO DO PERÍODO DE EXPOSIÇÃO	132
FIGURA 6-31 - COMPORTAMENTO DA COBERTURA (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) (A) NO DIA MAIS QUENTE E (B) NO DIA MAIS FRIO.....	133
FIGURA 6-32 - COMPORTAMENTO DO PISO (SUPERFÍCIE INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B).....	133
FIGURA 6-33 - COMPORTAMENTO DA FACE OESTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	134
FIGURA 6-34 - COMPORTAMENTO DA FACE NORTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B).....	135
FIGURA 6-35 - COMPORTAMENTO DA FACE LESTE (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	136
FIGURA 6-36 - COMPORTAMENTO DA FACE SUL (SUPERFÍCIES EXTERNA E INTERNA) NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	136
FIGURA 6-37 - COMPORTAMENTO DO TERMÔMETRO DE GLOBO NO DIA MAIS QUENTE (A) E NO DIA MAIS FRIO (B)	137
FIGURA 6-38 - GRAUS-HORA PARA O CONTÊINER 3	138
FIGURA 6-39 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NAS SUPERFÍCIES EXTERNAS DAS COBERTURAS AO LONGO DOS MESES MEDIDOS	140
FIGURA 6-40 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NAS SUPERFÍCIES INTERNAS DAS COBERTURAS AO LONGO DOS MESES MEDIDOS	142

FIGURA 6-41 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NAS SUPERFÍCIES INTERNAS DOS PISOS AO LONGO DOS MESES MEDIDOS	143
FIGURA 6-42 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NAS SUPERFÍCIES EXTERNAS DAS FACES NORTE AO LONGO DOS MESES MEDIDOS	144
FIGURA 6-43 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NAS SUPERFÍCIES INTERNAS DAS FACES NORTE AO LONGO DOS MESES MEDIDOS.....	145
FIGURA 6-44 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NAS SUPERFÍCIES EXTERNAS DAS FACES SUL AO LONGO DOS MESES MEDIDOS	146
FIGURA 6-45 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NAS SUPERFÍCIES INTERNAS DAS FACES SUL AO LONGO DOS MESES MEDIDOS.....	147
FIGURA 6-46 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS CONTÊINERES 1, 2 E 3 (°C) NOS TERMÔMETROS DE GLOBO AO LONGO DOS MESES MEDIDOS	148
FIGURA 6-47 – JUNÇÃO DA COBERTURA COM A PAREDE NOS CONTÊINERES 1 E 3	150
FIGURA 6-48 - ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONTÊINER 1: A) DURANTE O DIA B) DURANTE A NOITE. ONDE C – CONDUÇÃO, V – CONVECÇÃO, E – EMISSÃO E R - REFLEXÃO	150
FIGURA 6-49 - ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONTÊINER 2: A) DURANTE O DIA B) DURANTE A NOITE. ONDE C – CONDUÇÃO, V – CONVECÇÃO, E – EMISSÃO E R - REFLEXÃO	152
FIGURA 6-50 - ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONTÊINER 3: A) DURANTE O DIA B) DURANTE A NOITE. ONDE C – CONDUÇÃO, V – CONVECÇÃO, E – EMISSÃO E R - REFLEXÃO	153
FIGURA 6-51 – GRAUS-HORA: HORAS DE AQUECIMENTO PARA OS TRÊS CONTÊINERES	154
FIGURA 6-52 - GRAUS-HORA: HORAS DE RESFRIAMENTO PARA OS TRÊS CONTÊINERES	155
FIGURA 6-53 - SOMA FINAL DAS HORAS DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DOS CONTÊINERES SEGUNDO O MÉTODO DOS GRAUS-HORA.	156
FIGURA 6-54 – TEMPERATURA DO AR EXTERNO (°C) E TEMPERATURA DE GLOBO DO CONTÊINER 1 NO DIA MAIS QUENTE. 162	
FIGURA 6-55 - TEMPERATURA DO AR EXTERNO (°C) E TEMPERATURA DE GLOBO DO CONTÊINER 2 NO DIA MAIS QUENTE.. 163	
FIGURA 6-56 - TEMPERATURA DO AR EXTERNO (°C) E TEMPERATURA DE GLOBO DO CONTÊINER 3 NO DIA MAIS QUENTE.. 163	

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
A	Área da seção [m^2]
A_{ext}	Amplitude térmica externa [$^{\circ}\text{C}$ ou K]
A_{int}	Amplitude térmica interna [$^{\circ}\text{C}$ ou K]
b	Efusividade térmica [$\text{J}/\text{m}^2\text{Ks}^{1/2}$]
c	Calor específico ou capacidade térmica específica [$\text{J}/\text{kg K}$]
C	Capacidade térmica [J/K]
C_6H_{12}	Cicloexano
C_{cv}	Capacidade calorífica volumétrica [$\text{kJ}/\text{m}^3\text{ K}$]
cm	Centímetro
CO_2	Dióxido de Carbono
C_p	Calor específico [$\text{J}/\text{kg K}$]
C_T	Capacidade térmica do componente [$\text{kJ}/\text{m}^2.\text{K}$]
C_{Text}	Capacidade térmica da camada externa do componente [$\text{kJ}/\text{m}^2.\text{K}$]
D	Diâmetro do termômetro de globo [m]
d ou ρ	Densidade de massa aparente ou massa volumétrica [kg/m^3]
e	Espessura [m ou mm]
E	Poder emissivo [$\text{W}/\text{m K}$]
FS_o	Fator solar de elementos opacos ou fator de ganho de calor solar
ft	<i>Foot</i> ou pés
g	Grama
G	Radiação [W/m^2]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
G_{abs}	Radiação absorvida por uma superfície [W/m^2]
Gr	Número de Grashof
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2.\text{ K}$]
h_c	Coeficiente de convecção [$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
h_e	Coeficiente de convecção externo [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
HFC	Hidrofluorcarboneto
h_i	Coeficiente de convecção interno [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
hr	Coeficiente de radiação [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
$h_{\text{rc-e}}$	Coeficiente de radiação externo [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
$h_{\text{rc-i}}$	Coeficiente de radiação interno [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
I	Radiação solar incidente na superfície [W/m^2]
J	Joule

J	Radiosidade ou Intensidade de radiação para cada comprimento de onda [W/m ²]
k	Constante de condutividade térmica [W/m . K]
K	Kelvin [Unidade de temperatura]
L	Dimensão característica da superfície [m]
l	Comprimento [m]
m	Metro
m'	Fator de amortecimento
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
Nu	Número de Nusselt
Ø	Diâmetro
Pr	Número de Prandtl
q''	Fluxo de calor por convecção [W/m ²]
q'' _x	Fluxo térmico ou densidade de fluxo térmico [W/m ²]
q'' _E	Fluxo térmico emitido por uma superfície real [W/m ²]
q _{rad}	Troca líquida de calor por radiação [W]
q _x	Taxa de transferência de calor [W]
R	Resistência térmica [m ² K/W]
R _{cond}	Resistência térmica à condução [K/W]
Re	Número de Reynolds
R _{ext}	Resistência térmica da superfície externa do componente [m ² K/W]
R _{se}	Resistência superficial externa [m ² K / W]
R _{si}	Resistência superficial interna [m ² K / W]
R _T	Resistência térmica de superfície a superfície do componente [m ² K/W]
R _T	Resistência térmica total [m ² K/W]
R _t	Resistência térmica de superfície a superfície
s	Segundo
T _{black}	Temperatura de uma superfície negra padronizada, com 5% de refletância e 90% de absortância, com SRI=0 [K]
T _{surface}	Temperatura da superfície a ser medida [K]
T _{white}	Temperatura de uma superfície branca padronizada, com 80% de refletância e 90% de emissividade, com SRI=1 [K]
T _∞	Temperatura do fluido [°C ou K]
T _∞	Temperatura do ar interno [K]
T _a	Temperatura do ar [°C ou K]
t _a	Temperatura do ar ou temperatura de bulbo seco [°C ou K]
T _{bn}	Temperatura de bulbo úmido à ventilação natural [°C ou K]
T _f	Temperatura de filme [K]
t _g	Temperatura do termômetro de globo [K]
T _g	Temperatura de globo [°C]
TiO ₂	Óxido de titânio
t _o	Temperatura operativa [°C ou K]

T_p	Temperatura superficial interna [K]
t_r	Temperatura do radiante média [°C ou K]
T_s	Temperatura da superfície [K]
T_s	Temperatura de equilíbrio da superfície [°C ou K]
T_{sky}	Temperatura radiante do céu [°C ou K]
T_{sup}	Temperatura da superfície [°C ou K]
T_{viz}	Temperatura de vizinhança [K]
U	Transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor [W/m² K]
V	Volt
v	Velocidade do vento
v_a	Velocidade do ar [m/s]
V_a	Velocidade do ar, calculada a 10 m do chão [km/h]
W	Watt
α	Absortância à radiação solar
α	Difusividade térmica [mm²/s ou m²/s]
β	Coeficiente de expansão volumétrica [1/K]
ε	Emissividade
ε_g	Emissividade presumida do termômetro de globo
λ	Condutividade térmica [W/m K]
μ	Amortecimento térmico
μm	Micrômetro
ν	Viscosidade cinemática [m²/s]
ν_{ext}	Viscosidade cinemática externa [m²/s]
ρ	Refletância à radiação solar
σ	Constante de Stefan Boltzmann [5,67 . 10 ⁻⁸ W/m².K ⁴]
τ	Transmitância
Φ	Atraso térmico [h]
ΔT	Diferença de temperatura [K]
Δx	Comprimento [m]

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C1	Contêiner 1
C2	Contêiner 2
C3	Contêiner 3
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i>
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EPS	Poliestireno Expandido ou Isopor
EP-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
HIS	Habitação de Interesse Social
IBUTG	Índice de Bulbo Úmido e Temperatura de Globo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	Norma Brasileira
NIR	<i>Near Infra-Red</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NR	Norma Regulamentadora
PCC	Departamento de Engenharia da Construção Civil da Escola Politécnica da USP
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PUR	Espuma rígida de poliuretano
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SRI	<i>Solar Reflectance Index</i>
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TG	Temperatura de Globo
U	Transmitância Térmica
UV	Ultravioleta
WCI	<i>Wind Chill Index</i>
WGT	<i>Wet and Temperature of Globe</i>
XPS	Poliestireno extrudado

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1 - COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE INSTALAÇÕES PROVISÓRIAS PARA CANTEIROS DE OBRAS UTILIZADOS ATUALMENTE NO BRASIL, MONTADO A PARTIR DE SAURIN E FORMOSO (2006) E OLIVEIRA E LEÃO (1997).	33
TABELA 4-1 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO, DENSIDADE DE MASSA APARENTE E CAPACIDADE CALORÍFICA VOLUMÉTRICA DE ALGUNS MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.	41
TABELA 4-2 – VALORES DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS ISOLANTES.	42
TABELA 4-3 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS.....	43
TABELA 4-4 – CARACTERÍSTICAS DETERMINANTES À TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO, EQUAÇÕES E UNIDADES	45
TABELA 4-5 - VALORES DE EMISSIVIDADE.	51
TABELA 4-6 – PRINCÍPIOS DA TROCA DE CALOR POR RADIAÇÃO.....	52
TABELA 4-7- COMPOSIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR.	71
TABELA 4-8 – TEMPERATURA SUPERFICIAL DE MATERIAIS PARA CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DETERMINADAS PELA ASTM 1980- 98.	72
TABELA 4-9 - VALORES DE REFLETÂNCIA, EMISSIVIDADE E SRI DE MATERIAIS CONVENCIONAIS.	73
TABELA 4-10 – EXEMPLOS DE MATERIAIS FRIOS E SEUS ÍNDICES.	74
TABELA 5-1 - DESCRIÇÃO DOS TERMOPARES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PERMANENTE	82
TABELA 5-2 - VARIÁVEIS MEDIDAS E RESPECTIVAS SONDAS UTILIZADAS.	86
TABELA 5-3- VALORES PARA A CONSTANTE A EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR	89
TABELA 5-4 – VARIÁVEIS E EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO INTERNO (HI) SEGUNDO O MÉTODO ASHRAE (2013)	93
TABELA 5-5 - VARIÁVEIS E EQUAÇÕES QUE COMPÕEM O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO EXTERNO SEGUNDO A ASHRAE (2013)	94
TABELA 5-6- REGIME DE TRABALHO PERMITIDO DE ACORDO COM OS VALORES CALCULADOS DE IBUTG. ADAPTADO DE NR-15 (BRASIL, MTE, 1978)	97
TABELA 5-7 – ÍNDICE WCI E NÍVEIS DE RISCO DE CONGELAMENTO.	98
TABELA 6-1-DATAS EM QUE FORAM REALIZADAS AS MEDIÇÕES COM O CONFORTÍMETRO	108
TABELA 6-2 – HORAS POR DIA (MÉDIA MENSAL) DE SATISFAÇÃO QUANTO À SENSAÇÃO TÉRMICA	114
TABELA 6-3 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DO CONTÊINER 2.....	121
TABELA 6-4 - CARACTERÍSTICAS INICIAIS DO REVESTIMENTO REFLETIVO UTILIZADO, SEGUNDO OS MÉTODOS DE ENSAIO DETERMINADOS PELAS NORMAS ASTM C 1549, ASTM E891-87 (B891), ASTM C 1371 E ASTM E 1980-11.....	129
TABELA 6-5 – PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS MATERIAIS DO CONTÊINER 1 (ASTM E891-87 (B891) E ASTM C1371-04A)	149
TABELA 6-6 - PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS MATERIAIS DO CONTÊINER 2 (ASTM E891-87 (B891) E ASTM C1371-04A)	151

TABELA 6-7 - PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS MATERIAIS DO CONTÊINER 3 (ASTM E891-87 (B891) E ASTM C1371-04A)
.....152

TABELA 6-8 - VARIÁVEIS E RESULTADOS DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA, ATRASO TÉRMICO E AMORTECIMENTO TÉRMICO.....157

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
1 INTRODUÇÃO	24
2 BREVE HISTÓRICO SOBRE O SURGIMENTO DOS CONTÊINERES METÁLICOS E SUA UTILIZAÇÃO 26	
2.1 FUNÇÃO “HABITAR” DOS CONTÊINERES METÁLICOS: ESTADO DA ARTE	27
2.1.1 Shipping Container Guest House (Casa de Hóspedes), Jim Poteet, 2010	28
2.1.2 Container City II	28
2.1.3 Keetwonen, de Tempohousing, 2005-2006	29
2.2 CONTÊINERES PARA CANTEIROS DE OBRAS NO MERCADO BRASILEIRO	30
2.2.1 Contêineres em aço sem tratamento térmico	31
2.2.2 Contêineres Metálicos com tratamento térmico	32
2.2.3 Contêineres metálicos e outras tipologias nos canteiros de obras da construção civil: comparação	33
3 OBJETIVOS	37
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
4.1 A TRANSFERÊNCIA DE CALOR	38
4.1.1 Convecção	38
4.1.2 Condução	39
4.1.3 Características dos materiais que influenciam na transferência de calor por condução	40
4.1.3.1 Condutividade térmica (λ)	40
4.1.3.2 Calor específico (c)	41
4.1.3.3 Densidade de massa aparente (ρ) ou massa volumétrica	41
4.1.3.4 Capacidade Calorífica Volumétrica (C_{cv})	41
4.1.3.5 Capacidade Térmica	42
4.1.3.6 Resistência Térmica	42
4.1.3.7 Transmitância Térmica	43
4.1.3.8 Difusividade Térmica (α)	43
4.1.3.9 Efusividade Térmica (b)	43
4.1.4 Características derivadas das propriedades dos materiais que indicam desempenho da envoltória	46
4.1.4.1 Inércia térmica	46
4.1.4.1.1 Atraso térmico (Φ)	46
4.1.4.1.2 Amortecimento térmico (μ)	47
4.2 RADIAÇÃO	48
4.2.1 Características que influenciam a transferência de calor por radiação de acordo com a ABNT NBR 15220-1 (2003)	50
4.2.1.1 Radiação (G)	50
4.2.1.2 Poder emissivo (E)	50
4.2.1.3 Radiosidade (J) ou Intensidade de radiação para cada comprimento de onda	50
4.2.1.4 Emissividade (ϵ):	51
4.2.1.5 Absortância (α)	51
4.2.1.6 Refletância (ρ)	51
4.2.1.7 Transmitância (τ)	51
4.3 O ISOLAMENTO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO	52

4.3.1	Isolamento térmico à Condução	57
4.3.2	Isolamento térmico à Radiação	61
4.3.2.1	As barreiras térmicas radiantes– isolantes térmicos de baixa emissividade	64
4.3.2.2	Os revestimentos refletivos ou ‘frios’ – barreiras de alta emissividade	69
5	MATERIAIS E MÉTODOS	75
5.1	O EXPERIMENTO	75
5.1.1	Definição dos modelos a serem medidos.....	75
5.1.2	Caracterização dos módulos metálicos	76
5.1.3	Localização do experimento e condições climáticas	77
5.1.4	Posicionamento dos módulos metálicos	79
5.1.5	Medições	82
5.1.5.1	O sistema de medição permanente: determinação do comportamento térmico.....	82
5.1.5.2	Medições auxiliares: variáveis para a determinação de parâmetros de Conforto Térmico, IBUTG e WCI	85
5.2	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO.....	89
5.2.1	Avaliação do desempenho térmico	90
5.2.2	Avaliação do conforto térmico	95
5.2.3	Avaliação do estresse térmico (IBUTG)	97
5.2.4	Avaliação do resfriamento devido ao vento (WCI - Wind Chill Indice).....	97
5.2.5	Graus-hora.....	98
6	RESULTADOS	100
6.1	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONTÊINER 1 (MODELO REFERÊNCIA) NOS DIAS MAIS QUENTE E MAIS FRIO MEDIDOS	101
6.1.1	Avaliações Térmicas do Contêiner 1	108
6.1.1.1	Avaliação de estresse térmico (Índice IBUTG)	108
6.1.1.2	Avaliação de Wind Chill Indice (WCI).....	110
6.1.1.3	Conforto Térmico – Modelo Adaptativo	112
6.1.1.4	Desempenho da envoltória segundo as Temperaturas de Bulbo Seco	115
6.1.1.5	Graus-hora.....	117
6.1.2	DISCUSSÕES.....	118
6.2	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONTÊINER 2 (C2) NOS DIAS MAIS QUENTE E MAIS FRIO MEDIDOS	119
6.2.1	Graus-hora.....	126
6.2.2	DISCUSSÕES.....	127
6.3	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONTÊINER 3 (C3) NOS DIAS MAIS QUENTE E MAIS FRIO MEDIDOS	128
6.3.1	Breve contextualização sobre a escolha do revestimento refletivo e suas propriedades	128
6.3.1.1	Caracterização do material frio utilizado.....	129
6.3.1.2	Comportamento térmico do Contêiner 3	132
6.3.2	Graus-hora.....	137
6.3.3	DISCUSSÕES.....	139
6.4	PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS CONTÊINERES METÁLICOS	139
6.4.1	Cobertura – superfície externa.....	140
6.4.2	Cobertura – superfície interna	141
6.4.3	Piso – superfície interna	142
6.4.4	Face Norte – superfície externa	143
6.4.5	Face Norte – superfície interna	144
6.4.6	Face Sul – superfície externa.....	145
6.4.7	Face Sul – superfície interna.....	146

6.4.8	Temperatura de Globo	147
6.4.9	Processos de transferência de calor – análises e representação esquemática	149
6.4.9.1	Contêiner 1.....	149
6.4.9.2	Contêiner 2.....	150
6.4.9.3	Contêiner 3.....	152
6.4.10	Análise comparativa quanto ao parâmetro dos Graus-hora	153
6.4.11	Transmitâncias, atraso e amortecimento térmicos.....	157
6.4.12	Para além do experimentado	164
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	169

1 INTRODUÇÃO

Os contêineres metálicos vêm sendo cada vez mais utilizados pelo setor da construção civil como instalações destinadas à ocupação humana, devido às suas características de mobilidade, flexibilidade, leveza, modulação, baixo custo, dentre outras. Além dessas, a praticidade e rapidez na montagem das edificações ou dos canteiros de obras, aliada à baixa demanda de mão de obra torna sua utilização interessante no aspecto econômico. Sua longa vida útil, aliada à baixa geração de resíduos e à alta possibilidade de reciclagem do material após o término de seu ciclo de utilização total são características favoráveis no que tange ao aspecto ambiental de sua utilização.

No entanto, nota-se que o aspecto térmico das instalações é insatisfatório. Em visitas realizadas a canteiros de obras no município de São Paulo, foram frequentes os relatos dos trabalhadores no que se refere à precária condição de conforto térmico, sendo que em muitos casos relatou-se a impossibilidade de ocupação humana sem que houvesse condicionamento artificial das instalações. Tais visitas foram realizadas predominantemente no período de verão, o que certamente direcionou os depoimentos obtidos informalmente para as situações de desconforto para o calor no interior dos contêineres.

Apesar da crescente utilização dos contêineres para fins de ocupação humana, há pouquíssimos estudos dedicados à compreensão de seu comportamento termofísico, bem como acerca da condição de conforto existente no interior de tais ‘edificações’ quando destinadas à ocupação humana. Talvez o único estudo existente no meio acadêmico brasileiro, além deste, foi realizado por Buges *et al.* (2014), no qual avalia-se uma habitação popular projetada a partir de contêineres metálicos segundo o método prescritivo estipulado pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), criado em 2010, no âmbito do PROCEL. Tal pesquisa avaliou os padrões de eficiência de uma tipologia habitacional segundo a etiquetagem do PROCEL para as oito Zonas Bioclimáticas Brasileiras, nas quatro orientações geográficas principais, chegando à conclusão que o desempenho da envoltória ficou abaixo dos parâmetros necessários para que a

edificação pudesse atingir etiquetagem acima de “C” segundo os parâmetros estabelecidos.

É possível que o presente estudo seja o primeiro a apresentar dados experimentais coletados durante um ano acerca da resposta térmica dos contêineres às condições climáticas do local onde se inserem, bem como das condições de conforto e estresse térmicos atingidas por tais instalações durante os períodos mais críticos, no verão e no inverno. Além disso, propõe-se e avalia-se experimentalmente um tratamento térmico da envoltória à condução e outro à radiação, como possibilidades de diminuição das trocas térmicas entre o interior do contêiner e seu entorno.

Tais instalações demonstram serem passíveis de ocupação humana e oferecem imensa gama de utilização possível, mas sua aplicabilidade indiscriminada pode acarretar em altos custos de operação, primordialmente se o tratamento da envoltória não se adequar ao clima local e às especificidades do uso. A demanda por energia para condicionamento artificial pode ser alta, num cenário onde esse recurso tem se apresentado escasso e de valor cada vez mais elevado, situação que inutilizaria toda a economia de recursos obtida na especificação de tal tipologia para um canteiro de obras, por exemplo, ou que anularia a escolha dessa tipologia por ser de custo mais baixo e de execução mais veloz que outras.

A presente pesquisa se insere no âmbito do Projeto CANTECHIS - Tecnologias para Canteiro de Obras Sustentável de Habitações de Interesse Social (HIS), aprovado no Edital 06/2010 da FINEP, cujo objetivo é o desenvolvimento de soluções tecnológicas aplicadas a canteiros de obras de empreendimentos habitacionais, especialmente de interesse social, visando à sustentabilidade ambiental e melhoria das condições de trabalho nos canteiros de obras.

2 BREVE HISTÓRICO SOBRE O SURGIMENTO DOS CONTÊINERES METÁLICOS E SUA UTILIZAÇÃO

Segundo Slawik et al. (2010), o jovem caminhoneiro Malcom McLean, nascido nos Estados Unidos em 1913, teve a ideia de criar um sistema que pudesse tornar mais rápido e eficiente o carregamento dos caminhões que faziam o transporte de cargas - após a longa espera a que era submetido durante sua jornada -, pois as cargas normalmente eram embaladas para transporte em pacotes pequenos e demandavam enorme quantidade de mão de obra e tempo para serem colocadas sobre os caminhões. Os contêineres surgiram em 1956, vinte anos após o nascimento da ideia. Diminuíram, de fato, o tempo de espera dos caminhoneiros e a necessidade de mão de obra, tendo se difundido mundialmente no setor de logística e transporte de cargas.

Os contêineres utilizados pelo setor de logística são encontrados no mercado mundial em dimensões padronizadas com 12 m e 6 m de comprimento, 2,4m de largura e alturas que variam entre 2,6m, 2,4m e 2,9m. Normalmente produzidos em aço *corten*, com estrutura em perfis padronizados especiais e paredes que suportam cargas. Pesam em média 2,4 toneladas (com 6 m de comprimento), e suportam uma carga de até 24 toneladas, com capacidade de empilhamento de até oito unidades. Podem ser utilizados em módulos individuais ou sistemas múltiplos, frequentemente na posição horizontal, mas com possibilidade de disposição vertical, embora isso exija um projeto de estrutura diferente do convencional. As cargas verticais são transmitidas para os quatro cantos. Devem ser tomados cuidados especiais com as articulações estruturais se os contêineres precisarem ser posicionados rotacionados um em relação ao outro, devido ao sistema de transmissão de esforços verticais.

Os contêineres utilizados no setor de logística são selados, o que os fazem flutuar na água – muitas vezes abaixo da superfície, o que pode ocasionar acidentes em navegação. Por outro lado, essa característica pode favorecer os tratamentos térmicos para criar barreiras às trocas de calor, para o caso do transporte de cargas perecíveis.

A padronização dos componentes permite a reutilização das peças em caso de montagem, desmontagem e remontagem. Tal característica, aliada à alta taxa de reciclabilidade do aço, torna os contêineres metálicos ambientalmente amigáveis.

A migração do uso dos contêineres do setor de logística para outros usos deu-se principalmente pela facilidade no transporte e mobilidade: sua forma e escala foram projetadas justamente para que pudessem ser transportados por caminhões, de modo que a retirada de um local e a posterior realocação fossem feitas com grande facilidade: característica muito atrativa para seu uso fosse assimilado por outros setores. No setor da construção civil, seja nos canteiros de obra ou nos usos residenciais e comerciais, a praticidade de montagem das instalações e o baixo volume de resíduos gerados é uma característica que pode determinar a opção de tipologia construtiva. Atualmente, os contêineres metálicos são utilizados para três funções primordiais: *transportar*, *estocar* e *habitar*.

2.1 Função “Habitar” dos Contêineres Metálicos: Estado da Arte

Os módulos habitáveis existentes atualmente no mercado brasileiro possuem uma ampla gama de tipos, dimensões, tratamentos térmicos e materiais empregados, não havendo norma ou padrão para sua comercialização. Sua característica comum é a mobilidade, a flexibilidade quanto ao *layout*, rapidez de instalação, bem como a baixa utilização de mão de obra quando da montagem no local onde o mesmo irá permanecer.

Devido à sua escala, que comporta o ser humano em pé, aproximando-se da escala da arquitetura, sua utilização deixou de ser exclusividade do setor de cargas, passando à utilização na construção civil. Embora o uso dos contêineres seja mais frequente em instalações provisórias, o que talvez se deva à sua qualidade estética e à versatilidade quanto ao transporte, montagem e desmontagem, atualmente já se pode observar sua utilização no setor da construção civil em obras de caráter permanente.

Algumas experiências referentes à utilização dos contêineres na função habitar foram realizadas e estão sendo amplamente divulgadas. A seguir apresentam-se três exemplos, em ordem crescente segundo seu grau de complexidade.

2.1.1 Shipping Container Guest House (Casa de Hóspedes), Jim Poteet, 2010

O arquiteto Jim Poteet, radicado no estado do Texas, EUA, partiu de uma unidade de contêiner marítimo de 12 m (40 ft) para projetar a casa de hóspedes para um rancho.

Além dos acabamentos dispostos na parte interna como a madeira nas paredes e piso, o forro branco e liso e o revestimento do banheiro em fórmica vermelha, que conferem característica de ambiente acolhedor ao contêiner, Jim Poteet desenvolveu um sistema de proteção térmica para manter o conforto da edificação, naturalmente ventilada.

O arquiteto implementou algumas soluções passivas para a diminuição do ganho térmico da edificação. Sobre a cobertura, dispôs um teto verde, que aumenta consideravelmente a inércia térmica da envoltória e, conseqüentemente, diminui o ganho de calor do contêiner, ajudando a manter, no período noturno - quando a tendência é a perda de calor - temperaturas mais amenas do que as do ambiente externo. O sombreamento também foi utilizado pelo arquiteto em alguns pontos da envoltória, evitando a elevação da temperatura superficial pela incidência de radiação solar direta. Um grande pano de vidro tem função de ventilação quando sob clima quente, e função de ganho e retenção de calor se fechado, sob clima frio.

Figura 2-1 - Shipping Container Guest House by Jim Poteet, San Antonio, Texas, EUA, 2010. Fonte:

<http://www.archdaily.com/127570/container-guest-house-poteet-architects/>

2.1.2 Container City II

A empresa *Container City* tem atualmente dezesseis unidades de conjuntos como o Container City. Os conjuntos são projetados a partir de contêineres reutilizados,

conferindo caráter de reciclabilidade ao conjunto. A ideia surgiu a partir da demanda por locais de trabalho e moradia próximo às docas de Londres, com custo acessível a jovens empreendedores e artistas.

Figura 2-2 - Container City, Buro Happold & Container City, Londres, Reino Unido, 2002. Fonte:
<http://morethanshipping.com/2nd-life-for-shipping-containers/>

2.1.3 Keetwonen, de Tempohousing, 2005-2006

Keetwonen, ou Moradia Estudantil em Amsterdam é o maior conjunto de contêineres de que se tem notícia, contendo mil unidades.

Composto por doze edificações montadas a partir de contêineres de 12 m (40 ft) sobrepostos, o conjunto comporta espaços coletivos para vivência e bicicletário, além de lavanderia, supermercado e restaurante. As unidades individuais possuem banheiro, cozinha, dormitório e área de estudo. Os apartamentos são isolados termicamente e acusticamente, com um mecanismo de ventilação que dispõe de velocidade de vento variável, e boa iluminação natural, devido à grande abertura envidraçada. O aquecimento é feito por um sistema central.

Figura 2-3 - Keetwonen (Amsterdam Student Housing), Tempohousing, Amsterdam, Holanda, 2005-2006. Fonte: <http://www.tempohousing.com/projects/keetwonen.html>

2.2 Contêineres para Canteiros de Obras no Mercado Brasileiro

Os contêineres metálicos utilizados como instalações provisórias de canteiros de obra se diferem dos contêineres marítimos quanto ao material de composição – aço galvanizado ou outro, enquanto para os marítimos se utiliza o aço *corten*, mais resistente à corrosão – quanto à espessura das paredes e à composição estrutural, sendo os marítimos mais resistentes estruturalmente, pesando próximo de duas vezes mais que um contêiner utilizado nos canteiros de obras da construção civil. No setor da construção civil existe um padrão construtivo, embora haja variações de composição de materiais e dimensões, dentro da gama de produtos disponíveis no mercado brasileiro. O padrão mais utilizado apresenta altura útil de 2,5 m, largura de 2,4 m e comprimento variável, frequentemente baseado na modulação de 3 m. Ou seja: há produtos com 3, 6, 9 e 12 m de comprimento. As paredes em aço possuem espessura frequentemente inferior a 1,0 mm.

Nos canteiros de obras, são majoritariamente utilizados nas funções de apoio administrativo das obras, como nos escritórios, refeitórios, sanitários e depósitos, ou então como alojamentos para os trabalhadores. Tais características de uso são determinantes para a compreensão de que – no caso dos contêineres – a abordagem quanto aos requisitos de conforto térmico e índices de temperatura adequados para o trabalho ou o descanso faz-se necessariamente diferente, conforme o uso a que se destinam, ainda que o projeto básico do contêiner seja o mesmo para os diferentes usos.

Embora os contêineres sejam ambientalmente adequados em muitos aspectos, suas características térmicas são extremamente insatisfatórias, o que acarreta a utilização praticamente constante de climatizadores de ar, a fim de viabilizar a ocupação humana. Este fato contribui para o aumento do consumo de energia comparativamente a outros sistemas construtivos utilizados como instalações provisórias em canteiros de obras. Segundo Santamouris & Kolokotsa (2013), o volume de energia demandada pelo setor da construção civil varia conforme o país, permanecendo entre 35 a 40% da demanda mundial por energia, se consideradas as etapas de construção e o pós-ocupação. Os mesmos autores ainda afirmam que a demanda por condicionamento de ar corresponde a 15% do consumo mundial de energia.

Dentre a imensa variedade de dimensões dos contêineres produzidos no mercado brasileiro destinados às instalações para canteiros de obras, há diferença entre os tipos de superfícies de acabamento e o tipo de tratamento térmico, de acordo com a finalidade a que se destinam. Ao presente trabalho interessam particularmente os contêineres destinados ao trabalho em escritório – haja vista que é o local onde ocorre maior tempo de permanência de trabalhadores – e os contêineres destinados aos alojamentos, nos quais os trabalhadores passam o tempo de repouso. As tipologias mais representativas da variedade de acabamentos e tratamentos térmicos serão apresentadas a seguir, tomando o módulo básico de 6,0 m de comprimento como referência, já que é um produto fornecido por grande parte das empresas do setor.

2.2.1 Contêineres em aço sem tratamento térmico

Os contêineres em aço sem tratamento térmico têm sido utilizados nos canteiros de obras brasileiros tanto nos escritórios quanto nos alojamentos. Seu desempenho térmico é extremamente insatisfatório seja no verão ou no inverno, como consta da

análise feita nesta pesquisa, apresentada adiante. A fim de contornar o desconforto térmico advindo do uso dessas instalações, adota-se a climatização artificial o que, conseqüentemente, incrementa os custos de obra, demandando grande quantidade de energia.

Figura 2-4 – Contêineres Metálicos sem tratamento térmico. Fontes: <http://www.eurobras.com.br/view?id=eb13-0&cat=tradicional> e <http://soldatopo.com.br/site/?produtos=beliches-metalicos-soldatopo>

2.2.2 Contêineres Metálicos com tratamento térmico

O mercado brasileiro oferece módulos tratados termicamente. Dentre as composições mais frequentemente desenvolvidas, é comum a utilização do isopor entre a chapa de aço externa e o forro interno, de material plástico ou de aglomerado de madeira. Tal tipologia de tratamento térmico aparece em alguns casos somente nas coberturas, ou ainda em coberturas e paredes. Adotam-se também – para cobertura e paredes - os painéis sanduíche, compostos por duas chapas de aço, normalmente pintadas de branco – dispostas como revestimento interno e externo – com a camada intermediária em poliuretano, com espessura de 50 mm.

Figura 2-5 – Contêineres Metálicos com tratamento térmico. Fonte <http://www.nhjdobrasil.com.br/pt-br/produtos/modulo-habitavel/> e <http://www.eurobras.com.br/view?id=ebta-10-0&cat=origin>

2.2.3 Contêineres metálicos e outras tipologias nos canteiros de obras da construção civil: comparação

É possível encontrar atualmente no mercado brasileiro diversos sistemas utilizados para as instalações provisórias para canteiros de obras. A Tabela 2-1 apresenta as principais características dos sistemas mais utilizados:

Tabela 2-1 - Comparação entre diferentes sistemas de instalações provisórias para canteiros de obras utilizados atualmente no Brasil, montado a partir de Saurin e Formoso (2006) e Oliveira e Leão (1997).

Item	sistema tradicional de chapas de madeira compensada	pré-moldado de madeira	contêineres metálicos	construções metálicas desmontáveis	fibra plástica
Necessidade de mão de obra para montagem	alta	média	baixa	média	baixa
Tempo de montagem/desmontagem	alto	médio	baixo	baixo	baixo
Grau de industrialização	baixo	médio	alto	alto	alto
Potencial de reutilização	baixo/nenhum	alto	alto	alto	alto
Versatilidade	alta	alta	alta	alta	baixa
Grau de complexidade da montagem	baixo	médio	baixo	baixo	baixa
Custo aluguel	baixo	-	alto	-	alto
Custo compra	baixo	baixo	alto	alto	alto
Necessidade de execução de fundação	alta	média	baixa	baixa	baixa
Complexidade de transporte	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa
Condição de conforto térmico	média	média	baixa	baixa	-
Potencial de geração de resíduos	alto	alto	baixo	baixo	alta
Vida útil em anos	3	3	12 a 18	12 a 18	-

A tabela organiza-se de modo a qualificar como positiva, mediana, ou negativa cada uma das características apresentadas pelas principais tipologias utilizadas como instalações provisórias nos canteiros de obra. As células em vermelho apontam características negativas; as células amarelas, as características neutras; e as células verdes, as características positivas para cada quesito analisado.

Pode-se constatar, com base nas características avaliadas, que o sistema tradicional de chapas de madeira compensada é o que apresenta maior quantidade de pontos negativos, enquanto o sistema de contêineres metálicos apresenta a maior quantidade de itens positivos, evidenciando deficiências no que se refere aos custos iniciais de aquisição e aos níveis de conforto ambiental apresentados.

Saurin e Formoso (2006) realizaram um estudo comparativo que permitiu a avaliação dos custos ao longo do tempo para três tipologias de instalações provisórias: os contêineres metálicos, os compensados de madeira, e um sistema mesclado entre

contêineres utilizados no início e fim da obra, intercalados com o uso das instalações do próprio edifício em construção.

Como podem ser observados no gráfico da Figura 1-6, os custos iniciais são maiores para a utilização de contêineres metálicos, devido ao investimento feito para a aquisição, mas com o passar do tempo e a possibilidade de reutilização maior do que o sistema de compensados de madeira, os custos tendem a apresentar menor crescimento se comparados aos demais sistemas.

Figura 2-6 - Comparação de custos entre as diferentes modalidades de instalações provisórias ao longo de sua utilização em sucessivas obras, segundo Saurin e Formoso (2006)

Onde:

- Opção A: contêineres metálicos adquiridos definitivamente;
- Opção B: sistema racionalizado em chapas de compensado de madeira;
- Opção C: contêineres alugados durante três meses e utilização das instalações do edifício em construção nos demais.

Segundo pesquisa de preços de contêineres realizada com fornecedores do mercado brasileiro no mês de junho de 2012, o valor da aquisição dos contêineres metálicos para instalação provisória em canteiros de obras equivale em média a 24 vezes seu custo mensal com aluguel. Os custos de manutenção, segundo um dos fabricantes consultados, se aproximam de 30% do valor de aquisição, mas serão empregados somente após 10 anos de utilização do contêiner. Contudo, hoje é possível amenizar os custos do investimento inicial de aquisição de contêineres optando pela locação dos sistemas modulares, modalidade disponível em muitas das empresas fornecedoras.

Como ressaltam Saurin e Formoso (2006):

Seja qual for o sistema utilizado, devem ser considerados os seguintes critérios: custos de aquisição, custos de implantação, custos de manutenção, reaproveitamento, durabilidade, facilidade de montagem e desmontagem, isolamento térmico e impacto visual. A importância de cada critério é variável conforme as necessidades da obra.

A durabilidade dos contêineres, segundo alguns fabricantes, é estimada em dez anos sob as condições agressivas habitualmente existentes em canteiros de obras sem significativa manutenção, sendo consideravelmente ampliada se reformados após esse período.

Considera-se pertinente, a partir do que foi exposto, estudar o comportamento térmico dos contêineres metálicos utilizados como instalações provisórias para canteiros de obras, a fim de que o sistema possa oferecer boas condições de conforto à ocupação humana, diminuindo, no entanto, o consumo de energia. Acredita-se que dessa forma, o sistema poderá contribuir efetivamente para que haja canteiros de obras mais adequados ambientalmente no Brasil.

A Norma Regulamentadora NR-18 (BRASIL, MTE, 1978) define parâmetros a serem adotados nas instalações provisórias dos canteiros de obras, principalmente relacionados à segurança do trabalhador e aos padrões mínimos de conforto, primordialmente relacionados ao dimensionamento dos ambientes e às questões de salubridade. Contudo, não define padrões de conforto ambiental para as instalações, embora este item tenha impactos diretos sobre o bem estar dos trabalhadores do canteiro de obras e a adequabilidade das condições para realização do trabalho.

A Norma Regulamentadora nº 15 (BRASIL, MTE, 1978) aborda os limites à insalubridade no ambiente de trabalho, determinando condições térmicas de permanência e duração das atividades sob condições de estresse térmico, que serão abordadas mais detalhadamente na metodologia para avaliação de ambientes térmicos e nos resultados da presente pesquisa.

Já a NBR-12284:1991 - Áreas de vivência em canteiros de obras - Procedimento (ABNT, 1991) especifica temperaturas internas máximas para os alojamentos e outros ambientes – 23 °C mais ou menos 3 °C - , e define índices mínimos de luminosidade - 150 a 250 lux, de acordo com a atividade a ser desenvolvida - para alguns ambientes

dentro das instalações provisórias, bem como da necessidade de ventilação dos ambientes, ainda que sem especificá-los.

Caberia aqui ressaltar que o parâmetro de temperatura de conforto especificado pela NBR-12284:1991 é reducionista no conceito e vago nos limites. Para avaliar e especificar parâmetros de conforto é necessário levar em conta uma série de fatores, alguns objetivos e outros, nem tanto, que servirão como base para determinar o quão confortável ou desconfortável está - ou será - o ambiente. Tais complexidades serão levadas em conta nos próximos capítulos do presente trabalho.

3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral compreender o comportamento térmico de contêineres metálicos destinados ao trabalho e a dormitórios em canteiros de obras.

Como objetivos específicos, pode-se elencar:

- Realizar análise do comportamento termofísico de um contêiner metálico sem tratamento térmico;
- Verificar o desempenho térmico da envoltória dos contêineres metálicos a serem utilizados como instalações provisórias em canteiros de obras por meio das temperaturas do ar;
- Avaliar o contêiner segundo o índice de conforto térmico adaptativo;
- Avaliar o contêiner segundo os índices estresse térmico;
- Avaliar o comportamento termofísico de um contêiner dotado de isolamento térmico para minimizar as trocas de calor à condução;
- Avaliar o comportamento termofísico de um contêiner dotado de pintura refletiva que minimize o ganho térmico à radiação.
- Verificar a adequação dos contêineres aos parâmetros de transmitância térmica, estabelecidos pela ABNT-NBR 15575.
- Verificar os parâmetros de desempenho térmico relacionados à cobertura dos contêineres: atraso térmico, amortecimento térmico e fator solar.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A Transferência de Calor

Para o desenvolvimento de soluções tecnológicas para a melhoria do desempenho térmico e condições de conforto, primando pela economia de energia é necessário que se compreendam as formas como se dá a transferência de calor, a fim de que se possam aproveitar as propriedades térmicas de materiais de forma que a edificação responda aos fenômenos térmicos a que é submetida, neutralizando ao máximo as características indesejáveis e potencializando as características adequadas à realidade climática, à estação do ano ou à localização. O presente capítulo aborda os modos como ocorrem a transferência de calor, além de apresentar as equações e conceitos associados aos respectivos fenômenos.

Transferência de calor (ou calor) é a energia em movimento devido a uma diferença de temperaturas.

As diferentes formas pelas quais pode ocorrer a transferência de calor são chamadas de modos, classificadas em três categorias: convecção, condução e radiação.

4.1.1 Convecção

É a transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um meio fluido em movimento, quando há diferença de temperatura. A convecção é descrita como “a transferência de energia do interior de um fluido devido aos efeitos combinados da condução e do escoamento global ou macroscópico do fluido. A energia transferida é sensível ou térmica interna do fluido. Pode haver troca de calor latente, normalmente quando existe mudança de fase entre os estados líquido e vapor do fluido.” (INCROPERA & DeWITT, 1999)

A equação para a determinação da convecção é denominada Lei de Resfriamento de Newton:

$$q'' = h (T_{\text{sup}} - T_{\infty})$$

Onde:

q'' – fluxo de calor por convecção (W/m²)

T_{sup} – temperatura da superfície (°C ou K)

T_{∞} – temperatura do fluido (°C ou K)

h – coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m². K)

4.1.2 Condução

É a transferência de calor que se dá quando há diferença de temperatura em um meio estacionário, seja sólido ou fluido, através do meio.

Tal transferência de calor ocorre nos níveis atômicos e moleculares, sendo compreendida por Incropera e DeWitt (2009) como a transferência de energia de partículas mais energéticas para as partículas de menor energia, devido às interações existentes entre elas. As maiores temperaturas estão associadas às moléculas de maior energia.

A *Lei de Fourier*, desenvolvida a partir da observação de fenômenos, é dada pela expressão:

$$q_x = k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Onde:

q_x - taxa de transferência de calor (W)

k – constante de condutividade térmica (W/m . K)

A – área da seção (m²)

ΔT - diferença de temperatura (K)

Δx – distância (m)

Para a obtenção da densidade de fluxo de calor ou fluxo térmico:

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Onde:

q''_x – densidade de fluxo térmico (W/m²)

4.1.3 Características dos materiais que influenciam na transferência de calor por condução

Apesar da equação da condução levar em conta somente a espessura do material, a diferença de temperatura e o coeficiente de condutividade térmica, as características apresentadas a seguir, intrínsecas aos materiais, determinam seu comportamento quanto ao fenômeno da condução.

4.1.3.1 Condutividade térmica (λ)

Classificada como uma propriedade de transporte indica a taxa na qual a energia é transferida pelo processo de condução. Varia em função da estrutura física, atômica e molecular da matéria, ou seja, relaciona-se ao estado da matéria. A condutividade térmica dos sólidos normalmente é maior que a dos líquidos, que normalmente é maior que a dos gases. Quanto maior a condutividade térmica, maior é a velocidade com que o fluxo de calor se difunde pelo material.

A condutividade térmica é alta em metais (20 – 700 W/m K) devido a que os elétrons podem se movimentar livremente. Os materiais sólidos não metálicos não permitem o movimento de elétrons, simplesmente a vibração molecular, isto faz com que sua condutividade térmica esteja entre 0,5 e 30 W/m K. Isolantes térmicos, como o poliestireno expandido (isopor), são compostos de materiais de baixa condutividade térmica (~ 0,04 W/m K), devido à quantidade de ar incorporado na estrutura interna. (“ECV4297 – Transferência de Calor e Umidade em Edificações I”, [s.d.])

4.1.3.2 Calor específico (c)

É a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C a temperatura de uma massa de 1g de determinada substância. É o quociente da capacidade térmica pela massa.

4.1.3.3 Densidade de massa aparente (ρ) ou massa volumétrica

É a razão entre a massa e o volume aparente de um corpo.

4.1.3.4 Capacidade Calorífica Volumétrica (Ccv)

Característica que indica a capacidade de um corpo de armazenar energia térmica. É a relação entre a quantidade de calor fornecida a um corpo e a variação térmica observada. Varia em função do calor específico e da densidade do material. Está relacionada ao corpo, e não à substância que o compõe. Relaciona-se à quantidade de material existente em um corpo, sendo que dois corpos feitos da mesma substância podem ter capacidade calorífica volumétrica diversa, dependendo da diferença entre suas porosidades. A energia necessária para aquecer um material poroso é menor que para um material denso. Quanto mais baixa a capacidade calorífica volumétrica, mais lentamente o corpo é aquecido, e mais lento é o resfriamento.

A Tabela 4-1 apresenta alguns valores das propriedades descritas até aqui para materiais comumente utilizados na construção civil.

Tabela 4-1 – Condutividade Térmica, Calor Específico, Densidade de Massa Aparente e Capacidade Calorífica Volumétrica de alguns materiais utilizados na construção civil. Fontes: NBR 15220-1(2003) e http://www.protolab.com.br/Condutividade_Termica.htm e <http://www.thermocal.es/es/normativa/informacion-medioambiental>

Grupo	Material	Condutividade Térmica [W/mK]	Calor Específico [J/(kg.K)]	Densidade de Massa Aparente [kg/m³]	Capacidade Calorífica Volumétrica [J/m³.K]
Metal	Aço, ferro	52-55	0,46	7800	3588
Alvenaria	Tijolo	0,6 - 0,7	0,92	1000-1300	920-1196
Concreto	Concreto celular	0,17 – 0,5	1,0	400-500	400-500
Inorgânico	Vidro	0,8-0,84	1,0	2500	2500
	Lã de vidro	0,04-0,045	0,70	10-100	7-70
	Lã de rocha	0,04-0,045	0,75	20-200	15-150
Emplastros	Cimento	0,9	1,55		

	Fibrocimento	0,95	0,84	1900	1596
Orgânicos	Cortiça	0,04 – 0,0045	2,03	320	
	Linóleo/borracha	0,03	2,01	900-1700	
Madeira	Compensado	0,17	2,30	450-550	1035-1265
	Cartão duro	0,2-0,3	2,30	850-1000	1955-2300
Sintéticos	Espuma de poliestireno	0,035	1,62	15-35	24,3-56,7
	Poliestireno expandido	0,038	1,20	16	0,76
	Poliestireno extrudado	0,034	1,450	35	2,03
	Espuma de poliuretano	0,025 – 0,035	1,67	30-40	50,1-66,8
Ar	Ar	0,023			
Solo	Argila arenosa	0,84-0,90	0,52	1700	884
	Solo seco	0,3	2,09	1500	3155

4.1.3.5 Capacidade Térmica

É a quantidade de calor requerida para elevar em uma unidade a temperatura de um sistema.

4.1.3.6 Resistência Térmica

É a dificuldade que um material oferece à transmissão de calor por condução. Alguns valores de resistência térmica são apresentados na Tabela 4-2, para espessura de 3 cm dos materiais.

Tabela 4-2 – Valores de resistência térmica de alguns materiais isolantes. Fonte:
<http://www.areas.pt/download/diversos/Resistencia%20termica%20de%20materiais%20isolantes.pdf>

Material	Poliestireno extrudado (XPS)	Poliestireno expandido (EPS100)	Lã de rocha	Aglomerado de cortiça	Argamassa de reboco para isolamento térmico
Resistência Térmica [m².K/W]	0,86	0,83	0,79	0,75	0,33

4.1.3.7 Transmitância Térmica

É a taxa de fluxo de calor que passa através de um elemento construtivo, do ponto mais quente em direção ao ponto mais frio. É entendida como sendo de regime estacionário, ou seja, constante, embora tal princípio não corresponda à realidade, principalmente diante de oscilações constantes das temperaturas externas e internas.

4.1.3.8 Difusividade Térmica (α)

Característica que indica a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la, expressando quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura em seu entorno. Materiais que possuem baixa difusividade térmica atrasam a variação de temperatura do exterior de uma edificação para seu interior. Na Tabela 4-3 apresentam-se alguns valores de difusividade térmica.

Tabela 4-3 – Difusividade Térmica de alguns materiais. Fonte: www.chemie.de/lexikon

Material	Alumínio	Aço	Cobre	Sílica Fundida	Gesso	Polietileno	Mármore
Difusividade Térmica [mm ² /s]	98,8	22,8	117	0,87	0,47	0,15	1,35

4.1.3.9 Efusividade Térmica (b)

Propriedade que indica a quantidade de energia térmica que um material é capaz de absorver. Materiais que parecem frios ao toque da pele, como os metais e o granito possuem alta efusividade térmica. Segundo Dornelles (2004) “um elemento interno que tenha ‘b’ grande indica que, em caso de elevação da temperatura do ar interno, ele ‘roubará’ muita energia desse ar; como consequência, a temperatura do ambiente interno não aumentará tanto”. Assim que a temperatura do ar diminui, o material com alta efusividade térmica é capaz de emitir a energia acumulada anteriormente, contribuindo assim para que a amplitude de temperatura não seja tão grande. Alguns valores de difusividade e efusividade apresentam-se na Figura 4-1, segundo os grupos de materiais.

Figura 4-1 – Correlação entre difusividade térmica (a) e efusividade térmica (b) em escala logarítmica. Fonte: Dornelles (2004)

Observa-se que no caso dos contêineres metálicos – devido à composição em material metálico - a envoltória possui valores altos tanto para difusividade quanto para efusividade térmicas, o que sugere que as temperaturas superficiais desses materiais oscilem rapidamente em função de alterações nas condições ambientais, como a intensidade da radiação ou a temperatura do ar, sendo considerados, portanto, de baixo desempenho térmico.

A Figura 4-2 apresenta os valores de difusividade e efusividade térmicas para os materiais mais comumente utilizados na construção civil.

Figura 4-2 - Correlação entre difusividade térmica (a) e efusividade térmica (b) em escala logarítmica para os materiais mais comuns na construção civil. Fonte: Dornelles (2004)

A partir das informações apresentadas na Figura 4-1 e na Figura 4-2 pode-se estimar que os materiais mais indicados para um melhor desempenho térmico da envoltória em climas quentes devem possuir baixa difusividade térmica e, simultaneamente, alta efusividade térmica. Dessa forma, absorveriam grande quantidade de calor de forma lenta, liberando-o quando a temperatura do ar entrasse em tendência de queda no interior da edificação.

Na Tabela 4-4 apresentam-se as características descritas nos itens anteriores, bem como seus símbolos, equações originárias e unidades.

Tabela 4-4 – Características determinantes à transferência de calor por condução, equações e unidades

Característica	Símbolo	Equação	Unidade
Calor específico	C_p	$C_p = \frac{Q}{m\Delta T}$	$\frac{J}{kg\ K}$
Densidade	d ou ρ	$d = \frac{m}{V}$	$\frac{kg}{m^3}$
Condutividade térmica	λ	$\lambda = \frac{1}{3} C_p \bar{c} \lambda_{lpm}$	$\frac{W}{mK}$
Capacidade calorífica volumétrica	C_{cv}	$C_{cv} = \rho C_p$	$\frac{kJ}{m^3\ K}$
Capacidade Térmica	C		J/K
Capacidade térmica de componentes	C_T	$C = \frac{\rho C_p}{e}$	$\frac{KJ}{m^2\ ^\circ C}$
Difusividade térmica	α	$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$	$\frac{m^2}{s}$ ou $\frac{mm^2}{s}$
Efusividade térmica	b	$b = \sqrt{\lambda \rho C_p}$	$\frac{J}{m^2\ K\ s^{1/2}}$
Resistência térmica à condução	R_{cond}	$R_{cond} \equiv \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{k A}$	$\frac{K}{W}$
Resistência térmica	R	$R = \frac{e}{\lambda}$	$\frac{m^2\ K}{W}$
Transmitância térmica	U	$U = \frac{1}{R}$	$\frac{W}{m^2\ K}$

4.1.4 Características derivadas das propriedades dos materiais que indicam desempenho da envoltória

4.1.4.1 Inércia térmica

Para Mitjá (1986) apud Silva (2006), a inércia térmica pode ser analisada quando é decomposta em dois fenômenos:

4.1.4.1.1 Atraso térmico (Φ)

Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor (ABNT, 2005).

Para componentes homogêneos, pode ser determinado segundo as equações:

$$\varphi = 1,382 e \sqrt{\frac{(\rho c)}{3,6\lambda}}$$

Onde:

φ – atraso térmico (h)

e – espessura da parede (m)

ρ – densidade aparente (kg/m³)

c – calor específico (J/kg K)

λ – condutividade térmica (W/mK)

$$\varphi = 0,7284 \sqrt{R_T C_T}$$

Onde:

φ – atraso térmico (h)

R_T – resistência térmica de superfície a superfície do componente (m²K/W)

C_T – capacidade térmica do componente (kJ/m².K).

Já para componentes heterogêneos, a equação é a seguinte:

$$\varphi = 1,382 R_T \sqrt{\left(0,226 \frac{(C_T - C_{T_{ext}})}{R_T}\right) + \left(0,205 \frac{(\lambda \rho c)_{ext}}{R_T}\right) \left(R_{ext} - \frac{R_T - R_{ext}}{10}\right)}$$

Onde:

φ – atraso térmico (h)

R_T – resistência térmica de superfície a superfície do componente (m^2K/W)

R_{ext} – resistência térmica da superfície externa do componente (m^2K/W)

C_T – capacidade térmica do componente ($kJ/m^2.K$).

$C_{T_{ext}}$ - capacidade térmica da camada externa do componente ($kJ/(m^2.K)$)

4.1.4.1.2 Amortecimento térmico (μ)

A propriedade de um componente de impedir o fluxo de calor de atravessar completamente a envoltória de uma edificação, diminuído a amplitude térmica no interior se comparada à amplitude térmica exterior é chamada de amortecimento térmico. Uma parcela da energia que chega à edificação será consumida, portanto, para aquecer o próprio material da envoltória. O coeficiente de amortecimento de uma edificação será determinado pela seguinte equação:

$$\mu = \frac{A_{int}}{A_{ext}}$$

Onde:

A_{int} – amplitude térmica interna ($^{\circ}C$ ou K)

A_{ext} – amplitude térmica externa ($^{\circ}C$ ou K)

Dornelles (2004) sugere que se utilize a grandeza denominada *fator de amortecimento* quando se pretende avaliar o amortecimento térmico, já que dessa forma quanto maior for a amplitude interna, menor será o fator de amortecimento da envoltória. Para adequação, propõe que seja utilizada a seguinte equação:

$$\mu' = 1 - \mu$$

Onde:

μ' – fator de amortecimento

A Figura 4-3 apresenta o fator de amortecimento para alguns materiais utilizados na construção civil, apresentado por Roriz (RORIZ, 1996 apud DORNELLES, 2004).

Figura 4-3 – Fator de amortecimento em função da espessura do material. Fonte: Dornelles (2004) apud Dornelles; Roriz (2003).

Conforme se observa nos gráficos da Figura 4-3, o fator de amortecimento está diretamente relacionado à espessura dos materiais, sendo que na maior parte dos exemplos apresentados, para um amortecimento significativo seria necessário adotar envoltórias com espessuras muito superiores às que usualmente são especificadas na construção civil brasileira. No caso dos contêineres – cuja espessura da envoltória é um fator limitante – o fator de amortecimento térmico não pode ser tomado como recurso principal a ser utilizado quando se especifica uma envoltória que deva atuar na redução das trocas de calor.

Para Dornelles (2004), a inércia térmica – aqui decomposta em atraso e amortecimento térmicos – depende da difusividade e da efusividade térmicas do material da envoltória. Papst (1999) salienta que quanto maiores as variações de temperatura externa, radiação solar e ganho de calor pela envoltória, maior a necessidade de altos valores de inércia térmica.

4.2 Radiação

É a transferência de calor que acontece na ausência de meio, devido à emissão de energia em forma de ondas eletromagnéticas de um corpo com temperatura finita, ocorrendo entre duas superfícies com diferentes temperaturas. Para Incropera & Dewitt (2009), a radiação “é a energia *emitida* por toda matéria que se encontra a uma temperatura absoluta não nula”, compreendendo além da matéria no estado sólido,

também a líquida e gasosa. Para Fairey (1994), basta que existam dois corpos a temperaturas diferentes que “enxerguem” um ao outro, para que ocorra a transferência de calor por radiação, sem que para tanto seja necessário um meio, como acontece na convecção. Segundo o mesmo autor, a energia radiante “caminha” em linha reta através do espaço e é o principal meio de transporte de energia no universo.

A transmissão de calor por radiação ocorre em uma faixa de 0,1 μm a 100 μm de comprimento de onda, compreendendo, portanto, uma parcela da radiação ultravioleta e toda a parcela visível e infravermelha, como mostra a Figura 4-4:

Figura 4-4- Espectro de radiação para transferência de calor. Fonte: Ordenes et al. (2008).

A radiação é propagada em todas as direções possíveis, sendo, portanto, um fenômeno vetorial, que pode ser compreendido através do conceito de intensidade. A temperatura da superfície emissora caracteriza o comprimento de onda e, conseqüentemente, o tipo de radiação. A radiação infravermelha compõe a parcela invisível da radiação, e comporta faixas de infravermelho próximo e infravermelho distante, a última denominada também por onda longa ou radiação térmica. Segundo Incropera & Dewitt (2009), a transferência de calor por radiação ocorre com maior facilidade no vácuo.

A equação que rege a transferência de energia por ondas eletromagnéticas – ou seja, à radiação – é a que segue:

$$q_x'' = \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{VIZ}^4)$$

Onde:

q_x'' - fluxo térmico (W/m^2)

ε - Emissividade

σ – constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T_S – temperatura da superfície (K)

T_{VIZ} – temperatura de vizinhança (K)

4.2.1 Características que influenciam a transferência de calor por radiação de acordo com a ABNT NBR 15220-1 (2003)

4.2.1.1 Radiação (G)

É a radiação incidente em uma superfície, proveniente de todas as direções. A radiação absorvida por uma superfície varia de acordo com a propriedade radiante da superfície conhecida como absorptância.

4.2.1.2 Poder emissivo (E)

É a quantidade de radiação emitida em todas as direções, por unidade de área de superfície, em função da temperatura da superfície. O limite superior para o poder emissivo é dado pela Lei de Stefan-Boltzmann, conforme consta da Tabela 4-6.

4.2.1.3 Radiosidade (J) ou Intensidade de radiação para cada comprimento de onda

É o total de energia radiante que deixa a superfície, ou seja, a soma da energia emitida mais a radiação refletida, em função da refletância do material. É a taxa de energia radiante emitida em uma determinada direção por unidade de área de superfície emissora normal a essa direção. “A intensidade de radiação tem relação então com a radiação emitida e a radiação refletida por uma determinada superfície. A soma das duas é conhecida como radiosidade.” (ORDENES et al., 2008)

Figura 4-5 - Emissão (Radiação), Radiação e Radiosidade. Fonte: Ordenes et al. (2008).

4.2.1.4 Emissividade (ϵ):

É a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura. (ORDENES et al.,2008).

Tabela 4-5 - Valores de emissividade. Fonte: ORDENES et al. (2008)

Material	Alumínio polido	Aço limpo	Concreto	Tijolo (vermelho)	Placa de gesso	Madeira
Emissividade (ϵ)	0,04	0,22	0,88-0,93	0,90-0,92	0,90-0,92	0,82-0,92

4.2.1.5 Absortância (α)

É o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Os valores variam entre 0 e 1, para 0% e 100% de absortância, respectivamente. Tais valores dependem da natureza da radiação e das propriedades da superfície.

4.2.1.6 Refletância (ρ)

É o quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.

4.2.1.7 Transmitância (τ)

É o quociente da taxa de radiação solar que atravessa um elemento pela taxa de radiação solar incidente sobre este mesmo elemento.

Tabela 4-6 – Princípios da troca de calor por radiação

Característica	Símbolo	Equação ou valor	Unidade
Poder Emissivo	E	$E = \sigma T_{sup}^4$	$\frac{W}{m^2}$
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	$5,67 \times 10^{-8}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
Fluxo térmico emitido por uma superfície real	q''_E	$q''_E = \varepsilon \sigma T_S^4$	$\frac{W}{m^2}$
Troca líquida de calor por radiação	q_{rad}	$q_{rad} = h_r A (T_S - T_{VIZ})$	W
Coefficiente de radiação	h_r	$h_r = \varepsilon \sigma (T_S + T_{VIZ})(T_S^2 + T_{VIZ}^2)$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Relação entre absorptância, refletância e transmitância para cada comprimento de onda		$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$	
Lei de Kirchoff – relação entre emissividade e absorptância no mesmo comprimento de onda		$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$	
Radiação absorvida por uma superfície	G_{abs}	$G_{abs} = \alpha G$	$\frac{W}{m^2}$

Onde:

T_{sup} – Temperatura superficial absoluta (K)

4.3 O isolamento térmico de uma edificação

O isolamento térmico, segundo Sadineni et al. (2011), é o material ou a combinação de materiais que, quando apropriadamente aplicados à edificação, tem a capacidade de resistir à passagem do fluxo de calor na edificação, interferindo nos processos de condução, convecção e radiação, por meio da resistência térmica. O uso

apropriado do isolamento térmico pode reduzir não só a demanda por energia, permitindo a especificação de sistemas de condicionamento artificial de menor potência – ou seja, mais econômicos – do que os utilizados em edificações sem tratamento térmico, como também pode proporcionar a utilização da edificação sem condicionamento artificial, dependendo do clima e do sistema construtivo. O isolamento térmico tem a função, portanto, de diminuir a amplitude térmica no interior da edificação de forma a proporcionar temperaturas mais próximas às de conforto térmico, minimizando a utilização de sistemas que demandem energia elétrica para o condicionamento do ambiente. Tal preceito se aplica também à redução das perdas de calor do interior da edificação para o exterior, de forma a conservar o calor existente, quando as temperaturas externas são menores do que as internas, se estas últimas estiverem dentro dos parâmetros de conforto.

A demanda por energia para aquecer ou resfriar uma edificação depende do desempenho térmico de sua envoltória. Esse desempenho varia em função da quantidade de radiação absorvida pela cobertura e pelas paredes, bem como da transmissibilidade do calor absorvido para o interior da edificação. Nos climas ou estações frios, a demanda por energia varia em função da capacidade de conservação de energia térmica no interior da edificação, de forma a minimizar as trocas de calor com o ambiente externo.

A especificação de isolamento térmico para as edificações deve partir de uma observação atenta às condições climáticas locais, bem como do uso e ocupação a que se destina a edificação. Além disso, deve ser feito um estudo cauteloso sobre a composição de sua envoltória, compreendendo assim os fenômenos de transferência de calor a que a edificação se submete, a fim de se avaliar a melhor forma de intervir para atingir as condições de conforto para os usuários.

Al-Homoud (2005) desenvolveu um procedimento de apoio à especificação de isolamentos térmicos na construção civil, cuja estrutura se pode observar na Figura 4-6.

Figura 4-6 – Procedimento de apoio para especificação de isolamento térmico. Adaptado de Al-Houmoud (2004)

De forma sucinta, quanto mais resistente termicamente for o tipo de isolamento térmico a ser especificado, mais chances haverá de aumentarem os custos. Assim, a correta implantação da edificação na fase de projeto, maximizando a insolação adequada e minimizando a insolação indesejada por meio de recursos como proteção das fachadas por materiais construtivos específicos ou acréscimos de anteparos ao corpo da edificação, bem como o correto desenho do sistema de ventilação natural terão

implicações que repercutirão diretamente nos custos do tratamento térmico, nos custos com energia e manutenção e, conseqüentemente, no custo final da edificação.

A compreensão acerca dos fenômenos de transferência de calor a que se submete a edificação é primordial para que se atinja o melhor custo benefício tanto do sistema construtivo, quanto do sistema de isolamento térmico, que pode se beneficiar de recursos de baixo custo e altamente eficientes para o tratamento de fenômenos de transferência de calor.

Segundo Michels et al. (2008), nos países tropicais como o Brasil, grande parte do ganho de calor pelas edificações acontece principalmente pela cobertura, com exceção das edificações cuja área de envoltória vertical supere em muito a área de cobertura. No inverno, no hemisfério Sul, devido à baixa altitude solar, a envoltória é fortemente atingida pela radiação solar, sendo a fachada Norte – juntamente com a cobertura - as responsáveis por grande parte do ganho térmico durante esses períodos.

A radiação solar visível, composta de ondas curtas, atinge as superfícies externas das edificações. Quando não há materiais refletivos na envoltória, a radiação é absorvida. Estas ondas transformam-se em calor, que pode ser retirado em parte pelo fenômeno da convecção externa – advindo do regime de ventos existente no ambiente - e em parte pela emissão de ondas longas (calor) da edificação em direção ao ambiente, em função da emissividade do material da superfície externa. Daí em diante, a transferência de calor para o interior das edificações acontece pela condução através da cobertura e das paredes, que têm a temperatura aumentada e transferem calor para o interior das edificações por radiação e convecção (MICHELS et al., 2008.)

Dessa forma, o posicionamento dos sistemas de isolamento pode interferir diretamente no desempenho térmico da envoltória. Al-Houmoud (2004) sugere que o melhor desempenho é atingido dispondo os materiais isolantes¹ próximos ao ponto ou superfície por onde o calor adentra na edificação. Para regiões frias – segundo o autor -, o isolamento deveria se localizar na parte interna da edificação e, para regiões quentes, na parte externa. Tais especificações variam, no entanto, conforme as características dos materiais isolantes e dependem fundamentalmente da performance do material em

¹ O termo ‘isolante térmico’ está relacionado – habitualmente – na literatura aos materiais resistentes à condução, cuja condutividade térmica é extremamente baixa, embora os materiais ou sistemas que funcionem à radiação também sejam, de fato, isolantes térmicos.

relação ao fenômeno térmico: se atua por meio da resistência térmica, da refletância, da alta ou baixa emissividade, não sendo possível estabelecer um princípio geral de antemão.

Al-Houmoud (2004) desenvolveu um estudo que leva em conta os custos com o isolamento térmico, relacionados aos custos com a energia na edificação para a determinação do ponto ideal para a escolha do tipo de isolamento, como aparece na Figura 4-7. Apesar do método proposto por Al-Houmoud mencionar apenas os sistemas de isolamento à condução, a relação “Custo do Isolamento x Custo com Energia” pode ser aplicada aos sistemas mistos, compostos por elementos resistentes à condução e à radiação.

Figura 4-7 – Ponto ótimo entre o custo do isolamento térmico e o custo com energia na edificação. Fonte: Al-Houmoud (2004)

Vittorino et al. (2003) salientam que tradicionalmente se habituou a utilizar na construção civil os isolantes resistivos, ou seja, aqueles que funcionam diminuindo as trocas térmicas à condução, em detrimento dos isolantes à radiação, atualmente mais desenvolvidos e utilizados, compreendendo maior gama de possibilidades, como se verá adiante. Em muitos estudos a respeito dos isolantes térmicos claramente se privilegia a abordagem aos isolantes condutivos, talvez pela tradição descrita por Vittorino et al.(2003) ou mesmo pela ausência de estudos que demonstrem a efetividade dos isolantes à radiação na minimização dos fluxos de calor. No presente trabalho serão abordados os princípios de funcionamento do isolamento térmico de edificações considerando principalmente as possibilidades relacionadas à condução e à radiação, já que o máximo potencial de trocas térmicas por convecção é diretamente proporcional à

velocidade do vento e à rugosidade das superfícies, sendo de difícil controle por parte dos projetistas o aumento do desempenho de trocas térmicas nesse último modo, a convecção. No caso dos contêineres metálicos, a combinação de sistemas de isolamento térmico à condução e à radiação aponta para resultados mais efetivos, considerando as limitações intrínsecas a esse tipo de edificação.

4.3.1 Isolamento térmico à Condução

Para que se consiga isolar uma edificação à condutividade térmica, é necessário que se aumente a resistência térmica de sua envoltória, optando-se por dois princípios distintos, a saber:

- Aumento de massa térmica: obtido através da utilização de materiais densos, de baixa condutividade térmica, preferencialmente, mas que ofereçam resistência à passagem do calor pela massa de material de que dispõem. A espessura da envoltória tem papel fundamental nesse modo de isolamento térmico;
- Utilização de materiais leves: os interstícios repletos de espaços com gases confinados oferece a resistência à passagem do calor, pela baixa condutividade térmica dessas substâncias.

O primeiro princípio se utiliza da capacidade térmica dos materiais, armazenando o calor durante o dia, para então dissipá-lo ao ambiente durante a noite, o que se denomina inércia térmica, como mostra a Figura 4-8.

Figura 4-8 – Efeito da massa térmica na temperatura interna da edificação. Fonte: The Concrete Center (2009)

Papst (1999) aponta, contudo, que estudos comprovam que os efeitos da massa térmica sobre o pico de resfriamento ou aquecimento de uma edificação podem ser equivalentes àqueles obtido com os materiais isolantes leves. De qualquer forma, a massa térmica não substitui os materiais isolantes podendo, contudo, ser utilizada de maneira combinada com esses nas edificações convencionais (THE CONCRETE CENTER, 2009). Para o caso em estudo no presente trabalho, a massa térmica não seria um recurso a ser aplicado para diminuir a amplitude térmica no interior dos contêineres, devido às grandes espessuras demandadas e ao peso, o que acarretaria em prejuízo ao já limitado espaço interno dessas instalações e à sua leveza e flexibilidade.

Para Jelle (2011), o principal objetivo dos sistemas de isolamento térmico à condução é a utilização de materiais com a menor condutividade térmica possível, a fim de que se possa – com pequenas espessuras – atingir a maior resistência térmica e a menor transmitância térmica possíveis na envoltória, minimizando os fluxos de calor entre o interior e o exterior da edificação. Tais materiais são denominados isolantes térmicos.

Dentre os materiais tradicionais, Jelle (2011) destaca:

- 1) Lãs minerais: lã de vidro e lã de rocha. São aplicadas principalmente em envoltórias com cavidades, como as paredes pré-fabricadas, principalmente

em forma de lã leve e macia. As lãs mais densas e pesadas são usualmente mais aplicadas em pisos ou coberturas;

- 2) Poliestireno expandido (EPS) ou isopor: tem origem no petróleo e é formado por pequenas esferas de poliestireno contendo um gás expansivo (p. ex. C_6H_{12});
- 3) Poliestireno extrudado (ou extrudido) (XPS): é formado a partir do poliestireno derretido, adicionado a um gás expansivo (p. ex. HFC, CO_2 ou C_6H_{12});
- 4) Celulose: material que pode ser feito de papel reciclado ou de fibra de madeira;
- 5) Cortiça: material de origem vegetal extraído da casca dos sobreiros (*Quercus suber*);
- 6) Poliuretano (PUR): é formado por uma reação entre isocianatos e polióis. Durante o processo de expansão dos poros fechados são preenchidos com um gás expansivo (HFC, CO_2 ou C_6H_{12}). O material é produzido como placas ou de forma contínua numa linha de produção. Também pode ser usado como uma espuma de expansão, geralmente utilizado no local da construção, por exemplo, para selar em torno das janelas e portas e para preencher várias cavidades. Esse material, no entanto em contato com o fogo, produz um gás altamente tóxico.

A condutividade total de um material isolante é dada em função de sua composição, e não somente da condutividade térmica do principal material em estado sólido. Jelle (2011) utiliza a seguinte equação para a composição da condutividade total:

$$\lambda_{tot} = \lambda_{sólido} + \lambda_{gás} + \lambda_{rad} + \lambda_{conv} + \lambda_{outros} + \lambda_{vaz}$$

Onde:

$\lambda_{sólido}$ – condutividade térmica no material no estado sólido

$\lambda_{gás}$ – condutividade térmica do gás existente nos interstícios

λ_{rad} – condutividade térmica à radiação

λ_{conv} – condutividade térmica à convecção

λ_{outros} – condutividade térmica de segunda ordem, devido aos efeitos das demais formas de condutividade

λ_{vaz} – condutividade térmica dos vazamentos (ar e umidade)

Para Domínguez-Muñoz *et al.* (2010), fatores como a condutividade do gás presente nos interstícios, bem como as condutividades térmicas à radiação e convecção dos materiais referem-se à composição da condutividade térmica em escala microscópica. Em escala macroscópica, fatores como densidade, umidade, temperatura e idade do material determinariam a condutividade térmica.

Os materiais resistivos à condução possuem uma infinidade de células de ar microscópicas que suprimem a transferência de calor por convecção, impedindo o movimento do ar contido em seu interior. Para Al-Homoud (2005) é o aprisionamento do ar no sistema de isolamento que proporciona a resistência térmica.

A criação de pequenas células (estrutura de célula fechada) dentro do isolamento térmico através da qual a diferença de temperatura não é grande também reduz efeitos de radiação. Isso faz com que os ‘caminhos’ para a radiação sejam divididos em pequenas distâncias, onde a radiação infravermelha de onda longa é absorvida e / ou espalhada pelo material de isolamento (materiais de baixa emissividade também podem ser usados para minimizar efeitos de radiação). No entanto, a condução geralmente aumenta à medida que diminui o tamanho da célula (aumentando a densidade). (AL-HOUMUD, 2005)

Sendo assim, para Al-Houmoud (2005), a interação entre os três modos de transferência de calor determinará a condutividade aparente do material, evidenciando que praticamente não há um fenômeno que possa ser considerado como condutividade estrita no isolamento térmico de edificações.

Domínguez-Muñoz *et al.* (2010) realizaram estudo sobre métodos de determinação da condutividade térmica dos materiais e apresentam a relação entre condutividade dos principais materiais isolantes e a relação com sua densidade, como se pode observar na Figura 4-9.

Figura 4-9 - Condutividade térmica de materiais isolantes a 10°C em estado seco, amostras amadurecidas (aged). Fonte: Domínguez-Muñoz et al. (2010)

Há que se pensar, contudo, a respeito da espessura a ser especificada para os materiais isolantes. Kaynakli (2012) reforça o conceito de Al-Houmoud (2004) de que a espessura econômica de isolamento térmico deve considerar o custo do sistema de isolamento somado ao custo da economia de energia obtida durante a vida útil estimada para o conjunto. Para o primeiro, a espessura do isolamento térmico é estabelecida em função do tipo de construção, sua função, forma, orientação, sistema construtivo, condições climáticas, materiais isolantes disponíveis e seu custo, tipo de energia disponível e seu custo e tipo e eficiência do sistema de condicionamento artificial que por ventura se pretenda instalar.

4.3.2 Isolamento térmico à Radiação

Para que um sistema de isolamento à radiação seja eficiente, é necessário que se leve em consideração duas características principais dos materiais que o compõe: sua refletância e emissividade.

Fairey (1986) desenvolveu estudo no qual evidencia as características de diversos materiais usualmente empregados na construção civil quanto à sua refletância e emissividade, como se observa na Figura 4-10:

Figura 4-10 - Propriedades radiantes no espectro da radiação solar e do infravermelho de materiais de construção. Fonte Fairey, 1986 apud Vittorino et al., 2003.

Nota-se que, segundo a lei de Kirchoff, para o mesmo comprimento de onda, absorptância e emissividade são iguais, e o comportamento dos materiais deve seguir o princípio de que absorptância, refletância e transmitância somadas sejam igual a 1. Observa-se na Figura 4-10, no entanto, que alguns materiais possuem valores altos para emissividade e, simultaneamente, altos para a refletância, como é o caso da pintura branca. Tal fator se deve à que os valores apresentados no quadro da Figura 4-10 são valores médios, obtidos para todos os comprimentos de ondas do espectro.

A absorção de radiação pela superfície dos materiais depende, segundo Vittorino et al. (2003), da quantidade de elétrons livres.

Nos materiais condutores de eletricidade como os metais, há uma grande quantidade de elétrons livres que fazem com que seja refletida grande parte da energia térmica incidente, resultando em pequena absorção e, portanto, pequena emissão de energia térmica. Nos materiais não condutores, há poucos elétrons livres e a absorção da energia térmica se dá em grande quantidade no reticulado estrutural do material. (VITTORINO et al., 2003)

A emissividade, então, relaciona-se à condutividade térmica, de forma inversamente proporcional. Quanto mais condutivo um material, menor sua emissividade térmica, como também menor será sua absorptância e, ainda, maior sua refletância.

A emissividade dos materiais é devida às suas características superficiais, uma vez que, na maioria dos sólidos, a radiação emitida pelas moléculas do seu interior é absorvida pelas moléculas a ela adjacentes, sendo que apenas a energia emitida pelas moléculas localizadas a até 1 μm da superfície do material é que deixa efetivamente o corpo (INCROPERA, 1998). Fato similar ocorre para a absorção/reflexão da radiação incidente, ou seja, a parcela da energia incidente que é absorvida fica contida nas camadas moleculares mais externas do material. A absorção da radiação térmica na superfície dos materiais é função da quantidade de elétrons livres presentes (MODEST, 1993). (VITTORINO et al., 2003)

Para Al-Homoud (2005) a performance do isolamento térmico à radiação em uma edificação depende dos seguintes fatores:

- Ângulo de incidência sobre a superfície refletiva;

- Diferença de temperatura entre ambos os lados da superfície refletiva. Quanto maior a diferença, maiores os benefícios;
- Emissividade do material;
- Espessura da camada de ar que circunda a superfície refletiva;
- Orientação da camada de ar;
- Direção do fluxo de calor.

Os sistemas de isolamento à radiação podem ser agrupados em duas categorias: os refletivos - cujas características atreladas ao bom desempenho são alta refletância nos espectro da luz visível e infravermelho e alta emissividade, no espectro infravermelho – e as barreiras térmicas – cuja característica fundamental para o bom desempenho é a baixa emissividade no espectro infravermelho.

Como se podem notar, com relação à emissividade as características dos dois grupos de materiais são opostas, sendo, portanto, primordial que se entenda o funcionamento de cada grupo de materiais com relação aos fenômenos de transferência de calor, a fim de que seu potencial possa ser utilizado favoravelmente em função da melhoria dos índices de conforto no interior da edificação.

4.3.2.1 As barreiras térmicas radiantes– isolantes térmicos de baixa emissividade

As barreiras térmicas radiantes são materiais que funcionam de modo a diminuir o ganho de calor nas estações quentes e impedir a perda de calor das edificações nas estações frias. A principal propriedade das barreiras radiantes é sua baixa emissividade (Vittorino et al., 2003), características das superfícies metálicas polidas de que são compostas. Para Michels et al., 2008a, as superfícies metálicas – geralmente de alumínio – das barreiras radiantes refletem as ondas de calor recebidas pela cobertura e, devido à baixa emissividade, impedem que o calor retido seja transmitido à laje ou forro em uma edificação. Para os autores, quanto mais baixa for a emissividade do material, maior será a eficiência da barreira.

Vittorino et al. (2003) afirmam que o uso das barreiras radiantes no Brasil deu-se a partir de 1995, ainda com produtos importados do mercado estrangeiro, já que não havia nem fabricação nacional de tais produtos, nem tampouco normatização técnica sobre o tema. Hoje as normas ABNT NBR 15567 e 15636, de 2008 definem a composição de tais barreiras e seus parâmetros de instalação, bem como sua emissividade, que deve ter valor máximo de 0,15, ou seja, deve refletir no mínimo 85% da radiação incidente e emitir no máximo 15%.

As barreiras radiantes podem ser instaladas na cobertura ou na envoltória vertical nas edificações. Para Camargo (2011), o material das barreiras radiantes deve ser fixado entre duas superfícies que não estejam em contato, como ilustra a Figura 4-11.

Figura 4-11 – Instalação de barreira radiante sob a cobertura e na parede de uma edificação. Fonte: ABNT - 15636 (2008)

É importante que se compreenda a forma como se dá a transferência de calor na cobertura da edificação para que a inserção da barreira térmica seja eficaz. Para Camargo (2011), o fluxo de calor pela cobertura pode ser dividido em três fases, conforme aparece na Figura 4-12:

Figura 4-12 – Fluxo de calor na cobertura de uma edificação. Fonte: CAMARGO (2011)

Fase 1 – As superfícies da cobertura, opacas ou transparentes, receberão calor principalmente por radiação e convecção. A radiação ocorre a partir do sol ou outra fonte de calor para a superfície mais fria que absorve, reflete ou transmite essa energia.

Fase 2 – o calor absorvido pela superfície será transferido através do sistema de cobertura. Em coberturas compostas por várias camadas, por exemplo telhado/ático/forro ou laje/plenum/forro; essa transferência vai ocorrer por condução, convecção e radiação. Condução através dos materiais e pontos de contato, convecção e radiação a partir da superfície mais quente para o ar e para a superfície mais fria, respectivamente.

Fase 3 – O componente aquecido transfere calor para os ambientes mais frios. Ocorre por condução nos pontos de contato, convecção e radiação a partir da superfície mais quente para os ambientes.

Com a barreira térmica radiante, o fluxo de calor é interrompido, sendo “aprisionado” entre a envoltória e a superfície que faz contato com o ambiente interno na edificação, seja na cobertura ou nas paredes, conforme Figura 4-13.

Figura 4-13 – Comparação entre o fluxo de calor advindo da cobertura em uma edificação sem barreira térmica e com barreira térmica. Fonte: <http://www.insulationsolutions.com/products/radiantshield/information.html>

A barreira térmica radiante, sendo composta por material de baixa emissividade em uma face ou nas duas, impede que o calor retido no espaço entre a cobertura e o forro seja emitido para o interior da edificação.

Nos estudos experimentais realizados por Vittorino et al. (2003) comprovou-se que

A simples inserção de um forro com alta emissividade nas suas duas faces, entre o telhado e o ambiente, reduz à metade o fluxo de calor que é irradiado para o ambiente em relação à situação sem forro. Caso uma das superfícies do forro tenha baixa emissividade, a redução no fluxo de calor é de 85%, isto devido ou à reflexão da radiação térmica na face superior do forro ou devido à baixa emissão na face inferior deste elemento. Combinando-se os dois efeitos, a redução do fluxo de calor passa a ser de 91% em relação à situação sem forro. (VITTORINO et al., 2003)

Para Fairey (1986) há grande redução no fluxo de calor pela cobertura quando o mesmo é descendente com a utilização de barreiras radiantes, ao passo que quando o fluxo é ascendente, a perda de calor é menor, já que a transferência de calor ocorrerá

principalmente por convecção. Medina (2006) (apud CAMARGO, 2011) realizou medições comparativas entre a redução do fluxo de calor por barreiras radiantes, chegando à aproximadamente 35% no verão e 15% no inverno.

Com relação às barreiras radiantes instaladas nos elementos verticais da envoltória, Fairey (1986) afirma que não há diferença na redução do fluxo de calor entre diferentes sentidos, ou seja, quando há ganho de calor ou perda de calor, a redução no fluxo de calor obtida com o uso de barreira radiante é a mesma.

Vittorino et al. (2003) afirmam que se somente um dos lados da barreira radiante for dotado de baixa emissividade – ou superfície polida – é praticamente indiferente o poder de redução do fluxo de calor se a face pouco emissiva estiver voltada para cima ou para baixo se instalada sob a cobertura. No entanto, se a mesma estiver voltada para cima, o acúmulo de poeira aumentará a emissividade do material polido, chegando a 0,4 aproximadamente, o que minimizaria consideravelmente o efeito de barreira à radiação do material.

Alguns materiais existentes no mercado brasileiro, apresentados como barreira radiante, devido a seu aspecto metálico, foram testados no laboratório do IPT quanto à emissividade. Segundo Vittorino et al.(2003), alguns não têm a eficácia prometida, devido a não possuírem baixa emissividade:

- produtos com superfície metálica em toda a sua extensão: $\varepsilon < 0,15$;
- produtos com superfície parcialmente ou descontinuamente metalizadas: $0,3 < \varepsilon < 0,5$;
- produtos com superfície metálica totalmente revestida com material polimérico ou não metálico transparente à luz visível: $\varepsilon > 0,7$

Para Al-Houmoud, as barreiras refletivas - como também são chamados os isolamentos térmicos à radiação – devem ser utilizadas nos climas quentes, quando a edificação não apresente a necessidade de aquecimento, quando as superfícies não se encontram sombreadas ou já isoladas termicamente e quando não há depósito de sujeira. Na face externa da cobertura, por exemplo, o autor desaconselha a aplicação desse tipo de barreira.

4.3.2.2 Os revestimentos refletivos ou 'frios' – barreiras de alta emissividade

As altas temperaturas superficiais na envoltória das edificações são a principal causa de ganho de calor para o interior das mesmas e contribuem significativamente para o aumento das temperaturas nos centros urbanos, o que tem acentuado o incômodo fenômeno das ilhas de calor. Esse fenômeno leva a alterações do microclima urbano, agravando os fenômenos climáticos (PRADO e FERREIRA, 2005), como alterações na velocidade do vento, na umidade do ar e elevação da temperatura do ar se comparada às áreas não urbanas. Inúmeros estudos vem sendo feito a respeito do desempenho de materiais capazes de reduzir as temperaturas superficiais e, seu impacto na atenuação do fenômeno das ilhas de calor (AKBARI e MATTHEWS, 2012, AKBARI e LEVINSON, 2008 AKBARI et al.,2001, ROSENFELD *et al.*,1998, ROSENFELD *et al.*,1995, SYNNEFA et al., 2007).

Sobre o potencial de redução de carga térmica no interior das edificações por meio da aplicação de materiais frios em sua cobertura, podem-se citar alguns estudos importantes, como Suehrcke et al. (2008), Synnefa e Santamouris (2012), dentre outros, que apresentaram resultados significativos sobre o impacto positivo que os materiais frios possuem na diminuição da carga térmica de edificações em climas quentes. A aplicação de revestimentos frios em coberturas – chamadas *cool roofs* – foi monitorada por Akbari et al. (2005), Synnefa et al. (2012), Bozonnet et al. (2011), Kolokotroni et al. (2013), Kolokotsa *et al* (2012), Pisello e Cotana (2014), Romeo e Zinzi (2013), Joudi *et al.* (2011), dentre outros, apontando relevantes resultados de redução de temperaturas superficiais e consequente redução na demanda por condicionamento artificial para refrigeração em edificações situadas em diferentes latitudes.

Diminuir as temperaturas superficiais nas edificações, portanto, é um recurso que pode ser utilizado para minimizar as consequências das ilhas de calor sobre o ambiente urbano (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY apud PRADO E FERREIRA, 2005), bem como diminuir de forma significativa a demanda por energia elétrica para condicionamento artificial nos grandes centros.

Materiais que apresentam baixas absorções e altas emissividades são conhecidos como materiais refletivos ou "frios" (*cool materials*) (DORNELLES et al.,

2013). Os materiais frios ou refletivos se apresentam como uma estratégia com boa relação custo-benefício, se aplicados de forma planejada, a partir de avaliação que considere as técnicas construtivas empregadas, a utilização ou função da edificação e o clima em que se inserem. Tais materiais atuam por meio de propriedades ópticas, refletindo porções da radiação solar que atinge a superfície da edificação.

Na Europa e nos Estados Unidos existem conselhos criados para testar, avaliar e divulgar tais materiais, já largamente fabricados e comercializados nessas localidades. No Brasil há amplo espectro de possibilidades de popularização de tais produtos, devido à alta incidência de radiação solar, bem como à predominância dos climas quentes dentre as Zonas Bioclimáticas Brasileiras, determinadas na ABNT - NBR 15220-3 (2005).

Os materiais frios possuem em sua composição pigmentos inorgânicos, menos suscetíveis à degradação causada pelas ondas de radiação solar ultravioleta, mais estáveis a temperaturas elevadas e menos suscetíveis a ação de ácidos e alcalinidade. Os óxidos de metal misto – da classe dos compostos inorgânicos – possuem elevada opacidade no visível e elevada refletância no infravermelho (RYAN, 2005). Sua adição às tintas e revestimentos confere alta refletância no visível e no infravermelho, diminuindo a absorvância da radiação que atinge as superfícies, mesmo em produtos de cores escuras – se comparados aos produtos convencionais -, normalmente muito absorvivos à radiação nas faixas visível e infravermelho do espectro. Para Ryan (2005), o óxido de titânio (TiO_2) é o pigmento do qual se obtém com maior eficiência tais características. Segundo Dornelles et al. (2013), a alguns dos poucos produtos refletivos fabricados no mercado brasileiro, são adicionadas microesferas cerâmicas que teriam, de acordo com o fabricante, a função de refletir, refratar e bloquear o calor, além de dissipá-lo para o ambiente, embora a pesquisadora não tenha comprovado tal propriedade das microesferas cerâmicas.

Tabela 4-7- Composição da radiação solar. Fonte: Prado e Ferreira (2005)

Tipo	Comprimento de Onda (nm)	% aproximada	Efeito quando absorvidas pelas superfícies
Raios UV	290-380	6	Alteração nas cores dos materiais, câncer, síntese de vitamina D
Luz Visível	380-780	46	Luz visível, cores e calor
Infravermelho	780-2500	43	Calor

Segundo Levinson et al. (2005), é principalmente a alta refletância no espectro infravermelho – ou Near Infra-Red (NIR) – o que determina se um pigmento é frio ou quente, ou seja, se reflete calor, diferentemente dos materiais convencionais com valores de emissividade abaixo de 0,5. Nota-se pela Tabela 4-7 que o espectro infravermelho contém grande parte da energia radiante que atinge a superfície da Terra.

Para que um material seja considerado frio ou refletivo, são necessárias duas características:

- Alto valor de albedo, definido como “a refletância especular e difusa integrada, entre as faixas de 290 e 2500 nm de comprimento de onda, que corresponde a aproximadamente 96% da radiação solar que alcança a superfície terrestre”, com valores que variam entre 0 e 1 (PRADO e FERREIRA, 2005);
- Alta emissividade (ϵ): capacidade de reemitir as ondas do espectro luminoso absorvidas, na forma de ondas de radiação infravermelha. O índice estabelece relação entre a capacidade da superfície de irradiar calor para o ambiente em comparação com a mesma capacidade em uma superfície negra. Os valores variam de 0 a 1 (SANTAMOURIS, SYNNEFA e KARLESSI, 2011).

A Tabela 4-8 apresenta a temperatura superficial de alguns materiais tradicionalmente utilizados na construção civil, associadas às suas propriedades ópticas de albedo e emissividade. Para fins de cálculo das temperaturas superficiais, a Comissão Californiana de Energia definiu em 2002, por meio da Proposta de Alteração de Código – Título 24, que os valores de temperatura do ar, radiação solar, temperatura de céu,

coeficiente de convecção podem ser adotados conforme se segue, para situações de ventilação moderada:

$$I = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$h_c = 12 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$T_{\text{sky}} = 300 \text{ K}$$

$$T_{\text{ar}} = 310 \text{ K}$$

Tabela 4-8 – Temperatura Superficial de materiais para condições climáticas determinadas pela ASTM 1980-98.

Fonte: Prado e Ferreira (2005).

Material	Albedo	Emissividade	Temperatura Superficial (°C)
Cerâmica vermelha	0,53	0,9	36,8
Cerâmica branca	0,54	0,9	36,2
Metal (Al + Zn) sem revestimento	0,54	0,25	60,1
Cimento cinza escuro	0,26	0,9	50,8
Cimento cinza claro	0,49	0,9	49,8
Aço inoxidável sem revestimento	0,57	0,25	57,9

Observa-se pela Tabela 4-8 que quanto maiores forem o albedo e a emissividade simultaneamente, menores serão as temperaturas superficiais dos materiais. A temperatura superficial dos materiais pode ser calculada pela seguinte equação:

$$(1 - a)I = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{\text{sky}}^4) + h_c (T_s - T_a)$$

Onde:

a – albedo ou refletância solar da superfície

I – radiação solar incidente na superfície (W/m^2)

σ – Constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

ε – emissividade da superfície

T_s – Temperatura de equilíbrio da superfície (K)

T_{sky} – Temperatura radiante do céu (K)

h_c – coeficiente de convecção ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)

T_a – Temperatura do ar (K)

Para avaliar quão frios são os novos materiais, foi desenvolvido um índice que leva em consideração as temperaturas superficiais relacionadas à refletância e à emissividade, uma vez que estabelece relação entre a temperatura do material e as temperaturas em uma superfície branca padronizada e em uma superfície negra padronizada. O índice, denominado SRI (*Solar Reflectance Index*), pode ser determinado pela Equação 2:

$$\text{SRI} = [(T_{\text{black}} - T_{\text{surface}}) / (T_{\text{black}} - T_{\text{white}})] * 100 \quad (2)$$

Onde:

T_{black} – temperatura de uma superfície negra padronizada, com 5% de refletância e 90% de absortância, com SRI=0 (K);

T_{surface} – temperatura da superfície a ser medida (K);

T_{white} – temperatura de uma superfície branca padronizada, com 80% de refletância e 90% de emissividade, com SRI=1 (K).

Tabela 4-9 - Valores de refletância, emissividade e SRI de materiais convencionais. Fonte: SANTAMOURIS et al (2011).

Material de superfície	Refletância	Emissividade	SRI
Alumínio	0,20-0,65	0,25-0,65	-25 a 72
Pintura branca	0,70-0,85	0,80-0,90	84 a 113
Telha de concreto cinza	0,18-0,25	0,85-0,90	14 a 25
Cobertura metálica sem pintura	0,20-0,60	0,05-0,35	-48 a 53

Tomando como base as informações constantes da Tabela 4-8, pode-se estimar que as temperaturas superficiais de materiais com altos valores para o índice SRI apresentados na Tabela 4-9 serão mais baixas do que aqueles com SRI inferior. Os materiais frios recentemente desenvolvidos possuem valores de SRI superiores aos dos materiais tradicionais apresentados na Tabela 4-9, com exceção de algumas pinturas brancas, conforme mostra a Tabela 4-10, adaptada do sítio CRRC (*Cool Roof Rating Council*):

Tabela 4-10 – Exemplos de materiais frios e seus índices. Fonte:

http://coolroofs.org/products/results/search&channel=products&orderby=cf_product_manufacturer+cf_product_brand+cf_product_model+asc&cf_product_pri_prod_type=%22Field-Applied+Coatings%22. Acesso em 20/10/2015.

Marca	Tipo de Produto	Refletância Solar		Emissividade Térmica		SRI		Cor
		Inicial	3 anos	Inicial	3 anos	Inicial	3 anos	
x	Revestimento acrílico aplicado <i>in loco</i>	0,84	0,72	0,79	0,86	104	88	Branco Brilhante
y	Revestimento acrílico aplicado <i>in loco</i>	0,87	0,70	0,89	0,90	110	86	Branco Brilhante
z	Revestimento acrílico aplicado <i>in loco</i>	0,89	0,81	0,89	0,87	113	101	Branco Brilhante

Para Sato et al.(2013), os índices SRI superiores a 100 se devem à refletância de alguns produtos testados ser maior que a refletância da superfície branca padrão, cuja refletância é de 80%.

As características iniciais de albedo e emissividade dos revestimentos frios são passíveis de alteração ao longo do período de exposição às condições ambientais, principalmente em função de sujeira e intemperismo. Segundo Sleiman *et al.* (2014), a deposição de sujeira inclui a sedimentação de carbono negro, poeira, materiais particulados orgânicos e inorgânicos, além do crescimento de micro-organismos. As alterações devido ao intemperismo ocorreriam em função da exposição do material à umidade, à radiação ultravioleta, bem como às oscilações diárias de temperatura. Para atingir a estabilidade quanto às características ópticas em processo natural de envelhecimento, segundo Sleiman et al. (2014) seriam necessários no mínimo três anos de exposição do produto sob tais condições.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 O experimento

5.1.1 Definição dos modelos a serem medidos

A fim de conhecer a realidade de mercado das instalações provisórias metálicas para canteiros de obra, realizaram-se visitas técnicas a alguns canteiros na cidade de São Paulo, buscando verificar de que forma acontece a apropriação de tais instalações no uso cotidiano, além de poder verificar quais tipologias de contêineres oferecidas pelo mercado se difundem ou têm obtido maior preferência por parte das empresas contratantes. A ideia inicial era a de escolher um dos canteiros de obra em funcionamento para que fosse utilizado como estudo de caso, onde se pudessem executar as medições térmicas, a partir das quais seriam feitas as análises.

Ao constatar a grande variedade de projetos de implantação de tais estruturas, bem como seu curto tempo de permanência nos canteiros de obras, optou-se por delimitar o objeto de estudo para que fossem reduzidas as inúmeras variáveis que contribuiriam para relativizar os resultados das medições, tais como orientação geográfica, volume ocupado pela instalação, condições de sombreamento, utilização de climatizadores artificiais, e número de usuários e equipamentos geradores de calor existentes no interior das mesmas.

Descartada a possibilidade de realizar medições no canteiro, partiu-se para o levantamento de tipologias usuais de contêineres habitáveis – já que os contêineres marítimos se diferenciam desses com relação à espessura da envoltória e composição estrutural, pesando o dobro do que pesa o módulo habitacional construído especificamente para essa finalidade.

Chegou-se à tipologia básica de contêiner metálico para a construção civil, considerando que as análises realizadas a partir do modelo podem ser amplamente aplicadas às infinitas variações de implantação existentes nos canteiros e demais usos. A fim de viabilizar economicamente a realização do experimento, reduziu-se a dimensão do comprimento pela metade, mantendo todas as demais características estruturais e de vedação dos contêineres utilizados no mercado. Esse modelo básico (Contêiner 1, a ser

caracterizado no próximo tópico) será considerado Modelo Referência para os desdobramentos da pesquisa, tanto no que se refere às análises do ganho de carga térmica quanto às análises de conforto e estresse térmico. Optou-se, contudo, por adotar mais dois modelos, com propriedades distintas no que tange à interação com os diferentes fenômenos físicos a que estão submetidos. O Modelo 2 é dotado de tratamento térmico resistente à condução e o Modelo 3 possui tratamento térmico resistente à radiação.

5.1.2 Caracterização dos módulos metálicos

Contêiner 1: confeccionado em aço galvanizado (Tipo X) corrugado revestido com zinco, alumínio e quantidades-traço de silicone, com 3 m de comprimento, 2,4 m de largura e 2,5 m de altura, piso em compensado de madeira de 2 cm de espessura, com revestimento plástico imitando madeira, disposto a 28 cm de altura do solo, contendo uma janela nas dimensões 0,99 m x 0,92 m, confeccionada no mesmo material do contêiner, permanentemente fechada por motivo de segurança, e uma porta de 0,77 m x 2,11 m do mesmo material da composição, também mantida constantemente fechada durante o período de medições. Este Contêiner possui interstícios que permitem a passagem do ar nas junções entre a cobertura e as paredes verticais, localizadas nas fachadas Norte e Sul, conforme Figura 5-1.

Figura 5-1 – Interstícios na junção entre cobertura e paredes verticais

Contêiner 2: composição idêntica à do Contêiner 1. A cobertura, no entanto, é acrescida de uma camada interna de poliestireno expandido (isopor) de 2 cm de espessura e de uma chapa dura de material derivado de madeira revestido internamente com fórmica bege fosca (Eucaplac). As junções do forro não permitem infiltração de ar como ocorre no Contêiner 1. As vedações verticais contém poliestireno de 2 cm de espessura nos interstícios existentes devido ao perfil do aço corrugado utilizado entre a chapa de aço e a chapa de madeira. O piso é confeccionado em compensado de madeira 2 cm de espessura, acrescido de revestimento plástico imitando madeira².

Contêiner 3: composição idêntica à do Contêiner 1. Nesse Contêiner , no entanto, aplicou-se uma camada de 0,25µm de revestimento branco refletivo externamente de forma homogênea, nas quatro superfícies verticais - incluindo porta e janela - e na cobertura.

A potencialidade de redução de ganho térmico apresentada pelos materiais frios, sua boa aplicabilidade e aderência, a baixa espessura e leveza, além da adequada resistência aos esforços passíveis de serem sofridos pelo contêiner ao longo de sua vida útil, levaram à escolha do material para o recobrimento total de um dos contêineres experimentais. O revestimento foi aplicado externamente sobre toda a envoltória, a fim de que se pudesse verificar seu comportamento ao longo do tempo, bem como seu desempenho térmico, comparado ao do aço galvanizado, material que compõe o contêiner referência.

5.1.3 Localização do experimento e condições climáticas

Devido à disponibilidade de espaço e à infraestrutura cedida para a execução e manutenção do experimento, os contêineres foram dispostos no município de Mairinque – SP, onde se localiza a sede da empresa Soldatopo-Fladafi, fabricante dos contêineres

² A escolha de tipologia do Contêiner 2 deve-se a ser esse um dos produtos disponibilizados pelo fabricante ao mercado, na ocasião do experimento, conforme solicitado pela pesquisadora.

experimentais. Mairinque possui coordenadas 23°32'45" Sul para latitude, e 47°11'00" Oeste para longitude.

O município de Mairinque está situado na Zona Bioclimática Brasileira nº3, segundo a NBR 15220-3 (2005b), conforme Figura 5-2.

Figura 5-2 - Zona Bioclimática Brasileira nº3 com a localização do Município de Mairinque. Fonte do mapa: NBR 15220-3 (2005)

A Figura 5-3 apresenta dados de temperaturas médias máximas e mínimas para todos os meses do ano, bem como o índice pluviométrico correspondente ao Município de Mairinque.

Figura 5-3 - Mairinque: médias climatológicas. Fonte: Climatempo. Acesso em 14/10/2015.

As médias climatológicas são valores calculados a partir de uma série de dados coletada durante 30 anos.

5.1.4 Posicionamento dos módulos metálicos

Para determinar posição em que permaneceriam dispostos a fim de receberem a maior insolação possível e de evitar todo o sombreamento em suas paredes, realizou-se o estudo de sombras de acordo com a trajetória solar para o solstício de verão, solstício de inverno e para os equinócios de primavera e outono. Adotou-se a carta solar para latitude 24° sul pela proximidade relativa de trajetórias solares, que se apresenta na Figura 5-4. A diferença entre as cartas das duas latitudes não repercute de forma intensa no presente estudo, já que o objetivo ao estudar o sombreamento para as datas citadas foi o de determinar o posicionamento sem sombra para cada um dos contêineres concomitantemente à menor distância entre os mesmos e entre esses e a estação onde foi posicionado o datalogger.

Figura 5-4 - Carta Solar para latitude 24° Sul. Fonte: LABAUT/FAUUSP.

A Figura 5-5, a Figura 5-6 e a Figura 5-7 demonstram o desenho da sombra projetada no chão por um contêiner nas datas especificadas nas legendas, e nos horários dispostos dentro da forma geométrica correspondente ao desenho da sombra. Os estudos foram feitos para os solstícios e equinócios.

Figura 5-5 - Estudo de sombreamento para um contêiner no solstício de verão.

Figura 5-6 - Estudo de sombreamento para um contêiner no solstício de inverno.

Figura 5-7 - Estudo de sombreamento para um contêiner nos equinócios.

A Figura 5-8 apresenta o estudo realizado para o sombreamento total do conjunto, incluindo a cabine de controle, para as datas mais representativas, os solstícios e equinócios, para determinar, então, a distância mínima possível entre os contêineres e entre esses e a cabine, para evitar sombreamentos nas envoltórias.

Figura 5-8 - Estudo de sombreamento para os três contêineres e a cabine de controle nos solstícios e equinócios.

Foram marcados *in loco* os pontos determinados no estudo de sombreamento. Para o posicionamento dos contêineres foi utilizado um caminhão com o dispositivo de içamento.

Figura 5-9 - Marcação dos pontos de locação, de acordo com o estudo de sombreamento.

Finalmente, o conjunto posicionado. Observa-se que na data em que foi fotografado, o conjunto apresentou insolação da face sul, como nota-se na Figura 5-10.

Figura 5-10 - Locação final do conjunto. Imagem realizada no dia 27/12/2013.

5.1.5 Medições

Inicialmente cogitou-se realizar as medições em datas específicas, tomando dias característicos dos doze meses do ano para compor uma amostra de dados representativa, conforme se utiliza frequentemente em pesquisas relacionadas ao conforto e estresse térmicos em edificações.

Contudo, devido à peculiaridade dos fenômenos físicos de trocas térmicas a que os contêineres – bem como qualquer edificação ou instalação metálica – estão submetidos, ou seja, a baixa inércia térmica de sua envoltória, que permite que os processos de transferência de calor ocorram em curto período de tempo, optou-se por utilizar as medições pontuais – realizadas com o equipamento portátil, o confortímetro – em dias característicos do ano como método de apoio, passando-se a estruturar a aquisição de dados para a pesquisa em funcionamento constante, no decorrer de um ano, a fim de que se pudessem captar as variações nos modos de transferência de calor dos módulos durante o dia e a noite, em todas as estações do ano.

5.1.5.1 O sistema de medição permanente: determinação do comportamento térmico

Para a obtenção de dados representativos acerca da resposta dos contêineres metálicos às transferências de calor, optou-se pela instalação de um sistema de medição permanente, com coleta de dados realizada a cada 5 minutos. Optou-se, neste caso, pela utilização de Termopares Tipo T, compostos de liga Cu/Cu-Ni, conhecidos como Cobre-Constantan, recomendados para medições de temperaturas dentro da faixa de -27°C a 370°C. Para o Termopar Tipo T, o termoelemento positivo é o Cobre (Cu100%) e o termoelemento negativo é a liga Constantan (Cu55%Ni45%).

Foram utilizados no experimento 12 termopares em cada contêiner, a saber:

Tabela 5-1 - Descrição dos termopares do sistema de medição permanente

Termopar	Localização	Descrição - medição
01	cobertura	temperatura superficial no centro da cobertura - face externa
02	cobertura	temperatura superficial no centro da cobertura - face interna
03	piso	temperatura superficial no centro do piso - face interna
04	face Oeste	temperatura superficial no centro da parede Oeste - face externa
05	face Oeste	temperatura superficial no centro da parede Oeste - face interna
06	face Norte	temperatura superficial no centro da parede Norte - face externa

07	face Norte	temperatura superficial no centro da parede Norte - face interna
08	face Leste	temperatura superficial no centro da parede Leste - face externa
09	face Leste	temperatura superficial no centro da parede Leste - face interna
10	face Sul	temperatura superficial no centro da parede Sul - face externa
11	face Sul	temperatura superficial no centro da parede Sul - face interna
12	centro	temperatura de globo no centro geométrico do piso do contêiner, medida a 1,10 m de altura, conforme Norma ISO 7243

No intuito de diferenciá-los, aos números dos termopares foi adicionado o número do contêiner correspondente na posição da centena, ou seja, para o Contêiner 1 os termopares foram numerados de 101 a 112, para o Contêiner 2, de 201 a 212, e para o Contêiner 3, de 301 a 312, para que fosse possível a identificação imediata a partir das leituras realizadas pelo Datalogger.

Além dos termopares localizados nas superfícies dos contêineres, foi instalado um termopar na parte externa da cabine de controle, um metro acima da cobertura, envolto em fita aluminizada, com a finalidade de obtenção de dados de temperatura de bulbo seco (TBS) ou temperatura do ar. Esse foi numerado como 313.

Para a medição da Radiação Solar Total Incidente, foi instalado um piranômetro “Black and White” da marca Eppley, cuja constante é $9,64 \mu\text{V/W/m}^2$, conforme a Figura 5-11.

Figura 5-11 - Piranômetro “Black and White” Eppley. Fonte:
http://smartlabs.gsfc.nasa.gov/instruments_smart.php . Consultada em 29/10/2013.

Todos os termopares e o piranômetro conectam-se ao Datalogger Agilent, modelo 34970A, apresentado na Figura 5-12, configurado para realizar varreduras a cada 5 minutos.

Figura 5-12 - Datalogger Agilent 34970A

Como o município de Mairinque-SP, onde o experimento foi instalado, não possui estação meteorológica e a estação mais próxima pertence ao município de Sorocaba-SP, cujas características climáticas são bastante diferentes, optou-se pela aquisição de uma mini estação meteorológica para maior precisão na coleta de dados climáticos. O modelo adotado foi o ITWH-1080, com certificado de calibração, da marca Instrutemp, conforme Figura 5-13.

Figura 5-13 - Instalação da Estação Meteorológica ITWH-1080

A estação meteorológica envia os sinais captados por ondas de rádio até a central de leitura, e essa se conecta ao computador para a aquisição de dados. A estação foi configurada para realizar medições de 5 em 5 minutos, intervalo mínimo para esse modelo.

Os relógios do computador e da estação meteorológica foram compatibilizados segundo o tempo solar.

Figura 5-14 - Representação esquemática da cadeia de medição com posicionamento do conjunto em relação ao norte verdadeiro. (a) computador, (b) datalogger, (c) base da estação meteorológica, (d) sensores meteorológicos, (e) piranômetro, (f) termopar para medição de TBS, (de 1 a 11) sensores para medição de temperaturas superficiais e (TG) globo negro com sensor de temperatura.

5.1.5.2 Medições auxiliares: variáveis para a determinação de parâmetros de Conforto Térmico, IBUTG e WCI

As medições dos parâmetros de Conforto Térmico, IBUTG e WCI foram realizadas somente no Contêiner 1 (Modelo Referência), devido a algumas restrições

como disponibilidade de utilização de um único equipamento, bem como a distância entre o laboratório e o experimento, o que impediu de realizar medições desses parâmetros nos três contêineres. Além disso, o Contêiner 1 é uma tipologia básica encontrada com facilidade no mercado brasileiro, daí o entendimento dessa unidade como Modelo Referência. Optou-se por realizar medições dos parâmetros de conforto térmico durante alguns dias de cada mês – devido à disponibilidade do equipamento - , 24 horas por dia, com intervalo de 5 minutos.

Utilizou-se o Confortímetro com Datalogger da marca Delta OHM, modelo HD32.1, para a medição das seguintes variáveis:

Tabela 5-2 - Variáveis medidas e respectivas sondas utilizadas. Imagens: Delta OHM.

<p>1) Temperatura de Bulbo Seco interna:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sonda de temperatura • Sensor tipo: Pt100 a filme fino • (*) Incerteza de medição: Classe 1/3 DIN • Campo de medição: -40 a 100 °C • Dimensão: Ø=14 mm L=140 mm
<p>2) Temperatura de Bulbo Úmido interna:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sonda a bulbo úmido a ventilação natural para a • Medição do índice IBUTG • Sensor tipo: Pt100 • (*) Incerteza de medição: Classe A • Campo de medição: 4 °C a 80 °C

<p>3) Temperatura de Globo:</p> <ul style="list-style-type: none">• Sonda globo termômetro $\varnothing=150$ mm segundo normas ISO 7243 - ISO 7726• Sensor tipo: Pt100• (*) Incerteza de medição: Classe 1/3 DIN• Campo de medição: -10 a 100 °C
<p>4) Velocidade do Ar:</p> <ul style="list-style-type: none">• Sonda a fio quente omnidirecional.• Sensor tipo: NTC 10 kohm• (*) Incerteza de medição: ± 0.02 m/s (0÷1 m/s)• ± 0.1 m/s (1 a 5 m/s)• Campo de medição: 0 a 5 m/s• 0°C a 80°C

Figura 5-15 - Confortímetro: datalogger da marca Delta OHM e suporte montado com as sondas medidoras dentro do Contêiner 1.

Além de medir as temperaturas de bulbo úmido e seco, temperatura de globo e velocidade do ar, o confortímetro apresenta dados de temperatura radiante média, calculados pelo software do equipamento, por meio da seguinte equação:

$$t_r = [(t_g + 273)^4 + \frac{273 + 10^8}{\varepsilon_g} + \left(\frac{|t_g - t_a|}{D}\right)^{1/4} * (t_g - t_a)]^{1/4} - 273$$

Onde:

D - diâmetro do termômetro de globo (m)

ε_g – 0,95 emissividade presumida do termômetro de globo

t_g - temperatura do termômetro de globo (K)

t_a - temperatura do ar (K)

v_a - velocidade do ar (m/s)

Os valores de temperatura radiante média apresentados pelo equipamento foram utilizados para o cálculo da temperatura operativa, juntamente com os dados de temperatura de bulbo seco (t_a), conforme a seguinte equação:

$$t_o = (a * t_a) + (1 - a)t_r$$

Onde:

t_o – temperatura operativa (°C ou K)

a – constante conforme Tabela 5-3

t_r – temperatura radiante média (°C ou K)

t_a – temperatura do ar (°C ou K)

Tabela 5-3- Valores para a constante a em função da velocidade do ar

V a (m/s)	0 – 0,2	0,2 – 0,6	0,6 – 1,0
a	0,5	0,6	0,7

Fonte: ASHRAE Fundamentals (2010)

5.2 Métodos de avaliação

Fanger (1972) desenvolveu importante trabalho para a compreensão das relações térmicas entre o corpo humano e o ambiente que o cerca. O modelo térmico estacionário de trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente que o cerca, o conceito de neutralidade térmica, o modelo preditivo de sensações térmicas e inúmeras outras contribuições à área de estudo das interações térmicas entre o ser humano e o ambiente são conceitos desenvolvidos pelo pesquisador e equipe, que atualmente perpassam a normatização referente à avaliação dos fenômenos térmicos, sendo mundialmente difundidos.

O presente trabalho abarca quatro aspectos relevantes para o conhecimento das características térmicas dos contêineres, derivados diretamente ou indiretamente das pesquisas de Fanger. A análise desses aspectos visa contribuir para que se possam estabelecer parâmetros para o uso, bem como para que se possam dimensionar sistemas tecnológicos adequados para atingir temperaturas internas próximas aos parâmetros de conforto, ou que se consiga, ao menos, diminuir a demanda por condicionamento

artificial, quando da impossibilidade de atingir níveis de conforto exclusivamente por meio de estratégias passivas.

5.2.1 Avaliação do desempenho térmico

A norma ABNT - NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho (2013), também denominada Norma de Desempenho apresenta parâmetros para a avaliação do desempenho de edificações em diversos quesitos, como lumínico, acústico, estrutural e térmico, sendo o último o que se relaciona estritamente a esta pesquisa.

Embora se possa questionar se cabe avaliação de contêineres metálicos como uma edificação, e não como uma instalação provisória quanto ao desempenho, no presente trabalho adota-se a postura de avaliá-los como edificações, devido à utilização crescente nos mais diversos setores, além dos canteiros de obras: stands, comércios e serviços e também no setor residencial. A avaliação do desempenho térmico dos contêineres segundo os parâmetros aplicados a uma edificação convencional tem como objetivo primordial apontar a necessidade de tratamento térmico da envoltória a fim de que sua utilização possa alcançar o melhor resultado do que se refere ao uso racional de energia para que se atinjam condições de conforto em seu interior.

A norma brasileira ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013) define os seguintes critérios de avaliação do desempenho térmico das edificações, para verão e inverno, no que se refere às temperaturas de bulbo seco (temperatura do ar) para a Zona Bioclimática 3, onde se situa o experimento da presente pesquisa :

1) Verão:

M – mínimo: Temperatura interna máxima $\leq$ Temperatura externa máxima

I – inferior: Temperatura interna máxima $\leq$ Temperatura externa máxima – 2°C

S – superior: Temperatura interna máxima $\leq$ Temperatura externa máxima – 4°C

2) Inverno:

M – mínimo: Temperatura interna máxima $\geq$ Temperatura externa máxima + 3°C

I – inferior: Temperatura interna máxima $\geq$ Temperatura externa máxima + 5°C

S – superior: Temperatura interna máxima $\geq$ Temperatura externa máxima + 7°C

O parâmetro de avaliação baseado nas temperaturas de bulbo seco foi aplicado ao Contêiner 1, no qual foram realizadas as medições com o confortímetro.

A norma ainda especifica parâmetros para os índices de transmitância térmica da cobertura das edificações, de acordo com a absorvância das mesmas, sendo para a Zona Bioclimática 3:

$$\alpha \leq 0,6 \rightarrow U \leq 2,3$$

$$\alpha > 0,6 \rightarrow U \leq 1,5$$

Onde:

α – absorvância (0 a 1)

U – transmitância térmica ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

O método de cálculo das transmitâncias proposto pela Norma de Desempenho é fornecido pela norma ABNT - NBR 15220-2 (2005), e compreende as seguintes equações:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Onde:

R_T – resistência total do componente da cobertura ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

A Resistência Térmica é calculada de ambiente a ambiente, conforme a equação:

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si}$$

Onde:

R_{se} – resistência superficial externa

R_t – resistência térmica de superfície a superfície

R_{si} – resistência superficial interna

Para a determinação da Resistência Térmica de Superfície a Superfície, propõe-se a seguinte equação:

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}}$$

Onde:

A_a, A_b, A_n – áreas de cada seção (m^2)

R_a, R_b, R_n – resistências térmicas de superfície a superfície para cada seção (m^2K/W)

As resistências térmicas são dadas por:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Onde:

e – espessura do componente (m)

λ – condutividade térmica do componente (W/mK)

Para determinação das Resistências Superficiais Externas e Internas, a norma ABNT NBR-15220-3 propõe os seguintes parâmetros:

$R_{si} (m^2.K)/W$			$R_{se} (m^2.K)/W$		
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

Figura 5-16 – Parâmetros para as resistências superficiais externas e internas, segundo a ABNT-NBR 15220-3 (2005)

No entanto, como na presente pesquisa foram realizadas medições das temperaturas superficiais dos contêineres, bem como das temperaturas do ar externo e das temperaturas internas – no caso, as temperaturas de globo, já que as medições realizadas com o confortímetro no Contêiner 1 demonstraram haver pequena diferença entre essas e as temperaturas de bulbo seco -, optou-se por determinar as transmitâncias térmicas por meio do cálculo dos coeficientes locais de convecção externo e interno, para compor o cálculo da transmitância térmica em cada contêiner, segundo a equação:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i + h_{rc-i}} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e + h_{rc-e}}}$$

Onde:

h_i – coeficiente de convecção interno (W/m².K)

h_e – coeficiente de convecção externo (W/m².K)

h_{rc-i} – coeficiente de radiação interno (W/m².K)

h_{rc-e} – coeficiente de radiação externo (W/m².K)

O método de cálculo do h_i proposto pela ASHRAE (2013) envolve as equações constantes da Tabela 5-4.

Tabela 5-4 – Variáveis e equações para determinação do coeficiente de convecção interno (h_i) segundo o método ASHRAE (2013)

Variável	Símbolo	Equação	Unidade
coeficiente de convecção interno	h_i	$h_i = Nu * \lambda_{ar} / L$	(W/m ² . K)
número de Nusselt	Nu	$Nu = 0,15 * (Gr * Pr)^{1/3}$	-
número de Grashof	Gr	$Gr = (g * \beta * (T_p - T_{\infty}) * L^3) / \nu^2$	-
número de Prandtl	Pr	$Pr = \nu / \alpha$	-
difusividade térmica do ar	α	$\alpha = \lambda_{ar} / \rho c$	m ² /s
condutividade térmica do ar interno	λ_{ar}	-	W/m.K
aceleração da gravidade	g	9,8	m/s ²
coeficiente de expansão volumétrica	β	$\beta = 1 / T_{\infty}$	1/K
temperatura superficial interna	T_p	valor medido	K
temperatura do ar interno	T_{∞}	valor medido	K
temperatura de filme	T_f	$T_f = (T_p + T_{\infty}) / 2$	K
dimensão característica da superfície	L	L = área/perímetro	m
viscosidade cinemática	ν	tabelada	m ² /s

O coeficiente de radiação interno (h_{rc-i}) é dado pela equação:

$$h_{rc-i} = \epsilon_{ext} \sigma (T_{sup}^4 + T_{sky}^4) (T_{sup} - T_{sky})$$

Onde:

ϵ – emissividade

σ – constante de Stefan Boltzmann (W/m²K⁴)

T_{sup} – temperatura superficial (K)

T_{sky} – temperatura de céu (K)

O coeficiente de convecção externo h_e é dado pelas equações constantes da Tabela 5-5.

Tabela 5-5 - Variáveis e equações que compõem o cálculo do coeficiente de convecção externo segundo a ASHRAE (2013)

Variável	Símbolo	Equação	Unidade
coeficiente de convecção externo	h_e	$h_e = Nu_{ext} * \lambda_{ar\ ext} / l$	(W/m ² . K)
número de Nusselt externo	Nu_{ext}	$0,037 * Re^{4/5} Pr_{ext}^{1/3}$	-
número de Reynolds	Re	$Re = vL / \nu_{ext}$	-
viscosidade cinemática externa	ν_{ext}	tabela	m ² /s
comprimento da cobertura	l	-	m
número de Prandtl externo	Pr_{ext}	$Pr = \nu / \alpha$	-
velocidade do vento	v	Dado fornecido pelo CRESESB + fator de correção	m/s

Onde:

$\lambda_{ar\ ext}$ – condutividade do ar externo

L – temperatura superficial (K)

T_{sky} – temperatura de céu (K)

O coeficiente de radiação externo (h_{rc-e}) externo é dado pela equação:

$$h_{rc-e} = \varepsilon_{ext} \sigma (T_{sup}^2 + T_{sky}^2)(T_{sup} + T_{sky})$$

Onde:

ε – emissividade

σ – constante de Stefan Boltzmann (W/m²K⁴)

T_{sup} – temperatura superficial (K)

T_{sky} – temperatura de céu (K)

O cálculo das transmitâncias térmicas das coberturas e sua avaliação de acordo com os parâmetros da Norma de Desempenho foram realizados para os três contêineres.

5.2.2 Avaliação do conforto térmico

A sensação de conforto térmico é uma combinação entre fatores pessoais e ambientais. Fanger (1972) e equipe desenvolveram uma metodologia para a avaliação dos ambientes térmicos, considerando que mesmo que as condições de conforto obtidas pela equação do conforto – também desenvolvida pelo autor - sejam satisfeitas, ainda assim haverá um percentual de usuários insatisfeitos com as condições térmicas do local. Segundo a ASHRAE 55 (2010), “conforto térmico é o estado da mente (ou estado de espírito) que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Portanto, admite-se que a sensação de conforto tenha um componente de subjetividade.

A partir de pesquisa realizada com 1300 pessoas submetidas a diversas situações térmicas, sob condicionamento artificial, foi desenvolvido o sistema de Voto Médio Estimado (PMV – Predicted Mean Vote), baseado em questionários respondidos pelos participantes da pesquisa. A norma ISO 7730:2005 traz diretrizes para a determinação do PMV. No entanto, o método PMV passou a ser amplamente questionado a respeito de sua validade para ambientes naturalmente ventilados, principalmente em países de clima quente.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos no sentido de aperfeiçoar o modelo de sensação térmica para situações não previstas por Fanger. Assim, surge o que se denomina atualmente por Método do Conforto Adaptativo, que possibilita a avaliação térmica de ambientes naturalmente ventilados, considerando que há uma faixa mais ampla do que a do PMV para a satisfação térmica dos usuários que, alterando variáveis relacionadas ao isolamento da roupa e aos controles de ganho de calor da edificação, poderiam atingir índices satisfatórios de conforto sem que para tanto houvesse a necessidade de utilizar o condicionamento artificial. O ser humano é visto, dessa perspectiva, como agente que interage em todos os níveis do sistema ambiental pessoal em função da resposta térmica obtida. Dentre as principais referências, citam-se os estudos de Givoni (1969), A. Auliciems (1981), Nicol (2004), M.A. Humphreys (1978), Brager e De Dear (1998).

Pereira & Assis (2010) avaliaram a adequabilidade para a realidade brasileira dos modelos propostos por Auliciems (1981), Humphreys (1978), Nicol e Humphreys (2002) e De Dear e Brager (2002), afirmando que o modelo adaptativo proposto pelos últimos pesquisadores é o que possibilita maior proximidade entre os parâmetros de conforto estabelecidos e a realidade dos diversos climas brasileiros, dentre os métodos estudados. Dessa forma, optou-se por utilizar para a análise dos padrões de conforto nos contêineres a Metodologia do Conforto Adaptativo proposta por DeDear & Brager (2002), que passou a integrar a norma ASHRAE 55 no ano de 2004.

De Dear & Brager (2002) consideram que as sensações térmicas sofrem influência da expectativa que se tem sobre o clima local. Assim, os parâmetros de conforto variariam conforme o contexto em que se inserem. O método se utiliza dos valores de Temperatura de Bulbo Seco Média para o ambiente externo e dos valores de Temperatura Operativa para o ambiente interno, obtidos por meio de equação apresentada à página 80.

O Modelo Adaptativo estabelece uma faixa onde se localiza a sensação de conforto térmico que compreende a satisfação de até 90% dos usuários, e duas faixas para valores acima e abaixo dessa, cujo percentual de satisfeitos atinge os 80% de satisfeitos, conforme Figura 5-17.

Figura 5-17- Intervalo para Temperaturas Operativas aceitáveis para edificações naturalmente ventiladas Fonte: ASHRAE 55 (2010)

5.2.3 Avaliação do estresse térmico (IBUTG)

No Brasil, o Ministério do Trabalho e Emprego utiliza a Norma Regulamentadora nº 15 – Atividades e Operações Insalubres (BRASIL, 1978), baseada na norma ISO 7726:1998 para a fiscalização das condições térmicas no ambiente de trabalho. Em seu Anexo III - Limites de tolerância para exposição ao calor, a norma brasileira oferece um modelo de avaliação de ambientes quentes, denominado IBUTG – Índice de Bulbo Úmido Temperatura de Globo, baseado na ISO 7243:1989. Os valores do índice IBUTG são obtidos por meio da Equação 2:

$$IBUTG = 0,7 T_{bn} + 0,3 T_g$$

Onde:

T_{bn} – temperatura de bulbo úmido à ventilação natural (°C)

T_g – temperatura de globo (°C)

A Tabela 5-6 fornece o tipo de regime de trabalho permitido sob a condição de estresse térmico, impondo restrições à jornada dos trabalhadores submetidos a tais condições.

Tabela 5-6- Regime de trabalho permitido de acordo com os valores calculados de IBUTG. Adaptado de NR-15 (BRASIL, MTE, 1978)

REGIME DE TRABALHO INTERMITENTE COM DESCANSO NO PRÓPRIO LOCAL DE TRABALHO (por hora)	ATIVIDADE LEVE
trabalho contínuo	até 30 °C
45 minutos de trabalho/15 minutos de descanso	30,1 a 30,5 °C
30 minutos de trabalho/30 minutos de descanso	30,7 a 31,4 °C
15 minutos de trabalho/45 minutos de descanso	31,5 a 32,2 °C
não é permitido o trabalho sem a adoção de medidas adequadas de controle	acima de 32,2°C

5.2.4 Avaliação do resfriamento devido ao vento (WCI - Wind Chill Indice)

O índice WCI avalia as situações de desconforto sob condição de frio. Aplica-se a situações em que a temperatura do ar atinge valores inferiores a 10°C, sendo

considerados para o cálculo os valores medidos de Temperatura de Bulbo Seco e velocidade do vento. Não se consideram isolamento da roupa nem intensidade de atividade desenvolvida. Seu cálculo é realizado conforme a equação:

$$WCI = 13,12 + 0,6215t_a - 11,37 V_a^{0,16} + 0,4275 t_a V_a^{0,16}$$

Onde:

t_a – temperatura de bulbo seco ou temperatura do ar (°C)

V_a – velocidade do ar, calculada a 10 m do chão (km/h)

A medição com o confortímetro é realizada a 1,5m do chão, portanto, a equação é corrigida da seguinte forma:

$$WCI = 13,12 + 0,6215t_a - 11,37 (1,5 V_{a1,5})^{0,16} + 0,4275 t_a (1,5 V_{a1,5})^{0,16}$$

Onde:

$V_{a1,5}$ – velocidade do ar a 1,5m de altura (km/h)

A permanência sob condições de resfriamento pode levar ao congelamento de partes do corpo humano, conforme consta da Tabela 5-7. Os valores em negrito levam ao congelamento em um tempo inferior a 30 minutos.

Tabela 5-7 – Índice WCI e níveis de risco de congelamento. Fonte: NOAA – National Weather Service apud DELTA OHM (2007)

		temperatura do ar °C												
		10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
Velocidade do ar V_a Km/h	10	8.6	2.7	-3.3	-9.3	-15.3	-21.1	-27.2	-33.2	-39.2	-45.1	-51.1	-57.1	-63.0
	15	7.9	1.7	-4.4	-10.6	-16.7	-22.9	-29.1	-35.2	-41.4	-47.6	-51.1	-59.9	-66.1
	20	7.4	1.1	-5.2	-11.6	-17.9	-24.2	-30.5	-36.8	-43.1	-49.4	-55.7	-62.0	-68.3
	25	6.9	0.5	-5.9	-12.3	-18.8	-25.2	-31.6	-38.0	-44.5	-50.9	-57.3	-63.7	-70.2
	30	6.6	0.1	-6.5	-13.0	-19.5	-26.0	-32.6	-39.1	-45.6	-52.1	-58.7	-65.2	-71.7
	35	6.3	-0.4	-7.0	-13.6	-20.2	-26.8	-33.4	-40.0	-46.6	-53.2	-59.8	-66.4	-73.1
	40	6.0	-0.7	-7.4	-14.1	-20.8	-27.4	-34.1	-40.8	-47.5	-54.2	-60.3	-67.6	-74.2
	45	5.7	-1.0	-7.8	-14.5	-21.3	-28.0	-34.8	-41.5	-48.3	-55.1	-61.8	-68.6	-75.3
	50	5.5	-1.3	-8.1	-15.0	-21.8	-28.6	-35.4	-42.2	-49.0	-55.8	-62.7	-69.5	-76.3
	55	5.3	-1.6	-8.5	-15.3	-22.2	-29.1	-36.0	-42.8	-49.7	-56.6	-63.4	-70.3	-77.2
	60	5.1	-1.8	-8.8	-15.7	-22.6	-29.5	-36.5	-43.4	-50.3	-57.2	-64.2	-71.1	-78.0

5.2.5 Graus-hora

O método dos Graus-hora consiste na somatória das diferenças de temperatura entre a temperatura de referência ou temperatura de base – definida a partir de

condicionantes locais – e as temperaturas medidas ou simuladas em determinado contexto.

As temperaturas de base são definidas em um intervalo no qual – para aquela determinada região climática – seja possível manter níveis de conforto sem que haja a necessidade da utilização de condicionadores artificiais (CIBSE, 2006). No presente estudo, foram consideradas como temperaturas de base os 20 °C como temperatura mínima e 26 °C como temperatura máxima. Tal definição implica no entendimento de que quando temperaturas abaixo de 20 °C são registradas em medição, haveria a necessidade de aquecimento do ambiente, e quando temperaturas acima de 26 °C são registradas, haveria a necessidade de resfriamento do ambiente.

Os valores utilizados para o cálculo dos Graus-hora em cada contêiner foram tomados das medições registradas pelo termômetro de globo, cuja diferença de temperatura com a temperatura do ar situa-se na casa dos décimos. O resultado final dos graus-hora é obtido pelo registro da diferença horária entre a temperatura de globo registrada e a temperatura de base. Se a temperatura de globo estiver acima dos 26 °C, a diferença é registrada como hora de resfriamento e, se estiver abaixo dos 20 °C, é registrada como hora de aquecimento. A somatória total das horas de aquecimento e resfriamento resulta no que se denomina graus-hora.

6 RESULTADOS

Aqui serão apresentados os resultados obtidos a partir das medições realizadas durante um ano, nos três contêineres experimentais. O Contêiner 1- tomado como referência, uma vez que não foi provido de qualquer tratamento térmico – será adotado como parâmetro de comparação para a avaliação dos demais.

Para o Contêiner 1 serão apresentados em gráficos os resultados das medições realizadas pelo sistema de medição permanente, que compreende os sensores fixos instalados em todas as superfícies da envoltória, referentes ao dia mais quente e ao dia mais frios registrados durante o experimento. Tais resultados apresentam o comportamento térmico do contêiner nas respectivas datas.

Posteriormente, serão apresentados os resultados das medições realizadas nesse Contêiner referentes ao desempenho da envoltória, conforto térmico, estresse térmico e índice de resfriamento, todas realizadas com o equipamento confortímetro Delta OHM Modelo HD 32.1 e com a estação meteorológica INSTRUTEMP Modelo ITW 8010, além de um sensor de TBS externa. Tais resultados referem-se à resposta térmica que o corpo humano teria caso estivesse utilizando o contêiner para qualquer fim.

Para os Contêineres 2 e 3 serão apresentados os resultados referentes ao comportamento térmico, obtidos pelo sistema de medição permanente, para os dias mais quente e mais frio, respectivamente. Optou-se por apresentar resultados sucintos, mas representativos, para que se possa comparar o desempenho dos tratamentos térmicos adotados nos respectivos contêineres com o desempenho do Contêiner 1, sem tratamento. Serão apresentadas as temperaturas de todas as superfícies dos Contêineres 2 e 3 nos dias mais quente e mais frio, como realizado com o Contêiner 1.

No item 4.4 será apresentada uma comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos três contêineres, assim como um esquema de transferência de calor para cada contêiner, desenvolvido a partir da análise dos resultados, bem como cálculos e resultados acerca do desempenho térmico das coberturas dos três contêineres.

09 de fevereiro – o dia mais quente

Para a escolha do dia mais quente foram determinadas as maiores temperaturas de bulbo seco externas, medidas pela estação meteorológica e pelo sensor de TBS

pertencente ao sistema de medição permanente. A temperatura máxima do ar atingiu 43,1 °C e a mínima, 19°C no dia 9 de fevereiro de 2014, que foi um dia sem chuva, com velocidade máxima do vento de 5,4 m/s e umidade do ar máxima de 89 % às 5h58min e mínima de 24 % às 16h13min.

01 de julho – o dia mais frio

O dia mais frio foi selecionado a partir dos dados de temperatura de bulbo seco externa medidos. No dia 1º de julho de 2014 o ar atingiu a mínima de 4,4 °C, enquanto a máxima chegou a 29,9 °C. A umidade do ar chegou a 99 % à 01h39min e decresceu até 23 % às 15h34min. Foi um dia sem chuva, com velocidade máxima de vento de 2,4 m/s.

6.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONTÊINER 1 (MODELO REFERÊNCIA) NOS DIAS MAIS QUENTE E MAIS FRIO MEDIDOS

A Figura 6-1 apresenta o resultado da medição das temperaturas superficiais na cobertura do Contêiner. No gráfico apresentam-se os valores de Temperatura de Bulbo Seco Externa e da Radiação Solar multiplicada por 0,01, para facilitar a interpretação das informações.

Figura 6-1 - Comportamento da cobertura (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

Observa-se que no período noturno, das 0h00min até próximo de 7h, as superfícies internas e externas da cobertura mantêm-se com temperatura abaixo da TBS externa. No dia mais quente a diferença entre elas não é tão perceptível quanto no dia mais frio, onde as superfícies da cobertura atingem temperatura de 0,7 °C externamente e 0,53 °C internamente, enquanto a TBS apresenta valor de 5,2 °C. A velocidade do vento foi registrada como zero pela estação meteorológica.

Em função do horário, imediatamente anterior ao nascer do sol, pode-se atribuir a baixa temperatura superficial à presença do orvalho matinal sobre a superfície.

Assim que surgem os primeiros raios solares as temperaturas superficiais entram em ascensão, recuando em determinados momentos em função da presença ou ausência de radiação solar – fator que também altera a temperatura do ar.

No dia mais quente, a superfície externa da cobertura atinge temperatura máxima de 73,8 °C, a interna chega a 69,2 °C, enquanto a radiação máxima atinge o valor de 1048 W/m² e o ar, temperatura máxima de 43,1 °C. No dia mais frio, as temperaturas máximas externas e internas da cobertura atingem 50,1 °C e 49,6 °C, respectivamente, enquanto a radiação solar chegou a 653 W/m² e o ar atingiu 29,9 °C.

As temperaturas superficiais na cobertura oscilam principalmente em função da presença da radiação solar direta. Os grandes vales nos valores de temperatura existentes no gráfico do dia mais quente demonstram tal dinâmica, enquanto para o dia mais frio, não há quedas tão acentuadas, pois os meses de inverno se caracterizam por apresentarem céu mais limpo, sem a presença de tantas nuvens.

Assim que a radiação direta cessa, as temperaturas da cobertura decrescem vertiginosamente, voltando a atingir valores inferiores à temperatura do ar. No dia mais quente, às 17h33min a temperatura superficial externa se iguala à temperatura superficial interna, e a partir daí a temperatura externa passa a ter valores menores que os da temperatura interna. É quando se inicia o fluxo de calor do interior para o exterior do contêiner. Quando a radiação total chega a 24 W/m², às 18h08min, o contêiner tem temperatura superficial decrescente e às 18h38min a temperatura superficial passa a ser inferior à temperatura do ar externo. No dia mais frio, às 15h19min a radiação chega a 107,8 W/m² e as temperaturas superficiais da cobertura decrescem e então a temperatura superficial interna passa a ter valores superiores aos da temperatura superficial externa,

e às 16h54min as temperaturas superficiais atingem valores inferiores ao da temperatura do ar externo.

A Figura 6-2 apresenta os resultados da medição da temperatura superficial do piso na face interna do contêiner. O piso é composto por um compensado de madeira de 2 cm de espessura, com revestimento superficial de material plástico imitando madeira.

Figura 6-2 - Comportamento do piso (superfície interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

Como o contêiner está posicionado a 28 cm de altura, a face interna fica em contato com o ar interno, enquanto a face externa fica em contato com o ar externo, mais frio, uma vez que também este sofre influência da temperatura da porção de terra sombreada, geralmente mais fresca.

A dinâmica da temperatura do piso acompanha a da temperatura do ar de forma muito semelhante sem, contudo, sofrer tantos vales e picos quanto a do ar, em função das propriedades da madeira, como a baixa condutividade térmica (por volta de 0,12 W/m.K) e alto calor específico (aproximadamente 1215 J/kg.K). O piso sofre, contudo, a influência do ar quente acumulado no interior do contêiner, como se observa pela ligeira diferença que apresenta em relação à temperatura do ar, quando o contêiner encontra-se sob radiação solar direta. Mesmo no período noturno o piso é levemente mais quente que o ar, o que pode ser consequência da temperatura superficial do material sintético que reveste a madeira, bem como a capacidade de acúmulo de calor da própria madeira, ou seja, de sua difusividade e efusividade térmicas, como descrito no Capítulo 2.

A Figura 6-3 apresenta as temperaturas superficiais na parede Oeste. Observa-se que a radiação solar indireta exerce papel importante na elevação das temperaturas

superficiais, pois já nos primeiros momentos de radiação, as temperaturas superficiais apresentam diferença crescente em relação à temperatura do ar.

Figura 6-3 - Comportamento da face Oeste (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

O pico de temperatura superficial interna e externa ocorre após as 13h, quando a radiação direta atinge a superfície. Os valores de temperatura decrescem logo depois, pois o contêiner passava a ser sombreado a partir de um determinado horário da tarde, devido à presença de árvores e de um talude na direção Oeste. A diferença entre a temperatura superficial externa e interna é pequena, devido à alta condutividade térmica do material e à pequena espessura.

A Figura 6-4 traz os resultados das medições realizadas na face Norte do Contêiner 1. No dia mais quente, as temperaturas superficiais apresentam-se – antes do amanhecer – muito próximas à temperatura do ar, ou ligeiramente inferiores a esta. No dia mais frio, as temperaturas superficiais apresentam diferença de até 2,3°C da temperatura do ar no mesmo horário. As temperaturas entram em ascensão assim que se registram os primeiros valores de radiação solar.

A face Norte apresenta as maiores diferenças de temperatura entre as superfícies interna e externa. Tal fator pode ocorrer devido à convecção, já que os ventos vêm predominantemente da direção Norte durante os horários em que o Contêiner se encontra sob radiação solar.

Figura 6-4 - Comportamento da face Norte (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

Outra peculiaridade da face Norte é que as temperaturas superficiais obtidas no dia mais frio são superiores às obtidas no dia mais quente. Isso se deve à altitude solar, muito menor nos meses de inverno, o que faz com que a radiação solar direta atinja a superfície Norte em ângulos menores do que no verão. No verão, devido à altitude solar, o Contêiner ganha mais calor pela cobertura, como se pode observar na Figura 6-1, ao passo que no inverno o ganho térmico se dá também pela face Norte. A diferença entre as temperaturas superficiais e a temperatura do ar externo também é muito maior no dia mais frio.

Na Figura 6-5 apresentam-se os resultados das medições na face Leste. Nota-se que as temperaturas superficiais elevam-se bruscamente assim que a radiação solar se inicia, atingindo seu pico em pouco tempo. Após atingir as maiores temperaturas, a superfície apresenta perda de calor – a partir do momento em que o sol deixa de incidir diretamente sobre a face Leste - até o momento em que o Contêiner 1 registra o maior ganho térmico total durante o dia, como será apresentado na Figura 6-7, onde serão analisados os resultados das temperaturas de globo.

Figura 6-5 - Comportamento da face Leste (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

Depois deste curto período de estabilização das temperaturas superficiais da face Leste, registra-se nova tendência de queda, tanto no dia mais quente quanto no dia mais frio, e então as temperaturas passam a acompanhar muito proximamente a temperatura do ar externo.

A Figura 6-6 apresenta o comportamento térmico da face Sul. No verão, no início do dia, o sol atinge diretamente esta face nos primeiros momentos da manhã, como se pode ver pela carta solar constante do Capítulo 3. As temperaturas superficiais acompanham a dinâmica da temperatura do ar externo, embora sejam maiores, devido ao ganho térmico total do contêiner.

Figura 6-6 - Comportamento da face Sul (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

Durante o inverno o sol não atinge diretamente a face Sul. A temperatura externa da superfície apresenta valores muito próximos aos da temperatura do ar na maior parte do dia, com exceção do período em que o contêiner passa a concentrar calor, entre o

horário de 10h e 15h, aproximadamente, no qual as temperaturas superficiais superam a temperatura do ar. A temperatura da superfície interna é mais alta que a da externa, devido ao ganho térmico advindo principalmente da cobertura, no verão, e da cobertura e da face Norte, no inverno. Além disso, uma superfície emite radiação para a outra.

Na Figura 6-7 estão os resultados das temperaturas de globo. Durante as medições realizadas com o confortímetro, apresentadas adiante, observou-se que a diferença entre as temperaturas de bulbo seco no interior do contêiner e as temperaturas de globo são pequenas, frequentemente permanecendo na casa do décimo de grau Celsius. Embora as análises sobre a temperatura interna do contêiner sejam feitas nos presentes itens a partir da temperatura de globo, estas servem de parâmetro para que se estimem também as temperaturas de bulbo seco internas.

Figura 6-7 - Comportamento do termômetro de globo no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

No dia mais quente, antes do amanhecer, a temperatura de globo permanece muito próxima da temperatura do ar externo, ao passo que no dia mais frio, esta permanece em valores inferiores. Isso pode se dever ao fato de que a cobertura realiza troca térmica com o céu, cujas temperaturas são baixíssimas nos dias frios. A cobertura, por sua vez, atinge valores muito baixos de temperatura, o que também diminui as temperaturas registradas pelo termômetro de globo.

Sob a ação da radiação solar, a temperatura de globo se eleva, tanto no dia mais quente quanto no dia mais frio, atingindo seu pico durante o momento no qual se registram os maiores valores de radiação solar, período no qual o contêiner concentra o

máximo de calor durante o dia. Após isso, a temperatura de globo apresenta queda, até que atinge um ponto no qual acompanha a dinâmica da temperatura do ar externo.

6.1.1 Avaliações Térmicas do Contêiner 1

As medições no Contêiner 1 foram realizadas com o confortímetro nas datas constantes da Tabela 6-1-Datas em que foram realizadas as medições, de acordo com a disponibilidade do equipamento, utilizado de forma compartilhada com outro pesquisador.

Tabela 6-1-Datas em que foram realizadas as medições com o confortímetro

2013	2014											
dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
27 a 30	06 a 10	3 a 15	10 a 17	1 a 12	15 a 31	01 a 16	14 a 22	7 a 15	2 a 10	05 a 11 ³	24 a 28	12 a 18

Os resultados apresentados nos itens a seguir foram obtidos com o equipamento portátil da Delta OHM, modelo HD 32.1, o confortímetro, além das interações deste com resultados obtidos a partir dos sensores permanentes ou da estação meteorológica.

6.1.1.1 Avaliação de estresse térmico (Índice IBUTG)

A medição dos valores de IBUTG determina a possibilidade de que o ambiente seja utilizado para o trabalho ininterrupto, quando não se encontra sob temperaturas que levem ao estresse térmico, ou com redução de jornada de trabalho, caso as temperaturas obtidas a partir da equação que considera a temperatura de bulbo úmido e a temperatura de globo, superem os 30°C.

Os valores médios mensais de IBUTG obtidos nas medições realizadas no Contêiner 1 encontram-se na Figura 6-8.

³ A medição referente a outubro foi realizada na primeira semana de novembro, excepcionalmente, devido à perda involuntária de dados do confortímetro obtidos em medições realizadas no período de 1 a 7 de outubro.

Figura 6-8 - Média mensal de valores de IBUTG (°C) para o Contêiner 1

De acordo com a NR-15, considerando a realização de trabalho leve, as medições evidenciam situações de estresse térmico no interior do contêiner metálico, quando mantido sem tratamento térmico e ventilado naturalmente. Observa-se, pela Figura 6-9, que nos meses de fevereiro, março e abril há necessidade de aplicação das restrições quanto à jornada de trabalho, como determinado pela norma regulamentadora.

Figura 6-9 - Número de horas/dia (h/dia) com valores de IBUTG acima de 30°C (média mensal)

Dos valores médios mensais de IBUTG que ultrapassam o limite de 30 °C, 82 % incluem-se na faixa entre 30,1 °C e 30,5 °C, que determina que haja descanso de 15 minutos a cada hora de trabalho, ao passo que 18 % se enquadram na faixa que vai de 30,7 °C a 31,4 °C, cujo regime de trabalho é determinado por descanso de meia hora a cada hora trabalhada. Não foram obtidos resultados superiores a essa faixa.

6.1.1.2 Avaliação de Wind Chill Indice (WCI)

Inicialmente, antes de realizadas as medições nos períodos de frio, aventou-se que a condição de desconforto predominante no interior dos contêineres metálicos ocorreria principalmente em situações de calor, sob o efeito da radiação solar, já que relatos de ocupantes de contêineres apontavam as altas temperaturas internas como fator limitante à utilização de tais instalações sob condicionamento passivo.

Contudo, ao longo dos meses de medição, foram registradas inúmeras situações nas quais o fator de desconforto deveu-se principalmente às temperaturas baixas no interior do contêiner, atingindo valores que escaparam dos limites mínimos para o conforto adaptativo.

Durante os meses mais frios medidos – aqui considerando maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro - efetuou-se registros de temperaturas inferiores a 10 °C no interior do Contêiner 1, conforme se observa na Figura 6-10. Durante o período em que o Contêiner 1 se encontra sob ação da radiação solar, não foram registrados valores críticos para o índice WCI.

Figura 6-10 – WCI (Wind Chill Index) – média mensal registrada nos meses de maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro de 2014.

A frequência de ocorrência das situações de desconforto sob temperaturas abaixo de 10°C apresenta-se conforme a Figura 6-11.

Figura 6-11 – Número de horas/dia (h/dia) cujo índice WCI atingiu valores inferiores a 10°C no interior do Contêiner 1.

Apesar das inúmeras horas de desconforto térmico sob condição de frio, não foram registrados valores de WCI que pudessem levar ao congelamento de partes do corpo humano.

6.1.1.3 Conforto Térmico – Modelo Adaptativo

As Temperaturas Operativas Médias medidas nos meses de dezembro de 2013 a dezembro de 2014 indicam que - seja no verão ou no inverno - há grande amplitude térmica no interior do contêiner, partindo de temperaturas inferiores aos limites de conforto no período noturno e atingindo temperaturas que superam largamente os limites de conforto para o calor, conforme se observa nas Figura 6-12 e Figura 6-13.

Figura 6-12 – Temperatura Operativa (°C) média mensal no interior do Contêiner 1

Nota-se que no período noturno, as temperaturas operativas atingem valores baixos, demandando aumento do fator de isolamento térmico da roupa ou do contêiner, ou mesmo certo tipo de aquecimento no interior do mesmo. Durante o dia, os valores de temperaturas tendem a acompanhar a intensidade da radiação solar, atingindo o pico de temperatura entre 12h e 15h, horário em que a radiação também alcança os maiores valores, tanto no inverno quanto no verão.

O registro das medições de temperatura operativa e temperatura de bulbo seco externa oferecem informações quanto à sensação térmica. Conforme nota-se pela Figura 6-13, a predominância de valores situados fora dos limites de sensação de conforto,

tanto atingindo temperaturas mais altas, quanto mais baixas – estas predominantemente ocorridas no período noturno.

A ASHRAE 55 (2010) determina que sejam estabelecidos parâmetros de conforto para temperaturas operativas situadas dentro do intervalo de 10 °C a 33,5 °C para a ventilação natural, conforme se observa pelas linhas de limites constantes da Figura 6-13. Temperaturas operativas inferiores a 10 °C ou que superem os 33,5 °C estariam, portanto, fora do limite de conforto adaptativo.

Figura 6-13 - Sensação Térmica segundo o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2010)

Observa-se que o mês no qual há maior predominância de pontos situados dentro da zona mais próxima ao conforto é dezembro de 2013, ao passo que janeiro é o mês com maior percentual de insatisfação devido às altas temperaturas e maio, junho e julho os meses com maior percentual de insatisfação devido às baixas temperaturas, conforme a

Tabela 6-2. Contudo, tais resultados foram obtidos em medições realizadas em um ano atípico.

Na Figura 6-14 apresenta-se o resultado final da avaliação de satisfação quanto à sensação térmica. Fica evidente que, embora o experimento tenha se localizado em clima tropical, na Zona Bioclimática Brasileira nº 3, o maior percentual de insatisfação deve-se ao frio, e não ao calor, conforme se cogitou antes de se verificarem os resultados das medições no período de inverno.

Tabela 6-2 – Horas por dia (média mensal) de satisfação quanto à sensação térmica

mês	Fora dos 80% de satisfação inferior	90% de satisfação inferior	conforto	90% de satisfação superior	Fora dos 80% de satisfação superior
dezembro-13	8	3	9	-	4
janeiro	7	2	5	-	10
fevereiro	5	4	5	1	9
março	11	1	3	-	9
abril	12	1	2	2	7
maio	16	2	3	3	-
junho	16	-	4	2	2
julho	16	-	3	1	4
agosto	15	2	4	-	3
setembro	14	-	3	1	6
outubro	12	1	4	2	5
novembro	10	4	3	1	6
dezembro-14	12	2	1	-	9

Na

Tabela 6-2 foram contabilizados os pontos de medição correspondentes a cada mês, de acordo com sua posição no gráfico da Figura 6-13, evidenciando que há predominância de ocorrências situadas fora dos parâmetros de conforto, ou seja, localizadas acima ou abaixo dos limites superior e inferior de 80% de satisfação, conforme se observa na Figura 6-14.

Figura 6-14 - Percentual total de satisfação quanto à sensação térmica, medido de dezembro de 2013 a dezembro de 2014.

6.1.1.4 Desempenho da envoltória segundo as Temperaturas de Bulbo Seco

Aqui serão apresentados os resultados das medições de desempenho do Contêiner 1 segundo o parâmetro estabelecido pela ABNT NBR 15575 referente às temperaturas de bulbo seco. A avaliação de desempenho segundo a transmitância da cobertura será apresentada adiante, juntamente com as análises referentes aos Contêineres 2 e 3, para fins de comparação.

As medições de temperatura de bulbo seco apontam a intensidade dos fenômenos de transferência de calor ocorridos na envoltória do contêiner. Observando-se os gráficos formulados para os meses de dezembro de 2013 a dezembro de 2014 pode-se constatar que nos períodos noturnos a envoltória realiza trocas negativas com o ambiente externo, isto é, perde calor, enquanto durante o dia, sob a ação da radiação solar, absorve e acumula calor, atingindo temperaturas de bulbo seco internas que superam as mesmas temperaturas medidas no ambiente externo. Segundo a ABNT - NBR 15575 (2013), para que se atinja o critério mínimo de desempenho na envoltória, a temperatura do ar interno deve ser, no máximo, igual à temperatura do ar medida no ambiente externo, nos meses de verão, e no mínimo igual à temperatura do ar externo mais 3°C, nos meses de inverno.

As Figuras 6-15 apresentam os gráficos de desempenho térmico da envoltória para os meses de fevereiro e julho de 2014.

Figuras 6-15 – Gráficos de Desempenho (Temperatura de Bulbo Seco Internas x Temperatura de Bulbo Seco Externas)

A avaliação do desempenho térmico da envoltória torna-se mais consistente quando se avalia a partir da média mensal as horas em que o desempenho atende aos critérios mínimos estabelecidos pela ABNT-NBR 15575 (2013), conforme Figura 6-16.

Figura 6-16 – Número de horas por dia (média mensal) em que a envoltória do Contêiner 1 atinge o desempenho mínimo⁴

O gráfico aponta que a envoltória demanda intervenções tanto para que se diminua o ganho térmico nos meses de verão e nos demais meses, quando o contêiner se encontra sob ação da radiação solar, quanto para que se impeçam as trocas negativas, durante o período noturno nos meses de inverno e nos demais, nos quais se registram valores baixos de temperatura de globo, demonstrando que o desempenho é insuficiente durante o ano todo.

6.1.1.5 Graus-hora

A avaliação térmica do Contêiner 1 segundo o método dos Graus-hora reforça o diagnóstico feito pelos demais métodos até aqui apresentados.

Em todos os meses houve horas de aquecimento e horas de resfriamento, o que demonstra que o desempenho da envoltória do Contêiner 1 é bastante insuficiente para que as trocas térmicas sejam minimizadas, a fim de que se atinja alguma estabilidade térmica em seu interior.

O gráfico apresentado na Figura 6-17 demonstra que mesmo durante os meses de verão – considerando aqui outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março – houve horas de aquecimento, predominantemente nos horários noturnos. Em tais meses, contudo, a necessidade de resfriamento é maior do que a de aquecimento. No

⁴ Considerando os meses de verão como outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março, e os meses de inverno abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, para entendimento dos padrões adotados para determinar desempenho mínimo, conforme descrito no Capítulo 4 – Materiais e Métodos.

mês mais crítico, fevereiro, as horas de aquecimento correspondem a 10 % das horas de resfriamento.

Figura 6-17 - Avaliação térmica do Contêiner 1 segundo o método dos Graus-hora

A necessidade de aquecimento nos meses de inverno – abril, maio, junho, julho, agosto e setembro – chega a superar largamente a necessidade de resfriamento. No mês mais crítico, julho, as horas de resfriamento correspondem apenas 17 % das horas de aquecimento.

Na soma final, foram identificadas 16378 horas de aquecimento, contra 13944 horas de resfriamento, ou seja, 54% do total de horas fora dos limites de conforto foram horas em que houve necessidade de aquecimento, enquanto 46% foram horas nas quais houve necessidade de resfriamento. Note-se que as horas de resfriamento ocorrem durante os momentos em que o contêiner se encontra sob ação da radiação solar.

6.1.2 DISCUSSÕES

A partir das medições realizadas pode-se constatar que a envoltória dos contêineres metálicos, sem tratamento térmico, não oferece resistência térmica suficiente para diminuir as trocas térmicas com o ambiente, tanto para as temperaturas

baixas, quanto para as quentes. As instalações confeccionadas com o aço Tipo X permanecem em grande parte do tempo sob altas temperaturas, quando se encontram sob ação da radiação solar, apesar de terem sido constatados poucos episódios de estresse térmico. Mesmo tendo sido observados somente alguns episódios de estresse térmico, deve-se notar que a restrição de jornada de trabalho determinada pela NR-15 pode trazer impactos que poderiam ser evitados com o adequado tratamento térmico da envoltória dos contêineres. Ainda assim, as temperaturas atingidas permanecem predominantemente em zona de desconforto térmico, já que o percentual de pontos medidos fora dos pontos de conforto atinge os 73,1% conforme demonstra a Figura 6-14, embora os resultados obtidos nas medições para avaliação do estresse térmico sejam poucos, se comparados à totalidade das medições, e os resultados de desconforto para o frio não tenham atingido a condição crítica de congelamento.

As análises de desempenho pela temperatura do ar evidenciam tal constatação. A envoltória apresenta alta absorção da radiação, e de modo muito semelhante, à condução do calor, sendo necessário, para amenizar tal situação, que os parâmetros de resistência térmica sejam melhorados.

6.2 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONTÊINER 2 (C₂) NOS DIAS MAIS QUENTE E MAIS FRIO MEDIDOS

O Contêiner 2 é composto de aço Tipo X, assim como o Contêiner 1, possuindo exatamente as mesmas dimensões. A parte interna, contudo, apresenta materiais destinados a desempenhar papel de isolante térmico.

Na Figura 6-18 aparece o aspecto do interior do Contêiner, com o forro utilizado pela empresa fabricante para fornecer um produto com um acabamento agradável, já que os interstícios entre o aço corrugado e o forro são preenchidos por poliestireno expandido de 2 cm de espessura, cortado em tiras, como na Figura 6-19.

Figura 6-18 – Interior do Contêiner 2 (C2)

Ressalta-se que o tratamento térmico existente no Contêiner 2 foi elaborado pelo fabricante, sendo - na ocasião do início do experimento - um dos produtos que a empresa disponibilizava ao mercado, como foi solicitado pela pesquisadora para a realização do experimento.

Figura 6-19 – Disposição do isolamento térmico existente nas paredes do Contêiner 2

O poliestireno expandido foi instalado sob toda a cobertura de forma homogênea. Nas paredes, o poliestireno foi inserido somente nos interstícios entre as saliências do aço corrugado e o forro de chapa dura de madeira, conforme Figura 6-19.

As propriedades térmicas dos materiais utilizados como tratamento térmico no Contêiner 2 são:

Tabela 6-3 – Propriedades dos materiais de isolamento térmico do Contêiner 2. Fontes: INCROPERA et al. (2008), <http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm> e <http://www.eucatex.com.br/pt/chapas/produto.aspx?id=33>

Material	Massa Específica Típica (kg/m ³)	Condutividade Térmica Típica (W/m.K)
Poliestireno expandido (isopor)	35	0,29
Chapa dura de fibra de madeira (Eucaplac)	800 (mínimo)	0,3

De forma idêntica ao que foi exposto a respeito do comportamento térmico do Contêiner 1, apresentar-se-ão as informações sobre o comportamento térmico do Contêiner 2 para os mesmos dias: 9 de fevereiro, como sendo o dia mais quente e 1º de julho, como sendo o dia mais frio.

A Figura 6-20 apresenta o comportamento da cobertura, externamente e internamente, nos dias mais quente e mais frio.

Figura 6-20 - Comportamento da cobertura (superfícies externa e interna) (a) no dia mais quente e (b) no dia mais frio

A superfície externa atinge - no dia mais quente - a temperatura máxima de 74,3 °C, às 13h08min, ao passo que na face interna, no mesmo horário, registra-se a

temperatura de 45,5 °C. Externamente, a dinâmica da temperatura acompanha a curva da radiação solar, apresentando picos e vales conforme as oscilações da radiação. Já na superfície interna, identifica-se dinâmica diferente, com temperaturas ascendentes até às 11h, aproximadamente, uma leve queda, acompanhando o pronunciado vale registrado na temperatura da superfície externa, e posterior acúmulo de calor, mantendo a temperatura da superfície interna quase constante até o momento em que a radiação solar diminui acentuadamente, assim como a temperatura da superfície externa. Ainda assim, a superfície interna apresenta queda na temperatura de forma mais lenta, devido às propriedades térmicas da chapa dura de madeira, bem como ao calor acumulado nas tiras de isopor. Nos horários noturnos, a face interna mantém temperatura ligeiramente mais alta que a face externa, cujas temperaturas se aproximam muito da temperatura do ar externo.

Já no dia mais frio, com céu limpo, torna-se mais clara a forma como se dá o comportamento das duas superfícies. Durante o período noturno, a superfície externa atinge temperaturas extremamente baixas, enquanto a temperatura da face interna se mantém aproximadamente 5 °C acima das temperaturas da face externa. Esta permanece ligeiramente mais baixa que a temperatura do ar externo. Assim que a incidência de radiação solar se inicia, ambas as superfícies se aquecem. A superfície externa esquenta rapidamente até os 35 °C, aproximadamente, enquanto a interna permanece por longo tempo abaixo de 30 °C. A diferença máxima registrada entre as duas superfícies no dia mais frio é de 21,7 °C. Assim que cessa a radiação solar direta, a superfície externa se resfria bruscamente, enquanto a interna tem queda mais lenta, aproximando-se bastante da temperatura do ar externo.

Na Figura 6-21 apresentam-se os resultados das medições feitas no piso do Contêiner 2. Semelhantemente ao Contêiner 1, as temperaturas acompanham muito proximamente a temperatura do ar externo sendo, contudo, ligeiramente inferiores às registradas no Contêiner 1 no dia mais quente, e ligeiramente superiores, no dia mais frio.

Figura 6-21 - Comportamento do piso (superfície interna) (a) no dia mais quente e (b) no dia mais frio

A Figura 6-22 apresenta a medição realizada na face Oeste. No dia mais quente, a diferença máxima entre as temperaturas da face externa e interna foi de 15,1 °C, enquanto no dia mais frio, foi de 10,3 °C. Em ambos os dias, no período noturno, as superfícies apresentam temperaturas muito próximas às do ar externo. No dia mais quente, contudo, o aquecimento se inicia logo pela manhã, a partir da presença da radiação difusa, já que fica nítido o horário em que os raios solares incidem diretamente sobre a superfície, ou seja, onde se observa o pico de temperatura.

Figura 6-22 - Comportamento da face Oeste (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

No dia mais frio, observa-se que a face interna se aquece antes da face externa, por influência do ganho de calor do contêiner como um todo, já que somente no período da tarde é que a face externa apresenta temperaturas consideravelmente mais altas que as do ar externo. Ao contrário do que ocorre na face Leste (Figura 6-24), a temperatura da superfície interna não se mantém constante após o registro do pico, pois o contêiner como um todo entra em processo de perda de calor.

As medições da face Norte apresentam-se na Figura 6-23. Como ocorrido com o Contêiner 1, as temperaturas máximas praticamente não se diferenciam entre os dias mais quente e mais frio, embora a temperatura do ar e a radiação solar sejam bastante diferentes. À semelhança do que acontece no Contêiner 1, isso se deve à diferença entre altitude solar no verão e no inverno, sendo que no último a radiação solar atinge a face Norte em ângulo menor do que no verão, o que leva ao aumento da temperatura. A diferença entre as temperaturas da face externa e interna é mais pronunciada no dia mais frio, uma vez que o ganho de calor total do Contêiner 2 também é muito menor, o que impacta os registros de temperatura da face interna. Nos períodos noturnos, para o verão e o inverno, as temperaturas das superfícies internas e externas permanecem próximas à temperatura do ar externo.

Figura 6-23 - Comportamento da face Norte (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

A Figura 6-24 apresenta os resultados obtidos na face Leste. A temperatura da superfície interna é ligeiramente superior à da externa durante o período noturno, para ambas as datas. A superfície externa se aquece rapidamente, assim que a radiação solar atinge a face Leste, enquanto a temperatura superficial interna sobe mais lentamente, decrescendo pouco para posteriormente permanecer praticamente estável até que haja resfriamento completo do contêiner. Enquanto a temperatura da superfície externa oscila bruscamente em função da radiação, a superfície interna apresenta relativa estabilidade. No dia mais frio, a superfície interna se mantém aquecida no período da tarde, enquanto a superfície externa se resfria rapidamente.

Figura 6-24 - Comportamento da face Leste (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

A Figura 6-25 traz os resultados obtidos para a face Sul. Durante o verão o sol incide diretamente sobre essa face nas primeiras horas da manhã, como pode ser averiguado no momento em que as temperaturas interna e externa se elevam instantaneamente. As temperaturas, nos momentos seguintes, tendem a ascender, devido à radiação indireta, acompanhando nos momentos mais quentes a dinâmica da temperatura do ar, que por sua vez acompanha as oscilações da radiação solar.

Figura 6-25 - Comportamento da face Sul (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

Já no dia mais frio, a face Sul se aquece externamente por influência da radiação indireta, enquanto a superfície interna atinge temperaturas mais elevadas, devido ao ganho de calor do contêiner por todas as demais superfícies, atingindo a temperatura máxima no fim de tarde, pouco antes do fim da presença da radiação.

Os resultados do termômetro de globo são mostrados na Figura 6-26. No dia mais quente a temperatura sobe lentamente, se comparada à do Contêiner 1. No entanto, o Contêiner 2 atinge seu pico de temperatura após o pico da radiação, quando essa já está em decréscimo, o que denota que ocorre um acúmulo de calor no interstício entre a parede de aço externa e o forro interno, onde encontra-se o poliestireno e o ar quente confinado. As paredes desse contêiner continuam a ganhar calor mesmo após a radiação iniciar queda. Nota-se também o atraso na perda de calor, uma vez que a temperatura do ar externo – por volta das 16h – já decresceu, enquanto que a de globo permanece perdendo calor lentamente.

Figura 6-26 - Comportamento do termômetro de globo no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

6.2.1 Graus-hora

As horas de aquecimento acontecem durante os períodos noturnos, nos meses de inverno e nos demais meses, porém em menor proporção nesses últimos. Durante os momentos em que o contêiner encontra-se sob a ação da radiação solar, registram-se as horas de resfriamento, em maior proporção nos meses de verão. Os dois fenômenos – horas de aquecimento e resfriamento – ocorrem em todos os meses, evidenciando a insuficiência da envoltória na diminuição das trocas térmicas.

A avaliação do Contêiner 2 segundo o método dos graus-hora demonstra que o tratamento térmico existente não é suficiente para que seja atingida temperatura de conforto no interior do mesmo sem que haja condicionamento artificial. Embora o resultado final tenha sido melhor do que o obtido para o Contêiner 1, ou seja, com

menor quantidade de horas de resfriamento ou aquecimento na soma final, o número registrado ainda é alto, conforme Figura 6-27.

Figura 6-27 - Graus-hora para o Contêiner 2

6.2.2 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para o Contêiner 2 demonstram que o isolamento térmico executado com poliestireno expandido e chapa de madeira, como feito na cobertura, tem grande capacidade de redução do ganho de calor para o interior do contêiner, bem como na redução de perdas durante os períodos de resfriamento. Tal sistema de isolamento seria viável também para a utilização do contêiner com condicionadores de ar, diminuindo a demanda por energia elétrica para manter a temperatura dentro dos padrões de conforto, se comparado aos valores obtidos para o Contêiner 1.

No entanto, da forma como o sistema de isolamento está disposto – com faixas de isopor a cada reentrância do aço corrugado – o desempenho total do isolamento térmico é prejudicado, e a diferença de temperatura entre o exterior e o interior que se observa na cobertura não se repete nas paredes, nem tampouco nas temperaturas de globo.

O Contêiner 2 aparece, no entanto, como uma possibilidade a ser utilizada quando da necessidade de isolamento térmico, principalmente se combinado com outros sistemas que ajudem a reduzir o ganho térmico.

6.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CONTÊINER 3 (C₃) NOS DIAS MAIS QUENTE E MAIS FRIO MEDIDOS

Serão apresentados os resultados correspondentes ao comportamento térmico do Contêiner 3 nos dias mais quente e mais frio, como foi apresentado para os demais contêineres. No entanto, faz-se necessário abordar aspectos relevantes acerca do revestimento refletivo para que se possam compreender melhor as propriedades térmicas do mesmo quando da apresentação dos resultados.

6.3.1 Breve contextualização sobre a escolha do revestimento refletivo e suas propriedades

Partindo da avaliação das características térmicas obtidas nas medições realizadas no Contêiner 1, sem tratamento térmico, pode-se afirmar que é necessário que se aponte possibilidade de diminuição de ganho térmico durante as horas em que o contêiner permanece sob radiação solar, a fim de que se evitem as horas de desconforto e estresse térmico, que poderiam levar ao comprometimento das condições de permanência do corpo humano em tal ambiente.

Considerando que há grande possibilidade de intervenção a fim de que seja obtida a redução do ganho térmico de forma passiva, ressaltam-se alguns aspectos relevantes quando se tratam de contêineres metálicos. Tais edificações foram direcionadas à ocupação humana devido a seu caráter de flexibilidade, facilidade de transporte e leveza, aspectos que devem ser preservados em qualquer intervenção que se pense realizar. Desse modo, é necessário partir de alguns princípios norteadores para que qualquer intervenção seja proposta:

- O material utilizado para a confecção dos contêineres (aço) é extremamente condutivo ao calor, de baixa resistência térmica e praticamente nenhuma inércia térmica;

- O volume no interior do contêiner pode ser escasso em determinados arranjos, portanto não é adequado que se aumente ilimitadamente a espessura das paredes a fim de que se diminua a condutividade térmica e se aumente a resistência térmica;

- Os materiais a serem utilizados para o tratamento térmico precisam ser leves e resistentes à torção, esforço comum sofrido pelas paredes e estrutura do contêiner quando do içamento para transporte.

Considerando tais premissas, aventou-se realizar medições experimentais em um contêiner revestido externamente com um produto que tivesse a função servir como a primeira barreira à entrada de calor em função de suas propriedades ópticas: a tinta fria ou refletiva.

6.3.1.1 Caracterização do material frio utilizado

O revestimento utilizado no modelo experimental foi o produto Nanothermic 1, desenvolvido, fabricado e comercializado pela empresa Nanotech do Brasil.

Como o nome do produto sugere, constitui-se de nano partículas com elevados índices de refletância e emissividade, o que confere ao produto a qualidade de atingir baixas temperaturas superficiais, em comparação aos materiais convencionais.

Foram realizados ensaios nas amostras iniciais do produto para verificação de seus índices de refletância, emissividade e SRI, conforme consta da Tabela 6-4.

Tabela 6-4 - Características iniciais do revestimento refletivo utilizado, segundo os métodos de ensaio determinados pelas normas ASTM C 1549, ASTM E891-87 (b891), ASTM C 1371 e ASTM E 1980-11.

Análise	Refletância	Emissividade	SRI
PRI Construction Technologies (EUA / Laudo encomendado pela empresa fabricante)	0,80	0,90	99
IPT (Laudo encomendado pela empresa fabricante)	0,87	1,00	110
Laboratório de Microestruturas (PCC- EP-USP)	0,79	0,87	98

A aplicação do produto é simples, realizada por meio de uma pistola acionada por bomba de pressão. A camada de revestimento deve possuir $0,25\mu\text{m}$, para que se possa obter rendimento máximo do produto.

Foram feitas duas tentativas de aplicação. Na primeira, as condições de clima estavam bastante desfavoráveis à aplicação do produto, com sensação térmica de aproximadamente 8°C . Após ser aplicado, o produto craquelou sobre a superfície do contêiner conforme mostra a Figura 6-28, necessitando ser retirado com espátula para que se pudesse realizar nova aplicação.

Figura 6-28- Revestimento aplicado sob condições climáticas adversas para a fixação do produto

Na segunda tentativa, ocorrida em dia de clima mais ameno, o produto aderiu completamente à superfície metálica, sem apresentar irregularidades ou falhas observáveis a olho nu.

A Figura 6-29 mostra o processo de aplicação do revestimento no contêiner.

Figura 6-29 - Processo de aplicação do revestimento refletivo no contêiner experimental

Para a presente pesquisa, a fim de que se pudessem observar as alterações das propriedades ópticas do revestimento ao longo do tempo, foram dispostas sobre a cobertura do contêiner revestido 13 amostras, compostas por chapa de aço Tipo X de medida variável, sobre as quais foi aplicado o mesmo produto utilizado como revestimento externo no contêiner experimental.

As chapas foram sendo retiradas progressivamente, uma a cada mês, entre o 13° e 15° dias, para que se pudesse analisar o comportamento do material ao longo do ano de medição.

Foram realizados ensaios no Laboratório de Microestrutura da EP/USP, a fim de verificar a alteração das características iniciais de refletância global (G03 Committee, 1992) e emissividade (C16 Committee, 2010) e, conseqüentemente, do SRI (D08 Committee, 2011), conforme a Figura 6-30.

Figura 6-30- Características do revestimento ao longo do período de exposição

Nota-se que enquanto a emissividade sofre alterações mínimas, a refletância decresce bruscamente até o 250º dia de exposição, aproximadamente, para depois entrar em ascensão. Tal fator se explica pela incidência de chuva sobre as amostras após o 250º dia, removendo porção do material particulado e outros sedimentos até então depositados sobre as superfícies.

6.3.1.2 Comportamento térmico do Contêiner 3

Como apresentado para os Contêineres 1 e 2, neste item serão analisadas as superfícies do Contêiner 3 segundo seu comportamento térmico, para os mesmos dias: 9 de fevereiro, como sendo o dia mais quente e 1º de julho, como sendo o dia mais frio.

A Figura 6-31 apresenta os resultados da cobertura do Contêiner 3 nos dias mais quente e mais frio. Durante o período noturno, em ambas as datas, a temperatura superficial atinge valores inferiores aos da temperatura do ar externo, e no dia mais frio, até o início da presença da radiação solar, tais valores se aproximam de zero.

Figura 6-31 - Comportamento da cobertura (superfícies externa e interna) (a) no dia mais quente e (b) no dia mais frio

A diferença entre a temperatura externa e interna da superfície é significativa, ainda que a espessura da camada de revestimento a impeça de exercer papel quanto à resistência à condução térmica. Tal diferença é mais pronunciada no dia mais frio.

Na Figura 6-32 aparecem os resultados das medições realizadas no piso, durante o dia mais quente e o dia mais frio medidos. No dia mais quente, a temperatura do piso cresce conforme a temperatura do ar externo aumenta, embora com um pequeno atraso, ocasionado devido às propriedades térmicas da madeira e do revestimento plástico existente no piso. Ao cessar a radiação solar, as temperaturas do ar e do piso decrescem, a última mais uma vez com pequeno atraso.

Figura 6-32 - Comportamento do piso (superfície interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

No dia mais frio a temperatura do piso acompanha a temperatura do ar, mas com uma diferença maior do que ocorre no dia mais quente. O aquecimento também se dá com atraso, mas o resfriamento do piso é simultâneo ao do ar nessa situação.

A Figura 6-33 traz os resultados das medições realizadas na parede Oeste⁵. Apresentam-se os dados referentes à superfície interna, que permitem que se tenha uma estimativa do comportamento físico da superfície externa.

Figura 6-33 - Comportamento da face Oeste (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

A face Oeste apresenta elevação da temperatura de forma a acompanhar a temperatura do ar até o momento em que há um pico nos valores de radiação solar, que fazem a temperatura superficial se elevar. Assim que o sol atinge diretamente a face Oeste, a temperatura aumenta ainda mais, até que a radiação cesse.

Já no dia mais frio, a temperatura superficial interna permanece com valores inferiores aos da temperatura do ar externo até o momento em que os raios solares atingem a face Oeste, causando breve elevação que, contudo, não se mantém, decrescendo novamente a valores inferiores aos da temperatura do ar.

A Figura 6-34 demonstra o comportamento da face Norte. No dia mais quente, as temperaturas externas e internas acompanham – no período noturno – a temperatura do ar, permanecendo um pouco inferiores. Momentos antes do início da radiação solar, a temperatura superficial diminui, talvez por efeito de convecção, somado a uma leve diminuição na temperatura do ar, para depois iniciar ascensão, acompanhando muito proximamente a temperatura do ar. Nota-se uma pequena diferença entre as temperaturas das superfícies externa e interna nos períodos em que as temperaturas atingem seu ápice.

⁵ Nessa superfície ocorreu a interrupção do sinal do sensor já a partir do mês de fevereiro, apresentando valores discrepantes. Os valores coerentes foram mantidos na apresentação que segue, referente ao dia mais quente, ao passo que no dia mais frio já não se conseguiu obter qualquer informação válida do sensor da superfície externa.

Já no dia mais frio, as temperaturas da face Norte atingem valores consideravelmente maiores do que os de temperatura do ar, devido à baixa altitude solar. Nota-se – durante os registros das temperaturas mais altas – grande diferença entre as temperaturas superficiais externa e interna. Tal característica pode se dever à alta refletância do revestimento, inclusive no infravermelho próximo e à alta emissividade global, que durante os momentos em que se registram altas temperaturas, já refletem e reemitem para o ambiente externo uma parcela das ondas absorvidas.

Figura 6-34 - Comportamento da face Norte (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

Nos períodos noturnos, as temperaturas superficiais atingem valores inferiores aos da temperatura do ar, e não se observa diferença entre os registros das superfícies interna e externa.

Na Figura 6-35 apresentam-se os resultados obtidos nas medições da face Leste. No dia mais quente, as temperaturas superficiais acompanham muito proximamente as temperaturas do ar no período noturno, com leve diminuição momentos antes de despontarem os primeiros raios de sol. A ascensão é brusca, já que o sol atinge em ângulo muito baixo a face Leste no início da manhã. A diferença entre as temperaturas externa e interna é pronunciada, diminuindo conforme a altitude solar se eleva. As temperaturas superficiais se mantêm praticamente estáveis após o primeiro pico, decrescendo em função da diminuição da radiação solar. Assim que cessa a radiação, as temperaturas voltam a acompanhar a temperatura do ar.

Figura 6-35 - Comportamento da face Leste (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

No dia mais frio, a dinâmica das temperaturas superficiais é semelhante à do dia mais quente, com significativa diferença, no entanto, entre as máximas atingidas em cada horário. Nos períodos noturnos as temperaturas superficiais atingem valores inferiores aos da temperatura do ar externo.

A Figura 6-36 apresenta os resultados de medições na face Sul. No dia mais quente, quando o sol atinge diretamente a face Sul no começo da manhã, há ascensão das temperaturas superficiais, superando a temperatura do ar até o horário em que a radiação atinge seu pico. As temperaturas oscilam simultaneamente às variações de intensidade de radiação, continuando, contudo, muito próximas à temperatura do ar externo. Assim que a radiação cessa, as temperaturas superficiais decrescem, acompanhando a temperatura do ar, atingindo, no entanto, valores inferiores a esses.

Figura 6-36 - Comportamento da face Sul (superfícies externa e interna) no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

No dia mais frio as temperaturas superficiais permanecem com valores inferiores aos da temperatura do ar no período noturno e, quando dos primeiros raios solares, o ar

inicia a ascensão de temperatura enquanto a face Sul ascende mais lentamente. Os valores de temperatura superficiais não superam os da temperatura do ar, a não ser em um curto período no qual provavelmente há acúmulo de calor no interior do contêiner, como atesta a Figura 6-37, que apresenta as medições de temperatura de globo.

Com relação à temperatura de globo, observa-se que esta acompanha muito proximamente a temperatura do ar externo sem, contudo, oscilar tanto quanto esta última. Observa-se que no dia mais quente, a temperatura de globo atinge valores superiores aos da temperatura do ar a partir do momento em que há o pico nos valores de radiação solar, e permanece mais alta até que a radiação cesse, uma vez que houve acumulação de calor no contêiner ao longo do dia. Os valores, no entanto, não são muito maiores do que os da temperatura do ar externo.

Figura 6-37 - Comportamento do termômetro de globo no dia mais quente (a) e no dia mais frio (b)

No dia mais frio, a temperatura de globo permanece inferior à temperatura do ar externo nos períodos noturnos. Durante as horas de incidência de radiação solar, a temperatura permanece muito próxima à temperatura do ar externo. Esses valores, no entanto, são atingidos após um período de atraso. Assim que a radiação cessa, a temperatura de globo decresce rapidamente, passando a atingir valores inferiores aos da temperatura do ar.

6.3.2 Graus-hora

Muito embora seja notório o aspecto de desconforto térmico e até mesmo a ocorrência de episódios de estresse térmico para o calor no interior dos contêineres metálicos sob clima tropical, o método avaliativo dos graus-hora evidenciou a

insuficiência quanto ao desempenho térmico da envoltória também para as temperaturas baixas, como se pôde constatar nos resultados referentes ao Contêiner 1 apresentados.

Na Figura 6-38 apresentam-se os resultados obtidos a partir do método dos graus-hora.

Figura 6-38 - Graus-hora para o Contêiner 3

Já para as horas de aquecimento, ocorridas tanto nas estações frias quanto nas quentes – somente no período noturno, nessas últimas – o Contêiner 3 atinge valores superiores àqueles obtidos para o Contêiner 1, o que tornaria seu singular desempenho na redução do ganho térmico diminuto, quando se contabiliza o resultado final, somando horas de aquecimento e horas de resfriamento.

O Contêiner 3 apresenta 26% a mais em demanda por aquecimento, se comparado ao Contêiner 1. Na soma final, considerando horas de aquecimento e horas de resfriamento, o Contêiner 3 apresenta redução de 12% se comparado com o Contêiner 1.

6.3.3 DISCUSSÕES

O Contêiner 3 tem um desempenho térmico que funciona muito bem durante os períodos em que há incidência de radiação solar. O isolamento térmico executado a partir das propriedades ópticas dos materiais se mostra efetivo no caso dos contêineres metálicos, pois além de não aumentarem a espessura da envoltória, são leves e resistem bem aos esforços a que o contêiner é submetido.

Para que suas propriedades sejam amplamente aproveitadas, percebe-se que a utilização se faz adequada em contêineres que se destinem prioritariamente ao uso em atividades exercidas durante o dia nos canteiros de obras, como é o caso do trabalho nos escritórios. Ainda que haja necessidade da utilização de climatizadores artificiais no verão, a demanda por energia será diminuída.

A utilização do revestimento refletivo em contêineres que demandem outras funções precisará ser analisada caso a caso, já que as temperaturas superficiais e a temperatura de globo registradas no interior do Contêiner 3 foram extremamente baixas nos períodos sem radiação solar e de baixas temperaturas do ar externo. Esse efeito do revestimento refletivo precisará ser amenizado por meio da combinação do tratamento térmico baseado em propriedades ópticas aliado a outro tipo de tratamento, possivelmente uma barreira à condução, a fim de que se evitem as perdas de calor nos horários frios.

6.4 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS CONTÊINERES METÁLICOS

No presente tópico serão apresentados alguns resultados referentes aos três contêineres, de forma comparativa, a fim de que se possa evidenciar o desempenho térmico de cada um, bem como identificar os processos de transferência de calor a que os mesmos estão submetidos.

Serão apresentados os resultados referentes às temperaturas superficiais internas e externas das coberturas, faces Norte e Sul, piso e às temperaturas de globo. Em seguida, serão apresentados desenhos esquemáticos e análises sobre os processos de transferência de calor a que cada contêiner experimental foi submetido.

Serão apresentados os resultados das temperaturas internas de globo dos três contêineres de forma que se possam compreender as dinâmicas dos ciclos de ganho e perda térmica nos dias mais quente e mais frio.

A avaliação da necessidade de aquecimento ou refrigeração de cada um segundo o método dos graus-hora será analisada de forma a apresentar a reforçar a necessidade de adequação do tratamento térmico da envoltória ao uso a que se destinam e às condições climáticas a que estarão submetidos.

Serão apresentados cálculos da transmitância térmica da cobertura, atraso e amortecimento térmicos e fator solar para os Contêineres 1 (aço), 2 (com poliestireno expandido) e 3 (com revestimento refletivo).

6.4.1 Cobertura – superfície externa

A cobertura é a superfície por onde os contêineres absorvem a maior parte do calor acumulado em seu interior. Isso acontece em função da latitude em que se encontram os contêineres experimentais, na qual a altitude solar atinge ângulos altos no verão e, mesmo no inverno, não deixa de desempenhar papel significativo sobre o aumento de temperatura superficial na cobertura, embora haja aumento também na face Norte.

Figura 6-39 – Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nas superfícies externas das coberturas ao longo dos meses medidos

A Figura 6-39 demonstra a evolução das temperaturas máximas e mínimas na face externa da cobertura dos três contêineres ao longo do ano de medição. Observa-se que as temperaturas mínimas – obtidas primordialmente em medições noturnas - são extremamente próximas, com pequena exceção na cobertura do Contêiner 3 nos meses de novembro, fevereiro e outubro, meses nos quais sua cobertura atinge temperaturas menores que as dos demais, possivelmente devido às suas características de alta refletância – também no infravermelho – e alta emissividade.

Nota-se grande diferença entre as temperaturas máximas atingidas na superfície do Contêiner 3 e as dos demais contêineres. As temperaturas máximas foram impreterivelmente obtidas nos momentos de maior incidência de radiação solar, reafirmando a importância do papel exercido pela alta refletância da superfície do Contêiner 3 na diminuição de sua carga térmica, já que – atuando como primeira camada de isolamento térmico – impede a absorção de porção considerável da radiação no espectro visível e infra-vermelho, que seria transformada em calor na superfície.

A temperatura do Contêiner 2 é superior à do Contêiner 1, embora ambos sejam confeccionados de forma idêntica. Esse fato pode ser explicado pela presença do isopor e do forro de chapa dura metálica sob a cobertura do Contêiner 2 que, embora tenham a função de isolar termicamente, acabam por acumular calor quando da presença da radiação solar, ao passo que o Contêiner 1, cuja cobertura é unicamente a chapa de aço, tende a perder calor mais facilmente, seja devido à convecção, ou pela ausência momentânea de radiação solar, como quando há nuvens, ainda que por curto período de tempo.

6.4.2 Cobertura – superfície interna

Apesar de a cobertura do Contêiner 2 atingir as maiores temperaturas na superfície externa, se comparada às dos demais, na superfície interna são obtidos os melhores resultados para as máximas, ou seja, as menores temperaturas dentre os três contêineres. As temperaturas da face interna da cobertura do Contêiner 1 superam as do Contêiner 2 em até 59 %, ou 23,2 °C, enquanto as temperaturas do Contêiner 3 superam em até 21 %, o que representam 9 °C.

Quando se analisam as temperaturas mínimas, o Contêiner 2 também apresenta os melhores resultados, já que sua temperatura superficial interna atinge os maiores valores, o que é positivo nos períodos noturnos para o contêiner, principalmente nos meses frios. A diferença entre as temperaturas mínimas é desfavorável para o Contêiner 3, que obtém as menores temperaturas superficiais internas, o que pode levar ao comprometimento dos níveis de conforto no interior da edificação, principalmente nos meses frios, como abordado no item 4.1, quando se analisam os dados de WCI.

Figura 6-40 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nas superfícies internas das coberturas ao longo dos meses medidos

Dessa forma, comprova-se que o isolamento térmico executado na cobertura do Contêiner 2 – isopor sob toda a superfície e chapa dura de madeira – tem eficácia na diminuição das trocas térmicas, tanto para impedir o ganho de calor durante as horas mais quentes, quanto para minimizar a perda de calor nas horas mais frias.

6.4.3 Piso – superfície interna

O piso – confeccionado em compensado de madeira e revestido internamente com material plástico – sofre influência da temperatura do ar interno do contêiner e também do ar externo, já que o contêiner se encontra suspenso do chão, a 28 cm de altura.

É interessante notar – ainda que óbvio - como a composição do piso reage de modo diverso ao das superfícies metálicas às trocas térmicas: sua amplitude térmica é consideravelmente menor. Tal fator reafirma a qualidade da madeira enquanto material de boa performance como isolante térmico. Suas características de baixa condutividade térmica e baixa difusividade térmica a levam a reagir lentamente às alterações nas condições térmicas externas até que adquira nova condição de equilíbrio.

Com relação às temperaturas máximas, o piso do Contêiner 3 foi o que obteve o melhor resultado, tendo atingido as menores temperaturas, enquanto o piso do Contêiner 1 foi o que atingiu as maiores temperaturas, como se observa na Figura 6-41.

Figura 6-41 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nas superfícies internas dos pisos ao longo dos meses medidos

Quanto às mínimas, o Contêiner 2 atinge os melhores resultados, com as maiores temperaturas, devido possivelmente ao tratamento térmico existente na parte interna, que impede a entrada de ar frio pelas frestas – como as que há nos Contêineres 1 e 3 – e também dificulta a perda de calor para o ambiente externo.

6.4.4 Face Norte – superfície externa

As temperaturas externas da face Norte são praticamente coincidentes entre os Contêineres 1 e 2 nos meses de verão, quando o sol tem grande altitude solar, como se observa na Figura 6-42. Nos meses de inverno, quando a altitude solar decresce e o sol passa a atingir predominantemente essa face, nota-se pequena diferença entre as duas

curvas. No entanto, diferentemente do que ocorre com a cobertura, o Contêiner 1 atinge as maiores temperaturas. Isso provavelmente se deve à diferença com que se executaram o sistema de isolamento na cobertura e na face Norte – assim como em todos os panos verticais da envoltória -: com faixas de isopor dispostas somente nos interstícios entre o aço e a chapa dura de madeira. Possivelmente no inverno o acúmulo de calor na camada de isopor vertical não seja efetivo.

Já o Contêiner 3 apresenta as menores temperaturas superficiais. A diferença é ainda maior nos meses mais frios, quando o sol atinge a face Norte em um ângulo menor do que no verão, e assim o potencial de refletância do revestimento é otimizado na diminuição da temperatura superficial.

Figura 6-42 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nas superfícies externas das faces Norte ao longo dos meses medidos

As temperaturas mínimas também são praticamente coincidentes entre os Contêineres 1 e 2, enquanto as temperaturas registradas no Contêiner 3 são as menores dentre os três. Nos meses frios as temperaturas atingem valores extremamente baixos, o que leva a edificação como um todo a um possível estado de desconforto pelo frio.

6.4.5 Face Norte – superfície interna

Ao contrário do que acontece na face Norte externa, há grande diferença entre as temperaturas internas dos Contêineres 1 e 2, como se pode notar na Figura 6-43. Isso

mais uma vez demonstra que o isolamento térmico de isopor e chapa de madeira apresenta resultados positivos. A diferença entre as duas é mais pronunciada nos meses em que o sol incide diretamente sobre a face Norte.

O Contêiner 3 apresenta os melhores resultados para as máximas, com uma diferença máxima de 17,6 °C da temperatura superficial máxima do Contêiner 1, o que representa temperatura 57 % maior para o último.

Figura 6-43 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nas superfícies internas das faces Norte ao longo dos meses medidos

Mais uma vez, os menores resultados de temperaturas mínimas são os do Contêiner 3, embora as superfícies dos três contêineres tenham atingido temperaturas muito baixas nos meses de inverno.

6.4.6 Face Sul – superfície externa

Nos meses de verão o sol incide na face Sul no início da manhã, o que determina a diferença entre as temperaturas externas dos três contêineres. Diferentemente do que ocorre na face Norte, o Contêiner 2 atingiu as maiores temperaturas superficiais externas, enquanto o Contêiner 3 atingiu as menores. As temperaturas dos Contêineres 1 e 2 se aproximam conforme se aproximam os meses frios, já que o sol não incide diretamente sobre a face Sul em tais meses. As temperaturas do Contêiner 3 são inferiores devido à sua alta emissividade, que possibilita que as menores temperaturas

ocorram durante o dia, ainda que sem a ação da radiação direta incidindo sobre a superfície.

As temperaturas mínimas são coincidentes entre os Contêineres 1 e 2, ao passo que no Contêiner 3 são obtidas as menores mínimas, como em todas as demais superfícies.

Figura 6-44 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nas superfícies externas das faces Sul ao longo dos meses medidos

6.4.7 Face Sul – superfície interna

O Contêiner 1 atinge as maiores temperaturas internas na face Sul, ao passo que o Contêiner 3 atinge as menores. O desempenho do isolamento térmico do Contêiner 2 é eficiente também na face Sul, já que esse contêiner atingiu as maiores temperaturas na superfície externa.

As temperaturas mínimas são praticamente coincidentes entre os Contêineres 1 e 2, sendo mais uma vez as menores para o Contêiner 3. A maior diferença entre as temperaturas mínimas chega a 1,9 °C, o que representa 8 %.

Figura 6-45 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nas superfícies internas das faces Sul ao longo dos meses medidos

6.4.8 Temperatura de Globo

As máximas e mínimas das temperaturas globo são apresentadas seguindo coerentemente o que foi apresentado até o presente, nesse item e em outros que descrevem o comportamento térmico dos contêineres.

Observa-se na Figura 6-46 que, nas máximas temperaturas, o Contêiner 1 é o que apresenta os piores resultados, ou seja, as maiores temperaturas, seguido pelos Contêineres 2 e 3, respectivamente.

O resultado das temperaturas máximas atingidas no Contêiner 2 são melhores do que aqueles obtidos no Contêiner 1. No entanto, não deixam de apontar para o fato de que se tomarmos os resultados obtidos nas superfícies internas e externas das coberturas dos dois contêineres, observaremos que o isolamento térmico da cobertura do Contêiner 2 reduziu em até 59% a temperatura superficial. Tal resultado não se observa nas medições de temperatura de globo, que no máximo atingem 11% de diferença entre Contêineres 1 e 2. O processo de transferência de calor para determinação de temperatura do ar interno e temperatura de globo leva em consideração fatores como troca de calor por radiação das paredes, ventilação e renovação do ar, dentre outros, o que impede que os resultados obtidos para a cobertura sejam transpostos diretamente para aqueles obtidos em temperatura de globo. No entanto, as medições superficiais das

paredes evidenciaram que em algumas situações o isolamento aumentou a temperatura superficial externa, o que pode ter levado à diminuição da eficácia global do tratamento térmico. Caberia verificar se o desempenho térmico do isolamento se alteraria qualitativamente caso as superfícies verticais fossem integralmente isoladas com o isopor, e não somente nos interstícios, como foi executado no Contêiner 2.

Figura 6-46 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas dos Contêineres 1, 2 e 3 (°C) nos termômetros de globo ao longo dos meses medidos

As temperaturas máximas obtidas no Contêiner 3 demonstram que o revestimento contribui significativamente para a diminuição do ganho de calor, tendo sido atingido até 28 % de diferença entre as temperaturas de globo desse contêiner e as do Contêiner 1, o que representam 8,7 °C em números absolutos.

Quanto às temperaturas mínimas, o melhor resultado foi obtido no Contêiner 2. Ressalta-se, no entanto, que durante os meses frios, os três contêineres atingem temperaturas muito baixas nos períodos noturnos, atingindo o desconforto para o frio em inúmeras situações, como descrito no item 4.1.

6.4.9 Processos de transferência de calor – análises e representação esquemática

6.4.9.1 Contêiner 1

O Contêiner 1, cuja envoltória é de aço Tipo X, sem tratamento térmico, absorve radiação solar, refletindo uma parcela pequena da radiação no espectro visível. O aço Tipo X é anunciado no mercado como um aço mais refletivo que os demais, que teria propriedades térmicas – embora em catálogo ou mesmo por meio de contato insistente com o fabricante não tenha sido fornecida qualquer informação a respeito das propriedades anunciadas. Foram feitas, contudo, análises das propriedades ópticas do material no Laboratório de Microestruturas da Escola Politécnica da USP, conforme consta da Tabela 6-5. Ressalta-se, no entanto, que as propriedades do aço Tipo X são inconstantes, variando conforme o lote do material, como se soube após as inúmeras tentativas de obtenção de informações com o fabricante, apesar de a empresa siderúrgica não mencionar tal peculiaridade do material de forma clara.

Tabela 6-5 – Propriedades ópticas dos materiais do Contêiner 1 (ASTM E891-87 (b891) e ASTM C1371-04A)

Cobertura	Refletância Inicial	Refletância Final (12 meses)	Emissividade Inicial	Emissividade Final (12 meses)
Face externa	0,64	0,34	0,15	0,37
Face interna	0,64	0,64	0,15	0,15

Além da ação das propriedades refletivas, as superfícies externas são submetidas à convecção, pela ação do vento. O calor absorvido pela envoltória é conduzido para as superfícies internas rapidamente e quase integralmente, devido à alta condutividade térmica do aço e sua baixa espessura. As superfícies internas emitem calor para o ar, no interior do contêiner, por convecção e para as demais superfícies, por radiação. O Contêiner 1, mesmo com a porta e janela fechadas, possui frestas entre a cobertura e as paredes, derivadas do sistema de junção das chapas, conforme Figura 6-47, o que permite que ocorra infiltração, de forma que se pode contar com uma parcela de resfriamento por convecção no interior do contêiner também.

Figura 6-47 – Junção da cobertura com a parede nos Contêineres 1 e 3

Quando cessa a ação da radiação solar e a temperatura do ar externo decresce, ocorre perda de calor do interior do contêiner para o exterior, através da convecção ocasionada pela infiltração no interior, pela condução de calor através das superfícies metálicas, e depois, pela emissividade do material da envoltória e pela convecção do vento que atinge as superfícies externas.

Figura 6-48 - Esquema de transferência de calor no Contêiner 1: a) durante o dia b) durante a noite. Onde C – Condução, V – Convecção, E – Emissão e R - Reflexão

6.4.9.2 Contêiner 2

O Contêiner 2, confeccionado com aço Tipo X, possui propriedades térmicas e ópticas externas iguais às do Contêiner 1. Nas superfícies externas da envoltória, o Contêiner 2 está submetido aos mesmos fenômenos descritos para o Contêiner 1: convecção, refletância e emissividade, e condução do calor absorvido para a superfície

interna do aço. A emissividade interna, no entanto, advinda da chapa dura de madeira revestida com fórmica tem valor maior do que aqueles apresentados pelo Contêiner 1.

Tabela 6-6 - Propriedades ópticas dos materiais do Contêiner 2 (ASTM E891-87 (b891) e ASTM C1371-04A)

Cobertura	Refletância Inicial	Refletância Final (12 meses)	Emissividade Inicial	Emissividade Final (12 meses)
Face externa	0,64	0,34	0,14	0,37
Face interna	-	-	0,79	0,79

As tiras de poliestireno expandido dispostas nos interstícios entre as saliências do aço e a chapa dura de madeira retém quantidade de ar entre suas células, o que diminui a condutividade térmica do sistema, aumentando seu isolamento. Observa-se, contudo, que as altas temperaturas da superfície de aço aquecem a camada de isolante térmico, que acabam por concentrar calor, aumentando a temperatura superficial do aço. O calor acumulado no isopor e na superfície metálica encontra resistência para atravessar a camada de chapa de fibra de madeira, que tem baixa condutividade térmica e alto calor específico.

O sistema de isolamento térmico e acabamento do interior do Contêiner 2 vedam toda a superfície, impedindo, dessa forma, a infiltração de ar existente no Contêiner 1, eliminando o efeito de resfriamento por convecção em seu interior. Dessa forma, o processo de perda de calor quando da cessação da radiação solar e resfriamento do ar externo é mais lento, e não se efetiva integralmente, da forma como ocorre com o Contêiner 1, que atinge temperaturas de globo mais baixas do que as do Contêiner 2 nos períodos mais frios.

Figura 6-49 - Esquema de transferência de calor no Contêiner 2: a) durante o dia b) durante a noite. Onde C – Condução, V – Convecção, E – Emissão e R - Reflexão

6.4.9.3 Contêiner 3

O Contêiner 3 é confeccionado de forma idêntica à do Contêiner 1, possuindo, no entanto, uma camada de revestimento refletivo que cobre toda a superfície externa da envoltória.

Além de estar submetido – como os demais – ao processo de resfriamento por convecção, devido à ação do vento, sua superfície reflete parcela consideravelmente maior da radiação no espectro visível e no infravermelho próximo, o que por si só já diminui as temperaturas superficiais. Além da refletância, a emissividade global do revestimento é alta, proporcionando a reemissão de parcela da radiação absorvida e transformada em calor novamente ao ambiente externo.

Tabela 6-7 - Propriedades ópticas dos materiais do Contêiner 3 (ASTM E891-87 (b891) e ASTM C1371-04A)

Cobertura	Refletância Inicial	Refletância Final (12 meses)	Emissividade Inicial	Emissividade Final (12 meses)
Face externa	0,79	0,67	0,87	0,84
Face interna	0,64	0,64	0,15	0,15

A condução de calor através do aço ocorre da mesma forma como nos dois contêineres já descritos, mas o volume de calor a ser transportado para o interior já é consideravelmente menor, o que leva a temperaturas superficiais externas e internas

mais baixas do que as do Contêiner 1. Os demais processos ocorridos no interior do Contêiner 3 são similares àqueles existentes no Contêiner 1: emissão de calor das superfícies para o ar interno por convecção devido à ação da ventilação cruzada que acontece devido às frestas e radiação das superfícies para as demais superfícies.

O processo de resfriamento, após o fim da ação da radiação e do resfriamento do ar externo ocorre de modo similar àquele do Contêiner 1. Tal efeito é potencializado pela emissividade do revestimento externo, responsável por tornar a superfície externa ainda mais fria do que aquela de aço Tipo X sem revestimento. Dessa forma, maior quantidade de calor é enviada do interior ao exterior, o que faz com que as temperaturas de globo do Contêiner 3 tenham sido as mais baixas registradas dentre os três.

Figura 6-50 - Esquema de transferência de calor no Contêiner 3: a) durante o dia b) durante a noite. Onde C – Condução, V – Convecção, E – Emissão e R - Reflexão

6.4.10 Análise comparativa quanto ao parâmetro dos Graus-hora

Apresentam-se os resultados obtidos para horas de aquecimento e horas de resfriamento segundo o método dos graus-hora, introduzido no capítulo sobre Materiais e Métodos. Para a presente análise observou-se conveniente a separação entre aquecimento e resfriamento, devido à peculiaridade dos resultados de cada contêiner.

Figura 6-51 – Graus-hora: horas de aquecimento para os três contêineres

Conforme observado anteriormente, o registro das horas de aquecimento foi obtido nos momentos de ausência da radiação solar. No verão, durante os períodos noturnos e no inverno, a partir do momento em que a radiação solar direta desaparecia.

O resultado final apresentado na Figura 6-51 demonstra que os três contêineres alcançam valores altíssimos de horas de aquecimento, sendo que o Contêiner 2 apresentou maior eficiência entre os três. Os resultados do Contêiner 3 – cuja temperatura superficial externa é inferior à dos demais – foi extremamente negativo, demonstrando que em uma edificação cuja envoltória possui baixa resistência térmica, a temperatura superficial pode exercer influência sobre os níveis de conforto e o consumo energético.

No Contêiner 3 foram registradas 19148 horas de aquecimento. No Contêiner 1 registrou-se 78% das horas de aquecimento obtidas no Contêiner 3 e no Contêiner 2, o valor atinge 68%.

As horas de resfriamento foram obtidas frequentemente sob a ação da radiação solar. Nota-se, como aparece na Figura 6-52, que os resultados finais são inferiores ao das horas de aquecimento, demonstrando que apesar de haver insatisfação por parte de usuários questionados em conversas informais quanto ao comportamento térmico dos contêineres no calor, seu desempenho térmico é ainda pior no frio.

Figura 6-52 - Graus-hora: horas de resfriamento para os três contêineres

O Contêiner 1 apresentou os piores resultados para as horas de resfriamento, totalizando 11250 horas. No Contêiner 2 registrou-se 97% das horas de resfriamento obtidas no Contêiner 1, enquanto no Contêiner 3, obteve-se o surpreendente resultado de 38%.

A soma final das horas de aquecimento e resfriamento apresenta-se na Figura 6-53. Os piores resultados foram alcançados pelo Contêiner 1, sem tratamento térmico, seguido pelos Contêineres 2 e 3, respectivamente. A diferença final, contudo, não é pronunciada entre os três. O Contêiner 1 atinge 26091 graus-hora, enquanto os resultados do Contêiner 2 atingem 91 % desse resultado, e o Contêiner 3, 89 %.

Figura 6-53 - Soma final das horas de aquecimento e resfriamento dos contêineres segundo o método dos graus-hora.

O resultado apresentado na Figura 6-53 aponta para a necessidade de associar o tipo de tratamento térmico empregado à envoltória do contêiner ao uso a que o mesmo estará destinado.

O Contêiner 2 apresenta os melhores resultados para horas de aquecimento, sendo portanto, mais adequado para a utilização em períodos frios ou noturnos, dada a maior resistência térmica de sua envoltória, que funciona tanto para o ganho quanto para a perda de calor. Com a ação de cargas internas, como a ocupação humana, poder-se-ia, inclusive, obter melhor resultado quanto à necessidade de aquecimento.

O Contêiner 3 apresenta grande redução no ganho térmico sob a radiação solar. No entanto, esse resultado positivo praticamente se anula quando a ele se somam as horas de aquecimento registradas. O revestimento refletivo seria apropriado, então, aos contêineres a serem utilizados durante o período diurno, como os escritórios nos canteiros de obra, que certamente teriam maior possibilidade de passarem a ser naturalmente climatizados ou, pelo menos, obteriam grande redução na demanda de energia para condicionamento artificial, em torno de 62%.

6.4.11 Transmitâncias, atraso e amortecimento térmicos

A transmitância, o atraso e o amortecimento térmicos das coberturas dos contêineres foram determinados segundo o método estabelecido pela ASHRAE 2013, bem como pela Norma de Desempenho, que se baseia na metodologia estabelecida pela NBR 15220 (2005). Os resultados, bem como as variáveis consideradas e suas equações geradoras estão dispostos na Tabela 6-8.

Tabela 6-8 - Variáveis e resultados de transmitância térmica, atraso térmico e amortecimento térmico

transmitância térmica - método ASHRAE 2013							
linha	variável	símbolo	unidade	Equação	C1	C2	C3
1	temperatura de céu	T_{sky}	K	valor padrão	273,00	273,00	273,00
2	temperatura do ar externo	$T_{ar\ ext}$	K	valor medido	309,95	309,95	316,07
3	temperatura superficial externa	$T_{sup\ ext}$	K	valor medido	346,80	347,30	326,50
4	temperatura superficial interna	$T_{sup\ int}$	K	valor medido	342,20	318,50	324,50
5	temperatura de filme	T_f	K	$T_f = (T_p + T_\infty)/2$	330,60	316,20	317,70
6	temperatura do ar interno	T_∞	K	valor medido	319,00	313,90	310,90
7	espessura	e	m	-	7,60E-04	composta	7,60E-04
8	comprimento da cobertura	l	m	-	3,00	3,00	3,00
9	dimensão característica	L	m	$L = \text{área/perímetro}$	0,67	0,67	0,67
10	coeficiente de condutividade da envoltória	k	W/mK	dado	55,00	composta	55,00
11	resistência térmica total da envoltória	R_T	mK/W	$R_T = e/k$	1,38E-05	0,09	1,38E-05
12	aceleração da gravidade	g	m/s ²		9,81	9,81	9,81
13	número de Nusselt externo	Nu_{ext}	-	$Nu = 0,037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr_{ext}^{1/3}$	1686,03	1772,26	1762,83
14	velocidade do vento	v	m/s	CRESESB + fator de correção	4,95	4,95	4,95
15	condutividade térmica do ar externo	$k_{ar\ ext}$	W/mK	tabela	0,03	0,03	0,03
16	coeficiente de convecção externo	h_e	W/m ² K	$h_e = Nu_{ext} \cdot k_{ar\ ext} / l$	16,05	16,23	16,21
17	viscosidade cinemática externa	ν_{ext}	m ² /s	tabela	1,92E-05	1,81E-05	1,82E-05
18	número de Reynolds	Re	-	$Re = vL/\nu_{ext}$	7,72E+05	8,20E+05	8,15E+05
19	número de Prandtl externo	Pr_{ext}	-	tabela	0,70	0,70	0,70
20	número de Nusselt	Nu	-	$Nu = 0,15 \cdot (Gr)$	109,26	67,43	96,19

	interno			$*Pr)^m$			
21	condutividade térmica do ar interno	$k_{ar\ int}$	-	tabela	0,03	0,03	0,03
22	coeficiente de convecção interno	h_i	$W/m^2\ K$	$h_i = Nu_{int} * k_{ar}/l$	4,68	2,78	3,98
23	viscosidade cinemática interna	ν	m^2/s	tabela	1,92E-05	1,81E-05	1,82E-05
24	número de Grashof	Gr	-	$Gr = (g * \beta * (T_{sup\ int} - T_{\infty}) * l^3) / \nu^2$	5,51E+08	1,29E+08	3,75E+08
25	número de Prandtl interno	Pr_{int}	-	tabela	0,70	0,70	0,70
26	coeficiente de expansão volumétrica	β	K^{-1}	$\beta = 1/T_{\infty}$	3,02E-03	3,16E-03	3,15E-03
27	constante	m	-	ASHRAE 2013	0,33	0,33	0,33
28	emissividade superfície externa	ϵ_{ext}	-	medido	0,37	0,37	0,85
29	emissividade superfície interna	ϵ_{int}	-	medido	0,14	0,19	0,14
30	coeficiente de radiação externo	h_{rc-e}	$W/m^2\ K$	$h_{rc-e} = \epsilon_{ext} \sigma (T_{sup\ ext}^2 + T_{sky}^2) / (T_{sup\ ext} + T_{sky})$	2,55	2,55	5,26
31	coeficiente de radiação interno	h_{rc-i}	$W/m^2\ K$	$h_{rc-i} = (\epsilon_{int} \sigma (T_{sup\ int}^4 + T_{ar}^4)) / (T_{sup\ int} - T_{ar})$	1,15	5,66	1,02
32	resistência superficial externa	R_{se}	m^2K/W	$R_{se} = 1 / (h_e + h_{rc-e})$	0,05	0,05	0,05
33	transmitância térmica com radiação	U	W/m^2	$U = 1 / ((1/h_i + h_{rc-i}) + (\sum \epsilon/k) + (1/(h_e + h_{rc-e})))$	4,44	3,80	4,05
34	transmitância térmica NBR 15575	U	W/m^2	$U = \frac{1}{R_T}$	4,76	3,32	4,76
35	capacidade térmica	C_T	kJ/m^2K	-	2,73	49,12	2,73
36	atraso térmico	φ	h	-	4,47E-03	0,02	4,47E-03
37	atraso térmico	φ	s	-	16,10	59,88	16,10
38	amortecimento térmico	μ	-	$\mu = \text{Amplitude interna} / \text{Amplitude externa}$	1,12	0,97	0,89
39	fator de amortecimento térmico	μ'	-	$\mu' = 1 - \mu$	-0,12	0,03	0,11
40	fator solar	FS_o	%	$FS_o = 100 * U * \alpha * R_{se}$	11,72	10,04	3,72

Os cálculos foram realizados para o dia mais quente, sob a temperatura mais quente atingida pela superfície dos contêineres. Nota-se, por tal razão, uma pequena

diferença nas temperaturas do ar externo entre os Contêineres 1 e 2 e o Contêiner 3. Este último – possivelmente devido à característica peculiar de refletância de seu revestimento externo, atinge a temperatura máxima em momento diferente dos demais, no dia em questão. Os cálculos foram realizados com os valores de medição obtidos às 13h08min do dia mais quente para o Contêiner 1 e 2, e às 14h28min para o Contêiner 3. Por isso a diferença na temperatura do ar externo.

Na linha 11 da Tabela 6-8 observa-se o resultado das Resistências Térmicas totais das coberturas dos três contêineres. Para os Contêineres 1 e 3, cuja espessura é aproximadamente igual, os valores são extremamente baixos, evidenciando que a envoltória – já que tais valores, no caso desses contêineres, se aplicam também às paredes – não oferece praticamente resistência alguma à passagem do calor. No Contêiner 2 a cobertura atinge um valor de resistência térmica um pouco superior, mas ainda assim baixo. Os valores de resistência térmica são determinantes para o desempenho da envoltória, uma vez que assumem importância significativa no cálculo da transmitância térmica.

O coeficiente de convecção externo pode ser observado na linha 16. Os valores desse coeficiente são definidos principalmente em função das temperaturas superficiais da edificação e de sua diferença em relação à temperatura do ar circundante. Para o ambiente externo, a velocidade do vento tem influência significativa no resultado. O Contêiner 2 apresenta o resultado mais elevado para esse coeficiente, uma vez que – observa-se – as temperaturas superficiais externas da cobertura também sofrem influência das trocas de calor com o ar quente armazenado entre o forro de chapa dura de madeira e o aço, mais propriamente no ar e no isopor.

Já para o coeficiente de convecção interno, o Contêiner 2 apresenta os menores resultados, com discrepância significativa dos demais, como se observa na linha 22. Isso se deve à grande diferença de temperatura entre exterior e interior, com temperaturas superficiais internas inferiores no Contêiner 2.

Na linha 30 observam-se os resultados do coeficiente de radiação externo. As temperaturas superficial e de céu são as variáveis mais influentes no resultado final. O Contêiner 3 apresenta as menores temperaturas superficiais, o que determinaria o menor coeficiente de radiação. No entanto, sua emissividade externa é a maior entre os três e,

dessa forma, o resultado do coeficiente de radiação externo passou a ser o maior, o que impacta de forma negativa no resultado final de transmitância térmica, apesar de ser a alta emissividade externa uma das características responsáveis pelas temperaturas mais baixas nessa cobertura.

Quanto ao coeficiente de radiação interno, o menor resultado foi obtido pelo Contêiner 2. Isso ocorre principalmente devido à baixa temperatura superficial interna, se comparada às temperaturas superficiais dos demais. O resultado do Contêiner 2 seria ainda menor, não fosse a alta emissividade do forro – 0,79 ao passo que a emissividade da superfície interna dos demais, em aço, atinge o valor de 0,14, aproximadamente. Ainda que dispondo dos mesmos valores de emissividade, o coeficiente de radiação dos Contêineres 1 e 3 atingiram resultados diversos, devido à diferença entre suas temperaturas superficiais internas, com valor menor para o Contêiner 3.

Com relação à transmitância térmica, o cálculo realizado por métodos diferentes aponta para discrepância significativa entre os resultados. O procedimento estabelecido pela Norma de Desempenho – baseado no método sugerido pela NBR 15220 – aborda o conceito de transmitância térmica de forma generalista, definindo previamente os coeficientes de convecção externo e interno exclusivamente em função da direção do fluxo de calor, ascendente ou descendente. Entende-se que a metodologia é válida, levando à obtenção de resultados pertinentes principalmente quando se refere os sistemas construtivos empregados usualmente, como é o caso da alvenaria de tijolos maciços ou blocos de concreto, dentre outros, que em comum têm valores de resistência térmica conhecidos, como também a condutividade térmica, sendo seu comportamento extensivamente conhecido no setor da construção civil.

No entanto, ao serem utilizados os parâmetros propostos pela ASHRAE (2013), nota-se grande diferença nos resultados finais. É certo que – na impossibilidade da obtenção de dados a partir de medições em campo – o método proposto pela NBR 15220 cumpre sua função. No caso dos contêineres, como a oscilação de temperatura é brusca na envoltória, mesmo o cálculo desenvolvido a partir do método ASHRAE (2013) apresentará divergências com a realidade, dado que o regime de trocas térmicas real é dinâmico.

A peculiaridade da resposta térmica da envoltória à radiação solar determina os resultados aqui apresentados. As altas temperaturas alcançadas pela cobertura, bem como seus valores de emissividade e a velocidade do vento alteram os valores dos coeficientes utilizados para a determinação das resistências superficiais. Apesar de intuitivamente se supor que o fator de transmitância térmica da envoltória de um contêiner metálico não estaria próximo ao de uma construção de alvenaria, sendo muito superior, os valores obtidos pelos diversos métodos apontam resultados diferentes, como pode se observar nas linhas 33 e 34.

Outra diferença significativa entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos foram os resultados referentes à cobertura do Contêiner 3. Pelo método da Norma de Desempenho, os Contêineres 1 e 3 teriam o mesmo valor final de transmitância térmica, determinado em função da espessura da envoltória e de sua condutividade térmica, que se podem considerar equivalentes entre ambos. No entanto, quando o cálculo leva em consideração as características particulares de cada um como a emissividade e as temperaturas superficiais, nota-se alguma diferença, tendo sido o Contêiner 3 melhor avaliado do que o Contêiner 1, sem qualquer tratamento térmico.

Pelos critérios da Norma de Desempenho, nenhuma das três coberturas avaliadas estaria adequada. No entanto, os cálculos realizados com os valores locais demonstram que a cobertura do Contêiner 2 é a que mais se aproximaria dos critérios da NBR 15575, segundo método da ASHRAE (2013) sem a inclusão dos coeficientes de radiação. Quando os esses coeficientes são incluídos – o que aparenta ter maior correspondência com a realidade, dado que os valores finais para os três contêineres superam aqueles determinados pela NBR 15220 para paredes de alvenaria – o Contêiner 2 atinge um valor de transmitância superior ao limite estabelecido ($U \leq 2,3\text{W/m}^2$). Todos os resultados obtidos para os Contêineres 1 e 3 se distanciaram dos limites estabelecidos pela NBR 15575.

Como esperado, os resultados obtidos para o atraso térmico da envoltória são muito pequenos. Os Contêineres 1 e 3 atingem atraso térmico de 16 segundos, enquanto o Contêiner 2, 59 segundos. Nenhum dos valores é representativo para uma edificação. No entanto, observa-se que o isolamento térmico à condução colaborou para a melhoria do resultado. O atraso térmico está relacionado às características do material construtivo

ou do sistema, se este for composto. As variáveis determinantes são densidade, condutividade térmica, calor específico e espessura.

Os valores de amortecimento térmico revelam que o tratamento térmico do Contêiner 3 demonstra ter sido o mais eficaz dos três, na configuração em que se encontram no experimento. Aqui são consideradas as amplitudes de temperaturas internas – no caso, a temperatura de globo – em relação às temperaturas externas. As Figura 6-54 – Temperatura do ar externo (°C) e Temperatura de Globo do Contêiner 1 no dia mais quente. As Figura 6-54, 5-55 e 5-56 apresentam a dinâmica das temperaturas de globo em cada um dos contêineres em relação à temperatura do ar externo.

Figura 6-54 – Temperatura do ar externo (°C) e Temperatura de Globo do Contêiner 1 no dia mais quente.

O Contêiner 1 obteve fator de amortecimento térmico negativo, evidenciando que a amplitude térmica em seu interior foi maior do que a amplitude térmica do ar externo. Isso demonstra que a envoltória colabora na acumulação de calor no interior do contêiner, levando o ar interno a temperaturas mais elevadas que as do ar externo.

No caso do Contêiner 2, apesar de a cobertura ter atingido valores muito melhores do que os demais contêineres para a transmitância térmica, as paredes exercem forte influência nos resultados. As paredes não só não possuem elevada resistência térmica, como retêm o calor no interior do isopor, enquanto os demais contêineres possuem a capacidade de se resfriarem rapidamente, quando cessa a radiação solar. No entanto, ainda assim o Contêiner 2 obteve amplitude térmica menor do que a do Contêiner 1, devido principalmente à resistência térmica de sua cobertura.

Figura 6-55 - Temperatura do ar externo (°C) e Temperatura de Globo do Contêiner 2 no dia mais quente.

O Contêiner 3 apresentou os melhores resultados, chegando a 10% de amortecimento térmico, o que pode ser considerado um bom resultado, dada a alta condutividade térmica da envoltória. Como se observa na Figura 6-56, a temperatura de globo fica muito próxima à temperatura do ar externo.

Figura 6-56 - Temperatura do ar externo (°C) e Temperatura de Globo do Contêiner 3 no dia mais quente.

Quanto ao fator solar, que é o ganho de calor pela edificação, o Contêiner 1 apresenta os piores resultados. Para o Contêiner 2 os valores de transmitância foram significativos para a diminuição do fator solar, enquanto para o Contêiner 3, a baixa absorvância medida para o mês de fevereiro – mês no qual está o dia mais quente - em 23%.

6.4.12 Para além do experimentado

Considera-se, diante do que foi estudado, que a melhoria nas características térmicas da envoltória pode estar associada a um bom tratamento térmico de sua cobertura, aliado a um tratamento térmico simples da envoltória.

Tomando-se o resultado de fator solar, aponta-se como possibilidade a junção da barreira refletiva externa ao isolamento à condução. Tal arranjo deveria, no entanto, ser testado em simulações para a verificação de sua validade.

A característica de baixa emissividade do aço apresenta um potencial a ser trabalhado na melhoria do desempenho térmico da envoltória. Como foi exposto no Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica, as barreiras radiantes têm grande potencial de redução dos fluxos térmicos. No caso dos contêineres, não seria necessário um alto nível de sofisticação do processo produtivo – fato que também impediria a viabilidade de algumas soluções térmicas possíveis – para que se pudessem adaptar barreiras radiantes à envoltória. Tal recurso também necessitaria de validação antes de ser implementado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização dos contêineres metálicos como espaço habitável é crescente no mundo, devido a seu baixo custo, à sua flexibilidade, mobilidade das instalações, baixa geração de resíduos, durabilidade e reciclabilidade, sendo esses pontos favoráveis no que tange ao aspecto ambiental. Como analisado nessa pesquisa, as condições térmicas dessas edificações – ao que parece, as vantagens econômicas e funcionais apontam para que sejam de fato consideradas como tal – são extremamente insuficientes para a ocupação humana, demandando grande quantidade de energia para condicioná-las internamente, devido ao baixo desempenho térmico da envoltória.

A queixa mais abundante sobre as instalações em contêineres metálicos nos canteiros de obras no Brasil diz respeito a quão quentes os contêineres podem ser quando a radiação solar incide sobre eles, o que restringe enormemente a permanência humana. No entanto, a partir das medições contínuas realizadas nos contêineres experimentais, constatou-se a insuficiência da envoltória também para a condição de frio. Os resultados obtidos revelam que as situações de desconforto para o frio predominam sobre as situações de desconforto pelo calor nas condições da Zona Bioclimática 3, onde o experimento foi montado.

O material que compõe a envoltória – no caso da presente pesquisa, o aço Tipo X, que possui propriedades térmicas muito similares a qualquer outro tipo de aço – possui alta condutividade térmica, se comparada à dos materiais usualmente empregados na construção civil, aliada à baixa espessura, o que lhe confere resistência térmica insignificante para manter os padrões de conforto adequados à ocupação humana. O aço possui alta difusividade térmica, ou seja, o calor se alastra rapidamente pelo material, e ao mesmo tempo, alta efusividade, o que faz com que o resfriamento também seja brusco, não possuindo a propriedade de retenção de calor, o que nas edificações pode ser uma característica positiva para a obtenção de níveis satisfatórios de conforto, se adequadamente utilizada.

Sua baixa emissividade, no entanto, se não resulta na eliminação do calor para o ambiente externo, evitando que adentre a edificação, pode ser aproveitada a favor da obtenção dos índices de conforto quando refletida a partir da face interna. Os resultados

de transmitância térmica demonstram que a alta emissividade das superfícies internas pode reduzir consideravelmente a resistência térmica final da envoltória, uma vez que o calor é transferido com maior intensidade para o interior. Isso pode ser observado nos resultados obtidos para o Contêiner 2: se sua emissividade interna fosse a mesma do aço, 0,14, a transmitância da cobertura seria de $2,45 \text{ W/m}^2$. Tendo emissividade interna de 0,79, sua transmitância atinge $3,8 \text{ W/m}^2$, o que o coloca consideravelmente distante de qualquer padrão aceitável de desempenho térmico. A Norma de Desempenho ABNT NBR 15575 aceita transmitância máxima de $2,3 \text{ W/m}^2$, em função da absorptância menor do que 0,6. Sendo dotado de baixa emissividade interna, o simples aumento da refletância externa poderia levar a cobertura a atingir o padrão estabelecido pela norma.

A baixa emissividade das paredes e cobertura nas faces internas poderia ser aproveitada adequadamente na instalação de barreiras radiantes, seja sob a cobertura, seja no interior das paredes, com indícios de possíveis reduções no ganho térmico dos contêineres, como apresentado no Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica. Essa solução, no entanto, precisaria ser testada e analisada.

A cobertura tem papel fundamental no nível de conforto térmico dos contêineres. Os resultados das medições realizadas no Contêiner 2 demonstram que se houver tratamento térmico à condução na cobertura, pode haver grande redução no fluxo de calor até que ele atinja a superfície interna, minimizando também o calor que se acumulará no interior. Os resultados demonstram - nas superfícies das paredes do Contêiner 2 - que o isolamento térmico da cobertura sob toda a superfície e não somente nos interstícios entre o perfil corrugado do aço e o forro, como instalado nas paredes – é mais eficiente do que o sistema adotado para as paredes, que não só não obtiveram bons resultados para a redução do fluxo de calor de fora para dentro, como retiveram parte do calor nos momentos em que o mesmo já teria sido eliminado por uma parede simples, ou com tratamento térmico diferente, mas adequado. O bom desempenho da cobertura foi praticamente eliminado pela ineficiência das paredes no Contêiner 2, como demonstram os resultados de temperatura de globo obtidos no Contêiner 2, se comparados aos mesmos resultados nos demais contêineres.

Outra vantagem da instalação de isolamento térmico à condução na cobertura, no caso dos contêineres, é que a espessura do isolamento não comprometeria a área útil

em planta e, ainda que o pé direito possa ser minimamente reduzido, não restringiria ou limitaria o uso, como ocorreria se fossem aumentadas as espessuras das paredes.

O isolamento térmico à condução demonstrou ser o mais adequado para as situações de frio, pois aumenta a resistência térmica da envoltória, evitando as perdas de calor para o ambiente externo. As medições realizadas no Contêiner 2 demonstraram, contudo, que o isolamento aplicado a esse contêiner ainda não é suficiente para evitar temperaturas desconfortáveis no frio. No entanto, há que se considerar que, havendo a utilização do contêiner nessas situações, haverá também a geração de cargas térmicas internas, seja pela ocupação humana ou pela instalação de equipamentos eletro-eletrônicos. Diante dessa situação, é possível que as temperaturas internas não atinjam níveis tão distantes do padrão de conforto, mas tal hipótese necessita de averiguação, o que poderia ser feito por meio de uma simulação computacional a partir de um modelo virtual validado que tome como base os dados experimentais obtidos.

No caso da utilização de condicionadores artificiais, o aumento da resistência térmica à condução na envoltória seria apropriado, junto com a utilização da barreira à radiação externa, para minimizar o ganho de calor do ar interno, e assim tornar o sistema de condicionamento o mais eficiente possível.

A barreira à radiação aplicada externamente ao Contêiner 3 demonstrou alto desempenho na redução do ganho de calor. Nas medições mensais chegou-se a observar uma diferença de até 9 ° C nas temperaturas de globo entre os Contêineres 1 e 3. Tal eficácia fica demonstrada pelos resultados obtidos nas análises de temperatura segundo o método dos graus dia, na qual o Contêiner 3 apresenta uma redução de 62% nas horas de resfriamento, se comparado ao Contêiner 1. Esse resultado implica em uma significativa redução na demanda de energia para manter níveis aceitáveis de conforto no interior dos contêineres, caso seja necessário lançar mão de condicionamento artificial.

O resultado positivo alcançado pela barreira à radiação no verão, no entanto, não se aplica às condições de frio, principalmente durante os períodos sem radiação solar. O resultado obtido com o cálculo das horas de aquecimento foi alto, possivelmente em função das baixas temperaturas superficiais atingidas, devido às propriedades ópticas do revestimento. Tal resultado leva a concluir que o revestimento refletivo deve ser

utilizado em contêineres cuja utilização aconteça nos momentos em que há radiação solar, a fim de que o potencial de redução de ganho térmico seja totalmente aproveitado. Os contêineres localizados na Zona Bioclimática 3 dotados de revestimento refletivo, uma vez dispostos para utilização noturna, possivelmente necessitariam de aquecimento para atingirem temperaturas de conforto aos usuários.

Observa-se que a associação do isolamento térmico à condução à barreira à radiação externa possivelmente potencializaria a redução do ganho de calor pela envoltória dos contêineres. Tal solução não foi experimentada e carece de análises que possam avaliar se o isolamento térmico das paredes teria impactos positivos nos níveis de conforto internos, ou se poderia contribuir para o superaquecimento, retendo calor nos momentos em que seria prioritário eliminá-lo. Essa configuração merece ser estudada detalhadamente, possivelmente por meio de simulações computacionais.

Diante disso, entende-se que a especificação de tratamento térmico para essas instalações deva se orientar imprescindivelmente por alguns critérios, se o objetivo quando da utilização for o de atingir internamente temperaturas adequadas à ocupação humana, primando pelo uso racional da energia. O primeiro critério seria uma avaliação criteriosa sobre as condições climáticas do local onde o contêiner será instalado. Em segundo lugar, um levantamento acerca da utilização a que se pretende destiná-lo, considerando principalmente se o uso será diurno ou noturno e se haverá longa permanência de pessoas em seu interior. Em terceiro, deve se avaliar o tipo de carga térmica que será gerado no interior do contêiner, para determinar se será necessária maior ou menor resistência térmica de sua envoltória.

Espera-se que a pesquisa desenvolvida possa contribuir para que fabricantes de contêineres e projetistas tenham instrumentos para especificar melhores soluções para a envoltória dos contêineres metálicos, contribuindo assim para a melhoria nas condições da permanência humana em seu interior, primando pela utilização racional dos recursos energéticos disponíveis.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12284:1991- Áreas de vivência em canteiros de obras - Procedimento. . 1991.

____. **Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**, 2003.

____. NBR-15220 - 1 - Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. . 2005 a.

____. NBR 15220-3. ABNT NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. . 2005 b.

____. NBR 15220-2. ABNT 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. . 2005 c.

____. ABNT NBR 15636:2008 Folhas de alumínio e suas ligas - Barreiras de radiação térmica para uso em edificações - Instalação. . 2008.

____. 15575-5. ABNT NBR 15575-5 - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. . 2013 a.

____. ABNT NBR 15575-1 - Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. . 2013 b.

AKBARI, H.; LEVINSON, R. Evolution of Cool-Roof Standards in the US. **Advances in Building Energy Research**, v. 2, n. 1, p. 1–32, jan. 2008.

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; RAINER, L. Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 10, p. 1007–1016, out. 2005.

AKBARI, H.; MATTHEWS, H. D. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 2–6, 2012.

AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 295–310, jan. 2001.

AL-HOMOUD, D. M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 353–366, mar. 2005.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. ASHRAE STANDART 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. . 2004.

ANSI/ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta: [s.n.].

AULICIEMS, A. Psycho-Physiological Criteria for Global Thermal Zones of Building Design. **International Journal of Biometeorology**, 1981.

BOZONNET, E.; DOYA, M.; ALLARD, F. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 11, p. 3006–3012, nov. 2011.

BRAGER, G. S.; DEAR, R. J. DE. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 1, p. 83–96, fev. 1998.

BRASIL, MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. NR 18-CONDIÇÕES E MEIO AMBIENTE DE TRABALHO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. . 1978.

BUGES, N.L *et al.* **A eficiência energética de contêiner adaptado como residência nos diversos climas do Brasil**XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais... In: AVANÇOS NO DESEMPENHO DAS CONSTRUÇÕES - PESQUISA, INOVAÇÃO E CAPACITAÇÃO PROFISSIONAL**. Maceió: ENTAC, nov. 2014

C16 COMMITTEE. **Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers**. [s.l.] ASTM International, 2010. Disponível em: <<http://www.astm.org/doiLink.cgi?C1371>>. Acesso em: 23 maio. 2015.

CAMARGO, M.G.P. **O USO DE BARREIRAS DE RADIAÇÃO TÉRMICA EM COBERTURAS DE EDIFÍCIOS NA CIDADE DE SÃO PAULO**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Engenharia da Construção Civil e Urbana, 2011.

CIBSE - THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. **Degree-Days - Theory and Application - TM41 2006**. [S.l.]: CIBSE, 2006.

D08 COMMITTEE. **Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces**. [s.l.] ASTM International, 2011. Disponível em: <http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/E1980.htm>. Acesso em: 23 maio. 2012.

DEAR, R. J. DE; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549–561, jul. 2002.

DELTA OHM. **Manual Confortímetro HD 32.1. Microclima Termal Brasileiro**. Itália: DELTA OHM, 2007.

DOMÍNGUEZ-MUÑOZ, F. *et al.* Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 11, p. 2159–2168, nov. 2010.

DORNELLES, K.A. **ESTUDO DE CASOS SOBRE A INÉRCIA TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004.

DORNELLES, K.A.; CARAM, R.M.; SICHIERI, E.P. ABSORTÂNCIA SOLAR E DESEMPENHO TÉRMICO DE TINTAS FRIAS PARA USO NO ENVELOPE CONSTRUTIVO. **XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído/VIII ELACAC Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído**, set. 2013.

ECV4297 – Transferência de Calor e Umidade em Edificações I. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/ensino/pos-graduacao/ecv4297>>. Acesso em: 5 set. 2014.

European Cool Roofs Council. , [s.d.]. Disponível em: <<http://coolroofcouncil.eu/>>. Acesso em: 23 dez. 2013

FAIREY, P. Radiant energy transfer and radiant barrier systems in buildings. **Design note 6, Florida Energy Center**, 1986.

____. **Radiant Energy Transfer and Radiant Barrier Systems in Buildings** Florida Solar Energy Center, , maio 1994. Disponível em: <<http://www.wec.ufl.edu/extension/gc/Madera/documents/EH245.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2013

FANGER, P.O. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. New York: McGraw-Hill, 1972.

G03 COMMITTEE. **Standard Tables for Terrestrial Direct Normal Solar Spectral Irradiance for Air Mass 1.5.** [s.l.] ASTM International, 1992. Disponível em: <<http://www.astm.org/doiLink.cgi?E891>>. Acesso em: 23 maio. 2015.

GIVONI B, A. **Man, Climate and Architecture**. Elsevier Architectural Science Series ed. [s.l.] Editor Henry J. Cowan; Professor of Architectural Science; University of Sydney, 1969.

HUMPHREYS, M. Outdoor Temperatures and Comfort Indoors. **Batim Int Build Res Pract**, v. 6, n. 2, p. 92–105, abr. 1978.

INCROPERA, F. P.; INCROPERA, F. P.; LIBRO, C. E-. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7726:1998 Ergonomics of the thermal environment -Instruments for measuring physical quantities. . Genève 1998.

JELLE, B. P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2549–2563, out. 2011.

JOUDI, A. *et al.* Highly reflective coatings for interior and exterior steel cladding and the energy efficiency of buildings. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 4655–4666, dez. 2011.

KAYNAKLI, O. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 415–425, jan. 2012.

KOLOKOTRONI, M.; GOWREESUNKER, B. L.; GIRIDHARAN, R. Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 658–667, dez. 2013.

KOLOKOTSA, D. *et al.* Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 85–93, 2012.

LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI, H. Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 89, n. 4, p. 351–389, dez. 2005.

MICHELS, C.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 4, p. 445–451, jan. 2008.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot–humid tropics. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 7, p. 628–637, jul. 2004.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563–572, jul. 2002.

OLIVEIRA, M.E.R.; LEÃO, S.M.C. PLANEJAMENTO DAS INSTALAÇÕES DE CANTEIROS DE OBRAS: ASPECTOS QUE INTERFEREM NA PRODUTIVIDADE. **ENEGEP 1997**, 1997.

ORDENES, M.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. **Transferência de Calor na Envolvente da Edificação** Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil., mar. 2008. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila_08.pdf>. Acesso em: 5 out. 2013

PAPST, A.L. **USO DE INÉRCIA TÉRMICA NO CLIMA SUBTROPICAL ESTUDO DE CASO EM FLORIANÓPOLIS – SC**. Florianópolis: UFSC, 1999.

PEREIRA, I.M.; ASSIS, E.S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v. 10, n. n.1, p. 31–51, mar. 2010.

PISELLO, A. L.; COTANA, F. The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 154–164, fev. 2014.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 4, p. 295–300, abr. 2005.

ROMEO, C.; ZINZI, M. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 647–657, dez. 2013.

ROSENFELD, A. H. *et al.* Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. **Energy and Buildings**, v. 22, n. 3, p. 255–265, ago. 1995.

____. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. **Energy and Buildings**, v. 28, n. 1, p. 51–62, ago. 1998.

RYAN, M. Introduction to IR-Reflective Pigments. **Paint & Coating Industry**, v. Vol. 21, n. Issue 8, p. p.70, ago. 2005.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3617–3631, out. 2011.

SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 74–94, fev. 2013.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3085–3102, dez. 2011.

SATO, N.M.N.; LOH, K.; LIBORIO, I.M.S. DESEMPENHO TÉRMICO DE TINTAS FRIAS EM COMPONENTES DE COBERTURA. **XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído/VIII ELACAC Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído**, set. 2013.

SAURIN, T. A.; FORMOSO, C. T. **Planejamento de canteiros de obra e gestão de processos**. Porto Alegre: ANTAC, 2006.

SILVA, P. C. P. DA. **Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE**. Portugal: Minho, 2006.

SLAWIK, H. **Container Atlas: A Practical Guide to Container Architecture**. [s.l.] Die Gestalten Verlag, 2010.

SLEIMAN, M. *et al.* Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance – Part II: Development of an accelerated aging method for roofing materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 122, p. 271–281, mar. 2014.

SYNNEFA, A.; SALIARI, M.; SANTAMOURIS, M. Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 7–15, 2012.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 35–41, dez. 2012.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 11, p. 1167–1174, nov. 2007.

THE CONCRETE CENTER. **Thermal Mass Explained**. Surrey, UK: [s.n.].

VITTORINO, F.; SATO, N.M.N.; AKUTSU, M. **Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas**. In: ENCAC-COTEDI 2003. Curitiba: nov. 2003Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/antigo/arquivos/publicacoes/ENCAC03_1277_1284.pdf>. Acesso em: 23 set. 2013

Sítios:

5 Creative Ways to Reuse Shipping Containers. Disponível em:

<<http://morethanshipping.com/2nd-life-for-shipping-containers/>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

Container Guest House / Poteet Architects | ArchDaily. Disponível em: <<http://www.archdaily.com/127570/container-guest-house-poteet-architects/>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito - <http://www.cresesb.cepel.br/>

Eurobras. Disponível em: <<http://www.eurobras.com.br/view?id=eb13-1ch&cat=tradicional>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

Insulations Solutions.

<http://www.insolutionsolutions.com/products/radiantshield/information.html>

Keetwonen: student housing in Amsterdam. Disponível em: <<http://www.tempohousing.com/projects/keetwonen.html>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

Médias Climatológicas de Mairinque-SP .

<http://www.climatempo.com.br/climatologia/483/mairinque-sp>. Acesso em 14 out. 2015.

NHJ do Brasil. Disponível em: <<http://www.nhjcontainer.com.br>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

Portal Saber Livre.

<http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1361304430.pdf>

Protolab http://www.protolab.com.br/Condutividade_Termica.htm

Sol – Arq.<http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/masa-termica>

Soldatopo / Fladafi. Disponível em: <<http://soldatopo.com.br/site/?produtos=beliches-metalicos-soldatopo>>. Acesso em: 21 ago. 2014