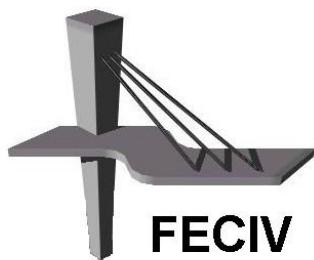


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
CONCRETOS COM AR INCORPORADO**

ARTHUR MOURA CINTRA

UBERLÂNDIA, 20 DE JULHO 2015.



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



Arthur Moura Cintra

**ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO 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**.

Orientador: Prof. Dr. Turibio José da Silva

Uberlândia, 20 de julho de 2015.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C575e Cintra, Arthur Moura,
2015 Estudo do desempenho térmico de concretos com ar incorporado /
Arthur Moura Cintra. - 2015.
111 f. : il.

Orientador: Turíbio José da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Concreto - Aditivos - Teses. 3.
Paredes - Teses. I. Silva, Turíbio José da. II. Universidade Federal de
Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDU: 624



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 147/2015

CANDIDATO: Arthur Moura Cintra

Nº. Matrícula: 11312ECV001

ORIENTADOR: Prof. Dr. Turibio José da Silva

TÍTULO: "Estudo do desempenho térmico de concretos com ar incorporado"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

DATA DA DEFESA: 20 de julho de 2015

LOCAL: Sala de Webconferência 03 – bloco 5M, Campus Santa Mônica.

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 14:30 - 16:30

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

() APROVADO

() REPROVADO

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professora Orientadora: **Prof. Dr. Turibio José da Silva – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. João Adriano Rossignolo – FZEA/USP**

Membro interno: **Prof. a Dr. a Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU**

Uberlândia, 20 de JULHO de 2015.

*À minha filha, à minha esposa, aos meus pais, e ao meu
orientador pelo apoio.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha filha.

A minha esposa pela força e paciência durante todo este período, que foi muito importante para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, por sempre acreditarem na minha capacidade e investirem na minha educação.

Aos meus colegas da Faculdade de Engenharia Civil, em especial Fábio Zanetti, Avelino Gomes, Danillo Martins e Cristiane Pires, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

Agradeço muito ao meu orientador, Prof. Turibio, pela sua dedicação e empenho no desenvolvimento desta pesquisa. A quem eu tenho profunda admiração e respeito.
Professor, tenho o senhor como um exemplo de pessoa e reconheço tudo que fez por mim.
Muito obrigado.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil, pelos ensinamentos, atenção e dedicação.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil que forneceu o apoio necessário à realização da pesquisa.

Cintra, A. M. Estudo do desempenho térmico de concretos com ar incorporado. 111 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

RESUMO

O uso de paredes de concreto em edificações unifamiliares teve um grande aumento nos últimos anos. Para atender a demanda de construção de moradias de interesse social e a necessidade de melhorar o desempenho, as empresas da construção civil têm buscado novos sistemas construtivos sendo um deles as paredes de concreto armado com concreto auto adensável ou ar incorporado. A evolução do uso das paredes de concreto culminou na publicação, em maio de 2012, da ABNT NBR 16055. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de uma pesquisa sobre o desempenho do concreto com ar incorporado em placas, 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 (quantidade definida por ANOVA), 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). O ensaio térmico foi realizado em uma câmara com dois compartimentos isolados termicamente e com controle independente de temperatura (10 °C e 25 °C) e umidade relativa. Na divisória entre os dois compartimentos foram colocados as placas. Foram determinadas as propriedades físicas no estado fresco e endurecido em corpos de prova e o comportamento de cada grupo em relação à condução térmica. Para os percentuais utilizados de aditivo, o teor de ar total variou de 2,8 % a 11,88 % e o abatimento de tronco de cone aumentou de 21 mm a 107 mm. Os resultados permitiram concluir que a massa específica diminuiu até 11 % quando incorporado aditivo. A resistência à compressão teve reduções de, até, 53 % aos 28 dias de idade e o modulo de elasticidade também reduziu de 26 %. Nos ensaios térmicos, com uma câmara variando de 10 °C para 25 °C e mantida a outra a 10 °C, o concreto com 0,04% de aditivo ficou com temperatura de, aproximadamente, 1,5 °C menor do que o concreto de referência.

Palavras-chave: aditivo, concreto com ar incorporado, desempenho térmico, paredes de concreto.

Cintra, A. M. Study of thermal performance of concrete with air entrainment. 111 pp. MSc Dissertation, Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2014.

ABSTRACT

The use of concrete walls in single-family buildings had greatly increased in recent years. To meet the demand of housing construction of social interest and the need to improve performance, business construction have sought new construction systems being one of them the walls of reinforced concrete with self compacting concrete or entrained air. The evolution of the use of concrete walls culminated in the publication, in May 2012, the NBR 16055. The purpose of this paper is to present the results of a survey on the actual performance of air incorporated into plates, considering the climatic variations of the period winter. The control variable is the heat conduction gradient, aiming the thermal performance of housing. The experimental program consisted of performing panels 16 (quantity determined by ANOVA), and reference 4 and 4 for each dose developer air additive (0.04%, 0.08% and 0.12% on the cement consumption). The thermal test was conducted in a chamber with two thermally insulated compartments and independent control of temperature (10 °C to 25 °C) and relative humidity. The partition between the two compartments the plates were placed. They determined the physical properties in fresh and hardened specimens and the behavior of each group with respect to thermal conduction. For the percentage of additive used, the total air content ranged from 2.8% to 11.88% and the frustoconical rebate increased from 21 mm to 107 mm. The results showed that the density decreased to 11% when incorporated additive. The compressive strength had reductions of up to 53% at 28 days of age and the modulus of elasticity also reduced by 26%. In the thermal test, with a chamber ranging from 10 °C to 25 °C and maintained at 10 °C another, the concrete with additive was 0.04% with a temperature of approximately 1.5 °C lower than the reference concrete.

Keywords: additive, air entrained concrete, thermal performance, concrete walls.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

le – Comprimento equivalente de parede

ABREVIATURAS

Res. – Residencial

SIGLAS

PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida

PBQP-H – Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABESC – Associação Brasileira de Serviços de Concretagem

IBTS – Instituto Brasileiro de Telas Soldadas

CP – Corpo de prova

ANOVA – Análise de variância

CAD – Concreto de alto desempenho



Lista de Figuras

Figura 1 – Dados do PMCMV desde o início do programa, em 2009, até julho de 2015.....	1
Figura 2 – Construção em alvenaria estrutural.....	8
Figura 3 – Alvenaria estrutural com bloco cerâmico e bloco de concreto.	9
Figura 4 – Blocos de concreto mais empregados na alvenaria estrutural.....	9
Figura 5 – Amarração de parede de alvenaria estrutural em “L” e “T” utilizando graute em blocos de concreto.	10
Figura 6 – Construção com o sistema construtivo Estruturas de Aço Leve.	11
Figura 7 – Consumo histórico anual de chapas para drywall no Brasil (milhões de m ²). ...	12
Figura 8 – Casa de gesso acartonado.....	12
Figura 9 – Fabricação de paredes do sistema “tilt-up”.....	13
Figura 10 – Sistema “tilt up”.....	14
Figura 11 – Edifícios de múltiplos pavimentos no Brasil com paredes de concreto moldadas in loco.....	15
Figura 12 – Casa de paredes de concreto moldadas in loco.	15
Figura 13 – Número de unidades habitacionais térreas construídas em parede de concreto por 9 grandes construtoras no período de 2010 à 2013.	16
Figura 14 – Fundação do tipo radier.....	17
Figura 15 – Armação e montagem das instalações elétricas e hidráulicas.	18
Figura 16 – Montagem das formas.	19
Figura 17 – Fôrmas mistas para parede de concreto moldada in loco.....	20
Figura 18 – Processo de retirada das formas e montagem do telhado.	20
Figura 19 – Casa de parede de concreto em fase de acabamento.	21
Figura 20 – Comprimento equivalente da parede (le).	22
Figura 21 – Tipos de concreto leve: (a) concreto com agregados leves, (b) concreto leve celular e (c) concreto sem finos.	23
Figura 22 – Tipos de concretos utilizados no sistema Parede de Concreto.....	24
Figura 23 – Influência do ar incorporado na durabilidade do concreto.....	25
Figura 24 – Mecanismo de ação do sistema de incorporação de ar.	31
Figura 25 – Efeito do teor de ar na resistência do concreto.	33
Figura 26 – Seção polida do concreto leve de ar incorporado AR1, tendo-se concentração elevada de vazios (áreas pretas) na pesquisa do autor Araújo <i>et al.</i> (2014).	34
Figura 27 – Seção polida do concreto com ar incorporado AR2, tendo-se concentração elevada de vazios (áreas pretas) na pesquisa do autor Araújo <i>et al.</i> (2014).	34
Figura 28 – Ensaio da caixa L em concreto autoadensável na pesquisa do autor Santos (2013).	36
Figura 29 – Imagens obtidas com a lupa estereoscópica de concretos sem aditivo e com 0,15 de aditivo na pesquisa do autor Da Rosa (2013).	41
Figura 30 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0% de aditivo na pesquisa do autor Da Rosa (2013).	42
Figura 31 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0,15% de aditivo na pesquisa do autor Da Rosa (2013).	42
Figura 32 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais na resistência à compressão uniaxial de concretos com aditivo IAR na pesquisa do autor Da Rosa (2013).	44
Figura 33 – Fatores importantes para o desempenho térmico das edificações.	45
Figura 34 – Zonas bioclimáticas do Brasil.	46

Figura 35 – Valores de absorvividade (α) e emissividade (ε) de alguns materiais.	49
Figura 36 – Condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção civil.....	50
Figura 37 – Valores de resistência térmica superficial.....	51
Figura 38 – Abertura (h) em beirais, para ventilação do ático.	59
Figura 39 – Zona Bioclimática 6.	62
Figura 40 – Dados históricos de temperaturas médias, máxima e mínima de Uberlândia (MG).	63
Figura 41 – Betoneira utilizada na pesquisa.	68
Figura 42 - Transporte, preenchimento das formas, adensamento e acabamento.	69
Figura 43 – Moldagem dos corpos de prova.	70
Figura 44 – Ensaio de abatimento do tronco de cone.	70
Figura 45 – Ensaio de teor de ar no estado fresco.	71
Figura 46 – Dimensões das placas de concreto.	72
Figura 47 – Ensaio de Resistência à compressão.	72
Figura 48 – Câmara climatizada do laboratório da FECIV-UFU.	73
Figura 49 – Projeto da câmara climatizada do laboratório da FECIV-UFU.	74
Figura 50 – Distribuição dos termopares nas placas.	75
Figura 51 – Cobre/constantan.	75
Figura 52 – Sistema de aquisição de dados (HBM) de 8 canais para termopares.	76
Figura 53 – Conectores para termopares.	76
Figura 54 – Esquema de montagem do ensaio.	77
Figura 55 – Ensaio de desempenho térmico.	78
Figura 56 – Computador e aquisição de dados.	78
Figura 57 – (a) Sistema “Sitrad” e (b) Sistema Catmam.	79
Figura 58 – Resultados de abatimento de tronco de cone.	81
Figura 59 – Resultados das médias dos teores de ar.	82
Figura 60 – Resultados das médias de massa específica.	83
Figura 61 – Relação: massa específica x teor de ar.	84
Figura 62 – Variação da massa específica e teor de ar em função do teor de aditivo de Santos (2012).	84
Figura 63 – Resistência à compressão obtida nos ensaios aos 7 dias e 28 dias para os diferentes teores de aditivos estudados.	87
Figura 64 – Resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto de Santos (2012).	88
Figura 65 – Módulo de elasticidade obtido nos ensaios aos 7 dias e 28 dias para os diferentes teores de aditivos estudados.	89
Figura 66 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto de Santos (2012).	90
Figura 67 – Variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	91
Figura 68 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	92
Figura 69 – Variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	93
Figura 70 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	93
Figura 71 – Variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	94

Figura 72 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	95
Figura 73 – Variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	95
Figura 74 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita. .	96
Figura 75 – Variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	97
Figura 76 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	97
Figura 77 – Variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.	98
Figura 78 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita. .	99
Figura 79 – Gráfico: massa específica x condutividade.	100

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Número de unidades habitacionais em construção ou em fase de projeto em Ituiutaba e Uberlândia em 2013.....	3
Tabela 2 – Dosagem e características dos concretos leves na pesquisa do autor Araújo et al (2014).....	35
Tabela 3 – 1 ^a Dosagem de traços para estudo do CAD para ambientes com baixas temperaturas na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009).....	38
Tabela 4 – Resistência à compressão simples na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009).....	38
Tabela 5 – 2 ^a Dosagem de traços para estudo do CAD para ambientes com baixas temperaturas na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009).....	39
Tabela 6 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009)	40
Tabela 7 – Resultado de teor de ar na pesquisa do autor Da Rosa (2013).	41
Tabela 8 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone na pesquisa do autor Da Rosa (2013).....	43
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto na pesquisa do autor Da Rosa (2013).....	43
Tabela 10 – Valores de condutividade térmica do concreto.....	54
Tabela 11 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.	56
Tabela 12 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.	57
Tabela 13 – Métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos.....	57
Tabela 14 – Critérios de cobertura quanto à transmitância térmica – M.....	58
Tabela 15 – Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U).....	60
Tabela 16 – valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica (CT).....	61
Tabela 17 – Critérios para ventilação.....	61
Tabela 18 – Dados históricos de temperaturas médias e umidade relativa do ar na cidade de Uberlândia (MG).	63
Tabela 19 – Cálculo estatístico da quantidade de amostras.....	65
Tabela 20 – Resultados da caracterização do aglomerante.	65
Tabela 21 – Resultados da caracterização do agregado miúdo.	66
Tabela 22 – Resultados da caracterização do agregado graúdo.	66
Tabela 23 – Propriedades do aditivo incorporador de ar.....	67
Tabela 24 – Resultados obtidos no estado fresco.	80
Tabela 25 – Resultados obtidos no estado endurecido.	86
Tabela 26 – Resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto.	88

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2 OBJETIVO.....	5
1.2.1 Objetivo geral	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2	7
SISTEMAS CONSTRUTIVOS	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 SISTEMAS CONSTRUTIVOS INOVADORES	8
2.2.1 Alvenaria estrutural.....	8
2.2.2 Aço leve galvanizado na construção rápida.....	10
2.2.3 Paredes de gesso acartonado (dry wall)	11
2.2.4 Sistema “tilt up” (paredes pré-moldadas)	13
2.2.5 Paredes de concreto	14
2.2.5.1 Prescrições normativas sobre paredes de concreto	21
2.2.5.2 Tipos de concreto empregados no sistema construtivo	23
2.2.5.3 Aditivos químicos	26
2.2.5.4 Incorporação de ar no concreto.....	28
2.2.5.5 Propriedades do concreto com ar incorporado	31
2.2.5.6 Condições de mistura dos materiais.....	33
2.2.5.7 Pesquisa com aditivo incorporador de ar.....	33
CAPÍTULO 3	45
DESEMPENHO TÉRMICO	45
3.1 DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES.....	45
3.2 ZONAS BIOCLIMÁTICAS	46
3.3 CONCEITOS DA TERMODINÂMICA	47
3.4 DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES DE CONCRETO	53
3.5 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS SOBRE CONFORTO TÉRMICO	56
3.6 ZONA BIOCLIMÁTICA DA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO.....	62
CAPÍTULO 4	64
PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	64
4.1 METODOLOGIA	64
4.2 MATERIAIS	65
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	67
4.3.1 Introdução	67

4.3.2	Produção do concreto.....	68
4.3.3	Transporte, moldagem e cura dos corpos de prova e placas de concreto	69
4.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	70
4.4.1	Consistência	70
4.4.2	Teor de ar.....	71
4.4.3	Massa específica	71
4.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	71
4.5.1	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	72
4.5.2	Procedimento experimental para avaliação do desempenho térmico	73
4.5.2.1	Experimentação	75
4.5.2.2	Sistema de medição de temperatura.....	76
4.5.2.3	Montagem do aparato experimental	76
4.5.2.4	Procedimento de medição.....	77
CAPÍTULO 5		80
RESULTADOS E ANÁLISES		80
5.1	INTRODUÇÃO.....	80
5.2	RESULTADOS NO ESTADO FRESCO.....	80
5.3	RESULTADOS no estado endurecido	85
5.3.1	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	85
5.3.2	Desempenho térmico	91
CAPÍTULO 6		101
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		101
6.1	CONCLUSÕES.....	101
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS		103

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) é um programa do Governo Federal, gerido pelo Ministério das Cidades e operacionalizado pela Caixa Econômica Federal (CEF). O PMCMV foi lançado em março de 2009 com a finalidade de criar mecanismo de incentivo à produção e aquisição de 1 milhão de novas unidades habitacionais, atualmente, em 2014, esta meta é de 2 milhões de novas moradias para as famílias com renda bruta mensal de até R\$ 5.000,00 reais.

Na Figura 1 pode-se observar os números do PMCMV desde o início do programa, em 2009, até julho de 2015, de acordo com a Caixa Econômica Federal.

Figura 1 – Dados do PMCMV desde o início do programa, em 2009, até julho de 2015.



Fonte: <http://mcmv.caixa.gov.br/numeros/>

Considerando o déficit habitacional brasileiro e a implantação de políticas públicas para o financiamento e subsídio de programas habitacionais de interesse social, as empresas do setor da construção civil estão sendo obrigadas a melhorar a qualidade do produto final e

dar maior atenção ao planejamento e controle da produção das edificações. No ano de 2008, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aprovou a primeira versão da norma então intitulada como “Desempenho de Edificações”, com a finalidade de indicar requisitos para as edificações de acordo com as condições mínimas de conforto, habitabilidade e uso. Desde o ano de 2008, a norma passou por reformulações e consultas públicas, vindo a entrar em vigência no dia 19 de julho de 2013 com o nome de NBR 15575 – Edifícios Habitacionais – Desempenho. Com a vigência da norma, os produtos de baixa qualidade entregues aos consumidores podem ocasionar problemas judiciais às construtoras, tornando-se útil aos consumidores por estabelecer os parâmetros de conforto das edificações habitacionais, comerciais e de serviços.

Assim, a ABNT NBR 15575:2013 tem levado profissionais de engenharia e arquitetura a buscar o conforto térmico e acústico em seus projetos, por meio da utilização de sistemas construtivos e materiais que apresentam desempenho adequado nas edificações.

A necessidade de melhorar o desempenho e de acelerar o processo de produção, reduzindo a mão de obra que se encontra escassa no mercado, as construtoras começaram a buscar novos métodos construtivos. Tentando reduzir ainda o caráter artesanal do setor da construção civil, surgiu-se o método *Tilt-up*, em que as paredes são construídas na horizontal em uma plataforma já com todas as instalações elétricas e hidráulicas, e então erguidas para sua posição final.

Já nos últimos anos, surgiu um novo sistema, chamado de Parede de Concreto, que vêm conquistando o mercado. De acordo com Santos (2012), desde 2007 a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a Associação Brasileira de Serviços de Concretagem (ABESC) e o Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (IBTS) introduziram no movimento Comunidade da Construção um debate sobre as edificações feitas com paredes de concreto moldadas no local, cujo sistema construtivo recebeu o nome de PAREDE DE CONCRETO.

Essas três intuições, associadas a quatorze grandes empresas, formaram o Grupo Parede de Concreto em 2007 com o intuito de difundir o sistema construtivo foram publicados documentos chamados Coletânea de Ativos: Paredes de Concreto. Estes documentos apresentam ao setor da construção civil o novo sistema construtivo, contemplando informações, como por exemplo, a avaliação do sistema de acordo com a norma de

desempenho (SANTOS, 2012). E entrou em vigência no dia 10 de maio de 2012 a ABNT NBR 16055 – Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e Procedimentos. Antes da aprovação da norma, o sistema construtivo seguia as diretrizes do Sistema Nacional de Aprovações Técnicas (SINAT) e as empresas que pretendessem utilizá-lo teriam que obter o Documento de Avaliação Técnica (DATec).

De acordo com a CEF¹, em 2013 estavam sendo construídas ou em fase de projeto em Uberlândia e Ituiutaba 3340 unidades habitacionais utilizando o sistema paredes de concreto, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Número de unidades habitacionais em construção ou em fase de projeto em Ituiutaba e Uberlândia em 2013.

Empreendimentos	Construtora	Cidade	Nº de Unidades	Percentual de Obra
Res. Gilca Vilela Cancella	Realiza	Ituiutaba	364	86,93
Res. Tocantins I	HLTS	Uberlândia	288	32,11
Res. Tocantins II	HLTS	Uberlândia	288	32,45
Córrego do Óleo - lote 01	Marca Registrada	Uberlândia	192	Não iniciada
Córrego do Óleo - lote 06	Marca Registrada	Uberlândia	288	Não iniciada
Córrego do Óleo - lote 02	Libe	Uberlândia	288	Não iniciada
Córrego do Óleo - lote 03	Libe	Uberlândia	288	Não iniciada
Córrego do Óleo - lote 04	Libe	Uberlândia	288	Não iniciada
Córrego do Óleo - lote 05	Libe	Uberlândia	256	Não iniciada
Res. Nova Ituiutaba II	Elglobal	Ituiutaba	361	26,25
Res. Nova Ituiutaba IV	Elglobal	Ituiutaba	439	25,94

Fonte: Caixa Econômica Federal

O PMCMV ampliou os empreendimentos na cidade de Uberlândia e no final de 2014 foi iniciada a construção de 5200 casas em glebas da Fazenda Eldorado.

Segundo Santos (2012), as paredes de concreto na maioria das vezes são moldadas utilizando concreto com ar incorporado, que apresentam um desempenho satisfatório tanto no isolamento térmico quanto no isolamento acústico, como em relação à durabilidade para concretos com baixa resistência.

¹ CEF. Dados enviados pela Caixa Econômica Federal via correio eletrônico em 16 de abril de 2014.

É fundamental que o conforto térmico das edificações seja pensado durante a fase de projeto da edificação para não tornar mais onerosa ou impossível a sua adequação as condições mínimas de conforto ambiental.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do estudo proposto neste trabalho é avaliar, por meio de uma pesquisa experimental, o desempenho térmico do concreto com ar incorporado, quando submetido à variação de temperaturas no período de inverno, visando a sua utilização em paredes de concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

De acordo com o objetivo principal foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e avaliar as propriedades dos concretos no estado fresco tais como a massa específica, teor de ar e abatimento;
- Analisar e avaliar as propriedades dos concretos no estado endurecido como a resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- Determinar e analisar o desempenho térmico do concreto com alguns teores de ar.

1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação a ser apresentada será constituída de 7 capítulos, organizados da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução: Faz-se uma breve explanação sobre a importância de se estudar o desempenho térmico de concretos com ar incorporado que vem sendo muito utilizado em paredes de concreto moldadas in loco.

Capítulo 2 – Sistemas construtivos: enfatiza a importância da utilização dos novos sistemas construtivos e apresentação dos mesmos. Apresentação das normas de paredes de concreto, as propriedades do concreto com ar incorporado e os tipos de aditivos incorporadores de ar e suas principais características.

Capítulo 3 – Desempenho térmico: Neste capítulo é apresentado as principais informações sobre desempenho térmico e as normas sobre este tema.

Capítulo 4 – Programa experimental: Neste capítulo foi apresentado o programa experimental, os materiais, equipamentos e métodos dos ensaios.

Capítulo 5 – Análises e resultados: Serão apresentados os resultados dos experimentos, as análises e discussões.

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros: Apresentação das conclusões obtidas do programa experimental e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS CONSTRUTIVOS

2.1 INTRODUÇÃO

O crescimento da indústria nos últimos anos têm trazido dificuldades no setor da construção civil para contratação de mão de obra qualificada, por isto, grande parte dos trabalhadores provém de outras áreas, como por exemplo, da agricultura. E o maior problema, é que estes trabalhadores recebem pouco ou nenhum treinamento, gerando como consequência baixa produtividade e má qualidade do serviço, caminhando em sentido contrário, por exemplo, ao desejado pelo PBQP-H, que é um programa criado pelo Ministério das Cidades com o objetivo de melhorar estes desempenhos, mas que muitas empresas do setor, apesar de serem certificadas, não o colocam em prática (LEITE, 2013).

É necessário, ao iniciar a elaboração de um projeto, ter em mente a infinidade de situações possíveis de serem propostas em termos de sistemas construtivos. Atualmente são vários os sistemas construtivos utilizados em obras de habitações de interesse social no Brasil. Dentre eles estão os sistemas convencionais, cujos principais elementos são executados no canteiro de obra e suas técnicas construtivas e materiais são tradicionais; os sistemas construtivos racionalizados, em que alguns elementos são pré-moldados e a montagem ocorre no local da obra, utilizando técnicas convencionais; além dos sistemas industrializados, em que grande parte dos elementos são transportados da fábrica para o local da obra, onde ocorre somente sua montagem e acabamento.

Os sistemas construtivos utilizados na produção das vedações na maioria das obras brasileiras apresentam um elevado desperdício de mão de obra, componentes e materiais, devido ao emprego de técnicas não racionalizadas. Por isso, para atender a demanda de construção de moradias de interesse social do PMCMV e outras obras, as empresas de construção civil devem, progressivamente, incorporar inovações tecnológicas (LEITE, 2013).

2.2 SISTEMAS CONSTRUTIVOS INOVADORES

2.2.1 Alvenaria estrutural

De acordo com a CEF, o emprego da alvenaria estrutural de suporte em edificações vem sendo largamente ampliado, principalmente por possibilitar redução nos custos de produção das unidades habitacionais. Na Figura 2 pode ser observada a construção de um edifício em alvenaria estrutural.

Figura 2 – Construção em alvenaria estrutural.



Fonte: <http://www.pdg.com.br/imovel>.

Para a empresa MZM Incorporadora e Construtora (2013), a alvenaria estrutural quando comparada ao concreto armado permite uma redução de aproximadamente 15% no custo total da obra e prazo de execução até 20% menor, entretanto a execução da alvenaria estrutural pode ser prejudicada em caso de chuva, pois em dias chuvosos fica inviável o assentamento de blocos; enquanto no caso de obras de concreto armado, o serviço de carpintaria continuaria produzindo. A alvenaria estrutural também possui ótima resistência ao fogo e bom desempenho quanto ao isolamento térmico e acústico.

A alvenaria estrutural resulta da colocação em arranjos específicos de peças industrializadas, de dimensões e peso de fácil manuseio, ligadas entre si através de juntas de argamassa para formar os elementos de alvenaria (produtos da construção), que formam um conjunto monolítico. A alvenaria estrutural pode ser formada por bloco cerâmico e bloco de concreto, a Figura 3 ilustra a utilização destes materiais neste sistema construtivo.

Figura 3 – Alvenaria estrutural com bloco cerâmico e bloco de concreto.

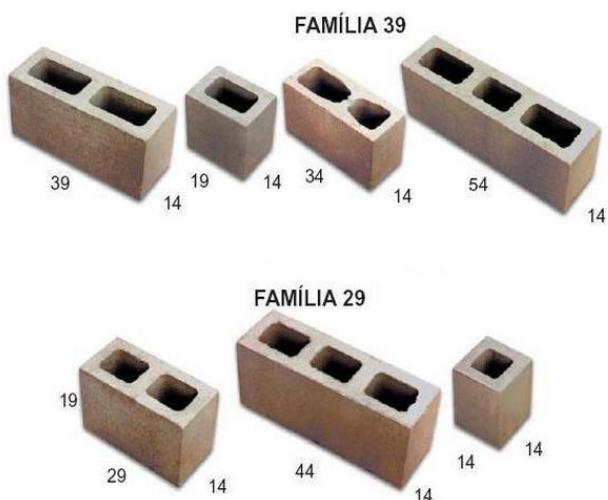


Fonte: <http://www.ufrgs.br/alvenaria-estrutural/>.

No sistema convencional de construção, as paredes apenas fecham os vãos entre pilares e vigas, encarregados de receber o peso da edificação. Na alvenaria estrutural, as paredes distribuem a carga uniformemente ao longo da fundação e os elementos que desempenham a função estrutural são os próprios blocos, que geralmente são de concreto.

Os blocos de concreto são componentes obtidos a partir de uma dosagem racional de cimento, areia, pedrisco, pó de pedra e água. A Figura 4 ilustra alguns dos blocos de concreto mais empregados na alvenaria estrutural.

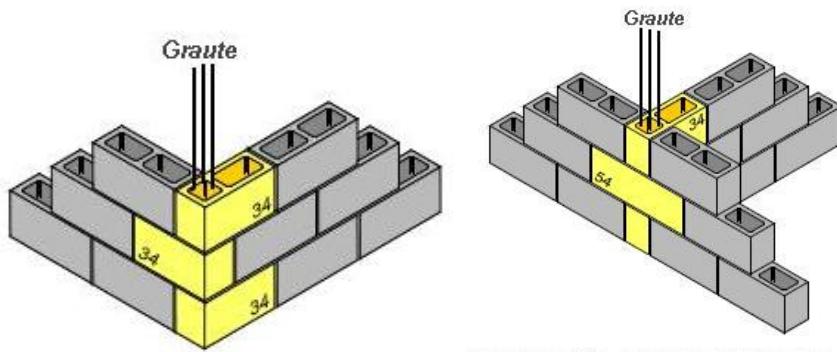
Figura 4 – Blocos de concreto mais empregados na alvenaria estrutural.



Fonte: <http://www.ufrgs.br/alvenaria-estrutural/>.

Em alguns casos, armaduras podem ser incorporadas nas juntas de assentamentos ou no graute, dentro dos furos dos blocos para realizar uma alvenaria armada, a qual apresenta maior resistência a determinadas solicitações. Na Figura 5 pode ser visto exemplo de amarração de parede de alvenaria estrutural em “L” e “T” utilizando graute em blocos de concreto.

Figura 5 – Amarração de parede de alvenaria estrutural em “L” e “T” utilizando graute em blocos de concreto.



Fonte: <http://www.ufrgs.br/alvenaria-estrutural/>.

A concepção estrutural limita a destinação do edifício e condiciona à necessidade de paredes internas enrijecedoras, subdividindo o espaço em cômodos de dimensões relativamente pequenas. E o usuário não tem a mesma possibilidade de remover paredes a fim de se aumentar um determinado ambiente, como no caso de uma estrutura reticulada.

2.2.2 Aço leve galvanizado na construção rápida

Segundo Leite (2013), a disponibilização, a partir de 2005, pelas indústrias siderúrgicas brasileiras, de perfis de aço leve galvanizados, viabilizou a construção de moradias populares através da montagem das estruturas com perfis metálicos, aumentando a velocidade de execução, com preços competitivos diante das demais alternativas.

As Estruturas de Aço Leve (Light Steel Framing) conhecidas por LSF estão cada vez mais sendo uma alternativa procurada no mercado da construção. A designação de LSF surge do fato de que as peças serem fabricadas a partir de chapa de aço galvanizado, com baixa espessura. Neste tipo de sistema construtivo o aço é o elemento mais representativo da

estrutura. Esta é uma solução já muito procurada noutros países mais desenvolvidos e vem ganhando espaço no Brasil (ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, 2014).

Na Figura 6 pode ser visto uma construção com o sistema construtivo Estruturas de Aço Leve.

Este tipo de estrutura quando comparado com as estruturas de concreto armado, apresenta redução de até 60% do tempo de execução, maior organização do canteiro de obras e racionalização de materiais e mão de obra (STEEL FRAMING, 2014).

Figura 6 – Construção com o sistema construtivo Estruturas de Aço Leve.



Fonte: <http://www.engenhariaeconstrucao.com/vantagens-do-sistema>.

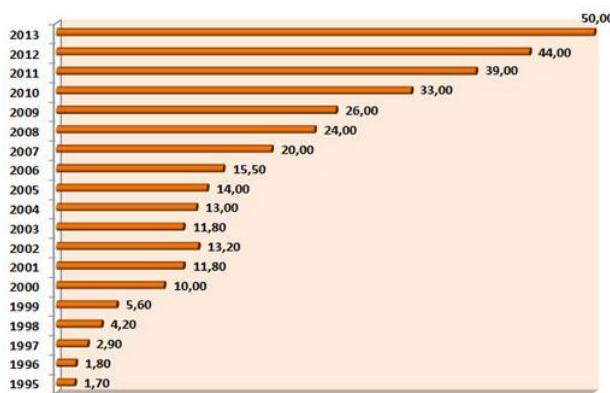
A grande dificuldade deste sistema construtivo no Brasil, ainda é a dificuldade de obtenção de mão de obra qualificada e o custo, mesmo que o prazo de execução seja menor.

2.2.3 Paredes de gesso acartonado (dry wall)

Embora existente nos Estados Unidos e Europa há cerca de 80 anos, o uso de paredes de gesso acartonado no Brasil é relativamente recente, com utilização mais significativa a partir dos anos 90. De acordo com dados da Associação Brasileira dos Fabricantes de Chapas, o consumo nacional de chapas de drywall subiu de 1,7 milhões de metros quadrados em 1995 para 50 milhões de metros quadrados em 2013, conforme apresentado

na Figura 7, dado este que demonstra a intensificação do uso das paredes de gesso acartonado na construção civil brasileira.

Figura 7 – Consumo histórico anual de chapas para drywall no Brasil (milhões de m²).



Fonte: <http://www.drywall.org.br/>

O gesso acartonado, ilustrado na Figura 8, é um material leve que permite a diminuição de cargas nas fundações e estruturas quando utilizado como paredes e forros, permite instalações elétricas, hidráulicas e de telefone no interior das paredes. Este sistema construtivo também apresenta bom desempenho térmico e acústico; e elevada resistência ao fogo (CLIQUE ARQUITETURA, 2014).

Figura 8 – Casa de gesso acartonado.



Fonte: <http://construindo.org/gesso-acartonado/>

Paredes de gesso acartonado são menos resistentes a impactos em comparação com paredes de tijolos cerâmicos e requerem um cuidado maior para colocação de prateleiras e quadros, por exemplo. Além disso é necessário um profissional especializado para a execução deste tipo de serviço.

2.2.4 Sistema “tilt up” (paredes pré-moldadas)

O sistema “tilt up” foi reconhecido no início do século 20 como um método construtivo, que significa “colocar de pé”. O arquiteto americano Robert Ai Ken, foi o precursor do sistema, utilizando na fachada da Igreja Metodista em Zion-Illinois, nos Estados Unidos em 1909 (ROSALES, 2003).

O sistema construtivo "tilt-up" é um sistema construtivo estrutural baseado na execução de paredes pré-moldadas em concreto armado, moldadas na própria obra, em superfície extremamente plana e sem imperfeições para este fim, utilizando fôrmulas. A Figura 9 ilustra o processo de fabricação de paredes deste sistema.

Figura 9 – Fabricação de paredes do sistema “tilt-up”.



Fonte: www.cobraviconstrutora.com.br/conteudo.

Este tipo de sistema construtivo elimina a necessidade de montagem de andaimes, pode ser executado em menor tempo, a estruturas são facilmente modificadas para ampliação e possuem longa durabilidade. As dificuldades deste sistema construtivo é a falta de mão de obra qualificada, a necessidade de equipe para içamento e de grande espaço disponível no canteiro de obra para moldagem das peças (ROSALES, 2003).

Na Figura 10 pode ser observado o içamento e a estrutura final de edificações que utilizaram o Sistema “tilt-up”.

Figura 10 – Sistema “tilt up”.



Fonte: www.cobraviconstrutora.com.br/conteudo.

Para projetar em tilt-up, é preciso atender as normas brasileiras para pré-moldados e para concreto armado e a norma americana específica para o sistema (ACI-318). Os painéis são executados com f_{ck} de 25 MPa e aço CA-50, com dimensões médias de 5 m x 18 m e com espessura mínima de 12 cm.

2.2.5 Paredes de concreto

De acordo com a Coletânea de Ativos (2007/2008), o sistema parede de concreto vem conquistando o mercado brasileiro. Algumas das vantagens do sistema são: velocidade de execução, industrialização do processo, maior controle de qualidade, redução de etapas e qualificação da mão de obra. O sistema pode ser utilizado em diferentes tipos de edificações. Países como Colômbia e México, por exemplo, já construíram edifícios com até 25 pavimentos. No Brasil, construtoras como, por exemplo, Trisul e Sergus já construíram edifícios de múltiplos pavimentos no estado de São Paulo utilizando como sistema construtivo paredes de concreto moldadas in loco em fôrmas de alumínio ou painéis de aço, como os das obras ilustradas na Figura 11.

Figura 11 – Edifícios de múltiplos pavimentos no Brasil com paredes de concreto moldadas in loco.



Fonte: <http://engemix.com.br/>.

Também estão sendo construídas muitas casas térreas com paredes de concreto moldadas in loco. A Figura 12 ilustra a construção de uma casa de Parede de Concreto no Conjunto Nova Ituiutaba II.

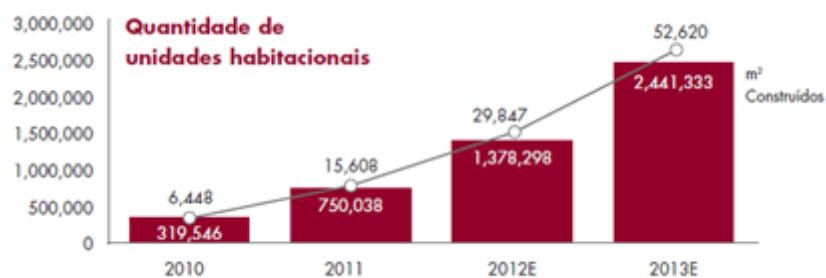
Figura 12 – Casa de paredes de concreto moldadas in loco.



Fonte: Autor.

Desde 2010, o número de construtoras que adota o sistema parede de concreto vem aumentando. Parede de concreto gradativamente está substituindo obras que antes eram executadas em alvenaria. Vale ressaltar que a perspectiva é ainda mais promissora que os números apresentados, pois há uma tendência de adoção de parede de concreto pelas construtoras de porte médio. Na figura 13 pode ser observado como vem aumentando a quantidade de unidades habitacionais que utilizam o sistema parede de concreto.

Figura 13 – Número de unidades habitacionais térreas construídas em parede de concreto por 9 grandes construtoras no período de 2010 à 2013.



Fonte: Coletânea de Ativos (2013).

Na Revista Téchne (2009) são relacionados os seguintes benefícios para o sistema paredes de concreto:

- Velocidade de execução;
- Prazos de entrega e custos programados;
- Industrialização do processo;
- Maior qualidade e desempenho técnico;
- Economia de material;
- Mão de obra especializada.

O sistema construtivo de paredes de concreto está inserido no grupo de construção industrializada e racionalizada que visa produtividade, diminuição dos prazos de entrega das obras, minimização de custos e melhoria da qualidade. O sistema construtivo Paredes de Concreto Armado, quando comparado aos sistemas convencionais, representam uma

diminuição considerável das etapas construtivas como, por exemplo, chapisco, emboço e reboco. Além, da eliminação da necessidade de execução das alvenarias (assentamento).

Neste sistema as paredes de concreto possuem uma dupla função: a de servir como elemento estrutural e de vedação simultaneamente. Estas paredes são moldadas “in loco”, sendo as instalações elétricas e hidráulicas instaladas previamente, ou seja, posicionados no interior da fôrma antes da concretagem, nos locais previstos em projeto (SILVA, 2013).

Para a execução das paredes de concreto é utilizado um conjunto de fôrmas de alumínio que permite a produção em larga escala em um curto espaço de tempo. O objetivo das fôrmas é permitir que o concreto seja moldado conforme o projeto da edificação, para isto suas peças devem estar devidamente no lugar para assegurar a geometria, a resistência e a pressão provocada no ato do lançamento do concreto, até o endurecimento do mesmo (SILVA, 2013).

De acordo com Silva (2013) para a produção das unidades a obra se transforma em uma linha de montagem, como a do modelo “Toyota” de produção. As equipes são separadas de acordo com o serviço a ser executado.

A primeira etapa da obra é a limpeza e a terraplanagem do terreno. Logo depois é feita a execução da fundação, que é específica de cada projeto. A Figura 14 ilustra a execução da fundação do tipo radier, geralmente utilizada na construção de habitações térreas, porém pode variar de acordo com o terreno em questão.

Figura 14 – Fundação do tipo radier.



Fonte: Silva (2013).

A fundação tipo radier tem a vantagem de proporcionar uma base de trabalho apropriada para montagem das fôrmas e instalações, além de permitir, por exemplo, o posicionamento da rede de esgoto (ABCP, 2002).

Depois de concluída a fundação, a obra é liberada para a equipe responsável pela montagem das armaduras na forma de uma malha que é distribuída em todas as paredes.

A próxima etapa é colocação dos eletrodutos para as instalações elétricas e hidráulicas e os espaçadores plásticos que irão garantir o posicionamento das telas e a geometria dos painéis. Na Figura 15 pode ser observado o processo de armação e montagem das instalações elétricas e hidráulicas.

Figura 15 – Armação e montagem das instalações elétricas e hidráulicas.



Fonte: Autor.

O sistema de fôrmas é composto por estruturas provisórias que deve moldar o concreto fresco. É compreendido por painéis de fôrmas, escoramento, cimbramento, aprumadores e andaimes, incluindo os seus apoios, bem como a união entre os diversos elementos. As fôrmas podem ser metálicas, de madeira, de plástico ou outro tipo. Deve-se tomar o cuidado na escolha de um desmoldante que garantirá que o concreto não tenha aderência à fôrma e que não altere as características físicas e químicas do concreto (ABNT NBR 16055:2012). A Figura 16 ilustra o processo de montagem das formas.

Figura 16 – Montagem das formas.



Fonte: Autor.

Atualmente para esse sistema construtivo estão disponíveis no mercado três sistemas de fôrmas, sendo eles:

Sistemas de fôrmas de madeira tradicional e racionalizado: os elementos constituintes das fôrmas são compostos basicamente por peças de madeira, montados e desmontados individualmente, ocasionando um grande consumo de material e desperdício de mão de obra (LORDSLEEM JUNIOR, 1998).

Sistema de fôrmas metálicas: nesse caso os componentes são metálicos e são desenvolvidos com o objetivo de multiplicar o número de usos de um mesmo painel, racionalizando a utilização de fôrmas. As mais utilizadas são de aço e alumínio.

Sistema de fôrmas mistas: neste sistema chapas de madeira compensada compõem o molde, enquanto a estrutura do molde incorpora componentes metálicos. A Figura 17 ilustra a montagem de fôrmas mistas para parede de concreto moldada in loco.

Figura 17 – Fôrmas mistas para parede de concreto moldada in loco.



Fonte: <http://www.ufrgs.br/eso/content/?tag=concreto-armado>.

Geralmente, neste sistema construtivo é utilizado concreto autoadensável, que é justificado pela necessidade de um material com maior fluidez e trabalhabilidade, não necessitando o uso do vibrador para adensamento. Pode ser utilizado aditivo incorporador de ar para proporcionar melhores condições térmica e acústica para atender os requisitos de desempenho presentes na ABNT NBR 15575:2013 (SILVA, 2013).

O lançamento do concreto nas fôrmas pode ser feito utilizando caçambas içadas por guindastes ou bombeamento. É necessário nos dois casos que o concreto apresente trabalhabilidade adequada para o lançamento.

Depois de concluída a etapa de concretagem dos painéis obtêm-se todas as vedações e estrutura da edificação, com as esquadrias e a parte dos sistemas elétricos e hidráulicos já instalados. A Figura 18 ilustra o processo de retirada das formas e montagem do telhado.

Figura 18 – Processo de retirada das formas e montagem do telhado.



Fonte: Autor.

A cobertura pode ser feita com de telhas de concreto, cerâmicas ou metálicas. E a estrutura pode ser de madeira ou pré-fabricada, acelerando o processo de execução. A pintura é feita diretamente sobre a parede de concreto. A Figura 19 ilustra uma casa de parede de concreto em fase de acabamento.

Figura 19 – Casa de parede de concreto em fase de acabamento.



Fonte: Autor.

De acordo com a complexidade do projeto e da equipe disponível, a montagem de todos os painéis (montagem de fôrmas, armaduras, instalações e concretagem) pode ocorrer em apenas 24 horas em média.

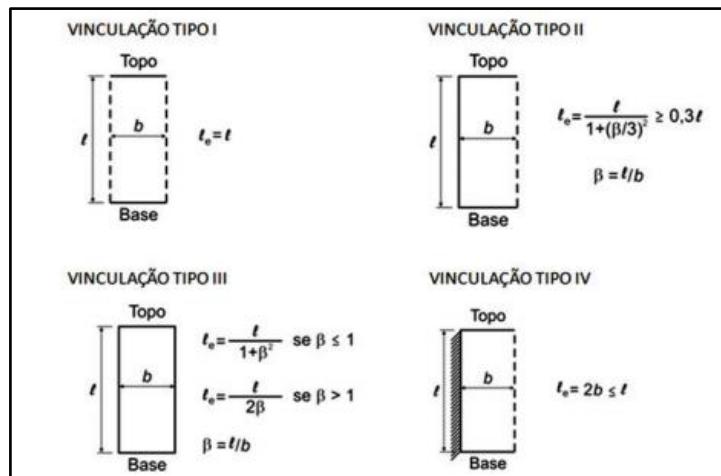
2.2.5.1 Prescrições normativas sobre paredes de concreto

A ABNT NBR 16055:2012, estabelece os requisitos mínimos para paredes de concreto moldadas in loco, com fôrmas removíveis. A norma se aplica às paredes submetidas à carga axial, com ou sem flexão, concretadas com todos os elementos que farão parte da sua construção final, como fachada, instalações (elétricas e hidráulicas), quando embutidas, e considera as lajes incorporadas ao sistema por solidarização com as paredes, tornando o sistema monolítico.

De acordo com a ABNT NBR 16055:2012, o uso de aditivos químicos deve ser feito em conformidade com as Normas Brasileiras específicas (ABNT NBR 11768:2011 e ABNT NBR 12655:2015). Não podendo usar aditivos que possam atacar quimicamente as armaduras, em especial os aditivos à base de cloreto. Segundo a ABNT NBR 16055:2012,

a espessura mínima das paredes com altura de até 3 m deve ser de 10 cm. É permitido uma espessura de 8 cm apenas em paredes internas de edificações de até dois pavimentos. Para paredes com mais de 3 m de altura, a espessura mínima deve ser $l_e/30$, com l_e obtido de acordo com a Figura 20. A tolerância para a espessura das paredes é de ± 5 mm.

Figura 20 – Comprimento equivalente da parede (l_e).



Fonte: ABNT NBR 16055:2012

As recomendações e os critérios técnicos para a utilização do concreto com a incorporado (massa específica aparente no estado fresco inferior a 2000 kg/m³) no sistema construtivo de painéis monolíticos moldados in loco estão nas normas ABNT NBR 12645:1992 e ABNT NBR 12646:1992.

Quando não for utilizado concreto autoadensável devem ser tomados os seguintes cuidados:

- o adensamento deve permitir que o concreto preencha todos os espaços da fôrma sem prejuízo da aderência das armaduras;
- no caso de alta densidade de armadura, deve-se tomar o cuidado para que o concreto se distribua de forma homogênea;
- o enchimento da forma deve ser realizado sem a ocorrência de falhas por aprisionado, devendo ter dispositivos que permitam a saída deste ar.

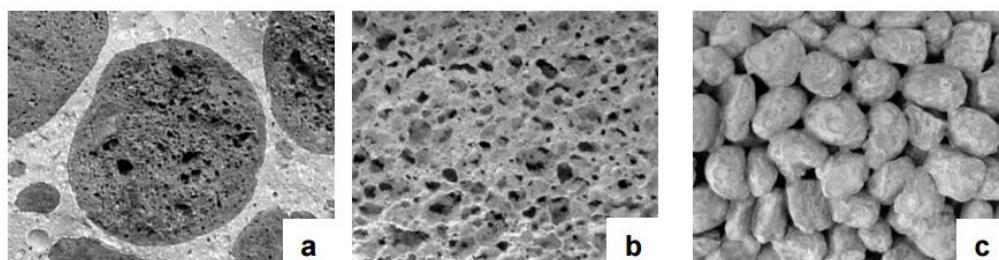
2.2.5.2 Tipos de concreto empregados no sistema construtivo

O concreto têm um papel fundamental na execução e no desempenho de painéis moldados in loco e usualmente são utilizados o concreto tradicional e o concreto leve celular.

O concreto tradicional, composto por cimento Portland, brita, areia e água, apesar de atender aos requisitos estruturais, pode apresentar algumas deficiências para aplicação nos painéis de vedação, em relação aos concretos leves, por exemplo, pode ocorrer um aumento das cargas na fundação e na estrutura da edificação, além de apresentar isolamento térmico e acústico inferior ao obtido para os concretos leves (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O concreto leve é definido como um concreto com menor massa específica do que os concretos convencionais. Essa diminuição da massa específica ocorre pela substituição de componentes sólidos da mistura por ar, que pode ser obtida pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves, pela incorporação de ar (concretos celulares) ou pela retirada de finos (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005). A Figura 21 ilustra os tipos de concreto leve.

Figura 21 – Tipos de concreto leve: (a) concreto com agregados leves, (b) concreto leve celular e (c) concreto sem finos.



Fonte: Rossignolo e Agnesini (2005).

No sistema construtivo parede de concreto, o concreto normal com densidade em torno de 2300 kg/m^3 pode ser utilizado para construção de casas térreas, sobrados e edifícios de multipavimentos, incluindo casas sobrepostas. Já o concreto com ar incorporado com densidade em torno de 2000 kg/m^3 só deve ser utilizado na construção de casas térreas, sobrados, incluindo casas sobrepostas e edifícios com térreo mais um pavimento. Os

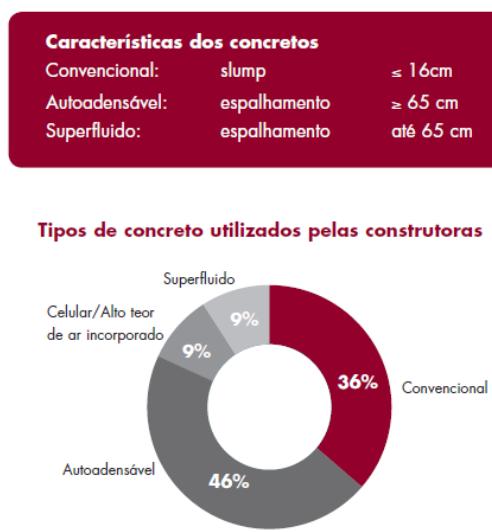
concretos comuns possuem massa específica da ordem de 2300 kg/m^3 e $f_{ck} \geq 20 \text{ MPa}$ e concretos com ar incorporado possuem massa específica inferior a 2000 kg/m^3 e $f_{ck} \geq 14 \text{ MPa}$ (SINAT, 2011).

A ABNT NBR 9778:2005 classifica o concreto de acordo com a sua massa específica:

- Concreto normal – C (entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3);
- Concreto leve – CL (inferior a 2000 kg/m^3);
- Concreto pesado ou denso – CD (superior a 2800 kg/m^3).

O concreto autoadensável é o mais utilizado para execução de paredes de concreto. Pois para este tipo de sistema construtivo, os concretos precisam de diversos tipos de aditivos para atender a diferentes requisitos como, por exemplo, trabalhabilidade e o tempo de desforma (COLETÂNEA DE ATIVOS, 2011/2013). A Figura 22 ilustra os tipos de concreto utilizados no sistema Paredes de Concreto.

Figura 22 – Tipos de concretos utilizados no sistema Parede de Concreto.



Fonte: Coletânea de Ativos (2011/2013).

O concreto com alto teor de ar incorporado é constituído de cimento Portland, areia, brita, água e espumas ou agentes incorporadores de ar. As bolhas de ar incorporadas na matriz de cimento ocasionam a redução da massa específica do concreto para valores entre 1300 e

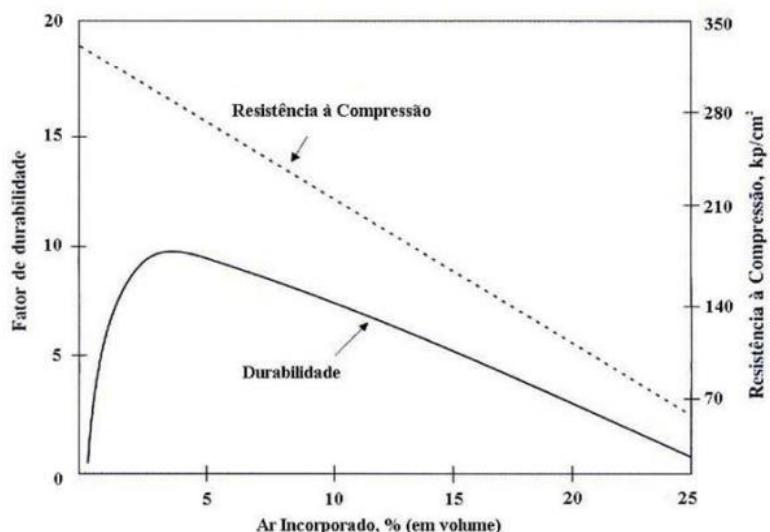
1900 kg/m³ e aumenta significativamente a porosidade do concreto, reduzindo sua resistência mecânica (SATCH, 2008).

Em um empreendimento do PMCMV, em 2014, com o sistema Paredes de Concreto, as paredes foram executadas com concreto autoadensável de 25 MPa. Segundo o engenheiro residente, para cada 1 m³ de concreto, utiliza-se: 856 kg de brita, 378 kg de areia média, 576 kg de areia fina, 340 kg de cimento CP V, 266 litros de água, 1 litro de aditivo superplastificante e 0,30 kg de fibra de polipropileno.

Nos sistemas construtivos que são utilizados concretos com ar incorporado, deve-se fazer uma avaliação da exposição à agressividade ambiental demonstrando o potencial de resistência do concreto a agentes agressivos mais comuns, como carbonatação e penetração de cloretos, quando são empregadas armaduras metálicas. Caso sejam utilizadas armaduras com fibras não metálicas, deve ser verificada a compatibilidade do material da fibra com o concreto, ou seja, com os álcalis do cimento (SINAT, 2011).

Em relação à durabilidade, observa-se na Figura 23, que a partir de certo limite ótimo de teor de ar incorporado, algo próximo de 4%, a porosidade reduz significativamente o desempenho e durabilidade dos concretos (MARTIN, 2005). Com isso, a aplicação estrutural do concreto celular necessita de cuidados especiais para a proteção da armadura (NEVILLE, 1997).

Figura 23 – Influência do ar incorporado na durabilidade do concreto.



Fonte: Martin (2005).

2.2.5.3 Aditivos químicos

De acordo com o IBRACON (2005), a indústria do concreto está em evolução, tendo os aditivos um protagonismo destacado. Os aditivos têm sido empregados desde o Império Romano, quando foram utilizados sangue e clara de ovo na fabricação de concretos feitos a base de cal e pozolanas.

Na ASTM C 125 o aditivo é definido como sendo qualquer material – que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras – usado na dosagem do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A indústria química têm produzido aditivos para concreto que permitem obter concretos com as características requeridas pelos usuários, bem como fabricar concretos mais duráveis e aumentar o rendimento da sua produção. A importância que tem adquirido a utilização dos aditivos na elaboração do concreto tem resultado que, atualmente, as normas internacionais o consideram como um dos componentes do mesmo (IBRACON, 2005).

Segundo o IBRACON (2005), os aditivos utilizados corretamente permitem as ações descritas a seguir:

- a) Modificar ou melhorar:
 - a trabalhabilidade e diminuir a segregação;
 - a pega e o endurecimento do cimento;
 - o conteúdo de ar ou outros gases no concreto;
 - aumentar a durabilidade; e
 - a resistência mecânica do concreto, em suas diferentes idades.
- b) Obter uma regularidade da fabricação do concreto ou argamassa e especialmente na sua qualidade.
- c) Ampliar o campo de aplicação do concreto.

- d) Diminuir o custo do concreto por aumentar o rendimento, por facilitar a colocação em obra e por permitir a retirada de formas em períodos mais curtos de tempo, etc.

Conforme a ABNT NBR 11768:2011, os aditivos são classificados em:

- a) tipo P - aditivo plastificante;
- b) tipo R - aditivo retardador;
- c) tipo A - aditivo acelerador;
- d) tipo PR - aditivo plastificante retardador;
- e) tipo PA - aditivo plastificante acelerador;
- f) tipo IAR - aditivo incorporador de ar;
- g) tipo SP - aditivo superplastificante;
- h) tipo SPR - aditivo superplastificante retardador;
- i) tipo SPA - aditivo superplastificante acelerador.

De acordo com o IBRACON (2005), a eficácia de cada aditivo depende de vários fatores:

- a) Por parte do cimento:
 - ✓ Tipo de cimento e quantidade;
 - ✓ Composição do clínquer, especialmente conteúdo de C_3A e C_3S ;
 - ✓ Adições: classe, características (composição química e/ou estrutural, finura, forma etc.) e quantidade;
 - ✓ Conteúdo de compostos alcalinos;
 - ✓ Conteúdo de gesso;
 - ✓ Finura;
 - ✓ Quantidade de cimento.
- b) Por parte dos agregados:
 - ✓ Tipo;

- ✓ Características: diâmetro máximo, granulometria, e conteúdo de finos, porosidade, forma etc.
- c) Por parte do aditivo:
 - ✓ Tipo;
 - ✓ Quantidade (dosagem).
- d) Outros fatores:
 - ✓ Fundamentalmente aqueles que afetam a cinética da hidratação do cimento (por exemplo, temperatura, condições seguidas para realizar a mistura etc.).

Por essas razões, segundo o IBRACON (2005), antes de utilizar um aditivo, é necessário caracterizar os materiais constituintes do concreto.

2.2.5.4 Incorporação de ar no concreto

Conforme relatado por Santos (2012), as bolhas de ar incorporado, considerada pelo autor como sendo o volume total de ar, podem ter duas origens:

- ✓ Natural, com a incorporação de pequenas quantidades de ar, disseminadas através de microbolhas no concreto. A incorporação natural pode ser ocasionada por vários fatores: tipo e finura dos aglomerantes e agregados miúdos, dosagem dos materiais, tipo e grau de adensamento aplicado, temperatura e tempo de mistura do concreto;
- ✓ Através de aditivos, se dá em casos especiais com os objetivos de redução do tamanho dos vazios de ar aprisionado (macrobolhas), aumento da trabalhabilidade do concreto, redução do consumo de cimento e melhoria da qualidade do concreto quanto à ação de gelo e degelo. Dentro de limites aceitáveis, para incorporações de até 6% através de aditivos, a cada incremento da incorporação de ar em 1% pode-se permitir a redução da água da mistura em até 3% e a porcentagem de areia em até 1% levando a melhorias na resistência mecânica do concreto.

Os aditivos químicos que incorporam ar no concreto são os aditivos superplasticificantes e os aditivos incorporadores de ar.

Aditivos superplasticificantes

Os aditivos superplasticificantes tem importante aplicação na produção de concretos, também chamados de redutores de água de alta eficiência, incorporam ar e permitem o aumento da trabalhabilidade do concreto, através da melhor distribuição das partículas de cimento. A compatibilidade entre o cimento Portland e o aditivo superplasticificante, representa uma única dosagem que resulta na obtenção de uma trabalhabilidade elevada por um período de tempo suficientemente longo para permitir o lançamento. Este tipo de aditivo é necessário na produção do concreto chamado autoadensável, que tem sua aplicação muito rápida, feita por bombeamento, e a mistura é extremamente plástica, dispensando o uso de vibradores (MEHTA e MONTHEIRO, 2008).

Os superplasticificantes são considerados tensoativos redutores de água de alta eficiência. São polímeros orgânicos hidrossolúveis obtidos sinteticamente por um processo de polimerização para obtenção de moléculas longas de elevada massa molecular. As principais categorias dos superplasticificantes são: condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos; condensados de lignossulfonatos modificados, e outros como os ésteres de ácido sulfônico e ésteres de carboidratos (MEHTA e MONTHEIRO, 2008).

Aditivos incorporadores de ar

Na tecnologia de concreto moderna, os primeiros aditivos utilizados como incorporadores de ar foram resinas orgânicas. Esses aditivos naturais classificam-se, dependendo dos métodos de produção e da fonte, em resinas de bálsamo (da cortiça da árvore), resinas de raízes e resinas do tronco (provenientes da produção de celulose). Essas resinas são compostas por diferentes ácidos orgânicos insaturados, como o ácido abiático, ésteres e ácidos carboxílicos e alcoóis de cadeias longas. As resinas puras são insolúveis em água e, consequentemente, para serem utilizadas, precisam ser convertidas previamente em sais solúveis em água que é chamado de saponificação, IBRACON (2005).

De acordo com o IBRACON (2005), dos compostos etoxilados, são utilizados os éteres de alquilfenol poliglicol e os éteres de poliglicol de alcoóis graxos. Esses éteres são compatíveis com a maioria das outras matérias-primas e formam microbolhas estáveis em água.

Uma grande quantidade de produtos podem ser usados como aditivos incorporadores de ar, mas o mais comum deles é a resina Vinsol. No entanto, mais recentemente surgiram outros tipos de materiais como, por exemplo, aditivos de proteínas e óleo de motor. Foram introduzidos principalmente por causa da menor solubilidade em água, maior custo e oferta limitada de resina Vinsol (OUYANG; GUO; QIU; 2007).

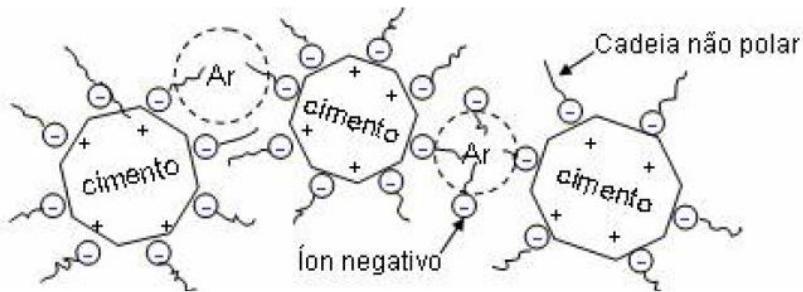
Substâncias sintéticas também podem ser utilizadas como agentes incorporadores de ar. Do grupo dos alquil sulfatos, os sais de sódio dos sulfatos de ácidos graxos são utilizados. Essas substâncias são biologicamente degradáveis. Desse grupo, os sais de sódio dos alquibzenenosulfonatos e α -olefinosulfonatos são utilizados, IBRACON (2005).

Além da resina vinsol (aniônico), também pode ser empregado na sua composição ácido abietíco, ácido oléico, ácido cáprico, alquil-sulfonatos, alquil-fenóis etoxilados (não iônico) e sais de alquil-amônio (SALVADOR, 2011).

Mehta e Monteiro (1994) citando Lea (1971)² descreve a forma como o ar é incorporado ao concreto pelos aditivos incorporadores de ar. Na interface ar-água a tensão superficial é diminuída quando os grupos polares são orientados em direção à fase aquosa, promovendo a formação de micro bolhas de ar e neutralizando a tendência das bolhas se unirem umas as outras. E na interface sólido-água, onde existem forças diretoras na superfície do cimento, os grupos polares ligam se ao sólido, com os grupos não polares orientados para a água, tornando a superfície do cimento hidrófoba, de modo que o ar pode deslocar a água e permanecer ligado às partículas sólidas na forma de bolhas. Na Figura 24 pode se observar o mecanismo de ação do sistema de incorporação de ar.

² LEA, F. M. The chemistry and cement and concrete. New York: Chemical Publishing Company, Inc., 1971.

Figura 24 – Mecanismo de ação do sistema de incorporação de ar.



Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

2.2.5.5 Propriedades do concreto com ar incorporado

A incorporação de ar tem sido considerada essencial para a durabilidade do concreto, principalmente para os concretos expostos à ação de gelo-degelo em regiões de inverno rigoroso. Segundo o IBRACON (2005), a saturação de água nos poros capilares e o seu posterior congelamento submetem o concreto a tensões de fadiga, o que pode levá-lo a ruptura. A inclusão de bolhas de ar no concreto pela adição de um aditivo incorporador faz com que, no momento do congelamento, a água encontre pequenas bolhas de ar, reduzindo as tensões sobre o concreto e aumentando sua durabilidade.

O concreto com ar incorporado, além de melhorar a durabilidade, melhora a trabalhabilidade e reduz a segregação. Consequentemente permite uma redução da relação água/cimento, permitindo um concreto mais impermeável e melhora da resistência a agentes agressivos (OUYANG; GUO; QIU; 2007).

A melhoria na trabalhabilidade está relacionada ao fato de que as bolhas de ar se mantêm esféricas, devido à tensão superficial. Deste modo, elas atuam como um agregado miúdo com baixo atrito superficial e elevada elasticidade. A incorporação de ar permite, desta forma, uma redução no teor de areia e consequentemente redução no teor de água, compensando em parte, a perda de resistência devido aos vazios (KOSMATKA *et al.*, 2003).

O concreto pode possuir vazios por bolhas de ar incorporado ou através de ar aprisionado. As bolhas de ar incorporado possuem dimensões entre 100 μm e 500 μm de diâmetro. Os

vazios de ar aprisionado possuem dimensões entre 1 mm e 10 mm (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

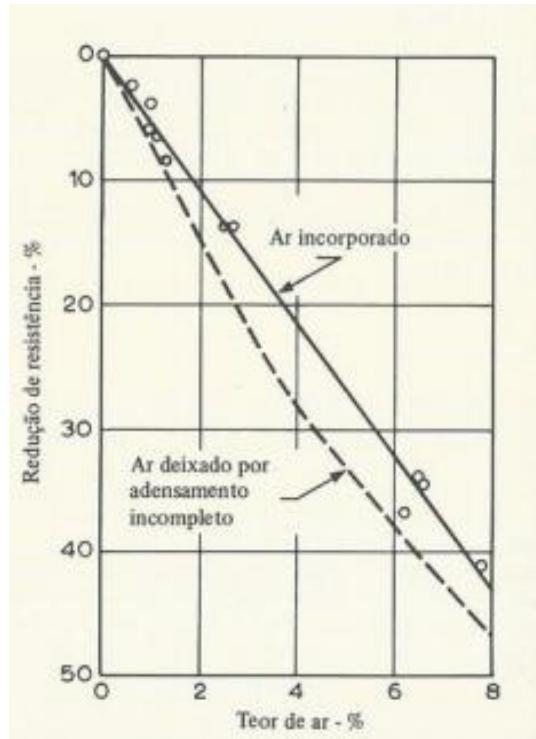
A retração por secagem não se altera muito para até 6% de ar incorporado no concreto. Mas para conteúdos maiores, a retração por secagem aumenta significativamente. A introdução de ar incorporado ao concreto reduz as resistências mecânicas, mas melhora a durabilidade do concreto ao reduzir sua permeabilidade em concretos com até 7% de ar incorporado (IBRACON, 2005).

A quantidade de ar no concreto aumenta conforme a quantidade de areia; geralmente são os grãos com tamanhos compreendidos entre 0,2 mm e 0,8 mm os que mais incorporam ar. Por exemplo, um aumento de 5% no conteúdo da areia produz entre 1 % e 1,5% de aumento no teor de ar. A quantidade de argamassa em um concreto depende do tamanho do agregado graúdo, para uma mesma dosagem de aditivo, a quantidade de ar diminui ao aumentar o tamanho do agregado (IBRACON, 2005).

Segundo Santos (2012), o teor de ar no concreto depende de como o cimento, a água e as bolhas de ar ocupam o espaço entre os agregados. Isso também está relacionado com a quantidade de pasta que separa os agregados miúdos, e da quantidade de argamassa que separa os agregados graúdos.

Mehta e Monteiro (2008) relacionam a resistência do concreto à parte sólida do material, sendo assim, os vazios devido à incorporação de ar influenciam no valor da resistência. Na Figura 25, pode-se verificar que ao incorporar ar no concreto, há uma redução na resistência. Essa redução é proporcional ao volume total de ar, ou seja, o ar aprisionado e o ar incorporado pelo aditivo.

Figura 25 – Efeito do teor de ar na resistência do concreto.



Fonte: Neville (1982).

2.2.5.6 Condições de mistura dos materiais

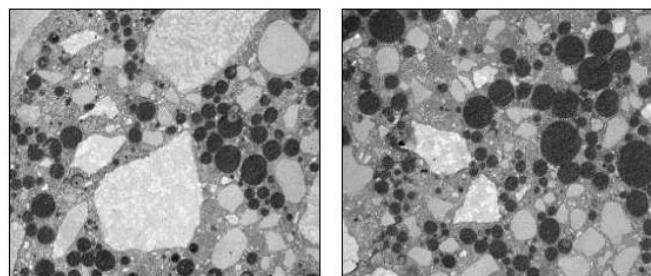
A operação de mistura tem grande influência no teor de ar. Se o tempo de mistura não for suficiente, o aditivo não será totalmente espalhado. Mas, tempo de mistura muito longo tende a expulsar o ar. Desta forma existe um tempo de mistura considerado ótimo. Na prática, o tempo de mistura é fixado como sendo um pouco menor que o mínimo necessário para o espalhamento total do aditivo. Além disso, maiores rotações aumentam a quantidade de ar incorporado (EDMEADES; HEWLETT, 1998).

2.2.5.7 Pesquisa com aditivo incorporador de ar

Segundo Araújo et al. (2014), foi feita uma avaliação da corrosão de armaduras de paredes estruturais de concreto leve com ar incorporado. A avaliação contemplou a realização de inspeções de unidades habitacionais e de ensaios de laboratórios de corpos de provas preparados com amostras extraídas do campo. Os concretos leves utilizados têm como

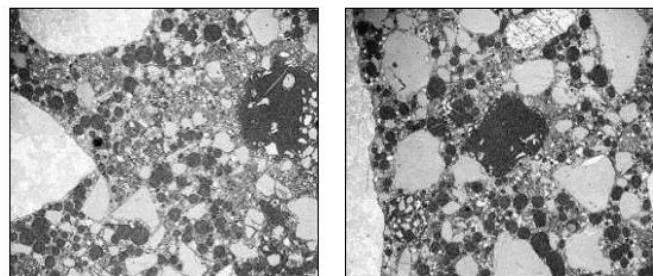
especificação básica o uso de concretos convencionais, com característica de auto adensável, aos quais é adicionado um aditivo incorporador de ar que obteve incorporação de bolhas de ar da ordem de 18% no concreto e massa específica em torno de 1800 kg/m^3 . Foram extraídas duas amostras de concreto (AR1 e AR2), a tabela 2 apresenta a dosagem e as características dos concretos leves. Nas Figuras 26 e 27 pôde ser observada a seção polida dos concretos leves.

Figura 26 – Seção polida do concreto leve de ar incorporado AR1, tendo-se concentração elevada de vazios (áreas pretas) na pesquisa do autor Araújo *et al.* (2014).



Fonte: Araújo *et al.* (2014).

Figura 27 – Seção polida do concreto com ar incorporado AR2, tendo-se concentração elevada de vazios (áreas pretas) na pesquisa do autor Araújo *et al.* (2014).



Fonte: Araújo *et al.* (2014).

Tabela 2 – Dosagem e características dos concretos leves na pesquisa do autor Araújo et al (2014).

Dados	Norma	ARI		AR2		
		Traço	Características	Traço	Características	
Dados fornecidos em campo	Água	-	185 L	Relação água/cimento = 0,66	185 L	Relação água/cimento = 0,71
	Aditivo incorporador de ar	ABNT NBR EB 1763 (1992)	0,5 L	Aditivo incorporador de ar à base de sabão de breu, 0,18 % em relação à massa de cimento.	0,5 L	Aditivo incorporador de ar à base de sabão de breu, 0,19 % em relação à massa de cimento.
	Agregado miúdo	ABNT NBR NM 248 (2003)	943 kg	-	839 kg	-
	Agregado grão		725 kg	-	796 kg	-
	Cimento	ABNT NBR 11578 (1997)	280 kg	CP IV 32	260 kg	CP II E 40
Dados obtidos em ensaios	Fibra	-	0,3 kg	Microfibra de polipropileno de 18 mm de comprimento e 12 µm diâmetro	0,2 kg	Microfibra de polipropileno de 18 mm de comprimento e 12 µm diâmetro
	Resistência à compressão axial	ABNT NBR-5739 (2007)	6,5 MPa		6,2 MPa	
	Índice de vazios	ABNT NBR 9778 (2009)	37,5 %		36,8 %	
	Massa específica real		1730 kg/m³		1650 kg/m³	
	Absorção de água		22,7 %		22,4 %	

Fonte: Araújo *et al.* (2014).

Com o intuito de aumentar a trabalhabilidade do concreto AITCIN (2000) sugere o uso de aditivos incorporadores de ar, embora a presença das bolhas de ar possam prejudicar a resistência à compressão, citando um exemplo de produção de concreto com 4,5% de ar incorporado que atingiu 100 MPa de resistência à compressão aos 91 dias.

AITCIN (2000) atesta que o uso de aditivo incorporador de ar é recomendável para concretos nos quais é difícil de alcançar a trabalhabilidade requerida, mesmo que esta incorporação provoque alguma perda de resistência.

Lima e Libório (2008) em seu estudo projetou um concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas. Os resultados demonstraram que mesmo o concreto sem ar incorporado foi durável ao congelamento, evidenciando a eficiência no processo de hidratação, que consumiu a água congelável. Além disso, o refinamento de poros foi um fator determinante para a durabilidade ao congelamento, posto que a diminuição dos poros

provoca aumento da tensão superficial na água armazenada ou conduzida até esses vazios, o que implica em menor temperatura de congelamento.

Portanto, a ausência de danos que afetassem a rigidez dos concretos, com e sem ar incorporado quando submetidos à temperatura de -35°C, causados principalmente pela geração de pressão hidráulica, demonstrou que ambos foram resistentes a ambientes nestas condições (LIMA e LIBÓRIO, 2008).

Os resultados obtidos no estudo de Araújo *et al.* (2014) determinou que as características do concreto leve influenciaram negativamente na capacidade do aço-carbono de se passivar no meio e assim se manter por longo período de exposição ambiental. Este estudo ressaltou, ainda, a importância de acompanhar o desempenho das paredes estruturais e a necessidade de estudos detalhados das propriedades do concreto leve e de seu desempenho, incluindo o estudo de medidas de proteção superficial da armadura.

Santos (2013) apresentou um trabalho em que buscou desenvolver concretos auto-adensáveis com alto teor de ar, utilizando finos de pedreira em sua composição para a aplicação em sistemas construtivos de paredes de concreto moldadas no local. Foram avaliados parâmetros de auto-adensabilidade no estado fresco, conforme ilustrado na Figura 28, e o desempenho físico e mecânico no estado endurecido.

Figura 28 – Ensaio da caixa L em concreto autoadensável na pesquisa do autor Santos (2013).



Fonte: Santos (2013).

Os concretos autoadensáveis com aditivo incorporador de ar não mantiveram os parâmetros de fluidez e viscosidade apresentados no concreto auto adensável de referência. O uso de aditivo resultou em 14% e 15% de ar aprisionado e ar incorporado para as relações de água/cimento de 0,50 e 0,55 respectivamente, valores acima do estipulado que era de 9%. No entanto, os resultados de viscosidade plástica, resistência à exsudação, segregação e habilidade passante foram satisfatórios em todas as misturas (SANTOS, 2013).

O elevado teor de ar influenciou no desempenho físico e mecânico dos concretos em comparação ao de referência, aumentando a porosidade e diminuindo a resistência à compressão. Porém, quanto ao ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, não se notou redução dos resultados proporcionalmente ao teor de ar dos concretos (SANTOS, 2013).

Lima e Libório (2009) pesquisaram o desenvolvimento de um concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e armazenagem de alimentos em baixas temperaturas para atender às indústrias de alimentos no Brasil que se utilizam da tecnologia do frio em seu processo industrial. Foram estudadas as seguintes situações: baixas temperaturas em ambientes secos e baixas temperaturas em ambientes sujeitos à umidade. A dosagem do concreto e os resultados dos ensaios no estado fresco estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – 1^a Dosagem de traços para estudo do CAD para ambientes com baixas temperaturas na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009).

Concretos submetidos à baixas temperaturas		
Parâmetros	Referência (sem aditivo incorporador de ar)	Concreto com aditivo incorporador de ar
1:M	1:5	
1:a:p:a/agl	1:2,36:2,64:0,42	
% S.P.	0,5	0,25
% IAR*	-	0,045
Teor de ar incorporado (%)	2	7
Consumo de cimento (kg/m ³)	384	379
Teor de argamassa (%)	56	
Consistência (mm)	100±10	

* Aditivo incorporador de ar – Norma Brasileira EB 1763

Fonte: Lima e Libório (2009).

Já os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para os concretos que serão submetidos à temperatura de (- 35±2) °C estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência à compressão simples na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009).

Resistência à compressão simples (MPa)			
Traço	f_{ck1}	f_{ck28}	f_{ck63}
1:5 (s/IAR)	10	53	61
1:5 (c/IAR)	8	38	43
Consistência 100±10mm			

Fonte: Lima e Libório (2009).

Somente os corpos de prova com (6±1)% de teor de ar resistiram aos ciclos de gelo e degelo, apresentando fator de durabilidade mínimo de 96%. A expansão causada pela ação dos ciclos de gelo/degelos sobre o concreto aumentaram a sua porosidade de 1,57% para 4,22%. Estes mecanismos de deterioração também causaram a redução da massa específica

do concreto de $2,48 \text{ g/cm}^3$ para $2,31 \text{ g/cm}^3$. A partir desses dados optou-se pela elaboração de um novo concreto cujo teor de ar incorporado foi de 3,5%.

Dois objetivos governaram o projeto desta nova dosagem: a diminuição ao máximo da quantidade de ar incorporado e o reforço da matriz da pasta de cimento. A dosagem do concreto e os resultados dos ensaios no estado fresco desta nova dosagem estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – 2^a Dosagem de traços para estudo do CAD para ambientes com baixas temperaturas na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009).

Concretos submetidos a ciclos de gelo/degeló	
Parâmetros de Dosagem	
1:M	1:5
1:a:p:a/agl	1:2,18:2,82:0,41
% S.P.	0,35
% IAR*	0,00925
Teor de ar incorporado (%)	3,5
Consumo de cimento (kg/m^3)	384
Teor de argamassa (%)	53
Consistência (mm)	100 \pm 10
F_{c28} (MPa)	49

* Aditivo incorporador de ar

Fonte: Lima e Libório (2009).

Uma terceira série de ensaios de gelo e degelo foi realizada a partir da qual confirmou o resultado obtido na segunda série.

Os corpos de prova dessa terceira série foram moldados com concreto produzidos em dosagem com as mesmas características da segunda (concreto com 3,5 % de teor de ar), entretanto foram analisadas as seguintes condições de cura e mistura:

1. Revibração e cura em água com cal (RAC);
2. Revibração e cura em câmara úmida (RCU);
3. Sem revibração e cura em água com cal (VAC);
4. Sem revibração e cura em câmara úmida (VCU).

Os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade desta nova série estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade na pesquisa dos autores Lima e Libório (2009).

Concretos	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)
	f_{ck_7}	$f_{ck_{29}}$	
RCU	43	50	43
RAC	43	53	44
VCU	42	50	42
VAC	42	51	44

Fonte: Lima e Libório (2009).

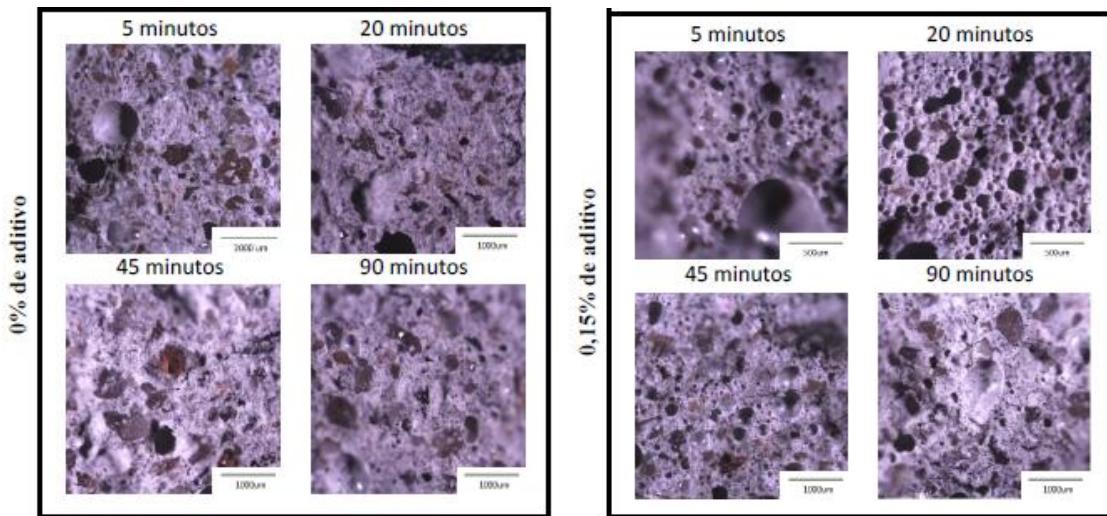
A técnica de dosagem empregada possibilitou a produção de um concreto de alto desempenho frente a baixas temperaturas, inclusive em situações de ciclos de gelo e degelo. O concreto com 3,5% de ar incorporado teve fator de durabilidade mínimo de 96 % e máximo de 104 %. O concreto produzido prescindiu a necessidade de se incorporar $6 \pm 1\%$ de ar ou a redução do fator a/agl em 0,27 para resistir aos ciclos de gelo e degelo.

O desempenho dos concretos é avaliado pelo fator de durabilidade proposto pela ASTM C666-92. Sendo que os concretos são considerados duráveis se o fator de durabilidade ao final dos ciclos for maior ou igual a 80% (LIMA E LIBÓRIO, 2009).

A resistência à compressão foi de 50 MPa, a resistência à tração na flexão de 4,9 MPa, módulo de elasticidade de 43 GPa com um consumo de 7,8 kg de aglomerante por 1 MPa.

Da Rosa (2013) fez um estudo da variação das propriedades mecânicas em função do tempo de mistura dos materiais quando utilizado aditivo incorporador de ar. Foi definida a utilização de um traço intermediário, com relação 1:5 (cimento:agregados). Foi produzido um concreto sem aditivo (traço de referência) e outro com 0,15% de aditivo sobre a massa de cimento. Os tempos de mistura foram fixados em 5, 20, 45 e 90 minutos. Na Figura 29 podem ser observadas as imagens obtidas com a lupa estereoscópica.

Figura 29 – Imagens obtidas com a lupa estereoscópica de concretos sem aditivo e com 0,15% de aditivo na pesquisa do autor Da Rosa (2013).



Fonte: Da Rosa (2013).

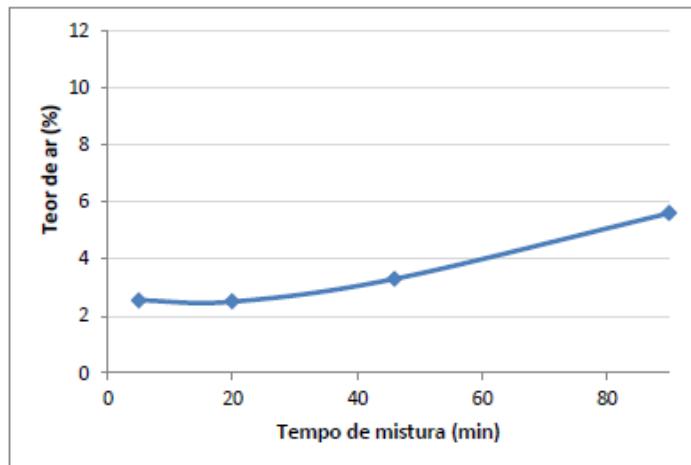
Na Tabela 7 e nos gráficos das Figuras 30 e 31 são apresentados os resultados de teor de ar para os diferentes tempos de mistura.

Tabela 7 – Resultado de teor de ar na pesquisa do autor Da Rosa (2013).

Tempo de mistura (min)	Teor de ar (%)					
	Traço 1 (0% de aditivo)			Traço 2 (0,15% de aditivo)		
	Betonada 1	Betonada 2	Média	Betonada 1	Betonada 2	Média
5	2,6	2,5	2,55	9,5	9,9	9,7
20	2,5	2,5	2,5	11,0	11,5	11,3
45	3,2	3,4	3,3	8,8	10,0	9,4
90	5,4	5,8	5,6	4,9	5,4	5,2

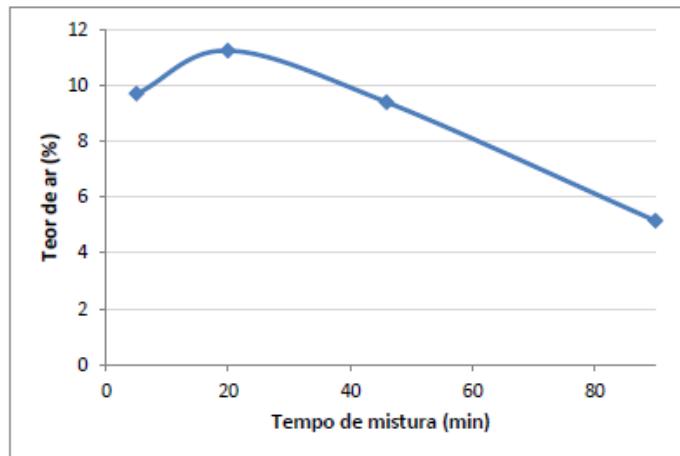
Fonte: Da Rosa (2013).

Figura 30 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0% de aditivo na pesquisa do autor Da Rosa (2013).



Fonte: Da Rosa (2013).

Figura 31 – Variação do teor de ar para os diferentes tempos de mistura no traço com 0,15% de aditivo na pesquisa do autor Da Rosa (2013).



Fonte: Da Rosa (2013).

Na Tabela 8 são apresentados os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone na pesquisa do autor Da Rosa (2013).

Tempo de mistura (min)	Slump (mm)			
	Traço 1 (0% de aditivo)		Traço 2 (0,15% de aditivo)	
	Betonada 1	Betonada 2	Betonada 1	Betonada 2
Antes	80	80	90*	100*
5	-	-	165	160
90	0	0	35	25

* Antes da adição do aditivo

Fonte: Da Rosa (2013).

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto.

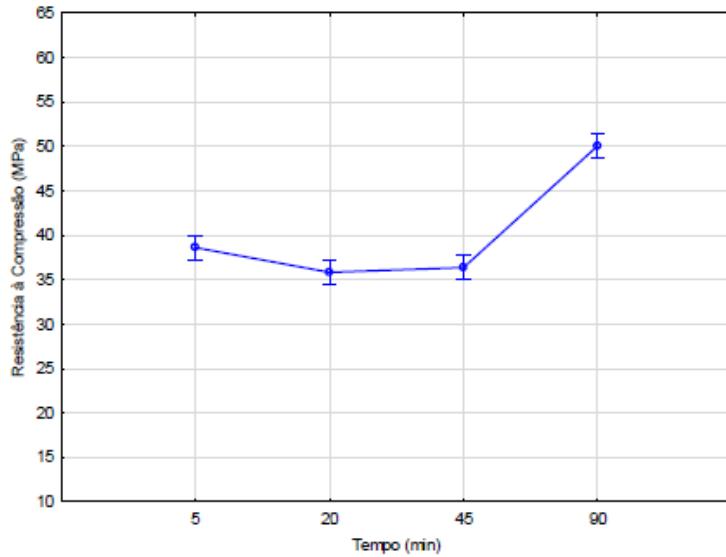
Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto na pesquisa do autor Da Rosa (2013).

Concreto	Resistência à compressão (MPa)
Traço 1 (0% de aditivo) Tempo de mistura = 5 minutos	50,5
Traço 1 (0% de aditivo) Tempo de mistura = 20 minutos	53,3
Traço 1 (0% de aditivo) Tempo de mistura = 45 minutos	50,6
Traço 1 (0% de aditivo) Tempo de mistura = 90 minutos	55,6
Traço 2 (0,15% de aditivo) Tempo de mistura = 5 minutos	26,7
Traço 2 (0,15% de aditivo) Tempo de mistura = 20 minutos	18,3
Traço 2 (0,15% de aditivo) Tempo de mistura = 45 minutos	22,1
Traço 2 (0,15% de aditivo) Tempo de mistura = 90 minutos	44,5

Fonte: Da Rosa (2013).

Na Figura 32 é apresentado o Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais na resistência à compressão uniaxial do concreto com aditivo.

Figura 32 – Efeito isolado do tempo de mistura dos materiais na resistência à compressão uniaxial de concretos com aditivo IAR na pesquisa do autor Da Rosa (2013).



Fonte: Da Rosa (2013).

A utilização do aditivo incorporador de ar reduziu em média 50% da resistência à compressão, 43% a resistência à tração e 33% o módulo de elasticidade. A influência do tempo de mistura mostrou-se significativa para o traço com aditivo em relação à resistência à compressão. Nos ensaios de módulo de elasticidade e resistência à tração a variação do tempo não apresentou diferenças significativas nos resultados para os tempos 5 min., 20 min., 45 min e 90 min.

CAPÍTULO 3

DESEMPENHO TÉRMICO

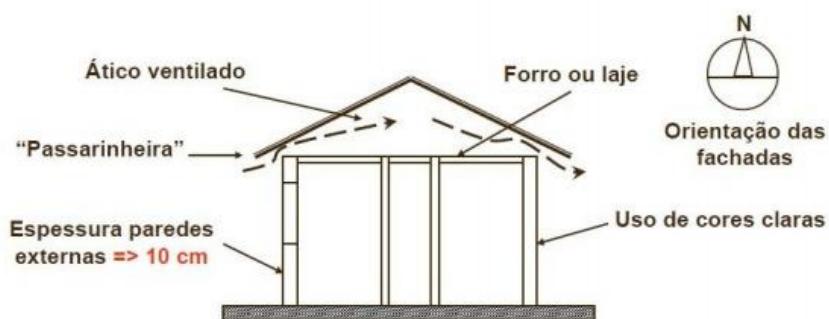
3.1 DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

No momento em que o setor energético brasileiro passa por uma crise devido à falta de chuvas em algumas regiões do país, o interesse quanto ao condicionamento térmico natural não deve ser somente por razões de conforto, mas também de eficiência energética, pois importante parcela do consumo de energia elétrica em uma residência se deve aos equipamentos de climatização, seja para o aquecimento ou para a refrigeração dos ambientes.

Por este motivo, considerações sobre eficiência energética serão indispensáveis na concepção de novos projetos, inclusive no que se refere às especificações dos materiais.

Conforme relatado por Wendler (2009), a edificação habitacional deve reunir características que atendam exigências de desempenho térmico, considerando o local de implantação da obra e a respectiva zona bioclimática. O desempenho térmico depende do comportamento em conjunto dos seguintes elementos: fachada, cobertura e piso. Na Figura 33 são apresentados alguns fatores importantes para o desempenho térmico das habitações.

Figura 33 – Fatores importantes para o desempenho térmico das edificações.



Fonte: Wendler (2009).

De acordo com Código de Práticas da CEF, Programa de olho na qualidade: código de práticas CAIXA (2014), no caso de obras de paredes de concreto é necessária a

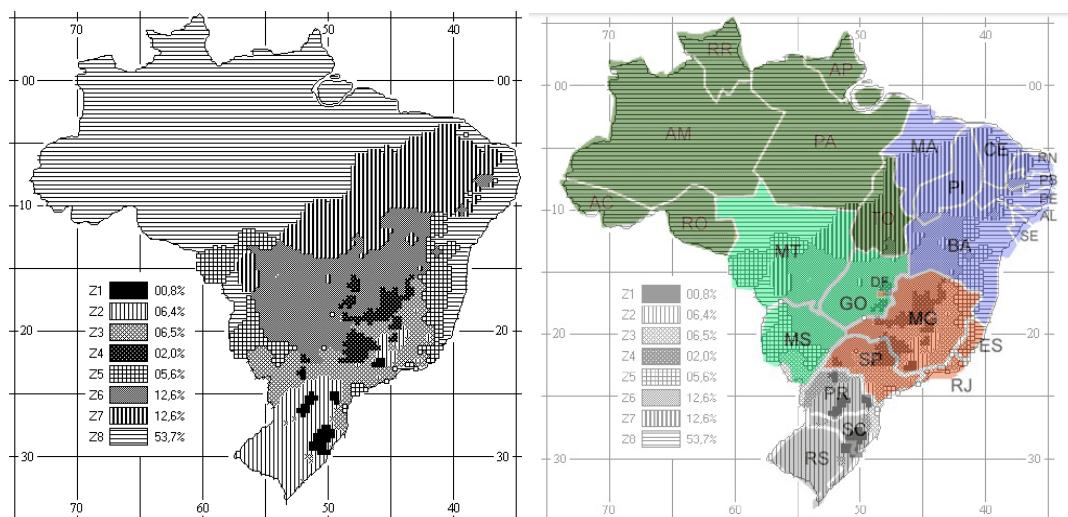
comprovação de atendimento de desempenho térmico, através de relatório de ensaio, que só é dispensável quando ocorre as seguintes condições simultaneamente:

- pé direito mínimo (piso-teto) de 2,5m;
- espessura mínima das paredes e da laje = 10cm;
- telhado com telhas de fibrocimento (esp. \geq 6mm) ou telhas de concreto (esp. \geq 11mm) ou telhas cerâmicas;
- presença de ático entre a laje horizontal e o telhado com altura mínima de 50cm;
- faces externas das paredes pintadas com tonalidades médias ou claras para as zonas bioclimáticas Z1 a Z7, e tonalidades claras com emprego de produto isolante térmico na cobertura para a zona bioclimática Z8.

3.2 ZONAS BIOCLIMÁTICAS

De acordo com ABNT NBR 15575-1:2013 as edificações habitacionais devem possuir características que atendam aos requisitos de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática definida na ABNT NBR 15220-3:2005, conforme Figura 34.

Figura 34 – Zonas bioclimáticas do Brasil.



Fonte: ABNT NBR 15220-3: 2005.

3.3 CONCEITOS DA TERMODINÂMICA

Calor é uma forma de energia que quando um corpo absorve, sua temperatura se eleva e sua energia interna aumenta. 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 ocorra troca de calor entre dois corpos é necessário que tenham temperaturas diferentes. Nesse caso, o calor passa do corpo mais quente para o mais frio.

Carga térmica é a soma de todas as variações de energia, ganho e perda, através do envelope da edificação (BEZERRA, 2003).

De acordo com Lamberts *et al.* (1997) apud Bezerra (2003), os principais fatores que influenciam na carga térmica de uma edificação são: fatores climáticos (insolação, umidade, temperatura do ar externo), fator humano (número de ocupantes, tipo de uso) e fator arquitetônico (iluminação, equipamentos e tipos de fechamento).

Uma edificação absorve energia térmica por radiação e convecção. Quando a temperatura da face externa está maior do que a da face interna ocorrerá 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 (ρ) e de condutividade térmica (λ). Em consequência da elevação da temperatura haverá um fluxo de calor por radiação e convecção da face interna da parede para o ambiente interno (BEZERRA, 2003).

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).

É possível reduzir o uso de climatizadores artificiais com o uso de proteções solares em aberturas, cores claras na fachada, uso de ventilação cruzada e redução da “condutância” térmica (U) das paredes, janelas e coberturas. Condutância térmica é o inverso da resistência térmica total do fechamento (BEZERRA, 2003).

Silva (2013) afirma que há três tipos de transferência de calor:

Convecção: a convecção acontece com os gases e os líquidos. Ela acontece quando o fluido fica em contato com uma superfície quente.

Condução: a condução é o modo mais comum de transferência de calor porque os sólidos são mais propagadores do calor condutivo. A energia é transferida de uma molécula para a outra por meio de difusão de sua energia potencial.

Radiação: a radiação é uma forma eletromagnética de transferência de calor, que pode acontecer até mesmo no vácuo. O exemplo mais comum é a luz solar que atravessa o espaço. Ela pode ser detectada como ondas de calor infravermelho ou como luz.

Tipos de Fechamentos

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2012), em termos de propriedades térmicas dos elementos construtivos, existem os fechamentos translúcidos e os fechamentos opacos. Sendo que as principais trocas térmicas em uma edificação acontecem geralmente nestes fechamentos, que compreendem, por exemplo, janelas e claraboias. Neste tipo de fechamento podem ocorrer os três tipos de trocas térmicas: condução, convecção e radiação. Já nos fechamentos opacos não ocorre transmissão de calor por radiação, apenas condução e convecção.

Absortividade, refletividade, transmissividade e emissividade

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2012), os elementos construtivos podem ter características 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 (ρ), da absorvividade (α) e da transmissividade (τ) do material. A emissividade (ϵ) é uma propriedade que diz qual é a quantidade de energia térmica é emitida por unidade de tempo. Na Figura 35 são apresentados os valores de absorvividade (α) e emissividade (ϵ) de alguns materiais utilizados na construção civil.

Figura 35 – Valores de absorvividade (α) e emissividade (ϵ) de alguns materiais.

TIPO DE SUPERFÍCIE	α	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15	0,90
Concreto aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro comum de janela	transparente	0,90 / 0,95

Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2012).

Inércia térmica

Um sólido absorve parte da energia que flui entre suas faces. A 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. Reduzindo-se sensações de desconforto provocadas pelo frio ou pelo calor (BEZERRA, 2003).

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; 2012).

Condutividade térmica

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2012), a condutividade térmica (λ) depende da densidade do material e representa sua capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo. Na Figura 36 são apresentados os valores de condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção civil.

Figura 36 – Condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção civil.

MATERIAL	λ (W/m K)
Concreto normal, densidade de 2.200 a 2.400 kg/m ³	1,750
Tijolo de barro, densidade de 1.000 a 1.300 kg/m ³	0,700
Madeira, densidade de 450 a 600 kg/m ³	0,150
Isopor, densidade de 25 a 40 kg/m ³	0,035

Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2012).

Resistência térmica

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. A resistência térmica de um material homogêneo é calculada de acordo com a equação 1. Quando o material é heterogêneo a resistência térmica é calculada somando as resistências térmicas de cada componente deste material (BEZERRA, 2003).

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (1)$$

Onde:

R - resistência térmica do material [m² K/W];

L - espessura do material [m];

λ – condutividade térmica do material [W/m.K];

Resistência térmica superficial

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2012), a resistência térmica superficial traduz os efeitos da troca de calor por radiação e convecção do material em análise com o meio externo (R_{SE}) e com o meio interno (R_{SI}). O valor de R_{SE} é em função da velocidade do vento, e é adotado 0,04 [m²K/W]. E o valor de R_{SI} 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). Os valores de R_{SI} e R_{SE} são apresentados na Figura 37.

Figura 37 – Valores de resistência térmica superficial.

R_{SI} [m ² K/W]	R_{SE} [m ² K/W]
DIREÇÃO DO FLUXO DE CALOR	
	
0,13	0,04
0,10	0,04
0,17	0,04

Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2012).

Transmitância térmica

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 a transmissão de calor, sendo usada para comparação e escolha dos diversos tipos de fechamento. A equação 2 demonstra como é calculada a transmitância térmica.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad [\text{W} / \text{m}^2\text{K}] \quad (2)$$

Densidade de fluxo de calor e temperatura SOL-AR

Densidade de fluxo de calor total de um fechamento é calculada pela equação 3.

$$q = U \cdot \Delta t \quad (3)$$

Onde:

q – densidade de fluxo de calor [W/m²]

U – transmitância térmica [W / m²K]

Δt – diferença entre as temperaturas externas e internas [K]

Caso haja incidência de radiação solar diretamente no fechamento, a temperatura da superfície externa do mesmo pode crescer a temperatura muito acima da temperatura do ar. Por isso, acrescenta-se na equação da densidade de fluxo de calor a Temperatura Sol-Ar (t_{SOL-AR}), que é função da quantidade de radiação solar incidente e da cor da superfície. É calculada pela equação 4.

$$t_{SOL-AR} = \alpha \cdot I \cdot R_{SE} \quad (4)$$

Onde:

α – absorvidade da superfície externa do fechamento;

I – radiação solar [W/m^2];

R_{SE} – resistência superficial externa [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$];

Fluxo de calor

Em fechamentos opacos, o ganho de calor é determinado pelo produto da taxa de calor que o atravessa pela sua área, descrito na equação 5.

$$Q = q \cdot A \quad (5)$$

Onde:

Q – fluxo de calor [W]

q – densidade de fluxo de calor [W/m^2]

A – área da superfície do fluxo de transferência de calor [m^2].

Capacidade térmica

Capacidade térmica 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 um °C. A capacidade térmica de um material é calculada pela equação 6.

$$C = e \cdot c \cdot \rho \quad [\text{kJ/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (6)$$

Onde:

e – espessura do material [m];

c – calor específico do material [kJ/kg.K];

ρ – densidade do material [kg/m³].

3.4 DESEMPENHOS TÉRMICOS DE PAREDES DE CONCRETO

A Caixa Econômica Federal (CEF) e a Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) indicam a utilização de concretos leves na execução de habitações de interesse social utilizando sistema construtivo de parede moldada in loco, com a intenção de melhorar o desempenho térmico das edificações, sendo o concreto leve celular o mais utilizado (SACHT, 2008).

As propriedades térmicas dos concretos leves são significativamente diferentes das encontradas nos concretos tradicionais, principalmente devido ao ar aprisionado que reduz a transferência e a absorção de calor, alterando assim as propriedades térmicas dos concretos como a condutividade térmica, por exemplo. Devido a este fator o concreto leve é utilizado em algumas edificações com o objetivo de reduzir a absorção e a transferência para o ambiente interno do calor proveniente da radiação solar (HOLM e BREMNER, 2000).

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2012), materiais que possuem baixa densidade e que são porosos como, por exemplo, a cortiça, o EPS, lã de vidro e a lã de rocha são isolantes térmicos. A capacidade de reduzir a transferência de calor se dá ao fato de o ar parado

contido nesses poros ter baixa condutividade térmica (λ). Da mesma forma, um concreto com ar incorporado por aditivos químicos, pode reduzir o fluxo de calor através deste.

Na Tabela 10 podem ser verificados os valores de condutividade térmica do concreto segundo a ABNT NBR 15220:2005.

Tabela 10 – Valores de condutividade térmica do concreto.

	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/mK)
Concreto normal	2200 - 2400	1,75
Concreto cavernoso	1700 - 2100	1,4

Fonte – ABNT NBR 15220:2005.

Em pesquisa realizada em Uberlândia e em Uberaba, o sistema parede de concreto obteve melhor aceitação dos usuários com relação ao desempenho térmico, em comparação com os sistemas convencionais e o sistema de painéis cerâmicos pré-fabricados (SILVA, 2013).

Umas das vantagens da utilização do concreto autoadensável com ar incorporado para produção de paredes de concreto são: facilidade e rapidez de aplicação, acabamento e redução da mão de obra. Além disso, o fato do concreto conter ar incorporado melhora a durabilidade em regiões marinhas e o desempenho quanto ao isolamento acústico e térmico. E a principal desvantagem é a perda de até 70% da resistência mecânica (DOS SANTOS E DE CASTRO, 2013).

Segundo Roriz (2014), os edifícios devem atuar como um filtro em relação ao ambiente externo, impedindo a entrada dos elementos indesejáveis, mas permitindo que os ambientes internos se beneficiem dos elementos que contribuam para o conforto dos usuários. Um elemento pode ser desejável ou não, dependo do tipo de clima e do tipo de ocupação. Estas variáveis podem ser arquitetônicas ou dos materiais e sistemas construtivos:

a) Variáveis arquitetônicas

- Devido aos movimentos relativos entre a Terra e o Sol, edifícios com as maiores fachadas orientadas a norte e sul recebem menores intensidades de radiação solar;
- O vidro comum permite a entrada dos raios solares, mas impede a saída do calor radiante produzido internamente (Efeito Estufa). Para evitar o sobreaquecimento dos ambientes internos, podem ser usadas películas;
- Para evitar desperdício de energia, em ambientes dotados de equipamentos de ar-condicionado devem ser reduzidas as infiltrações do ar exterior. Por outro lado, nos casos em que se pretenda usufruir da ventilação natural, o dimensionamento e as posições das aberturas devem ser cuidadosamente detalhados, em função das fontes internas de calor (pessoas, lâmpadas, equipamentos etc.) e das características (velocidade e direção) dos ventos predominantes no lugar;
- A absorção solar é uma propriedade física das superfícies opacas que indica a porcentagem da radiação solar incidente que é absorvida pelo corpo (e transformada em calor). Sendo mais baixas em superfícies mais claras.

b) Variáveis dos materiais e sistemas construtivos

- A resistência térmica (em $m^2 \cdot ^\circ C/W$) de uma placa homogênea é dada pela razão entre a espessura da placa (em metros) e a condutividade térmica (em $W/m \cdot ^\circ C$) do material de que é constituída. Como o ar tem condutividade muito baixa, materiais mais porosos geralmente apresentam condutividades mais baixas do que os mais densos. Em regiões sujeitas a inverno rigoroso, vedações construtivas com baixa Transmissão são mais recomendáveis, pois contribuem para evitar as perdas de calor disponível nos ambientes internos e cuja produção geralmente implica em consumo de energia. Ambientes com equipamentos de ar-condicionado também precisam de níveis mais altos de isolamento térmico (baixa Transmissão), para evitar ou restringir os ganhos indesejáveis do calor exterior. Por outro lado, em edificações naturalmente ventiladas e submetidas aos climas predominantes no território brasileiro, há muitas situações em que baixas Transmissões são contraproducentes, pois dificultam a dissipação do calor interno.

- Capacidade térmica, de modo geral, é mais alta em corpos cujas massas e densidade sejam também mais altas. Em climas com maiores amplitudes térmicas (diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas), sistemas construtivos mais espessos e mais densos acumulam calor nas horas mais quentes do dia e o liberam durante a madrugada, quando o ar é normalmente mais frio, contribuindo assim para reduzir as oscilações das temperaturas internas e proporcionar mais conforto aos usuários.

Segundo Sacht (2008), em pesquisa realizada a partir de análise computacional para avaliação de desempenho térmico de painéis de vedação de concretos moldados *in loco*, foram utilizados concretos com massa específica variando entre 1600 e 2400 kg/m³ e espessuras de 8 cm, 10 cm e 12 cm. Neste estudo a espessura e o tipo de cobertura exerceram maior influência sobre os resultados das temperaturas internas do que a variação de massa específica do concreto.

3.5 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS SOBRE CONFORTO TÉRMICO

Conforme a ABNT NBR 15575-1:2013 para avaliação de desempenho térmico por simulação computacional, deve se seguir os critérios apresentados na Tabela 11 nas condições de verão, sendo que M é o nível de aceitação mínimo.

Tabela 11 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas Bioclimáticas 1 a 7	Zona Bioclimática 8
M	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013.

Sendo que $T_{i,máx.}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação e $T_{e,máx.}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no exterior da edificação, em graus Celsius. A Tabela 12 apresenta os critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno, sendo que M é o nível de aceitação mínimo.

Tabela 12 – 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	$T_{i,\min.} \geq (T_{e,\min.} + 3^\circ\text{C})$	Não pode ser verificado.

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013

Sendo que $T_{i,\min.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação e $T_{e,\min.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no exterior da edificação, em graus Celsius.

A ABNT NBR 15575-1:2013 recomenda os métodos apresentados na Tabela 13 para análise em laboratórios das propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos. A norma também recomenda a utilização dos programas EnergyPlus para a realização das simulações computacionais, ou outros programas que podem produzir os efeitos na inércia térmica e validados pela ASHRAE Standard 140.

Tabela 13 – Métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos.

Propriedade	Determinação
Condutividade térmica	ASTM C518 ou ASTM C177 ou ISO 8302
Calor específico	Medição ASTM C351 - 92b
Densidade de massa aparente	Medição conforme método de ensaio preferencialmente normalizado, específico para o material
Emissividade	Medição JIS A 1423/ASTM C1371 - 04a
Absortância à radiação solar	Medição ANSI/ASHRAE 74/88 ASTM E1918-06, ASTM E903-96
Resistência ou transmitância térmica de elementos	Medição conforme ABNT 6488 ou cálculo conforme ABNT NBR 15220-2, tomando-se por base valores de condutividade térmica medidos ASTM E903-96
Características fotoenergéticas (vidros)	EM 410 - 1998/EN 12898

Fonte: ABNT NBR 15575-1:2013

A ABNT NBR 15575-1:2013 estabelece que devem ser feitas avaliações do ponto térmico considerando as situações mais críticas. No caso de conjuntos habitacionais de edificações térreas deve ser selecionada uma unidade habitacional com o maior número de paredes expostas, e no caso de edifícios de multipiso, selecionar uma unidade do último andar com cobertura exposta. Considerando no verão, que as janelas do dormitório ou da sala estejam voltadas para oeste e outra parede exposta voltada para norte; e no inverno, que a janela do dormitório ou sala de estar esteja voltada para o sul e outra parede exposta voltada para o leste.

Devem ser verificadas as seguintes propriedades para o sistema de vedação das edificações:

- Transmitância térmica das paredes externas;
- Capacidade térmica das paredes externas;
- Aberturas para ventilação;
- Sombreamento das aberturas.

Para coberturas a ABNT NBR 15575-5:2013 estabelece os critérios apresentados na Tabela 14, sendo M o nível mínimo aceitável, α a absorção à radiação solar da superfície externa da cobertura e FT o fator de correção da transmitância estabelecido pela ABNT NBR 15220-3:2005.

Tabela 14 – Critérios de cobertura quanto à transmitância térmica – M.

Transmitância térmica (U) W/m²K				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$U \leq 2,30$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$ FT

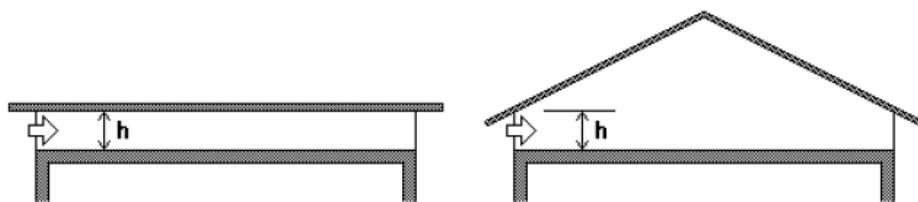
Fonte: ABNT NBR 15575-5:2013.

De acordo com a ABNT NBR 15220: 2005, na Zona 8 também serão aceitas coberturas com transmitâncias térmicas acima dos valores tabelados, desde que atendam às seguintes exigências:

- a) contenham aberturas para ventilação em, no mínimo, dois beirais opostos; e
- b) as aberturas para ventilação ocupem toda a extensão das fachadas respectivas.

Nestes casos, em função da altura total para ventilação, Figura 38, os limites aceitáveis da transmitância térmica poderão ser multiplicados pelo fator (FT) indicado pela equação 7.

Figura 38 – Abertura (h) em beirais, para ventilação do ático.



Fonte: ABNT NBR 15220 (2003).

$$FT = 1,17 - 1,07 \cdot h^{-1,04} \quad (7)$$

Onde:

FT - igual ao fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da zona 8 [adimensional];

h - igual à altura da abertura em dois beirais opostos [cm].

O valor da absorção (α) depende da cor do fechamento de acordo com a ABNT NBR 15575-4:2013, caso a cor ainda não esteja definida em projeto, deve-se simular para as seguintes opções:

- Cor clara: $\alpha = 0,3$;
- Cor média: $\alpha = 0,5$;
- Cor escura: $\alpha = 0,7$.

A ABNT NBR 15575-4:2013 define os requisitos e critérios para verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de vedações verticais externas. De acordo com a norma, no procedimento de simulação do desempenho térmico podem ser consideradas condições de ventilação e de sombreamento, conforme ABNT NBR 15575-1:2013. No caso da ventilação, pode ser considerada uma condição "padrão", com taxa de 1 ren/h, ou seja, uma renovação de ar por hora do ambiente, e uma condição "ventilada", com taxa de 5 ren/h, ou seja, cinco renovações de ar por hora do ambiente sala ou dormitório. No caso do sombreamento das aberturas, pode ser considerada uma condição "padrão", na qual não há qualquer proteção contra a entrada da radiação solar, e uma condição "sombreada", na qual há proteção que corte pelo menos 50 % da radiação solar incidente na sala ou dormitório.

Para a ABNT NBR 15575-4:2013, a unidade habitacional deve apresentar transmitância térmica e capacidade térmica que proporcionem pelo menos o desempenho térmico mínimo estabelecido para cada zona bioclimática estabelecida na ABNT NBR 15220-3:2005. Os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) das paredes externas são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U).

Transmitância térmica U	
W/m².K	
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8
$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$
	$U \leq 3,7$
	$\alpha^a > 0,6$
	$U \leq 2,5$

Fonte: ABNT NBR 15575 – 4.

Sendo que α é a absorção à radiação solar da superfície externa da parede.

Para capacidade térmica (CT), os valores mínimos admissíveis para a das paredes externas segundo a ABNT NBR 15575-4:2013 são apresentados os apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica (CT).

Capacidade térmica (CT)	
KJ/m ² .K	
Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	Zona 8
≥ 130	Sem requisito

Fonte: ABNT NBR 15575 – 4.

A ABNT NBR 15575-4:2013 recomenda que as fachadas das habitações tenham aberturas com dimensões adequadas para proporcionar a ventilação interna dos ambientes de longa permanência: salas e dormitórios. Os ambientes de permanência prolongada devem ter aberturas para ventilação com áreas que atendam à legislação específica do local da obra, incluindo códigos de obras, códigos sanitários e outros. Quando não houver requisitos de ordem legal para o local de implantação da obra, devem ser adotados os valores indicados na Tabela 17.

Tabela 17 – Critérios para ventilação.

Nível de desempenho	Aberturas para ventilação (A)	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
	Aberturas Médias	Aberturas Grandes
Mínimo	$A \geq 7\%$ da área de piso	$A \geq 12\%$ da área de piso - região norte do Brasil $A \geq 8\%$ da área de piso - região nordeste e sudeste do Brasil

Fonte: ABNT NBR 15575 – 4.

Sendo que A deve ser calculado de acordo com a equação 8:

$$A = 100 \times (AA/Ap) (\%) \quad (8)$$

Onde:

AA é a área efetiva de abertura de ventilação do ambiente;

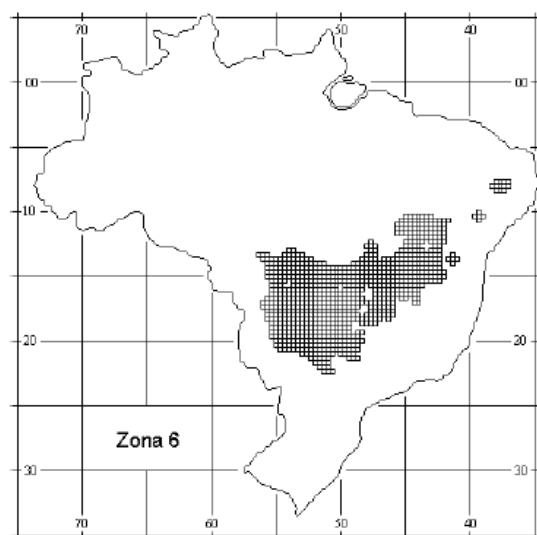
Ap é a área de piso do ambiente.

Tendo como referência o desempenho global da edificação, mostram-se relevantes os estudos sobre o concreto celular, ou seja, o concreto com ar incorporado para aplicação no sistema construtivo Paredes de Concreto moldadas *in loco* que atendam aos requisitos técnicos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade, além dos requisitos relacionados ao desempenho térmico da habitação.

3.6 ZONA BIOCLIMÁTICA DA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO

As cidades de Uberlândia e Ituiutaba encontram-se na Zona Bioclimática 6, segundo a ABNT NBR 15575-1:2013 nesta região é dispensada a verificação de desempenho térmico para o inverno. Segundo a ABNT NBR 15220-3:2005, nesta Zona Bioclimática as aberturas para ventilação devem ser médias e sombreadas, 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). A Figura 39 apresenta a Zona Bioclimática 6.

Figura 39 – Zona Bioclimática 6.



Fonte: ABNT NBR 15220-3 (2005).

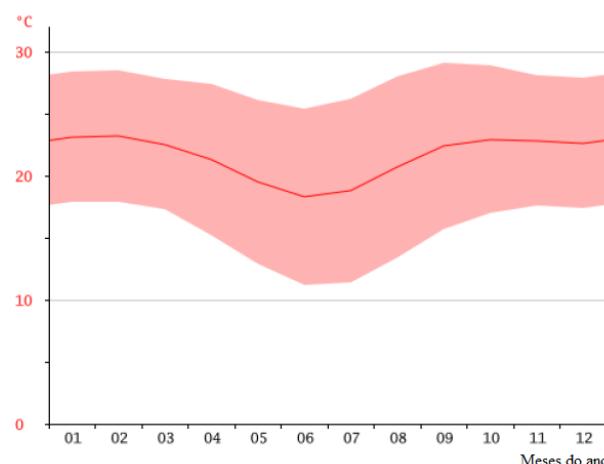
O clima de Uberlândia é caracterizado como tropical de altitude, com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 21,5 °C. O mês mais quente, fevereiro, tem temperatura média de 23,2 °C e o mês mais frio, junho, de 18,3 °C. Outono e primavera são estações de transição. A Tabela 18 e a Figura 40 ilustram os dados históricos de temperaturas médias e a umidades relativas do ar na cidade de Uberlândia (MG).

Tabela 18 – Dados históricos de temperaturas médias e umidade relativa do ar na cidade de Uberlândia (MG).

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima média (°C)	28,4	28,5	27,8	27,4	26,1	25,4	26,2	28	29,1	28,9	28,1	27,9	27,7
Temperatura média (°C)	23,1	23,2	22,5	21,3	19,5	18,3	18,8	20,7	22,4	22,9	22,8	22,6	21,5
Temperatura mínima média (°C)	17,9	17,9	17,3	15,2	12,9	11,2	11,4	13,4	15,7	17	17,6	17,4	15,4
Umidade relativa (%)	72	78	71	69	72	68	63	61	57	68	75	79	69

Fonte: Climate data (média das temperaturas) e Weatherbase (umidade relativa).

Figura 40 – Dados históricos de temperaturas médias, máxima e mínima de Uberlândia (MG).



Fonte: Climate data (média das temperaturas).

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGIA

Em conformidade com os objetivos propostos nesta pesquisa implementou-se a metodologia baseada em programa experimental, em laboratório, com placas simulando as paredes de concreto, de tal forma que os resultados obtidos pudessem fornecer informações acerca da caracterização, do ponto de vista de desempenho térmico, de paredes de concreto com ar incorporado por aditivo químico. A finalidade foi verificar o desempenho térmico de paredes de concreto contendo alguns teores de aditivo.

O programa experimental desenvolvido foi dividido em escolha e caracterização dos materiais constituintes das misturas, dosagem, moldagem dos corpos de prova e de placas de concreto, e ensaios de caracterização do concreto nos estados fresco e endurecido.

O experimento de desempenho térmico de concretos com ar incorporado foi feito com placas de concreto. A quantidade de placas para a realização do ensaio foi calculada pelo método de Análise de Variância. O método considera aceitável o erro quando o número de graus de liberdade é superior a 11. Considerando-se 4 níveis de aditivo e 4 de repetições, calculou-se então o erro da seguinte forma:

$$\text{Aditivo} = 4 \text{ (níveis de aditivo)} - 1 = 3 \text{ graus de liberdade}$$

$$\text{Total de unidades amostrais} = 4 \text{ (níveis de aditivo)} \times 4 \text{ (repetições)} = 16 \text{ graus de liberdade}$$

$$\text{Erro} = 16 \text{ (Total de unidades amostrais)} - 3 \text{ (Aditivo)} = 12 \text{ graus de liberdade}$$

Chegou-se a um número de graus de liberdade igual a 12 para o erro, conforme ilustrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Cálculo estatístico da quantidade de amostras.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA	
Função Variável	Grau de liberdade
Aditivo	3
Erro	12
Total	15

Fonte: Autor.

Como o número de graus de liberdade do erro foi maior do que o recomendado (11), conclui-se que 4 repetições é uma quantidade satisfatória para os ensaios, considerando-se 4 níveis de aditivo. Portanto, foram utilizadas 4 placas para cada traço.

4.2 MATERIAIS

Para a produção das misturas do concreto com aditivo incorporador de ar foram selecionados os seguintes materiais constituintes:

Cimento Portland CP V - escolhido em função da grande utilização em paredes de concreto, de acordo com as informações obtidas em entrevistas realizadas em obras. Os ensaios de caracterização dos cimentos expostos na Tabela 20 consistem na determinação da massa específica, da finura, da resistência à compressão e dos tempos de início e fim de pega;

Tabela 20 – Resultados da caracterização do aglomerante.

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

Fonte: Autor.

Agregado miúdo – foi selecionada uma areia natural, proveniente de cava de rio, de granulometria média. Os ensaios de caracterização do agregado miúdo, mostrados na Tabela 21, contemplam a determinação da composição granulométrica, massa unitária, massa específica, módulo de finura e absorção da areia;

Tabela 21 – Resultados da caracterização do agregado miúdo.

Agregado miúdo		
Ensaios realizados	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,58	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária (g/cm ³)	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: Autor.

Agregado graúdo – foi selecionado um agregado natural britado de origem basáltica, sendo classificado comercialmente como brita 1. Os ensaios de caracterização do agregado graúdo, conforme expostos na Tabela 22, contemplam a determinação da composição granulométrica, massa unitária no estado solto e compactado, massa específica e absorção da brita.

Tabela 22 – Resultados da caracterização do agregado graúdo.

Agregado graúdo		
Ensaios realizados	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,82	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,49	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	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: Autor.

Aditivos químicos – o aditivo utilizado foi o CEMIX-AIR, de fabricação da indústria Vedacit Impermeabilizantes, vendido comercialmente como incorporador de ar, ou seja, do tipo IAR.

Conforme constava na embalagem, o produto tinha as características de natureza, cor, composição, densidade, teor de íons cloreto (Cl-) e consumo apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Propriedades do aditivo incorporador de ar.

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

Fonte: Manual técnico Vedacit Impermeabilizantes, 2008.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.3.1 Introdução

Para a realização do experimento foi adotado o traço 1:2:3 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo) para o concreto de referência, um traço com consumo médio de cimento, aproximadamente 350 kg/m³. Foi adotada também a relação água/cimento de 0,53.

Em relação ao aditivo, a recomendação do fabricante Vedacit é que o teor de aditivo fique entre 0,04% e 0,12% sobre a massa do cimento. Foram confeccionados então, outros três tipos de concreto, variando o teor de aditivo incorporador de ar. Desta forma, foram dosados concretos com teores de aditivo iguais a 0,04%, 0,08% e 0,12% sobre o consumo de cimento, além do concreto de referência, sem aditivo químico. O objetivo era avaliar concretos com até 15% de teor de ar incorporado e massa específica em torno de 2000 kg/m³.

4.3.2 Produção do concreto

Como equipamento de mistura foi utilizado uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade nominal do tambor de 320 litros, conforme Figura 41.

Figura 41 – Betoneira utilizada na pesquisa.



Fonte: Autor.

O procedimento de mistura para a confecção dos concretos foi o seguinte:

- Inicialmente, pesou-se os materiais e determinou a umidade da areia;
- Imprimou-se a betoneira com concreto de traço 1:2:3:0,5 (cimento:areia:brita:água);
- Colocou-se na betoneira a brita, o cimento e metade da água, misturando por 2 minutos;
- Logo após, foi adicionada a areia e o restante da água (adotou-se a diluição do aditivo na água para todos os traços por ser em menor quantidade, a fim de garantir seu total aproveitamento);
- Depois, iniciou-se novamente a mistura por mais 3 minutos;
- Finalmente, retirou-se uma porção de amostra para determinar suas propriedades no estado fresco e outra para moldagem da placa e dos corpos de prova.

4.3.3 Transporte, moldagem e cura dos corpos de prova e placas de concreto

O concreto produzido era transportado por carrinho de mão até a fôrma de madeira. Em seguida, era feito o preenchimento da fôrma e o adensamento do concreto utilizando um vibrador de imersão. Depois de preenchido todo o volume de cada fôrma, era feito o acabamento da superfície. A Figura 42 ilustra o transporte, preenchimento das formas, adensamento e acabamento.

Figura 42 - Transporte, preenchimento das formas, adensamento e acabamento.



Fonte: Autor.

A cura das placas foi realizada com as mesmas em um local coberto e fresco. A desforma foi realizada sete dias após a moldagem. Depois de retiradas as fôrmas, o concreto era molhado duas vezes ao dia, até atingir 21 dias.

Os corpos de prova foram moldados e curados segundo a ABNT NBR 5738:2003. Foram adensados com vibrador de imersão e curados imersos em um tanque com água. A Figura 43 ilustra a moldagem dos corpos de prova.

Figura 43 – Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

4.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Foram realizados no estado fresco, ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, determinação da massa específica e determinação do teor de ar.

4.4.1 Consistência

O ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizado conforme a ABNT NBR NM 64:1998, não foi definido previamente o abatimento. A Figura 44 ilustra a realização do ensaio de abatimento.

Figura 44 – Ensaio de abatimento do tronco de cone.

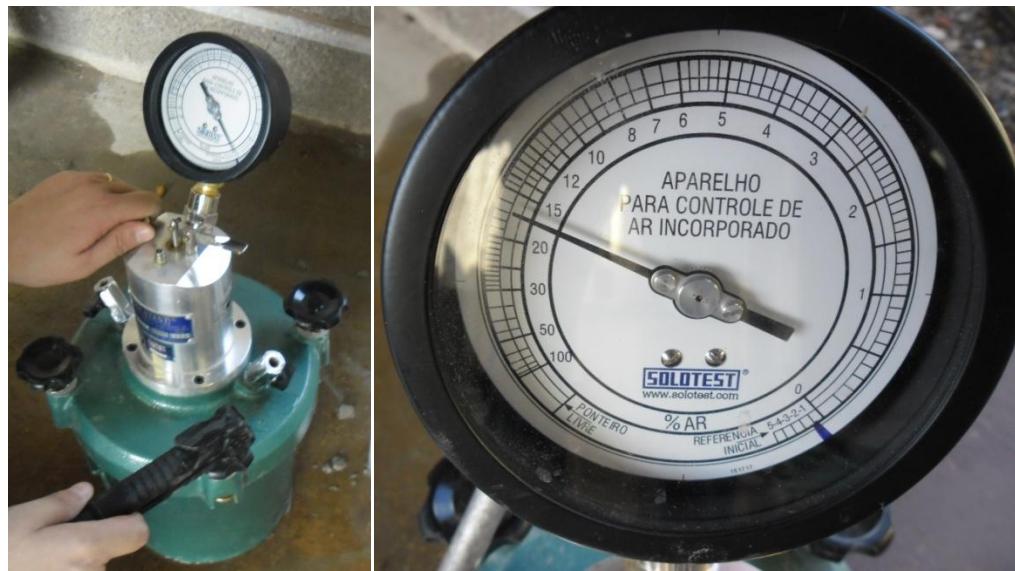


Fonte: Autor.

4.4.2 Teor de ar

A determinação do teor de ar foi realizada através do método pressométrico, de acordo com a ABNT NBR NM 47:2002. Na Figura 45 pode ser observado como foi feito o ensaio de teor de ar.

Figura 45 – Ensaio de teor de ar no estado fresco.



Fonte: Autor.

4.4.3 Massa específica

O ensaio de determinação da massa específica foi feito seguindo as recomendações da ABNT NBR 9833:2008.

4.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

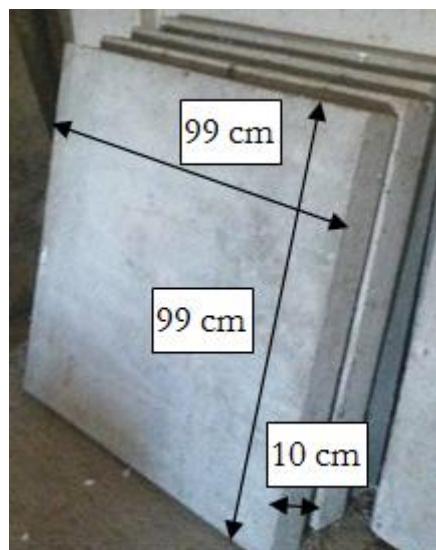
Foram moldadas as seguintes quantidades de corpo de prova e placas de concreto:

- 4 corpos de prova cilíndrico 10 cm x 20 cm para ensaio de módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 7 dias;
- 4 corpos de prova para ensaio de módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 28 dias;

- 4 placas para os ensaios de desempenho térmico com dimensões de 99 cm x 99 cm x 10 cm, conforme ilustrado na Figura 46.

A desforma dos corpos de prova foi feita após 24 horas da moldagem.

Figura 46 – Dimensões das placas de concreto.



Fonte: Autor.

4.5.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

O ensaio de resistência à compressão do concreto foi feito de acordo com a ABNT NBR 5739:2007 nas idades de 7 dias e 28 dias. Foi utilizado enxofre para o capeamento dos corpos de prova. A Figura 47 ilustra a realização do ensaio de Resistência à compressão.

Figura 47 – Ensaio de Resistência à compressão.



Fonte: Autor.

O ensaio de módulo de elasticidade do concreto foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8522:2008 nas idades de 7 dias e 28 dias.

4.5.2 Procedimento experimental para avaliação do desempenho térmico

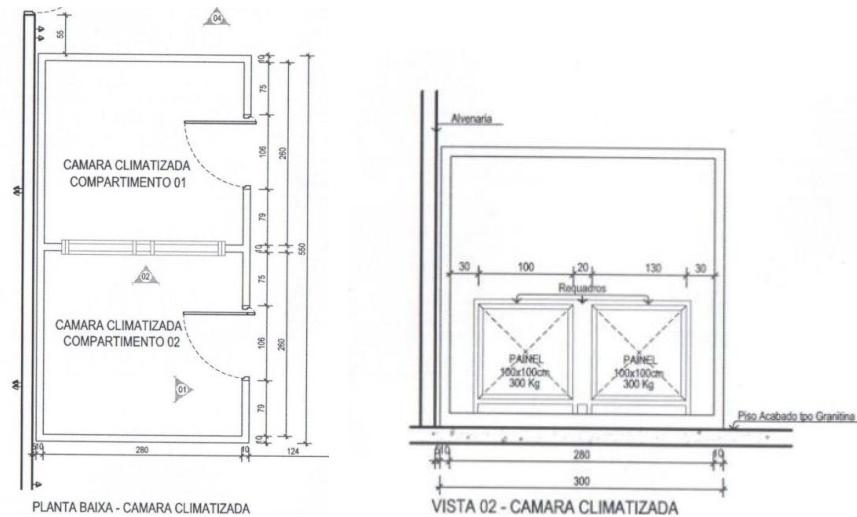
Para realização dos ensaios de desempenho térmico foi utilizada a câmara ilustrada nas Figuras 48 e 49, do laboratório da FECIV-UFU. A câmara possui dois compartimentos isolados termicamente, construído com paredes e coberturas de EPS revestido por chapas de alumínio e piso de EPS revestido de concreto. Estes dois compartimentos foram colocados os painéis em espaços reservados para tal, assim, uma face estava voltada para o compartimento esquerdo e a outra para o compartimento direito.

Figura 48 – Câmara climatizada do laboratório da FECIV-UFU.



Fonte: Autor.

Figura 49 – Projeto da câmara climatizada do laboratório da FECIV-UFU.

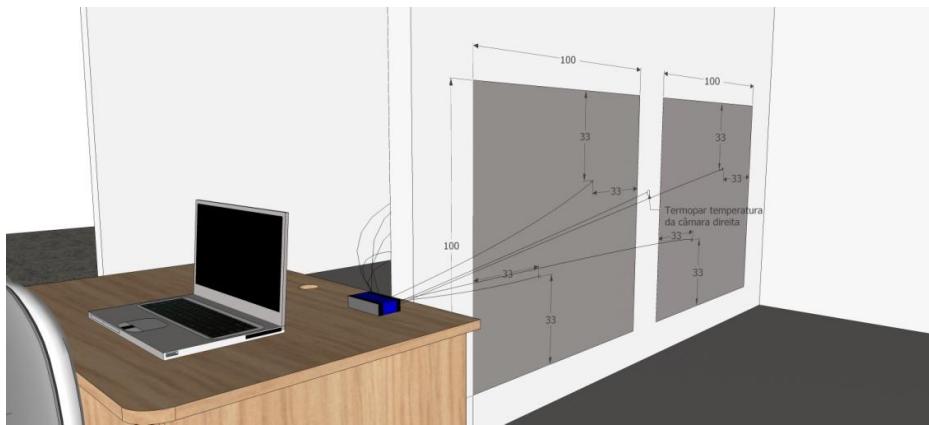


Fonte: Da Silva (2013).

Foram colocadas duas placas do mesmo traço na câmara por ensaio, cada uma delas contendo dois termopares em cada face de forma espelhada com a outra face. Outro termopar foi deixado livre no interior da câmara, sem contato com o concreto, a 33 cm das placas, para registrar a temperatura do ar próximo à placa.

Os termopares fixados na superfície da placa foram distribuídos a um terço (33 cm) das laterais e a um terço (33 cm) das bordas superior e inferior, conforme ilustrado na Figura 50. Também foi posicionado um termopar do lado externo da câmara, para registrar a temperatura ambiente. Os ensaios foram iniciados após mais de 90 dias da moldagem das placas de concreto após a umidade do concreto entrar em equilíbrio com a umidade relativa do ar.

Figura 50 – Distribuição dos termopares nas placas.



Fonte: Autor.

4.5.2.1 Experimentação

Fabricação dos termopares

A preparação dos sensores de temperatura foi feita no laboratório da FEMEC/UFU, onde foram fabricados termopares do tipo T (cobre/constantan) calibre 24 (bitola de 0,51 mm). Fabricação é a soldagem de uma das extremidades do par termoelétrico. A Figura 51 ilustra o material cobre/constantan que foi utilizado para fabricação dos termopares.

Figura 51 – Cobre/constantan.



Fonte: Autor.

Os termopares do tipo T são indicados para temperaturas entre -270°C e 400°C, estando adequados para o objetivo da pesquisa, pois o intervalo de temperatura para a pesquisa foi entre 5°C e 25°C (período de inverno).

4.5.2.2 Sistema de medição de temperatura

O sistema de medição de temperatura foi composto de um sistema de aquisição de dados (QUANTUM X MX840A – HBM) de 8 canais para termopares, conforme Figura 52, acoplado a um microcomputador.

Figura 52 – Sistema de aquisição de dados (HBM) de 8 canais para termopares.



Fonte: HBM.

4.5.2.3 Montagem do aparato experimental

Os termopares fabricados foram ligados ao conector THERMO MXBOARD ilustrado na Figura 53, que por sua vez, foi conectado no sistema de aquisição de dados.

Figura 53 – Conectores para termopares.



Fonte: Autor.

4.5.2.4 Procedimento de medição

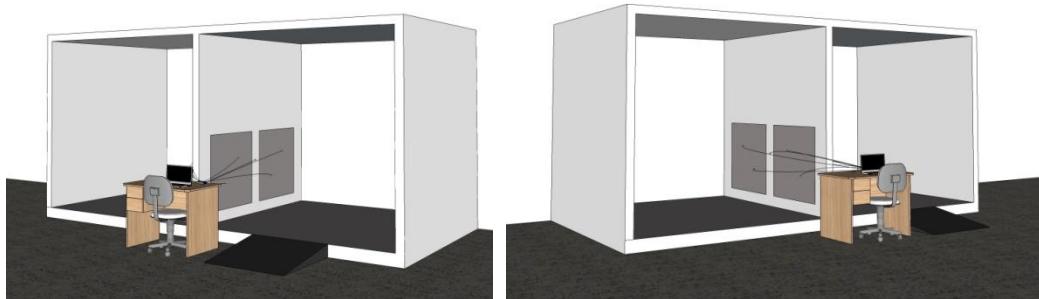
A pesquisa experimental foi realizada para o período de inverno, considerando as temperaturas máximas médias e as temperaturas mínimas médias dos meses de maio, junho e julho.

Para a medição da temperatura, o sistema de aquisição de dados foi configurado para gravar a média das temperaturas lidas nos últimos 30 segundos em intervalo de tempo de 1 minuto. A temperatura inicial das câmaras foi 25°C. Primeiramente, ligava-se a câmara esquerda a 5°C por aproximadamente 48 horas. Posteriormente, ligava-se a outra câmara (direita) também a 5°C por aproximadamente 24 horas. E por fim, desligava-se a câmara esquerda, continuando a leitura de dados por mais 24 horas. A umidade relativa do ar no interior das câmaras foi fixada em 70%, próximo da média do período de inverno. Mas devido à histerese do equipamento, ela variava entre 60% e 90%, aproximadamente.

O ensaio de condução térmica no concreto foi dividido em três etapas. Na primeira etapa a câmara esquerda foi ligada a 5 °C e a câmara direita mantida a temperatura ambiente. Na segunda etapa, as duas câmaras eram ligadas a 5 °C. E na terceira etapa, a temperatura da câmara esquerda era elevada a 25 °C e a câmara esquerda mantida a 5 °C.

A Figura 54 ilustra como foi montado o ensaio, com as placas entre as duas câmaras, os termopares nas duas faces e o computador com o aquisitor de dados.

Figura 54 – Esquema de montagem do ensaio.



Fonte: Autor.

A Figura 55 ilustra a montagem do aparato do ensaio e as posições dos termopares na placa.

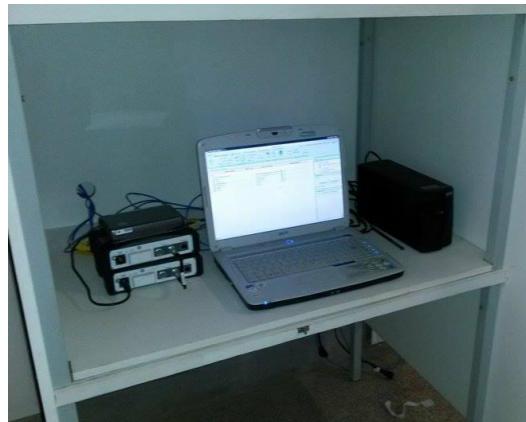
Figura 55 – Ensaio de desempenho térmico.



Fonte: Autor.

Já a Figura 56 ilustra a montagem do computador e da aquisição de dados.

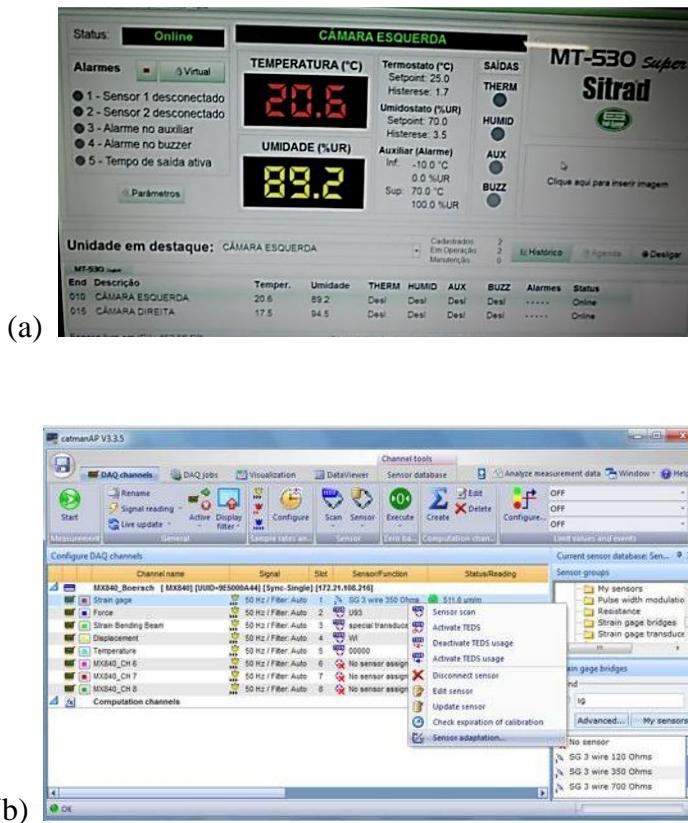
Figura 56 – Computador e aquisição de dados.



Fonte: Autor.

Na Figura 57 pode ser visto: (a) o programa “Sitrax” utilizado para controlar a temperatura e umidade das câmaras climatizadas e (b) o programa Catmam utilizado para fazer as leituras e gravar as informações das temperaturas registradas pelos termopares.

Figura 57 – (a) Sistema “Sitrud” e (b) Sistema Catmam.



Fonte: Autor.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através de ensaios realizados no laboratório de materiais e estruturas da FECIV/UFU e de outros laboratórios da UFU.

5.2 RESULTADOS NO ESTADO FRESCO

Os ensaios no estado fresco foram abatimento de tronco de cone, teor de ar e massa específica.

Na Tabela 24 podem ser visualizados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o concreto em seu estado fresco.

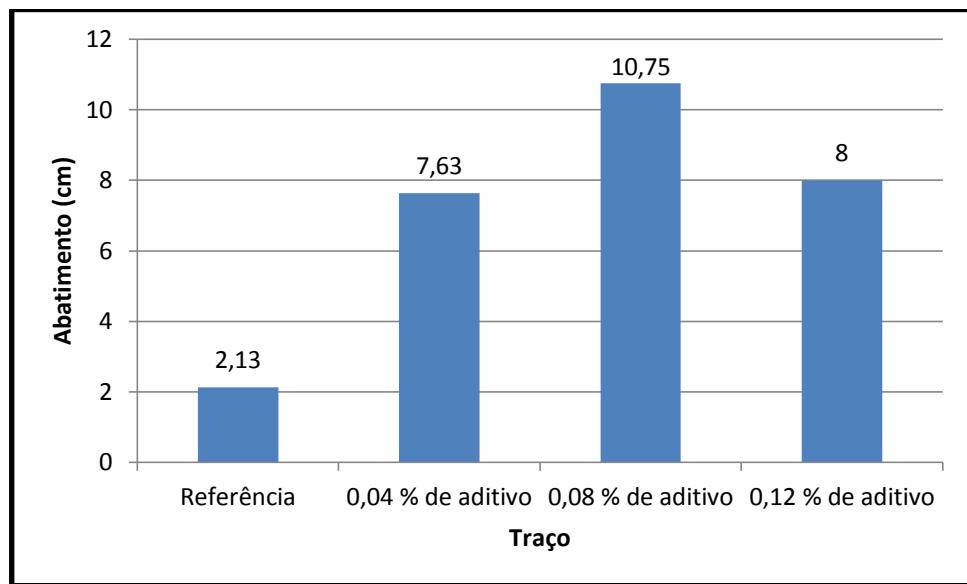
Tabela 24 – Resultados obtidos no estado fresco.

TRAÇOS		ENSAIOS NO ESTADO FRESCO			
		Abatimento (cm)	Teor de ar (%)	Massa específica (kg/m ³)	
REFERÊNCIA	Concreto 1A	1,50	2,13	2,50	2452,58
	Concreto 1B	1,50		3,20	
	Concreto 1C	2,50		2,50	
	Concreto 1D	3,00		3,00	
0,04 % DE ADITIVO	Concreto 2A	11,00	7,63	11,00	2323,41
	Concreto 2B	8,00		9,00	
	Concreto 2C	5,00		6,10	
	Concreto 2D	6,50		6,00	
0,08 % DE ADITIVO	Concreto 3A	9,00	10,75	11,50	2199,15
	Concreto 3B	9,00		9,00	
	Concreto 3C	12,50		11,50	
	Concreto 3D	12,50		12,50	
0,12 % DE ADITIVO	Concreto 4A	7,00	8,00	13,00	2182,80
	Concreto 4B	11,00		13,00	
	Concreto 4C	7,00		11,50	
	Concreto 4D	7,00		10,00	

Fonte: Autor.

Na Figura 58 pode ser observado o desempenho do concreto de referência e dos concretos com diferentes teores de aditivo no ensaio de abatimento de tronco de cone.

Figura 58 – Resultados de abatimento de tronco de cone.

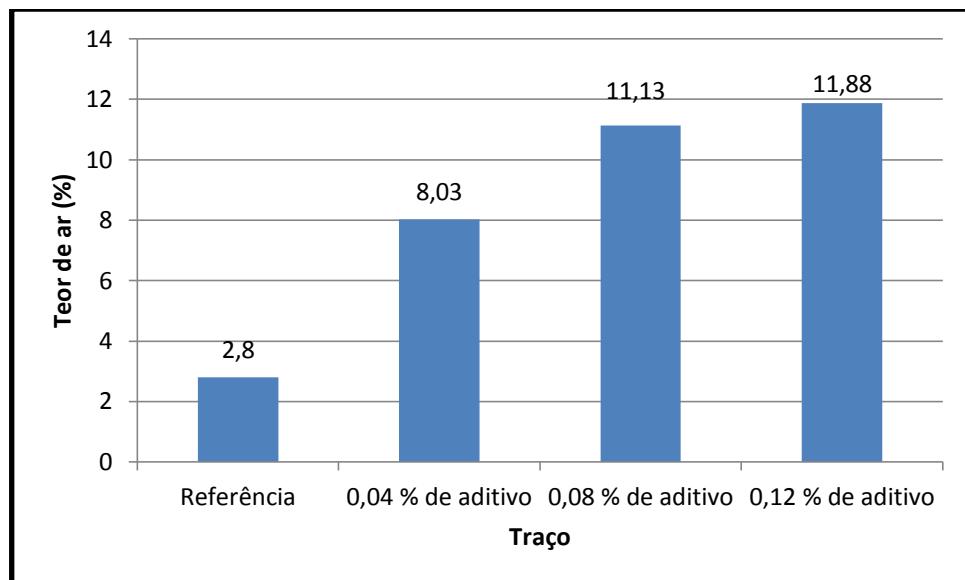


Fonte: Autor.

Observa-se nestes resultados que o traço referência (traço 1) apresentou abatimento de 2,13 cm, enquanto que o traço com 0,08% de aditivo (traço 3) apresentou abatimento mais alto, de 10,75 cm. Mas já o traço 4, com 0,12% de aditivo, apresentou abatimento menor do que o traço 3, demonstrando que o abatimento diminui após um determinado teor de aditivo.

Na Figura 59 é observado o gráfico dos resultados do ensaio de teor de ar.

Figura 59 – Resultados das médias dos teores de ar.

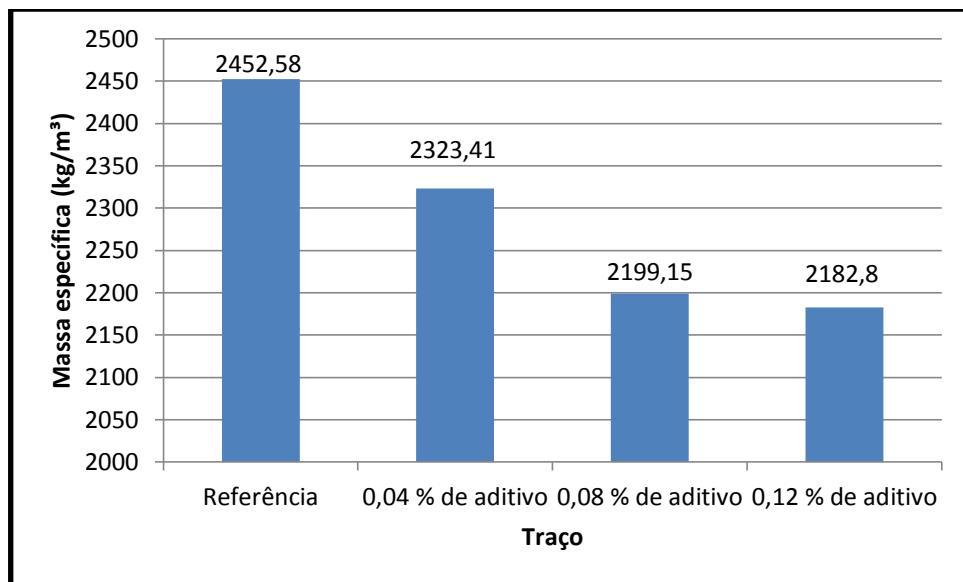


Fonte: Autor.

No ensaio de teor de ar foi verificado um aumento da taxa de 2,80 % para o traço referência para 11,88 % para o traço com o teor máximo de aditivo recomendado pelo fabricante. Houve um acréscimo considerável do teor de ar no concreto utilizando o aditivo. A porcentagem encontrada, 11,88% de teor de ar, é bem maior do que o recomendado por autores. De acordo com Santos (2012), o limite aceitável para acréscimo do teor de ar incorporado quando se utiliza aditivo é 6%.

Na Figura 60 são ilustrados os resultados do ensaio de massa específica dos concretos analisados.

Figura 60 – Resultados das médias de massa específica.

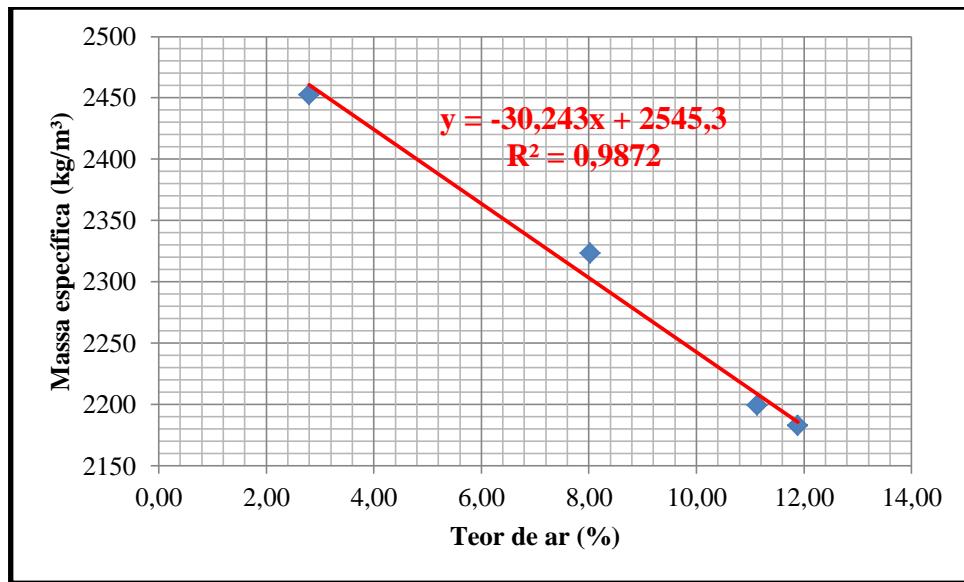


Fonte: Autor.

Já o resultado da massa específica demonstrou um comportamento inversamente proporcional ao do teor de ar. Ou seja, o incremento de aditivo e consequentemente de ar incorporado proporcionou um concreto com massa específica menor. Sendo 2452,58 kg/m³ para o concreto de referência e 2182,80 kg/m³ para o concreto com 0,12 % de aditivo. Araújo *et al.* (2014), utilizando concretos com teores de aditivo de 0,18% e 0,19% sobre a massa de cimento obteve massa específica de 1730 kg/m³ e 1650 kg/m³, respectivamente. Os valores de massa específica encontrados por Araújo *et al.* (2014), utilizando traços com 33,33% a mais de aditivo, foram bem menores do que os encontrados nesta pesquisa. O concreto encontrado nesta pesquisa não é considerado leve, pois ficou acima de 2000 kg/m³.

Na Figura 61 é apresentado um gráfico que relaciona a massa específica e o teor de ar do concreto.

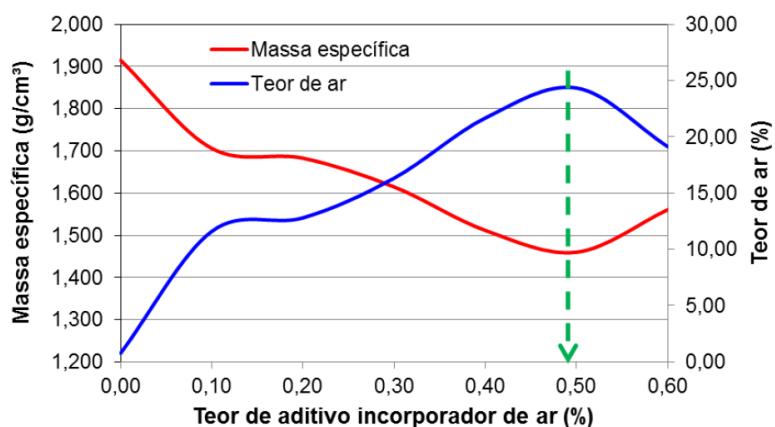
Figura 61 – Relação: massa específica x teor de ar.



Fonte: Autor.

Santos (2012) fez um trabalho experimental com diversos teores de aditivos (0%, 0,10%, 0,20%, 0,30%, 0,40%, 0,50%, 0,60%) e relação água/cimento 0,50 em pastas cimentícias para um estudo de dosagem de concreto auto adensável, os resultados desta pesquisa estão apresentados na Figura 62. Fazendo a interpolação do gráfico do autor, para um teor de aditivo de 0,12% sobre a massa de cimento foi encontrado um teor de ar de 11,84%, valor muito próximo do encontrado nessa pesquisa que foi de 11,88% para o mesmo teor de aditivo.

Figura 62 – Variação da massa específica e teor de ar em função do teor de aditivo de Santos (2012).



Fonte: Santos (2012).

Santos (2012) também analisou o comportamento do aditivo incorporador de ar no concreto. Em um traço foi utilizado 316,8 kg/m³ de cimento CII E 32, relação água/cimento de 0,50, teor de fíler de 40%, 0,44% de teor de aditivo superplasticante e 0,10% de teor de aditivo incorporador de ar. Foi encontrado nos ensaios o resultado de 14% de teor de ar e massa específica de 1,85 kg/dm³. Em outro traço foi utilizado 362,8 kg/m³ cimento CII E 32, relação água/cimento de 0,55, teor de fíler de 50%, 0,64% de teor de aditivo superplasticante e 0,20% de teor de aditivo incorporador de ar. Foi encontrado nos ensaios o resultado de 15% de teor de ar e massa específica de 1,82 kg/dm³.

O resultado do teor de ar de encontrado na pesquisa de Santos (2012) foi maior do que o encontrado neste trabalho, provavelmente pela utilização simultânea do aditivo superplasticante e o aditivo incorporador de ar. Já o valor encontrado por Santos (2012) para a massa específica foi menor do que deste trabalho, consequência do aumento do teor de ar e pela incorporação de fíler no concreto.

Já Lima e Libório (2008), fizeram uma pesquisa utilizando o traço de referência 1:2,36:2,64:0,42 (cimento: areia: brita: água) que apresentou 2% de teor de ar e o concreto com 0,045% de aditivo apresentou 7% de teor de ar, com consumo de cimento de 384 kg/m³ e 379 kg/m³. Os valores de teor de ar encontrados nesta pesquisa para o traço de referência foi de 2,8% e para o traço com 0,04% de aditivo foi 8,03%, próximo dos resultados encontrados pelo autor, que foi de 2% e 7%, respectivamente, para teores de aditivos próximos do utilizado nesta pesquisa.

5.3 RESULTADOS NO ESTADO ENDURECIDO

5.3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

No estado endurecido foram realizados os ensaios de Resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Na Tabela 25 podem ser vistos os resultados obtidos nos ensaios no estado endurecido do concreto.

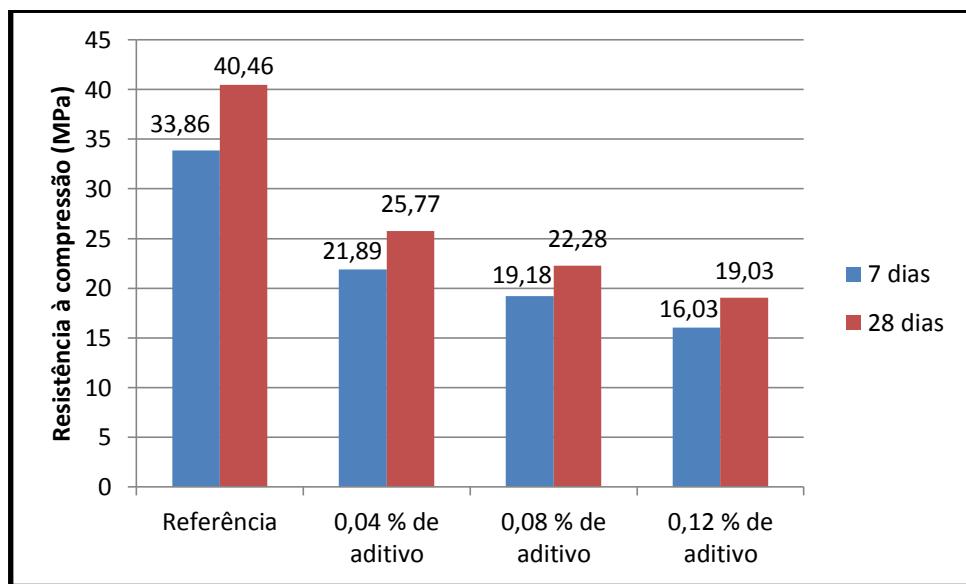
Tabela 25 – Resultados obtidos no estado endurecido.

TRAÇOS		ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO					
		Resistência à compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa)		
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
REFERÊNCIA	Concreto 1A	38,00	33,86	46,63	40,46	38,70	37,45
		34,92		40,15		35,20	
	Concreto 1B	35,15		41,92		49,40	
		34,56		42,48		43,40	
	Concreto 1C	32,47		41,55		39,30	
		32,57		36,74		40,00	
	Concreto 1D	32,46		38,90		34,40	
		30,78		35,29		33,10	
0,04 % DE ADITIVO	Concreto 2A	16,56	21,89	22,58	25,77	25,10	32,38
		20,07		21,30		23,90	
	Concreto 2B	24,87		29,21		32,50	
		25,17		28,26		32,50	
	Concreto 2C	20,01		26,57		29,10	
		20,90		23,21		33,60	
	Concreto 2D	24,75		27,37		29,00	
		22,75		27,69		25,70	
0,08 % DE ADITIVO	Concreto 3A	19,66	19,18	20,89	22,28	31,80	32,75
		20,91		25,36		29,50	
	Concreto 3B	21,52		26,32		30,60	
		23,02		30,14		33,20	
	Concreto 3C	16,11		17,93		19,00	
		18,44		21,89		23,80	
	Concreto 3D	14,55		15,30		24,50	
		19,25		20,44		24,50	
0,12 % DE ADITIVO	Concreto 4A	16,72	16,03	20,29	19,03	28,20	27,83
		17,34		20,77		25,50	
	Concreto 4B	15,31		17,00		29,70	
		15,25		15,73		33,80	
	Concreto 4C	12,70		15,52		15,40	
		14,64		12,73		26,50	
	Concreto 4D	16,93		24,56		29,10	
		19,35		25,66		27,20	

Fonte: Autor.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são apresentados no gráfico da Figura 63.

Figura 63 – Resistência à compressão obtida nos ensaios aos 7 dias e 28 dias para os diferentes teores de aditivos estudados.



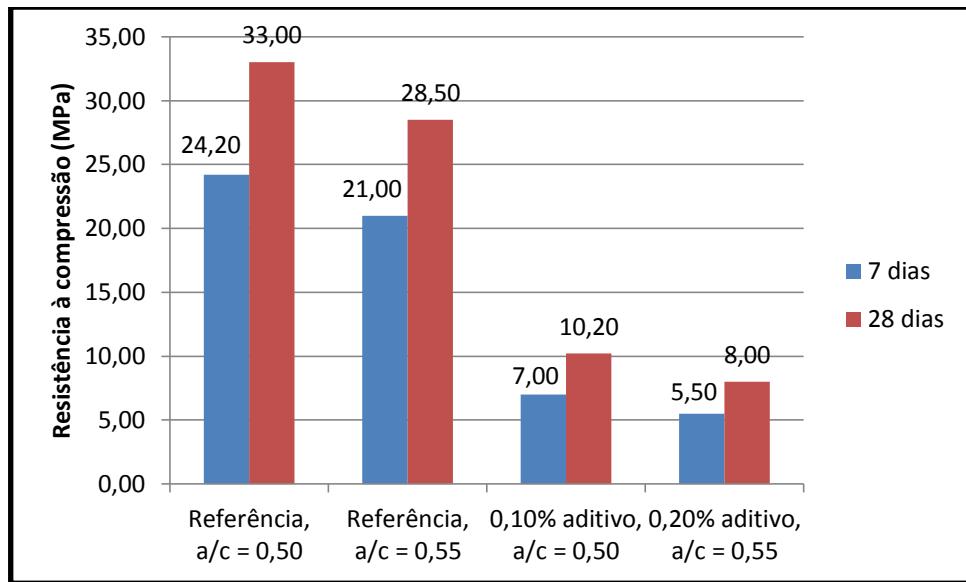
Fonte: Autor.

No ensaio de resistência à compressão foi observada uma diminuição da resistência com a utilização do aditivo, o que já era previsto por causa do incremento do teor de ar no concreto. O concreto de referência adquiriu aos sete dias resistência de 33,86 MPa, enquanto que os traços com 0,04 %, 0,08 % e 0,12 % de aditivo apresentaram resistência de 64,65 %, 53,68 % e 47,34 %, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Já aos 28 dias a resistência do concreto de referência foi 33,86 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.

Araújo *et al.* (2014), em ambos os concretos leves estudados foram especificados com uma relação a/c alta, o que impactou na resistência à compressão de ambos que foi muito baixa (na ordem de 6 MPa), bem menor do que a resistência encontrada neste trabalho.

Santos (2012) encontrou os resultados exposto na Figura 64 para resistência à compressão do concreto nas idades de 7 e 28 dias. Utilizando um concreto de referência com relação água/cimento (a/c) de 0,50 e 0,55, e teores de aditivo incorporadores de ar de 0,10% e 0,20%, respectivamente.

Figura 64 – Resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto de Santos (2012).



Fonte: Santos (2012).

Analizando os resultados de Santos (2012), podemos verificar que aos 7 e 28 dias a resistência dos traços com aditivo ficaram em torno de 30% da resistência do traço de referência, ou seja, bem menor do que o encontrado neste trabalho para o maior teor de aditivo, que foi próximo de 47% da resistência do traço de referência.

Já Lima e Libório (2008), encontrou resultados de resistência do concreto com aditivo incorporador de ar bem acima dos encontrados nesta pesquisa, entre 70% e 80% da resistência do concreto de referência, os dados são apresentados na Tabela 26.

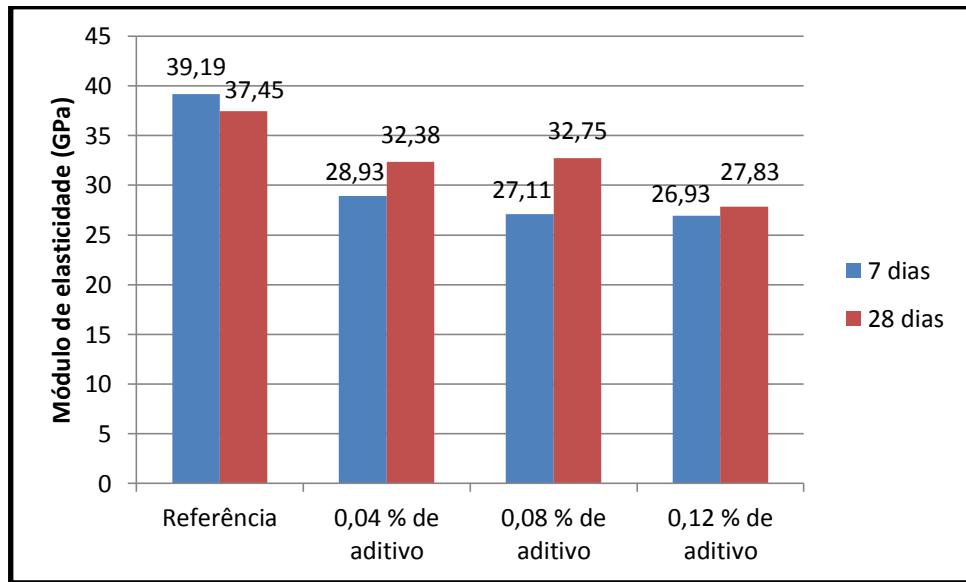
Tabela 26 – Resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto.

Traço	Resistência à compressão (MPa)		
	1 dia	28 dias	63 dias
Referência	10,00	53,00	61,00
Com aditivo incorporador de ar	8,00	38,00	43,00

Fonte: Lima e Libório (2008).

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade são apresentados no gráfico da Figura 65.

Figura 65 – Módulo de elasticidade obtido nos ensaios aos 7 dias e 28 dias para os diferentes teores de aditivos estudados.

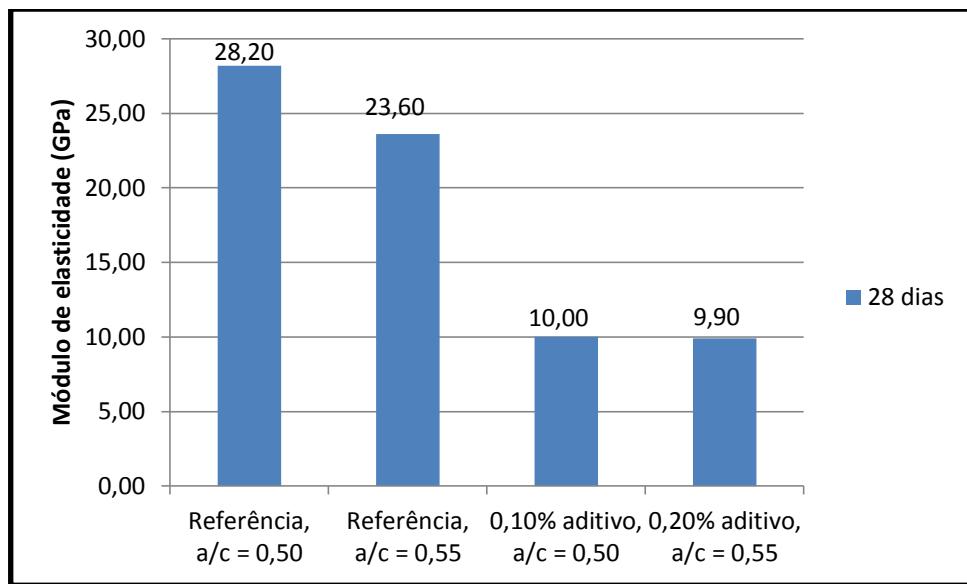


Fonte: Autor.

No ensaio de módulo de elasticidade era esperado um comportamento similar ao do ensaio de resistência à compressão, ou seja, que o incremento de aditivo provocasse uma diminuição do valor do módulo. O concreto de referência adquiriu aos sete dias módulo de elasticidade de 39,19 GPa, enquanto que os traços com 0,04 %, 0,08 % e 0,12 % de aditivo apresentaram resistência de 73,82 %, 69,18 % e 68,72 %, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Já aos 28 dias a resistência do concreto de referência foi 37,45 GPa, enquanto que os traços com 0,04 %, 0,08 % e 0,12 % de aditivo apresentaram resistência de 86,46 %, 87,45 % e 74,31 %, respectivamente, em relação ao concreto de referência.

Santos (2012) encontrou os resultados expostos na Figura 66 para o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias, utilizando os mesmos traços dos concretos do ensaio de resistência à compressão.

Figura 66 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto de Santos (2012).



Fonte: Santos (2012).

Analizando os resultados de Santos (2012), podemos verificar que aos 28 dias o módulo de elasticidade do concreto com aditivo ficou entre 35% e 42% do valor do módulo do traço de referência, ou seja, bem menor do que o encontrado neste trabalho para o maior teor de aditivo, que foi próximo de 74,31% do valor encontrado para o traço de referência.

O concreto com o teor máximo de aditivo (0,12 %) apresentou aos 28 dias resistência à compressão e módulo de elasticidade 47,43% e 74,31%, respectivamente. Portanto a diminuição do módulo de elasticidade quando comparados o concreto de referência e o concreto com aditivo foi consideravelmente menor do que a diminuição da resistência à compressão.

Além disso, os resultados demonstram que o concreto com 0,04% de aditivo apresentou aos 28 dias resistência à compressão de 25,77 MPa, o que permite tranquilamente ser utilizado com função estrutural na construção de casas de parede de concreto. Pois, a resistência encontrada foi maior do que a resistência geralmente utilizada, que é de 25 MPa.

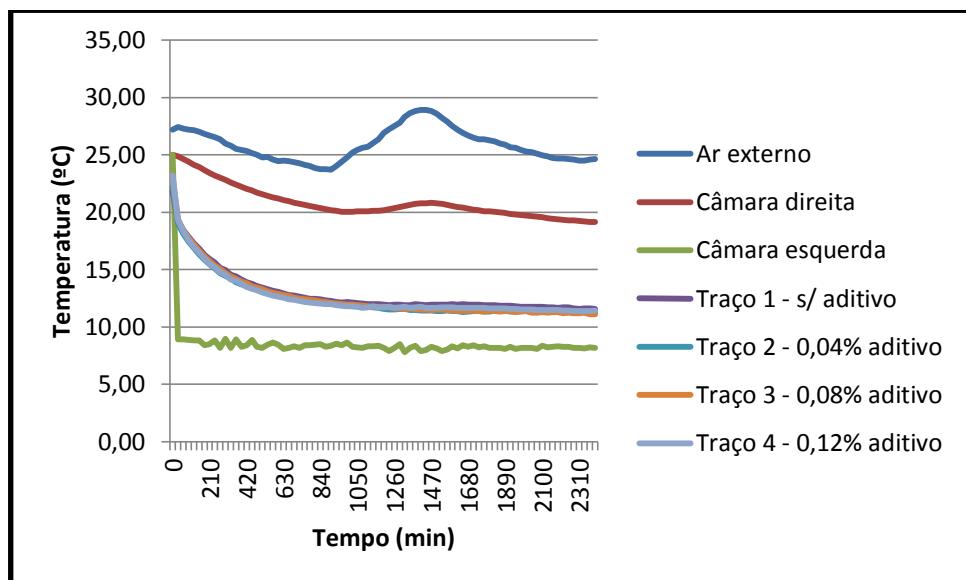
5.3.2 Desempenho térmico

Os gráficos apresentados da Figura 7 a Figura 12 apresentam as variações de temperaturas medidas nos seguintes ambientes: ar externo, ar da câmara esquerda, ar da câmara direita e as médias dos termopares colados nas faces esquerda e direita de cada placa (traço 1 – sem aditivo, traço 2 – 0,04% de aditivo, traço 3 – 0,08% de aditivo e traço 4 – 0,12% de aditivo).

Como as câmaras tinham uma histerese de 1,7°C e a memorização dos valores eram feitas a cada minuto, para melhor visualização gráfica, foi feita uma média com intervalo de 30 minutos.

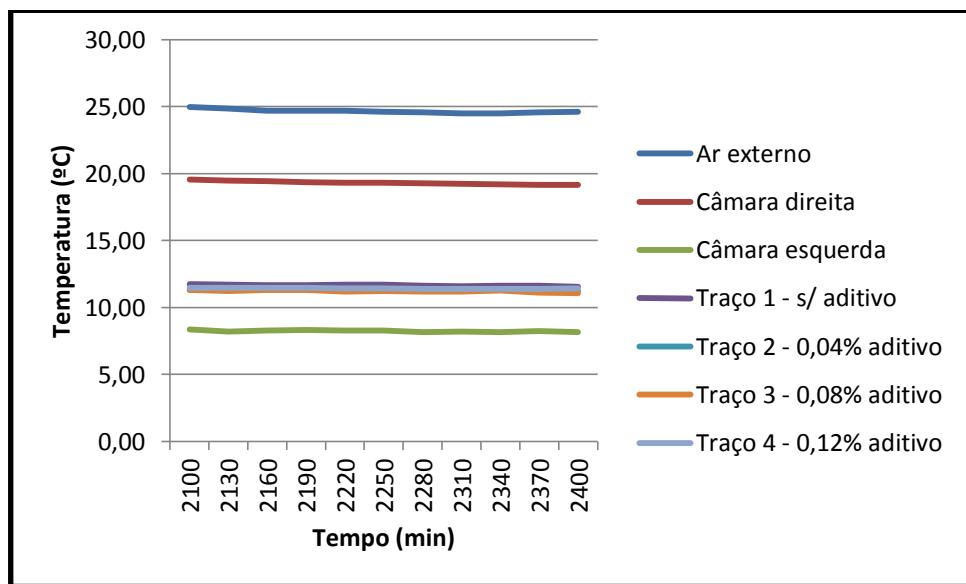
As Figuras 67 e 68 ilustram os resultados da etapa 1 do ensaio com a média dos 4 termopares colados na face esquerda da câmara.

Figura 67 – Variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

Figura 68 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



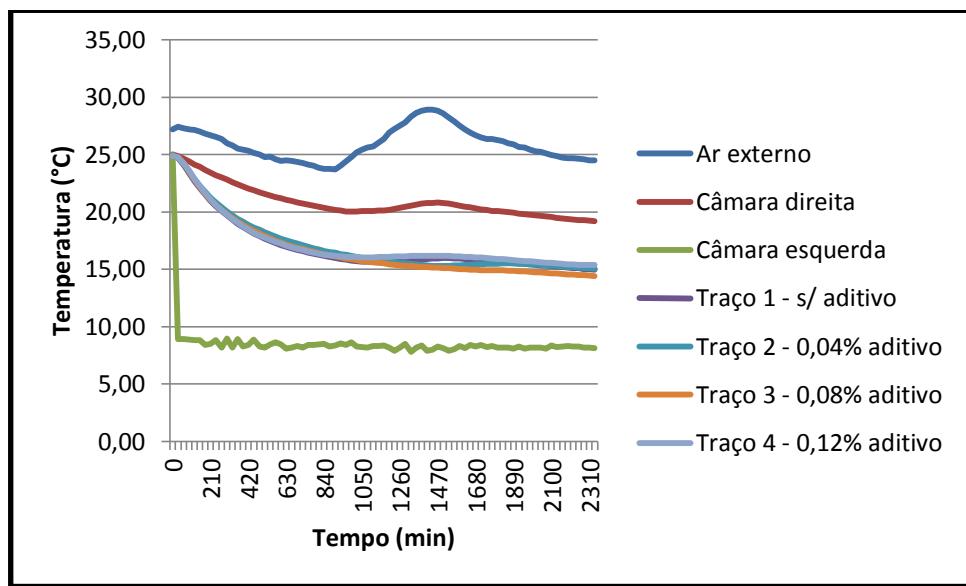
Fonte: Autor.

Conforme pode ser verificado na Figura 62, na 1^a etapa do ensaio as temperaturas dos termopares colados nas faces dos concretos estabilizaram-se a aproximadamente 1500 min depois de ligada a câmara esquerda. Neste instante pôde ser visualizado que o concreto de referência (traço 1) estava com temperatura ligeiramente superior a dos demais.

No momento da estabilização, na câmara esquerda, o concreto de referência estava com temperatura de 11,96°C, o concreto do traço 2 com 11,40°C, o concreto de traço 3 com 11,53°C e o concreto com o teor máximo de aditivo (traço 4) estava a uma temperatura de 11,68 °C. Portanto, a temperatura do concreto de referência ficou 0,56°C acima do concreto do traço 2.

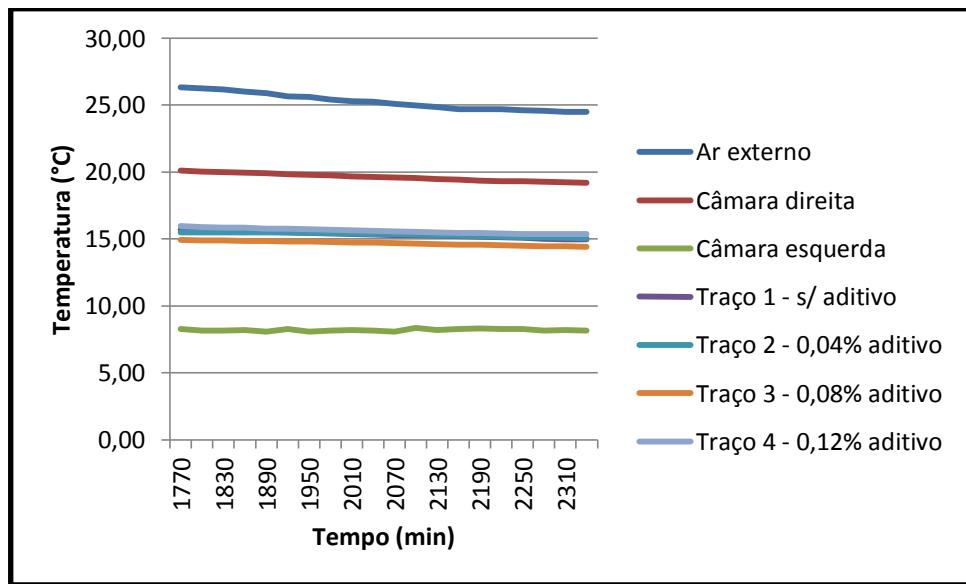
As Figura 69 e 70 ilustram os resultados da etapa 1 do ensaio com a média dos 4 termopares colados na face voltada para a câmara da direita.

Figura 69 – Variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

Figura 70 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 1 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

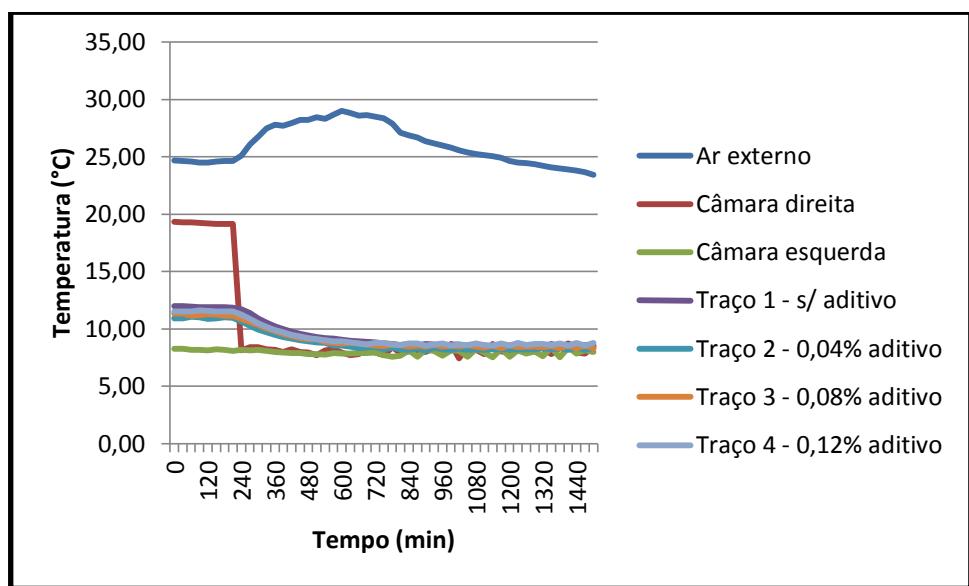
Na câmara direita o concreto de referência estava com temperatura de 15,97 °C, o concreto do traço 2 com 15,30 °C, o concreto de traço 3 com 15,11 °C e o concreto com o teor

máximo de aditivo (traço 4) estava a uma temperatura de 16,17 °C. Portanto, a temperatura do concreto de referência ficou 0,67°C e 0,86°C acima do concreto do traço 2 e traço 3, respectivamente. Entretanto, ficou 0,20°C menor do que a temperatura do concreto do traço 4.

O que pôde ser verificado nesta etapa 1, é um equilíbrio na variação da temperatura quando analisado o concreto de referência e o concreto com maior percentual de aditivo. Tendo estes, apresentando uma temperatura ligeiramente superior ao dos traços 2 e 3.

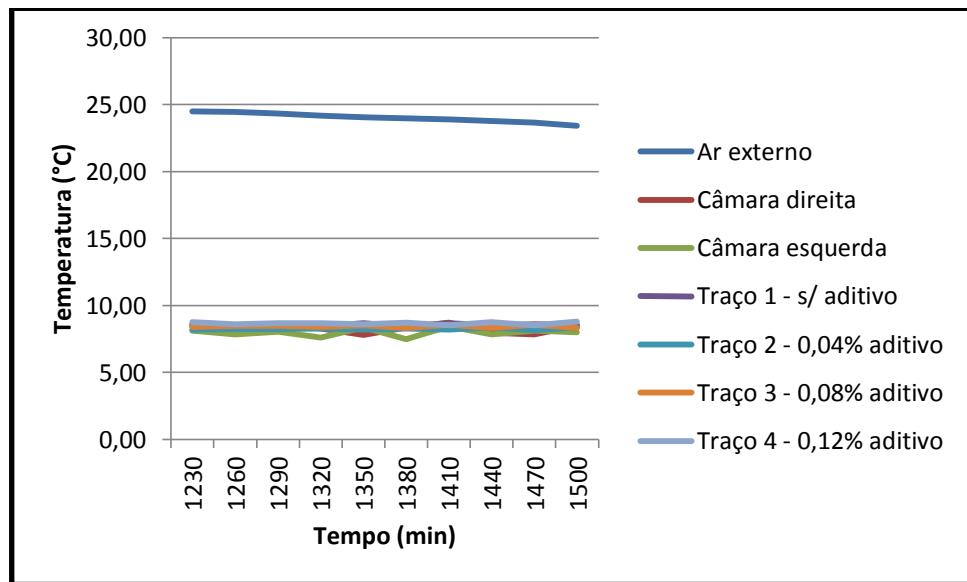
As Figuras 71 e 72 ilustram os resultados da etapa 2 do ensaio e a média dos 4 termopares colados na face voltada para a câmara da esquerda.

Figura 71 – Variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

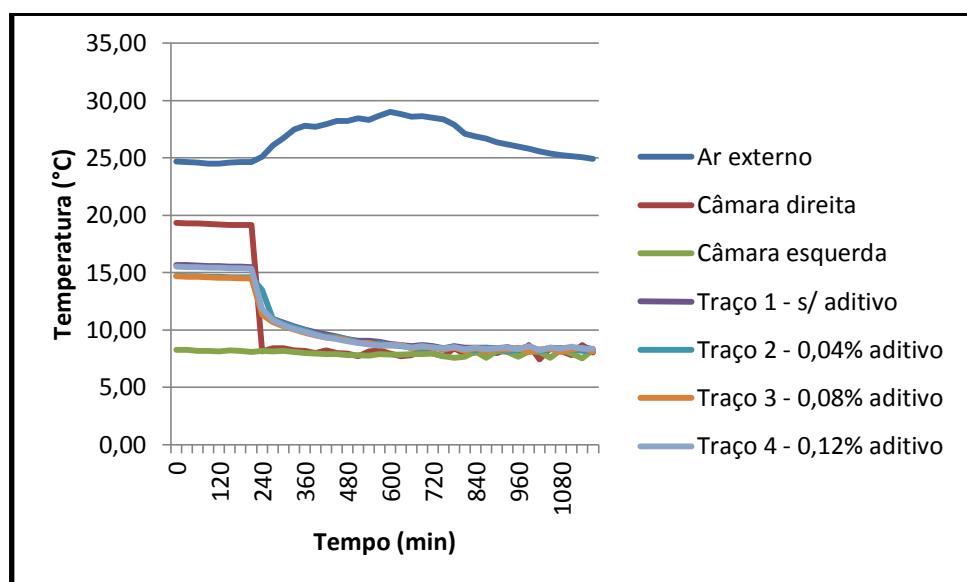
Figura 72 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

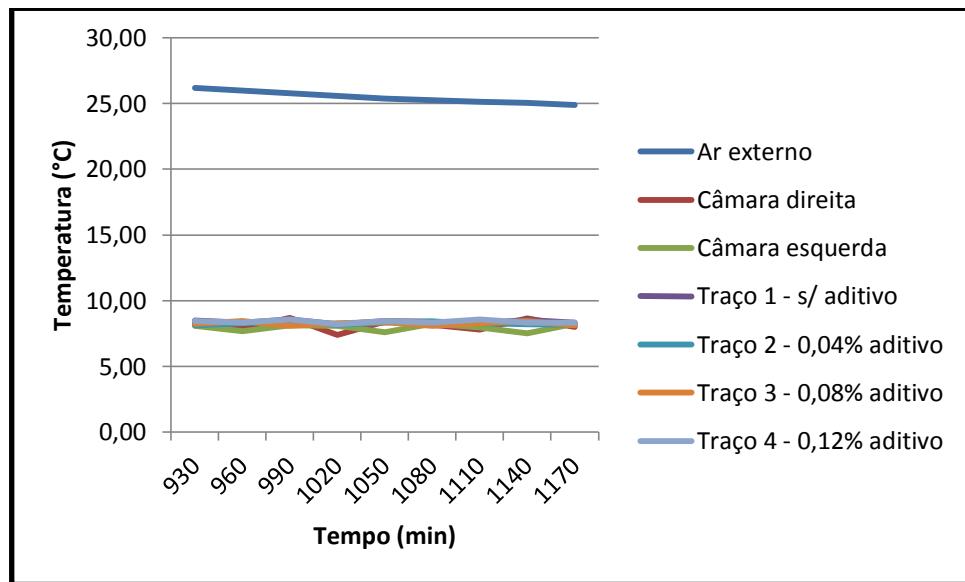
As Figuras 73 e 74 ilustram os resultados da etapa 2 do ensaio e a média dos 4 termopares colados na face voltada para a câmara da direita.

Figura 73 – Variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

Figura 74 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 2 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.

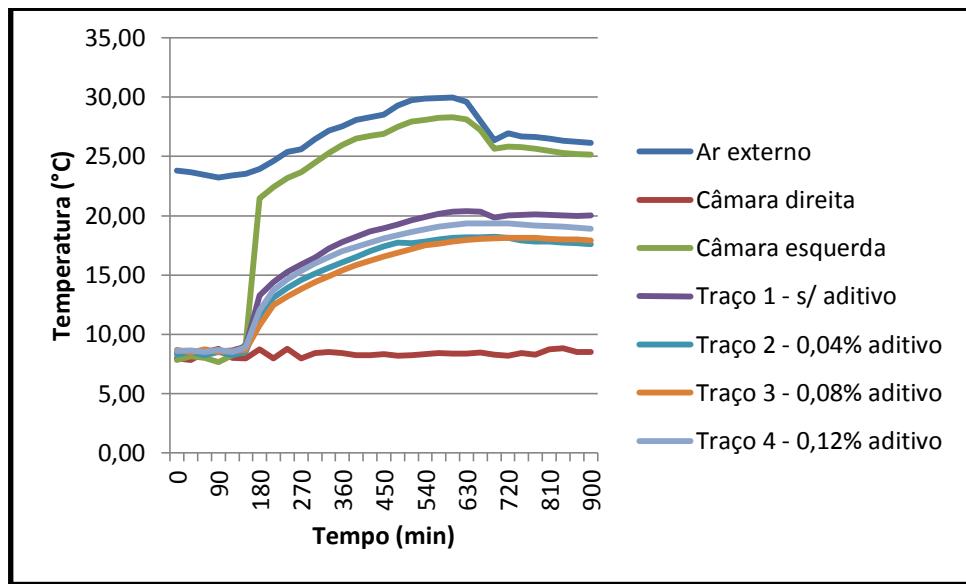


Fonte: Autor.

Na etapa 2 do ensaio, não foi verificada nenhuma alteração significativa entre os traços, visto que as duas câmaras estavam com a mesma temperatura.

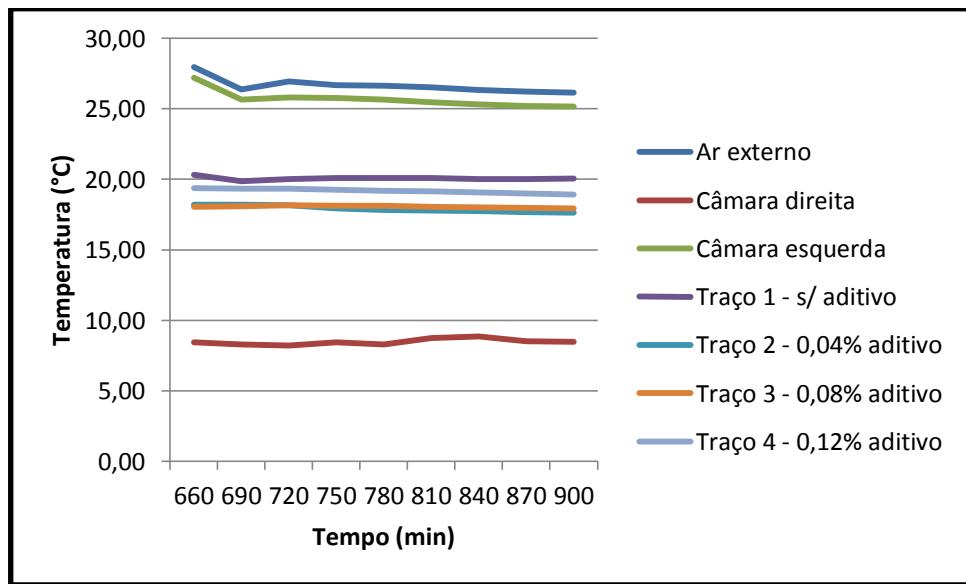
As Figuras 75 e 76 ilustram os resultados da etapa 3 do ensaio e a média dos 4 termopares colados na face voltada para a câmara da esquerda.

Figura 75 – Variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

Figura 76 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face esquerda das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.

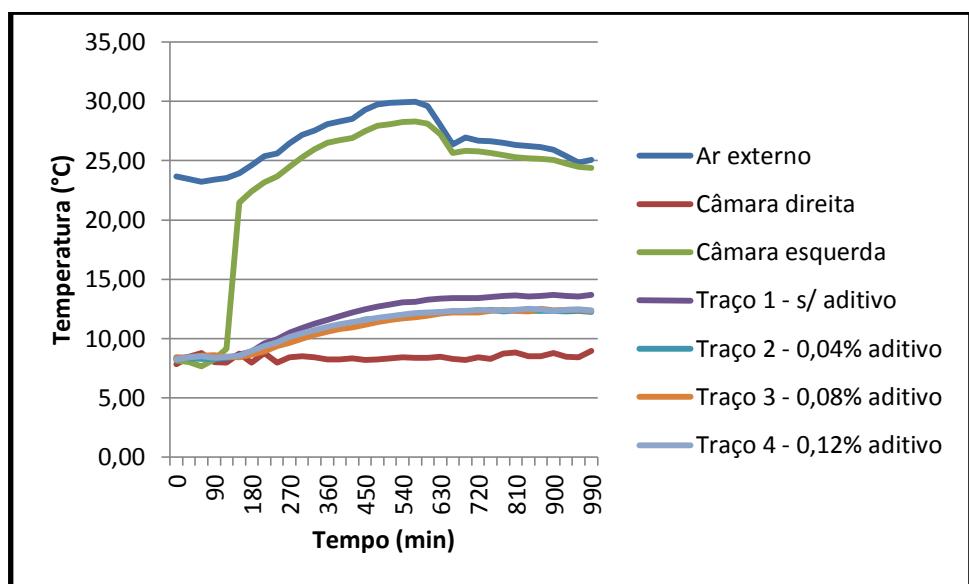


Fonte: Autor.

No instante 900 min os concretos estabilizaram as suas temperaturas na etapa 3. Na câmara esquerda o concreto de referência estava com temperatura de 20,04 °C, o concreto do traço 2 a 17,62 °C, o concreto de traço 3 a 17,92 °C e o concreto com o teor máximo de aditivo (traço 4) estava a uma temperatura de 18,92 °C. Portanto, a temperatura do concreto com 0,04% de aditivo (traço 2) ficou 2,42°C menor do que do concreto de referência. Já as temperaturas da face do concreto dos traços 3 e 4, estavam a menos 2,12°C e 1,12°C em relação ao concreto de referência, respectivamente.

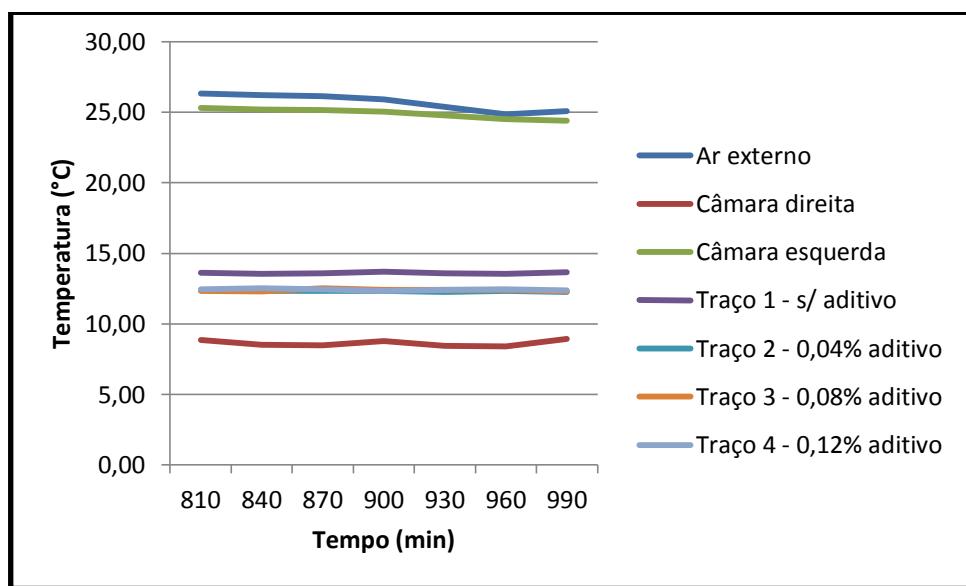
As Figuras 77 e 78 ilustram os resultados da etapa 3 do ensaio e a média dos 4 termopares colados na face voltada para a câmara da direita.

Figura 77 – Variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

Figura 78 – Detalhe da variação de temperatura na etapa 3 – Termopares na face direita das placas, no ar externo, ar interno na câmara esquerda e ar interno na câmara direita.



Fonte: Autor.

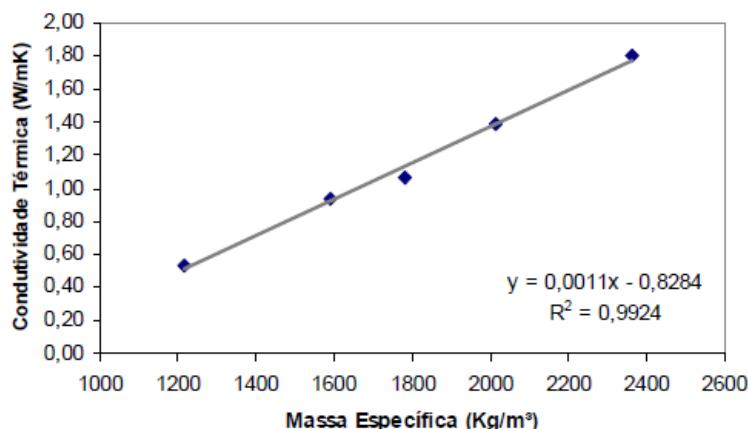
Na câmara direita (instante 990 min), o concreto de referência estava com temperatura de 13,68 °C, o concreto do traço 2 a 12,26 °C, o concreto de traço 3 a 12,31 °C e o concreto com o teor máximo de aditivo (traço 4) estava a uma temperatura de 12,38 °C. Portanto, a temperatura do concreto com 0,04% de aditivo (traço 2) ficou 1,42°C menor do que do concreto de referência. Já as temperaturas da face do concreto dos traços 3 e 4, estavam a menos 1,37°C e 1,30°C em relação ao concreto de referência, respectivamente.

O que pôde ser verificado nesta etapa 3, foi que o concreto com aditivo 0,04% de aditivo apresentou melhor resultado quando elevada a temperatura da câmara esquerda. Também verificou-se que, ao aumentar o aditivo incorporador de ar nos demais concretos não foi verificado um aumento da eficiência térmica.

Sacht (2008) realizou uma pesquisa de avaliação de desempenho térmico de painéis de concreto moldados in loco variando a massa específica do concreto entre 1600 kg/m³ e 2400 kg/m³ e espessuras de 8 cm, 10 cm e 12 cm. O pesquisador verificou, neste caso, que a espessura exerceu maior influência sobre os resultados das temperaturas internas do que a variação das massas específicas dos concretos. Concluiu ainda que a massa específica dos concretos pouco influenciou os resultados das temperaturas internas e que a variação das espessuras e do tipo de cobertura foram os aspectos predominantes nos resultados.

Portando Sacht (2008), verificou que a redução da massa específica apesar de diminuir a condutividade térmica, conforme ilustrado na Figura 79, pouco influenciou na variação de temperatura no interior das habitações.

Figura 79 – Gráfico: massa específica x condutividade.



Fonte: Sacht (2008).

Já neste trabalho, foi verificado que a variação da massa específica em função da utilização do aditivo incorporador de ar influenciou na variação de temperatura nos ensaios realizados com as placas de concreto nas câmaras climatizadas. O valor da diferença de temperatura entre o concreto de referência e o concreto com aditivo ficou próximo de 1,50 °C, valor consideravelmente razoável dentro de uma residência no que se refere a conforto térmico na estação do verão em algumas regiões do país.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões que podem ser extraídas dos resultados obtidos são:

Os aditivos atuaram como plastificantes, melhorando a trabalhabilidade, o abatimento inicial de 21 mm chegou a 107 mm. O teor de ar não aumentou seguindo a mesma proporção do aumento de aditivo, com grande variação na primeira adição e pouca variação na última adição, o que sugere uma correlação polinomial de 2º grau. Considerando-se somente o material sólido nos concretos com ar incorporado, ou seja, considerando somente o volume ocupado dos sólidos, obtiveram-se valores próximos para a massa específica, indicando que os teores de ar medidos ficaram próximos dos existentes.

No concreto endurecido, a resistência à compressão teve uma maior redução com a primeira adição de ar (0,04 %) com 36 % de redução. O aumento de teor não provocou as mesmas perdas e ficaram próximos a 10 % para cada aumento. O módulo de elasticidade não sofreu a mesma variação brusca, apesar de ter diminuído também.

Quanto ao ensaio de desempenho térmico, verificou-se que na primeira etapa, o concreto com aditivo mostrou-se mais propício a diminuir as suas temperaturas quando sujeito a baixas temperaturas, ou seja, indicou que quando a temperatura externa diminuiu o concreto sem aditivo apresentou um resultado melhor do que o concreto com aditivo. No entanto, para todos os traços ensaiados os resultados apresentaram-se aceitáveis para os critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno da ABNT NBR 15575:2013, já que a temperatura interna mínima ficou maior do que a temperatura externa mínima somada a 3 °C.

Na terceira etapa, em que o ambiente estava todo frio e foi aquecido em uma câmara, as temperaturas internas ficaram menores do que as temperaturas externas, com todos os traços apresentando nível de desempenho aceitável para os critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão da ABNT NBR 15575:2013. Mas o concreto

com ar incorporado permitiu um aquecimento menos rápido que o concreto convencional, permanecendo com temperatura mais baixa, aproximadamente 1,5 °C, até mesmo ao final do processo de equilíbrio das temperaturas. Portanto, seria mais indicado usá-lo em regiões de clima tropical.

Pôde ser visto nesta pesquisa que concretos com menor massa específica possuem menor condutividade térmica, ou seja, conduz menos calor do que um concreto com massa específica maior levando-se em conta os teores de ar estudados neste trabalho, que foram inferiores a 15 %.

O desempenho térmico do concreto com aditivo incorporador de ar foi satisfatório para temperaturas mais elevadas, fazendo com que o material possa ser uma boa alternativa para a construção de casas de parede concreto, pois além de reduzir o consumo de materiais e o custo da obra, no que se refere a conforto térmico em climas mais quentes os resultados foram melhores do que os do concreto de referência. Porém, serão necessários outros ensaios para uma conclusão consistente, e estudar melhor este material para se encontrar um equilíbrio entre o desempenho térmico e o desempenho mecânico para que o concreto possa ser utilizado também com função estrutural.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A amplitude de assuntos possíveis de serem abordados em continuidade a este trabalho é grande. Pode ser estudado a influência da espessura da placa de concreto, outros teores de ar ou o desempenho térmico de concretos com aditivos superplasticificantes e incorporadores de ar, simultaneamente.

Considerando que os ensaios realizados nas placas não foram destrutivos, outros ensaios com as mesmas placas utilizadas neste trabalho, mas para as condições climáticas de verão, que é a mais predominante em nossa região. Outros estudos que podem ser feitos, também, é a avaliação da durabilidade e o desempenho acústico.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra. Editora Pini. São Paulo, 2000

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Reinforced Concrete. Washington, 1995.

ARAÚJO J. L. **Considerações sobre concreto auto-adensável e uma aplicação com materiais locais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Manual **Técnico para Implementação: Habitação 1.0: Bairro Saudável**. 1ª Ed. São Paulo: ABCP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – **ABNT NBR 9062** – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado – Rio de Janeiro, 2006.

_____ **NBR 11768** - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____ **NBR 12645** – Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 12646** – Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 12655** - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____ **NBR 15220**: partes 1 a 5 – Desempenho térmico das edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **NBR 16055** - Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

- _____ **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- _____ **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____ **NBR 6488** – Componentes de construção - Determinação da condutância e transmitância térmica - Método da caixa quente protegida. Rio de Janeiro, 1980.
- _____ **NBR 8522** – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- _____ **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- _____ **NBR NM 47** - Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- _____ **NBR NM 64** – Agregado graúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 1996.
- _____ **NBR 15575**: partes 1 a 6 - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos. Rio de Janeiro, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 125**: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. Pennsylvania, 2007.
- _____ **ASTM C 1371**: Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. Pennsylvania, 2010.
- _____ **ASTM C 177**: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. Pennsylvania, 1999.
- _____ **ASTM C 351**: Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation. Pennsylvania, 1999.

_____ **ASTM C 518:** Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. Pennsylvania, 2007.

_____ **ASTM E 1918:** Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field

_____ **ASTM E 903:** Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. Pennsylvania, 2102.

ARAÚJO, A.; PANOSIAN, Z.; OLIVEIRA M. C. B.; FILHO D. R. N.; JUNIOR, A. D. S. **Corrosão de armadura de estruturas de concreto leve com ar incorporado.** ABRACO, INTERCORR 2012. Fortaleza, 2014.

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.

CAIXA ECONÔMICA FEDERA. **Números do programa Minha Casa Minha Vida.** Disponível em: <<http://mcmv.caixa.gov.br/numeros/>>. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

CLIMATE DATA. **Clima: Uberlândia.** Disponível em: <<http://pt.climatedata.org/location/2896/>>. Acesso em: 15 de maio de 2015.

CLIQUE ARQUITETURA. **Gesso acartonado: usos e vantagens.** Disponível em: <<http://www.cliquearquitetura.com.br/portal/dicas/view/gesso-acartonado-usos-e-vantagens-139>>. Acesso em: 26 de setembro de 2014.

COBRA CONSTRUTORA. **Fabricação de paredes do sistema “tilt-up”.** Disponível em: <http://www.cobraviconstrutora.com.br/?conteudo=biz_catalogo&canal_id=8&pro_id=8>. Acesso em: 22 de setembro de 2014.

CÓDIGO DE PRÁTICAS DA CEF. **Programa de olho na qualidade: código de práticas CAIXA. Brasília, 2014.** Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/266678073/Codigo-Prat-CAIXA-v03#scribd>>. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

COLETÂNEA DE ATIVOS. **Paredes de Concreto. Comunidade da construção. 2007/2008.** Disponível em:

<<http://www.abesc.org.br/concreteca/artigos/colet%C3%A2nea-de-ativos-paredes-de-concreto-20112013.html>>. Acesso em: 26 de maio de 2014.

COLETÂNEA DE ATIVOS. Paredes de Concreto. Comunidade da construção. 2011/2013. Disponível em: <<http://www.abesc.org.br/concreteca/artigos/colet%C3%A2nea-de-ativos-paredes-de-concreto-20112013.html>>. Acesso em: 26 de maio de 2014.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. Parede de concreto. Disponível em: <<http://www.comunidadedaconstrucao.com.br/sistemas-construtivos/2/parede-de-concreto>>. Acesso em: 26 de maio de 2014.

CONSTRUINDO. Gesso acartonado. Disponível em: <<http://construindo.org/gesso-acartonado>>. Acesso em: 06 de junho de 2014.

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.

DA SILVA, T. J. Projeto para construção de câmara climatizada – Relatório Interno. Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. EN 12898: Glass in building - Determination of the emissivity; German version EN 12898:2001.

DIAS, D. C. Análise de desempenho e fabricação de painéis pré-moldados em concreto. Trabalho apresentado à disciplina de TCC como requisito para obtenção do título de graduação em engenharia civil. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Centro de Ciências Tecnológicas – CCT. Departamento de Engenharia Civil – DEC. 2006.

DOS SANTOS, R. F. C.; DE CASTRO, A. L. Dosagem de Concreto Autoadensável com Alto Teor de Ar Incorporado Aplicado em Paredes de Concreto. Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2013. Gramado, RS, 2013.

DRYWALL. Drywall. Disponível em: <<http://www.drywall.org.br/>>. Acesso em: 28 de setembro de 2014.

EDMEADES, R. M.; HEWLETT, P. C. Cement admixtures. In HEWLETT, P. C. (ed.). **Lea's chemistry of cement and concrete.** 4th ed. Oxford: Elsevier Science & Technology Books, 1998.

ENGEMIX. **Portfólio de Obras e Clientes.** Disponível em: <<http://engemix.com.br/cserie/trisul.aspx>>. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO. **Estruturas de Aço Leve.** Disponível em: <<http://www.engenhariaeconstrucao.com/2011/07/vantagens-do-sistema-lsf.html>>. Acesso em: 27 de setembro de 2014.

HBM. **QUANTUM X.** Disponível em: <<http://www.hbm.com/pt/menu/produtos/elettronica-de-medica/sistema-de-aquisicao-de-dados-compacto-universal/quantumx-mx840a/>>. Acesso em: 02 de junho de 2014.

HOLM, T. A.; BREMNER, R. W. **High strength lightweight aggregate concrete.** Great Britain, McGraw-Hill, 1994.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8302: Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus.** Geneva, 1991.

JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. **JIS A 1423: Simplified test method for emissivity by infrared radio meter.** Japan, 1983.

KOSMTKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PARANAENSE, W. C. **Design and control of concrete mixtures.** 14th ed. Skokie: PCA, 2003.

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

ŁAZ'NIEWSKA-PIEKARCZYK, B. **Examining the possibility to estimate the influence of admixtures on pore structure of self-compacting concrete using the air void analyzer.** Silesian Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Processes, Akademicka 5 Str., 44-100 Gliwice, Poland. 2013.

LEITE, A. R. C. A. P. **A construção de moradias térreas populares no brasil: inovações tecnológicas e manufatura responsiva.** Tese de doutorado, Universidade Paulista, São Paulo, 2013.

LIMA, S. M.; LIBÓRIO, J. B. L. **Concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 10. ISSN 1809-5860. São Carlos, 2008.

LIMA, S. M.; LIBÓRIO, J. B. L. **Concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e armazenagem de alimentos em baixas temperaturas.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 11. São Carlos, 2009.

LORDSLEEM JUNIOR, A. C **O processo de produção das paredes maciças.** In: seminário tecnologia e gestão na produção de edifícios vedações verticais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC. São Paulo, 1998.

MARTIN, J. F. **Aditivos para concreto.** Concreto: ensino, pesquisa e realizações. IBRACON. São Paulo, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 2008.

MZM INCORPORADORA E CONSTRUTORA. **Economia de 15% motiva escolha pela alvenaria estrutural para construção de residencial em Mauá (SP).** Disponível em: <www <http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/145/artigo299688-1.aspx>>. Acesso em: 27 de setembro de 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** PINI. São Paulo, 1982.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** PINI. São Paulo, 1997.

NÚCLEO PAREDE DE CONCRETO. **Desempenho térmico e as paredes de concreto.** Disponível em: <http://nucleoparededeconcreto.com.br/destaque-interno/desempenho-termico-e-as-paredes-de-concreto>. Acesso em: 26 de maio de 2014.

OUYANG X.; GUO Y.; QIU X.. **The feasibility of synthetic surfactant as an air entraining agent for the cement matrix.** School of Chemical and Energy Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, PR China. 2007.

PDG. **Alvenaria estrutural.** Disponível em < <http://www.pdg.com.br/imovel-print.php?idCampanha=&idEmpreendimento=438&rota=&message=O+produto+informado+n%C3%83%C2%A3o+possui+regras+cadastradas+ativas+para+a+origem+atual.>> Acesso em: 22 de setembro de 2014.

REVISTA TÉCHNE. **Como construir paredes de concreto.** Edição 147, 2009.

RIGHI, P. C. R. **Ferramenta para análise do desempenho acústico das edificações para fins de financiamento imobiliário.** Dissertação de mestrado. Universidade federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. 2013.

RORIZ, M. **Conforto e desempenho térmico de edificações** Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Construção Civil. Apostila da disciplina. 2008.

RORIZ, M. **Conforto e desempenho térmico de edificações** Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Construção Civil. 2014.

ROSALES, V. G. S. **Tilt-up.** Tesis para optar al Título de Constructor Civil. Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de La Ingeniería Escuela de Construcción Civil. Valdivia, Chile. 2003.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Concreto estrutural leve.** In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, vol. 2. 2005.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concretos moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos.** Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SACHT, H. M., ROSSIGNOLO, J. A. **Desenvolvimento de concretos para vedações verticais moldadas in loco.** Revista Tecnológica, v. 17, p. 13-18, 2008.

SALVADOR, A. J. **Desempenho de concretos bombeáveis fabricados com aditivo estabilizador de hidratação.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SANTOS, R. F. C. **Estudo de concretos autoadensáveis, com aditivo incorporador de ar, utilizados na produção de paredes de concreto armado moldadas no local.** Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, 2012.

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 - SISTEMA NACIONAL DE APROVAÇÕES TÉCNICAS. **Diretriz para Avaliação Técnica de sistemas construtivos em paredes de concreto armado moldadas no local.** Ministério das Cidades, Secretaria Nacional da Habitação, Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat, Brasília, 2011.

STEEL FRAMING, 2014STEEL FRAMING. **Aço Estrutural Leve.** Disponível em: <<http://steelframing.com.br/>>. Acesso em: 22 de setembro de 2014.

UFRG. **Alvenaria Estrutural: blocos e tijolos de concreto.** Disponível em: <http://www.ufrgs.br/napead/repositorio/objetos/alvenaria-estrutural/blocos_concreto.php>. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

UFRG. **Parede de concreto armado.** Disponível em: <Fonte: <http://www.ufrgs.br/eso/content/?tag=concreto-armado>>. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

WEATHERBASE. **Umidade relativa do ar: Uberlândia.** Disponível em: <<http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=52538&cityname=UberlandiaMinasGeraisBrazil&units=metric>>. Acesso em: 15 de maio de 2015.

WENDLER, A. **Sistema Construtivo Parede de Concreto: Um sistema com bom desempenho.** In: Concrete Show, 2009. São Paulo.