



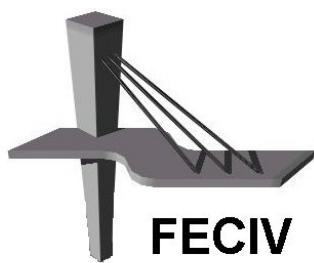
UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE  
CONCRETOS COM AR INCORPORADO**

**Laura Borges Cintra**

**UBERLÂNDIA, 30 DE AGOSTO DE 2017**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia**  
**Civil**



**Laura Borges Cintra**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE  
CONCRETOS COM AR INCORPORADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Orientadora: Profª. Drª. Leila Aparecida de Castro Motta**

Uberlândia, 30 de agosto de 2017.

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais Celso e Lunamar;  
Aos meus irmãos, Celso Emiliano e Luana;  
À minha cunhada Lívia e sobrinhas, Isabella e Isadora;  
E a toda minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelas bênçãos e oportunidades que me concedeu, nessa caminhada de estudos e descobertas.

À minha família por apoiar-me sempre e ser a razão da minha vida.

À professora e orientadora Dr<sup>a</sup>. Leila Aparecida de Castro Motta pela disponibilidade, atenção, dedicação, paciência, ensinamentos técnicos e valores humanos transmitidos durante o período de realização deste trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Materiais e Construção Civil Wanderly Geraldo da Silva e à técnica do Laboratório de Estruturas Cristiane Pires, da Universidade Federal de Uberlândia, pela ajuda na execução dos ensaios.

Ao técnico Diego Luiz Ferrari da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga, pela ajuda na realização dos ensaios de condutividade térmica.

À Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Civil, pelo apoio à realização desta pesquisa.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela disponibilização do laboratório e equipamentos.

Ao CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

A todos os amigos e colegas, que de alguma forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

Cintra, L. B. Avaliação das propriedades térmicas de concretos com ar incorporado. 144p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

## RESUMO

A aplicação de aditivo incorporador de ar, em proporções controladas, interfere nas propriedades mecânicas e térmicas do concreto. Isso leva à necessidade de estudos para avaliar o seu desempenho nas edificações. O objetivo do trabalho foi avaliar as propriedades térmicas de concretos com variação do teor de ar (referência-3%, 8%, 11%, 12%), considerando-se temperaturas do período de verão brasileiro. A metodologia incluiu ensaios de desempenho térmico em 16 painéis de concreto, sendo 4 painéis de referência e 4 painéis para cada teor de aditivo incorporador de ar, com dimensões de 99 cm × 99 cm × 10 cm, entre câmaras de dois compartimentos isolados termicamente; ensaios com fluxo de calor unidirecional em corpos de prova cilíndricos (10 x 10) cm extraídos dos painéis e determinação da condutividade térmica em amostras (5 x 2,5) cm dos concretos estudados conforme ASTM E1530 - 11. Nos ensaios de comportamento térmico na câmara climatizada, simulando condições internas e externas, obtiveram-se temperaturas internas menores do que as temperaturas externas para todos os concretos em estudo (referência, 8%, 11% e 12%), o que está de acordo com a especificação da ABNT NBR 15575: 2013. No entanto, não houve diferença significativa quanto ao desempenho térmico dos concretos com ar incorporado (8%, 11% e 12%) comparado ao concreto de referência (3%), pois conforme análise estatística os concretos em estudo apresentaram comportamentos térmicos iguais. As condutividades térmicas determinadas também resultaram em valores similares estatisticamente para todos os concretos estudados, porém os valores obtidos foram abaixo daqueles especificados pela norma ABNT NBR 15220: 2005, inclusive o de referência. Quanto a transmitância térmica, os concretos em estudo apresentaram valores abaixo de 3,7 W/m<sup>2</sup>. K, determinados conforme ABNT NBR 15220: 2005, atendendo, portanto, aos requisitos da ABNT NBR 15575:2013 para as zonas climáticas de 3 a 8, desde que a absorção da superfície seja inferior a 0,6.

**Palavras-chave:** Concreto com ar incorporado. Desempenho térmico. Paredes de concreto. Condutividade térmica. Transmitância térmica.

Cintra, L. B. Evaluation of the thermal properties of air entrained concretes. 144p. Dissertation of Master, Civil Engineering College, Federal University of de Uberlandia, 2017.

## ABSTRACT

The application of air entraining admixture, with controlled proportion, influence mechanical and thermal of concrete. This leads the necessity of studies to evaluate its performance in buildings. The objective of this work is to evaluate the thermal properties of entrapped/entrained air variation concrete (reference - 3%, 8%, 11%, 12%), considering temperatures of brazilian summer period. The methodology includes tests of thermal performance with 16 concretes panels, 4 reference panels and 4 panels for each air incorporated variation, with dimensions of 99 cm × 99 cm × 10 cm, applied at chambers with two isolated thermal compartments; tests with unidirectional heat flux in cylindrical proof bodies (10 cm x 10 cm) extracted from that's panels and was determined the thermal conductivity in samples (5 cm x 2,5 cm) of the studied concrete according ASTM E1530 – 11. In these tests the thermal performance at the climatized chambers, simulating internal and external conditions, obtained inside temperatures lower than external temperatures to all studied concretes (reference: 8%, 11% and 12%), which is according with the specification of the ABNT NBR 15575: 2013. However, there was no significant difference between the thermal performance of the concretes with incorporated air (8%, 11% and 12%) with the reference concrete (3%), because as the statistical analysis the studied concrete presents the same thermal behavior. The thermal conductivity also resulted in values statistically similar for all studied concretes, but the obtained values was below of specified by standard ABNT NBR 15220: 2005, inclusive the reference concrete. About the thermal transmittance, the studied concretes show values below 3,7 W/m<sup>2</sup>K, determined according ABNT NBR 15220: 2005, attending, therefore, to the requisites of ABNT NBR 15575:2013 to 3 to 8 climates zones, since that absorção of surface be less than 0,6.

**Keyword:** Air entrained concrete. Thermal performance. Concrete wall. Thermal Conductivity. Thermal Transmittance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração de uma molécula de incorporador de ar, em que apresenta uma extremidade hidrofóbica e uma extremidade hidrofílica.....	20
Figura 2 – Ilustração das possíveis formas de ancoragem das bolhas nas pastas cimentícias .....	21
Figura 3 – Representação das diferentes interfaces promovidas pela ação dos incorporadores .....	22
Figura 4 –Variação da tensão superficial da solução em função da concentração de incorporador de ar .....	23
Figura 5 – Relação entre a dimensão máxima de agregado e a quantidade de ar incorporado .....	25
Figura 6 – Relação entre a porcentagem de agregado miúdo e porcentagem de ar incorporado no concreto .....	25
Figura 7 – Efeito do ar incorporado e do ar acidental sobre a resistência do concreto .....	27
Figura 8 – Relação entre a resistência a compressão aos 90 dias e ar incorporado .....	27
Figura 9 – Relação entre ar incorporado em concretos com resistência a compressão aos 28 dias de idade com variação da quantidade de cimento.....	28
Figura 10 – Troca entre um ambiente real e o corpo e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo, por meio da temperatura radiante média .....	36
Figura 11 – Diagrama do conforto térmico para o ser humano .....	53
Figura 12 – Zonas bioclimáticas do Brasil.....	58
Figura 13 – Zona Bioclimática 6.....	59
Figura 14 – Gráfico da temperatura média mensal de outubro de 2014 .....	60
Figura 15 – Painéis de concreto moldados para ensaio.....	68
Figura 16 – Câmara climatizada utilizada nos ensaios térmicos dos painéis (a) e Compartimento interno da câmara (b) .....	71
Figura 17 – Projeto da câmara climatizada do laboratório da FECIV-UFU .....	72
Figura 18 – Posicionamento das placas na câmara .....	72
Figura 19 – Distribuição dos termopares nos painéis .....	73

Figura 20 – Esquema de montagem do ensaio .....	74
Figura 21 – Local da extração das amostras .....	75
Figura 22 – a) Sistema utilizado para a avaliação do comportamento térmico e b) Corpos de prova isolados em contato com a placa aquecida na Termoprensa.....	75
Figura 23 – Esquema do isolamento da amostra (a) e Amostra isolada com lã de rocha (b) .....	76
Figura 24 – Local da extração das amostras .....	77
Figura 25 – Corpo de prova extraído do painel (a) e Amostra utilizada para o ensaio conforme ASTM E1530-11 .....	77
Figura 26 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de condutividade térmica dos concretos: (a) sem HFT e (b) com HFT.....	78
Figura 27 – Equipamento DTC 300 da TA instruments .....	78
Figura 28 – Esquema dos componentes do equipamento usado no ensaio de condutividade térmica .....	79
Figura 29 - Verificação do isolamento térmico entre os compartimentos da câmara .....	83
Figura 30 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara .....	84
Figura 31 – Variação de temperatura média do ambiente interno para cada ensaio dos concretos no compartimento esquerdo não aquecido da câmara .....	84
Figura 32 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara – 1 <sup>a</sup> Etapa.....	85
Figura 33 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara – 2 <sup>a</sup> Etapa.....	86
Figura 34 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara – 3 <sup>a</sup> Etapa.....	86
Figura 35 – Variação de temperatura média no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecido da câmara.....	87
Figura 36 - Variação de temperatura média no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecido da câmara .....	88
Figura 37 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecimento da câmara – 1 <sup>a</sup> Etapa .....	88

Figura 38 – Variação de temperatura média no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecido da câmara – 2 <sup>a</sup> Etapa .....	89
Figura 39 – Variação de temperatura média da câmara no compartimento direito aquecido – 3 <sup>a</sup> Etapa.....	90
Figura 40 – Temperatura da base dos corpos de prova em contato com a placa aquecida ..	93
Figura 41 – Temperaturas na base inferior dos concretos e temperaturas na placa aquecida .....	93
Figura 42 – Temperaturas dos topos isolados dos corpos de prova (faces superiores afastadas da placa aquecida) .....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Absortividade de superfícies e cores .....	43
Tabela 2 – Emissividade de superfícies e cores .....	44
Tabela 3 – Condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção civil .....	46
Tabela 4 – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas .....	47
Tabela 5 – Resistência térmica superficial interna e externa .....	48
Tabela 6 – Calor específico e densidade de alguns materiais utilizados na construção civil .....	51
Tabela 7 – Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissível para cada tipo de vedações externas .....	55
Tabela 8 – Propriedade térmica de materiais utilizados em paredes externas .....	55
Tabela 9 – Transmitância térmica, Capacidade térmica e Atraso térmico para algumas paredes.....	55
Tabela 10 – Transmitância térmica de paredes externas.....	57
Tabela 11 – Capacidade térmica de paredes externas .....	57
Tabela 12 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão .....	57
Tabela 13 – Dados de temperaturas médias e umidade relativa do ar na cidade de Uberlândia - MG .....	60
Tabela 14 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno .....	64
Tabela 15 – Caracterização do cimento CP V.....	68
Tabela 16 – Caracterização do agregado miúdo .....	69
Tabela 17 – Caracterização do agregado graúdo .....	69
Tabela 18 – Informações do Aditivo Incorporado de ar (IAR).....	69
Tabela 19 – Consumo dos materiais do concreto.....	70
Tabela 20 – Resultados obtidos no estado fresco do concreto .....	80
Tabela 21 – Resultados médios e desvios padrão das propriedades do concreto no estado endurecido .....	81

Tabela 22 – Resultados médios e desvios padrão das propriedades do concreto no estado endurecido .....	82
Tabela 23 – Diferenças entre temperaturas máximas atingidas entre os compartimentos aquecido e não aquecido .....	91
Tabela 24 – Ganho de temperatura dos concretos em estudo no compartimento esquerdo não aquecido .....	91
Tabela 25 – Comparaçao de temperaturas consideradas internas e externas de uma edificação .....	92
Tabela 26 – Diferença de temperatura na base inferior em contato com a placa aquecida e topo isolado .....	94
Tabela 27 – Resultados da condutividade térmica dos concretos .....	95
Tabela 28 – Valores da resistência e transmitância dos concretos estudados .....	96

## SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

### SÍMBOLOS

- $\lambda$  - condutividade térmica do material;  
 $A$  - área da seção transversal;  
 $\Delta T$  - diferença de temperatura;  
 $l$  - distância entre os pontos em que foi realizada a medição de temperatura.  
 $\alpha$  - absorvividade  
 $\rho$  - massa específica  
 $\tau$  - transmissividade  
 $\varepsilon$  - emissividade  
 $R$  - resistência térmica  
 $U$  - transmitância térmica  
 $Q$  - fluxo de calor  
 $C$  - capacidade térmica  
 $\emptyset$  - diâmetro  
 $E$  - espessura do material  
 $\Phi$  - atraso térmico

### ABREVIATURAS

PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida

### SIGLAS

*INMET* - Instituto Nacional de Meteorologia

SEPLAN - Secretaria de Planejamento da prefeitura de Uberlândia

# SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	7
LISTA DE TABELAS .....	10
SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS .....	12
CAPÍTULO 1 .....	15
INTRODUÇÃO .....	15
1.1 OBJETIVO.....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	17
CAPÍTULO 2 .....	18
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 ADITIVO .....	18
2.1.1. Aditivo incorporador de ar .....	20
2.1.2 Concreto com Ar incorporado .....	24
2.2 PAREDES DE CONCRETO .....	29
2.2.1 Aplicação de paredes de concreto .....	29
2.2.2 Sistema Construtivo de paredes de concreto.....	30
2.2.3 Perspectivas futuras da aplicação de paredes de concreto .....	33
2.3 CONCEITOS CLIMATOLÓGICOS .....	34
2.3.1 Bioclimatologia .....	34
2.3.2 Clima .....	35
2.3.4 Temperatura radiante média.....	36
2.3.5 Umidade relativa do ar .....	36
2.4 O CLIMA DO TERRITÓRIO BRASILEIRO .....	37
2.4.1 Temperaturas e umidades no território brasileiro .....	39
2.5 ALGUNS CONCEITOS E DEFINIÇÕES DA TERMODINÂMICA .....	40
2.5.1 Calor .....	40
2.5.2 Radiação .....	41
2.5.3 Convecção .....	42
2.5.4 Condução.....	42
2.5.5 Absortividade ( $\alpha$ ) e Emissividade ( $\varepsilon$ ) .....	42
2.5.6 Fluxo de calor (Q) .....	44
2.5.7 Condutividade térmica ( $\lambda$ ).....	45
2.5.8 Resistência térmica (R) .....	46
2.5.9 Transmitância térmica (U) .....	49
2.5.10 Atraso Térmico ( $\varphi$ ) .....	49
2.5.11 Difusividade térmica ( $\alpha$ ) .....	50
2.5.12 Calor específico (c) .....	50
2.5.13 Capacidade térmica (C).....	51
2.6 NORMAS E APLICAÇÕES AO DESEMPENHO TÉRMICO .....	52
2.6.1 Zonas Bioclimáticas .....	58
2.6.2 Zona Bioclimática da Região do Triângulo Mineiro .....	59

2.7 DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES .....	60
2.7.1 Desempenho térmico do concreto .....	61
 CAPÍTULO 3 .....	67
MATERIAIS E MÉTODOS .....	67
3.1 PAINÉIS DE CONCRETO UTILIZADOS NA PESQUISA .....	67
3.1.1 Caracterização dos concretos produzidos .....	67
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA AVALIAZAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO .....	71
3.2.1 Procedimento de avaliação do desempenho térmico dos painéis na câmara climatizada .....	71
3.2.2 Procedimento de avaliação do desempenho térmico nos corpos de prova .....	74
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	76
 CAPÍTULO 4 .....	80
RESULTADOS E ANÁLISES .....	80
4.1 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	80
4.2 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	81
4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO DOS PAINÉIS NA CÂMARA CLIMATIZADA.....	83
4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO NOS CORPOS DE PROVA .....	92
4.5 RESULTADOS DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA .....	95
4.6 CÁLCULO DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA .....	96
 CAPÍTULO 5 .....	99
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
5.1 Conclusões .....	99
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	100
 APÊNDICE A .....	107
TEMPERATURAS MÁXIMAS/MÍNIMAS E UMIDADE RELATIVA POR ESTADO DO BRASIL.....	107
 APÊNDICE B .....	112
ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PESQUISA ..	112

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A dinâmica de desenvolvimento tecnológico na indústria da construção civil se mantém em nosso país, mesmo com a diminuição de investimentos no setor produtivo. A busca pela eficiência, maior produtividade com qualidade e menores custos são condições fundamentais para garantir a sobrevivência no mercado. A implementação da norma ABNT NBR 15575:2013 de desempenho trouxe parâmetros quantitativos que podem ser medidos para a diminuição das incertezas dos critérios subjetivos na construção civil e regular as relações da cadeia econômica. Ela propicia a instrumentação do Código de Defesa do Consumidor e estimula o reconhecimento de empresas que aplicam as normas regulamentadas. Assim, avaliar o desempenho dos sistemas construtivos se tornou um avanço para o setor e o caminho para a evolução de todos que compõem o setor da construção civil.

A ABNT 15575:2013 define os fatores de desempenho das edificações com requisitos para sistemas estruturais, sistemas de vedações verticais internos e externos, e requisitos para sistemas de coberturas. No desempenho térmico ela é complementada pela ABNT NBR 15220:2005 que abrange o zoneamento bioclimático brasileiro e as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, além de apresentar os métodos de cálculo de algumas propriedades térmicas dos materiais que compõem as edificações. Essas normas têm contribuído para a análise das condições térmicas das edificações e sistemas estruturais. Nessas normas, consideram-se parâmetros para o concreto normal, cavernoso, com pozolana, entre outros. Entretanto, há poucas considerações e citações sobre o desempenho térmico do concreto com ar incorporado.

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, principalmente devido sua versatilidade de aplicação nas edificações. Com os avanços tecnológicos no estudo dos concretos a inclusão de aditivos, entre eles os incorporadores de ar, tornaram-se alternativas possíveis para aumentar sua aplicação e utilização no setor da construção civil, como por exemplo a aplicação de concretos leves em painéis monolíticos moldados *in loco* em edificações habitacionais de interesse social. Os aditivos incorporadores de ar produzem no concreto bolhas de ar estáveis, que diferentemente dos outros vazios encontrados no

concreto, a presença dessas bolhas pode trazer importantes benefícios ao concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (DA ROSA, 2013). Esses aditivos modificam propriedades físicas como a massa específica e a trabalhabilidade, reduz a resistência à compressão e interferem nas propriedades térmicas dos concretos.

O desempenho térmico das edificações é um fator relevante, que os profissionais de engenharia e arquitetura buscam adequar em seus projetos, por meio da utilização de sistemas construtivos e materiais que apresentam desempenho adequado nas edificações. Há no meio acadêmico estudos que avaliam o desempenho do concreto com ar incorporado, entre eles destacam-se: trabalhabilidade, propriedades mecânicas, acústicas e térmicas do concreto com um alto volume de ar incorporado (KIM *et al.*, 2012); avaliação da influência do teor de ar incorporado, por meio do aditivo, no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados (BARBAR, 2016). E, ressaltam-se trabalhos realizados no Projeto de Pesquisa “Concreto com Ar Incorporado” do grupo da FECIV-UFU, como: estudo do desempenho térmico de concretos com ar incorporado (CINTRA, 2015); análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado (MAGALHÃES, 2016) e análise da durabilidade do concreto com ar incorporado para uso em paredes estruturais desenvolvida por Lorena Campos em sua dissertação de mestrado de 2017 em publicação.

O trabalho tem sua importância na avaliação do comportamento térmico de concretos com diferentes proporções de ar incorporado. Esse estudo contribuirá para avaliar como o ar incorporado modifica o desempenho térmico dos concretos em temperaturas extremas de verão com teores de até 12%. Acredita-se que, conhecendo esses parâmetros, contribui-se para o conhecimento e especificações mais precisas de propriedades desses materiais na literatura e, principalmente, em normas técnicas.

O presente trabalho justifica-se também pela motivação em fomentar o setor da construção civil com informações que auxiliem a comunidade na execução de projetos que garantam o desempenho térmico exigido pelas normas em vigor no país.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho térmico de concretos com ar incorporado por meio de aditivos em uma pesquisa experimental.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho térmico de concretos com variação de ar incorporado por meio de aditivos, quando submetidos a temperaturas e umidades relativas típicas de verão, visando a sua aplicação em paredes de concreto.
- Comparar propriedades térmicas dos concretos com diferentes teores de ar incorporado, com os valores que são especificados pela norma de desempenho ABNT NBR15575: 2013 e pela ABNT NBR 15220:2005.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho constitui-se de quatro capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução.
- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica sobre aditivo e concreto com ar incorporado, paredes de concreto, conceitos climatológicos, o clima e as temperaturas do território brasileiro, desempenho térmico das edificações, conceitos termodinâmicos, normas e aplicação ao desempenho térmico.
- Capítulo 3: apresenta a metodologia desenvolvida para o estudo proposto.
- Capítulo 4: apresenta os resultados dos experimentos, as análises e discussões.
- Capítulo 5: apresenta as conclusões obtidas do programa experimental e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 ADITIVO

Define-se aditivo como um produto não indispensável à composição e finalidade do concreto, que adicionado antes ou durante na sua mistura, em quantidades geralmente pequenas e bem homogeneizado, faz aparecer ou reforçar certas características (BAUER, 2013).

A ASTM C 125 define aditivo como material outro que não água, agregado ou cimento, empregado como ingrediente do concreto ou da argamassa, adicionado a estes, antes ou durante a mistura.

Aditivos utilizados corretamente permitem as seguintes ações: modificar ou melhorar a trabalhabilidade, diminuir a segregação, modificar a cinética química da pega e o endurecimento do cimento, o volume e distribuição de ar ou outros gases no concreto; aumentar a durabilidade e modificar a resistência mecânica do concreto em suas diferentes idades; obter uma regularidade da fabricação do concreto ou argamassa e especialmente na sua qualidade; ampliar o campo de aplicação do concreto, diminuir o custo do concreto por aumentar o rendimento, facilitar a aplicação em obra e por permitir a retirada de formas em períodos mais curtos de tempo (IBRACON, 2005).

A classificação dos aditivos tem como referência critérios que se orientam mediante suas ações, no âmbito científico da química, física ou físico-química, (BAUER, 2013). Entende-se por ação química aquela que modifica a solubilidade dos componentes do cimento. Há alguns produtos que aceleram a dissolução de cal, do alumínio ou da sílica, acelerando-se o processo, enquanto que outros formam proteções nas fases anidras, retardando a hidratação. De alguma forma ou de outra, os aditivos de ação química modificam a cinética do processo de hidratação (IBRACON, 2005).

Quanto a ação física, avalia-se quando ocorrem por forças de Van der Waals de natureza tensoativa, que modificam a tensão superficial da fase líquida e a tensão interfacial entre esta e as fases sólidas ou gasosas. Os tensoativos fazem com que as moléculas de água nas interfaces “água-ar” e “água-sólido” tenham menor coesão. Assim sendo, aumentam a capacidade de molhabilidade (umectação) das partículas, bem como seu poder de penetração.

As moléculas dos tensoativos têm um radical hidrofilico (polar) que interagem com a fase aquosa reduzindo a tensão superficial, promovendo a formação de bolhas e neutralizando a tendência das bolhas dispersas de se coalescerem. E outro radical hidrofóbico (apolar) que interage com a fase sólida, ligam-se a esses sólidos mantendo os grupos apolares orientados para a fase aquosa, o que torna a superfície do cimento hidrofóbica, nesse sentido o ar pode deslocar a água e permanecer ligado às partículas sólidas em forma de bolhas (BAUER, 2013).

Por ação físico-química, entende-se aquela que por efeito físico modifica a tensão superficial e interfacial água – “água x ar” e “água x sólido”, e por efeito químico, modifica a cinética do processo de hidratação (BAUER, 2013).

A ABNT NBR 11768:2011 classifica os aditivos conforme seus efeitos:

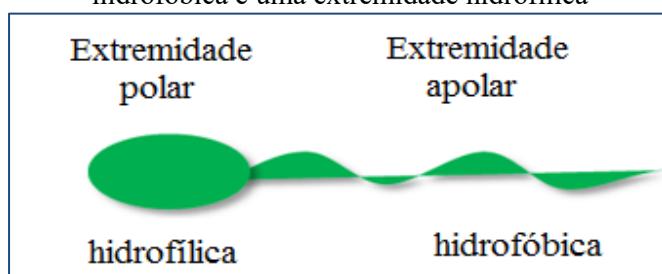
- a) Aditivo Plastificante (tipo P):** produto que aumenta o índice de consistência do concreto ou argamassa, mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de no mínimo 6% da quantidade de água de amassamento para produzir concreto com determinada consistência;
- b) Aditivo retardador (tipo R):** produto que aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto ou argamassa;
- c) Aditivo acelerador (tipo A):** produto que diminui os tempos de início e fim de pega do concreto ou argamassa, bem como acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais;
- d) Aditivo plastificante retardador (tipo PR):** produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e retardador;
- e) Aditivo plastificante acelerador (tipo PA):** produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e acelerador;

- f) **Aditivo incorporador de ar (tipo IAR):** produto que incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto ou argamassa;
- g) **Aditivo superplasticante (tipo SP):** produto que aumenta sensivelmente o índice de consistência do concreto ou argamassa, mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de no mínimo 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir concreto ou argamassa com determinada consistência;
- h) **Aditivo superplasticante retardador (tipo SPR):** produto que combina os efeitos dos aditivos superplasticante e retardador;
- i) **Aditivo superplasticante acelerador (tipo SPA):** produto que combina os efeitos dos aditivos superplasticante e acelerador.

### 2.1.1. Aditivo incorporador de ar

Os aditivos incorporadores de ar são agentes químicos de superfície, tensoativos (TORRES *et al.*, 2014). Os tensoativos são moléculas que apresentam uma parte com característica apolar ligada a uma outra parte com característica polar. Dessa forma, esse tipo de molécula é polar e apolar ao mesmo tempo (DALTIN, 2011), ou seja, apresentam na mesma molécula uma porção hidrofílica (polar) e outra hidrofóbica (apolar), como é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Ilustração de uma molécula de incorporador de ar, em que apresenta uma extremidade hidrofóbica e uma extremidade hidrofílica



Fonte: Torres *et al.* (2014) adaptado.

Rixon e Mailvaganam (1999), afirmam que os aditivos incorporadores de ar são predominantemente tensoativos aniônicos, ou seja, apresentam na extremidade polar da molécula uma carga negativa quando disperso em água. Os incorporadores de ar tensoativos aniônicos quando adicionados às pastas de cimentos, tendem a se adsorver nas partículas sólidas da pasta por meio da sua parte polar aniônica, com a parte apolar cátion metálico ou de amônia voltada para a fase aquosa. A formação das bolhas de ar é realizada pelos

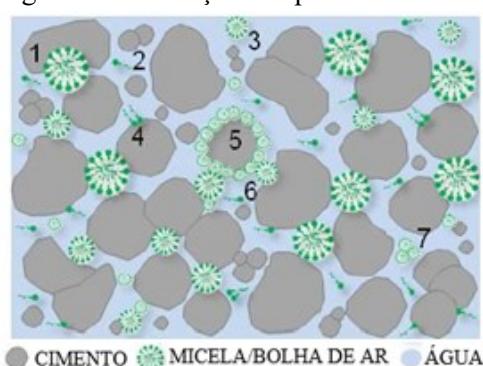
tensoativos que não foram adsorvidos e estão livres na fase aquosa que, sob agitação, formam bolhas de ar microscópicas estáveis, resultantes da aglutinação das partes apolares dos tensoativos (ALVES, 2002).

A molécula gerada pelo aditivo é caracterizada por uma cadeia apolar, geralmente, constituída por hidrocarbonetos; enquanto que, os ramos polares são formados por grupamentos iônicos, não iônicos ou anfóteros, e a presença do grupamento polar ou o comprimento/ramificação da cadeia apolar determinam as propriedades dos aditivos incorporadores de ar.

Quando tais aditivos são utilizados, há tendência natural de adsorção nas interfaces, reduzindo a tensão superficial e facilitando a geração e estabilização das bolhas de ar (TORRES *et al.*, 2014). A adsorção é provocada pela atração eletrostática entre a região polar do tensoativo aniónico e a dupla camada elétrica que as partículas do cimento apresentam em solução, cuja resultante é positiva (ALVES, 2002).

Segundo Romano (2013), os aditivos em suspensão, os de interface cimento-ar-água, podem gerar fenômenos como: formar bolhas que são ancoradas na superfície do cimento; formar bolhas livres na pasta (sem ancoramento), as quais coalescem e colapsam facilmente; estar livres sem a formação das bolhas; estar ancorados na interface cimento-ar; formar aglomerados de bolhas sem ancoramento no cimento e formar aglomerados de bolhas ancorados nas partículas. Na Figura 2 Torres *et al.* (2014) ilustram esses fenômenos de interface cimento-ar-água.

Figura 2 – Ilustração das possíveis formas de ancoragem das bolhas nas pastas cimentícias



1. Ancoragem das micelas nas partículas em suspensão do cimento;
2. Aditivo Incorporador de AR (AIA) livres (não formaram micelas);
3. Micelas livres na pasta (não ancoradas);
4. AIA ancorados na partícula de cimento;
5. Micelas ao redor do grão de cimento;
6. Agregados micelares (ancorados);
7. Agregados micelares (livres)

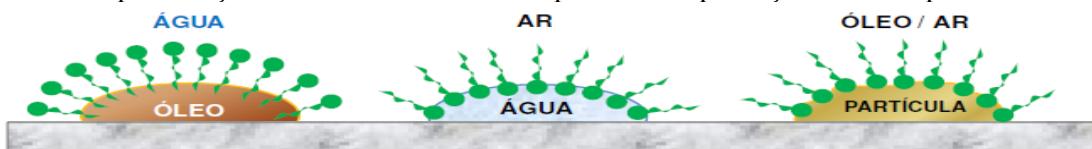
Fonte: Torres *et al.* (2014).

Alves (2002) afirma que as bolhas de ar são efetivamente produzidas pelos tensoativos que não foram adsorvidos e estão livres na fase aquosa. Sob agitação, serão formadas bolhas estáveis de ar, com aspectos de esferas microscópicas, resultantes da aglutinação das partes apolares dos tensoativos.

A maior parte dos aditivos permanece ancorada na superfície do cimento na forma de bolhas, mas mesmo em pequenas quantidades livres na solução, é suficiente para alterar a tensão superficial da água de amassamento. As bolhas não ancoradas apresentam maior mobilidade entre as partículas e, por isso, colapsam mais rapidamente (TORRES *et al.*, 2014).

Devido às características polares e apolares das moléculas, os incorporadores de ar mostram uma forte tendência de migrar para as interfaces, de forma que o seu grupo polar se encontre em contato com a fase líquida e o seu grupo apolar se encontre orientado para o ar, solvente orgânico ou partícula polar, ilustrado na Figura 3, assim a molécula satisfaz a sua dupla natureza, e é esta estabilidade que provoca a sua forte adsorção em interfaces e sua atuação na redução da tensão superficial, isso origina propriedades físicas e químicas especiais com larga aplicação prática, (ROMANO, 2013).

Figura 3 – Representação das diferentes interfaces promovidas pela ação dos incorporadores



Fonte: Romano (2013).

Alves (2002) reitera que a estabilidade das bolhas de ar se dá por meio da formação de um filme pelas moléculas adsorvidas, na interface ar/líquido, onde a fase polar dos tensoativos está orientada na fase aquosa. Se a molécula está carregada, as bolhas irão adquirir esta carga na superfície, fazendo com que, duas bolhas ao se aproximarem, durante a mistura, apresentem uma repulsão eletrostática, que irá mantê-las afastadas evitando a coalescência, ou seja, rompimento da película que a envolve, aumentando a estabilidade.

Outro mecanismo para garantir a estabilidade das bolhas de ar é a sua adsorção às partículas de cimento, principalmente se o tensoativo for iônico. Assim, os aditivos são adsorvidos

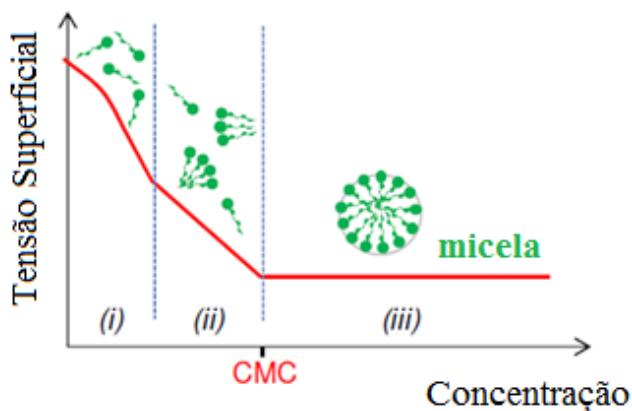
sobre a superfície das partículas de cimento, com a parte apolar projetando-se para fora tornando-a hidrofóbica.

Os tensoativos que estão adsorvidos no cimento, também podem participar da formação das bolhas, provocando o efeito ponte. Esse efeito aumenta a estrutura do sistema, e atribui-se a ele uma maior viscosidade apresentada pelas pastas de cimento. Considerando-se que as partículas de cimento são menores que as bolhas de ar, estas ficarão revestidas pelas partículas de cimento o que dificultará a coalescência das mesmas.

Segundo Romano (2013) a estabilidade das bolhas de ar depende também da concentração do aditivo. No início das reações, os aditivos se adsorvem na superfície água-ar e a tensão superficial decresce rapidamente. A partir de uma determinada concentração, cria-se uma camada monomolecular do incorporador de ar e a tensão superficial da água decresce linearmente com o logaritmo da concentração; em uma terceira etapa após a saturação do incorporador de ar na solução aquosa, a tensão superficial permanece constante, independente da adição de mais aditivo.

A partir da concentração micelar crítica (CMC), ponto onde é atingida a saturação do aditivo, e é função do tipo de aditivo, há saturação de moléculas de incorporador de ar na fase aquosa. Neste caso, observa-se a transição de fase onde a tensão superficial permanece constante mesmo com o aumento da concentração do aditivo, conforme é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 –Variação da tensão superficial da solução em função da concentração de incorporador de ar



Fonte: Romano (2013).

### **2.1.2 Concreto com Ar incorporado**

O concreto é o material que mais se aplica na construção, com mais de sete décadas de utilização. Desde os anos 40, sua popularidade cresceu devido a fácil disponibilidade dos componentes que fazem parte de sua estrutura. Isso deve-se principalmente à sua excelente resistência à ação da água, com aplicação em grandes projetos como as barragens, revestimento de canais hidrográficos e pavimentos. É um material em que se pode obter diversificadas formas e dimensões, devido sua capacidade de moldagem e conformação de elementos estruturais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O Manual de práticas do concreto norte americano ACI (Materials and General Properties of Concrete, 1980), define o concreto como sendo um material compósito que consiste, essencialmente de um meio aglomerante, o cimento, no qual estão aglutinadas as partículas ou fragmentos de agregado e eventualmente aditivos. Esses componentes são definidos conforme suas características físicas, químicas e dimensionais.

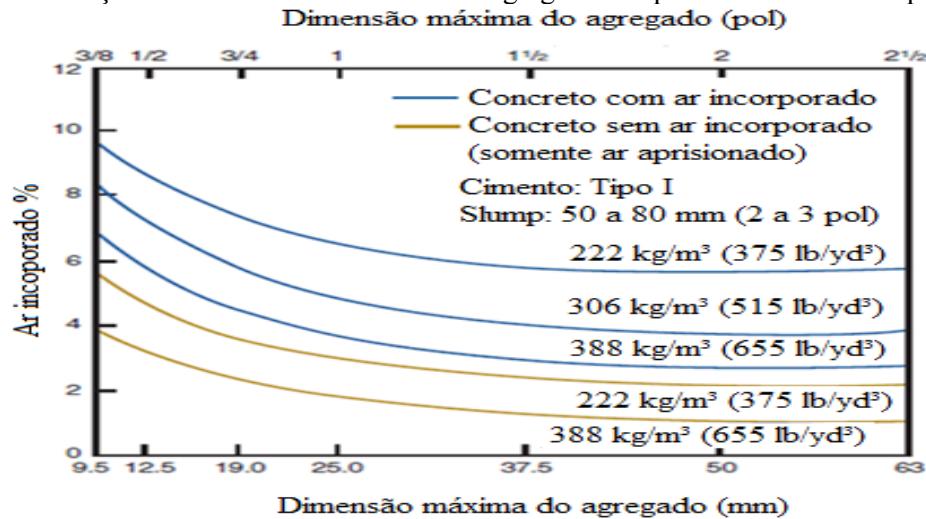
O concreto com ar incorporado apresenta em sua estrutura bolhas de ar. Diferentemente dos outros vazios encontrados no concreto, a presença dessas bolhas traz importantes benefícios ao concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (DA ROSA, 2013).

O concreto com ar incorporado é produzido com a utilização de cimentos já comercializados com aditivo, chamados de “cimento com ar incorporado” ou adição de um aditivo incorporador de ar durante a dosagem (DA ROSA, 2013). Uma melhor incorporação e variação dos tamanhos das bolhas, dependem da tensão superficial da água que impede a coalescência das bolhas e permitem a ancoragem das mesmas nos grãos de cimento e agregados (KOSMATKA *et al.*, 2008).

Segundo Da Rosa (2013), a incorporação do aditivo durante a mistura do concreto garante uma maior flexibilidade na alteração do teor de ar incorporado. Existem diversos fatores que podem afetar o teor de ar incorporado. Embora o teor não seja único parâmetro que deve ser analisado, ele é o único que pode ser medido no estado fresco. Entre os fatores que podem afetar o teor de ar, destacam-se: as quantidades e dimensões dos agregados, a quantidade de finos e as condições de misturas dos materiais.

O tamanho do agregado tem um efeito pronunciado sobre o teor de ar no concreto, tanto o ar aprisionado quanto o ar incorporado por meio de aditivos, como mostrado na Figura 5. Existe pouca alteração na quantidade de ar quando o tamanho do agregado é superior a 37,5 mm (1 ½") (KOSMATKA *et al.*, 2008).

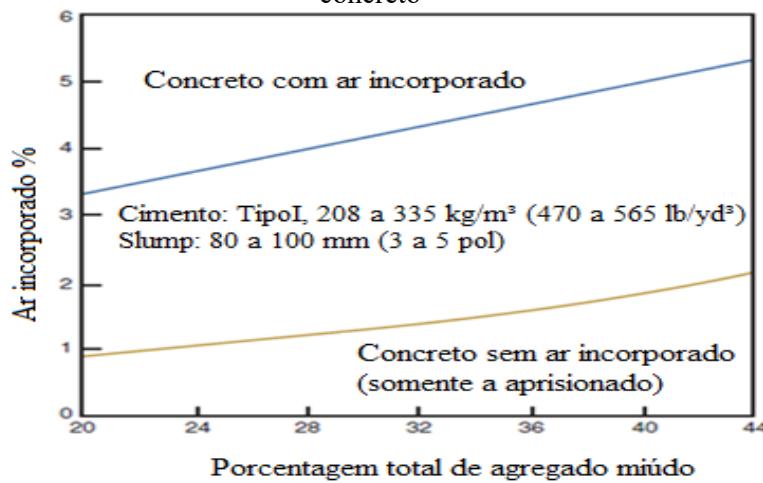
Figura 5 – Relação entre a dimensão máxima de agregado e a quantidade de ar incorporado



Fonte: KOSMATKA *et al.*, 2008, adaptado.

Segundo Kosmatka *et al.* (2008), os agregados finos, as areias médias, entre 0,6 e 0,15 mm, são mais eficientes na incorporação de ar, contudo a influência da dimensão do agregado não é tão significativa em misturas mais ricas, como verifica-se na Figura 6.

Figura 6 – Relação entre a porcentagem de agregado miúdo e porcentagem de ar incorporado no concreto



Fonte: KOSMATKA *et al.*, 2008, adaptado.

As propriedades dos concretos e argamassas utilizando-se aditivos incorporadores de ar são sensíveis ao tempo de mistura. Há duas etapas principais da incorporação de ar na mistura: na primeira etapa o ar é gerado e atinge seu ponto máximo, em uma segunda etapa com o passar do tempo, mesmo com o cisalhamento da argamassa, o volume de ar tende a diminuir (ROMANO, 2013; RIXON e MAILVAGANAN, 1999). Os fatores apontados pelos autores estão relacionados com a colisão da pasta de cimento e falta de estabilidade das bolhas que provocam a sua coalescência, mas pode também estar relacionada com a natureza físico-química das formulações e química dos aditivos.

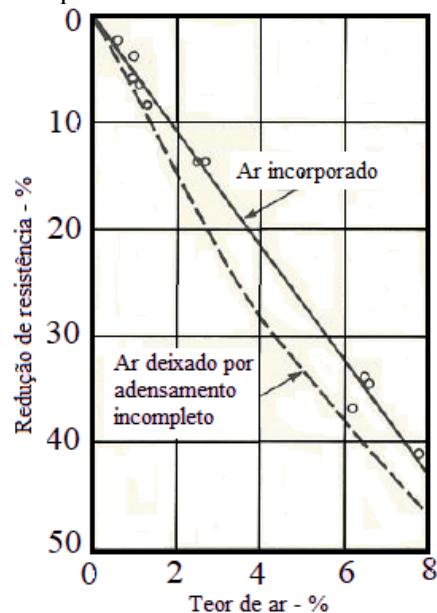
Segundo Neville (2013) a incorporação de ar tem efeito benéfico na trabalhabilidade do concreto. A trabalhabilidade é definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total, sendo o trabalho interno útil uma propriedade física inerente do concreto, ou seja, trabalho ou energia exigido para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto.

O aditivo incorporador atua na eliminação ou minimização do atrito dos agregados, pois com o aumento do teor de ar, os espaços existentes na argamassa contribuem para que as partículas se desloquem sem se tocarem, evitando o surgimento das forças de atrito. Isso ocorre porque o aditivo incorporador de ar altera a tensão superficial da pasta (COSTA *et al.*, 2010).

Neville (2013) afirma que para manter a trabalhabilidade constante, a adição de ar incorporado pode ser acompanhada pela redução da relação água/cimento, o que compensa a diminuição da resistência. Entretanto, Kosmatka *et al.* (2003), ressalta que em misturas de maior resistência, nas quais a relação água/cimento é mais baixa, a incorporação de ar permite apenas uma pequena redução na quantidade de água. Desta forma, a presença dos vazios tem um efeito muito mais pronunciado em concretos de resistência mais elevada.

Quanto a resistência dos concretos com ar incorporado, verifica-se que ao incorporar ar no concreto sem qualquer outra alteração nas proporções dos materiais da mistura, há uma redução na resistência (NEVILLE, 2013), com apresenta-se na Figura 7. Essa redução é proporcional ao volume de ar presente, e isso vale tanto para vazios devido a incorporação de ar quanto para vazios devido ao mau adensamento.

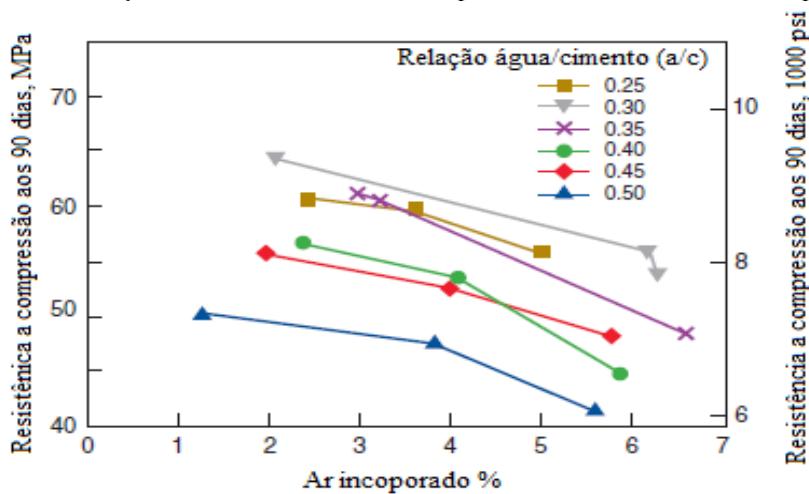
Figura 7 – Efeito do ar incorporado e do ar acidental sobre a resistência do concreto



Fonte: Neville (2013).

Segundo Kosmatka *et al.* (2008) a redução da resistência à compressão de concretos com ar incorporado, geralmente é proporcional à incorporação de ar, e pode ser minimizada com a redução da relação água/cimento ocasionada pela incorporação de ar. Em proporções da relação a/c constantes, ocorre o aumento de incorporação de ar e reduz proporcionalmente a resistência a compressão, como mostrado na Figura 8.

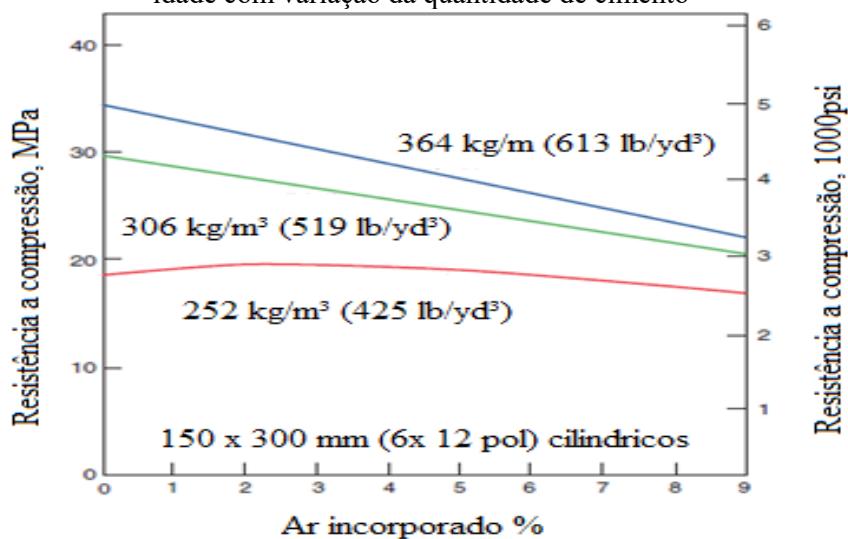
Figura 8 – Relação entre a resistência a compressão aos 90 dias e ar incorporado

Fonte: KOSMATKA *et al.*, 2008, adaptado.

A redução da resistência do concreto com ar incorporado torna-se mais significativa em consumos maiores de cimento. Nas misturas mais secas a resistência a compressão aumenta

devido à redução da relação a/c, e a trabalhabilidade aumenta devido a incorporação de ar em proporções adequadas, conforme demonstra-se na Figura 9. A resistência a compressão do concreto é reduzida cerca de 2% a 9% a cada percentual de aumento do ar incorporado (KOSMATKA *et al.*, 2003).

Figura 9 – Relação entre ar incorporado em concretos com resistência a compressão aos 28 dias de idade com variação da quantidade de cimento



Fonte: KOSMATKA *et al.*, 2008, adaptado.

Quanto às propriedades térmicas de concretos com ar incorporado, verifica-se que devido ao ar aprisionado na estrutura desses concretos, ocorre uma redução da transferência e absorção de calor em relação aos concretos tradicionais, alterando assim suas propriedades térmicas, como a redução da condutividade térmica (SACHT, 2008). Segundo Kim *et al.* (2012) a condutividade térmica do material diminuiu linearmente à medida que a porosidade na matriz de concreto aumenta, independentemente da localização dos poros. As estruturas de poros dos concretos leves com ar incorporado se tornam melhores no isolamento térmico, quando comparados com os concretos convencionais, pois a condutividade térmica está diretamente relacionada a quantidade e distribuição dos poros no concreto.

Segundo Angelin (2014) os valores da condutividade térmica são diretamente influenciados pelo valor da massa específica do concreto. Concretos leves com massa específica variando entre 250 a 800 kg/m<sup>3</sup> são ótimos isolantes térmicos, concretos com massa específica de 800 a 1400 possuem adequado isolamento térmico e concretos com massa específica entre 1400 a 2100 apresentam limitado isolamento térmico (DANTAS, 2003). Concretos com massa

específica próximos a 2500 kg/m<sup>3</sup> apresentam condutividade térmica alta se comparado a outros materiais utilizados nas vedações de edificações (NEVILLE, 2013), conforme Tabela 4 com os valores da condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção civil (ABNT NBR 15.220:2005). Porém, Sacht (2008) afirma que o aumento de massa específica dos concretos pouco influenciou nos resultados de desempenho térmico, sendo a espessura a característica determinante.

Outros fatores que podem influenciar a condutividade térmica segundo Neville (2014), são os teores de ar e a umidade, pois quanto maior a saturação do concreto no estado endurecido, menor a condutividade térmica. Entretanto, um aumento do teor de umidade em concretos leves resulta em um aumento na condutividade térmica.

## 2.2 PAREDES DE CONCRETO

### 2.2.1 Aplicação de paredes de concreto

A realidade brasileira no desenvolvimento e produção de novas moradias no século XXI se conduziu por meio do crescimento econômico das classes sociais, que no passado tinham poucas oportunidades para adquirirem a casa própria. Com a finalidade de criar incentivos à produção e aquisição de novas habitações para essas classes sociais, o governo brasileiro lançou o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) em março de 2009. Isso contribuiu para o setor da construção civil desenvolver novos sistemas construtivos e aprimorar novas técnicas construtivas que favorecessem a diminuição nos custos, o tempo de execução da construção e tornasse a execução das obras civis racionalizadas e limpas.

Dentre os sistemas construtivos desenvolvidos nesse período, destacam-se os painéis monolíticos moldados *in loco* (VIEIRA, 2014). Esses painéis possuem formato laminar obtido por moldagem no local definitivo de utilização, e caracterizam-se por ser monolítico, pois quando solicitados têm capacidade de distribuir os esforços por toda parede, além de serem contínuos, ou seja, não apresentam juntas de dilatação aparentes (SACHT, 2008).

A implementação do sistema de paredes de concreto moldadas no local, ocorreu mais intensamente a partir do ano de 2012, com a publicação da ABNT NBR 16055:2012. Esse

sistema é utilizado em estruturas térreas, como casas isoladas ou geminadas, sobrados e prédios baixos. As principais vantagens na aplicação de paredes de concreto moldadas *in loco* são a otimização da mão de obra direta, eliminação de etapas no processo como: vedação, chapisco, revestimento interno e externo, instalações e redução de prazos de entrega (SIGNO,2013).

As tecnologias aplicadas nas edificações, utilizando-se processos de industrialização de paredes de concreto, vão além das escalas de produção de casas de baixo custo. Supõe-se que esse processo contribua em vários segmentos na cadeia produtiva da engenharia civil. Segundo Maricato (2014), na última década, no Brasil, houve o surgimento do *boom* imobiliário, com a incorporação da classe média no mercado, principalmente da população entre seis e dez salários mínimos. Isso aumentou significativamente o número de novos empreendimentos no setor imobiliário brasileiro, no qual, no ano de 2013 registraram-se as maiores vendas nesse setor, e o crédito para a compra de imóveis superou o crédito pessoal no país, pelos dados do Banco Central do Brasil.

Nesse sentido, o programa habitacional brasileiro, e a publicação da norma específica para o sistema de paredes de concreto, contribuem muito para a continuidade da aplicação e crescimento desse processo tecnológico. Imagina-se que o desenvolvimento atual do processo de aplicação de paredes de concreto, com o surgimento de novas técnicas de aprimoramento de resultados, trará melhorias nos próximos anos nos níveis de desempenho das edificações, como: desempenho estrutural, acústico e térmico.

### **2.2.2 Sistema Construtivo de paredes de concreto**

Os sistemas construtivos acompanham o grau de desenvolvimento tecnológico em que se encontram as indústrias de máquinas de movimentação de cargas, equipamentos de processamento de concretos e argamassas, além das ferramentas e aparelhos de montagem e ajuste de peças na construção civil. A disponibilidade de novas tecnologias fornece a direção desse processo de desenvolvimento na execução dos projetos, as quais determinam suas formas de aplicação com os parâmetros técnicos e logística operacional.

Segundo Sacht (2008), no Brasil são utilizados alguns sistemas construtivos nas habitações de interesse social, entre eles:

- Sistemas convencionais, em que os principais elementos são executados no canteiro de obras, com suas técnicas construtivas e materiais tradicionais;
- Sistemas construtivos racionalizados, no qual parte dos elementos são pré-fabricados e a montagem ocorre no local da obra. Utilizam-se técnicas convencionais entre as quais pode-se citar os sistemas em alvenaria estrutural, painéis de concreto ou painéis monolíticos moldados *in loco*;
- Sistemas industrializados, em que grande parte dos elementos são transportados da fábrica para o local da obra, onde ocorre somente sua montagem e acabamento. Estão presentes em habitações pré-fabricadas em concreto, madeira e aço.

Os sistemas construtivos podem ser subdivididos em vários subsistemas, os quais são definidos segundo suas características e funções técnicas em relação ao edifício como um todo. É necessário ao iniciar a elaboração de um projeto de uma edificação habitacional, ter em mente a infinidade de situações possíveis de serem propostas em termos de sistemas construtivos (SACHT, 2008).

O sistema construtivo parede de concreto é um sistema racional e industrializado que visa produtividade, redução de prazos, minimização de custos e garantias na qualidade das edificações. Para isto, é necessário um planejamento para que se possa executar a obra de forma correta, evitando custos desnecessários (Comunidade da Construção, 2013-2014).

Como forma de padronizar e disseminar as técnicas construtivas do sistema de paredes de concreto, a ABNT aprovou no ano de 2012 a NBR 16055:2012 – Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e Procedimentos. Essa norma define a parede de concreto como elemento estrutural autoportante, moldado no local, de comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz de suportar carga no mesmo plano da parede.

A ABNT NBR 16055:2012 estabelece requisitos básicos para paredes de concreto moldadas *in loco* com fôrmas removíveis, aplicada às paredes submetidas à carga axial, podendo ser com ou sem flexão, concretadas com todos os elementos que farão parte de sua construção final, como os detalhes de fachada, armaduras distribuídas e localizadas, instalações

(elétricas e hidráulicas) se embutidas, e considera as lajes incorporadas ao sistema por solidarização com as paredes, tornando assim o sistema monolítico.

Uma reflexão que se faz na aplicação de paredes de concreto envolve a avaliação dos ganhos com a utilização de concreto celular. Segundo Sacht (2008) o uso de concreto celular tem ocorrido no Brasil em sistemas de vedações verticais. Inicialmente em função de sua fluidez e alta trabalhabilidade, sendo que dispensa vibração, garantindo ganhos no processo construtivo quanto a velocidade e reutilização das formas. O uso desse tipo de concreto tem também a função de obter menores valores de transmitância térmica com a mesma espessura de parede, pois tem menor condutividade térmica que o concreto convencional, devido as bolhas de ar incorporado.

Segundo SINAT (Sistema Nacional de Avaliações Técnicas, 2011) o sistema construtivo que emprega concreto normal (massa específica em torno de 2300 kg/m<sup>3</sup>) pode ser utilizado para construção de casas térreas unifamiliares, sobrados unifamiliares e edifícios de multipavimentos e multifamiliares, incluindo casas sobrepostas. Já o sistema construtivo que emprega concreto com ar incorporado (massa específica em torno de 1900 kg/m<sup>3</sup>) só deve ser utilizado na construção de casas térreas unifamiliares, sobrados unifamiliares, incluindo casas sobrepostas e edifícios com térreo mais um pavimento multifamiliar.

Os procedimentos e o processo de produção de paredes de concreto são realizados de forma linear. Na fundação normalmente utiliza-se o tipo radier, construído com espaço excedente em relação à espessura dos painéis externos das formas, o que proporciona uma base de trabalho apropriada para as equipes de montagem das formas e instalações (SACHT,2008).

Para a moldagem do concreto são utilizadas formas, que são estruturas provisórias, de materiais que podem ser metálicas, de madeira, mistas ou trepantes, e são instaladas logo após a execução da fundação. Por formarem paredes estruturais, elas devem ser estanques e manter rigorosamente a geometria das peças. Dentro dessas formas estão presentes a armação de aço e os eletrodutos com todas as aberturas necessárias assinaladas ao sistema. Para os sistemas de paredes de concreto é indicado o uso de concreto dosados em centrais de fabricação de concreto, transportados e fornecidos em caminhão betoneira (CARVALHO, 2012).

O sistema de aplicação de paredes de concreto segue uma produção linear com características industriais, diminuindo dessa forma o desperdício e tornando a obra mais limpa. Atualmente há equipamentos e ferramentas que fornecem rapidez e facilidade no processo de industrialização de paredes de concreto, formas pré-fabricadas com projetos, características e dimensões específicas, plataformas de instalação e ajustamentos das peças pré-moldadas.

A desforma deve ser feita de forma cuidadosa após o concreto atingir a resistência esperada, a fim de evitar fissuras. Devem conter todos os elementos embutidos, como caixilhos de portas e janelas, tubulações de instalações elétricas e hidráulicas e fixação de espera para as coberturas. As eventuais falhas decorrentes de infiltração de ar ou de heterogeneidade da granulometria da areia e de impurezas podem ser corrigidas com aplicação de uma camada de nata de cimento Portland, com traço rico em cimento (CARVALHO, 2012).

Uma desvantagem do sistema construtivo de paredes de concreto que se apresenta, segundo Vieira (2014), é a limitação do processo criativo da concepção arquitetônica dos empreendimentos, pois dificulta a retirada ou mudanças na disposição das paredes, as quais funcionam como elementos estruturais e de contraventamento (SACHT, 2008).

### **2.2.3 Perspectivas futuras da aplicação de paredes de concreto**

As perspectivas futuras da aplicação de paredes de concreto deverão ser analisadas segundo a visão dos profissionais da construção civil. Os arquitetos e engenheiros civis que projetam edificações, com a utilização de paredes de concreto, encontram facilidades como os embutimentos de diversos sistemas elétricos e hidráulicos, o que elimina a adequação de projetos executivos. Após alguns anos de aplicação de paredes de concreto nas obras de edificações, adquiriu-se um banco de dados de projetos, o qual possibilitou a adequação dos índices de aço, espessura das paredes e especificações do concreto (SACHT, 2008).

O desenvolvimento da tecnologia do concreto colaborou para a introdução e aperfeiçoamento de paredes de concreto, tanto nos projetos voltados ao desempenho de estruturas quanto ao conforto dos usuários. Os responsáveis diretos desse desenvolvimento foram as empresas produtoras de concreto, e os estudiosos da tecnologia do concreto que

aprimoraram o traço e processos que se aplicam na execução dos projetos. Isso fez com houvesse a definição e regulamentação da norma ABNT NBR 16055:2012 a qual teve a complementação da norma ABNT NBR 15575 (SILVA, 2013).

O processo de produção e aplicação das paredes de concreto no Brasil está em contínuo desenvolvimento. A tecnologia aliada a execução de projetos na última década avançou significativamente e consolidando-se em uma nova forma de construir. Considerando-se as condições de trabalho na aplicação dos projetos de paredes de concreto, que são mais confortáveis e seguras, além do bem-estar dos usuários nessas edificações, mais a otimização da mão de obra e ganhos em prazos de entrega dos imóveis, as perspectivas futuras são promissoras, e acredita-se que estarão em constante evidência no mercado brasileiro nos próximos anos (SILVA, 2013).

## **2.3 CONCEITOS CLIMATOLÓGICOS**

O desempenho térmico das edificações é uma variável necessária ao conforto térmico dos usuários, e sofre influência das condições ambientais características de uma determinada região. Portanto, é necessário o conhecimento de alguns conceitos climatológicos para a melhor compreensão do desempenho térmico das edificações no território brasileiro.

Frota e Schiffer (2001) afirmam que adequar a arquitetura ao clima de um determinado local, significa construir espaços que possibilitem ao homem condições de conforto. À arquitetura cabe, tanto amenizar as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos, tais como os de excessivo calor, frio ou ventos, como também propiciar ambientes que sejam, no mínimo, tão confortáveis como os espaços ao ar livre em climas amenos.

### **2.3.1 Bioclimatologia**

A bioclimatologia estuda as relações entre o clima e o ser humano, como forma de tirar partido das condições climáticas, para criar uma arquitetura com desempenho térmico adequado (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Dentre as variáveis climáticas que caracterizam uma região, podem-se distinguir as que mais interferem no desempenho térmico dos espaços construídos, quais sejam: a oscilação diária

e anual da temperatura, umidade relativa, a quantidade de radiação solar incidente, o grau de nebulosidade do céu, a predominância no sentido dos ventos e índices pluviométricos.

### 2.3.2 Clima

O conceito de clima é geralmente empregado com distintos graus de abrangência, podendo referir-se tanto à vastas regiões do planeta (clima equatorial, clima tropical, entre outros) quanto a um ponto específico de um bairro. O clima é definido como a integração do conjunto de condições atmosféricas típicas de um dado lugar (RORIZ, 2008).

Segundo Lamberts *et al.* (2016), a classificação das escalas do clima varia de autor para autor. Em geral, podem ser considerados o macroclima, o mesoclima e o microclima:

- No macroclima, são observadas as características climáticas de uma região, normalmente medidas em estações meteorológicas. As normais climatológicas são dados medidos em estações climáticas disponíveis para caracterização do clima das cidades. Esses dados são séries padronizadas pela Organização Meteorológica Mundial, calculadas para períodos de 30 anos, obtidas a partir de valores médios e extremos mensais de temperatura, umidade, precipitação, nebulosidade, horas de sol, entre outros. Os períodos de trinta anos de medições padronizadas já concluídos no Brasil são os de 1901 a 1930, 1931 a 1960 e de 1961 a 1990.
- O mesoclima relaciona-se com a poluição gerada no ambiente das cidades e mudança em áreas de vegetação. Uma grande cidade pode alterar as condições do mesoclima pela poluição que gera ou pelo corte indiscriminado da vegetação, por exemplo.
- O microclima está diretamente relacionado à escala da edificação e de seu entorno imediato, sendo influenciado pelas consequências das outras escalas climáticas e também pela interferência direta onde se encontra a edificação.

Nas escalas do mesoclima e no microclima são observadas as alterações locais na radiação solar, temperatura do ar, umidade e vento.

### 2.3.3 Temperatura do ar

A temperatura do ar é a principal variável do conforto térmico. A sensação de conforto baseia-se na perda de calor do corpo pelo diferencial de temperatura entre a pele e o ar, complementada pelos outros mecanismos termorreguladores. O calor é produzido pelo corpo mediante o metabolismo e suas perdas são menores quando a temperatura do ar está alta ou maiores quando a temperatura está mais baixa (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Denomina-se também de temperatura de bulbo seco, definida pela ABNT NBR 15220: 2005 – 1, como a temperatura do ar medida por um termômetro em °C, com dispositivo de proteção contra a influência da radiação.

### 2.3.4 Temperatura radiante média

A ABNT NBR 15220:2005 – 1 define a temperatura radiante média com a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor do corpo humano por radiação é igual a troca de calor por radiação no ambiente real não uniforme, conforme ilustrado na Figura 10. Pode-se fazer o seu cálculo mediante a determinação da temperatura de um termômetro específico com formato de globo com variáveis em seu diâmetro e da temperatura do ar (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Figura 10 – Troca entre um ambiente real e o corpo e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo, por meio da temperatura radiante média



Fonte: LAMBERT *et al.*, 2016.

### 2.3.5 Umidade relativa do ar

A ABNT NBR 15220 – 1:2005 define a umidade relativa do ar como o quociente da umidade absoluta do ar pela umidade absoluta do ar saturado, para a mesma temperatura e pressão atmosférica. Ainda segundo a norma, a umidade absoluta do ar é definida como sendo o

quociente da massa de vapor de água, em gramas, pela massa de ar seco, em quilograma. A umidade relativa tende a aumentar quando há diminuição da temperatura, e a diminuir quando há aumento da temperatura (LAMBERTS *et al.*, 2016).

A grande diferenciação que o grau de umidade relativa do ar acarreta nas condições climáticas de um local é quanto à amplitude da temperatura diária. Isto equivale a dizer que quanto mais seco for o clima, mais acentuadas serão suas temperaturas extremas (mínimas e máximas). Este fenômeno se dá em função da capacidade das partículas de água em suspensão no ar, ao receber calor do sol, se aquecerem.

Quanto mais úmido estiver o ar, maior será a quantidade de água em suspensão. Essas partículas, além de se aquecerem pela radiação solar que recebem, também funcionam durante o dia, como uma barreira da radiação solar que atinge o solo, e durante a noite ao calor dissipado pelo solo. Nesse sentido, um solo em clima mais seco recebe mais radiação solar direta que em clima mais úmido (FROTA e SCHIFFER, 2001).

## 2.4 O CLIMA DO TERRITÓRIO BRASILEIRO

O Brasil possui um extenso território com dimensões continentais, uma grande extensão costeira e configuração geográfica diversificada. Os ciclos diurnos e noturnos nas diferentes coordenadas geográficas do globo terrestre são atribuídos à inclinação do eixo de rotação da terra e à exposição solar, caracterizando a diversidade dos climas (RIBEIRO, 2013). Isso tem influência na diversidade de climas, muito pela dinâmica das massas de ar sobre seu território, o que se leva a caracterizar as temperaturas e os índices pluviométricos nas diferentes regiões do país.

As variáveis climáticas são obtidas em estações meteorológicas e descrevem as características gerais de uma região em termos da incidência do sol, nuvens, temperatura, vento, umidade e precipitações. Os fatores que define o clima de uma dada região são as temperaturas, as chuvas, a umidade do ar, ventos e pressão atmosférica induzida por fatores como altitude, latitude, condições de relevo, vegetação e continentalidade (LAMBERTS, *et al.*, 2014).

No Brasil, Strahler e Strahler (1989) apresentam uma classificação, onde predominam cinco grandes climas. Essa classificação climática tem como base na dinâmica das massas de ar, as quais são: clima equatorial, tropical, tropical semi-árido, subtropical e tropical de altitude. Os autores caracterizam o clima para cada região conforme se expõe a seguir.

A Região Norte do Brasil, comprehende parte da região Amazônica e representa a maior extensão de floresta quente e úmida. Caracteriza-se por baixas altitudes, e chuvas instáveis devido a presença de sistemas de ventos. O clima é quente com temperaturas médias anuais variando entre 24°C a 26°C.

Na Região Nordeste a caracterização climática é complexa. O sistema de circulação que influencia o clima é denominado de Sistema de Correntes Perturbadoras de Sul, Norte, Leste e Oeste. Suas temperaturas são elevadas, com médias anuais entre 20°C a 28°C, com máximas em torno de 40°C no sul do Maranhão e Piauí.

A Região Sudeste apresenta-se com temperaturas de formas diversificadas. Possui influência da sua posição latitudinal cortada pelos Trópicos de Capricórnio, sua topografia acidentada e de sistemas de circulação perturbadas. A temperatura média anual encontra-se entre 20°C no limite de São Paulo e Paraná, 24°C ao norte de Minas Gerais, já na serra do Espinhaço, Mantiqueira e do Mar a média é inferior a 18°C. No verão as máximas são de 30°C a 32°C nos vales dos rios São Francisco e Jequitinhonha, na Zona da Mata de Minas Gerais e na baixada litorânea e a oeste do estado de São Paulo. No inverno, a média das temperaturas mínimas varia de 6°C a 20°C, com mínimas de -4° a 8°C, sendo que as temperaturas mais baixas são registradas nas áreas mais elevadas. Vastas extensões de Minas Gerais e São Paulo registram ocorrências de geadas, após a passagem das frentes frias polares.

A região Sul, localizada em uma zona temperada, é influenciada pelo sistema de circulação perturbada de Sul, responsável pelas chuvas no verão e pelo sistema de circulação perturbada de Oeste, que acarreta chuvas e granizos. O regime térmico se caracteriza com um inverno frio e o verão quente. A temperatura média anual situa-se entre 14°C e 22°C e, em locais de altitudes acima de 1.100m, com temperaturas de aproximadamente 10°C. No verão a temperatura média das máximas mantém-se entre 24°C e 27°C e nas superfícies mais

elevadas do planalto as temperaturas se encontram entre 30°C e 32°C. No inverno as médias baixas se mantêm de 6°C a 12°C.

Na Região Centro-Oeste o clima é influenciado por três sistemas de circulação que interferem na região: o sistema de correntes perturbadoras Oeste, que caracteriza o tempo instável no verão, sistema de correntes perturbadoras Norte, que provoca chuvas no verão, outono e inverno e sistema de correntes perturbadoras Sul, que provoca chuvas com duração de três dias no período de inverno. A temperatura média anual se encontra a 22°C, as temperaturas máximas variam entre 24°C e 26°C e a média das máximas do mês de setembro, caracterizado como o mais quente, oscila entre 30°C e 36°C. No inverno a temperatura média do mês mais frio oscila entre 15°C a 24°C, as mínimas se encontram entre 8°C a 18°C.

Segundo o banco de dados da Secretaria de Planejamento Urbano da prefeitura de Uberlândia (SEPLAN, 2011), a cidade encontra-se localizada na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil, sob a influência de circulação dos sistemas atmosféricos tropicais. O clima é controlado pelas massas de ar continental (Equatorial e Tropical) e Atlântica (Polar e Tropical). Pela sua localização geográfica, Uberlândia encontra-se numa faixa de temperatura moderada, que associada à altitude, contribui para que a média térmica anual se situe em torno de 23,1°C, dados de 2009. As temperaturas máxima e mínima registradas nas últimas três décadas foram 37,4°C e 1,0°C nos anos de 1997 e 1981 respectivamente.

#### **2.4.1 Temperaturas e umidades no território brasileiro**

Para avaliar as temperaturas e umidades no território brasileiro, utilizou-se dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Faculdade de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia. Considerou-se o ano de 2014, com os meses de outubro e novembro que historicamente são os mais quentes do ano. Nesses meses, segundo o INMET, ocorre uma maior inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano orbital. Isso faz com que ela se encontre mais próxima do sol, e a incidência de raios solares se torne mais intenso na superfície no hemisfério sul. Reitera-se que a umidade relativa do ar se mantém alta tanto

nos meses de outubro e novembro, estação da primavera, quanto nos meses da estação de verão (dezembro, janeiro, fevereiro).

Foram analisados dados climáticos da estação de verão, incluindo os meses de outubro, novembro e dezembro de 2014, janeiro e fevereiro de 2015. Na Tabela do Apêndice A, encontram-se dados das umidades relativas e temperaturas máximas e mínimas, classificadas por regiões e estados do Brasil, no período compreendido entre outubro de 2014 e fevereiro de 2015.

É possível observar a partir dos dados apresentados na Tabela do Apêndice A, que a maior temperatura média máxima está na região Nordeste, e a menor umidade relativa média, dentre as máximas, encontra-se na região Sudeste, com os valores de 37,8°C e 75,8% respectivamente.

## **2.5 ALGUNS CONCEITOS E DEFINIÇÕES DA TERMODINÂMICA**

Os conceitos e definições apresentadas nesta seção têm o objetivo de auxiliar na compreensão da ciência da termodinâmica, que trata principalmente da transferência de energia e calor nos sistemas que avaliam o desempenho térmico do concreto.

### **2.5.1 Calor**

Para a conceituação dos parâmetros termodinâmicos considera-se como primeira definição o Calor, que é uma forma de energia. O calor é definido como sendo a forma de energia transferida através da fronteira de um sistema, numa dada temperatura, a um outro sistema (ou meio) numa temperatura inferior, em virtude da diferença de temperatura entre os dois sistemas. Os dois principais tipos de energia térmica são a energia de vibração dos átomos em torno de suas posições médias nos corpos e a energia cinética dos elétrons livres. Para que haja troca de calor entre dois corpos é necessário que suas temperaturas sejam diferentes. Nesse caso, o corpo mais quente cede calor ao mais frio.

Entende-se que as edificações devem proporcionar conforto térmico aos seus usuários. Para isso, na elaboração de projetos de edificações, determina-se a carga térmica do ambiente, onde se leva em conta a soma de todos os acréscimos e perdas de energia através da

edificação (RORIZ, 2008). Os principais fatores que influenciam na carga térmica de uma edificação são os fatores climáticos, como a insolação que indica o número máximo de horas de luz solar para cada data e latitude, umidade e temperatura do ar externo; o fator humano com o número de ocupantes e tipo de uso, e o fator arquitetônico como iluminação, equipamentos e tipos de fechamento (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Quanto aos tipos de fechamentos de edificações, verifica-se em termos de propriedades térmicas dos elementos construtivos, a existência dos fechamentos translúcidos e dos fechamentos opacos. As principais trocas térmicas em uma edificação acontecem geralmente em fechamentos translúcidos, por exemplo, janelas e claraboias. Neste tipo de fechamento podem ocorrer três tipos de trocas térmicas: condução, convecção e radiação. Nos fechamentos opacos não ocorre transmissão de calor por radiação, apenas condução e convecção (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Considera-se três tipos de transferência de calor: a convecção que acontece com elementos sólidos e gases, ou líquidos, quando o fluido fica em contato com uma superfície quente; a condução, modo mais comum de transferência de calor, porque os sólidos são mais propagadores do calor condutivo, onde a energia é transferida de uma molécula para a outra por meio de difusão de sua energia potencial; e a transferência de calor que ocorre por radiação na transmissão de energia (STANCATO, 2000).

### **2.5.2 Radiação**

Radiação é um mecanismo de troca de calor entre dois corpos, que guardam entre si uma distância qualquer, mediante sua capacidade de emitir e de absorver energia térmica.

Esse mecanismo de troca de calor é consequência da natureza eletromagnética da energia, que ao ser absorvida provoca efeitos térmicos, o que permite sua transmissão sem necessidade de meio para propagação, ocorrendo mesmo no vácuo (FROTA e SCHIFFER, 2001).

### 2.5.3 Convecção

Convecção é a troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e o outro um fluido (líquido ou gás).

Uma edificação absorve energia térmica por radiação e convecção. Quando a temperatura da face externa está maior do que a da face interna ocorre um fluxo de calor para o interior. A intensidade deste fluxo dependerá da espessura da parede ( $e$ ), da capacidade calorífica do material ( $c$ ), de sua densidade ( $\rho$ ) e de sua condutividade térmica ( $\lambda$ ). Em consequência da elevação da temperatura, haverá um fluxo de calor por radiação e convecção da face externa da parede para o ambiente interno (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Numa edificação, os ganhos de energia por radiação podem ocorrer por meio direto, difuso e por reflexão da energia nas suas adjacências, ou no solo por emissão do solo aquecido e da atmosfera. As perdas podem ocorrer por radiação emitida da edificação para o ambiente externo (BEZERRA, 2003).

### 2.5.4 Condução

Condução é a troca de calor entre dois corpos que se tocam ou mesmo partes do corpo que estejam a temperaturas diferentes.

Atualmente nas edificações que se projetam é possível reduzir o uso de climatizadores artificiais, onde aplicam-se proteções solares em aberturas, cores claras na fachada, uso de ventilação cruzada, o que permite a redução da “condutância” térmica das paredes, janelas e coberturas. Com isso, tem-se uma razão entre a condutância térmica e a resistência térmica total do fechamento, uma é o inverso da outra (FROTA e SCHIFFER, 2001).

### 2.5.5 Absortividade ( $\alpha$ ) e Emissividade ( $\epsilon$ )

A ABNT NBR 15220 – 1:2005 defini absortividade ou absortância a radiação solar, como o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície, pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.

A absortividade dos materiais de construção é seletiva à radiação solar, e a principal determinante desta característica é sua cor superficial. A parcela da radiação solar absorvida

por certo material aquecerá o mesmo, e será parcialmente reemitida para fora e parcialmente emitida para o ambiente interno. Os elementos construtivos têm comportamentos diferentes quanto as propriedades termodinâmicas. A radiação incidente num material terá uma parcela refletida, uma absorvida, e se for um material translúcido, uma parcela transmitida diretamente para o ambiente interno, cujos valores dependerão respectivamente da refletividade ( $\rho$ ), da absorvidade ( $\alpha$ ) e da transmissividade ( $\tau$ ) do material. A soma destas três parcelas corresponde a radiação total (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

A ABNT NBR 15220 – 2:2005 apresenta a absorvidade para alguns materiais utilizados na construção civil e algumas cores como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Absorvidade de superfícies e cores

Tipo de superfície	$\alpha$
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15
Chapa de aço galvanizado (nova e brilhante)	0,25
Caiação nova	0,12/0,15
Concreto aparente	0,65 /0,80
Telha de barro	0,75 /0,80
Tijolo aparente	0,65 /0,80
Reboco claro	0,30 /0,50
Revestimento asfáltico	0,85 /0,98
Vidro incolor	0,06 /0,25
Vidro colorido	0,40 /0,80
Vidro metalizado	0,35 /0,80
Pintura:	
Branca	0,20
Amarela	0,30
Verde clara	0,40
"Alumínio"	0,40
Verde escura	0,70
Vermelha	0,74
Preta	0,97

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.220-2:2005.

A ABNT NBR 15220 – 1:2005 define emissividade como o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, a mesma temperatura.

A emissividade é uma propriedade física dos materiais que diz qual a quantidade de energia térmica é emitida por unidade de tempo. França (2007) afirma que a emissividade de um material não é uma propriedade simples de ser obtida já que depende do tamanho do corpo, formato, rugosidade, ângulo de observação, entre outros. A ABNT NBR 15220 – 2:2005 apresenta a tabela de emissividade de superfícies e cores, conforme na Tabela 2.

Tabela 2 – Emissividade de superfícies e cores

Tipo de superfície	$\epsilon$
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,12
Chapa de aço galvanizado (nova e brilhante)	0,25
Caiação Nova	0,90
Concreto aparente	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,90 / 0,98
Vidro incolor	0,84
Vidro colorido	0,84
Vidro metalizado	0,15 / 0,84
Pintura:	
Branca	0,90
Amarela	0,90
Verde clara	0,90
"Alumínio"	0,50
Verde escura	0,90
Vermelha	0,90
Preta	0,90

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.220-2:2005.

## 2.5.6 Fluxo de calor (Q)

O fluxo de calor (Q) é determinado pela densidade de fluxo de calor (q) de um determinado material que atravessa uma área desse material. A ABNT NBR 15220 – 1:2005 define o fluxo de calor como o quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante

um intervalo de tempo pela duração desse intervalo. O fluxo de calor representa a quantidade de energia térmica em watts (W) que atravessa um fechamento de um ambiente descrito na Equação 1.

$$Q = q \cdot A \quad (1)$$

Em que:

$Q$  – Fluxo de calor [W]

$q$  – Densidade de fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>]

$A$  – Área da superfície do fluxo de transferência de calor [m<sup>2</sup>].

### 2.5.7 Condutividade térmica ( $\lambda$ )

A ABNT NBR 15220 – 1:2005 define a condutividade térmica ( $\lambda$ ) como propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m<sup>2</sup>, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro.

Em 1822, Fourier definiu que em regime estacionário, a condutividade térmica ( $\lambda$ ) de um material é a capacidade de conduzir calor. No Sistema Internacional de Unidades, a condutividade é expressa em W/m.°C ou W/m. K, no qual W indica a quantidade de calor (em Watts) transmitido em regime estacionário entre duas faces paralelas de um corpo homogêneo com espessura igual à 1 m (metro), durante o intervalo de tempo de 1 s (segundo), para cada metro quadrado de área, e para cada °C ou K (grau centígrado ou Kelvin) de diferença entre as temperaturas superficiais das faces.

Segundo Lamberts *et al.* (2014), a condutividade térmica ( $\lambda$ ) depende da densidade do material e representa sua capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo.

A ABNT NBR 15220:2005 – 2 apresenta os valores recomendados de condutividade térmica ( $\lambda$ ) de alguns materiais de uso corrente na construção civil conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção civil

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))
Tijolo e telhas de barro	1000-1300	0,70
	1300-1600	0,90
	1600-1800	1,00
	1800-2000	1,05
<b>Argamassas</b>		
Argamassas comum	1800-2100	1,15
Argamassa celular	600-1000	0,40
<b>Concreto</b>		
Concreto normal	2200-2400	1,75
Concreto cavernoso	1700-2100	1,40

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.220-2:2005.

### 2.5.8 Resistência térmica (R)

A ABNT NBR 15220 – 1: 2005 define a Resistência Térmica como o quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.

Conforme Lamberts *et al.* (2014), a Resistência térmica é a propriedade que um sistema tem de resistir à passagem de calor. Quanto maior a espessura do material, maior será a resistência que esse material oferece à passagem do calor. Najim *et al.* (2015) afirmam que a resistência térmica de uma estrutura da edificação como paredes, coberturas e outros, dependem principalmente das propriedades térmicas e físicas dos seus materiais de construção.

Fisicamente a resistência térmica é traduzida como sendo a facilidade ou a dificuldade com que se dá o fluxo de calor em uma determinada direção. Quanto maior a condutividade térmica de um material, menor será a sua resistência térmica (BEZERRA, 2003).

Conforme ABNT NBR 15220 – 2:2005 a resistência térmica de um material homogêneo é calculada de acordo com a Equação 2, quando não são obtidos em ensaios normalizados. Segundo Lamberts *et al.* (2014) quando o material é heterogêneo, a resistência térmica é calculada somando as resistências térmicas de cada componente deste material,

$$R = e/\lambda \quad (2)$$

Em que:

$R$  – Resistência térmica do material [  $(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$ ];

$e$  – Espessura do material [m];

$\lambda$  – Condutividade térmica do material [W/(m.K)];

Portanto, a resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano, constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada conforme a Equação 3, com a soma das resistências térmicas de n camadas homogêneas determinadas pela Equação 2 e resistências térmicas de n câmaras de ar obtidas na Tabela 4.

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn} \quad (3)$$

Em que:

$R_t$  – Resistência térmica de superfície a superfície ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );

$R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn}$  – são resistências térmicas das n camadas homogêneas, determinadas pela Equação 2;

$R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn}$  – são as resistências térmicas das n camadas de ar Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar (cm)	Resistência térmica $R_{ar}$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
Superfície de alta emissividade $\epsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\epsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Fonte: ABNT NBR 15.220:2005 – 2.

O cálculo da Resistência Térmica ambiente a ambiente, conforme Equação 4 é a soma da resistência térmica de superfície a superfície ( $R_t$ ), determinada na Equação 3, da resistência superficial externa ( $R_{Se}$ ), considerada como a resistência térmica da camada de ar adjacente

à superfície externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção e resistência superficial interna ( $R_{Si}$ ), definida como a resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção.

$$R_T = R_t + R_{Se} + R_{Si} \quad (4)$$

Em que:

$R_T$  – Resistência térmica total do material [ (m<sup>2</sup>.K) /W];

$R_t$  – é a resistência térmica de superfície a superfície;

$R_{Se}$  e  $R_{Si}$  – São as resistências superficiais externa e interna, respectivamente, obtidas na Tabela 6.

De acordo com Lamberts *et al.* (2014), a resistência térmica superficial traduz os efeitos da troca de calor por radiação e convecção do material em análise com o meio externo e com o meio interno. O valor da resistência superficial externa é função da velocidade do vento. E o valor da resistência superficial interna depende da direção do fluxo de calor, horizontal em paredes, vertical ascendente quando o exterior está mais frio, típico de inverno e vertical descendente quanto o exterior está mais quente, típico de verão. Obtém-se os valores da Resistência Superficial Interna e Externa na Tabela 5, conforme ABNT NBR 15220:2005 – 2.

Tabela 5 – Resistência térmica superficial interna e externa

$R_{Si}$ (m <sup>2</sup> .K)/W			$R_{Se}$ (m <sup>2</sup> .K)/W		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: ABNT NBR 15.220:2005 – 2.

### 2.5.9 Transmitância térmica (U)

A ABNT NBR 15220:2005 – 1 define a Transmitância Térmica ou Coeficiente global de transferência de calor como o inverso da resistência térmica total.

Roriz (2008) define a transmitância térmica como o fluxo de calor, que na unidade de tempo e por unidade de área, passa através do componente, para uma diferença unitária entre as temperaturas do ar em contato com cada uma das faces desse mesmo componente. A Transmitância é, portanto, um indicador do desempenho térmico (em regime térmico permanente) das edificações.

Conforme exposto por Lamberts, Dutra e Pereira (2012), transmitância térmica (U) é o inverso da resistência térmica incluindo as resistências térmicas superficiais. É a variável mais importante para avaliação de desempenho de fechamentos opacos frente à transmissão de calor, sendo usada para comparação e escolha dos diversos tipos de fechamento.

A transmitância térmica, calcula-se conforme a Equação 5 da ABNT NBR 15220:2005 – 2.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (5)$$

Em que:

$U$  – Transmitância térmica [W/ (m<sup>2</sup>.K) ]

$R_t$  – Resistência térmica total do material [ (m<sup>2</sup>.K) /W]

### 2.5.10 Atraso Térmico ( $\phi$ )

O atraso térmico é definido na ABNT NBR 15220:2005 – 1 como o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor.

O atraso térmico ( $\phi$ ) depende da capacidade térmica do componente construtivo e da ordem em que as camadas estão dispostas. O Atraso Térmico pode ser estimado pela expressão apresentada na Equação 6 da ABNT NBR 15220:2005 – 2.

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot C} \quad (6)$$

Em que:

$\varphi$  – Atraso Térmico [horas];

$R_t$  – Resistência térmica de superfície a superfície do componente [ $(m^2 \cdot K)/W$ ];

C – Capacidade térmica do componente [J/K].

### 2.5.11 Difusividade térmica ( $\alpha$ )

A difusividade térmica indica a rapidez com que ocorre a mudança de temperatura no concreto (ABNT NBR 12818:2012). A difusividade térmica é definida na ABNT NBR 15220:2005 – 1 como o quociente da condutividade térmica de um material ( $\lambda$ ) pela sua capacidade de armazenar energia térmica, conforme apresenta-se a Equação 7.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (7)$$

Em que:

$\alpha$  – Difusividade térmica;

$\lambda$  – condutividade térmica;

$\rho$  – Densidade do material;

$c$  – Calor específico

### 2.5.12 Calor específico (c)

O Calor Específico (c) é o quociente da capacidade térmica pela massa do sistema, conforme a ABNT NBR 15220:2005 – 1. Os valores do calor específico (c) e da densidade ( $\rho$ ) de alguns materiais de construção civil podem ser obtidos na ABNT NBR 15220 – 2: 2005. Na Tabela 6 apresentam-se o calor específico e a densidade de alguns materiais aplicados em paredes e coberturas.

Tabela 6 – Calor específico e densidade de alguns materiais utilizados na construção civil

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (kJ/(kg.K))
Tijolo e telhas de barro	1000-1300	0,92
	1300-1600	0,92
	1600-1800	0,92
	1800-2000	0,92
<b>Argamassas</b>		
Argamassas comum	1800-2100	1,00
Argamassa de gesso	1200,00	0,84
Argamassa celular	600-1000	1,00
<b>Concreto</b>		
Concreto normal	2200-2400	1,00
Concreto cavernoso	1700-2100	1,00

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.220:2005 – 2.

### 2.5.13 Capacidade térmica (C)

A ABNT NBR 15220 – 1:2005 define Capacidade Térmica (C) como a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema. Segundo Lamberts *et al.* (2014), é a capacidade de um material reter calor. Um material de grande capacidade térmica precisa de grande quantidade de calor para variar a sua temperatura em 1°C. A capacidade térmica de um material é calculada pela Equação 8.

$$C = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (8)$$

Em que:

$e_i$  – Espessura da camada [m];

$c_i$  – Calor específico do material da camada [J/ (kg. K) ];

$\rho_i$  – Densidade de massa aparente do material da camada [kg/m<sup>3</sup>];

C – Capacidade Térmica [J/K].

Entende-se que a temperatura está relacionada diretamente com a quantidade de energia térmica de um sistema. Assim, quando se adiciona calor a um sistema, a temperatura aumenta proporcionalmente à quantidade de calor adicionado. A constante de proporcionalidade é chamada de capacidade térmica, a habilidade do material de estocar calor.

A capacidade térmica influencia no comportamento térmico entre sólidos, que absorvem parte da energia que fluem entre suas faces. Essa quantidade depende da capacidade térmica do material. Esta característica dos sólidos é chamada de inércia térmica. Materiais com muita inércia térmica permite evitar grandes variações de temperaturas no interior das habitações, o que reduz a sensação de desconforto provocado pelo frio ou pelo calor (BEZERRA, 2003).

Gagliano *et al.* (2014), reiteram que os efeitos positivos da inércia térmica são reforçados em climas onde a variação da temperatura externa diurna é acima 10 K, enquanto a densidade dos sistemas do edifício ajuda a reduzir o pico da temperatura externa e mantém as condições internas dentro da faixa de conforto, absorvendo o calor em excesso. No entanto, mesmo em construção leve, pode-se beneficiar da ventilação natural durante a noite. A energia disponível a partir de ganhos solares e ganhos internos durante o dia é armazenado, e então lentamente libertado para o ambiente interior em um momento posterior. Quanto maior é a inércia térmica de um edifício, mais lenta é a taxa a que a sua temperatura interna aumenta. Em um fechamento opaco a transmissão de calor acontece quando há uma diferença de temperatura entre suas superfícies internas e externas. O sentido do fluxo de calor será sempre da superfície mais quente para a mais fria. Uma característica importante dos fechamentos opacos é a inércia térmica, ao conduzir calor para o outro extremo, o material retém uma parte no seu interior, liberando-o mais tarde. Quanto maior a inércia térmica, maior o calor retido (LAMBERTS, DUTRA E PEREIRA, 2014).

## **2.6 NORMAS E APLICAÇÕES AO DESEMPENHO TÉRMICO**

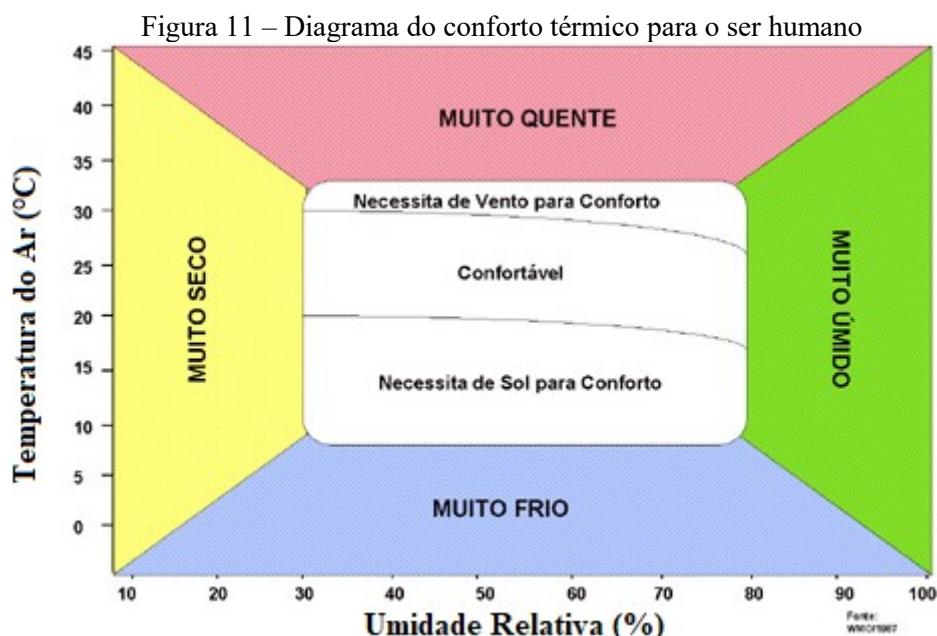
As normas existentes na área de desempenho térmico englobam estudos sobre todas as variáveis que influenciam no desempenho térmico e que proporcionam o conforto térmico aos usuários. Essas variáveis dependem do efeito combinado de fatores pessoais e ambientais como: taxa de metabolismo, isolamento térmico da vestimenta, temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa, as quais interferem no equilíbrio térmico do corpo humano, o chamado sistema termorregulador (RUAS, 2001).

A ISO 7730:1994 tem como objetivo apresentar um método para prognosticar a sensação térmica e a proporção de pessoas insatisfeitas quando expostas a ambientes térmicos

moderados, bem como especificar condições ambientais aceitáveis para o conforto térmico (CARVALHO, 2012).

É possível relacionar a norma ISO 7730:1994 com o desempenho térmico das estruturas e edificações, pois está diretamente relacionada ao conforto térmico dos usuários, e relaciona diretamente as propriedades dos elementos que compõem as análises de transferência de calor nos sistemas estruturais com o conforto térmico.

Para obter-se o conforto térmico, uma edificação deve atender condições necessárias, com suas variáveis ambientais, interligadas com suas características construtivas. O conforto térmico humano pode ser simplificado como mostra a Figura 11, na qual ilustra-se a relação da temperatura e umidade relativa do ar ao conforto térmico do ser humano.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia Inmet  
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/confortoTermicoHumano>

Para que o corpo humano esteja em equilíbrio térmico, a quantidade de calor ganho deve ser igual à quantidade de calor cedido para o ambiente. Assim, as condições satisfatórias de conforto térmico de uma edificação não dependem só da sua adequação ao clima, mas também da sua adaptação às atividades desenvolvidas pelos usuários, dos equipamentos envolvidos e características da edificação.

No Brasil a ABNT disponibiliza duas principais normas para avaliação do conforto térmico, as quais estabelecem parâmetros para o desempenho de edificações segundo modelos internacionais de desempenho (MARTINS, 2013).

A ABNT NBR 15220: 2005 – Desempenho térmico de edificações, divide-se em cinco partes:

- Parte 1: Definições símbolos e unidades – estabelece as definições e os correspondentes símbolos e unidades de termos relacionados com o desempenho térmico de edificações;
- Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações – estabelece procedimentos para o cálculo das propriedades térmicas (resistência, transmitância e capacidade térmica, atraso térmico e fator de calor solar) de elementos e componentes de edificações;
- Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social – estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro abrangendo um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social.
- Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida – estabelece o método para a medição, em regime permanente, da resistência térmica e da condutividade térmica de materiais sólidos, usando-se a aparelhagem denominada placa quente protegida, tendo a placa uma largura total ou diâmetro acima de 200 mm e uma largura do anel de guarda entre  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{6}$  do diâmetro ou da largura total.
- Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico – estabelece o método de utilização de técnicas fluximétricas para medir a resistência térmica em regime estacionário, por meio de corpos de prova na forma de placas planas, podendo-se deduzir por cálculo a condutividade térmica.

A ABNT NBR 15220:2005 apresenta valores de algumas propriedades importantes, para a análise do desempenho térmico, de uma estrutura como: transmitância térmica ( $U$ ), atraso térmico ( $\phi$ ), fator de calor solar ( $FS_O$ ) para paredes externas e coberturas, densidade de massa aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e capacidade térmica ( $C$ ), de alguns materiais utilizados em edificações conforme Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 7 – Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissível para cada tipo de vedações externas

Vedações externas	Transmitância térmica - $U$ (W/m <sup>2</sup> . K)	Atraso térmico - $\phi$ (h)	Fator solar $FS_O$ (%)
Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FS \leq 5,0$
Paredes	Leve refletora $U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS \leq 4,0$
Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FS \leq 3,5$

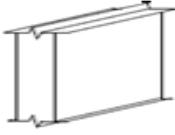
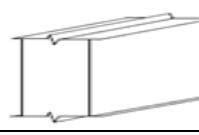
Fonte: ABNT NBR 15.220:2005 – 3.

Tabela 8 – Propriedade térmica de materiais utilizados em paredes externas

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	C (kJ/kg.K)
Cerâmica	1600,00	0,90	0,92
Argamassa de emboço ou assentamento	2000,00	1,15	1,00
Concreto	2400,00	1,75	1,00

Fonte: ABNT NBR 15.220:2005 – 3.

Tabela 9 – Transmitância térmica, Capacidade térmica e Atraso térmico para algumas paredes

Parede	Descrição	$U$ (W/m <sup>2</sup> . K)	C (KJ/m <sup>2</sup> . K)	$\phi$ (horas)
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 5,0 cm	5,04	120	1,3
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 10 cm	4,40	240	2,7

Fonte: ABNT NBR 15.220:2005 – 3.

A norma ABNT NBR 15575:2013 apresenta o desempenho térmico como um dos requisitos qualitativos de desempenho, sendo os critérios de avaliação os valores máximos de temperatura interna no verão e os valores mínimos de temperatura no inverno. Essa norma ainda apresenta requisitos que devem ser contemplados de maneira eficiente pelos sistemas de vedação verticais internas e externas, assim como pelos sistemas de cobertura.

Esta norma divide-se em seis partes, sendo:

- Parte 1: Requisitos gerais
- Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais
- Parte 3: Requisitos para os sistemas de piso.
- Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE.
- Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas.
- Parte 6: Sistemas Hidrosanitários.

ABNT NBR 15575:2013 estabelece os requisitos de desempenho que se aplicam às edificações habitacionais, como um todo integrado, bem como podem ser avaliados de forma isolada para um ou mais sistemas específicos. Apresenta também critérios relativos ao desempenho térmico, acústico, lumínico e de segurança ao fogo, que devem ser atendidos. A avaliação térmica pode ser aplicada com diferentes procedimentos conforme a ABNT NBR 15575 – 1:2013.

- A) Procedimento 1 A – Simplificado normativo: verifica o atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento da obra, com base na transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C) das paredes de fachada e das coberturas.
- B) Procedimento 1 B – Medição in loco, Anexo A da ABNT NBR 15575 - 1: prevê a verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos na norma, por meio da realização de medições em edificações existentes ou protótipos construídos com essa finalidade.
- C) Procedimento 2 – Simulação por software Energy Plus7 (normativo): para os casos em que os valores obtidos para a transmitância térmica e/ou capacidade térmica se mostrarem insatisfatórios frente aos critérios e métodos estabelecidos nas partes 4 e 5 da norma ABNT NBR 15575, o desempenho térmico global da edificação deve ser avaliado por simulação computacional.

No procedimento 1 A, utiliza-se uma avaliação simplificada do desempenho térmico, em que as paredes de fachada e a cobertura da edificação habitacional devem reunir

características mínimas que atendam aos critérios de desempenho, considerando-se a zona bioclimática em que a edificação se localiza, conforme Figura 12.

Os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) das paredes externas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Transmitância térmica de paredes externas

Transmitância térmica U (W/m <sup>2</sup> .K)	
Zonas 1 e 2	Zonas 3,4,5,6,7 e 8
$U \leq 2,5$	$\alpha \leq 0,6$ $U \leq 3,7$
	$\alpha > 0,6$ $U \leq 2,5$

$\alpha$  - absorção à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: ABNT NBR 15.575:2013 – 4.

Os valores mínimos admissíveis para a Capacidade térmica de paredes externas são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica (C) (kJ/m <sup>2</sup> .K)	
Zonas 8	Zonas 1, 2, 3,4,5,6 e 7
Sem requisito	$\geq 130$

Fonte: ABNT NBR 15.575:2013 – 4.

Para as paredes externas o valor máximo diário da temperatura do ar interno no verão de recintos de permanência prolongada como: salas e dormitórios, sem a presença de fontes internas de calor, como ocupantes, lâmpadas e outros equipamentos, deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior para o dia típico de verão, para atender ao nível mínimo de desempenho conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
Mínimo	Zonas 1 a 7	Zona 8
	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$

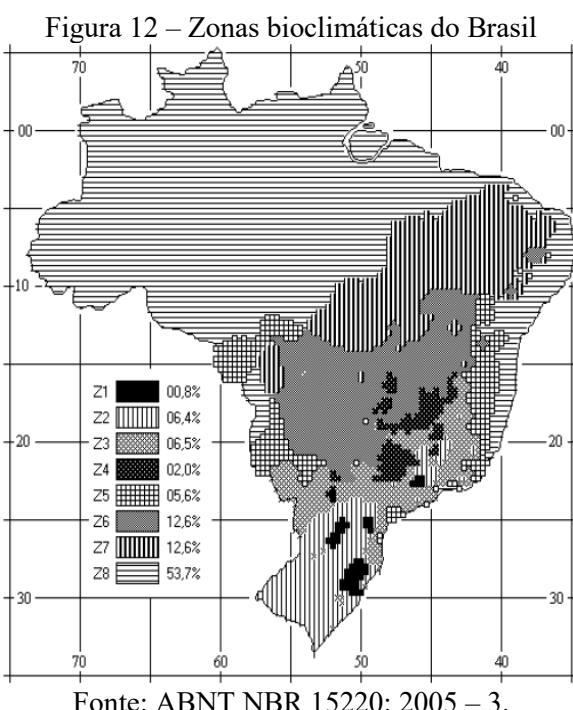
Ti,max é o valor máximo diário da temperatura do ar interior da edificação, em °C;  
Te,max é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C  
Zona bioclimática de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Fonte: ABNT NBR 15.575-1:2013.

### 2.6.1 Zonas Bioclimáticas

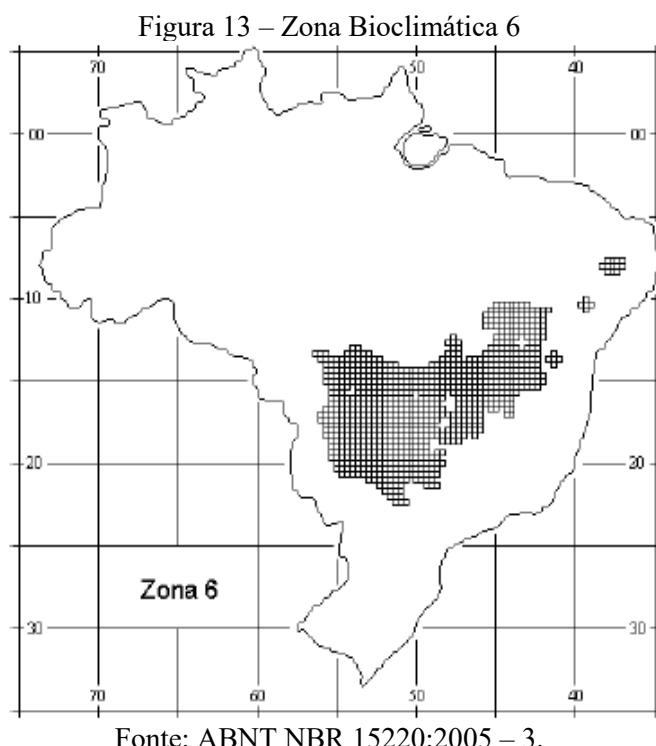
Zona Bioclimática é a região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano (ABNT NBR 15220-1:2005). A norma ABNT NBR 15575-1:2013 define que as edificações habitacionais devem possuir características que atendam aos requisitos de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática. Para se ter parâmetros comparativos com dados já normalizados, fizeram-se estudos com as normas brasileiras regulamentadas sobre as zonas bioclimáticas aplicados no território brasileiro.

Na ABNT NBR 15220-3:2005 dividiu o território brasileiro em oito regiões bioclimáticas, conforme ilustrado na Figura 12. Em cada uma dessas zonas climáticas são definidos o dia típico de inverno e o dia típico de verão, estabelecidos com base na temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente para o dia mais frio e para o dia mais quente do ano respectivamente, segundo a média observada num número representativo de anos. A norma indica as zonas correspondentes a cerca de 200 cidades brasileiras, que servem como referência para cidades próximas. Para cada uma destas zonas, formulou-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas, onde objetivou-se otimizar o desempenho térmico das edificações para uma melhor adequação climática.



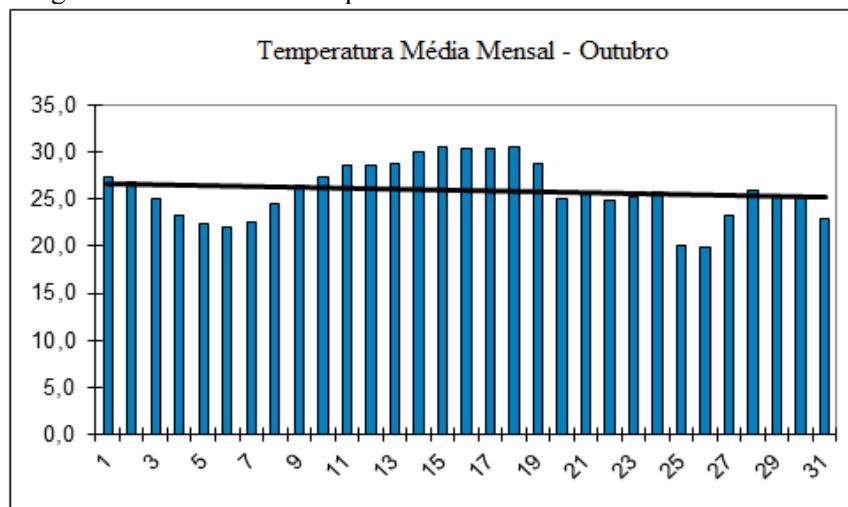
### 2.6.2 Zona Bioclimática da Região do Triângulo Mineiro

A região do Triângulo Mineiro encontra-se na Zona Bioclimática 6, conforme ABNT NBR 15220-3:2005. Nesta Zona Bioclimática as aberturas para ventilação devem ser médias e sombreadas, com vedações externas: parede pesada e cobertura leve isolada. No verão as estratégias de condicionamento térmico passivo devem ser: resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento e ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa); e no inverno vedações internas pesadas (inércia térmica). Na Figura 13 está ilustrada a Zona Bioclimática 6.



Considera-se que o clima de Uberlândia se caracteriza como tropical de altitude, com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 23,1 °C. O mês mais quente é outubro, tem temperatura média de 26,0 °C e o mês mais frio, junho, com 21,3 °C. Na Figura 14 está ilustrado o gráfico que considera a temperatura mensal média de outubro de 2014. Os valores de temperaturas médias e umidades relativas do ar, com referências aos anos de 2013 a 2015 na cidade de Uberlândia – MG, apresentam-se na Tabela 13 conforme Estação Automática UFU - Instituto de Geografia.

Figura 14 – Gráfico da temperatura média mensal de outubro de 2014



Fonte: Estação Automática UFU - Instituto de Geografia.

Tabela 13 – Dados de temperaturas médias e umidade relativa do ar na cidade de Uberlândia - MG

Ano	2013			2014			2015				
	Mês	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Out	Nov	Dez	Jan	Fev
Temperatura máxima média (°C)		28,0	28,3	26,4	27,4	27,0	30,5	26,4	27,2	29,7	27,2
Temperatura média (°C)		22,7	24,0	23,9	25,4	24,8	26,0	23,8	23,3	26,5	23,9
Temperatura mínima média (°C)		18,8	18,9	21,9	22,7	22,5	20,0	21,5	20,0	22,8	21,0
Umidade relativa (%)		58,2	66,7	76,2	60,8	59,5	41,6	69,7	74,6	54,6	69,9

Fonte: Estação Automática UFU - Instituto de Geografia

Com os dados do INMET e da Estação Meteorológica da UFU apresentados no Apêndice A, mais a orientação da Figura 11 que ilustra a relação da temperatura e umidade relativa do ar ao conforto térmico do ser humano, observa-se que a temperatura média mínima e a temperatura média máxima são de 20 °C e 40 °C respectivamente, com uma umidade relativa de 76%. Esses dados atendem as faixas extremas de temperaturas de verão, considerando-se o conforto térmico do ser humano, mediante aos intervalos de temperaturas e umidade relativa do ar, nas cinco regiões brasileiras e o município de Uberlândia.

## 2.7 DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

O desempenho térmico de um ambiente depende da combinação de vários fatores, dentre os quais se destacam: o posicionamento da edificação e suas dependências, a escolha dos materiais para a aplicação em paredes, pisos, tetos e esquadrias, e a especificação de equipamentos, com suas instalações, que são possíveis fontes de calor (RIBAS, 2013).

Segundo Lamberts *et al.* (2016), conforto térmico é o estado da mente que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. As variáveis que influenciam no conforto térmico que podem ser medidas diretamente são: a temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa e a velocidade do ar. Além destas, as variáveis da atividade física e vestimenta, também interagem na sensação de conforto térmico do homem. Nesse sentido, o conforto térmico pode ser alcançado pelo controle da influência de elementos climáticos. A norma ABNT NBR 15575: 2013 explicita que a edificação deve reunir características que atendam às exigências de conforto térmico dos usuários, considerando-se o seu entorno e as características bioclimáticas definidas na norma ABNT NBR 15220: 2005.

Considera-se que o desempenho térmico da edificação depende do comportamento interativo entre fachada, cobertura e piso, onde devem-se fixar requisitos mínimos a serem atendidos pelos elementos construtivos das edificações habitacionais (RIBAS, 2013). A norma ABNT NBR 15575: 2013, estabelece valores máximos e mínimos diários de temperatura do ar que devem ocorrer no interior da edificação, as quais devem ser melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra, para o dia típico de verão, e que propiciem conforto térmico no interior da edificação, no dia típico de inverno.

### **2.7.1 Desempenho térmico do concreto**

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o concreto é um material em que se pode obter excelente resistência à ação da água, devido sua capacidade de moldagem e conformação de elementos estruturais. Seu desempenho térmico dependerá dos materiais que compõem sua estrutura, como o cimento que aglutinam as partículas ou fragmentos de agregado e eventualmente aditivos. Pois, as características físicas, químicas e dimensionais desses componentes, podem influenciar as propriedades térmicas do concreto.

Como referência ao estudo e pesquisa de avaliação de desempenho térmico de edificações, Bezerra (2003) avaliou o desempenho térmico de paredes construídas com blocos de concreto, cuja composição agrupa o poliestireno expandido (EPS) reaproveitado na forma de flocos e em painéis, constituindo desse modo um concreto leve. Realizou ensaios de

determinação das propriedades térmicas dos blocos de concreto leve, como: densidade do material, calor específico e condutividade térmica.

O desempenho térmico foi avaliado por meio de uma análise comparativa da parede construída com blocos de concreto comum, adotada como padrão, em relação as paredes construídas com dois outros tipos de alvenarias convencionais: blocos de concreto vazado, tijolos cerâmicos de 8 furos e blocos de concreto leve. A análise do desempenho térmico dos componentes utilizou o método da “caixa quente protegida” descrita na norma ASTM C 236. As paredes foram construídas em ambientes climatizados com ar condicionado de 18.000 BTUs. Primeiramente as medições se realizaram em ambiente sem climatização e depois com climatização em intervalos de 24 horas.

Bezerra (2003) concluiu que o desempenho térmico do sistema construído com EPS como agregado, reduziu a transferência de calor do meio externo para o meio interno, comparando-se ao bloco padrão. As diferenças de temperatura entre as faces aquecida e resfriada das paredes com os blocos de concreto leve aumentaram em 164,4% e 181,1% respectivamente. Além da contribuição para a melhoria do conforto térmico dos usuários das edificações, o reaproveitamento do poliestireno expandido (EPS) na forma de agregado para a construção civil contribui para a redução do custo na produção dos blocos e evidentemente, permite também, reduzir o impacto causado pelo descarte desse material no meio ambiente.

O autor constatou ainda que os sistemas construídos com elementos convencionais, tijolo de oito furos e bloco de concreto vazado, apresentaram desempenhos térmicos inferiores ao sistema alternativo. Nesse caso a diminuição da quantidade de energia transferida para o interior das edificações tem como principal consequência a economia de energia elétrica necessária a climatização de ambientes. Esse fato deve ser mais evidente em edificações comerciais e públicas situadas nas regiões de baixas latitudes, como acontece com a região Nordeste do Brasil, onde a radiação solar é responsável por um relevante parcela da carga térmica nos espaços construídos.

Sacht (2008) desenvolveu uma pesquisa com concretos destinados ao sistema construtivo de painéis monolíticos moldados *in loco*, tendo como análise além dos requisitos técnicos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade, a influência das características dos

painéis no conforto térmico das habitações. Avaliou-se por meio de simulações computacionais os painéis de espessuras (8, 10 e 12 cm), e massas específicas dos concretos (1600, 1800, 2000, 2200 e 2400 kg/m<sup>3</sup>) adequadas em relação as características climáticas das localidades analisadas, utilizando-se como parâmetro a norma ABNT NBR 15575:2013 – Desempenho Térmico das Edificações.

A condutividade térmica dos concretos foi obtida pelo método do fio quente paralelo, normatizado em 1978 pela norma DIN 51046 – Parte 2. Os dados encontrados por esse ensaio foram utilizados para a realização de simulações computacionais para avaliação do desempenho térmico das edificações utilizando-se o software ARQUITROP 3.0, sistema integrado de programas computacionais e bancos de dados que simula o desempenho térmico e verifica a adequação climática de edificações visando otimizar o conforto ambiental e a economia de energia. O software processa em poucos minutos, um grande conjunto de dados e modelos matemáticos cujo tratamento manual demandaria vários dias de especialistas (RORIZ, 2008). A autora concluiu que dentre todas as tipologias analisadas, o uso de painéis de massa específica 2400 kg/m<sup>3</sup> e espessura de 12 cm apresentou um melhor desempenho térmico. O aumento da massa específica dos concretos pouco influenciou nos resultados, sendo a espessura característica determinante.

Carvalho (2012) apresenta um estudo para avaliação de desempenho térmico de edificações unifamiliares de interesse social executadas com paredes de concreto armado, localizadas no loteamento Zilda Arns em Santa Maria (Rio Grande do Sul), inserida na Zona Bioclimática 2 brasileira.

Esse estudo adotou quatro unidades de habitações que representavam projetos do programa “Minha Casa, Minha Vida”, onde foram realizadas medições de temperatura interna e externa além da umidade do ar. Para a avaliação do desempenho térmico utilizou-se um aparelho *Hobo DataLogger*, fabricado pela empresa *ONSET Computer Corporation*. Com simulações de dados fornecidos nos locais das edificações, calculou-se a amplitude e amortecimento térmico nos períodos de inverno e verão.

A autora concluiu que os sistemas construtivos são adequados ao uso de habitações de interesse social na Zona Bioclimática 2 brasileira para o período de verão, mas no inverno o

sistema construtivo apresentou inadequação, sendo necessário mudanças de projeto. Constatou ainda que no período de verão a temperatura interna se mantém abaixo da temperatura externa máxima, atendendo a ABNT NBR 15575: 2013. Já no período de inverno, o desempenho térmico não atendeu totalmente a norma, pois em 42% do tempo monitorado, a temperatura não atingiu o mínimo exigido de 3°C acima da temperatura externa, conforme apresentado na Tabela 14 da norma ABNT NBR 15575:2013-4.

Tabela 14 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5	Zonas bioclimáticas 6, 7 e 8
M	$T_i, \text{min} \geq (T_e, \text{min} + 3 ^\circ\text{C})$	Nestas zonas, este critério não deve ser verificado.

Ti, min é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;  
Te, min é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.  
Nota: Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Fonte: ABNT NBR 15.575:2013-4.

Kim *et al.* (2012) investigaram várias características do concreto leve contendo agregados leves com adição de aditivo incorporador de ar. Analisaram os efeitos de agregados leves e aditivo incorporador de ar sobre as características de fluxo, densidade, porosidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade e dinâmica do concreto. Mediú-se também a perda de transmissão acústica e condutividade térmica. Observaram que o concreto leve contendo agregados leves e uma quantidade de aditivo incorporador de ar têm características excelentes, entre eles: alta trabalhabilidade, baixa densidade e resistência à compressão adequada, podendo ser aplicado na arquitetura como blindagem acústica e boas propriedades de isolamento térmico.

Em seus resultados Kim *et al.* (2012) demonstraram que a condutividade térmica do concreto leve é inferior do que a do concreto normal. Enquanto a condutividade térmica do concreto normal foi 0,7-0,8 W/m.K, em uma faixa de temperatura de 0°C a 50°C, o concreto leve diminuiu para 0,5 a 0,6 W/m.K (63-70%) quando não houve aplicação do aditivo incorporador de ar, e diminuiu ainda mais a 0,3 a 0,4 W/m.K (52-55%) com a adição de 1,5% do aditivo incorporador de ar, neste caso obteve-se um teor de ar entre 30% a 35%.

Os autores demonstraram que a condutividade térmica apresentou forte relação com a densidade da matriz do concreto. A condutividade térmica do material diminui linearmente à medida que a porosidade na matriz de concreto aumenta, independentemente da

localização dos poros, o que afeta a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os autores concluíram que a condutividade térmica do concreto diminuiu quando agregados normais foram substituídos por agregados leves, e reduziu-se ainda mais com adição do aditivo incorporador de ar.

Angelin (2014) analisou concretos leves estruturais quanto ao desempenho físico, térmico, mecânico e microestrutural, em que se variou a proporção de agregados leves, argila expandida, nos traços de cada concreto produzido. Nesse caso a análise térmica do concreto realizou-se por meio do método da placa quente protegida, ensaio normalizado pela ABNT NBR 15220:2005 – Parte 4. A autora observou que os valores da condutividade térmica são diretamente influenciados pelo valor da massa específica do concreto, especificamente pelo teor de argila expandida. Quanto maior o teor de argila expandida no concreto menores são os valores de condutividade térmica. A autora concluiu ainda que os índices obtidos no ensaio de condutividade térmica, por meio do método da placa quente protegida (ABNT NBR 15220:2005), nos concretos com 100% de argila expandida, foram menores em comparação ao concreto sem argila expandida nacional, o qual apresentou valor máximo de condutividade térmica de 1,00 W/m.K.

Cintra (2015) apresentou resultados de uma pesquisa sobre o desempenho do concreto com ar incorporado em painéis, considerando as variações climáticas do período de inverno. A variável de controle foi o gradiente de condução do calor, visando o desempenho térmico das habitações. O programa experimental consistiu na execução de 16 painéis, sendo 4 de referência e 4 para cada dosagem de aditivo incorporador de ar (0,04%, 0,08% e 0,12% sobre o consumo de cimento). Realizou-se o ensaio térmico em uma câmara com dois compartimentos isolados termicamente e controle independente de temperatura (10 °C e 25 °C) e umidade relativa. Na divisória entre esses dois compartimentos instalaram-se os painéis. Realizou ensaios térmicos com uma câmara variando de 10°C para 25°C e a outra mantida a 10°C. As análises do autor tiveram como base as variações de temperaturas, com resultados que indicaram um melhor desempenho térmico do concreto sem aditivo em comparação aos concretos com aditivos incorporadores de ar. Os concretos com ar incorporado permitiram um aquecimento mais lento que o concreto convencional.

Barbar (2016) avaliou a influência do teor de ar incorporador, por meio de aditivo, no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados. Concluiu que os concretos com menores teores de agregados apresentaram menor resistência mecânica, menor velocidade da frente de carbonatação e menor condutividade térmica. De acordo com os resultados obtidos, concluiu que o aditivo a base de resinas sintéticas foi mais eficiente na incorporação de ar; maiores teores de ar implicaram na variabilidade dos resultados de ensaios de resistência a compressão e módulo de elasticidade; os concretos com maiores teores de agregados apresentaram maior velocidade da frente de carbonatação, para mesmos teores de ar incorporado; a condutividade térmica foi inversamente proporcional ao teor de ar incorporado no concreto, e quanto menor o teor de agregados, menor a condutividade térmica; o aumento do teor de ar no concreto promoveu aumento no diâmetro equivalente dos poros e redução da incidência de poros esféricos.

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

A presente pesquisa é uma continuidade do trabalho de Cintra (2015). Dessa forma, na avaliação do desempenho térmico do concreto, utilizaram-se painéis de concreto moldados por Cintra (2015): quatro painéis de referência sem aditivo com 3% de ar aprisionada, doze painéis com diferentes teores de ar por meio de aditivos, 8%, 11% e 12%, sendo quatro painéis para cada proporção respectivamente. O trabalho de Cintra (2015) avaliou o desempenho térmico em temperaturas de inverno. Nesse trabalho, esses painéis foram avaliados em câmaras com isolamentos térmicos, onde analisou-se primeiramente o desempenho térmico nas temperaturas de verão. Num segundo momento, fez-se a extração de corpos de prova desses painéis para determinar a condutividade térmica e ainda o comportamento térmico em corpos de prova menores.

Os valores da condutividade térmica foram aplicados na determinação da transmitância térmica ( $U$ ), e comparados aos valores estabelecidos na ABNT NBR 15.575-2:2013. Compararam-se os resultados do comportamento térmico dos concretos nos painéis e nos corpos de prova com fluxo unidirecional. Avaliaram-se os valores das propriedades térmicas obtidas no concreto de referência e nos concretos com diferentes proporções de aditivo incorporador de ar.

### **3.1 PAINÉIS DE CONCRETO UTILIZADOS NA PESQUISA**

#### **3.1.1 Caracterização dos concretos produzidos**

Nos ensaios em laboratório de avaliação de desempenho térmico do concreto, foram utilizados painéis de concreto com diferentes proporções de teores de ar (referência-3%, 8%, 11%, e 12%) com dimensões 99 x 99 x 10 cm, conforme ilustrado na Figura 15. A dosagem dos diferentes concretos estudados, a concretagem dos painéis, os ensaios no estado fresco e no estado endurecido foram executados por Cintra (2015).

Figura 15 – Painéis de concreto moldados para ensaio



Fonte: Autora.

Os Materiais utilizados por Cintra (2015) para a produção dos painéis de concreto foram:

- Cimento Portland CP V - escolhido em função da grande utilização em paredes de concreto. Os ensaios de caracterização do cimento realizado por Cintra (2015) estão apresentados na Tabela 15 e contemplam a determinação da massa específica, finura, resistência à compressão e dos tempos de início e fim de pega.

Tabela 15 – Caracterização do cimento CP V

Cimento			
Propriedades físicas		CP V	Limites
Finura	Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3,03	–
	Resíduo na peneira 200 mm (%)	0,48	$\leq 6$
Tempo de pega (min)	Área específica ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	471,44	$\geq 300$
	Início de pega (min)	195	$\geq 60$
Resistência à compressão (MPa)	Fim de pega (min)	210	$\leq 600$
	1 dia	22,69	$\geq 14$
	3 dias	32,63	$\geq 24$
	7 dias	33,16	$\geq 34$

Fonte: Cintra (2015).

- Agregado miúdo – areia natural, proveniente de cava de rio, de granulometria média. Os ensaios de caracterização do agregado miúdo, apresentados na Tabela 16, contemplam a

determinação da composição granulométrica, massa unitária, massa específica, módulo de finura e absorção da areia.

Tabela 16 – Caracterização do agregado miúdo

Agregado miúdo		
Ensaios realizados	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,58	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	ABNT NBR NM 45:2006
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura	2,15	ABNT NBR NM 248:2003
Granulometria	Areia média	ABNT NBR NM 248:2003
Absorção	1,21%	ABNT NBR NM 30:2001

Fonte: Cintra (2015).

- Agregado graúdo – agregado natural britado de origem basáltica, classificado comercialmente como brita 1. Os ensaios de caracterização do agregado graúdo, apresentados Tabela 17, contemplam a determinação da composição granulométrica, massa unitária no estado solto e compactado, massa específica e absorção da brita.

Tabela 17 – Caracterização do agregado graúdo

Agregado graúdo		
Ensaios realizados	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,82	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,49	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária no estado compactado (g/cm <sup>3</sup> )	1,6	ABNT NBR NM 45:2006
Dimensão máxima (mm)	19	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura	6,75	ABNT NBR NM 248:2003
Absorção	2,58%	ABNT NBR NM 53:2009

Fonte: Cintra (2015).

- Aditivo químico – o aditivo utilizado foi o CEMIX-AIR, de fabricação da indústria Vedacit Impermeabilizantes, do tipo incorporador de ar (IAR). As características do aditivo segundo o Manual técnico Vedacit Impermeabilizantes (2008) do fabricante são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Informações do Aditivo Incorporado de ar (IAR)

Características	
Natureza	Líquido
Cor	Amarelo claro
Composição	Alquil-aryl-sulfonado
Densidade	1,02 g/cm <sup>3</sup>
Teor de cloretos	Isento
Consumo	0,04% a 0,12%

Fonte: Cintra (2015).

O traço adotado por Cintra (2015) foi 1:2:3:0,53 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água) em massa seca para o concreto de referência. Os consumos dos materiais do concreto são apresentados na Tabela 19. Os concretos com adição de ar incorporado foram dosados com 0,04%, 0,08% e 0,12% de aditivo em relação à massa de cimento, além do concreto de referência, sem aditivo químico.

Tabela 19 – Consumo dos materiais do concreto

Concreto por m <sup>3</sup>	
Traço	1: 2: 3: 0,53
Cimento	350 kg
Agregado miúdo	700 kg
Agregado Graúdo	1050 kg
Água	185,5 L

Fonte: Autora.

Os ensaios realizados no estado fresco foram: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone segundo a norma ABNT NBR NM 64:1998, determinação da massa específica segundo a norma ABNT NBR 9833:2008, e determinação do teor de ar segundo a norma ABNT NBR NM 47:2002.

A moldagem dos painéis foi executada por Cintra (2015). O concreto foi transportado por carrinho de mão até as fôrmas de madeira. Em seguida, foram preenchidas e adensadas com um vibrador de imersão. Depois de preenchido todo o volume de cada fôrma, realizou-se o acabamento na superfície dos painéis.

A cura dos painéis foi realizada em um local coberto e fresco. A desforma ocorreu sete dias após a moldagem. Depois de retiradas as fôrmas, o concreto foi molhado duas vezes ao dia, até atingir 21 dias de idade.

No estado endurecido os ensaios realizados foram: de resistência à compressão conforme a ABNT NBR 5739:2007, módulo de elasticidade segundo norma ABNT NBR 8522:2008 executados por Cintra (2015) e massa específica segundo ABNT NBR 9778: 2009.

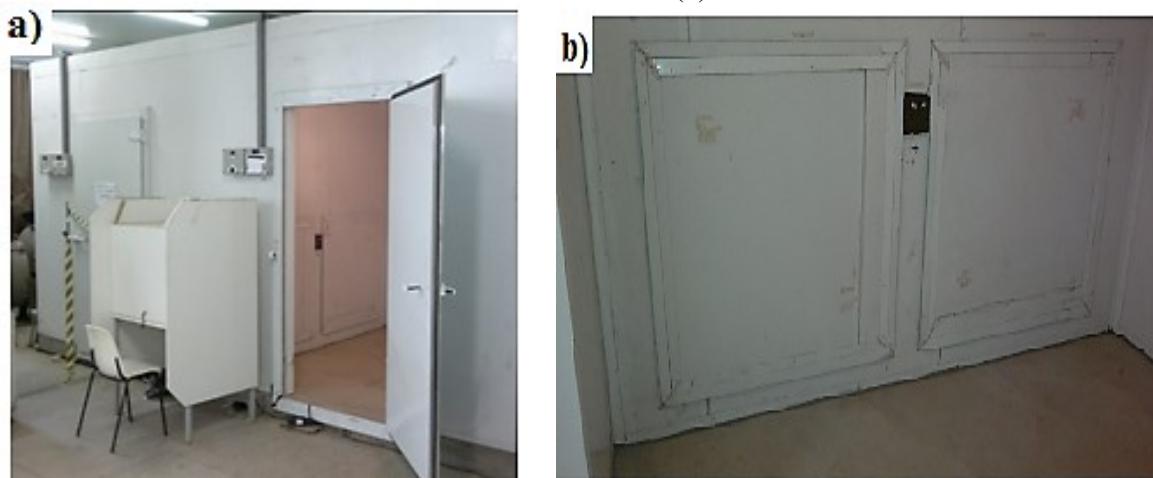
### **3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO**

#### **3.2.1 Procedimento de avaliação do desempenho térmico dos painéis na câmara climatizada**

Conforme apresentado na Tabela do Apêndice A, no período de meses mais quentes, a temperatura média máxima está na região Nordeste e a menor umidade relativa do ar encontra-se na região Sudeste, com os valores de 37,8°C e 75,8% respectivamente. Com base nessas informações, definiram-se os valores de 40°C e 76% para a temperatura e umidade respectivamente, que foram consideradas nos ensaios de desempenho térmico nos painéis de concreto.

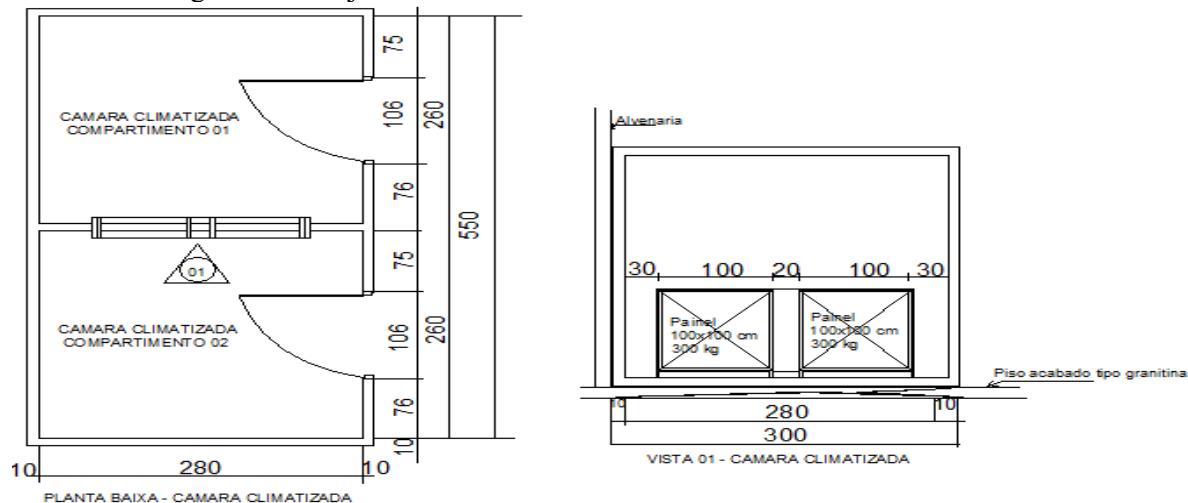
Nos ensaios utilizou-se a câmara climatizada ilustrada na Figura 16 e Figura 17, do laboratório da FECIV-UFU. A câmara possui dois compartimentos isolados termicamente, construído com paredes e coberturas de EPS, revestido por chapas de alumínio e piso de EPS revestido de concreto.

Figura 16 – Câmara climatizada utilizada nos ensaios térmicos dos painéis (a) e Compartimento interno da câmara (b)



Fonte: Autora.

Figura 17 – Projeto da câmara climatizada do laboratório da FECIV-UFU

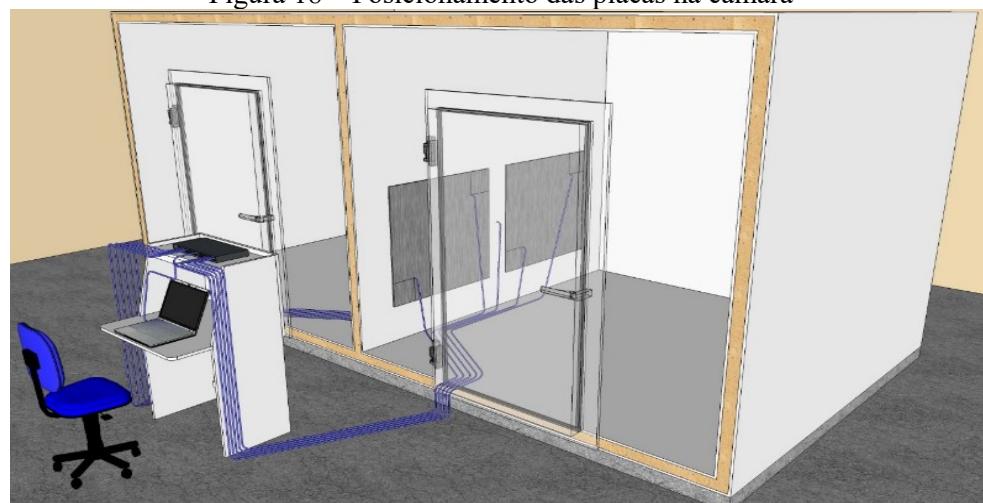


Fonte: Autora.

Inicialmente, realizou-se um ensaio para verificação do isolamento térmico entre os compartimentos da câmara. O objetivo foi certificar a não ocorrência de trocas de calor entre os compartimentos isolados termicamente. O ensaio foi realizado mantendo-se um dos compartimentos a temperatura de 20°C e o outro compartimento desligado, ambos fechados, por um período de 24 horas.

Após a verificação do isolamento térmico entre os compartimentos da câmara, procedeu-se os ensaios de desempenho térmico. Os painéis de concreto foram posicionados entre os dois compartimentos, de forma que uma das faces se posicionasse no compartimento esquerdo e a outra face no compartimento direito, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Posicionamento das placas na câmara



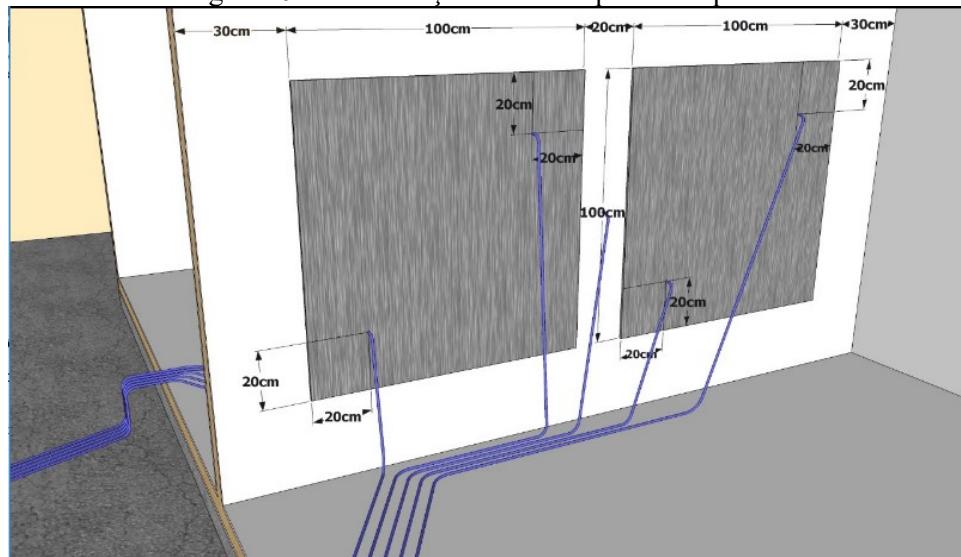
Fonte: Autora.

Instalaram-se dois painéis do mesmo traço na câmara em cada ensaio, um ao lado do outro e cada uma das faces contendo dois termopares. Um termopar livre no interior de cada câmara, sem contato com o concreto, a 20 cm dos painéis, para registrar a temperatura do ar próximo ao painel, conforme ilustrado na Figura 19.

Foram colocados circuladores de ar no interior das câmaras, para promover o equilíbrio e uniformidade contínua da temperatura e umidade do ambiente interno, e diminuir a histerese.

Os termopares fixados nas faces dos painéis foram distribuídos a 20 cm das laterais e a 20 cm das bordas superior e inferior, conforme ilustrado na Figura 19. Posicionou-se também um termopar do lado externo da câmara, para registrar a temperatura ambiente. Portanto, utilizaram-se ao todo, onze termopares, cinco no compartimento esquerdo da câmara, cinco no compartimento direito da câmara e um termopar externo.

Figura 19 – Distribuição dos termopares nos painéis



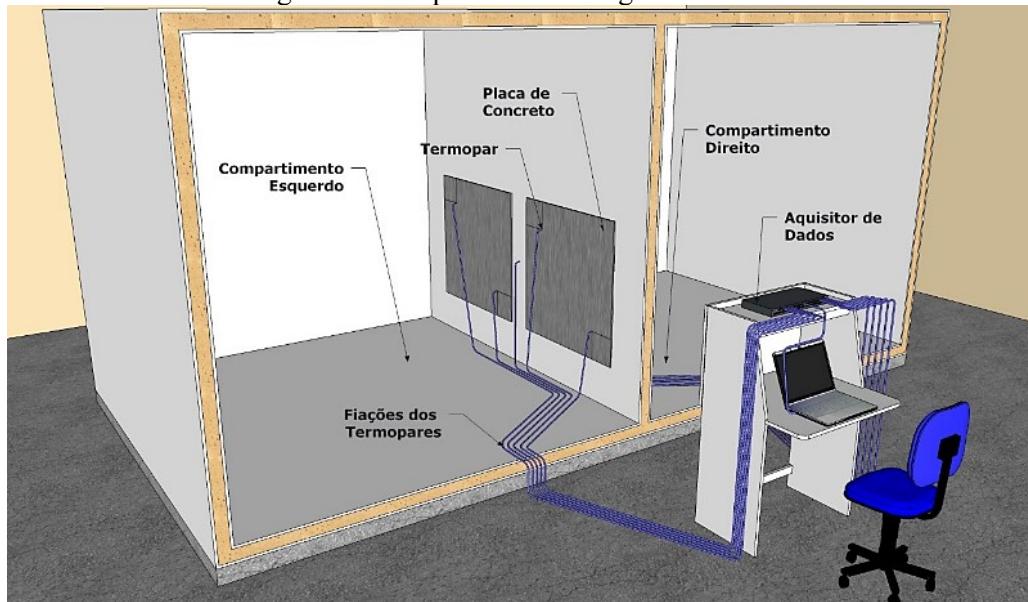
Fonte: Autora.

Para o controle e obtenção das temperaturas, utilizou-se um sistema de aquisição de dados, o aplicativo Catmam, configurado para gravar a média das temperaturas lidas nos últimos 30 segundos do intervalo de um minuto. Inicialmente, estabilizaram-se as duas câmaras na temperatura de 20 °C e umidade de 76%. Em seguida, desligou-se a câmara esquerda mantendo a umidade de 76%, mantendo-se ligada a câmara direita para aquecimento até atingir a temperatura de 40°C e 76% de umidade, por aproximadamente 24 horas.

O ensaio de desempenho térmico foi dividido em três etapas. Na primeira etapa com os dois compartimentos da câmara ligados para a estabilização na temperatura de 20°C. Na segunda etapa o compartimento direito mantido ligado até atingir a temperatura de 40°C e o compartimento esquerdo desligado e mantido fechado, com a fonte de calor proveniente dos painéis. Na terceira etapa os dois compartimentos da câmara foram desligados e mantidos fechados. Cada etapa teve um período de 24 horas para a estabilização das temperaturas entre os painéis e a câmara. A umidade relativa do ar no interior da câmara foi fixada em 76%, próximo da média do período de verão.

Na Figura 20 ilustra-se a montagem do ensaio, com os painéis entre as duas câmaras, os termopares nas duas faces e o computador com o aquisitor de dados.

Figura 20 – Esquema de montagem do ensaio



Fonte: Autora.

### **3.2.2 Procedimento de avaliação do desempenho térmico nos corpos de prova**

Para produzir o aquecimento de uma face do corpo de prova, utilizou-se a termoprensa Hidral Mac modelo PHHVB 100T. Fizeram-se ensaios de amostras de corpos cilíndricos de 100mm x 100mm (diâmetro x altura), extraídas de cada painel utilizado na pesquisa, sendo quatro amostras de concreto de referência e quatro amostras para cada teor de ar de 8%, 11% e 12%, ao todo foram dezesseis amostras. Essas amostras foram extraídas no canto inferior do painel, local onde realizaram-se as leituras dos termopares, conforme ilustra a Figura 21.

Após a extração, as amostras foram secas ao ar e acondicionadas em sacos plásticos até o momento do ensaio.

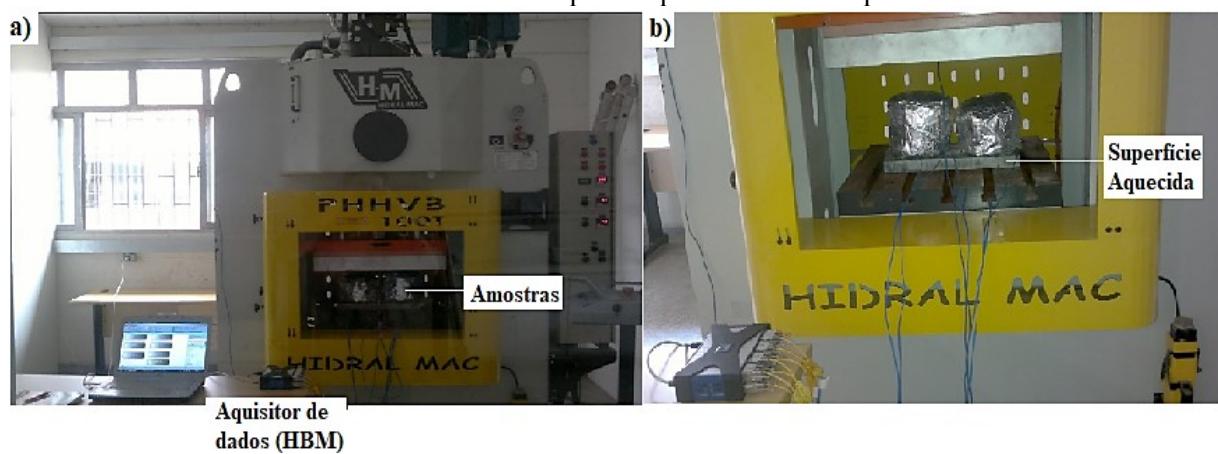
Figura 21 – Local da extração das amostras



Fonte: Autora.

Aplicou-se o seguinte procedimento: a extremidade inferior da amostra foi submetida a uma fonte de calor de 40°C na termopressa, em contato com a superfície metálica aquecida. Fixaram-se dois termopares, um termopar na extremidade inferior e um outro na extremidade superior da amostra, conforme sistema ilustrado na Figura 22.

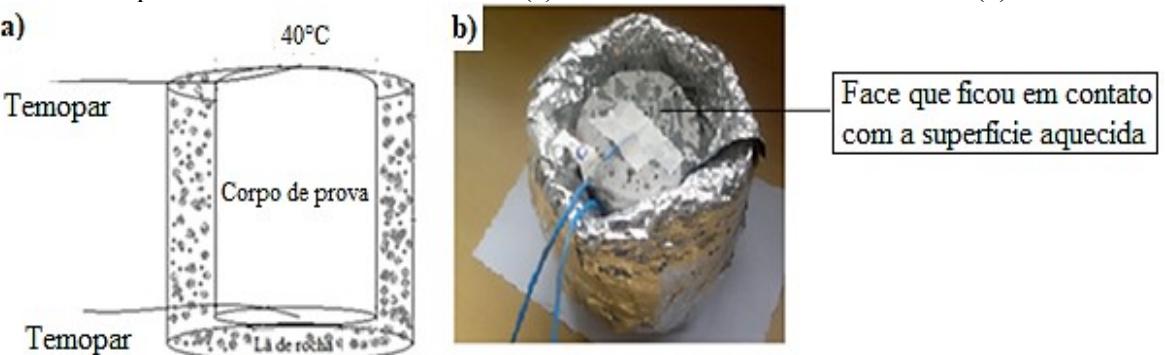
Figura 22 – a) Sistema utilizado para a avaliação do comportamento térmico e b) Corpos de prova isolados em contato com a placa aquecida na Termopressa



Fonte: Autora.

A amostra foi isolada com lã de rocha de modo que não ocorresse troca de calor com o ambiente, nem pelas laterais do corpo de prova nem pela superfície superior, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Esquema do isolamento da amostra (a) e Amostra isolada com lã de rocha (b)



Fonte: Autora.

As leituras das temperaturas foram obtidas pelo aquisitor de dados HBM com o aplicativo Catmam, considerando-se os últimos 30 segundos dos períodos registrados a cada minuto. O período total de cada ensaio foi de doze horas para cada amostra estudada. Nesse experimento analisou-se as alterações nas leituras das temperaturas dos termopares, inferior e superior, o qual pôde fornecer condições para se avaliar o desempenho térmico dos concretos.

### **3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA**

Conforme ABNT NBR 15220 – 2 :2005 a transmitância térmica é obtida pelo inverso da resistência térmica, que é a razão da espessura pela condutividade térmica. Para a determinação da transmitância térmica dos concretos em estudo, foi necessário a obtenção da condutividade térmica dos materiais estudados.

Para a determinação da condutividade térmica dos concretos utilizou-se o procedimento da norma técnica ASTM E1530 – 11 *Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique*, com o equipamento DTC-300 da TA instruments. O ensaio foi realizado na Universidade de São Paulo (USP) – Campus Pirassununga – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA-USP).

Os ensaios foram aplicados em amostras de corpo cilíndrico 50mm x 25mm (diâmetro x altura), extraídas de cada painel, sendo 4 amostras de concreto de referência e 4 amostras

para cada teor de ar (8%, 11% e 12%). Essas amostras foram extraídas no canto superior do painel, local onde realizaram-se as leituras dos termopares, conforme ilustra a Figura 24. Após a extração, as amostras foram secas ao ar e acondicionadas em sacos plásticos até o momento do ensaio.

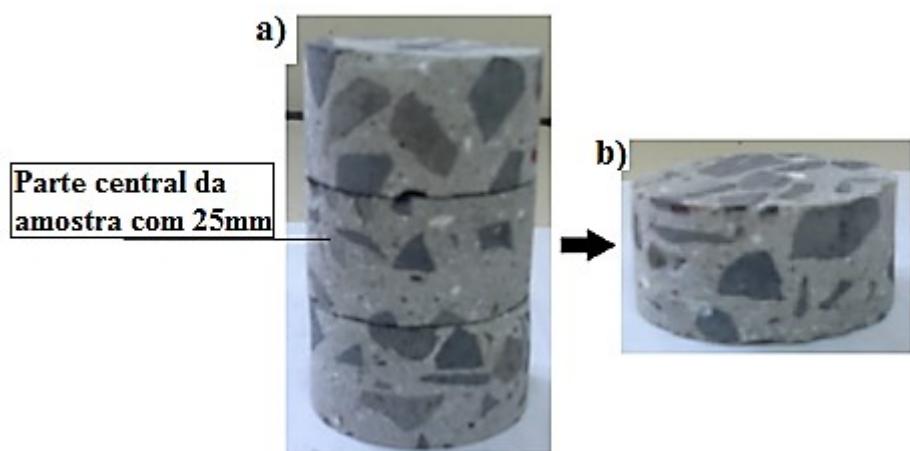
Figura 24 – Local da extração das amostras



Fonte: Autora.

As amostras foram cortadas para se obter a espessura de 25mm e garantir faces planas e paralelas. Utilizaram-se as amostras da parte central do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 25.

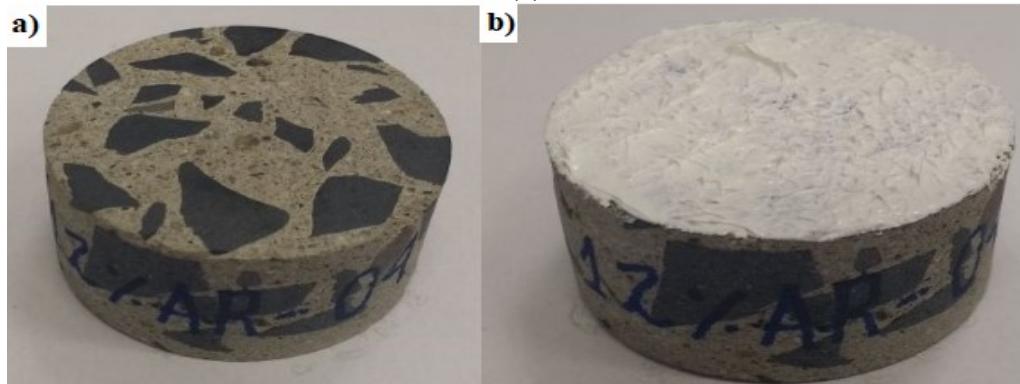
Figura 25 – Corpo de prova extraído do painel (a) e Amostra utilizada para o ensaio conforme ASTM E1530-11



Fonte: Autora.

No processo dos ensaios realizados, inicialmente prepararam-se as amostras com a aplicação de uma pasta de transdutor de fluxo de calor (Heat Flux Transducer – HFT) nas faces transversais dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de condutividade térmica dos concretos: (a) sem HFT e (b) com HFT



Fonte: Autora.

As amostras preparadas com transdutor de fluxo de calor (HFT) foram colocadas entre duas placas metálicas, superior e inferior, em diferentes temperaturas, a superior com 55°C e a inferior com 25°C, de forma a produzir um fluxo de calor com temperatura média de 40°C, como representado no esquema da Figura 27.

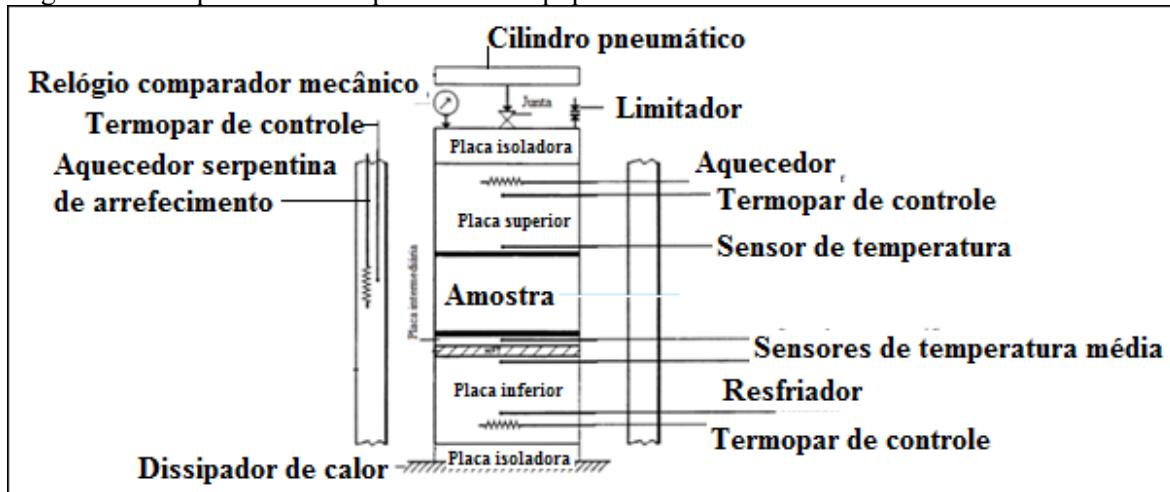
Figura 27 – Equipamento DTC 300 da TA instruments



Fonte: Autora.

O posicionamento e isolamento das faces, superior e inferior de cada amostra, no sistema do equipamento DTC – 300 (Figura 28), procedeu-se de forma criteriosa para minimizar a dissipação de calor em suas extremidades. A reprodutibilidade da resistência térmica nas áreas de contato das faces da amostra, entre as placas metálicas e a amostra é assegurada com a aplicação e manutenção de uma pressão de 0,28 MPa aplicada no cilindro pneumático do aparelho.

Figura 28 – Esquema dos componentes do equipamento usado no ensaio de condutividade térmica



Fonte: ASTM 1530: 2016, adaptado.

As temperaturas das superfícies que estão em contato com a amostra foram medidas por meio de termopares, já o calor foi medido por meio do transdutor HFT. Pela lei de Fourier, o calor medido é proporcional à resistência térmica da amostra nas interfaces com as placas metálicas do aparelho DTC 300. A proporcionalidade foi obtida por meio de uma calibração do sistema com amostras de condutibilidade térmica conhecida, realizada nas mesmas condições, para que a resistência nos contatos da superfície da amostra fosse reprodutível.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E ANÁLISES

#### 4.1 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Observa-se na Tabela 20 os resultados dos ensaios do concreto no estado fresco obtidos por Cintra (2015).

Tabela 20 – Resultados obtidos no estado fresco do concreto

TRAÇOS		ENSAIOS NO ESTADO FRESCO								
		Abatimento (mm)			Teor de ar (%)			Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		
		Valores	Média	Desvio Padrão	Valores	Média	Desvio Padrão	Valores	Média	Desvio Padrão
0,04% DE REFERÊNCIA	Concreto 1A	15	21	7	2,50	2,80	0,31	2478,74	2452,58	31,70
	Concreto 1B	15			3,20			2406,80		
	Concreto 1C	25			2,50			2485,28		
	Concreto 1D	30			3,00			2439,50		
0,04% DE ADITIVO	Concreto 2A	110	76	22	11,00	8,03	2,10	2269,46	2323,42	41,72
	Concreto 2B	80			9,00			2302,16		
	Concreto 2C	50			6,10			2380,64		
	Concreto 2D	65			6,00			2341,40		
0,08% DE ADITIVO	Concreto 3A	90	107,5	18	11,50	11,13	1,29	2223,68	2199,15	18,72
	Concreto 3B	90			9,00			2210,60		
	Concreto 3C	125			11,50			2184,43		
	Concreto 3D	125			12,50			2177,89		
0,12% DE ADITIVO	Concreto 4A	70	80	17	13,00	11,88	1,24	2184,43	2182,80	11,68
	Concreto 4B	110			13,00			2164,81		
	Concreto 4C	70			11,50			2184,43		
	Concreto 4D	70			10,00			2197,51		

Fonte: Cintra (2015).

O concreto de referência, sem aditivo incorporador de ar, apresentou o menor abatimento com 21,25 mm, isso ocorreu devido ao traço seco utilizado. Cintra (2015) optou por não usar aditivo plastificante nos concretos produzidos para que não houvesse interferência destes na incorporação de ar. Portanto, os abatimentos obtidos foram baixos, característicos de consistências mais ríjas. Observa-se que o traço com adição de 0,08% de aditivo incorporador de ar apresentou o maior abatimento médio de 107,5 mm, indicando ser o teor próximo do ótimo para a consistência. Entretanto, todos os concretos com aditivo incorporador de ar ficaram na faixa de abatimento médio igual a  $100 \pm 20$  mm. A partir de uma determinada concentração, cria-se uma camada monomolecular do incorporador de ar

e a tensão superficial da água decresce linearmente com o logaritmo da concentração; em uma terceira etapa após a saturação do incorporador de ar na solução aquosa, a tensão superficial permanece constante, independente da adição de mais aditivo (ROMANO, 2013).

Verifica-se na Tabela 20 que o teor de ar de 2,80% no traço de referência passou para 11,88% no traço com o teor máximo de aditivo recomendado pelo fabricante. Houve um acréscimo considerável do teor de ar no concreto utilizando o aditivo incorporador de ar.

O resultado da massa específica demonstrou que o incremento de aditivo e consequentemente de ar incorporado proporcionou um concreto com massa específica menor, sendo 2182,80 kg/m<sup>3</sup> para o concreto com 0,12 % de aditivo, portanto o concreto, com o máximo teor de ar desta pesquisa não é considerado leve, pois a massa específica ficou acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>.

## 4.2 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Observa-se na Tabela 21 os resultados dos ensaios no estado endurecido obtidos por Cintra (2015).

Tabela 21 – Resultados médios e desvios padrão das propriedades do concreto no estado endurecido

TRAÇOS		ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO						
		Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)				
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias			
REFERÊNCIA	Concreto 1A	38,00	33,86	46,63	40,46	38,70	39,19	43,50
		34,92		40,15		35,20		44,80
	Concreto 1B	35,15		41,92		49,40		40,00
		34,56		42,48		43,40		40,50
	Concreto 1C	32,47		41,55		39,30		37,00
		32,57		36,74		40,00		35,80
	Concreto 1D	32,46		38,90		34,40		32,00
		30,78		35,29		33,10		26,00
0,04% DE ADITIVO	Concreto 2A	16,56	21,89	22,58	25,77	25,10	28,93	30,50
		20,07		21,30		23,90		27,80
	Concreto 2B	24,87		29,21		32,50		32,50
		25,17		28,26		32,50		33,10
	Concreto 2C	20,01		26,57		29,10		45,50
		20,90		23,21		33,60		33,20
	Concreto 2D	24,75		27,37		29,00		32,30
		22,75		27,69		25,70		24,10

Tabela 22 – Resultados médios e desvios padrão das propriedades do concreto no estado endurecido  
(Continuação)

0,08% DE ADITIVO	Concreto 3A	19,66	19,18 (2,62)	20,89	22,28 (4,48)	31,80	27,11 (4,57)	32,60	32,75 (4,89)
		20,91		25,36		29,50		37,80	
	Concreto 3B	21,52		26,32		30,60		32,90	
		23,02		30,14		33,20		38,50	
	Concreto 3C	16,11		17,93		19,00		35,80	
		18,44		21,89		23,80		26,20	
	Concreto 3D	14,55		15,30		24,50		34,30	
		19,25		20,44		24,50		23,90	
0,12% DE ADITIVO	Concreto 4A	16,72	16,03 (1,88)	20,29	19,03 (4,27)	28,20	26,93 (4,96)	27,60	27,83 (3,48)
		17,34		20,77		25,50		31,30	
	Concreto 4B	15,31		17,00		29,70		25,60	
		15,25		15,73		33,80		32,70	
	Concreto 4C	12,70		15,52		15,40		24,30	
		14,64		12,73		26,50		32,30	
	Concreto 4D	16,93		24,56		29,10		24,70	
		19,35		25,66		27,20		24,10	

Fonte: Cintra (2015).

No ensaio de compressão observou-se uma diminuição da resistência com a utilização do aditivo incorporador de ar, o que já era previsto devido ao incremento do teor de ar no concreto e, segundo Da Rosa (2013), concretos com grande quantidade de ar incorporado tendem a ser menos resistentes e mais deformáveis. Mehta e Monteiro (2014) mencionam que um dos fatores que exerce influência na resistência do concreto é a quantidade de vazios presentes na matriz de cimento, a utilização de aditivos incorporadores de ar pode levar a uma significativa redução na resistência do material.

Os concretos com adição de 0,12% de aditivo apresentaram a resistência a compressão inferior a 20 MPa e não podem ser considerados concretos estruturais, segundo ABNT NBR 8953:2015. Caso sejam utilizados, devem ter seu desempenho atendido conforme ABNT NBR 6118 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) e ABNT NBR 12655 (Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento)

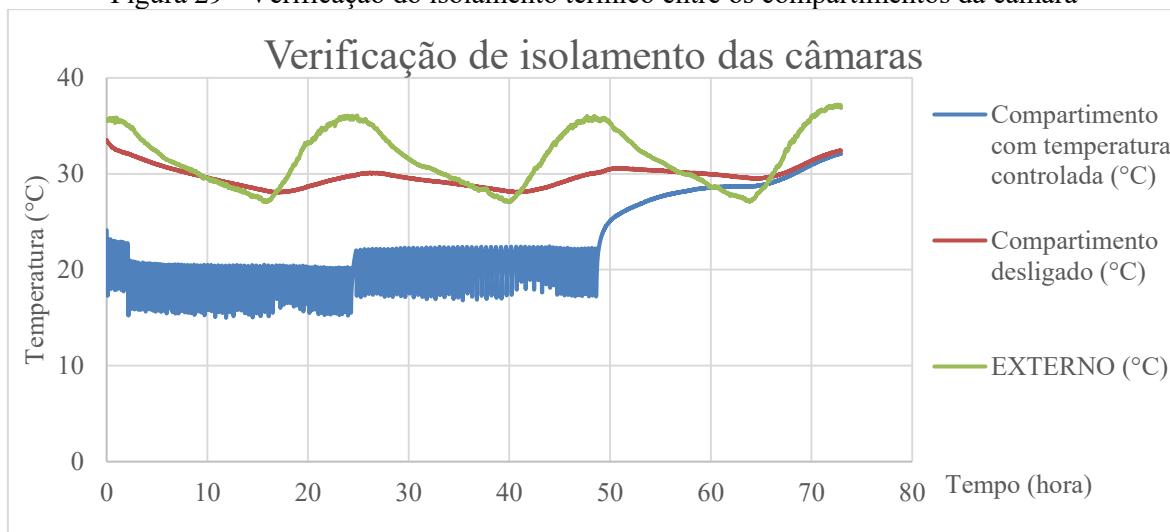
Aos 28 dias a resistência do concreto de referência foi 40,45 MPa, enquanto que os traços com 0,04 %, 0,08 % e 0,12 % de aditivo apresentaram resistência de 63,69 %, 55,07 % e 47,03 % respectivamente, em relação ao concreto de referência.

### 4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO DOS PAINÉIS NA CÂMARA CLIMATIZADA

A câmara utilizada nos ensaios é programável com variação térmica de 5°C a 40°C e variação de umidade de 30% a 98%. As temperaturas e umidades foram medidas por sensores, no interior da câmara e também com termopares e Datalogger. Durante os ensaios foram observados no interior da câmara oscilações de temperaturas e umidades, até que as mesmas se estabilizassem em valores próximos aos fixados no estudo, temperatura de 20°C, temperatura de 40°C e umidade 76%. Todos os resultados apresentados a seguir são valores médios dos ensaios das quatro amostras (painéis) de cada concreto.

O ensaio de verificação do isolamento térmico entre os compartimentos da câmara está ilustrado no gráfico da Figura 29. Verifica-se que o compartimento com temperatura controlada apresentou temperatura média de 21,5°C. A temperatura do compartimento desligado variou de 28°C a 34°C. Conforme pode ser observado, o compartimento desligado não teve influência do compartimento com temperatura controlada, levando à conclusão de bom isolamento entre os compartimentos e que a troca de calor se dará realmente através dos painéis em estudo. No entanto, as variações de temperatura do compartimento desligado acompanham as oscilações das temperaturas do ambiente externo à câmara, embora com magnitude muito inferior.

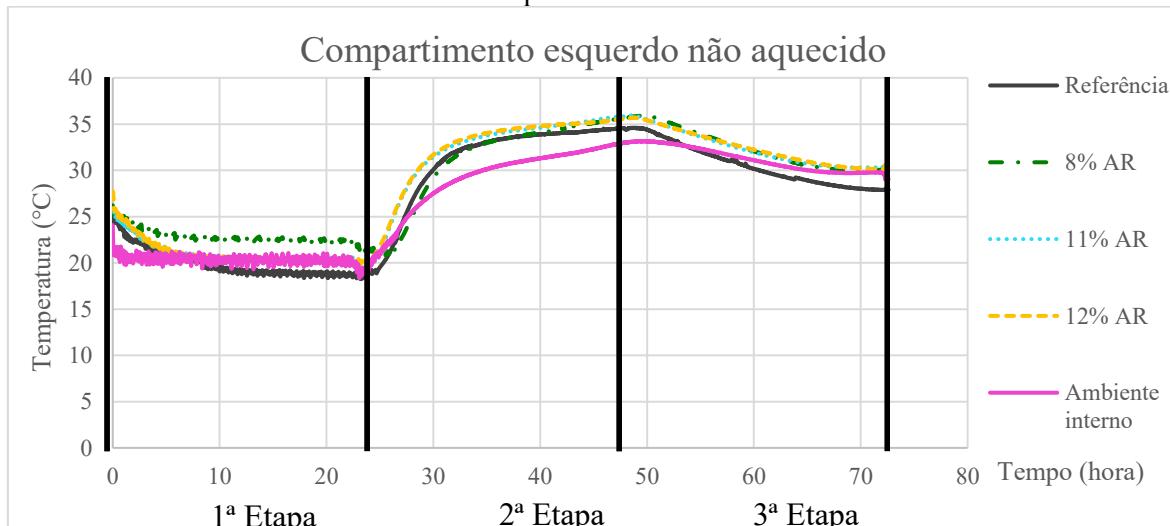
Figura 29 - Verificação do isolamento térmico entre os compartimentos da câmara



Fonte: Autora.

No gráfico da Figura 30 são apresentadas as temperaturas médias de todos os ensaios no compartimento esquerdo não aquecido, em todas as etapas a saber, ambiente interno da câmara e nos termopares fixados nas faces dos painéis de concreto (referência, 8%, 11% e 12%). Observa-se que a taxa de variação de temperatura do concreto de referência difere no resfriamento e no aquecimento.

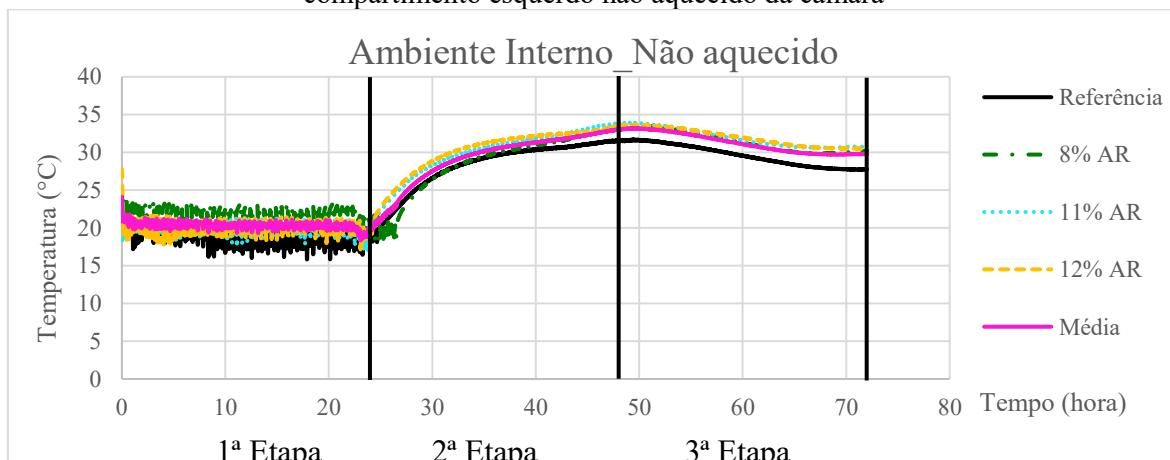
Figura 30 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara



Fonte: Autora.

No gráfico da Figura 31 são apresentadas a temperatura média do ambiente interno de todos os ensaios e temperatura do ambiente interno para cada ensaio dos concretos em estudo (referência, 8%, 11% e 12%) no compartimento esquerdo não aquecido. Nota-se que a temperatura média dos ensaios com o concreto de referência foi mais baixa do que os demais.

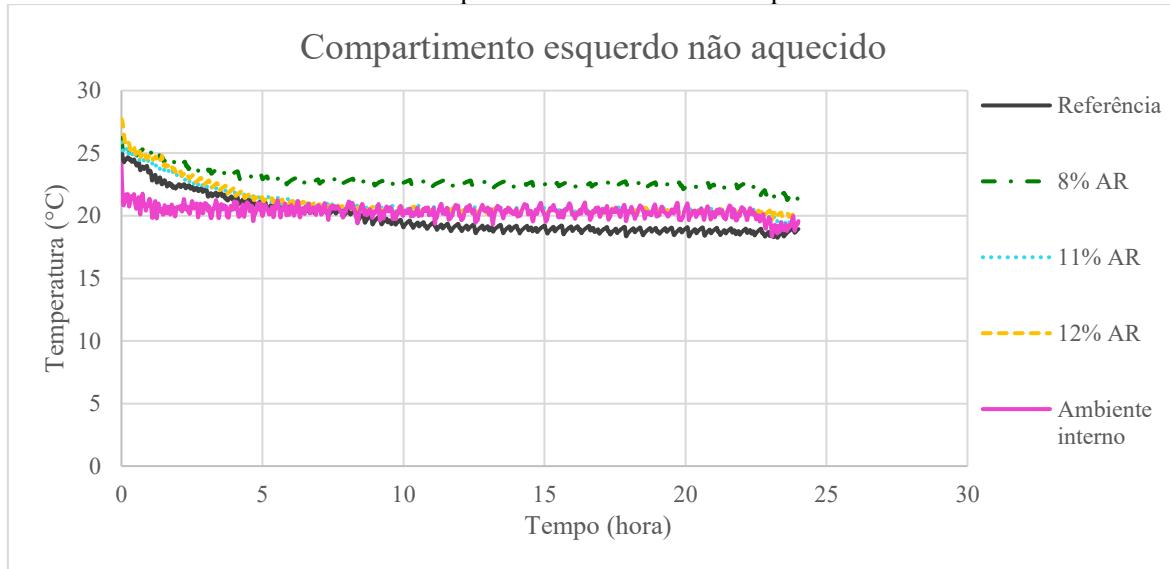
Figura 31 – Variação de temperatura média do ambiente interno para cada ensaio dos concretos no compartimento esquerdo não aquecido da câmara



Fonte: Autora.

A primeira etapa consiste nos dois compartimentos da câmara ligados na temperatura de 20°C. O gráfico da Figura 32 apresenta as variações de temperaturas ocorridas nesta etapa, no intervalo de 0 a 24 horas. Verifica-se que a estabilização próxima de 20°C ocorreu próximo a 5,5 horas.

Figura 32 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara – 1<sup>a</sup> Etapa

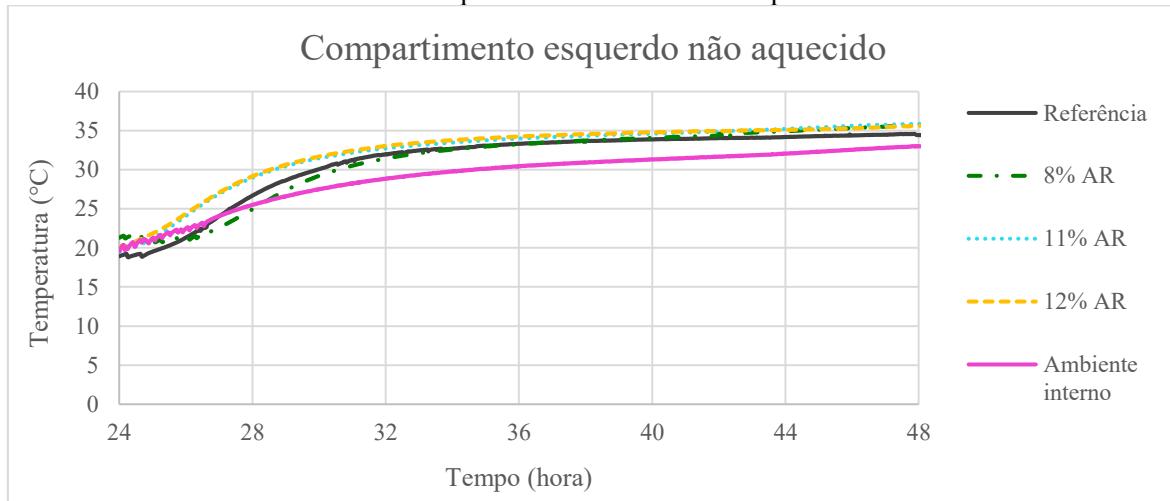


Fonte: Autora.

É possível observar na Figura 32 que a temperatura média do ambiente interno da câmara foi de 20°C, a temperatura média do concreto de referência de 18,9°C, a temperatura média do concreto com teor de ar 8% com 22,6°C, a temperatura média do concreto com teor de ar de 11% com 20,5°C e a temperatura média do concreto com teor de ar de 12% com 20,4°C.

Na segunda etapa de estabilização das temperaturas, o compartimento direito foi aquecido e mantido ligado a temperatura de 40°C e o compartimento esquerdo não aquecido é desligado e mantido fechado. O gráfico da Figura 33 apresenta as variações de temperatura ocorridas no compartimento esquerdo não aquecido da câmara.

Figura 33 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara – 2<sup>a</sup> Etapa

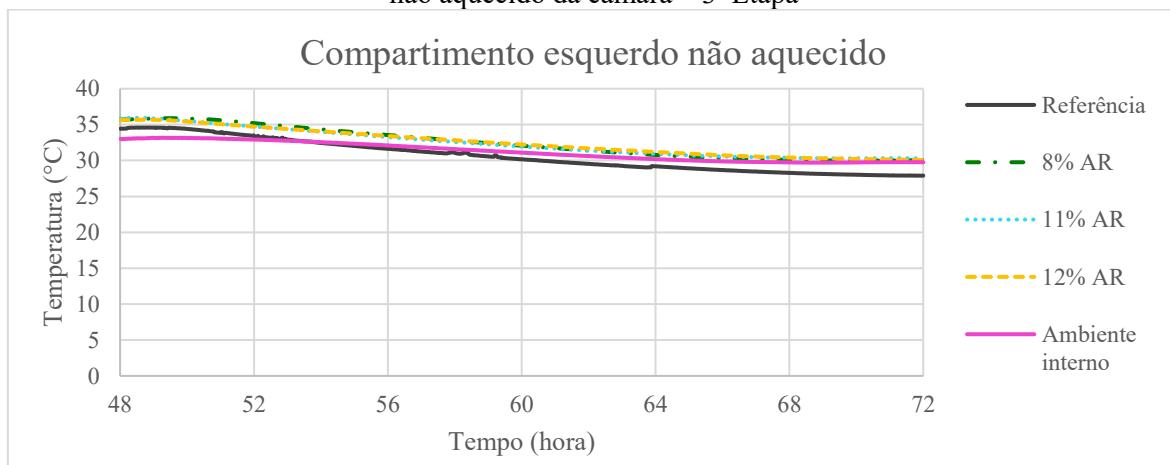


Fonte: Autora.

Observa-se que a temperatura máxima dos concretos em estudo, ficou próxima a 35°C e não apresentaram uma variação de temperatura expressiva entre eles, ao final da 2<sup>a</sup> etapa. O concreto de referência teve a menor temperatura de 34,2°C, o concreto com teor de ar 8% com 35,8°C, o concreto com teor de 11% com 35,2°C e o concreto com teor de ar 12% com 35,1°C. Tem-se uma variação de 1,6°C do concreto de referência para o concreto com teor de ar de 8%, 1,0°C para o concreto com teor de ar de 11% de 0,9°C para o concreto com teor de ar de 12%.

Na terceira etapa de estabilização das temperaturas, os dois compartimentos da câmara foram desligados e mantidos fechados, o gráfico ilustrado na Figura 34 apresenta as temperaturas do compartimento esquerdo não aquecido da câmara.

Figura 34 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento esquerdo não aquecido da câmara – 3<sup>a</sup> Etapa



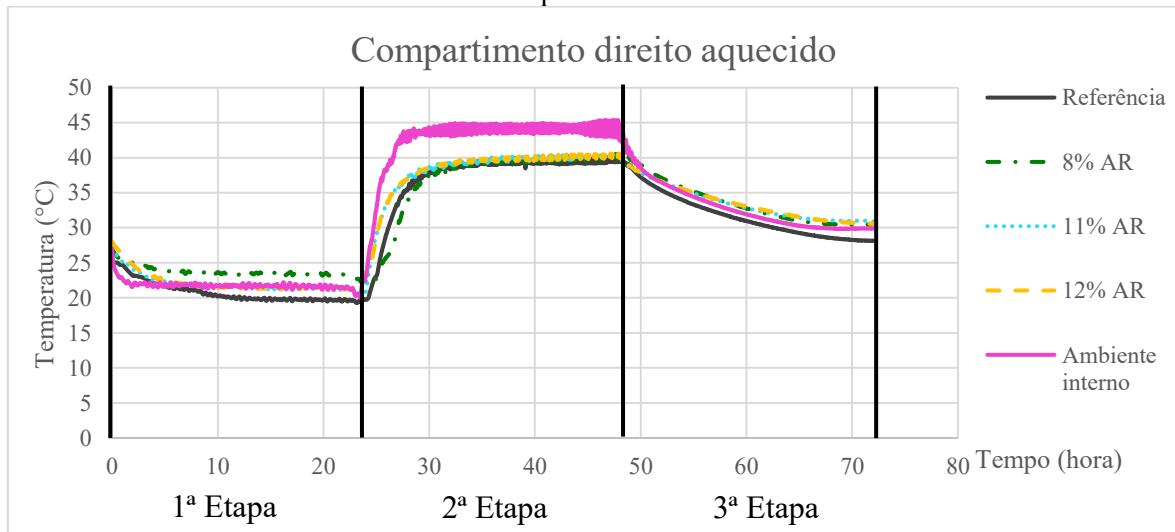
Fonte: Autora.

Observa-se no gráfico da Figura 34 que o concreto de referência atingiu 27,93°C ao final da etapa, o concreto com teor de ar 12% estabilizou-se com a maior temperatura de 30,53°C comparado com os concretos com 11% e 8% que se estabilizaram com a temperatura de 30,35°C e 30,49°C, respectivamente. Considerando as variações das temperaturas de estabilização nos termopares, na terceira etapa, verifica-se que as diferenças entre elas ficaram pequenas, e praticamente se estabilizaram num mesmo intervalo de tempo, e isso não é conclusivo para se definir o comportamento dos concretos com ar incorporado nas condições propostas nessa etapa.

A temperatura interna do ambiente ao final da etapa 3 na câmara esquerda não aquecida, durante os ensaios dos concretos foram: 25,8°C para o de referência, 27,4°C para o concreto com teor de ar 8%, 27,2°C para o concreto com teor de 11% e 27,4°C para o concreto com teor de ar 12%. Isso demonstra que a temperatura do concreto de referência ficou mais baixa, estando inclusive abaixo da temperatura média total do ambiente, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 31 e da Figura 34.

O gráfico na Figura 35 apresenta as temperaturas médias no compartimento direito aquecido da câmara em todas as etapas: no ambiente interno da câmara e as médias das temperaturas nos termopares colados nas faces dos painéis de concreto (referência, 8%, 11% e 12%).

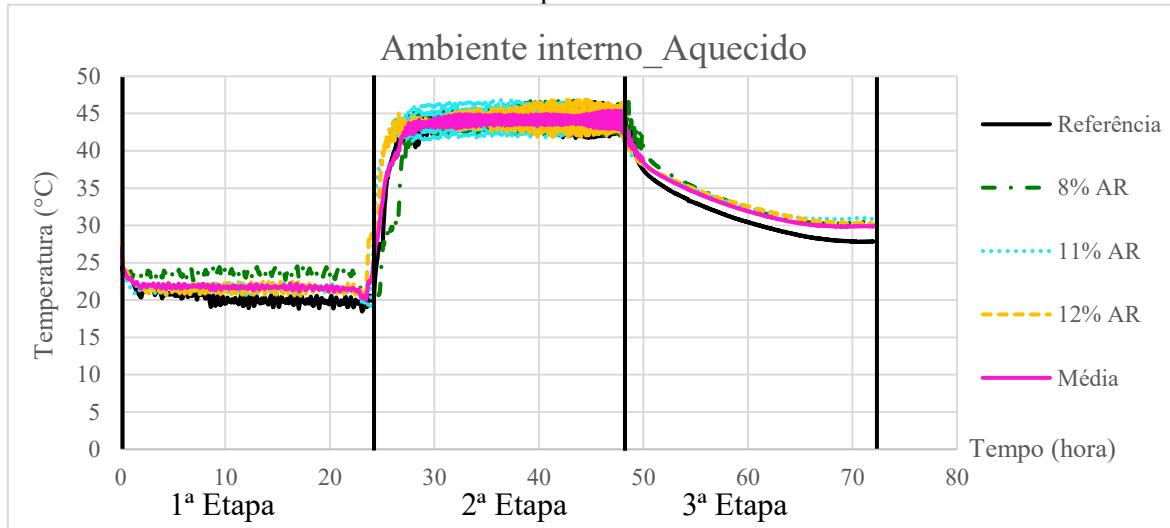
Figura 35 – Variação de temperatura média no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecido da câmara



Fonte: Autora.

No gráfico da Figura 36 são apresentadas a temperatura média do ambiente interno de todos os ensaios e temperatura do ambiente interno para cada ensaio dos concretos em estudo (referência, 8%, 11% e 12%) no compartimento direito aquecido da câmara.

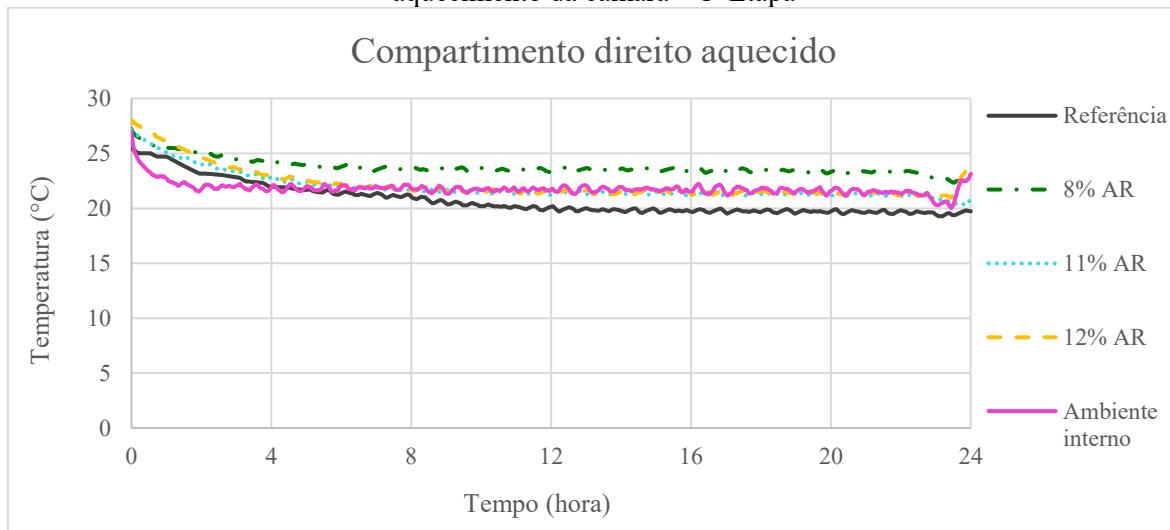
Figura 36 - Variação de temperatura média no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecido da câmara



Fonte: Autora.

Na Figura 37 são apresentadas as variações de temperatura na primeira etapa no compartimento direito aquecido, em que os dois compartimentos da câmara permanecem ligados com temperatura de 20°C.

Figura 37 – Variação de temperatura no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecimento da câmara – 1ª Etapa

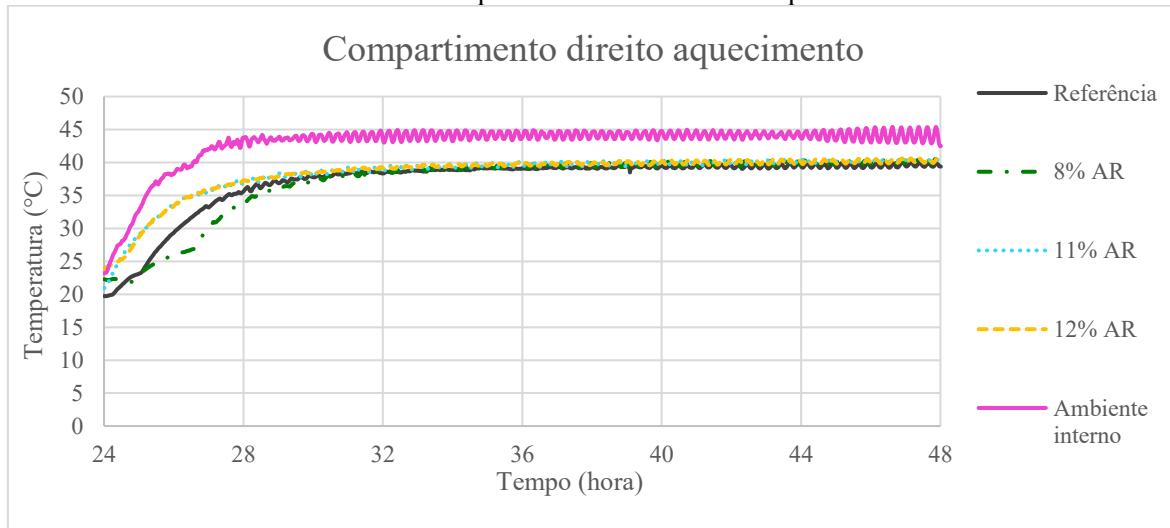


Fonte: Autora.

Foi determinada a temperatura média do ambiente interno igual a 21,98°C, temperatura média do concreto de referência de 19,8°C, temperatura média do concreto com o teor de ar 8% igual a 23,4°C, temperatura média do concreto com teor de ar 11% e 12% igual a 21°C. Nota-se que a temperatura do concreto de referência está abaixo da temperatura média do ambiente (Figura 37), quando se considera a média de todos os ensaios. No entanto, observa-se que a temperatura média do ambiente no ensaio do concreto de referência foi mais baixa do que a média dos demais concretos (Figura 36), o que explica a menor temperatura do concreto de referência.

O gráfico ilustrado na Figura 38 apresenta a variação das temperaturas no compartimento direito aquecido na segunda etapa. O compartimento direito aquecido permaneceu ligado para manter a temperatura a 40°C, e o compartimento esquerdo não aquecido foi desligado e mantido fechado.

Figura 38 – Variação de temperatura média no ambiente e face dos painéis no compartimento direito aquecido da câmara – 2<sup>a</sup> Etapa

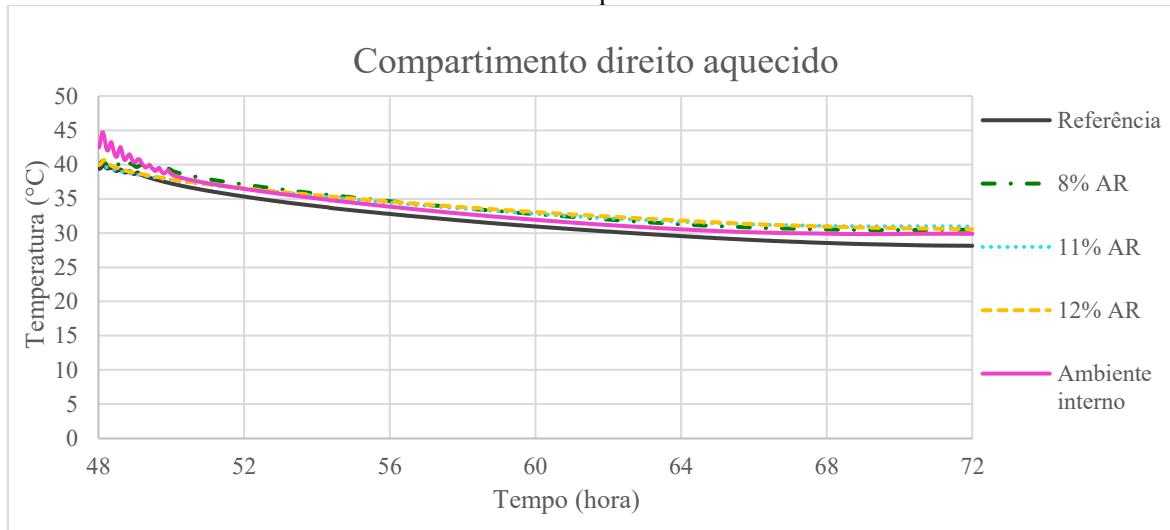


Fonte: Autora.

Nessa segunda etapa, observa-se que os concretos em estudo, tiveram suas temperaturas médias próximas à 40°C, e não tiveram uma variação expressiva entre eles. O concreto de referência com 39,1°C, o concreto com teor de ar 8% com 39,8°C, o concreto com teor de ar 11% com 39,5°C e o concreto com teor de ar 12% com 39,8°C. Verificou-se que a temperatura do ambiente do compartimento direito aquecido da câmara estabilizou-se em 42°C na média de todos os ensaios.

Na terceira etapa de estabilização das temperaturas com os dois compartimentos da câmara desligados e mantidos fechados, o gráfico para o compartimento direito aquecido da câmara está ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Variação de temperatura média da câmara no compartimento direito aquecido – 3<sup>a</sup> Etapa



Fonte: Autora.

As temperaturas das amostras ao final da terceira etapa no compartimento direito aquecido foram: 31,1°C para o concreto de referência, 32,9°C para o concreto com teor de ar 8%, 32,8°C para o concreto com teor de ar 11% e 32,9°C para o concreto com teor de ar 12%. Portanto, as temperaturas médias não apresentaram variações significativas entre os concretos estudados.

As diferenças das temperaturas nos painéis dos concretos, entre o compartimento direito aquecido e o compartimento esquerdo não aquecido da câmara, na segunda etapa (depois de 48 horas) estão expressos na Tabela 23. Observou-se que o concreto de referência teve a maior diferença de temperatura comparando-se com os outros concretos. Verifica-se que os valores das temperaturas dos concretos com ar incorporado, no compartimento esquerdo não aquecido da câmara, ficaram maiores do que as do concreto de referência, porém os concretos com ar incorporado tiveram um ganho menor de temperatura entre o final da primeira etapa (depois de 24 horas) e o final da segunda etapa (depois de 48 horas) conforme apresentado na Tabela 24.

Tabela 23 – Diferenças entre temperaturas máximas atingidas entre os compartimentos aquecido e não aquecido

<b>Concreto</b>	<b>Compartimento direito aquecido 2<sup>a</sup> Etapa</b>	<b>Compartimento esquerdo não aquecido 2<sup>a</sup> Etapa</b>	<b>Delta (°C)</b>
	<b>Temperatura após 48 horas (°C)</b>	<b>Temperatura após 48 horas (°C)</b>	
Referência	39,1	34,2	4,9
8% AR	39,8	35,8	4,0
11% AR	39,5	35,2	4,3
12% AR	39,8	35,1	4,7

Fonte: Autora.

Tabela 24 – Ganho de temperatura dos concretos em estudo no compartimento esquerdo não aquecido

<b>Concreto</b>	<b>Compartimento esquerdo não aquecido</b>		
	<b>Temperatura máxima 1<sup>a</sup> etapa (°C)</b>	<b>Temperatura máxima 2<sup>a</sup> etapa (°C)</b>	<b>Ganho de temperatura (°C)</b>
Referência	18,9	34,2	15,3
8% AR	22,6	35,8	13,2
11% AR	20,5	35,2	14,7
12% AR	20,4	35,1	14,7

Fonte: Autora.

Compararam-se os valores das temperaturas obtidas com os parâmetros da Tabela 13 do critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão da ABNT NBR 15.575-4:2013. Considerou-se a temperatura do termopar no ambiente interno do compartimento direito aquecido da câmara como a temperatura de verão do ambiente externo de uma edificação, e a temperatura do termopar no ambiente interno do compartimento esquerdo não aquecido da câmara como a temperatura ambiente interna de uma edificação, conforme a norma ABNT NBR 15.575-4:2013. As respectivas temperaturas obtidas nos ensaios estão na Tabela 25. Avalia-se que todos os concretos tiveram a temperatura interna menor do que a temperatura externa, o que atende ao especificado pela ABNT NBR 15.575-4:2013.

Tabela 25 – Comparação de temperaturas consideradas internas e externas de uma edificação

Temperaturas 2ª Etapa (48 horas) <b>termopares</b> no ambiente Interno dos compartimentos da câmara		
<b>Concreto</b>	<b>Compartimento direito aquecido</b>	<b>Compartimento esquerdo não aquecido</b>
	Temperatura ambiente externo °C	Temperatura ambiente interno °C
Referência	42,5	28,1
8% AR	41,9	28,4
11% AR	43,4	29,8
12% AR	43,5	30,1

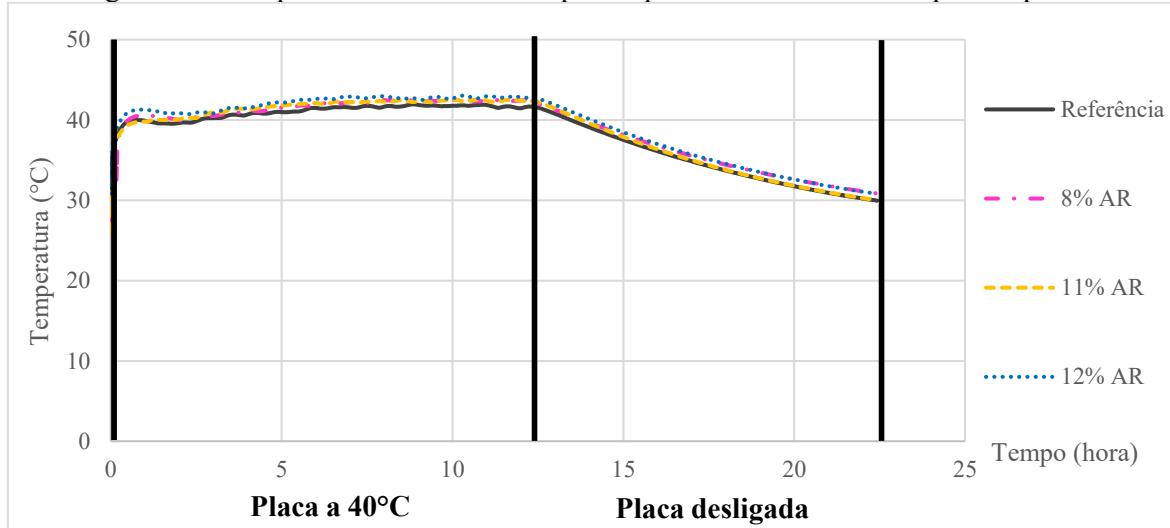
Fonte: Autora.

Os ensaios realizados apresentaram resultados de desempenho térmico com valores muito próximos para todos os concretos estudados. Acredita-se que esse resultado se deve à semelhança entre os concretos estudados, pois ambos possuem massas específicas próximas, com variações de até 11%, e acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>, considerados como concretos normais segundo a ABNT NBR 8953:2015. Os teores de ar obtidos nos concretos foram baixos para se conseguir uma mudança significativa em seus desempenhos térmicos. Como observado por Dantas (2003) e Angelim (2014) os valores da condutividade térmica são diretamente influenciados pelos valores da massa específica do concreto, e Sacht (2008) constatou que pequena variação da massa específica do concreto, pouco influenciou nos resultados de desempenho térmico.

#### 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHOS TÉRMICOS NOS CORPOS DE PROVA

Durante os ensaios houve um intervalo de tempo necessário para estabilização da temperatura da placa quente da termoprensa, fixada em 40°C. A temperatura média na placa aquecida obtida nos ensaios foi de 41,2°C. As temperaturas médias das bases inferiores dos corpos de prova em contato com a placa aquecida foram de 41,7°C no concreto de referência, 42,4°C para o concreto com teor de ar de 8%, 42,3°C para o concreto com teor de ar de 11% e 42,7°C no concreto com teor de ar 12%, conforme apresentado na Figura 40.

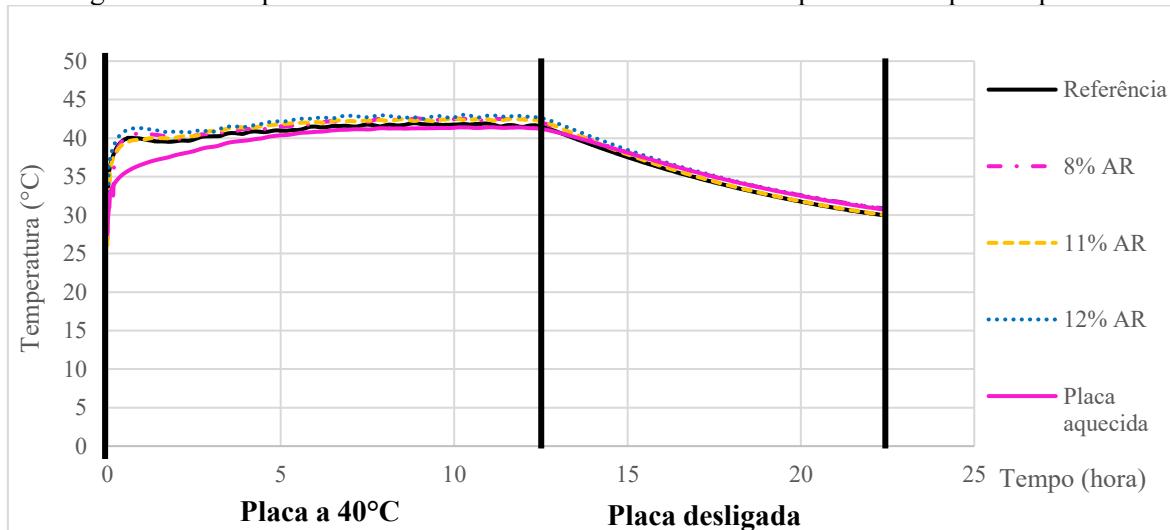
Figura 40 – Temperatura da base dos corpos de prova em contato com a placa aquecida



Fonte: Autora.

Observou-se que a temperatura média da placa aquecida ficou abaixo das temperaturas médias das faces dos corpos de prova em contato com a placa. Isto pode ser explicado pelo fato da termoprensa ligar e desligar o sistema de aquecimento para manter a temperatura alvo de 40°C. No entanto, quando o sistema atinge temperatura acima de 40°C, este é desligado automaticamente para retornar à temperatura alvo, e ligado quando a temperatura atinge valores mais baixos. A inércia térmica da placa metálica aquecida é menor do que a inércia térmica dos corpos de prova. Portanto, quando a sistema cai a temperatura e religa para aquecimento, esta variação é mais expressiva na placa de aquecimento do que nos corpos de prova, que mantém a temperatura elevada com menor variação, conforme pode ser visto na Figura 41.

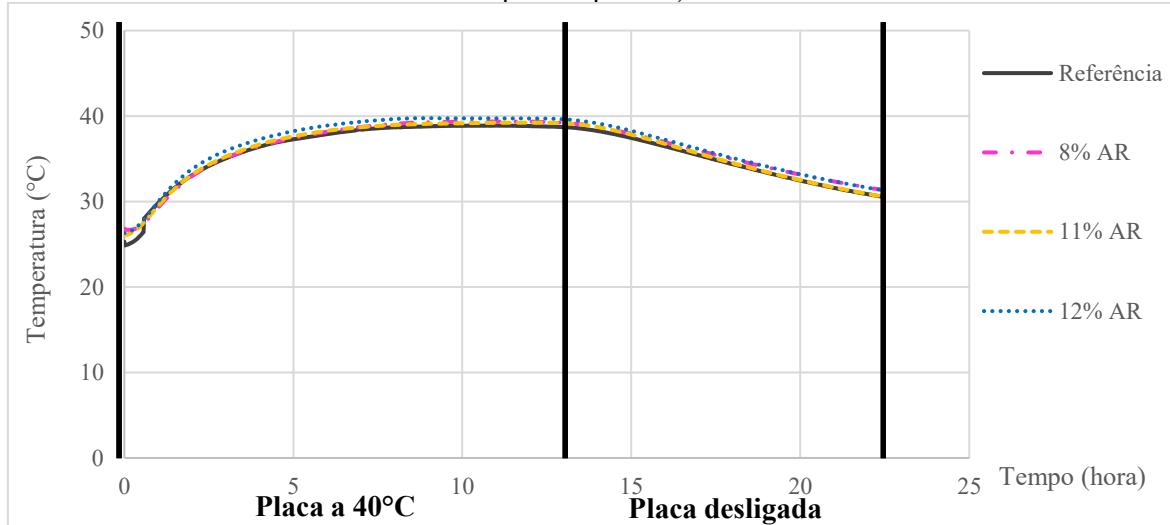
Figura 41 – Temperaturas na base inferior dos concretos e temperaturas na placa aquecida



Fonte: Autora

Os valores das temperaturas médias nos topos isolados, no início dos ensaios, foram: 25,31°C para o concreto de referência, 26,79°C para o concreto com teor de 8%, 26,08°C para o concreto com teor 11% e 26,31°C para o concreto com teor de 12%. Os valores das temperaturas médias nos topos isolados se estabilizaram em: 38,8°C para o concreto de referência, 39,5°C para o concreto com teor de ar de 8%, 39,1°C no concreto com teor de ar de 11% e 39,6°C no concreto com teor de ar de 12%, conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Temperaturas dos topos isolados dos corpos de prova (faces superiores afastadas da placa aquecida)



Fonte: Autora.

As diferenças das temperaturas dos corpos de prova no topo isolado e base inferior em contato com a placa aquecida ficaram próximas de 3,0°C conforme apresentadas na Tabela 26. Observa-se que os concretos com teores de ar de 11% e 12% tiveram diferenças de temperaturas maiores, e comparando-se com as outras amostras eles tiveram um melhor desempenho térmico.

Tabela 26 – Diferença de temperatura na base inferior em contato com a placa aquecida e topo isolado

Concreto	Corpos de prova ensaio termoprensa		
	Temperatura base inferior em contato	Temperatura topo isolado	Delta (°C)
Referência	41,7	38,8	2,9
8% AR	42,4	39,5	2,9
11% AR	42,3	39,1	3,2
12% AR	42,7	39,6	3,1

Fonte: Autora.

Compararam-se os métodos de ensaios realizados com os painéis na câmara climatizada e com os corpos de prova na termoprensa. As amostras aplicadas nos ensaios na termoprensa foram extraídas nos mesmos pontos dos termopares dos painéis de concretos em estudo. Verificou-se que os valores das diferenças de temperaturas nos painéis foram maiores do que nos corpos de prova conforme apresentado na Tabela 23 e Tabela 26. No entanto, os resultados obtidos em ambos os métodos de ensaio permitiram conclusões idênticas, ou seja, que não há diferenças significativas entre os concretos estudados quanto ao comportamento térmico. Portanto, acredita-se que o sistema utilizado nos corpos de prova pode ser usado para avaliar comparativamente diferentes concretos quanto ao comportamento térmico. Todavia, ressalta-se que o sistema de câmara climatizada se aproxima melhor dos ambientes externo e interno de uma edificação.

#### **4.5 RESULTADOS DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA**

Os valores médios da condutividade térmica dos concretos em estudo são apresentados na Tabela 27. Constatou-se que a condutividade térmica dos concretos com ar incorporado foi menor que a condutividade térmica do concreto de referência.

Tabela 27 – Resultados da condutividade térmica dos concretos

<b>Traços</b>	<b>Condutividade Térmica (W/m.K) T=40°C</b>	
	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Referência	0,966	0,28
Concreto com 8% de AR	0,956	0,18
Concreto com 11% de AR	0,955	0,16
Concreto com 12% de AR	0,910	0,18

Fonte: Autora.

Com os valores da condutividade térmica e espessura dos painéis de concreto em estudo, aplicou-se a Equação 2 para obter a resistência térmica de superfície a superfície, que corresponde a resistência térmica da parede. Aplicou-se a Equação 4 com a soma dos valores da resistência térmica da parede, resistências superficiais externa e interna, com os valores de 0,04 e 0,17 (Tabela 5), respectivamente, conforme ABNT NBR 15220: 2005. Obtiveram-se os resultados da transmitância térmica com a Equação 5 dos concretos em estudo, conforme apresentado na Tabela 28. As massas específicas no estado endurecido dos

concretos em estudo apresentaram valores muito próximos às massas específicas no estado fresco.

Tabela 28 – Valores da resistência e transmitância dos concretos estudados

Traços	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	Espessura (m)	$R_t$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_T$ (m <sup>2</sup> .K/W)	U (W/m <sup>2</sup> .K)
Referência	2452,58	0,966	0,10	0,10351967	0,31351967	3,18959255
8% de AR	2323,42	0,956	0,10	0,10460251	0,31460251	3,17861418
11% de AR	2199,15	0,955	0,10	0,10471204	0,31471204	3,17750790
12% de AR	2182,80	0,910	0,10	0,10989011	0,31989011	3,12607351

Fonte: Autora.

Os valores da transmitância térmica obtidos atendem aos requisitos das Tabelas 10 e 11 da norma ABNT NBR 15.220:2005 e ABNT NBR 15.575-4:2013 respectivamente. Esses valores estão de acordo com as especificações para uma absorção ( $\alpha$ )  $\leq 0,6$  e zonas bioclimáticas de 3 a 8. Todavia, para uma absorção ( $\alpha$ )  $> 0,6$  os valores obtidos não atendem às normas.

Para as zonas bioclimáticas 1 e 2, a espessura mínima necessária da parede de concreto para atender aos requisitos da ABNT NBR 15.575-4:2013 seria de 17,3 cm para o concreto com teor de ar de 12%.

Os valores médios obtidos da condutividade térmica e da transmitância térmica dos concretos estudados ficaram muito próximos. Avalia-se que essa ocorrência foi em função dos concretos estudados, pois possuem massas específicas próximas e a variação do teor de ar foi pequena, semelhante aos ensaios de desempenho térmico, o que não provocou uma variação significativa nos resultados.

#### 4.6 CÁLCULO DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Realizou-se a análise da variância para verificar se os resultados dos ensaios dos concretos estudados são estatisticamente diferentes entre si, quanto as propriedades físicas e térmicas determinadas. Efetuou-se essa análise para os resultados das propriedades físicas dos concretos no estado fresco e endurecido, para os resultados dos ensaios na câmara

climatizada, na termoprensa e da condutividade térmica, com erro de 5% conforme apresentado no Apêndice B.

Nos ensaios dos concretos no estado fresco, fez-se a análise da variância com os resultados médios do abatimento, do teor de ar e da massa específica de todos os concretos estudados. Posteriormente, fez-se comparação entre o concreto de referência e cada um dos concretos com diferentes teores de ar (8%, 11% e 12%).

Com a análise da variância para os ensaios no estado fresco, rejeitou-se a igualdade na comparação dos concretos com o concreto de referência. Na comparação entre os concretos com ar incorporado obteve-se resultados estatisticamente iguais para o ensaio de abatimento. Para o ensaio do teor de ar, os concretos com 8% e 12% apresentaram rejeição de igualdade entre si. Porém, tiveram respostas iguais estatisticamente ao teor de ar de 11%. No ensaio da massa específica a análise de variância indicou que os concretos não são iguais estatisticamente, mesmo com valores muito próximos entre si.

Nos ensaios dos concretos no estado endurecido, fez-se a análise da variância com os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade de todos os concretos estudados. Posteriormente, fez-se a comparação entre o concreto de referência e os concretos com diferentes teores de ar (8%, 11% e 12%).

Na análise da variância para os ensaios no estado endurecido obteve-se rejeição de igualdade entre todas as amostras na comparação dos concretos com diferentes teores de ar e o de referência. Quanto ao comparativo entre as amostras de concreto com ar incorporado, o resultado estatístico apresentou igualdade. No ensaio de módulo de elasticidade obteve-se respostas iguais estatisticamente na comparação de todos os concretos em estudo.

Nos ensaios com os painéis de concreto na câmara climatizada, fez-se a análise da variância com a diferença de temperatura das faces dos painéis de todos os concretos estudados e posteriormente comparou-se com o concreto referência cada concreto com diferentes teores de ar (8%, 11% e 12%).

Nos ensaios dos corpos de prova na termoprensa realizaram-se as análises da variância com as diferenças de temperaturas entre base inferior em contato com a placa aquecida e base superior isolada de cada amostra. Compararam-se também os resultados obtidos do concreto de referência com cada concreto com diferentes teores de ar (8%, 11% e 12%).

A análise da variância para os ensaios de condutividade térmica, foi aplicada primeiramente para os resultados obtidos de todos os concretos em estudo. Realizou-se outra análise comparando a condutividade térmica da amostra de referência com cada amostra com diferentes teores de ar.

O resultado final da análise da variância para os concretos em estudo (referência, 8%, 11% e 12% de teor de ar) indicou a igualdade entre todas as amostras dos concretos quanto a análise do comportamento térmico. Os concretos com aditivo incorporador de ar tiveram respostas iguais estatisticamente ao concreto de referência para todos os ensaios de comportamento térmico realizados.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 Conclusões

Conseguiu-se nesse trabalho realizar as pesquisas experimentais inicialmente propostas, sendo aplicados na câmara climatizada, termoprensa e método da condutividade térmica no aparelho DTC 300. As condições de realização dos ensaios permitiram a obtenção de parâmetros para análise do desempenho térmico do concreto com ar incorporado aplicado, por exemplo, em paredes.

Ao analisar os comportamentos térmicos dos concretos com até 12% de teor de ar, em temperaturas de verão, constatou-se que os resultados de desempenho térmico encontrados tiveram diferenças não significativas. Acredita-se que esses resultados se devem às semelhanças entre os concretos estudados, pois ambos possuem massas específicas próximas e acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>, considerados como concretos normais.

Quanto à condutividade térmica os concretos com ar incorporado apresentaram menores valores comparados ao concreto de referência, mas com diferença não significativa. No entanto, a condutividade térmica obtida para o concreto de referência foi muito abaixo daquela especificada pela ABNT NBR 15220: 2005 para concretos normais, que especifica 1,75 W/m.K, e o resultado obtido foi de 0,966 W/m.K, resultado semelhante a outros trabalhos.

Os valores determinados para a transmitância térmica dos concretos com diferentes proporções de ar incorporado atenderam aos requisitos das normas ABNT NBR 15.575:2013 e ABNT NBR 15.220:2005. Os resultados tiveram como referência a espessura usualmente usada nas construções de parede de concreto igual a 10 cm, desde que aplicados com superfície com absorção menor que 0,6 e nas zonas bioclimáticas 3 a 8. Para as zonas bioclimáticas 1 e 2, a espessura da parede deve ser acima de 17,3 cm, mesmo para o concreto com teor de ar de 12%.

Na comparação dos métodos de ensaios realizados com os painéis na câmara climatizada e os corpos de prova na termoprensa, ambos os sistemas permitem avaliar o comportamento térmico nos concretos em estudo, sobretudo quando se deseja fazer análise comparativa, neste caso, o ensaio com os corpos de prova é mais simples. No entanto, o ensaio com os painéis na câmara climatizada simula melhor o comportamento térmico do concreto aplicado em edificações, pois possui condições de se avaliar temperatura e umidades ambientes.

A análise de variância com resultados de abatimento dos concretos em estudo, referência, 8%, 11% e 12%, demonstra que a única amostra com diferença significativa dos demais é a referência. Para o ensaio do teor de ar os concretos com 8% e 12% tiveram respostas iguais estatisticamente ao teor de ar de 11%.

Observou-se igualdade estatística nos ensaios de resistência a compressão e no ensaio de módulo de elasticidade entre os concretos com aditivo incorporador de ar. Constatou-se que a quantidade de até 12% de ar incorporado, modifica as propriedades físicas do concreto em relação à referência, mas pequena variação dessa quantidade de ar incorporado não apresentou valores significativamente diferentes nas suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

Na análise de variância para os ensaios do comportamento térmico, o resultado para os concretos em estudo, referência, 8%, 11% e 12% de teor ar, indicou uma igualdade entre as amostras dos concretos. Os concretos com adição de aditivo incorporador de ar tiveram respostas quanto ao comportamento térmico próximas às do concreto de referência. Pode-se concluir que pequenas quantidades de ar incorporado, até 12%, não é suficiente para se ter uma melhora no desempenho térmico do concreto.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Devido à grande relevância da aplicação do concreto com ar incorporado, existe uma amplitude de assuntos que podem ser abordados em futuros trabalhos, entre eles: o desempenho térmico de concretos com proporções de ar incorporado que sejam maiores que os estudados neste trabalho, acima de 12%, com resistências acima de 20 MPa que atendam aos critérios da ABNT NBR 6118:2014 e dosagem de concretos com variação de proporção

de agregados para se obter melhores propriedades mecânicas. Pode-se fazer outras análises como a influência das espessuras dos painéis de concretos, e avaliar outras propriedades térmicas (capacidade térmica, difusividade térmica, calor específico) que influenciam o desempenho térmico.

Quanto aos ensaios para a avaliação da condutividade térmica, acredita-se que a quantidade de amostras para ser analisada deve ser maior. Considerando-se que as dimensões das amostras são pequenas, entende-se que maior amostragem representará melhor o concreto com os agregados, vazios e possíveis diferenças no adensamento, pois as amostras possuem características diferentes dentro de uma mesma placa, quanto a presença dos agregados e vazios.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – ABNT NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. NBR 15.575: Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. NBR 16.055: Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações - Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. NBR 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. NBR 12818: Concreto - Determinação da difusividade térmica. Rio de Janeiro: 2012.
- \_\_\_\_\_. NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete. Washington, 1995.
- \_\_\_\_\_. ACI Manual of Concrete Practice: Materials and General Properties of concrete – Part 1. Detroit – Michigan, 1980.
- Angelini, A. F. Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. Dissertação de mestrado. Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM.E1530 – 11: Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. West Conshohocken, 2016.
- \_\_\_\_\_. ASTM.C125 – 15b: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken, United States 2015.
- Alves, N. J. D. Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Distrito Federal, 2002.
- Barbar, J. S. Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados. Tese de doutorado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – SP, 2016.

BAUER, Luiz. Alfredo. Falcão. Materiais de Construção. Vol 1. 5<sup>a</sup>. Ed. Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos, 2013.471p.

Bezerra, L. A. C. Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo. Dissertação de mestrado. Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.

Carvalho, P. P. Desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social com paredes de concreto armado na zona bioclimática 2 brasileira. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, programa de pós-graduação em engenharia civil. Santa Maria, 2012.

Cintra, A. M. Estudo do desempenho térmico de concreto com ar incorporado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

Costa, E. B. C.; Antunes, R. P. N.; Pileggi, R. G.; Jonh, V. M. Avaliação do efeito da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. Coletânea de ativos Parede de concreto, 2013 – 2014.<<http://www.comunidadedaconstrucao.com.br/upload/ativos/342/anexo/relatoriop.pdf>>Acesso em 29 de abril de 2016.

Da Rosa, P. Concreto com ar incorporado: variação das propriedades mecânicas em função do tempo de mistura dos materiais. Dissertação. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

Daltin, D. Tensoativos: química, propriedades e aplicações. 1<sup>a</sup>. Ed. Blucher. São Paulo, Blucher, 2011. 59 p.

Dantas, F. A. S. Agregados leves e Concretos alternativos. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN 51046: Testing of ceramic materials: Determination of Thermal Conductivity up to 1600°C by the Hot-wire: Thermal conductivity up to 2W/mK. German, 1976.

França, A. F. Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas. Universidade Federal de Campinas. Campinas, 2007.

Frota, A. B. e Schiffer, S. R. Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

Gagliano, A.; Patania, F.; Nocera, F.; Signorello, C. Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings. Department of Industrial Engineering, University of Catania, Catania, Italy. Cement and Concrete Research, v.74, p. 361-370, 2014.

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: 20 de abril de 2016.

IBRACON. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Editor: Geraldo Isaia. Rio de Janeiro, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730: Moderate thermal environments -- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva, 2005.

Kim, H. K.; Jeon, J. H.; Lee, H. K. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. Department of Civil and Environmental Engineering, Korea, South Korea. Construction and Building Materials, v.29, p. 193-200, 2012.

Kosmatka, S. H.; Kerkhoff, B.; Paranaese, W. C. Desing and control of concrete mixtures. 14th ed. Skokie: PCA, 2008.

Lamberts, R. GHISI, E.; DE ABREU, A. L. P. Desempenho térmico de edificações: Conforto. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. Eletrobras/Procel, 3<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro, 2014.

Magalhães, R. M. Análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

Martins, J. C. (coord.) Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), Brasília, 2013.

Maricato, E. Boom Imobiliário: bom para quem? Revista do IDEC, v. 18, p. 9-11, 2014.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. 2014.

Najim, K. B.; Fadhil, O. T. Assessing and improving the thermal performance of reinforcedconcrete-based roofing systems in Iraq. College of Engineering, University of Anbar, University Campus, Ramadi, Iraq. Cement and Concrete Research, v.89, p. 213-221, 2015.

NEVILLE, Adam. M. Tecnologia do concreto. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2<sup>a</sup> Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Disponível em:  
<[http://www.uberlandia.mg.gov.br/uploads/cms\\_b\\_arquivos/1428.pdf](http://www.uberlandia.mg.gov.br/uploads/cms_b_arquivos/1428.pdf)> Acesso em: 20 de março de 2016.

Ribas, R. A. J. Método para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 2013.

Ribeiro, R. L. S. Ações devidas ao clima sobre os materiais de construção em regiões tropicais. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

Romano, R. C. O. Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil. Dissertação de doutorado em engenharia da construção civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2013.

Roriz, M. Conforto térmico e desempenho térmico de edificações. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, 2008.

Rixon, M. R.; Mailvaganam, N. P. Chemical admixtures for concrete. 3<sup>a</sup> Ed. London, E & FN Spon, 1999.  
<https://doi.org/10.4324/9780203017241>

Ruas, A. C. Avaliação de Conforto Térmico Contribuição à aplicação prática das normas internacionais. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campinas, Universidade de São Paulo, Campinas, 2001.

SEPLAN – SECRETARIA DE PLANEJAMENTO URBANO. Banco de Dados Integrados de Uberlândia - BID. Volume I Uberlândia, 2011.

Sacht, H. M. Painéis de vedação de concreto moldados in loco: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Signo, A. F. J. Concreto: a importância do concreto para o sistema construtivo paredes de concreto. Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

Silva, N. T. D. F. Incorporação de Materiais de Mudança de fase em Materiais de Construção. Dissertação de Mestrado. Universidade do Milho – Escola de Engenharia. Portugal, 2009.

Silva, S. Z. R. S. A percepção do usuário de habitação unifamiliar em relação ao sistema construtivo industrializado – avaliação do grau de satisfação. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SINAT - Diretriz para Avaliação Técnica de sistemas construtivos em paredes de concreto armado moldadas no local. Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos DIRETRIZ SINAT Nº 001 - Revisão 02 Brasília, 2011.

Stancato, A. C. Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000.

STRAHLER, Arthur Newell.; STRAHLER, Alan H. Geografia física. 3. ed. Barcelona: EdicionesOmega, 1989.

Torres, D. R.; Fujii, A. L.; Romano, R. C. O.; Pileggi, R. G. Impacto da rota de incorporação de ar nas propriedades de materiais formulados com cimento Portland. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 141-152, abr./jun. 2014.  
<https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000200010>

Vieira Junior, M.; Oliveira, J. F. G.; Coelho, R. T. Dureza de rebolos: conceitos estatísticos e dinâmicos e métodos de medição. Máquinas e Metais, São Paulo, v. 30, n. 351, p. 168-85, 1996.

Vieira, L. B. – Projeto de paredes de concreto armado: apresentação das recomendações normativas e avaliação da influência das aberturas. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

## APÊNDICE A

### TEMPERATURAS MÁXIMAS/MÍNIMAS E UMIDADE RELATIVA POR ESTADO DO BRASIL

Região Norte								
Estado	Capital	Ano	Mês	Umidade (%)	Temperatura (°C)			
					MAX	MIN		
Acre	Rio Branco	2014	Outubro	85,5	33,1	22,9		
			Novembro	85,1	32,2	23,1		
			Dezembro	87,5	31,4	22,8		
		2015	Janeiro	89,9	30,3	22,5		
			Fevereiro	90,4	30,6	22,7		
			Outubro	77	33,1	24,7		
Amazonas	Manaus	2014	Novembro	80,3	32,9	25,7		
			Dezembro	80,2	32,8	25,7		
			Janeiro	82,6	31,6	24,6		
		2015	Fevereiro	79,9	32,2	25		
			Outubro	69,5	34,3	24,6		
			Novembro	67,6	34,4	24,2		
Amapá	Macapá	2014	Dezembro	71,6	33,4	24,1		
			Janeiro	77,5	32,1	23,4		
			Fevereiro	84,2	31,1	23,2		
		2015	Outubro	78,8	33,2	22,6		
			Novembro	74,2	34,6	22,6		
			Dezembro	78,5	34	22,2		
Pará	Belém	2014	Janeiro	86,5	32,6	22		
			Fevereiro	87,9	32,3	22,1		
			Outubro	73,6	35,5	24,9		
		2015	Novembro	72	35,5	25,2		
			Dezembro	69,2	35	24,9		
			Janeiro	64,3	34,4	24,7		
Roraima	Boa Vista	2014	Fevereiro	59,4	35,9	25		
			Outubro	60	35,8	23,5		
			Novembro	74,2	33,4	22,8		
		2015	Dezembro	76,3	32,5	22,6		
			Janeiro	79,7	32,7	22,1		
			Fevereiro	79,7	32,1	22,1		
Maiores valores para a região Norte					Umidade (%)	Temperatura (°C)		
					90,4	35,9		

Continua

Região Nordeste						
Estado	Capital	Ano	Mês	Umidade (%)	Temperatura (°C)	
					MAX	MIN
Alagoas	Maceió	2014	Outubro	83,1	29,3	22
			Novembro	78,8	31,1	22,5
			Dezembro	77,2	31	22,3
		2015	Janeiro	77,8	31,4	22,8
			Fevereiro	82,4	31,1	23,1
			Outubro	78,7	28,9	22,6
Bahia	Salvador	2014	Novembro	81,7	29,4	23
			Dezembro	78,7	29,5	23,2
			Janeiro	78,7	30,3	23,6
		2015	Fevereiro	81,6	30,6	24
			Outubro	71,3	32,1	24,0
Ceará	Fortaleza	2014	Novembro	74,1	31,9	24,3
			Dezembro	74,1	31,7	24,6
			Janeiro	76	31,5	24,3
		2015	Fevereiro	79,2	31,5	24,5
			Outubro	76,2	25,2	-
Maranhão	São Luiz	2014	Novembro	76,2	33,3	-
			Dezembro	75,7	33	-
			Janeiro	76,8	32,5	-
		2015	Fevereiro	81,7	32	-
			Outubro	72,9	30,2	24,7
Paraíba	João Pessoa	2014	Novembro	71,1	30,4	25,3
			Dezembro	72,8	30,7	25,4
			Janeiro	72,3	30,8	25,3
		2015	Fevereiro	73,7	31,4	26
			Outubro	78	29,1	22,6
Pernambuco	Recife	2014	Novembro	73,3	30,5	22,5
			Dezembro	73,2	30,7	22,8
			Janeiro	71,3	30,9	22,7
		2015	Fevereiro	70,8	31,6	23,3
			Outubro	52,2	37,8	23,6
Piauí	Teresina	2014	Novembro	60,5	36,7	23,7
			Dezembro	63,8	35,6	24,2
			Janeiro	-	34,4	23,3
		2015	Fevereiro	79,8	32,5	23,3
			Outubro	80,4	29,4	23,5
Rio Grande do Norte	Natal	2014	Novembro	78,8	29,8	24,5
			Dezembro	79,1	30,1	24,9

					Continuação			
Estado	Capital	Ano	Mês	Umidade (%)	Temperatura (°C)			
					MAX	MIN		
Sergipe	Aracaju	2015	Janeiro	78,1	30,4	25		
			Fevereiro	79,9	30,7	25,3		
		2014	Outubro	76,9	30,2	23,3		
			Novembro	74,1	30,4	23,3		
			Dezembro	73,7	31,1	23,9		
	2015	Janeiro	-	71	31,2	24,5		
		Fevereiro	-	71,8	31,2	24,4		
		Maiores valores para a região Nordeste			Umidade (%)	Temperatura (°C)		
					83,1	37,8		
Região Sudeste								
Estado	Capital	Ano	Mês	Umidade (%)	Temperatura (°C)			
Espirito Santo	Vitória	2014	Outubro	75,8	28,2	20,6		
			Novembro	75,2	29	22,6		
		2015	Dezembro	72	31,2	23,6		
			Janeiro	-	33,2	25		
			Fevereiro	72,6	33	25,2		
	Belo Horizonte	2014	Outubro	49,5	29,3	17,2		
			Novembro	64	28,6	17,9		
		2015	Dezembro	61,6	28,9	19		
			Janeiro	53,5	31,3	21,3		
			Fevereiro	66	28,9	20,3		
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	2014	Outubro	68,7	28,9	21,1		
			Novembro	71	29,5	22,6		
		2015	Dezembro	67,9	32,8	24,5		
			Janeiro	65,5	34,6	26,1		
			Fevereiro	70,6	33,3	25,5		
	São Paulo	2014	Outubro	62,9	28,7	16,6		
			Novembro	73	27,1	17,8		
		2015	Dezembro	68,3	29,1	19,2		
			Janeiro	68,7	31,5	21,1		
			Fevereiro	74	29	19,9		
Maiores valores para a região Sudeste					Umidade (%)	Temperatura (°C)		
					75,8	34,6		

Continua

Região Sul						
Estado	Capital	Ano	Mês	Umidade (%)	Temperatura (°C)	
					MAX	MIN
Paraná	Curitiba	2014	Outubro	75,3	26	14,6
			Novembro	80	25,2	15,9
			Dezembro	78,8	26,9	17,5
		2015	Janeiro	76,2	29,1	19
			Fevereiro	81,5	27,2	18,3
			Outubro	74,6	26	18,6
Santa Catarina	Florianópolis	2014	Novembro	74,1	27,2	19,9
			Dezembro	79	28,9	21,3
			Janeiro	76,1	31,7	22,6
		2015	Fevereiro	79,2	30,2	22,1
			Outubro	76,6	26,7	16,9
			Novembro	72,8	28,9	18,4
Rio Grande do Sul	Porto Alegre	2014	Dezembro	74,9	29,6	20,3
			Janeiro	75,8	30,9	21,6
			Fevereiro	77,2	30,2	21,2
		2015	Maiores valores para a região Sul		Umidade (%)	Temperatura (°C)
					81,5	31,7

Região Centro Oeste						
Estado	Capital	Ano	Mês	Umidade (%)	Temperatura (°C)	
					MAX	MIN
Distrito Federal	Brasília	2014	Outubro	49,9	29,9	18,4
			Novembro	73,8	27,2	18,3
			Dezembro	78	26,1	17,9
		2015	Janeiro	60,7	29,1	18
			Fevereiro	71	26,8	18,1
			Outubro	44	34,9	21,2
Goiás	Goiânia	2014	Novembro	67,6	31,9	20,8
			Dezembro	72,5	30,1	20,2
			Janeiro	56,3	34	20,9
		2015	Fevereiro	70,6	30,9	20,2
			Outubro	67,4	36,8	24,1
			Novembro	69,7	34,5	24
Mato Grosso	Cuiabá	2014	Dezembro	74,8	33,1	23,7
			Janeiro	73,3	34,1	23,1
			Fevereiro	76,6	33,3	23,3

Continuação

Mato Grosso do Sul	2014	Campo Grande	Outubro	68,1	-	-	
			Novembro	77,4	-	-	
			Dezembro	81,3	-	-	
	2015		Janeiro	77	-	-	
			Fevereiro	82,6	-	-	
Maiores valores para a região Centro Oeste			Umidade (%)		Temperatura (°C)		
			82,6		36,8		

Fonte: INMET, 2015.

## APÊNDICE B

### ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PESQUISA

#### 1) Análise da variância para os resultados dos ensaios no estado fresco dos concretos

1.a) Análise de variância com comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento no estado fresco entre todos os concretos:

Abatimento (mm)				
Referência	8% Ar	11% Ar	12% Ar	
15	110	90	70	
15	80	90	110	
25	50	125	70	
30	65	125	70	

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	85	21,25	56,25
8% Ar	4	305	76,25	656,25
11% Ar	4	430	107,5	408,333
12% Ar	4	320	80	400

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	15662,5	3	5220,833333	13,7315	0,00035	3,490294819
Dentro dos grupos	4562,5	12	380,2083333			
Total	20225	15				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,00035 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	13,73 > 3,49	REJEITA-SE IGUALDADE

1.b) Análise de variância dos ensaios de abatimento dos concretos comparando-se os concretos com ar incorporado e o concreto de referência:

Abatimento (mm)	
Referência	8% Ar
15	110
15	80
25	50
30	65

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	85	21,25	56,25
8% Ar	4	305	76,25	656,25

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6050	1	6050	16,9825	0,00621	5,98738
Dentro dos grupos	2137,5	6	356,25			
Total	8187,5	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,0062 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	16,98 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Abatimento (mm)	
Referência	11% Ar
15	90
15	90
25	125
30	125

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	85	21,25	56,25
11% Ar	4	430	107,5	408,3333

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	14878,13	1	14878,13	64,04933	0,000203	5,987378
Dentro dos grupos	1393,75	6	232,2917			
Total	16271,88	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,000203 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	64,049 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Abatimento (mm)	
Referência	12% Ar
15	70
15	110
25	70
30	70

Anova: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	85	21,25	56,25
12% Ar	4	320	80	400

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6903,125	1	6903,125	30,26027	0,001514	5,987378
Dentro dos grupos	1368,75	6	228,125			
Total	8271,875	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,00015 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	30,26 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

1.c) Análise de variância dos ensaios de abatimento com comparação entre os concretos com ar incorporado:

Abatimento (mm)	
8% Ar	11% Ar
110	90
80	90
50	125
65	125

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
8% Ar	4	305	76,25	656,25
11% Ar	4	430	107,5	408,3333

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1953,125	1	1953,125	3,669276	0,103907	5,987378
Dentro dos grupos	3193,75	6	532,2917			
Total	5146,875	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,104 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	3,66 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Abatimento (mm)	
8% Ar	12% Ar
110	70
80	110
50	70
65	70

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
8% Ar	4	305	76,25	656,25
12% Ar	4	320	80	400

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	28,125	1	28,125	0,053254	0,825162	5,987378
Dentro dos grupos	3168,75	6	528,125			
Total	3196,875	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,825 > 0,05	IGUALDADE	0,053 < 5,987	IGUALDADE

Abatimento (mm)	
11% Ar	12% Ar
90	70
90	110
125	70
125	70

Anova: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
11% Ar	4	430	107,5	408,3333
12% Ar	4	320	80	400

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1512,5	1	1512,5	3,742268	0,101212	5,987378
Dentro dos grupos	2425	6	404,1667			
Total	3937,5	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,1012 > 0,05	IGUALDADE	3,742 < 5,987	IGUALDADE

1.d) Análise de variância com comparação entre os resultados dos ensaios do teor de ar entre todos os concretos:

Teor de ar (%)			
Referência	8% Ar	11% Ar	12% Ar
2,50	11,00	11,50	13,00
3,20	9,00	9,00	13,00
2,50	6,10	11,50	11,50
3,00	6,00	12,50	10,00

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	11,2	2,8	0,12667
8% Ar	4	32,1	8,025	5,86917
11% Ar	4	44,5	11,125	2,22917
12% Ar	4	47,5	11,875	2,0625

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	203,957	3	67,985625	26,4343	1,4E-05	3,490294819
Dentro dos grupos	30,8625	12	2,571875			
Total	234,819	15				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
1,4 E-05 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	26,434 > 3,490	REJEITA-SE IGUALDADE

1.e) Análise de variância dos ensaios do teor de ar comparando-se os concretos com ar incorporado e o concreto de referência:

Teor de ar (%)	
Referência	8% Ar
2,50	11,00
3,20	9,00
2,50	6,10
3,00	6,00

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	11,2	2,8	0,126667
8% Ar	4	32,1	8,025	5,869167

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	54,60125	1	54,60125	18,21306	0,005277	5,987377607
Dentro dos grupos	17,9875	6	2,997917			
Total	72,58875	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,052 > 0,05	IGUALDADE	18,213 < 5,987	IGUALDADE

Teor de ar (%)	
Referência	11% Ar
2,50	11,50
3,20	9,00
2,50	11,50
3,00	12,50

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	11,2	2,8	0,126667
11% Ar	4	44,5	11,125	2,229167

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	138,6113	1	138,6113	117,6749	3,64E-05	5,987377607
Dentro dos grupos	7,0675	6	1,177917			
Total	145,6788	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
3,64E-05 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	117,675 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Teor de ar (%)	
Referência	12% Ar
2,50	13,00
3,20	13,00
2,50	11,50
3,00	10,00

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	11,2	2,8	0,126667
12% Ar	4	47,5	11,875	2,0625

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	164,7113	1	164,7113	150,4785	1,79E-05	5,987377607
Dentro dos grupos	6,5675	6	1,094583			
Total	171,2788	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
1,79E-05 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	150,478 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

1.f) Análise de variância dos ensaios do teor de ar com comparação entre os concretos com ar incorporado:

Teor de ar (%)	
8% Ar	11% Ar
11,00	11,50
9,00	9,00
6,10	11,50
6,00	12,50

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
8% Ar	4	32,1	8,025	5,869167
11% Ar	4	44,5	11,125	2,229167

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	19,22	1	19,22	4,746656	0,072192	5,987378
Dentro dos grupos	24,295	6	4,049167			
Total	43,515	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,0722 > 0,05	IGUALDADE	4,746 < 5,987	IGUALDADE

Teor de ar (%)	
8% Ar	12% Ar
11,00	13,00
9,00	13,00
6,10	11,50
6,00	10,00

Anova: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
8% Ar	4	32,1	8,025	5,869167
12% Ar	4	47,5	11,875	2,0625

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	29,645	1	29,645	7,4751	0,034002	5,987378
Dentro dos grupos	23,795	6	3,965833			
Total	53,44	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,034 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	7,475 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Teor de ar (%)	
11% Ar	12% Ar
11,50	13,00
9,00	13,00
11,50	11,50
12,50	10,00

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
11% Ar	4	44,5	11,125	2,229167
12% Ar	4	47,5	11,875	2,0625

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,125	1	1,125	0,524272	0,496275	5,987378
Dentro dos grupos	12,875	6	2,145833			
Total	14	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,496 > 0,05	IGUALDADE	0,524 < 5,987	IGUALDADE

1.g) Análise de variância com comparação entre os resultados do ensaio da massa específica entre todos os concretos:

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )			
Referência	8% Ar	11% Ar	12% Ar
2478,74	2269,46	2223,68	2184,43
2406,80	2302,16	2210,60	2164,81
2485,28	2380,64	2184,43	2184,43
2439,50	2341,40	2177,89	2197,51

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	9810,32	2452,58	1340,18
8% Ar	4	9293,66	2323,415	2320,36
11% Ar	4	8796,6	2199,15	467,163
12% Ar	4	8731,18	2182,795	181,779

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	189178	3	63059,18967	58,5307	2E-07	3,490294819
Dentro dos grupos	12928,4	12	1077,369633			
Total	202106	15				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
2E-07 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	58,531 > 3,490	REJEITA-SE IGUALDADE

1.h) Análise de variância do ensaio da massa específica dos concretos comparando-se os concretos com ar incorporado e o concreto de referência:

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	
Referência	8% Ar
2478,74	2269,46
2406,80	2302,16
2485,28	2380,64
2439,50	2341,40

Anova: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	9810,32	2452,58	1340,177
8% Ar	4	9293,66	2323,415	2320,359

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	33367,19	1	33367,19	18,23077	0,005265	5,987377607
Dentro dos grupos	10981,61	6	1830,268			
Total	44348,8	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,00523 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	18,231 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	
Referência	11% Ar
2478,74	2223,68
2406,80	2210,60
2485,28	2184,43
2439,50	2177,89

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	9810,32	2452,58	1340,177
11% Ar	4	8796,6	2199,15	467,1631

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	128453,5	1	128453,5	142,1465	05	2,11E-05
Dentro dos grupos	5422,02	6	903,67			5,987377607
Total	133875,5	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
2,11E-05 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	142,146 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	
Referência	12% Ar
2478,74	2184,43
2406,80	2164,81
2485,28	2184,43
2439,50	2197,51

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	9810,32	2452,58	1340,177
12% Ar	4	8731,18	2182,795	181,7793

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	145567,9	1	145567,9	191,2905	8,89E-06	5,987377607
Dentro dos grupos	4565,868	6	760,978			
Total	150133,8	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
8,89E-06 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	191,290 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

1.i) Análise de variância do ensaio da massa específica com comparação entre os concretos com ar incorporado:

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	
8% Ar	11% Ar
2269,46	2223,68
2302,16	2210,60
2380,64	2184,43
2341,40	2177,89

Anova: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
8% Ar	4	9293,66	2323,415	2320,359
11% Ar	4	8796,6	2199,15	467,1631

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	30883,58	1	30883,58	22,15844	0,003301	5,987377607
Dentro dos grupos	8362,567	6	1393,761			
Total	39246,15	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,003 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	22,158 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	
8% Ar	12% Ar
2269,46	2184,43
2302,16	2164,81
2380,64	2184,43
2341,40	2197,51

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
8% Ar	4	9293,66	2323,415	2320,359
12% Ar	4	8731,18	2182,795	181,7793

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	39547,97	1	39547,97	31,61133	0,001353	5,987377607
Dentro dos grupos	7506,416	6	1251,069			
Total	47054,38	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,0013 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	31,613 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	
11% Ar	12% Ar
2223,68	2184,43
2210,60	2164,81
2184,43	2184,43
2177,89	2197,51

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
11% Ar	4	8796,6	2199,15	467,1631
12% Ar	4	8731,18	2182,795	181,7793

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	534,972	1	534,972	1,64875	0,24648	5,987378
Dentro dos grupos	1946,827	6	324,4712			
Total	2481,799	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,246 > 0,05	IGUALDADE	1,648 < 5,987	IGUALDADE

**2) Análise da variância para os resultados dos ensaios no estado endurecido dos concretos**

2.a) Análise de variância com comparação entre os resultados do ensaio de resistência à compressão no estado endurecido entre todos os concretos:

Resistência à compressão (MPa)			
Referência	8% Ar	11% Ar	12% Ar
43,39	21,94	23,12	20,53
42,20	28,73	28,23	16,36
39,14	24,89	19,91	14,12
37,09	27,53	17,87	25,11

Anova: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	161,82	40,455	8,237233
8% Ar	4	103,09	25,7725	9,100825
11% Ar	4	89,13	22,2825	20,39102
12% Ar	4	76,12	19,03	23,48447

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1073,066	3	357,6888	23,37318	2,67E-05	3,490295
Dentro dos grupos	183,6407	12	15,30339			
Total	1256,707	15				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < F <sub>critico</sub>	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > F <sub>critico</sub>	REJEITA-SE IGUALDADE
2,67E-05 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	23,373 > 3,491	REJEITA-SE IGUALDADE

2.b) Análise de variância do ensaio de resistência a compressão dos concretos comparando- se os concretos com ar incorporado e o concreto de referência:

Resistência à compressão (MPa)	
Referência	8% Ar
43,39	21,94
42,20	28,73
39,14	24,89
37,09	27,53

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	161,82	40,455	8,237233
8% Ar	4	103,09	25,7725	9,100825

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F critico
Entre grupos	431,1516	1	431,1516	49,73471	0,000407	5,987378
Dentro dos grupos	52,01418	6	8,669029			
Total	483,1658	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < F <sub>critico</sub>	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > F <sub>critico</sub>	REJEITA-SE IGUALDADE
0,00041 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	49,735 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Resistência à compressão (MPa)	
Referência	11% Ar
43,39	23,12
42,20	28,23
39,14	19,91
37,09	17,87

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	161,82	40,455	8,237233
11% Ar	4	89,13	22,2825	20,39102

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	660,4795	1	660,4795	46,14179	0,000498	5,987378
Dentro dos grupos	85,88478	6	14,31413			
Total	746,3643	7				

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	660,4795	1	660,4795	46,14179	0,000498	5,987378
Dentro dos grupos	85,88478	6	14,31413			
Total	746,3643	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,00049 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	46,141 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

Resistência à compressão (Mpa)	
Referência	12% Ar
43,39	20,53
42,20	16,36
39,14	14,12
37,09	25,11

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	4	161,82	40,455	8,237233
12% Ar	4	76,12	19,03	23,48447

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	918,0613	1	918,0613	57,88222	0,000269	5,987378
Dentro dos grupos	95,1651	6	15,86085			
Total	1013,226	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,00269 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	57,882 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

2.c) Análise de variância do ensaio de resistência a compressão com comparação entre os concretos com ar incorporado:

Resistência Compressão (MPa)	
8% Ar	11% Ar
21,94	23,12
28,73	28,23
24,89	19,91
27,53	17,87

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
8% Ar	4	103,09	25,7725	9,100825
11% Ar	4	89,13	22,2825	20,39102

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,3602	1	24,3602	1,651995	0,246067	5,987378
Dentro dos grupos	88,47555	6	14,74593			
Total	112,8358	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,246 > 0,05	IGUALDADE	1,652 < 5,987	IGUALDADE

Resistência Compressão (MPa)	
8% Ar	12% Ar
21,94	20,53
28,73	16,36
24,89	14,12
27,53	25,11

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
8% Ar	4	103,09	25,7725	9,100825
12% Ar	4	76,12	19,03	23,48447

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	90,92261	1	90,92261	5,580592	0,056105	5,987378
Dentro dos grupos	97,75588	6	16,29265			
Total	188,6785	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,056 > 0,05	IGUALDADE	5,58 < 5,987	IGUALDADE

Resistência Compressão (MPa)	
11% Ar	12% Ar
23,12	20,53
28,23	16,36
19,91	14,12
17,87	25,11

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
11% Ar	4	89,13	22,2825	20,39102
12% Ar	4	76,12	19,03	23,48447

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	21,15751	1	21,15751	0,964434	0,363998	5,987378
Dentro dos grupos	131,6265	6	21,93775			
Total	152,784	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,364 > 0,05	IGUALDADE	0,964 < 5,987	IGUALDADE

2.d) Análise de variância com comparação entre os resultados do ensaio de módulo de elasticidade no estado endurecido entre todos os concretos:

Módulo de elasticidade (GPa)			
Referência	8% Ar	11% Ar	12% Ar
44,15	29,15	35,20	29,45
40,25	32,80	35,70	29,15
36,40	39,35	31,00	28,30
29,00	28,20	29,10	24,40

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	149,8	37,45	41,745
8% Ar	4	129,5	32,375	25,55417
11% Ar	4	131	32,75	10,36333
12% Ar	4	111,3	27,825	5,450833

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	185,585	3	61,86167	2,97722	0,074084	3,490295
Dentro dos grupos	249,34	12	20,77833			
Total	434,925	15				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,074 > 0,05	IGUALDADE	2,977 < 3,490	IGUALDADE

2.e) Análise de variância do ensaio de módulo de elasticidade dos concretos comparando- se os concretos com ar incorporado e o concreto de referência:

Módulo de elasticidade (GPa)	
Referência	8% Ar
44,15	29,15
40,25	32,80
36,40	39,35
29,00	28,20

Anova: fator único

### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	149,8	37,45	41,745
8% Ar	4	129,5	32,375	25,55417

### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	51,51125	1	51,51125	1,530814	0,262214	5,987378
Dentro dos grupos	201,8975	6	33,64958			
Total	253,4088	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,262 > 0,05	IGUALDADE	1,531 < 5,987	IGUALDADE

Módulo de elasticidade (GPa)	
Referência	11% Ar
44,15	35,20
40,25	35,70
36,40	31,00
29,00	29,10

Anova: fator único

### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	149,8	37,45	41,745
11% Ar	4	131	32,75	10,36333

### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	44,18	1	44,18	1,695698	0,240603	5,987378
Dentro dos grupos	156,325	6	26,05417			
Total	200,505	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < F <sub>critico</sub>	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > F <sub>critico</sub>	REJEITA-SE IGUALDADE
0,241 > 0,05	IGUALDADE	1,695 < 5,987	IGUALDADE

Módulo de elasticidade (GPa)	
Referência	12% Ar
44,15	29,45
40,25	29,15
36,40	28,30
29,00	24,40

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4	149,8	37,45	41,745
12% Ar	4	111,3	27,825	5,450833

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F critico
Entre grupos	185,2813	1	185,2813	7,851594	0,031079	5,987378
Dentro dos grupos	141,5875	6	23,59792			
Total	326,8688	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < F <sub>critico</sub>	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > F <sub>critico</sub>	REJEITA-SE IGUALDADE
0,031 > 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	7,851 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

2.f) Análise de variância do ensaio de módulo de elasticidade com comparação entre os concretos com ar incorporado:

Módulo de elasticidade (GPa)	
8% Ar	11% Ar
29,15	35,20
32,80	35,70
39,35	31,00
28,20	29,10

Anova: fator único

### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
8% Ar	4	129,5	32,375	25,55417
11% Ar	4	131	32,75	10,36333

### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,28125	1	0,28125	0,015661	0,904498	5,987378
Dentro dos grupos	107,7525	6	17,95875			
Total	108,0338	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,904 > 0,05	IGUALDADE	0,015 < 5,987	IGUALDADE

Módulo de elasticidade (GPa)	
8% Ar	12% Ar
29,15	29,45
32,80	29,15
39,35	28,30
28,20	24,40

Anova: fator único

### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
8% Ar	4	129,5	32,375	25,55417
12% Ar	4	111,3	27,825	5,450833

### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	41,405	1	41,405	2,67086	0,153319	5,987378
Dentro dos grupos	93,015	6	15,5025			
Total	134,42	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < F <sub>critico</sub>	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > F <sub>critico</sub>	REJEITA-SE IGUALDADE
0,153 > 0,05	IGUALDADE	2,671 < 5,987	IGUALDADE

Módulo de elasticidade (GPa)	
11% Ar	12% Ar
35,20	29,45
35,70	29,15
31,00	28,30
29,10	24,40

Anova: fator único

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
11% Ar	4	131	32,75	10,36333
12% Ar	4	111,3	27,825	5,450833

#### ANOVA

Fonte da variação	SO	gl	MQ	F	valor-P	F critico
Entre grupos	48,51125	1	48,51125	6,135164	0,048005	5,987378
Dentro dos grupos	47,4425	6	7,907083			
Total	95,95375	7				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < F <sub>critico</sub>	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > F <sub>critico</sub>	REJEITA-SE IGUALDADE
0,048 < 0,05	REJEITA-SE IGUALDADE	6,1351 > 5,987	REJEITA-SE IGUALDADE

### 3) Análise da variância para os painéis de concreto

Tabela Apêndice B 1 – Dados das Temperaturas dos ensaios dos painéis de concreto

Painéis de concreto							
Aquecida	Não Aquecido	Aquecida	Não Aquecido	Aquecida	Não Aquecido	Aquecida	Não Aquecido
Referência		8% AR		11% AR		12% AR	
39,128	35,811	39,359	34,97	39,56	35,435	40,024	35,504
39,572	34,106	39,895	35,344	39,348	34,701	39,565	35,009
38,736	34,069	40,086	37,045	39,688	35,181	39,614	35,21
39,035	33,047	39,859	36,097	39,552	35,812	40,16	34,987
Médias							
<b>39,118</b>	<b>34,258</b>	<b>39,800</b>	<b>35,864</b>	<b>39,537</b>	<b>35,282</b>	<b>39,841</b>	<b>35,178</b>

Fonte: Autora.

3.a) Análise de variância com comparação entre todas as diferenças de temperaturas do compartimento direito aquecido e esquerdo não aquecido da câmara climatizada entre todos os concretos:

Painéis de concreto			
Referência	8% AR	11% AR	12% AR
3,318	4,389	4,125	4,521
5,466	4,551	4,647	4,556
4,667	3,041	4,507	4,404
5,988	3,762	3,74	5,173

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3,000	16,121	5,374	0,443
8% AR	3,000	11,354	3,785	0,570
11% AR	3,000	12,894	4,298	0,238
12% AR	3,000	14,133	4,711	0,166

#### ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,060	3,000	1,353	3,819	0,058	4,066
Dentro dos grupos	2,835	8,000	0,354			
Total	6,895	11,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,058 > 0,05	IGUALDADE	3,819 < 4,066	IGUALDADE

3.b) Análise da variância da diferença entre as temperaturas do compartimento direito aquecido e esquerdo não aquecido da câmara climatizada comparando-se com as diferenças do concreto de referência e os de ar incorporado:

Painéis de concreto	
Referência	8% AR
3,318	4,389
5,466	4,551
4,667	3,041
5,988	3,762

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3,000	16,121	5,374	0,443
8% AR	3,000	11,354	3,785	0,570

#### ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,787	1,000	3,787	7,477	0,052	7,709
Dentro dos grupos	2,026	4,000	0,507			
Total	5,814	5,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,052 > 0,05	IGUALDADE	7,477 < 7,709	IGUALDADE

Painéis de concreto	
Referência	11% AR
3,318	4,125
5,466	4,647
4,667	4,507
5,988	3,74

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3,000	16,121	5,374	0,443
11% AR	3,000	12,894	4,298	0,238

## ANOVA: Fator Único

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,736	1,000	1,736	5,097	0,087	7,709
Dentro dos grupos	1,362	4,000	0,341			
Total	3,098	5,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,087 > 0,05	IGUALDADE	5,097 < 7,709	IGUALDADE

Painéis de concreto	
Referência	12% AR
3,318	4,52
5,466	4,556
4,667	4,404
5,988	5,173

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	3,000	16,121	5,374	0,443
12% AR	3,000	14,133	4,711	0,166

## ANOVA: Fator Único

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,659	1,000	0,659	2,165	0,215	7,709
Dentro dos grupos	1,217	4,000	0,304			
Total	1,876	5,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,215 > 0,05	IGUALDADE	2,165 < 7,709	IGUALDADE

#### 4) Análise da variância para os resultados do ensaio dos corpos de prova

Tabela Apêndice B 2 – Dados das Temperaturas dos ensaios nos corpos de prova

Termoprensa							
Base inferior	Topo isolado	Base inferior	Topo isolado	Base inferior	Topo isolado	Base inferior	Topo isolado
<b>Referência</b>		<b>8% AR</b>		<b>11% AR</b>		<b>12% AR</b>	
41,158	38,630	42,628	39,903	42,303	39,103	43,254	40,318
40,937	38,509	42,240	39,298	41,708	38,759	42,663	39,600
42,796	39,567	42,671	40,151	42,972	39,401	42,706	39,437
42,198	38,537	42,126	38,948	42,390	39,234	42,265	39,282
<b>Médias</b>							
<b>41,772</b>	<b>38,811</b>	<b>42,416</b>	<b>39,575</b>	<b>42,343</b>	<b>39,124</b>	<b>42,722</b>	<b>39,659</b>

Fonte: Autora.

- 4.a) Análise de variância com as temperaturas das bases inferiores e topos isolados das amostras comparando-se todas as amostras.

Corpos de prova			
Referência	8% ARI	11% ARI	12% ARI
2,528	2,725	3,200	2,936
2,428	2,942	2,949	3,063
3,229	2,520	3,571	3,269
3,661	3,178	3,156	2,983

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência (1)	4,000	167,089	41,772	0,768
8% ARI (2)	4,000	169,665	42,416	0,075
11% ARI (3)	4,000	169,373	42,343	0,268
12% ARI (4)	4,000	170,888	42,722	0,165

#### ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,885	3,000	0,628	1,970	0,172	3,490
Dentro dos grupos	3,828	12,000	0,319			
Total	5,713	15,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,172 > 0,05	IGUALDADE	1,970 < 3,490	IGUALDADE

4.b) Análise de variância com a diferença entre as temperaturas base inferior e topos isolados entre o concreto de referência e os de ar incorporado

Corpos de prova	
Referência	8% AR
2,528	2,725
2,428	2,942
3,229	2,520
3,661	3,178

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3,000	9,318	3,106	0,391
8% AR	3,000	8,640	2,880	0,111

#### ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,077	1,000	0,077	0,305	0,610	7,709
Dentro dos grupos	1,005	4,000	0,251			
Total	1,082	5,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,610 > 0,05	IGUALDADE	0,305 < 7,709	IGUALDADE

Corpos de prova	
Referência	11% AR
2,528	3,200
2,428	2,949
3,229	3,571
3,661	3,156

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3,000	9,318	3,106	0,391
11% AR	3,000	9,676	3,225	0,100

## ANOVA: Fator Único

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,021	1,000	0,021	0,087	0,783	7,709
Dentro dos grupos	0,983	4,000	0,246			
Total	1,005	5,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,783 > 0,05	IGUALDADE	0,087 < 7,709	IGUALDADE

Corpos de prova	
Referência	12% AR
2,528	2,936
2,428	3,063
3,229	3,269
3,661	2,983

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Referência	3,000	9,318	3,106	0,391
12% AR	3,000	9,315	3,105	0,022

## ANOVA: Fator Único

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000	1,000	0,000	0,000	0,998	7,709
Dentro dos grupos	0,826	4,000	0,207			
Total	0,826	5,000				
Para	Resultado		Para	Resultado		
P > ERRO	IGUALDADE		F < Fcrítico	IGUALDADE		
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE		F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE		
0,998 > 0,05	IGUALDADE		0,000 < 7,709	IGUALDADE		

## 5) Análise da variância para os resultados do ensaio da Condutividade térmica

5.a) Análise de variância com comparação entre todas as amostras

Condutividade Térmica (W/m.K)			
Referência	8% AR	11%	12%
1,372	0,815	1,353	0,732
0,738	1,197	1,027	1,152
0,933	1,140	1,079	0,820
0,819	0,912	0,716	0,934

### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3	2,49	0,830	0,010
8% AR	3	3,249	1,083	0,023
11% AR	3	2,794	0,931	0,036
12% AR	3	2,906	0,969	0,028

### ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,098	3,000	0,033	1,348	0,326	4,066
Dentro dos grupos	0,194	8,000	0,024			
Total	0,293	11,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,326 > 0,05	IGUALDADE	1,348 < 4,066	IGUALDADE

5.b) Análise de variância com comparação entre as amostras de referência e a amostras 8% de ar incorporado

Condutividade térmica (w/m.K)	
Referência	8% AR
1,372	0,815
0,738	1,197
0,933	1,140
0,819	0,912

## RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4,000	3,862	0,966	0,080
8% AR	4,000	4,064	1,016	0,033

## ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,005	1,000	0,005	0,090	0,774	5,987
Dentro dos grupos	0,339	6,000	0,056			
Total	0,344	7,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,774 > 0,05	IGUALDADE	0,090 < 5,987	IGUALDADE

5.c) Análise de variância com comparação entre as amostras de referência e a amostras 11% de ar incorporado

Condutividade térmica (w/m.K)	
Referência	11% AR
1,372	1,353
0,738	1,027
0,933	1,079
0,819	0,716

## RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4,000	3,862	0,966	0,080
11% AR	4,000	4,175	1,044	0,068

## ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,012	1,000	0,012	0,165	0,698	5,987
Dentro dos grupos	0,444	6,000	0,074			
Total	0,456	7,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,698 > 0,05	IGUALDADE	0,165 < 5,987	IGUALDADE

5.d) Análise de variância com comparação entre as amostras de referência e a amostras 12% de ar incorporado

Condutividade térmica (w/m.K)	
Referência	12% AR
1,372	0,732
0,738	1,152
0,933	0,820
0,819	0,934

#### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	4,000	3,862	0,966	0,080
12% AR	4,000	3,638	0,910	0,033

#### ANOVA: Fator Único

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,006	1,000	0,006	0,111	0,750	5,987
Dentro dos grupos	0,338	6,000	0,056			
Total	0,345	7,000				

Para	Resultado	Para	Resultado
P > ERRO	IGUALDADE	F < Fcrítico	IGUALDADE
P < ERRO	REJEITA-SE IGUALDADE	F > Fcrítico	REJEITA-SE IGUALDADE
0,750 > 0,05	IGUALDADE	0,111 < 5,987	IGUALDADE