

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM CONSTRUÇÃO CIVIL*

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
PAREDES PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO**

Laylah Regina Raeder

São Carlos
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM CONSTRUÇÃO CIVIL*

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
PAREDES PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO**

Laylah Regina Raeder

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil

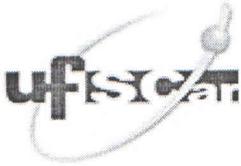
Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Marcelo de Araújo Ferreira

São Carlos
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the lower half of the page. It is intended for entering cataloging data.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Laylah Regina Raeder, realizada em 29/08/2018:

Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira
UFSCar

Prof. Dr. Érico Masiero
UFSCar

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo
UFG

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Daniel de Lima Araújo e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira

AGRADECIMENTOS

Sou grata primeiro a Deus, criador e sustentador da vida, e que me trouxe até aqui, porque eu entendo que sem Deus eu não seria nada.

Agradeço à minha família, em especial ao meu marido Rubens Abranches Filho que se fez presente em todo momento e me suportou nos dias bons e ruins, e também aos meus pais e irmãos, distantes porém sempre presentes na minha memória e coração, sogros, cunhados, tios e primos por todo o apoio. Ao meu tio Welinton David Santos, sou grata com carinho, engenheiro civil que inspirou e sustentou meus estudos. Ao meu irmão e também mestre engenheiro Marcos Raeder Filho, sou grata pela inspiração.

À todos meus amigos que estiveram comigo, especialmente da família Vineyard Sanca e da ABUSCar - Aliança Bíblica Universitária de São Carlos, meu muito obrigada. Erik, Lucas "Sardinha", Mini, Lucas Oliveira, Marília, Ana Elisa e tantos outros, obrigada! Por toda a ajuda, companhia, tempo e cafés, meus agradecimentos aos amigos Lucas Corato e Vanessa Damasceno.

Agradeço ao meu orientador Marcelo Ferreira, por sua dedicação, cuidado, paciência, incentivo frequente e por ser um grande referencial acadêmico e profissional. Ao laboratório NETPre e seus alunos e pesquisadores que me ajudaram e acompanharam, especialmente a Dra. Bruna Catoia, por sua amizade, empenho e disponibilidade em sempre ajudar.

Ao laboratório de conforto do Instituto de Arquitetura da USP - Universidade de São Paulo, meus sinceros agradecimentos pelo material cedido, dicas e ajuda.

Também pelo material cedido, dicas e ajuda, sou grata ao professor Érico Masiero do DECiv. Agradeço às empresas que abriram suas portas para que eu pudesse fazer meus estudos, Sudeste Pré-fabricados e CASALE.

E por fim agradeço à CAPES que tornou possível esta pesquisa com seu sustento financeiro. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

RAEDER, Laylah Regina. **Diretrizes de projeto para desempenho térmico de sistemas de paredes pré-moldadas de concreto**. 2018. 59f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

Os sistemas construtivos integrados por painéis pré-moldados de concreto têm sido empregados em edificações habitacionais em várias partes do mundo desde os anos 50. No Brasil, por falta de uma normalização específica para painéis pré-moldados até o ano de 2016, a aplicação destes sistemas construtivos foi condicionada à certificação com avaliações técnicas DATecs no sistema SINAT. A partir da aprovação da NBR16475:2017 e da revisão da NBR9062:2017, vários dos aspectos de desempenho relacionados à segurança estrutural, incêndio, estanqueidade à água, entre outros, estão cobertos, mas ainda não se tem uma posição clara com relação aos requisitos de desempenho térmico. Nesse contexto, como contribuição específica, a presente pesquisa apresenta os resultados do estudo exploratório dos aspectos e condições de projeto relacionados ao desempenho térmico de painéis pré-moldados com base na norma de desempenho ABNT NBR 15575 e norma de painéis ABNT NBR 16475. Com vistas a potencializar uma maior aplicação desses sistemas no Brasil, o estudo foi realizado através da aferição da temperatura superficial de painéis de concreto pré-moldados por meio de câmera térmica e da comparação dos resultados, verificando a importância dos fatores condicionantes de projeto que influenciam na variação da temperatura da fachada, através da absorvância solar no fluxo de calor, e, conseqüentemente, impactam o desempenho térmico dos painéis.

ABSTRACT

RAEDER, Laylah Regina. **Diretrizes de projeto para desempenho térmico de sistemas de paredes pré-moldadas de concreto**. 2018. 59f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

The industrialized precast building systems have been used all over the world in housing construction since the 50's. In Brazil, as there were no specific standard codes for precast panels until 2016, the use of those building systems have been under the certification of technical evaluations called DATec from the SINAT system. Since the approval of the new code of practice NBR16475:2017 - Wall Precast Panels and the review of NBR9062:2017, many performance aspects related to structural safety, fire, water tightness, among others are now covered, however there is not yet a very clear position regarding thermal performance requirements. In this context, as specific contribution, this research intends to present the results of an exploratory study regarding aspects and design conditions related to precast walls' thermal performance, according to the code of practice ABNT NBR 15575 and the precast code of practice ABNTNBR 16475. In order to potentialize a greater usability of those systems in Brazil, this study was accomplished through the measurement of the wall surface temperature using a thermal camera and the comparison of the achieved numbers, verifying the importance of design factors that influence the façade's temperature variation through the solar energy absorption at heat flow, impacting wall panel's thermal performance.

Key-words: Precast concrete, wall panel, thermal performance, facade

Figura 1: Zonas bioclimáticas brasileiras.	16
Figura 2: Ganhos e perdas de calor de construção sem isolamento térmico.	17
Figura 3: Esquema Genérico de Atraso Térmico e Amortecimento Térmico Durante Ciclo de Aquecimento Diário da Edificação.	22
Figura 4: Tipos de seção transversal de painel de parede.	30
Figura 5: Exemplo de Uso dos Equipamentos.	38
Figura 6: a) Exemplo de data logger HOBO similar ao utilizado e b) Exemplos da Instalação dos HOBOS na parede para aferimento da temperatura.	39
Figura 7: a) Câmera de Infravermelho Fluke Ti400 similar à utilizada e b) Exemplo de Imagem Obtida Através de Termovisor.	40
Figura 8: Planta baixa de Protótipo da Sudeste.	41
Figura 9: Gráfico da Variação de Temperatura em Graus Celsius das Superfícies Interna e Externa do Painel da Fachada Oeste da Sudeste ao Longo do Dia.	42
Figura 10: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Oeste para Mostrar as Pontes Térmicas e b) Foto da Junta dos Painéis Horizontais do NETPre.	42
Figura 11: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Oeste Externa do NETPRE e b) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Oeste Interna do NETPre.	43
Figura 12: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Leste ao Meio-dia no Protótipo da Sudeste e b) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada do Protótipo do NETPre.	44
Figura 13: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Norte Externa do NETPre e b) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Norte Interna do NETPre.	44
Figura 14: Influência da Cor na Temperatura da Fachada.	44
Figura 15: Foto aérea do laboratório do NETPre.	46
Figura 16: Foto Interna Obtida Através de Termovisor da Cobertura do NETPre.	46
Figura 17: Fachada com painel sanduíche em prédio administrativo.	47
Figura 18: Esquema de Diferentes Orientações Possíveis de Fachada.	48
Figura 19: a) Foto do Estacionamento do Pier de Pompano Beach e b) Foto do Estacionamento do Museu do Movimento Americano de Arts & Crafts.	48
Figura 20: a) Foto do Projeto do Escritório Perkins+Will Para a Fachada do Centro de Saúde da Universidade da Flórida e b) Foto de Projeto da Fibrobeton na Turquia.	48
Figura 21: Construção finlandesa com painéis de concreto e drywall.	49
Figura 22: Fachada com painéis pintados em estabelecimento comercial.	50
Figura 23: Exemplo do uso de vegetação em fachada.	52

Tabela 1: Condições ambientais de referencia para aplicação da equação 2.....	28
Tabela 2: Transmitância Térmica de Paredes Externas	33
Tabela 3: Transmitância Térmica de Paredes Externas	35
Tabela 4: Espessura mínima do painel maciço em função do TRRF e tipo de agregado.....	36
Tabela 5: Valores obtidos de Amortecimento Acústico, Resistência Térmica e Transmitância Térmica Segundo a Espessura de Painéis Maciços de Concreto Armado	36
Tabela 6: Valores adequados de transmitância, atraso térmico e fator solar para cada tipo de parede segundo a ABNT NBR15220.....	37
Tabela 7: Diferenças de Temperatura de Parede Cinza e Branca Obtidas Através de Termovisor	45
Tabela 8: Diferenças de Temperatura Obtidas Através de Termovisor em Painéis Preenchidos com Isolante Térmico	47
Tabela 9: Espessura mínima do painel maciço em função do TRRF e tipo de agregado.....	58

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Geral.....	15
1.1.2 Específicos	15
1.2 Justificativa.....	15
1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Propriedades térmicas de paredes de concreto.....	21
2.2 Trabalhos realizados.....	23
2.2.1 Estudos de aplicação do sistema.....	23
2.2.2 Estudo de absorvância solar de superfícies opacas.....	25
3. REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO.....	30
3.1 Requisitos da ABNT NBR 16475:2017.....	30
3.2 Adequação da espessura das paredes de concreto segundo critérios de desempenho da ABNT NBR15575.....	33
4. LEVANTAMENTO DE CAMPO.....	38
4.1 Medidas de temperatura superficial de painéis de parede pré-fabricados	38
4.2 Resultados e análises.....	40
4.2.1 Medição de atraso térmico (temperatura superficial das paredes).....	40
4.2.2 Efeito de pontes térmicas em juntas de painéis de fachadas.....	42
4.2.3 Medição da temperatura externa em condição de sombreamento e sol.....	43
4.2.4 Efeito de cor branca e cor de concreto.....	44
4.2.5 Painéis com isolamento.....	46
4.3 Recomendações de projeto	47
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
ANEXO A.....	57
Revestimentos de Paredes e Coberturas (tintas).....	57
ANEXO B.....	58
CÁLCULOS da tabela 5.....	58

1. INTRODUÇÃO

A construção civil no Brasil, tradicionalmente baseada em atividades manufaturadas, está sempre em busca do aumento da produtividade, especialmente através da introdução de inovações tecnológicas em seus produtos e processos, de forma que haja redução de desperdícios e garantia da qualidade do produto, assim como segurança aos usuários. Existe uma preocupação em desenvolver um processo e um produto cada vez mais sustentável, com bom desempenho e construtibilidade, e a utilização de peças pré-moldadas representa esse avanço na qualidade nos canteiros por causa do controle do processo que a produção industrializada permite. Com o uso do sistema pré-moldado é possível realizar uma obra com mais rapidez e menor perda de materiais, o que significa que a obra é mais racional, eficiente e de qualidade.

Embora o sistema construtivo em painéis pré-moldados de concreto foi considerado de caráter inovador até a publicação da NBR 16475 no começo do ano de 2017, de acordo com Freitas (2017), o sistema de painel portante existe desde 1945, empregado na reconstrução da Alemanha após a Segunda Guerra Mundial. Todavia, somente nos anos 1950, com o suporte estatal dado à execução de obras de infraestrutura e indústria de base, foi solicitado o desenvolvimento de tecnologias construtivas, que acabaram se difundindo gradativamente ao subsetor de edificações (FARAH, 1996). De fato, no final dos anos 50 e início dos anos 60 a construção de habitações estava quase estagnada, sendo o déficit estimado de habitações no ano de 1964 de oito milhões de unidades (FARAH apud FARAH, 1996). Houve então uma tentativa de estimular a construção de habitações com a criação do Banco Nacional da Habitação, o BNH, hoje extinto, e sanar esse déficit habitacional do país. Mas segundo a autora, o BNH definiu uma nova diretriz para o setor a partir da segunda metade dos anos 70, passando a estimular a introdução de inovações tecnológicas nos canteiros de obras estatais. Após pesquisas na Colômbia e na Venezuela e estudos de casos na Alemanha e na União Soviética, o sistema chegou ao Brasil na década de 70. De acordo com BRUNA (1976), a industrialização da construção civil, inserida no contexto da Segunda Revolução Industrial, ocorreu devido a ampliação da demanda habitacional por ter levado à busca por racionalização e mecanização dos métodos construtivos, ao ser considerada a solução para a redução do custo final da habitação. Para o autor, a racionalização do processo construtivo se daria através da pré-fabricação, entendida como uma fase do processo de

industrialização, mais amplo e complexo, baseada na padronização e freqüentemente realizada no canteiro de obra.

A introdução do mesmo foi difícil e teve diversos problemas, desde a falta de normalização até questões relativas a intempéries diferentes dos países onde era largamente utilizado. Seu uso, no entanto, não sendo muito difundido, restringia-se a algumas empresas e foi só na década de 90, após a criação da primeira versão da ABNT NBR 9062 de estruturas de concreto pré-moldado em 1985, que ele voltou aos holofotes, graças ao desenvolvimento da cidade de São Paulo, que impulsionou o uso do sistema pela necessidade de se construir em uma escala maior. Isso aconteceu quando projetos de construção de hotéis, shoppings, edifícios comerciais e flats exigiram melhores acabamentos na fachada e, portanto, utilizavam a tecnologia dos painéis pré-fabricados. Nessa época o sistema passou por uma grande evolução através do uso em grande escala, com aperfeiçoamentos de produção (sem descontinuidade) e produtividade de montagem (conceitos de otimização máxima da equipe desde a disposição dos edifícios na implantação). Finalmente, no último período de grande desenvolvimento, no primeiro Minha Casa Minha Vida, diversas construtoras usaram o sistema, pois se fez necessário a execução de grandes empreendimentos com rapidez e com o uso de menor quantidade de mão de obra, escassa naquele momento, fazendo com que sistemas racionalizados e industrializados fossem bastante utilizados, e permitiram um novo ciclo de desenvolvimento com novos elementos de ligação, uso de concreto autoadensável e montagem por meio de grandes pórticos.

Apesar de tantos anos de história, o uso do sistema pré-moldado é tímido no Brasil, em especial no setor de habitação, que no ano de 2016 segundo a ABCIC, Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto, nascida em 2001, as vendas do pré-moldado para habitação foram de apenas 4,7% do montante total de vendas do setor (ABCIC, 2016). Com a demanda crescendo a cada ano, especialmente incentivada por programas do governo federal, há um crescimento da necessidade de se pensar na produção com vistas a produtividade (TOMO, 2013), e, numa busca de redução de custos e maior sustentabilidade, faz-se necessário o estudo de processos construtivos industrializados que contribuam para atender essa demanda, como o pré-moldado, que é um sistema econômico, durável, seguro e com versatilidade arquitetônica (FIB, 2013). Mais do que o estudo dos elementos, o estudo de todo o sistema permite que o setor desenvolva soluções completas de construção, mas requer dos profissionais da área um planejamento muito mais detalhado de todo o processo, desde o desenho de projeto, produção, transporte até a construção da obra. Assim, esse processo detalhado é capaz de envolver não apenas o engenheiro, mas também o cliente, o arquiteto, o projetista da estrutura, a construtora e a empresa de pré-fabricados, porém para tal é necessário conhecimento dos critérios de desempenho conforme consta em norma e dos

fatores condicionantes para a implementação desse sistema de maneira correta. Antes da existência de uma norma específica de painéis, já estava clara a necessidade de regulamentação do uso do sistema, e a criação da norma contribui com o processo de industrialização da construção civil. Devido à falta de uma normalização prescritiva para painéis pré-moldados até a recente publicação da NBR16475 (ABNT, 2017), tais sistemas construtivos eram considerados como inovadores e seu uso em obras habitacionais estava condicionado à aprovação por meio de avaliações técnicas no sistema DATec-SINAT. A partir da aprovação da NBR16475 e da revisão da NBR9062, foram abordados importantes aspectos de desempenho quanto à segurança estrutural e situação de incêndio especificamente de estruturas e painéis de concreto pré-moldados, e apesar da NBR15575 apresentar os requisitos e critérios de desempenho térmico de forma geral para sistemas de vedações externas e internas, não há uma padronização normativa com relação ao desempenho térmico potencial destes painéis.

Os painéis pré-moldados de concreto apresentam elevado desempenho potencial quanto à sua segurança estrutural, resistência ao fogo, durabilidade, desempenho acústico, estanqueidade (desde que o projeto das juntas entre painéis seja projetado adequadamente) e sustentabilidade. No tocante ao desempenho térmico das paredes da fachada, o material concreto apresenta elevada condutividade térmica, baixa resistência térmica, mas possui inércia térmica elevada, a qual proporciona atraso térmico entre os ambientes internos e externos. Ainda com relação ao desempenho térmico, embora existam diversas referências internacionais importantes para projeto de painéis pré-moldados em países como EUA, Canadá e Norte da Europa, onde são empregadas tipologias de painéis tipo sanduíche com isolamento térmico, as mesmas não seriam adotadas integralmente no Brasil, uma vez que existem condições climáticas e de exposição bastante variadas e diferentes das condições dos países com climas frios.

Por outro lado, dada grande variedade dos painéis fabricados produzidos por diferentes fabricantes no Brasil, existe uma dificuldade inicial de caracterizar o desempenho potencial dos painéis de concreto para aplicações em todas as zonas bioclimáticas no Brasil. Assim, seria ideal, a princípio, classificar os painéis produzidos no Brasil hoje e analisar um a um conforme a ABNT NBR 15575 e a NBR 15220 para cada zona bioclimática, porém como as tecnologias avançam a cada ano, mudando constantemente, seria um trabalho vão. Uma alternativa atemporal é, portanto, apresentar uma gama de fatores que interferem no desempenho térmico do sistema, explorando o impacto na temperatura superficial dos painéis influenciada pela absorção solar no fluxo de calor de forma que seja possível favorecer a escolha de determinado elemento ou estratégia a ser adotada no projeto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Explorar os principais fatores condicionantes de projeto que impactam a temperatura superficial e afetam o desempenho térmico de painéis pré-moldados em concreto em edificações com base na norma de desempenho ABNT NBR 15575 e norma de painéis ABNT NBR 16475, influenciados pela absorvância solar no fluxo de calor e com ênfase na aplicação em região de clima tropical.

1.1.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

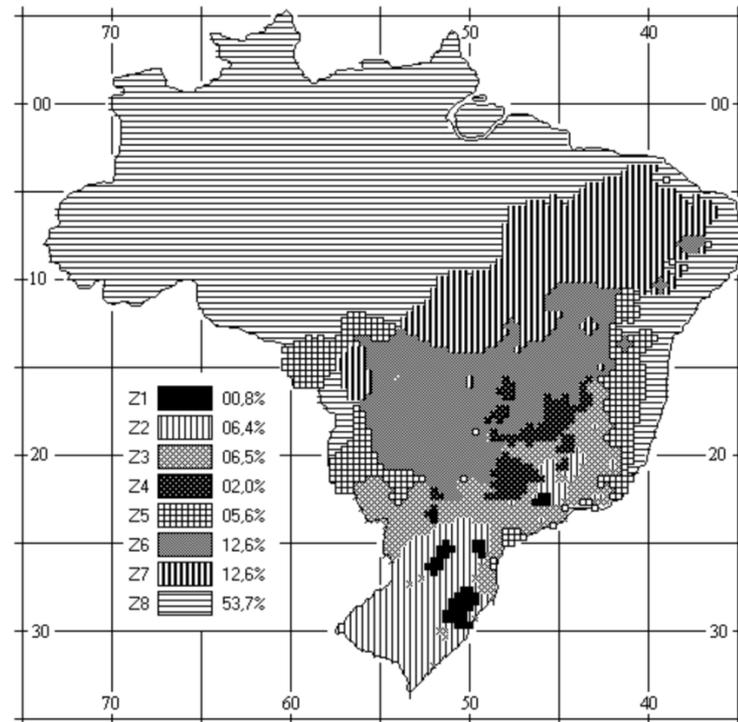
- Apresentar uma breve revisão teórica da tecnologia do sistema construtivo em painéis pré-moldados de concreto;
- apresentar considerações sobre soluções para paredes pré-moldadas de concreto, fazendo um breve levantamento com as tecnologias disponíveis no Brasil;
- Identificar e sintetizar os principais critérios e diretrizes de desempenho térmico das normas brasileiras para projetos deste sistema;
- fazer uma análise simplificada para a avaliação da variação da temperatura superficial incluindo medições de campo com uso de termovisor.

1.2 JUSTIFICATIVA

O projeto de uma edificação deve considerar parâmetros capazes de garantir segurança, durabilidade, economia, conforto e adequabilidade ao uso. Entretanto nota-se decisões de projeto frequentemente insatisfatórias devido a dificuldade em garantir a harmonia entre esses parâmetros.

O desempenho térmico de uma edificação depende de medidas definidas nas primeiras fases do projeto arquitetônico, como: volumetria do edifício, orientação das fachadas, posicionamento e sombreamento de janelas, sistemas construtivos de paredes e coberturas, das propriedades termo-físicas dos elementos que o compõem, entre outras. As temperaturas dos ambientes internos estão totalmente relacionadas com esses parâmetros e com o clima de cada lugar. O Brasil é um país de extenso território e possui diversas zonas bioclimáticas, como é possível observar na Figura 1.

Figura 1: Zonas bioclimáticas brasileiras.



Fonte: ABNT NBR 15220.

Como o Brasil apresenta grande diversidade climática são necessárias soluções construtivas específicas para cada região, e devido ao desconhecimento de tais especificidades nota-se a proliferação de edificações com baixo desempenho térmico e consequentemente elevado consumo de energia, especialmente quando se tratam de edificações comerciais e industriais, que geralmente utilizam ar-condicionado e não têm ventilação, que é uma estratégia de resfriamento natural do ambiente construído através da substituição do ar interno, mais quente, pelo externo, mais frio (Lamberts, 2016). Segundo Lamberts (2016), as soluções arquitetônicas comumente utilizadas são ventilação cruzada, ventilação da cobertura e ventilação do piso sob a edificação. O autor aponta que para cada zona bioclimática existem ainda outras estratégias para diminuir a temperatura do ar interno de uma edificação ou evitar perdas de calor em zonas mais frias. No caso das zonas das construções analisadas por esta pesquisa, as estratégias seriam o resfriamento evaporativo, que aumenta a umidade do ar para diminuir sua temperatura, através do uso de vegetação, fontes d'água ou outros recursos que resultem na evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar ou ainda tanques de água sombreados sobre a laje; a utilização de componentes construtivos com inércia térmica superior de forma que a amplitude da temperatura interior seja menor; e o uso de ventilação natural.

Quando não há isolamento, a transferência de calor entre o ambiente interno e externo pode piorar o desempenho térmico da edificação, como mostra a figura 2. Sabe-se que a cobertura e as aberturas de janelas são responsáveis pela maior parte do ganho de calor de uma edificação, mas durante dias mais frios pode haver maior perda de calor através das paredes e de juntas. É possível perceber que as paredes são responsáveis por até um quarto do ganho de calor em dias mais quentes, como no verão, e também de perda de calor em dias mais frios.

Figura 2: Ganhos e perdas de calor de construção sem isolamento térmico.



Fonte: governo da Austrália do Sul.¹

Paredes de concreto pré-moldado com isolamento rígido, como os painéis sanduíche com preenchimento de poliestireno expandido, ou painéis de paredes de maior espessura criam um envelope da construção ideal, pois fornecem elevados valores de resistência térmica (R), que é a habilidade do material de resistir à transferência de energia térmica, enquanto regulam as variações de temperatura. Vale ressaltar que segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), os valores de resistência térmica podem variar de acordo com a densidade do material, dependendo do agregado presente no concreto. Além disso, o concreto pré-moldado apresenta elevada massa térmica, ou seja, habilidade do material de armazenar energia térmica, sendo assim, necessária elevada quantidade de energia térmica para alterar sua temperatura, assim como de materiais com elevada densidade. O resultado é um material com eficiência energética incomparável para regiões de clima tropical, como as zonas 2, 4 e 7.

A ABNT NBR 15575, que entrou em vigor em 2013, diz respeito ao desempenho das edificações habitacionais, e estabelece parâmetros, objetivos e quantitativos que podem ser medidos/ Ela contribuiu para a inovação da construção e foi redigida segundo modelos internacionais de normalização de desempenho (CBIC, 2013). Sempre que possível são apresentados valores de referência de diferentes elementos ou sistemas construtivos, porém

¹ Disponível em <<https://www.sa.gov.au/topics/energy-and-environment/energy-efficient-home-design/insulation-and-ventilation>>.

a construção em painéis pré-moldados não foi contemplada por esta norma, já que à sua época era considerada inovação tecnológica. Contudo, a norma traz requisitos gerais de desempenho para as construções, definindo propriedades necessárias dos diferentes elementos, independentemente do material utilizado. Na área de habitabilidade, as especificações de desempenho térmico são que seja verificado o atendimento à norma com base na transmitância térmica e capacidade térmica das paredes de fachada e cobertura e, caso os valores sejam insatisfatórios, que seja feita a simulação por software Energy Plus. É possível ainda a verificação do atendimento à norma por meio de medições em edificações existentes ou protótipos, porém este procedimento é de caráter informativo e não se sobrepõe aos dois primeiros.

Dessa forma, o sistema estrutural constituído por painéis pré-moldados requer dos profissionais da área um planejamento muito mais detalhado de todo o processo, incluindo além do desenho de projeto, produção, transporte até a construção da obra, também um estudo quanto ao sombreamento, orientação e cor superficial, a fim de garantir a obtenção de um envelope da construção ideal. Esse processo detalhado é capaz de envolver não apenas o engenheiro, mas também o cliente, o arquiteto, o projetista da estrutura, a construtora e a empresa de pré-fabricados, e faz necessário o conhecimento dos critérios de desempenho conforme consta em norma e dos fatores condicionantes para sua implementação de maneira correta. Uma vez que esta tecnologia não era tratada como um sistema construtivo próprio, mas como produtos inovadores cujo uso em obras habitacionais estavam condicionados à sua aprovação por meio de avaliações técnicas do sistema DATec-SINAT, antes da existência de uma norma específica de painéis já estava clara a necessidade de regulamentação do uso do sistema, e a criação da ABNT NBR 16475, contribuiu com o processo de industrialização da construção civil.

A norma de painéis foi criada com o objetivo de promover o sistema e ter uma forma de regulação entre produtores e consumidores, promovendo melhores práticas e reunindo estudos mais recentes para a utilização do sistema. O sistema de painéis pré-moldados de concreto apresenta elevado desempenho potencial quanto à sua segurança estrutural, resistência ao fogo, durabilidade, desempenho acústico, estanqueidade (desde que o projeto das juntas entre painéis seja projetado adequadamente) e sustentabilidade. Quanto ao desempenho térmico das paredes da fachada, o material apresenta condutividade térmica moderada, mas possui inércia térmica elevada, o que faz com que seja grande o atraso térmico entre os ambientes internos e externos.

Devido a grande variedade dos painéis fabricados produzidos por diferentes fabricantes no Brasil, existe certa dificuldade de caracterizar e sistematizar o desempenho potencial dos mesmos para aplicações em todas as zonas bioclimáticas no Brasil. E embora

existam diversas referências internacionais importantes para projeto de painéis pré-moldados em países de clima frio, como Estados Unidos, Canadá e norte da Europa, onde são empregados painéis tipo sanduíche com isolamento térmico empregados, ainda não se dispõe informações padronizadas de como adequar a tecnologia para as condições climáticas específicas do Brasil.

Com a aprovação da NBR16475:2017 e da revisão da NBR9062:2017, vários dos aspectos de desempenho relacionados à segurança estrutural, incêndio, estanqueidade à água, entre outros, estão cobertos por aquela norma, mas ainda não se forneceu uma prescrição com relação ao desempenho térmico potencial dos sistemas de paredes integrados por painéis pré-moldados. Avaliar o desempenho de um sistema construtivo significa um avanço para o setor de construção civil e contribui significativamente para melhorar a qualidade das construções brasileiras, além de valorizar o projeto. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é estudar os principais fatores que afetam o desempenho térmico do sistema constituído por painéis pré-moldados, com ênfase na aplicação em região de clima tropical, com o intuito de mostrar a importância do projeto de fachada.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

A estrutura do trabalho desenvolvido está organizada em 8 capítulos, conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1 apresenta o assunto no qual se insere o tema deste estudo, a relevância do mesmo, um breve histórico de seu uso no Brasil, além dos objetivos a serem atingidos na pesquisa.

Em seguida, no capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, pesquisas realizadas sobre o tema, e são abordadas as propriedades térmicas relacionadas ao desempenho de painéis de concreto. O capítulo 3 é dedicado às normas brasileiras relacionadas aos painéis de concreto, e traz requisitos e critérios das ABNT NBR16475 e ABNT NBR15575. O capítulo traz também os requisitos e critérios de desempenho conforme as normas concernentes. No capítulo 4 está descrita a pesquisa de campo, com sua metodologia e as limitações do trabalho em questão, e apresenta os resultados e análises da pesquisa realizada.

O Capítulo 5 é constituído das considerações finais do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

O Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas no corpo do texto.

O anexo A traz a tabela com os valores de absorvência solar para cada tinta, conforme mencionado no trabalho, e o anexo B traz os cálculos da tabela 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES DE CONCRETO

Dentre as propriedades térmicas da fachada composta por painéis pré-moldados de concreto, temos a massa térmica, resistência térmica, a condutividade térmica, a inércia térmica e o coeficiente de transferência de calor, também chamado de transmitância térmica.

Massa térmica é a propriedade que descreve a capacidade da construção de absorver o calor durante o dia, armazená-lo e depois liberá-lo à noite. Para um material apresentar um nível de massa térmica útil, é necessário que possua três características básicas:

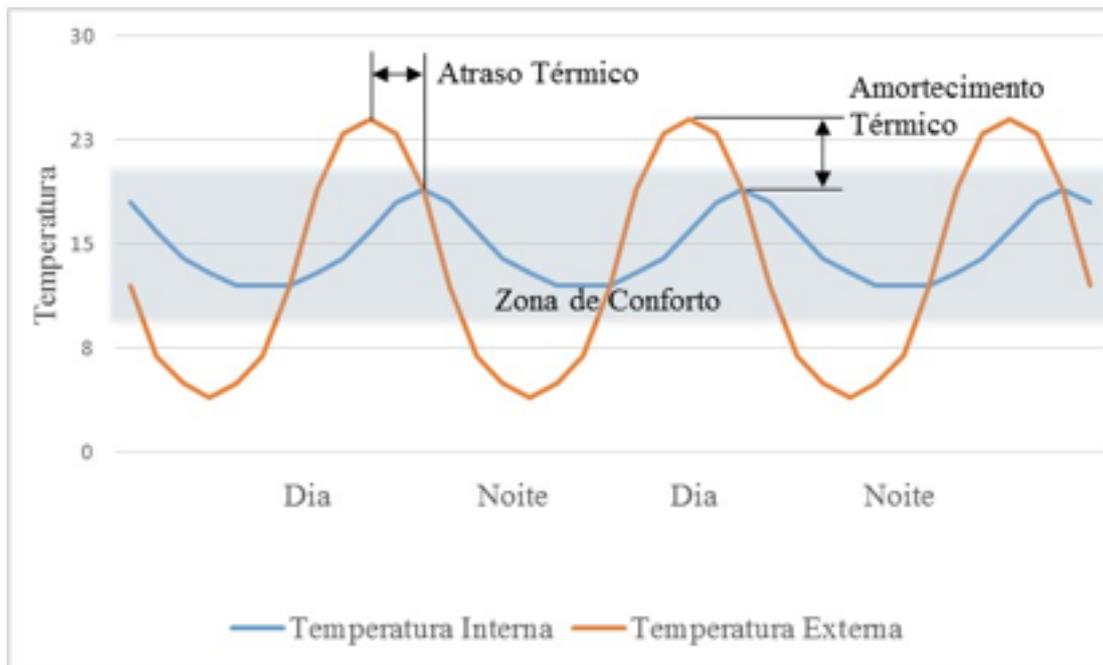
1. Uma alta capacidade de calor, de forma que o calor presente em cada quilograma é maximizado.
2. Uma alta densidade, pois quanto mais pesado o material, mais calor pode armazenar por volume.
3. Condutividade térmica moderada, de forma que o calor seja absorvido e liberado do material conforme o ciclo de aquecimento e esfriamento diário do edifício.

Materiais construtivos mais densos como alvenaria e concreto possuem estas características, por isso se diz que possuem alta inércia térmica. Alguns materiais, como a madeira, tem grande capacidade térmica, mas sua condutividade térmica é relativamente baixa, limitando a taxa de calor que pode ser absorvida durante o dia e liberada durante a noite, já o aço é capaz de armazenar muito calor, mas o conduz rápido demais, além de que geralmente pouco aço é usado nos edifícios.

A alvenaria e o concreto são materiais que combinam uma grande capacidade de guardar calor com uma condutividade térmica moderada, ou seja, maior que a da madeira e menor que a do aço. Isso significa que o calor passa da superfície externa para a interna de forma mais lenta, conforme o ciclo de aquecimento e esfriamento diário da edificação, ou seja, os painéis de concreto absorvem o calor durante o dia e lentamente liberam o calor durante a noite, quando a temperatura externa diminui. À noite a temperatura externa esfria as paredes e o painel transfere essa temperatura para o interior da edificação durante o dia. O ciclo se repete dia após dia, conforme podemos observar na figura 3. Esse efeito traz economia de energia, pois pode reduzir o uso de sistemas de aquecedores ou ar condicionado. É possível

perceber através da figura 3 que quando a temperatura externa atinge sua máxima, o interior da construção permanece mais fresco, já que o calor ainda não penetrou a massa do concreto, e o concreto só vai atingir a sua máxima temperatura algumas horas depois, o que é chamado de atraso térmico. Além disso, na figura 3 a máxima temperatura interna é menor que a máxima temperatura externa, o que é chamado de amortecimento térmico.

Figura 3: Esquema Genérico de Atraso Térmico e Amortecimento Térmico Durante Ciclo de Aquecimento Diário da Edificação.



Fonte: próprio autor.

Através do calor específico de um material é possível quantificar a sua massa térmica. O calor específico é a quantidade de calor que deve ser cedida a unidade de massa do material para elevar de um grau a sua temperatura e para o concreto normal com agregados de pedra é de $1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. A condutividade térmica é uma grandeza importante para o estudo de desempenho térmico de um material, que diz respeito à quantidade de calor que passa por unidade de tempo através de 1m^2 de área do material e espessura unitária 1m quando a diferença de temperatura entre suas faces é unitária, 1K , ou seja, ela mede como o material absorve e transmite energia. É importante ressaltar que a umidade interfere no valor da condutividade térmica, de forma que se a umidade é maior, a condutividade térmica aumenta. Quanto mais alta a condutividade térmica do material, mais rápido ele esquenta e mais rápido ele espalha o calor por toda sua área.

A resistência térmica de um material consiste na dificuldade de um material de transmitir calor, determinada pela fórmula a seguir:

$$R = \frac{E}{\gamma} \quad (2.1)$$

Onde:

R: resistência térmica de um material ($m^2.K/W$)

E: espessura do material (m)

λ : condutividade térmica $W/(m.K)$

Portanto, a resistência térmica do concreto é maior se a condutividade térmica do material for menor, mas pode variar em função da espessura do elemento. O concreto pré-moldado tem baixa resistência térmica, que varia dependendo de sua densidade. Conforme a densidade do concreto diminui, o valor da resistência térmica aumenta.

Outra grandeza importante para o estudo de desempenho térmico é o fator U, que é o coeficiente global de transferência de calor, também chamado de transmitância térmica, que é a taxa de perda de calor por unidade de área de um elemento. Conforme o valor de U diminui, a perda de calor também é menor, ou seja, a qualidade do isolamento é melhor. O valor de U é dado pelo inverso da soma das resistências dos materiais dos componentes e camadas de ar adjacentes.

$$U = 1/R \quad (2.2)$$

Onde:

R: resistência térmica de um material ($m^2.K/W$)

U: transmitância térmica ($W/m^2.K$)

A norma de desempenho térmico ABNT NBR 15220 é referência para o cálculo de todos esses valores, por trazer os métodos de cálculo de cada um deles.

2.2 TRABALHOS REALIZADOS

2.2.1 ESTUDOS DE APLICAÇÃO DO SISTEMA

Oliveira (2002) estudou os fatores que condicionam o desempenho e a eficiência do processo de produção das fachadas de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto em edifícios de múltiplos pavimentos, quando ainda não havia normas ou manuais técnicos

referentes a esta tecnologia construtiva. Seu estudo traz diretrizes de projeto e reúne fatores que condicionam o desempenho das fachadas em painéis pré-fabricados. Segundo a autora, a ABCI expõe que componentes mediantemente isolantes apresentam valores de U entre 1 e $1,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, e calcula o valor de U para diferentes espessuras e tipos de painéis, trazendo que um painel maciço de concreto comum com espessura de 150mm tem $U=3,84 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e de 200mm tem $U=3,46 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Oliveira (2002) recomenda uma análise global do projeto que considere outras variáveis, como a inércia térmica do componente, as juntas, os elementos de vedação adicionais, sistema de ar condicionado, a localização da edificação e suas particularidades, pois afirma que é interessante analisar o amortecimento térmico, pois devido à alta inércia térmica do concreto, ocorre maior atraso térmico que pode contrabalançar com os valores elevados de U .

Visando descrever o estudo e os procedimentos de construção e montagem de um sistema pré-fabricado aplicado em canteiros de obras, Knöner (2014) fez uma pesquisa experimental em que observa os requisitos da ABNT NBR 15575 (2013). Knöner (2014) propõe um sistema de painéis pré-moldados de concreto, diferente dos painéis sanduíche, com placas de 25mm de espessura separadas por uma câmara de ar de 100mm, e conclui em seu estudo que o atraso térmico é de 2,2h. As paredes do protótipo construído não são rebocadas, mas rejuntadas com massa corrida e pintadas na cor branca. E há massa de vedação entre as placas inferior a superior que compõem a parede externa. Segundo o autor, o sistema poderia ser aplicado em escolas, moradias, escritórios, posto de saúde, creche, entre outros, tendo realizado os estudos para edificações térreas. Knöner (2014) calcula o fator solar, a resistência térmica, a transmitância térmica e a capacidade térmica da parede conforme a NBR 15220, e conclui que além da ventilação e além da massa térmica da cobertura e de paredes, a forma, a cor externa dos componentes, a orientação de superfícies envidraçadas e da edificação e a sua implantação podem contribuir para o seu desempenho térmico.

Strabeli (2016) identifica e sistematiza diretrizes de projeto com base no desempenho para sistemas construtivos em painéis pré-moldados de concreto, com aplicação em edifícios habitacionais, apresentando os principais tipos de painéis e tipologias com potencial de aplicação para construções residenciais no Brasil e um exemplo de aplicação de avaliação de desempenho. Para a autora, do ponto de vista estrutural, o uso racional dos painéis diminuiria o custo do empreendimento e aumentaria a flexibilidade do projeto, ou seja, diminuir o uso de paredes estruturais e integrar outros sistemas construtivos, como drywall ou alvenaria, e utilizar os painéis estruturais no limite periférico das unidades e em caixas de escadas e serviços. A autora analisa o desempenho de um edifício, calculando a resistência e a transmitância térmica dos painéis, obtendo um resultado que não atende a norma de

desempenho ABNT NBR 15575, mas conclui que o edifício satisfaz aos requisitos mínimos de desempenho térmico quanto às aberturas de ventilação, que a autora analisa. Segundo a autora, a DATec 007 (2013) recomenda a aplicação de pintura de cores claras, considerando os seguintes parâmetros de absorvância (α): 0,3 (cores claras); 0,5 (cores médias) e 0,7 (cores escuras).

2.2.2 ESTUDO DE ABSORTÂNCIA SOLAR DE SUPERFÍCIES OPACAS

Com o intuito de comprovar que a visão humana não é instrumento adequado para indicar o quanto uma superfície absorve de energia solar, Dornelles (2008) apresenta dados de absorvância solar para diferentes cores e tipos de tintas utilizadas em superfícies opacas de edificações no Brasil. Assim, Dornelles (2008) emprega quatro métodos para determinar a absorvância solar de superfícies opacas:

O primeiro método consiste nas medições com espectrofotômetro de refletância, que permite, com grande precisão, obter a absorvância de amostras ao longo de todo o espectro solar, possibilitando escolher as regiões de interesse para cada estudo. Fornece valores de refletância e absorvância solar das superfícies quando expostas a uma energia constante ao longo do espectro, porém sem ajustar ao espectro solar padrão. De acordo com a autora, os dados de absorvância solar obtidos com o espectrofotômetro foram ajustados ao espectro solar padrão, e indicou que a absorvância diminui quando submetida às diferentes intensidades da radiação solar.

O segundo método consiste nas medições com scanner comum, que a partir dos valores de RGB e HSL obtidos com a digitalização das amostras em scanner comum, pode-se estimar a absorvância solar para as regiões visível e total do espectro solar, com boas correlações e pequenos desvios-padrão. Os valores de absorvância obtidos neste método já são ajustados ao espectro solar padrão e indicam a quantidade de energia solar real que é absorvida pela superfície. De acordo com a autora, os valores estimados através desse método, na sua maioria, apresentaram diferenças inferiores a 10% dos dados medidos em espectrofotômetro.

O terceiro método consiste nas medições com o espectrômetro ALTA II, que fornece valores de refletância para onze diferentes comprimentos de onda das regiões visível e infravermelho-próximo. Dornelles (2008) apresentou equações para estimar a absorvância solar de superfícies opacas para as regiões visível e total do espectro solar, com base nos valores de refletância medidos com o espectrômetro ALTA II, que neste método já são ajustados ao espectro solar padrão. De acordo com a autora, os resultados indicaram a

grande precisão do equipamento e do método proposto, com diferença máxima de 7% entre dados medidos e estimados.

O quarto método consiste nas medições de temperatura superficial, cujas absorptâncias são estimadas a partir das temperaturas superficiais das amostras, obedecendo à hipótese da linearidade. A equação apresentada por Dornelles (2008) fornece valores de absorptância solar não ajustadas ao espectro solar padrão. De acordo com a autora, este método apresentou grande precisão (máxima diferença entre dados medidos e estimados de 3,7%)

Rosado e Pizzutti (1997)² enfatizam que a escolha das absorptâncias (cores) de superfícies externas e internas de edificações minimiza gastos excessivos com eventuais equipamentos de climatização artificial, refletindo na racionalização energética e contribuindo na obtenção de conforto na habitação. Segundo os autores, conjugar “cores”, conforto e eficiência energética pode parecer um “trinômio” discutível, mas tanto pelas propriedades físicas e fisiológicas quanto psico-estéticas, o uso adequado das cores e suas respectivas absorptâncias pode trazer benefícios sem custo adicional. Basta que o profissional esteja atento às propriedades de cada cor utilizada e seja capaz de tirar partido desta simples ferramenta. Utilizar uma cor mais refletiva no envelope da edificação é a característica arquitetônica de controle climático mais eficaz e a maneira mais viável de minimizar as cargas térmicas das edificações, principalmente no verão (GIVONI, 1994)³.

Segundo Dornelles (2008), quando se trata de uma superfície opaca exposta à radiação solar que possui diferentes temperaturas nos ambientes internos e externos, acontece que:

- Parte da energia solar incidente é refletida pelo exterior e o restante é absorvida;
- A temperatura superficial externa aumenta, excedendo a temperatura do ar;
- Parte da energia é emitida para o exterior por radiação de onda longa, ou é transmitida para o interior por condução através do elemento construtivo.

Dornelles (2008) então apresenta a densidade do fluxo térmico (q) que atravessa esse corpo, por efeito da radiação solar incidente e da diferença de temperatura do ar, em regime permanente, através da equação:

$$q = U (t_e + (\alpha I_g / h_e) - t_i) \quad (2.3)$$

² apud DORNELLES, 2008

³ apud DORNELLES, 2008

Onde:

U: transmitância térmica da vedação ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$);

t_e e t_i : temperatura do ar externo e interno, respectivamente ($^\circ C$);

α : absorptância solar;

I_g : irradiância solar incidente global (W/m^2);

h_e : condutância térmica superficial externa ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

Através da equação 1 é possível perceber que o fluxo térmico através do corpo é diretamente afetado pela absorptância solar da superfície exposta ao Sol. Assim, quanto maior a absorptância, maior será o fluxo, induzindo um aumento na carga térmica dos ambientes (DORNELLES, 2008).

Akbari, Levinson e Berdahl (1996)⁴ estudaram as temperaturas superficiais de pavimentos urbanos e formularam a seguinte equação (Eq. 2), que ilustra a importância das absorptâncias sobre estas temperaturas, porém desconsidera o fluxo térmico por condução:

$$\alpha I_g = \epsilon \sigma (T_S^4 - T_C^4) + h_c (T_S - T_a) \quad (2.4)$$

Onde:

α : absorptância solar;

I_g : irradiância solar global (W/m^2);

ϵ : emissividade da superfície;

σ : constante de Boltzmann = $5,671 \times 10^{-8}$ ($W/(m^2 \cdot K^4)$);

T_S : temperatura absoluta da superfície (K), válida para regime permanente ou pouca inércia;

T_C : temperatura aparente do céu (K);

T_a : temperatura absoluta do ar (K);

h_c : coeficiente de convecção ($W/(m^2 \cdot K)$).

⁴ apud DORNELLES, 2008

Dornelles (2008) acrescenta que os mesmos autores sugerem as condições ambientais da Tabela 1 como referência para a avaliação teórica de materiais:

Tabela 1: Condições ambientais de referencia para aplicação da equação 2.

I_g	T_a	T_c	h_c
1000 W/m ²	37°C = 310 K	27°C = 300 K	12 W/(m ² .K)

Fonte: AKBARI; LEVINSON; BERDAHL, 1996 apud DORNELLES, 2008.

Segundo Dornelles (2008), a absorvância do concreto aparente é de 75%. Segundo a NBR 15220 (2005), a absorvância do concreto aparente pode variar entre 65% e 80%. Para a cor branca, Dornelles (2008) e a NBR 15220 (2005) consideram a absorvância de 20%.

Os estudos de Givoni (1981)⁵ sobre o efeito da absorvância solar do envelope construtivo nas temperaturas internas de edificações localizadas em Israel demonstraram que as temperaturas superficiais externas de paredes de alta absorvância foram muito superiores à temperatura do ar no exterior da edificação, indicando o efeito da radiação solar incidente. Por outro lado, as paredes com baixa absorvância solar apresentaram temperaturas superficiais externas muito próximas à temperatura do ar no exterior. Além desses resultados, comprovou-se que, para paredes de alta absorvância (pintadas de preto), a diferença entre as temperaturas superficiais de paredes em diferentes orientações pode chegar a até 23°C, enquanto para paredes de baixa absorvância (pintadas de branco), a diferença é inferior a 3°C (GIVONI; HOFFMAN, 1965, 1968)⁶.

Bansal, Garg e Kothari (1992)⁷, realizaram medições em protótipos para analisar o efeito da cor do envelope sobre o desempenho térmico de edificações, cujos resultados experimentais demonstraram que a “cor” do envelope (ou sua absorvância) tem efeito considerável sobre o comportamento térmico das edificações. De acordo com seus resultados, as temperaturas do ar no verão em um ambiente pintado de branco (baixa absorvância) podem ser cerca de 7°C mais baixas do que no mesmo ambiente pintado de preto (elevada absorvância). Para o inverno, essa diferença pode ser de até 4°C, mesmo com trocas de ar no ambiente.

Em um estudo realizado por Shariah et al. (1998)⁸, analisou-se o efeito da absorvância solar de superfícies externas de edificações sobre as cargas de aquecimento e refrigeração

⁵ apud DORNELLES, 2008

⁶ apud DORNELLES, 2008

⁷ apud DORNELLES, 2008

⁸ apud DORNELLES, 2008

para o clima de duas cidades na Jordânia: uma com clima moderado e outra de clima quente. Foram realizadas simulações computacionais com o programa TRNSYS, variando-se a absorvância de 0 a 100%, para diferentes tipos de paredes. Os resultados desta pesquisa demonstraram que, diminuindo-se a absorvância solar de 100% até 0, a carga de energia total (aquecimento e refrigeração) teve um decréscimo de aproximadamente 30% para a cidade de clima moderado e cerca de 40% para a cidade de clima quente.

Mulhall e Aynsley (1999)⁹, utilizaram o programa computacional BERS (Building Energy Rating Scheme) para determinar a influência do uso da pintura externa com baixa absorvância solar sobre o desempenho térmico de casas localizadas no clima quente e úmido da Austrália, cujos resultados confirmaram que este tipo de pintura reduz significativamente o consumo de energia com refrigeração, para casas com ar condicionado.

Dornelles (2008) também analisou o efeito da rugosidade superficial sobre a absorvância solar de amostras pintadas com diferentes cores de tintas. De acordo com Dornelles (2008), as análises de regressão para amostras rugosas pintadas com diferentes cores de tintas indicaram que a rugosidade aumenta linearmente a absorvância de cada superfície, com aumento mais significativo na amostra pintada de cor branca. A autora evidenciou que este comportamento é resultado da menor absorvância da tinta branca, onde as inter-reflexões na superfície rugosa envolvem maiores quantidades de energia. Dornelles (2008) também observou que as amostras pintadas com tintas semi-brilho foram mais sensíveis aos efeitos da rugosidade do que àquelas pintadas com tintas de acabamento fosco, devido a maior absorvância que as tintas semi-brilho apresentam em relação às tintas de acabamento fosco.

Para Dornelles (2008), estes exemplos confirmam a importância da absorvância solar sobre o comportamento térmico das edificações, pois afeta diretamente as temperaturas alcançadas pelas superfícies expostas ao Sol e, conseqüentemente, a intensidade do fluxo térmico através do envelope construtivo.

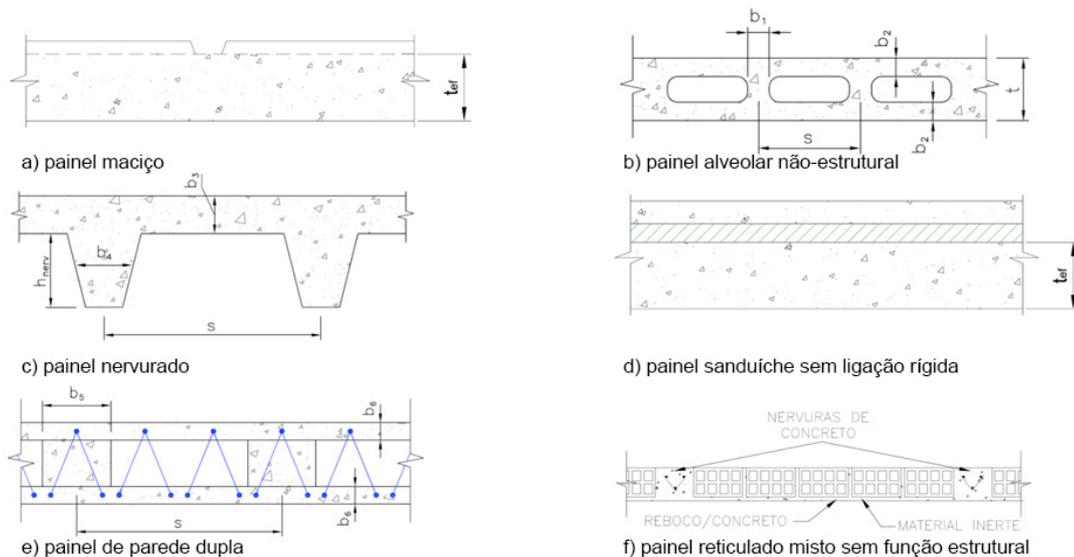
⁹ apud DORNELLES, 2008

3. REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

3.1 REQUISITOS DA ABNT NBR 16475:2017

A ABNT NBR 16475 (2017) classifica os painéis de paredes de quatro formas diferentes, considerando sua forma transversal, sua utilização, sua função de acabamento e sua função estrutural. Considerando a forma transversal, a norma classifica os painéis em maciços, que possuem a seção retangular ou preponderantemente retangular, em alveolares não estruturais, que possuem nervuras de concreto e de alvéolos, com geometria definida em função do processo de fabricação adotado, em nervurados, que possuem nervuras para aumentar sua resistência e rigidez, em painéis de parede sanduíche sem ligação rígida, que possuem em sua composição dois elementos de concreto de seção maciça e preenchimento de material inerte entre eles, em painéis de parede dupla, que são compostos por painéis maciços conectados por nervuras e/ou treliças e em painéis reticulados mistos, sem função estrutural, que têm em sua seção transversal nervuras de concreto armado e material inerte preenchendo o espaço entre as nervuras. A figura 4 exemplifica os tipos de seções conforme a classificação da norma.

Figura 4: Tipos de seção transversal de painel de parede.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR16475 (2017).

Em relação ao uso, a norma classifica os painéis em residencial, comercial e estrutural, limitando que os edifícios residenciais compostos de painéis estruturais com até cinco pavimentos, pé-direito de até 3 metros e lajes de menor vão livre não superior a 4 metros e sobrecarga máxima de 3kN/m^2 são considerados simplificados e os edifícios utilizados para hotelaria são considerados residenciais.

Quanto ao acabamento, a norma classifica os painéis em painel de parede bruto, que são aqueles que necessitam de algum acabamento como pintura, gesso ou argamassa, e em painel de parede arquitetônico, que em pelo menos uma das faces já estão acabados.

Finalmente, a norma classifica os painéis também em painéis estruturais, que funcionam como elementos resistentes a esforços locais e globais, e não estruturais, que fazem parte da edificação apenas como elementos de vedação.

Os painéis de parede de concreto pré-moldado, que antes deveriam atender requisitos e critérios de desempenho descritos na diretriz número 002 do SiNAT, agora devem atender aos requisitos e critérios presentes na NBR 16475 (ABNT, 2017).

Em primeiro lugar, temos a questão da durabilidade, cujas diretrizes para o projeto são definidas pela ABNT NBR 9062 e também pela ABNT NBR 6118, sendo as duas normas complementares. Além disso, a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) estabelece as considerações quanto à estanqueidade dos painéis e das juntas entre painéis. A norma ainda menciona a ABNT NBR 8800 ao tratar os conectores e dos insertos metálicos.

Quanto aos materiais, a norma apresenta uma extensa lista de requisitos de diversas normas a serem respeitadas, tratando de assuntos como resistência mecânica, dosagem, controle tecnológico, o aço para armaduras, fibras para reforço estrutural ou secundário, graute utilizado em ligações, argamassas de assentamento e mesmo outros materiais, como blocos utilizados para compor os painéis, este último sendo necessário ensaios de caracterização conforme normas técnicas ou procedimentos específicos que possam ser aplicados.

Além desses, a norma informa que o comportamento conjunto dos materiais deve atender a ABNT NBR 6118, assim como a segurança e estados limites últimos, de serviço e de deformação. Repleta de detalhes, a norma descreve ainda situações da produção dos painéis, como saque do painel da forma, estoque e montagem, e verificações que devem ser feitas, antes e depois da montagem, e explora cálculos de cargas verticais e ações transversais ao plano do painel. Menciona também que os coeficientes de ponderação dos esforços devem ser determinados conforme a ABNT NBR 6118 e ABNT NBR 8681, e as considerações em situação de incêndio. Fala ainda sobre limites para dimensões,

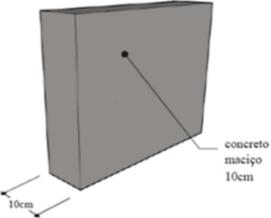
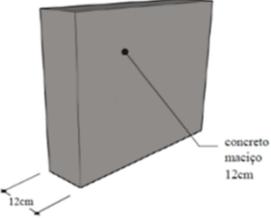
deslocamentos e abertura de fissuras, e sobre instalações que podem ou não ser embutidas nos painéis ainda em sua fabricação. Aborda a análise estrutural dos painéis e instabilidades e efeitos de segunda ordem. Possui um capítulo inteiro dedicado às ligações, com 5 itens e até 8 subitens, outro dedicado aos cálculos de dimensionamento dos painéis, e ainda outro dedicado à integridade estrutural e amarrações transversais, longitudinais, verticais e periféricas. A norma descreve os aspectos a serem levados em consideração durante a produção dos painéis, além do que já consta na ABNT NBR 9062, desde o planejamento da produção e tipos de formas até a concretagem e cura, assim como o manuseio, armazenamento, transporte e montagem, além dos requisitos mínimos quanto ao controle de qualidade e inspeção a serem atendidos pelos painéis.

Apesar de tão bem elaborada e detalhada, e embora a ABNT NBR 15575 seja considerada uma referência indispensável à ABNT NBR 16475, a ABNT NBR 15575-4 mal é mencionada, e não ficam claros os critérios de desempenho acústico ou térmico que os painéis devam atender. De forma bem simples a ABNT NBR 15575-4 é mencionada no tópico 5.5 da NBR 16475 que aborda requisitos gerais, subitem 2, onde é apresentada uma lista de requisitos da qualidade de projeto, no último tópico da lista, que diz que as exigências da norma de desempenho, quando aplicável, considera o desempenho do edifício concluído. Já a diretriz do SiNAT que deu origem à norma diz no item 3.4 que a edificação, quanto ao desempenho térmico, deve atender ao que diz a ABNT NBR 15575-1:2013, levando em consideração as características da zona bioclimática em que se encontra a edificação de acordo com a ABNT NBR 15220-3, além de considerar que o desempenho térmico do edifício depende do comportamento entre a cobertura e as paredes externas. A diretriz ainda exige que a avaliação de um sistema de vedação seja obtida por um procedimento simplificado, que considera os critérios e métodos estabelecidos nas ABNT NBR 15575-4 e ABNT NBR 15575-5. Se o resultado for insatisfatório, a diretriz aponta que deve ser feita a análise do desempenho térmico de toda a edificação através de uma simulação computacional. Diferente da norma, que pouco ou quase nada fala sobre o desempenho térmico, a diretriz traz as exigências para as paredes externas do edifício, conforme a ABNT NBR 15575-4:2013 e também para a cobertura, além de critérios para os procedimentos de simulação. No que se refere ao desempenho acústico, a diretriz aponta no item 3.5 que deve haver isolamento sonora de forma que a fachada e cobertura atendam à ABNT NBR 10152, e traz ainda recomendações para ensaios de campo ou laboratório, tanto para a isolamento sonora da fachada como entre ambientes internos.

3.2 ADEQUAÇÃO DA ESPESSURA DAS PAREDES DE CONCRETO SEGUNDO CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DA ABNT NBR15575

O concreto é um material com massa específica elevada e possui uma condutividade térmica moderada, fazendo que as paredes de concreto possuam inércia térmica elevada. Isso significa que os painéis de concreto podem absorver o calor durante o dia e liberar lentamente o calor durante a noite, quando a temperatura externa diminui. À noite a temperatura externa esfria as paredes e o painel transfere essa temperatura lentamente para o interior da edificação durante o dia. Esse efeito pode trazer economia de energia para as zonas bioclimáticas 2 e 4, reduzindo a necessidade do uso de sistemas de ar condicionado. Para concretos com massa específica de 2400 kg/m³, a condutividade térmica varia entre $\gamma = 1,75$ e 1,80 (W/mK). Buscando a padronização do desempenho potencial de sistemas de vedação aplicados em edificações habitacionais no Brasil, o Ministério das Cidades disponibilizou um catálogo com fichas de desempenho para algumas tipologias de fechamento, conforme apresentado na Tabela 1, incluindo painéis de concreto maciço com espessuras de 10 cm e 12 cm, com valores de transmitâncias térmicas de $U = 4,40$ (W/m².K) e $U = 4,19$ (W/m².K), respectivamente.

Tabela 2: Transmitância Térmica de Paredes Externas

	Descrição:	20						
	Sem revestimento interno Concreto maciço 10cm Sem revestimento externo							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>U</th> <th>C_T</th> </tr> <tr> <th>[W/(m².K)]</th> <th>[kJ/m².K]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4,40</td> <td>240</td> </tr> </tbody> </table>	U	C _T	[W/(m ² .K)]	[kJ/m ² .K]	4,40	240	
U	C _T							
[W/(m ² .K)]	[kJ/m ² .K]							
4,40	240							
	Descrição:	21						
	Sem revestimento interno Concreto maciço 12cm Sem revestimento externo							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>U</th> <th>C_T</th> </tr> <tr> <th>[W/(m².K)]</th> <th>[kJ/m².K]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4,19</td> <td>288</td> </tr> </tbody> </table>	U	C _T	[W/(m ² .K)]	[kJ/m ² .K]	4,19	288	
U	C _T							
[W/(m ² .K)]	[kJ/m ² .K]							
4,19	288							

Fonte: Anexo da Portaria Inmetro número 50/2013

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), as fachadas das edificações em seu conjunto - vedação, isolamento e revestimentos, incluindo pintura -, devem atender ao requisito de transmitância térmica e capacidade térmica segundo a sua zona bioclimática. Para o SiNAT

(MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2012), o memorial do projeto de arquitetura deveria identificar a zona bioclimática da construção segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), sendo que o projeto deve ser adequado à zona identificada segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), e trazer o cálculo para a transmitância térmica e capacidade térmica das paredes de fachadas. Além disso, o SiNAT (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2012) recomenda que sejam apresentados os resultados de ensaios de transmitância térmica realizados conforme a ABNT NBR 6488.

A norma de painéis, NBR 16475 (ABNT, 2017), publicada recentemente, exige que o desempenho térmico do sistema atenda a NBR 15575 (ABNT, 2013), que estabelece requisitos e critérios para o desempenho térmico em condições naturais de insolação, ventilação e outros (CBIC, 2013) e apresenta os níveis mínimos de desempenho térmico para a verificação. De acordo com a NBR15575, a avaliação da adequação do desempenho térmico de habitações deve ser feita por dois procedimentos, chamados de método simplificado e método de medição, abordados mais a frente. Segundo Lamberts (2016), a edificação habitacional deve reunir características que atendam às exigências de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática definida na NBR 15220-3. Uma edificação com bom desempenho térmico aumenta a qualidade de vida dos usuários e contribui para diminuir gastos de energia. A NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta as definições, símbolos e unidades, e os métodos de cálculo das grandezas relacionadas ao desempenho térmico das edificações, como transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico, etc.

O *Método Simplificado* (normativo) da NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece a avaliação analítica dos requisitos e critérios de desempenho térmico para os sistemas de vedação, conforme ABNT NBR 15575-4 e NBR 15575-5, considerando condições naturais de insolação e ventilação, onde as fachadas das edificações em seu conjunto - vedação, isolamento e revestimentos, incluindo pintura, devem atender ao requisito de transmitância térmica e capacidade térmica de acordo com os limites apresentados na Tabela 3. Caso o resultado da maneira simplificada seja insatisfatório, a NBR 15575 (ABNT, 2013) permite que a avaliação de desempenho térmico seja feita por simulação computacional. O software recomendado para a simulação é o programa EnergyPlus ou similar que permita a determinação do comportamento térmico da edificação sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capaz de reproduzir os efeitos de inércia térmica e seja validado pela ASHRAE Standard 140 (LAMBERTS, 2016). O SiNAT (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2012) afirma que os resultados da simulação computacional podem ser utilizados como referência para empreendimentos com mesma tipologia construtiva, mas sempre considerando as condições de cada zona bioclimática. Porém, a análise não é um

procedimento simples para ser aplicada na prática diária de um escritório de arquitetura, demandando tempo para ser implantada, sendo assim, não trivial.

Já o *Método de Medição* (informativo) permite a verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos na ABNT NBR 15575-1, por meio de realização de medições em edificações ou protótipos. Entretanto, este método não é prescritivo, mas apenas informativo e não sobrepõe aos procedimentos analíticos do método simplificado. A simulação computacional a ser realizada deverá considerar todas as condições e situações reais de projeto, como consideração da zona bioclimática, orientação das fachadas, posição das aberturas, condição de troca de calor horária (ventilação), condições de sombreamento nas fachadas (brises e beirais), consideração da cor da fachada (grau de absorção da irradiação solar na fachada). De fato, como pode ser observado em vários documentos DATec-SINAT existentes para avaliação de desempenho de sistemas construtivos empregando painéis pré-moldados que vários destes documentos apresentam simulações computacionais da edificação onde o desempenho térmico foi aprovado para condições de projeto com a fachada pintada com cor clara (com baixa absorção da luz solar). SACHT (2008) realizou uma série de avaliações de desempenho térmico em painéis de concreto aplicados em edifícios habitacionais com multipavimentos, considerando condições críticas para o verão e para o inverno, onde se observou que dentre as tipologias com painéis de concreto com massa específica de 2400 kg/m^3 , o painel com espessura 120mm mostrou-se viável para diversas situações de projeto.

Tabela 3: Transmitância Térmica de Paredes Externas

Transmitância Térmica U W/m ² .K		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5
^a α é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede		

Fonte: ABNT NBR 15575:2013

A NBR 16475 (ABNT, 2017) se aplica apenas aos painéis de até 250mm de espessura, conforme mencionado em seu escopo. Além disso, a NBR 16475 (ABNT, 2017) recomenda que sejam atendidos os critérios conforme a ABNT NBR 9062 referente a projetos em situação de incêndio, em que a espessura mínima do painel maciço em função do TRRF - Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo é dada pela tabela 4.

Tabela 4: Espessura mínima do painel maciço em função do TRRF e tipo de agregado

Tipo de Agregado	Espessura efetiva em função da resistência ao fogo mm				
	1h (60 min)	1,5 h (90 min)	2h (120 min)	3h (180 min)	4h (240 min)
Argila expandida, vermiculite ou ardósia expandida	65	80	90	115	130
Pedras calcárias	75	90	110	135	160
Pedras silicosas (quartzos, granitos ou basaltos)	80	100	120	150	175

Fonte: ABNT NBR 9062:2017

Segundo o INMETRO (2013), uma parede de concreto maciço de 100mm possui $U=4,40W/m^2.K$ e de 120mm, $U=4,19W/m^2.K$. A tabela 5 reúne o cálculo dos valores de resistência térmica e transmitância térmica segundo as normas, detalhados no anexo B.

Tabela 5: Valores obtidos de Amortecimento Acústico, Resistência Térmica e Transmitância Térmica Segundo a Espessura de Painéis Maciços de Concreto Armado

material	ρ (kgf/m ³)	λ (W/(m.K))	E (mm)	TRRF (min)	dB	R (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)	Rt (m ² .K/W)
Concreto armado pré- moldado	2500	1,75	100	90	45	0,057	4,40	0,227
			120	120	47	0,069	4,19	0,239
			140	150	49	0,080	4,00	0,250
			150	180	50	0,086	3,91	0,256
			175	240	52	0,100	3,70	0,270
			200	-	56	0,114	3,52	0,284
			250	-	62	0,143	3,20	0,313

Fonte: próprio autor.

Como a espessura máxima é de 250mm, o painel apresenta um desempenho potencial com transmitância de $3,2W/m^2.K$, portanto abaixo do valor requerido pela NBR 15575 (ABNT, 2013) para $\alpha > 0,6$. Portanto, como a absorvância de painéis com concreto aparente é superior a 60%, não é possível atender a tabela 3.

Segundo a NBR15220 (ABNT, 2013), a equação 3.1 é usada para o cálculo do fator solar:

$$F_{So} = 4.U.\alpha \quad (3.1)$$

Onde:

FSo: fator solar de elementos opacos em percentagem;

U: transmitância térmica do componente;

α : absorvância à radiação solar em função da cor.

Ainda segundo a norma, quando deve-se respeitar um limite de fator solar para uma determinada região, pode-se determinar o máximo valor de α em função do fator solar e da transmitância térmica, conforme a expressão 3.2 (ABNT NBR15220, 2013).

$$\alpha \leq \text{FSo}/(4.U) \quad (3.2)$$

A NBR15220 (ABNT, 2013) traz estratégias construtivas para cada zona bioclimática, especificando o tipo de parede adequado a cada uma delas. A tabela 6 reúne os valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar máximo para cada tipo de parede, assim como a zona bioclimática em que cada uma delas é sugerida.

Tabela 6: Valores adequados de transmitância, atraso térmico e fator solar para cada tipo de parede segundo a ABNT NBR15220

Paredes	Transmitância (W/m ² .K)	Atraso Térmico (h)	Fator Solar (%)	Zona Bioclimática
Leve	≤ 3,00	≤ 4,30	≤ 5,00	1, 2
Leve Refletora	≤ 3,60	≤ 4,30	≤ 4,00	3, 5, 8
Pesada	≤ 2,20	≥ 6,50	≤ 3,50	4, 6, 7

Fonte: adaptado de Lamberts (2016)

Assim, se a cor externa de uma parede é branca, com $\alpha=0,3$, e a parede possuir 150mm de espessura, o que segundo a Tabela 5 significa que $U=3,91\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$, então o fator solar é de 4,692%, portanto a parede atenderia o valor do fator solar exigido para as zonas bioclimáticas 1 e 2, mas ainda não atenderia o valor da transmitância.

O presente trabalho pretende fazer um levantamento sobre o impacto do concreto aparente na temperatura superficial externa de painéis pré-moldados, bem como de apresentar recomendações práticas de projeto visando a melhoria do desempenho térmico de uma construção. A seguir são apresentados os resultados da pesquisa exploratória para levantamento da temperatura superficial em painéis pré-moldados em concreto aparente de fachadas.

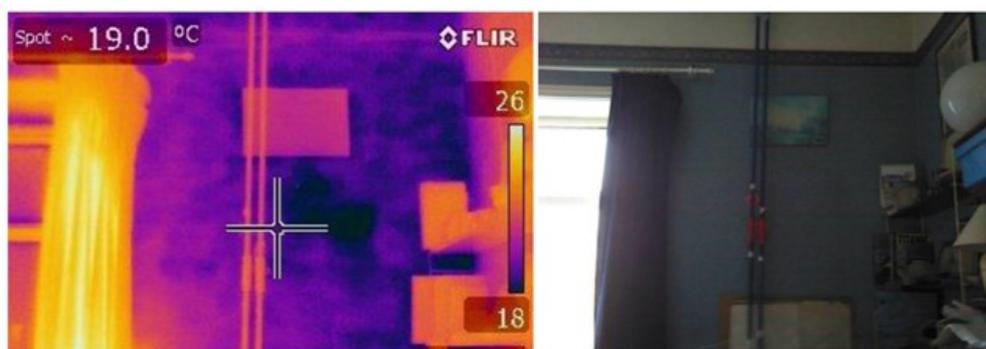
4. LEVANTAMENTO DE CAMPO

4.1 MEDIDAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE PAINÉIS DE PAREDE PRÉ-FABRICADOS

Foram exploradas leis, normas e manuais existentes no Brasil, assim como de manuais equivalentes no exterior que inspiraram ou direcionaram as normas brasileiras, e feita uma extensa pesquisa bibliográfica em livros, artigos e periódicos de forma a identificar as especificidades do sistema e suas limitações a partir dos critérios pontuados nesse material, de forma a sintetizar os principais critérios de desempenho térmico para os projetos em sistemas de paredes pré-moldadas de concreto.

Segundo o BRE - Building Research Establishment do Reino Unido, a melhor maneira de fazer medições de temperatura superficial é primeiro tirar uma foto com câmera térmica, para identificar possíveis áreas problemáticas que podem interferir nos resultados, como aberturas, juntas, fontes de calor, etc (HULME; DORAN, 2014). Então é recomendado que os medidores utilizados não sejam posicionados a menos de 50 cm do piso ou do teto para evitar essas áreas que podem ter problemas de estanqueidade nas juntas. É possível que a parede tenha diferentes temperaturas, por isso nestes casos o BRE diz ser necessário escolher posicionar o medidor em uma área capaz de representar uma média da temperatura de toda a parede, como é possível observar na Figura 5. Também é necessário evitar proximidade de aberturas, como janelas e portas, já que o valor medido seria comprometido. No geral, todos esses itens podem comprometer as medições, divisórias, paredes adjacentes a muros, pisos e tetos, pois podem afetar o fluxo de calor e distorcer as medições se estiverem muito próximas aos termômetros. Como o fluxo de calor também se dá com o tempo devido ao atraso térmico (condutividade térmica), é necessário que as medições sejam feitas por um período de tempo que permita uma análise mais precisa possível, como, por exemplo, duas semanas pelo menos, inclusive para que se determine com maior precisão o período em que a temperatura é máxima.

Figura 5: Exemplo de Uso dos Equipamentos.



Fonte: Hulme; Doran (2014).

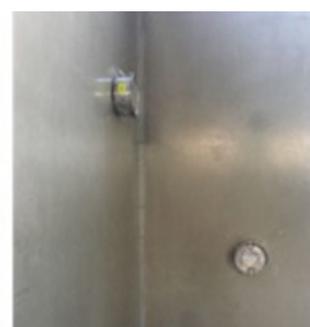
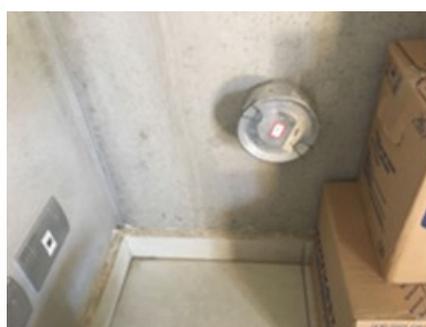
No presente estudo, foi limitado o estudo a painéis maciços ou sanduíche, sendo que o principal objeto de estudo são painéis de parede dupla de concreto com preenchimento de concreto *in loco*. Isso foi essencial para o artigo apresentado, pois tal modelo de construção elimina o problema de falta de estanqueidade das juntas por funcionar como um sistema monolítico. Foram selecionados dois projetos com essas características e realizadas aferições da temperatura da superfície de hora em hora por três semanas através de data loggers (Figura 6a e 6b), que são medidores e gravadores de dados de temperatura bem precisos com variações menores de 1°C, e também através de termovisor (Figura 7a e 7b), que é uma câmera térmica capaz de aferir a temperatura instantaneamente de uma superfície, cuja precisão é de $\pm 2^\circ\text{C}$ ou 2% (a 25 °C nominais, o que for maior), segundo o fabricante.

Figura 6: a) Exemplo de data logger HOBO similar ao utilizado e b) Exemplos da Instalação dos HOBOS na parede para aferimento da temperatura.



a

Fonte a: nvco.¹⁰



b

Fonte b: próprio autor.

Foi realizada uma pesquisa de campo com o uso do termovisor, para verificar a influência de diferentes fatores na temperatura da fachada das edificações. A Figura 7b é um

¹⁰ Disponível em: < <https://envcoglobal.com/catalog/hobo-temp-logger>>.

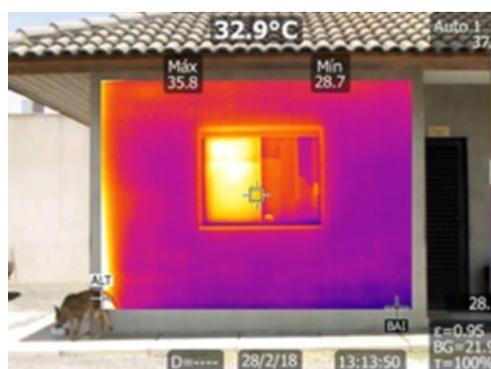
exemplo de foto tirada com o termovisor da guarita da Sudeste Pré-Fabricados, em Nova Odessa, que foi construída com o sistema mencionado. A câmera térmica é capaz de detectar as temperaturas da superfície dos elementos, a variação de temperatura é visível pela escala de cores, em que os valores de temperatura mais quentes são representados pelas cores mais quentes, como amarelo, e os valores de temperatura mais frios são representados pelas cores mais frias, como roxo, portanto representando melhor a distribuição da temperatura superficial do painel. A precisão do equipamento pode ser afetada pelo ângulo entre a fachada e a lente, portanto o ideal é que as medições sejam realizadas a 90°. Todos os valores apresentados são de medições realizadas com ângulo mais próximo do ângulo reto possível.

Figura 7: a) Câmera de Infravermelho Fluke Ti400 similar à utilizada e b) Exemplo de Imagem Obtida Através de Termovisor.



a

Fonte a: Fluke.¹¹



b

Fonte b: próprio autor.

Embora não fosse o objetivo principal da pesquisa a utilização dos data loggers, a partir do momento que foram disponibilizados, a pesquisa foi enriquecida. Como os equipamentos utilizados não pertenciam ao laboratório, mas foram cedidos para a pesquisa, não foi possível utilizá-los concomitantemente, pois seu uso dependia da disponibilidade e da agenda do laboratório a que pertenciam. Além disso, o principal objetivo desta pesquisa exploratória foi verificar a importância dos fatores que influenciam na temperatura da fachada e, consequentemente, no desempenho térmico dos painéis.

4.2 RESULTADOS E ANÁLISES

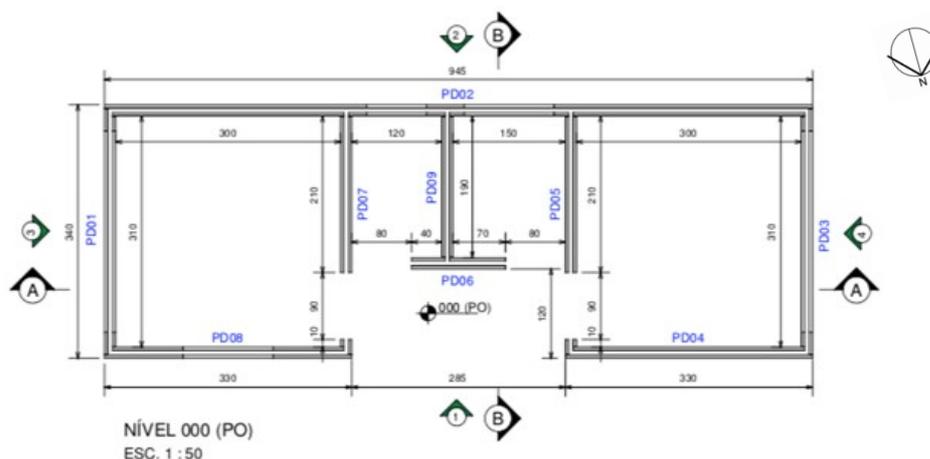
4.2.1 MEDIÇÃO DE ATRASO TÉRMICO (TEMPERATURA SUPERFICIAL DAS PAREDES)

A pesquisa exploratória para comparação da temperatura superficial das paredes foi realizada no protótipo que pertence à fábrica da Sudeste Pré-Fabricados, que foi construída

¹¹ Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/termovisor/termovisores/serie-professional/fluke-ti400>>

com paredes de 150mm de espessura duplas de concreto pré-fabricadas e preenchidas in loco com concreto. A figura 8 contém a planta do protótipo, sem a cobertura.

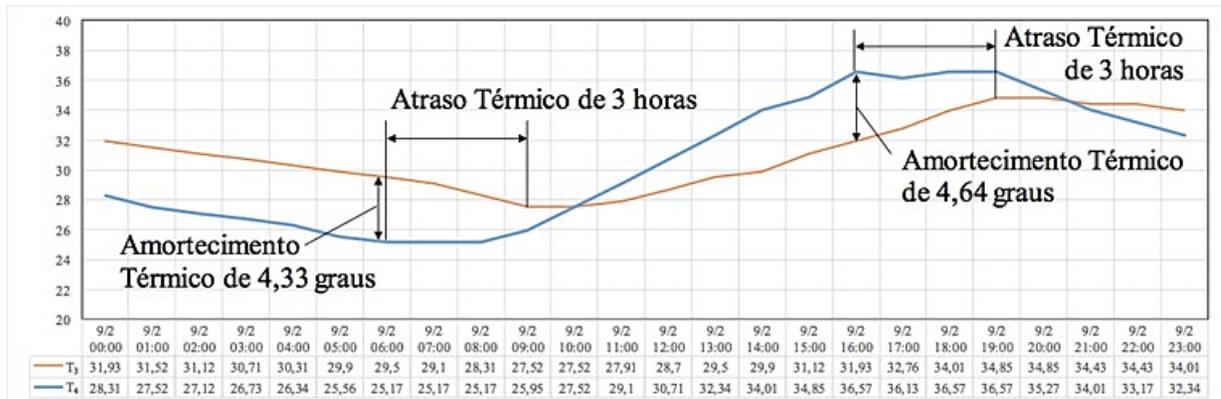
Figura 8: Planta baixa de Protótipo da Sudeste.



Fonte: Sudeste Pré-Fabricados.

Foi realizada a aferição da temperatura na fachada oeste para verificar o atraso térmico e a inércia térmica do painel de concreto, conforme é possível observar na figura 9. Os valores de temperatura foram aferidos através de data loggers nas superfícies interna (T_3), em vermelho, e externa (T_4), em azul, do painel, ambos localizados à sombra, para evitar que a radiação solar interferisse nas medições. Segundo o gráfico, a menor temperatura da face interna se dá entre nove e dez da manhã. É possível observar que a temperatura interna é a mesma que a temperatura externa por volta das dez horas da manhã. Das dez da manhã às quatro da tarde a temperatura externa aumenta, atingindo a temperatura máxima do dia, ultrapassando o valor da temperatura interna, e mantendo-se relativamente estável entre quatro e seis da tarde, e diminui a partir das sete da noite, sendo que às oito os valores de temperatura externa e interna novamente são os mesmos. Portanto, é possível concluir que durante o dia, após as dez da manhã, a temperatura externa é maior que a interna, e assim permanece até cerca de oito da noite, e durante a noite, a temperatura interna é maior que a externa. Isso se dá pela alta inércia térmica do concreto, que tende a esquentar durante o dia e resfriar durante a noite. Porém, a temperatura externa atinge sua máxima por volta das duas horas da tarde, enquanto o painel de concreto atinge sua máxima por volta das cinco da tarde, o que significa que o atraso térmico do painel de concreto é de 03 horas. Da mesma forma, as mínimas geralmente são atingidas durante as primeiras horas da manhã, por volta das seis, enquanto no painel isso ocorre às dez da manhã. O amortecimento térmico máximo registrado pela manhã foi de $4,33^{\circ}\text{C}$, e à tarde de $4,64^{\circ}\text{C}$.

Figura 9: Gráfico da Variação de Temperatura em Graus Celsius das Superfícies Interna e Externa do Painel da Fachada Oeste da Sudeste ao Longo do Dia.

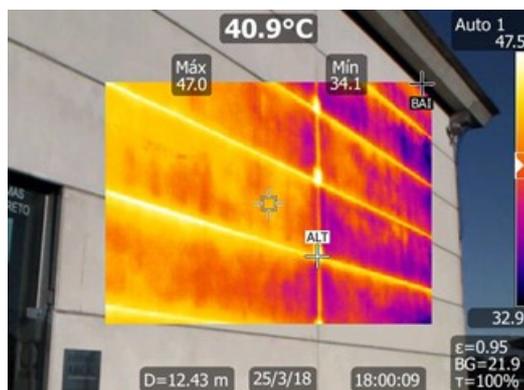


Fonte: próprio autor.

4.2.2 EFEITO DE PONTES TÉRMICAS EM JUNTAS DE PAINÉIS DE FACHADAS

A pesquisa exploratória realizada no laboratório do NETPre da UFSCar obteve valores de temperatura na fachada sul e leste às 14:00 de 29,5°C e 27°C respectivamente. Já nas fachadas oeste e norte, foram de 33,5°C e 46,6°C, respectivamente. Assim é possível observar que as fachadas que necessitam maior atenção são as fachadas norte e oeste. É importante notar que o painel Pi está presente nas fachadas norte e sul do NETPre, e as fachadas leste e oeste são compostas por painéis horizontais de 120mm de espessura. A diferença entre a temperatura externa e interna neste horário foi maior na fachada norte, chegando aos 3,7°C, enquanto nos painéis horizontais a maior diferença se deu na fachada oeste, 3,2°C. Entretanto, a diferença, menor do que deveria se esperar, se dá devido a construção do laboratório ter mais de 15 anos de idade e não ter sido feita nenhuma manutenção nas juntas do painel, como mostra a figura 10b, o que acarreta em problemas de estanqueidade no edifício, de tal forma que há presença de ponte térmica, conforme é visível nas figuras 10a e 11a e b.

Figura 10: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Oeste para Mostrar as Pontes Térmicas e b) Foto da Junta dos Painéis Horizontais do NETPre.



a

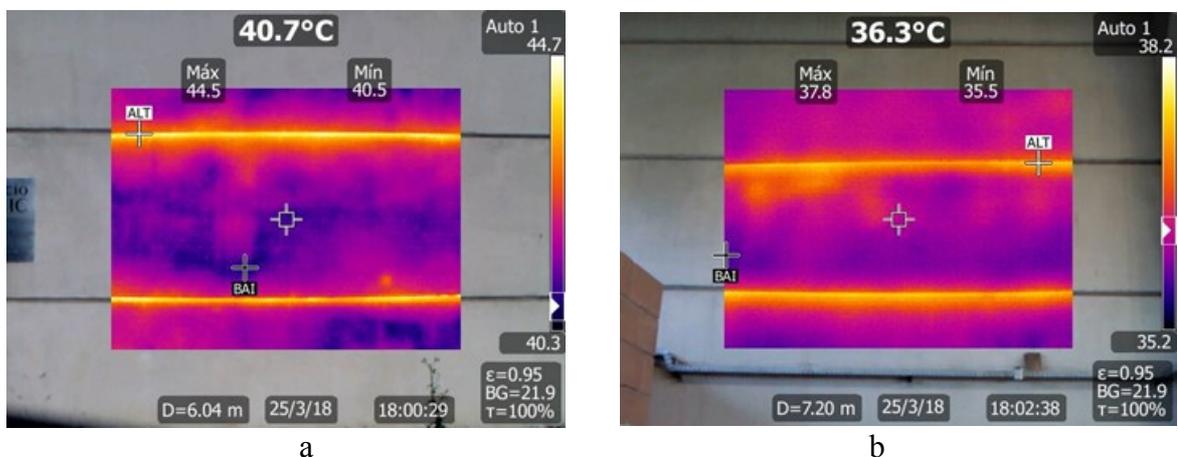


b

Fonte: próprio autor.

No final da tarde, depois de o painel acumular calor durante toda a tarde, a diferença de temperatura aferida no meio do painel na fachada oeste, chega a 5°C. Na figura 11, é possível ver que o valor da diferença de temperatura interna e externa é prejudicado pela falta de estanqueidade das juntas, e possivelmente poderia ser maior caso a junta estivesse estanque.

Figura 11: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Oeste Externa do NETPRE e b) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Oeste Interna do NETPre.



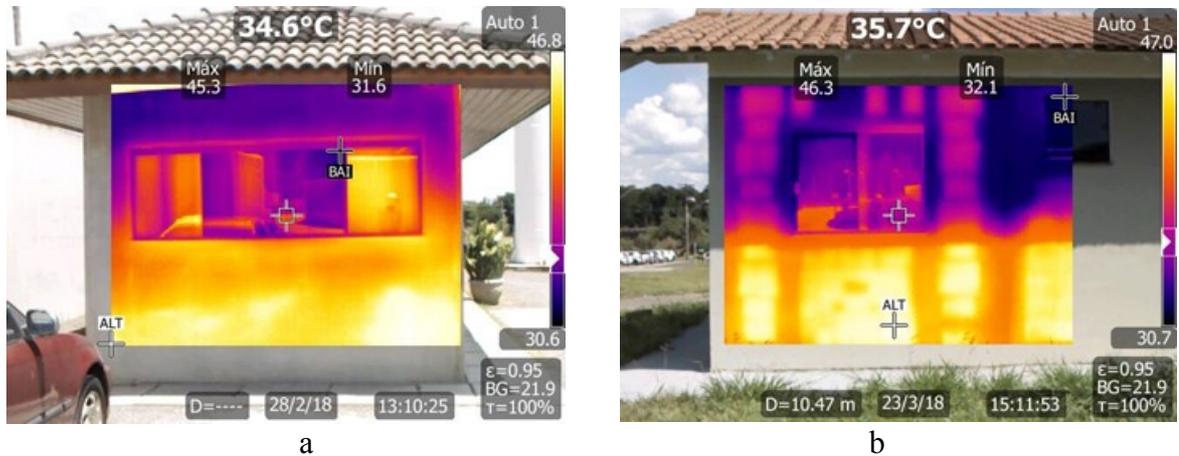
Fonte: próprio autor.

4.2.3 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA EM CONDIÇÃO DE SOMBREAMENTO E SOL

A fachada da figura 12a é a fachada Leste do protótipo da fábrica da Sudeste, que embora tenha sido fotografada ao meio-dia e o beiral projetasse sombra em toda a fachada neste momento, a parte alaranjada estava exposta ao sol durante a manhã. A figura 12b é a fachada Norte do protótipo do NETPre de paredes mistas de espessura 100mm, em que o beiral também projeta sombra. As paredes têm duas camadas de 25mm de concreto e 50mm de lajota entre as camadas de concreto. A diferença de temperatura que se observa entre a parte sombreada e a parte que estava exposta ao sol é de aproximadamente 12°C, portanto o sombreamento da fachada tem a capacidade de diminuir a temperatura da superfície do painel em pelo menos 10°C.

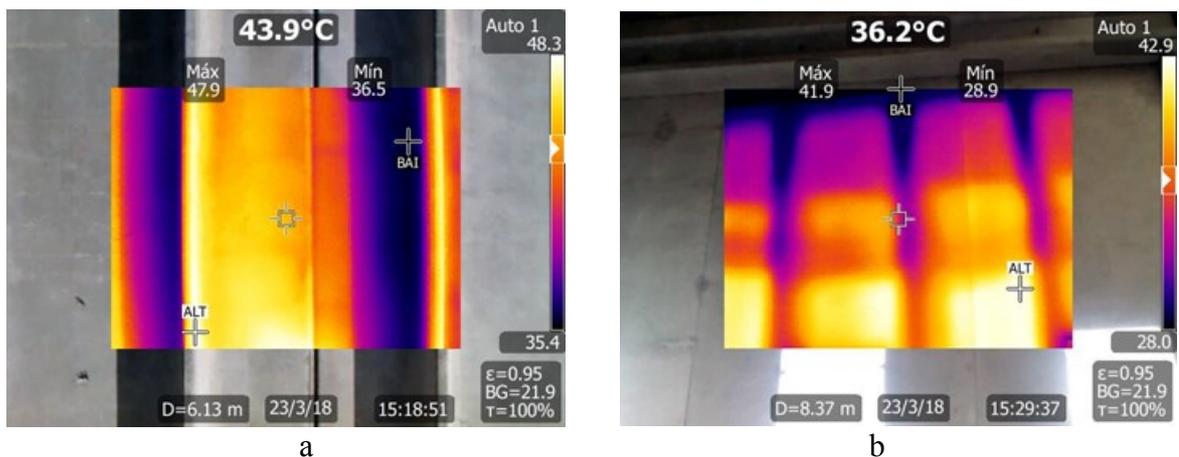
O painel Pi utilizado nas fachadas norte e sul do laboratório NETPre, devido a suas nervuras, projeta sombra na fachada, como mostra a figura 13. Através da imagem é possível notar que a sombra projetada pelo painel influencia na temperatura interna da fachada.

Figura 12: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Leste ao Meio-dia no Protótipo da Sudeste e b) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada do Protótipo do NETPre.



Fonte: próprio autor.

Figura 13: a) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Norte Externa do NETPre e b) Foto Obtida Através de Termovisor da Fachada Norte Interna do NETPre.

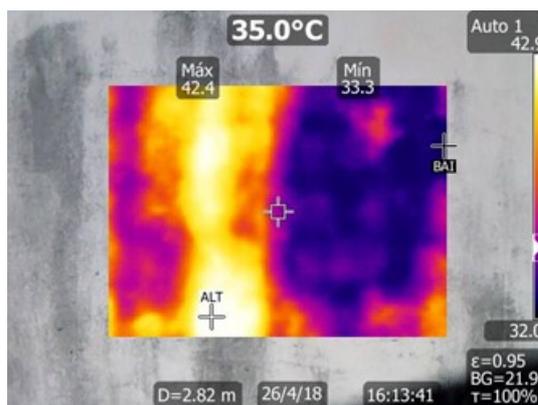


Fonte: próprio autor.

4.2.4 EFEITO DE COR BRANCA E COR DE CONCRETO

Conforme o estudo de absorvância solar de Dornelles (2008), a cor influencia na temperatura de uma superfície, devido ao fluxo de calor, e também a umidade. No caso da umidade, por exemplo, é possível verificar na figura 14 a diferença de temperatura de uma mesma superfície branca e acinzentada devido à ausência de tinta e presença de umidade.

Figura 14: Influência da Cor na Temperatura da Fachada.



Fonte: próprio autor.

A tabela 6 traz as temperaturas aferidas na fachada norte de um edifício pertencente ao Departamento de Engenharia Civil da UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, de cor branca e variação de umidade acinzentada, a fim de exemplificar a influência da cor na temperatura de uma fachada, conforme menciona o estudo de absorvância realizado por Dornelles (2008).

Tabela 7: Diferenças de Temperatura de Parede Cinza e Branca Obtidas Através de Termovisor

Laboratório	dia	horário	Sol ou sombra	Temperatura do ambiente (máxima e mínima registrada)	Temperatura máxima da parede na cor branca (Tb)	Temperatura máxima da parede na variação de umidade (Tc)	Diferença de temperatura ($\Delta T = Tc - Tb$)
Fachada Norte	26/04/2018	14:00	sol	23°/20°	32.4	45.9	13.5
Fachada Norte	26/04/2018	17:00	sol	23°/20°	29.9	41.6	11.97

Fonte: próprio autor.

É possível observar através da tabela que, estando as duas áreas lado a lado na mesma fachada, tendo recebido a mesma quantidade de sol, elas apresentam uma diferença entre si que varia de aproximadamente 12 a 13,5°C, dependendo do horário do dia, uma diferença muito significativa.

A figura 15 traz uma imagem aérea da área onde se encontra o laboratório do NETPre e é possível perceber que a falta de tratamento da cobertura é responsável pela leitura realizada pelo termovisor da figura 16. A cobertura do NETPre não possui antifugante ou impermeabilizante e sua cor se aproxima da cor preta, que tem maior absorvância.

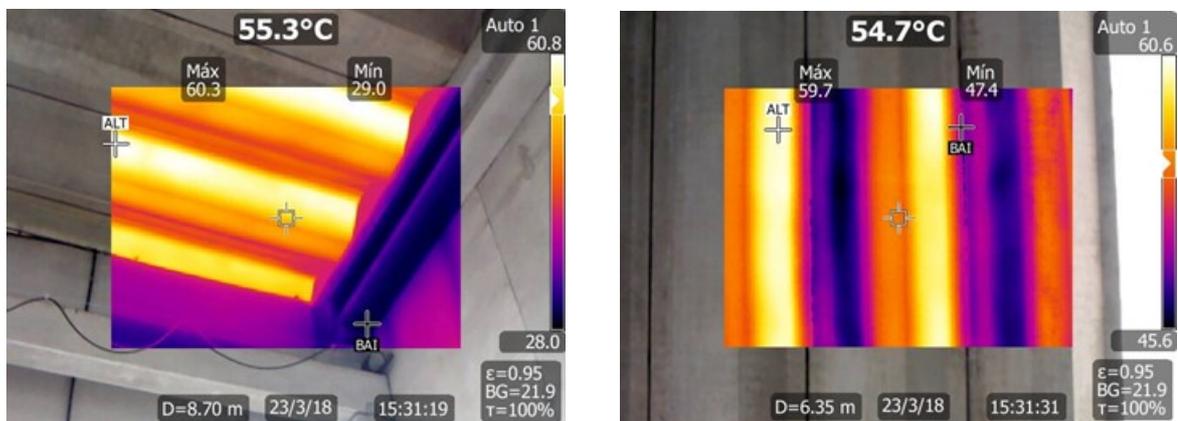
Figura 15: Foto aérea do laboratório do NETPre.



Fonte: acervo NETPre.

Além da fachada, a cobertura também pode influenciar o conforto do ambiente, conforme é possível observar na figura 16, onde a temperatura da cobertura atinge 60°C.

Figura 16: Foto Interna Obtida Através de Termovisor da Cobertura do NETPre.

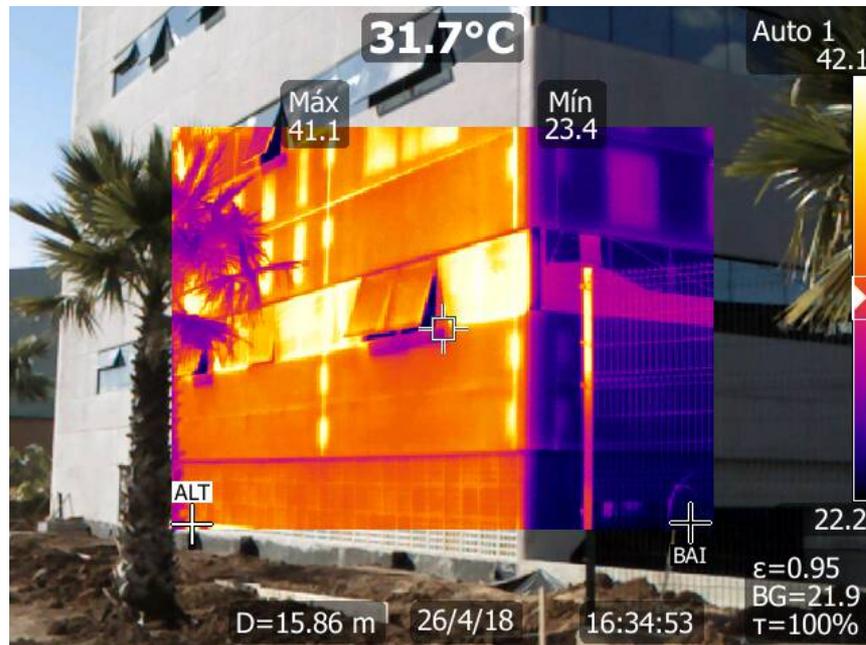


Fonte: próprio autor.

4.2.5 PAINÉIS COM ISOLAMENTO

Outra possibilidade de tratamento para a fachada que está mais exposta ao sol é o uso de painel sanduíche com isolamento térmico de espessura de 150mm. A tabela 7 traz os valores de temperatura máxima das fachadas sudoeste, sudeste e noroeste obtidos através do uso de termovisor em uma construção inacabada de prédio administrativo em São Carlos, que utiliza painéis de concreto preenchidos com isolante de poliestireno, conforme apresentado na figura 17. A diferença de temperatura atinge 17°C na fachada noroeste, uma fachada que é bastante atingida pelo sol.

Figura 17: Fachada com painel sanduíche em prédio administrativo.



Fonte: próprio autor.

Tabela 8: Diferenças de Temperatura Obtidas Através de Termovisor em Painéis Preenchidos com Isolante Térmico

	Dia	horário	Sol ou sombra	Temperatura ambiente em graus Celsius (máx/mín registrada)	Temperatura máxima interna da fachada	Temperatura máxima externa da fachada	Diferença de temperatura em graus Celsius
Fachada Sudoeste	26/04/2018	15:30	sol	23°/20°	28.4	36.9	8.5
Fachada Sudeste	26/04/2018	15:30	sombra	23°/20°		28.5	
Fachada Noroeste	26/04/2018	15:30	sol	23°/20°	30.3	47.5	17.2

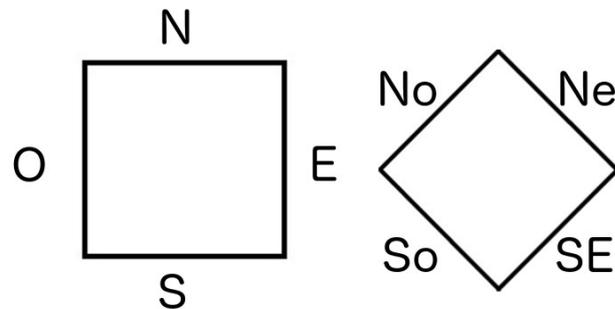
Fonte: próprio autor.

4.3 RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

A partir dos resultados obtidos e análises realizadas é possível compreender que existem fachadas que demandam maior atenção durante o projeto da construção que outras,

afim de garantir o conforto do ambiente. A figura 18 traz um esquema das possíveis orientações de fachada de uma edificação.

Figura 18: Esquema de Diferentes Orientações Possíveis de Fachada



Fonte: Próprio Autor.

O efeito da absorção solar nas paredes externas irá depender da orientação da fachada e da volumetria da construção, por influenciar na exposição da fachada ao sol. Como as fachadas sul, sudoeste e nordeste recebem pouca insolação, estas fachadas têm menos problemas de armazenamento de calor. Assim, são fachadas que poderiam permanecer com a face de concreto aparente, por exemplo, e não necessitam de sobreamento. Já as fachadas Norte e Sudoeste recebem maior insolação, são fachadas em que poderiam receber uma estratégia de sombreamento, o desenho do painel ou da fachada poderia contribuir para projetar sombra sobre a mesma, ou mesmo o uso de um painel nervurado como o painel pi, ou ainda o projeto pode prever um beiral ou brise, como exemplificado nas figuras 19 e 20.

Figura 19: a) Foto do Estacionamento do Pier de Pompano Beach e b) Foto do Estacionamento do Museu do Movimento Americano de Arts & Crafts.



a



b

Fonte: Ascent Winter 2018.

Figura 20: a) Foto do Projeto do Escritório Perkins+Will Para a Fachada do Centro de Saúde da Universidade da Flórida e b) Foto de Projeto da Fibrobeta na Turquia



a

Fonte a: Perkins+Will¹².

b

Fonte b: fibrobeton¹³.

No caso da fachada noroeste, como é a fachada que recebe maior insolação, necessita de um sombreamento mais intenso, sendo que é possível aproveitar a vegetação ou um projeto paisagístico de forma que a vegetação sombreie o painel durante a maior parte do dia. Outra opção seria usar um painel com isolamento térmico, como o painel sanduíche preenchido com isolante de poliestireno ou ainda utilizar o painel apenas como fechamento externo, como na Figura 21.

Figura 21: Construção finlandesa com painéis de concreto e drywall.



Fonte: Ferreira (2017).

A opção mais simples seria, entretanto, utilizar uma cor de tonalidade clara com o objetivo de diminuir a quantidade de calor que o painel armazenaria, ou seja uma cor que possua baixa absorção para que o fluxo de calor seja menor em comparação com uma cor

¹² Disponível em <<https://perkinswill.com/work/florida-international-university-academic-health-center-4>>

¹³ Disponível em <<http://fibrobeton.com.tr/proje-detay/turuncu-mimarlik-konut/440/>>

de maior absorção. Na figura 22 apresenta-se uma fachada com painéis pintados em tonalidades de concreto aparente com função decorativa.

Figura 22: Fachada com painéis pintados em estabelecimento comercial



Fonte: Ferreira (2017).

Segundo a NBR 15220 (2005), o concreto aparente apresenta uma absorção que varia entre 65% e 80%, enquanto DORNELLES (2008) recomenda uma absorção de 75%. Já para o caso de fachadas com cor branca, tanto a NBR 15220 (2005) quanto DORNELLES (2008) consideram uma absorção solar da ordem de 20%.

Com base na pesquisa realizada, a recomendação é que a escolha das tonalidades seja levada em conta não apenas pelo aspecto estético, mas em função da absorção solar das cores utilizadas nas faces dos painéis, onde seriam recomendáveis tonalidades claras, com absorção solar de até 30% nas fachadas com exposição ao sol vespertino.

No Anexo A encontram-se os valores de absorção para diferentes cores em superfícies opacas, conforme apresentado em Dornelles (2008), onde é possível notar que não é necessário utilizar apenas a cor branca, já que há uma variedade de cores com baixa absorção.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve seu foco no efeito da temperatura superficial externa em painéis pré-moldados de concreto e seu impacto no desempenho térmico do sistema construtivo. O efeito da absorção solar na temperatura superficial externa da fachada depende da orientação da fachada. Portanto, é possível compreender que existem orientações de fachadas que demandam maior atenção por parte do projetista, de modo a garantir uma eficiência térmica do sistema de fechamento.

Os fatores que afetam o desempenho térmico em sistemas de fechamentos integrados por painéis pré-moldados de concreto são variados, de modo que somente o método simplificado da tabulação da transmitância térmica de painéis em função da sua espessura não é suficiente para uma avaliação adequada de projeto, sendo necessária a realização da simulação computacional para a verificação do desempenho térmico.

Devido a grande diversidade climática brasileira, são necessárias soluções construtivas específicas para cada região e, devido ao desconhecimento dessas especificidades, edificações com baixo desempenho térmico e conseqüentemente elevado consumo de energia são recorrentes. Segundo Lamberts (2016), para cada zona bioclimática existem estratégias a serem adotadas para diminuir a temperatura do ar interno de uma edificação ou evitar perdas de calor em zonas mais frias. No caso das zonas das construções analisadas por esta pesquisa, conforme mencionado anteriormente, as estratégias seriam o resfriamento evaporativo, que aumenta a umidade do ar para diminuir sua temperatura através do uso de vegetação, fontes d'água ou outros recursos que resultem na evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar ou ainda tanques de água sombreados sobre a laje; ou a utilização de componentes construtivos com inércia térmica superior de forma que a amplitude da temperatura interior seja menor; ou o uso de ventilação natural, que pode ser cruzada, da cobertura ou do piso sob a edificação.

Considerando a massa específica do concreto armado (2500 kg/m³), tem-se uma condutividade térmica moderada, variando entre $\kappa = 1,75$ e $1,80$ (W/mK), fazendo que as paredes de concreto possuam inércia térmica elevada. Portanto, paredes com painéis de concreto absorvem o calor durante o dia e liberar lentamente o calor durante a noite, quando a temperatura externa diminui. À noite a temperatura externa esfria as paredes e o painel transfere essa temperatura lentamente para o interior da edificação durante o dia. Entretanto, em paredes externas com orientação para o oeste e noroeste, que estão expostas com

radiação solar durante todo o período vespertino, o aquecimento elevado da superfície externa da fachada pode comprometer o desempenho térmico do sistema de vedação.

A orientação da fachada e sua volumetria influenciam a exposição da fachada ao sol ou seu sombreamento, o que pode diminuir a temperatura da superfície em pelo menos dez graus. Logo, a importância do projeto de fachada é evidente, uma vez que seu desenho pode contribuir para essa redução de temperatura de sua superfície e consequente melhora do desempenho térmico da edificação. A necessidade do uso de elementos estratégicos como o beiral ou brises que projetem sombra sobre a fachada deve ser estudada na fase inicial de projeto. Adicionalmente, a vegetação pode contribuir para melhorar a qualidade do desempenho ao projetar sombra sobre a fachada, servindo de barreira aos raios solares, e ainda somando benefícios ao microclima, além de poder ser aplicada como elemento compositivo da paisagem, como o exemplo da figura 23. Por fim, a escolha da cor da fachada, devido à absorvância das cores, pode influenciar de modo significativo no desempenho térmico das paredes de concreto. Essa pode ser, inclusive, uma alternativa viável para melhorar o desempenho térmico de construções já existentes.

Figura 23: Exemplo do uso de vegetação em fachada.



Fonte: acervo Ferreira.

Como as fachadas sul, sudeste e nordeste recebem pouca insolação, estas fachadas têm menos problemas de armazenamento de calor. Assim, são fachadas que poderiam permanecer com a face de concreto aparente, por exemplo, e não necessitam de cuidados especiais com sombreamento. Já as fachadas Norte e Sudoeste recebem maior insolação, são fachadas em que poderiam receber uma estratégia de sombreamento, o desenho do painel ou da fachada poderia contribuir para projetar sombra sobre a mesma, ou mesmo o uso de um painel nervurado como o painel pi, ou ainda o projeto pode prever um beiral ou brise.

No caso das fachadas oeste e noroeste, que recebem maior insolação, necessita-se de um sombreamento mais intenso, sendo que é possível aproveitar a vegetação ou um projeto paisagístico de forma que a vegetação sombreie o painel durante a maior parte do dia. Outra opção seria usar um painel com isolamento térmico, como o painel sanduíche preenchido com isolante de poliestireno. Entretanto, a opção mais simples seria a utilização de pintura com uma cor clara que possua baixa absorvância solar, inferior a 30%, com o objetivo de diminuir a quantidade de calor que o painel armazenaria.

Com base nas medições de campo, as temperaturas superficiais em painéis pré-moldados com concreto aparente em fachadas oeste podem variar entre 10°C e 15°C para superfícies externas com insolação e sombreadas, enquanto para os casos de painéis com concreto aparente com painéis com superfície pintada com cor clara (com absorvância $\alpha < 0,3$), a temperatura superficial pode variar entre 15°C e 20°C. Portanto, considera-se que a absorvância solar deva ser considerada no projeto de fachadas com painéis pré-moldados, de modo a limitar o aquecimento superficial externo da fachada. Isto pode ser controlado pela escolha da cor da fachada em função da sua absorvância solar. O ideal é escolher uma cor que possua baixa absorvância para que o fluxo de calor seja menor em comparação com uma cor de maior absorvância. Esse procedimento pode ser, inclusive, uma alternativa viável para melhorar o desempenho térmico de construções já existentes. Entretanto, não há necessidade de utilizar a pintura de tintas com baixa absorvância em todas as fachadas, mas sim nas fachadas mais críticas, como oeste, norte e noroeste, que sofrem maior impacto solar.

Como pode ser observado na medição da inércia térmica dos painéis com paredes duplas, desde que não ocorra um aquecimento rápido na temperatura superficial externa das paredes da fachada, as paredes de concreto apresetam um comportamento interessante de atraso térmico de 3 horas, mas também apresentando um amortecimento da temperatura interna em relação à externa.

A falta de estanqueidade das juntas entre painéis e também entre painéis e piso ou entre painéis e cobertura, de forma que exista a presença de pontes térmicas no sistema, prejudica o desempenho térmico do painel, por isso é preciso um planejamento cuidadoso das juntas durante a fase de projeto e correta execução na fase da construção. Além disso, é essencial a inspeção e manutenção das juntas para evitar que o desempenho térmico do edifício seja prejudicado com o passar dos anos. É evidente a importância dos painéis com isolamento, especialmente nas fachadas que recebem maior insolação, como a fachada noroeste, devido à sua potencialidade em amortecer a temperatura em pelo menos 17°C, como foi possível observar nas medições realizadas entre as superfícies interna e externa.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As medições de campo na presente pesquisa foram realizadas em caráter exploratório e deveria ser expandida com o propósito de melhor caracterizar o desempenho térmico para painéis com espessuras típicas com 100, 120 e 150 mm.

Para trabalhos futuros, sugere-se os seguintes estudos:

- Estudo do efeito da rugosidade e porosidade da superfície do concreto aparente na temperatura superficial externa;
- Estudo do efeito de superfícies em concreto aparente com e sem aplicação de selantes hidrofugantes na temperatura superficial externa;
- Medições de campo e verificação da temperatura superficial externa em painéis com aplicações de revestimentos e pintura sobre concreto aparente, com estudo que identifique tons de tinta com baixa absorvância para fachadas de painéis de concreto;
- Análise comparativa das temperaturas externas e internas para diferentes sistemas construtivos;
- Estudo de eficiência de desempenho térmico em juntas de painéis de fachada.

6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Abril, 2017.

_____. **NBR 15.220**: Desempenho Térmico de Edificações. 2005.

_____. **NBR 15.575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. 2013.

_____. **NBR 16.475**: Painéis de Parede de Concreto Pré-moldado – Requisitos e Procedimentos. 2017.

Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto. **Anuário ABCIC**. Disponível em: <http://www.abcic.org.br/anuario_2016/ANUARIO_ABCIC_BAIXA_2016.pdf> Acesso em: 26/07/2017.

BRUNA, P. **Arquitetura, Industrialização e Desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP/Perspectiva, 1976. Coleção Debates, número 135.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

DORNELLES, K. A. **Absortância Solar de Superfícies Opacas**: métodos de determinação e Base de Dados para Tintas Látex Acrílica e PVA. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

FARAH, Marta Ferreira Santos. **Processo de trabalho na construção habitacional**: tradição e mudança. 1a. ed. São Paulo, SP, Brasil, Annablume, 1996, FAPESP. 308 p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **Planning and design handbook on precast building structures**. Lausanne, Suíça: FIB. 2013.

FERREIRA, M. de A. **Diretrizes de projeto**: sistemas pré- moldados de concreto. 2017. 162p. (Notas de aula).

FREITAS, A. P. de. **NBR 16.475 deve incentivar uso de painéis de parede de concreto pré-moldado no Brasil**. Disponível em <<https://techne.pini.com.br/2017/10/nbr-16-475-deve-incentivar-uso-de-paineis-de-parede-de-concreto-pre-moldado-no-brasil/>> Acesso em: 14/05/2018.

HULME, Jack; DORAN, Sean. **BRE Report: In-situ measurements of wall U-values in English housing.** Watford, Hertfordshire: [s.n.], 2014. 76 p. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/409428/In-situ_u-values_final_report.pdf> . Acesso em: 03 jul. 2018.

INMETRO. **Anexo da Portaria Inmetro número 50/2013: Anexo Geral V - Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros.** Rio de Janeiro: Inmetro. 2015. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/AnexoV.pdf>. Acesso em: 30/11/2016.

KNÖNER, N. **Sistema pré-fabricado para aplicação em construções provisórias de canteiros de obras.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2014.

LAMBERTS, R. **Desempenho térmico de edificações.** Apostila da disciplina ECV 5161 - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 7a. ed. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2016.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Diretriz para avaliação técnica de produtos. **DIRETRIZ SINAT N. 002.** Revisão 01. Sistemas construtivos integrados por painéis pré-moldados para emprego como paredes de edifícios habitacionais. Brasília, 2012.

OLIVEIRA, L. A. de. **Tecnologia de Painéis Pré-Fabricados Arquitetônicos de Concreto para Emprego em Fachadas de Edifícios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade São Paulo. São Paulo, 2002.

SACHT, H.M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos.** 229p. + anexos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

STRABELI, G.I. **Sistemas Construtivos Integrados por Painéis Estruturais Pré-Fabricados em Concreto para Aplicação em Edifícios Habitacionais.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2016.

TOMO, F. C. **Critérios para projetos de edifícios com paredes portantes de concreto pré-moldado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

ANEXO A

REVESTIMENTOS DE PAREDES E COBERTURAS (TINTAS)

Tipo	Número	Cor	Nome	α	Tipo	Número	Cor	Nome	α
Acrílica Fosca	01		Amarelo Antigo	51,4	Látex PVA Fosca	40		Branco Gelo	34,0
	02		Amarelo Terra	64,3		41		Erva doce	21,9
	03		Areia	44,9		42		Flamingo	46,8
	04		Azul	73,3		43		Laranja	39,9
	05		Azul Imperial	66,9		44		Marfim	29,7
	06		Branco	15,8		45		Palha	28,5
	07		Branco Gelo	37,2		46		Pérola	25,7
	08		Camurça	57,4	47		Pêssego	39,5	
	09		Concreto	74,5	48		Alecrim	64,0	
	10		Flamingo	49,5	49		Azul bali	48,9	
	11		Jade	52,3	50		Branco Neve	10,2	
	12		Marfim	33,6	51		Branco Gelo	29,7	
	13		Palha	36,7	52		Camurça	55,8	
	14		Pérola	33,0	53		Concreto	71,5	
	15		Pêssego	42,8	54		Marfim	26,7	
	16		Tabaco	78,1	55		Marrocos	54,7	
	17		Terracota	64,6	56		Mel	41,8	
Acrílica Semi-brilho	18		Amarelo Antigo	49,7	57		Palha	27,2	
	19		Amarelo Terra	68,6	58		Pérola	22,1	
	20		Azul	79,9	59		Pêssego	35,0	
	21		Branco Gelo	36,2	60		Telha	70,8	
	22		Cinza	86,4	61		Vanila	23,9	
	23		Cinza BR	61,1	62		Amarelo Canário	25,2	
	24		Crepúsculo	66,0	63		Areia	35,7	
	25		Flamingo	47,3	64		Azul Profundo	76,0	
	26		Marfim	33,9	65		Branco Neve	16,2	
	27		Palha	39,6	66		Branco Gelo	28,1	
	28		Pérola	33,9	67		Camurça	53,2	
	29		Preto	97,1	68		Cerâmica	65,3	
	30		Telha	69,6	69		Concreto	71,6	
	31		Terracota	68,4	70		Flamingo	44,4	
	32		Verde Quadra	75,5	71		Marfim	24,5	
	33		Vermelho	64,2	72		Palha	26,4	
Látex PVA Fosca	34		Amarelo Canário	29,3	73		Pérola	22,9	
	35		Amarelo Terra	61,4	74		Pêssego	29,8	
	36		Areia	39,0	75		Preto	97,4	
	37		Azul angra	32,3	76		Vanila	27,7	
	38		Bianco Sereno	26,6	77		Verde Musgo	79,8	
	39		Branco	11,1	78		Vermelho Cardinal	63,3	

* As imagens das cores aqui apresentadas podem não representar com exatidão a cor da tinta quando aplicada sobre as superfícies construtivas.

* α : 300 a 2500 nm (Espectro solar total).

Fonte dos dados de revestimentos de paredes e coberturas (tintas):

DORNELLES, Kelen Almeida. **Absortância solar de superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ANEXO B

CÁLCULOS DA TABELA 5

O cálculo da tabela 5 foi realizado conforme a norma de desempenho ABNT NBR 15575. O primeiro dado, $\rho = 2500 \text{ kgf/m}^3$, é o valor usualmente do concreto armado. O valor de λ ($\text{W}/(\text{m.K})$) foi retirado da NBR 15575. As espessuras dos painéis são as mais comumente utilizadas no mercado atualmente, começando por 100mm por ser o valor que atende a tabela da NBR 9062, reproduzida a seguir, e terminando em 250mm que é a espessura máxima abrangida pela NBR 16475 (ABNT, 2017).

Tabela 9: Espessura mínima do painel maciço em função do TRRF e tipo de agregado

Tipo de Agregado	Espessura efetiva em função da resistência ao fogo mm				
	1h (60 min)	1,5 h (90 min)	2h (120 min)	3h (180 min)	4h (240 min)
Argila expandida, vermiculite ou ardósia expandida	65	80	90	115	130
Pedras calcárias	75	90	110	135	160
Pedras silicosas (quartzos, granitos ou basaltos)	80	100	120	150	175

Fonte: ABNT NBR 9062:2017

Assim, os valores de TRRF foram preenchidos conforme esta tabela. Os valores de amortecimento acústico da coluna seguinte foram estimados segundo o guia CBIC (2013), através da equação 2.5, que trata do isolamento acústico para paredes maciças.

$$R_w \approx 12 + 5,3M^{1/3} \quad (2.5)$$

Onde:

M: massa da parede (kg/m^2)

R_T é a resistência total de ambiente a ambiente, determinada pela fórmula a seguir.

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (2.5)$$

Onde:

R_{si} e R_{se} : resistências térmicas das superfícies interna e externa, que dependem da direção do fluxo de calor, obtidas da tabela A1 da ABNT NBR 15220 ($\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$);

R_t : resistência térmica da camada de concreto, calculada através da equação 2.1 ($m^2.K/W$).

A norma de desempenho térmico ABNT NBR 15220 é referência para o cálculo da resistência e transmitância térmica, conforme as equações 2.1 e 2.2. Os cálculos para cada espessura de painel da tabela 5 encontram-se abaixo, considerando que não há camada de ar, uma vez que se tratam de painéis maciços.

a) $E=100\text{mm} = 0,1\text{m}$

$$R_a = \frac{0,1}{1,75} = 0,057\text{m}^2.K/W$$

$$R_T = 0,04 + 0,057 + 0,13 = 0,227\text{m}^2.K/W$$

$$U = \frac{1}{0,227} = 4,40\text{ W/m}^2.K$$

b) $E=120\text{mm} = 0,12\text{m}$

$$R_b = \frac{0,12}{1,75} = 0,069\text{m}^2.K/W$$

$$R_T = 0,04 + 0,069 + 0,13 = 0,239\text{m}^2.K/W$$

$$U = \frac{1}{0,239} = 4,19\text{ W/m}^2.K$$

c) $E=140\text{mm} = 0,14\text{m}$

$$R_c = \frac{0,14}{1,75} = 0,080\text{m}^2.K/W$$

$$R_T = 0,04 + 0,080 + 0,13 = 0,250\text{m}^2.K/W$$

$$U = \frac{1}{0,250} = 4,00\text{ W/m}^2.K$$

d) $E=150\text{mm} = 0,15\text{m}$

$$R_d = \frac{0,15}{1,75} = 0,086\text{m}^2.K/W$$

$$R_T = 0,04 + 0,086 + 0,13 = 0,256\text{m}^2.K/W$$

$$U = \frac{1}{0,250} = 3,91\text{ W/m}^2.K$$

e) $E=175\text{mm} = 0,175\text{m}$

$$R_e = \frac{0,175}{1,75} = 0,1\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_T = 0,04 + 0,1 + 0,13 = 0,270\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$U = \frac{1}{0,270} = 3,70 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

f) $E=200\text{mm} = 0,20\text{m}$

$$R_f = \frac{0,2}{1,75} = 0,114\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_T = 0,04 + 0,114 + 0,13 = 0,284\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$U = \frac{1}{0,284} = 3,52 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

g) $E=250\text{mm} = 0,25\text{m}$

$$R_g = \frac{0,25}{1,75} = 0,143\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_T = 0,04 + 0,143 + 0,13 = 0,313\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$U = \frac{1}{0,313} = 3,20 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$