

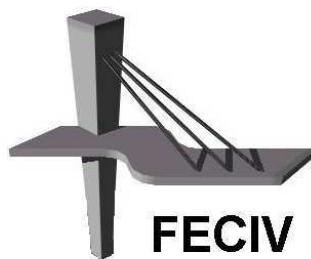


UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
UBERLÂNDIA

## Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA  
ESTRUTURAL DE PAREDES DE CONCRETO  
COM AR INCORPORADO**

**RAFAEL MACHADO DE MAGALHÃES**



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



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**Rafael Machado de Magalhães**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA  
ESTRUTURAL DE PAREDES DE CONCRETO COM  
AR INCORPORADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em 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, setembro de 2016.

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

---

M188a      Magalhães, Rafael Machado de, 1990-  
2016      Análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto  
com ar incorporado / Rafael Machado de Magalhães. - 2016.  
118 f. : il.

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

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

---

CDU: 624



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



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

ATA Nº: 167/2016

**CANDIDATO:** Rafael Machado de Magalhães **Nº. Matrícula:** 11412ECV017

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Turíbio José da Silva

**TÍTULO:** "Análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado".

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Estruturas e Construção Civil

**LINHA DE PESQUISA:** Estruturas

**PROJETO DE PESQUISA:** Patologia e Durabilidade em Edificações

**DATA DA DEFESA:** 08 de setembro de 2016

**LOCAL:** Sala de Projeções, bloco 1Y. **HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO:** 15:40 - 17:30

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Leila Aparecida de Castro Motta - FECIV/UFU; Armando Lopes Moreno Junior - FEC/UNICAMP** e **Turíbio José da Silva** orientador do candidato. Ressalta-se que o Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior participou da defesa por meio de vídeo conferência e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Turíbio José da Silva** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Turíbio José da Silva - FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior - FEC/UNICAMP**

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

Uberlândia, 08 de setembro de 2016.

## DEDICATÓRIA

---

*Aos meus pais, Esio e Liliam;  
Aos meus irmãos, Daniel, Ana Cláudia, João Paulo e Júlia;  
e a toda minha família e amigos.*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradeço a Deus pelas bênçãos e oportunidades que tem me concedido.

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

Ao professor e orientador Dr. Turibio José da Silva pela dedicação, competência, consideração, e todos os ensinamentos técnicos e valores humanos transmitidos ao longo desses anos.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais e Construção Civil, Cristiane e Wanderly, do Laboratório de Topografia, Josildo, e do Senhor Avelino pelo companheirismo e auxílio durante a realização da fase experimental.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil da UFU, destacando especialmente o professor Joseph Salem Barbar e o Engenheiro Gercindo Ferreira pelo o apoio e contribuições na fase experimental.

A todos meus amigos, especialmente aos meus colegas Leandro e Ricardo pelo apoio na fase experimental.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Civil que proporcionaram estrutura para desenvolvimento dessa pesquisa.

Às empresas Brasmix Engenharia de Concreto S/A, PDCA Engenharia e Construções Ltda e El Global Construtora Ltda.

Magalhães, R. M. Análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado. 118 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

## RESUMO

---

A história da construção civil está ligada ao desenvolvimento do homem e têm obtido avanços na área habitacional. Em função desse avanço, o conceito de desempenho de edificações vem sendo estudado, e pode ser entendido como o comportamento em uso das construções ao longo da vida útil. A ABNT NBR 15575:2013 introduziu vários requisitos de desempenho. Esse trabalho tem o objetivo de avaliar requisitos de desempenho em paredes de concreto com ar incorporado. Essa avaliação foi feita através de ensaios de corpo mole e corpo duro, e ensaios de choque térmico. Foram utilizados três tipos de concreto com teores diferentes de aditivo incorporador de ar. Os grupos amostrais foram formados por três protótipos de casas com quatro paredes mais 9 painéis que foram moldados em fôrmas de madeira nas mesmas condições dos protótipos, além da moldagem de 24 cp's cilíndricos (10 cm x 20 cm), de cada tipo de concreto. Dessa maneira, a variável de entrada foi o teor de aditivo incorporador de ar e as variáveis de saída foram: massa específica, teor de ar e composição real do concreto no estado fresco; e resistência ao impacto de corpo mole e corpo duro, resistência ao choque térmico, módulo de elasticidade, resistência à compressão e massa específica do concreto no estado endurecido. Nos ensaios de corpo mole e corpo duro, os resultados indicaram que o deslocamento instantâneo gerado pelo ensaio de impacto de corpo mole correspondeu a  $h/13320$  ( $h=2720$  mm) e não houve sinais de falhas; os deslocamentos mantiveram uma correlação negativa com o teor de ar e positiva em relação à energia do impacto, representada pela altura de lançamento do saco cilíndrico; a profundidade das mossas foi inferior a 0,085 mm para todas as paredes e protótipos e o SVVE pode ser classificado com nível de desempenho S de acordo com a ABNT NBR 15575:2013. Nos painéis, o teor de ar no concreto influenciou positivamente os resultados da ação do choque térmico; a incorporação de ar reduziu as curvaturas durante a ação do calor e de acordo com a ABNT NBR 15575:2013 o SVVE ensaiado possui nível de desempenho M.

**Palavras-chave:** Parede de concreto, desempenho estrutural, ensaio de corpo mole e corpo duro, choque térmico.

Magalhães, R. M. Performance analysis of the structural system of concrete walls with incorporated air. 118 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2016.

## ABSTRACT

---

The history of the building is linked to the development of man and have obtained advances in the housing area. Given this progress, the concept of building performance has been studied, and can be understood as the behavior in use of buildings along the lifespan. The ABNT NBR 15575:2013 implemented various performance requirements. This study aims to evaluate performance requirements in concrete walls with incorporated air. This assessment was made by soft body tests, hard body, and thermal shock tests. It has been used three types of concrete with various levels of air additive developer. The sample groups were formed for three prototypes of houses with four walls each, plus 9 panels that were shaped in wooden molds in the same conditions of prototypes, and with the addition of 24 cp's cylindrical molding's (10 cm x 20 cm), of each type of concrete. Thus, the input variable is the content of air incorporator additive, and the output variables are: specific mass, air content and real concrete composition in the fresh state; impact resistance soft body and hard body, thermal shock resistance, elastic modulus, compressive resistance and the specific mass of the concrete in the hard state. In soft body tests and hard body, the results indicated that the instantaneous displacement generated by the soft body impact test corresponding to h/13320 (h = 2720 mm) and no failures signals; displacements maintained a negative correlation with air content and positive regarding the impact energy, represented by the release height of the cylindrical bag; the depth of the dents is less than 0.085 mm for the walls and prototypes and SVVE can be rated performance level S according to ABNT NBR 15575:2013. The panels, the air content in the concrete positively influenced the results of the thermal shock action; the incorporation of air reduced the curvatures during the action of heat and according to NBR 15575:2013 the SVVE tested has performance level M.

**Keywords:** Concrete wall, structural performance, soft body and hard body test, thermal shock.

# SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

---

## SÍMBOLOS

$d_h$  - Deslocamentos instantâneos

$d_{hr}$  - Deslocamentos residuais

$f_{ck}$  – Resistência característica do concreto

MPa – Mega Pascal

M – Mínimo

I – Intermediário

S - Superior

°C – Graus Celsius

h – Horas

min – Minutos

J - Joule

N – Newton

kN – Quilo Newton

$E_{ci}$  – Módulo de elasticidade tangente inicial

$f_c$  – Resistência à compressão

## ABREVIATURAS

*SVVIE* – Sistemas de vedação verticais internos e externos

*SVVE* – Sistemas de vedação verticais externos

*AIA* – Aditivos incorporadores de ar

*VUP* – Vida útil de projeto

*VU* – Vida útil

*TRRF* – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

*cp's* – Corpos de prova

## **SIGLAS**

*ABNT* – Associação Brasileira de Normas Técnicas

*BNH* – Banco Nacional da Habitação

*CBIC* – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

*CEF* – Caixa Econômica Federal

*FECIV* – Faculdade de Engenharia Civil

*Finep* – Financiadora de Projetos Especiais

*IPT* – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

*ISO* – International Organization for Standardization

*NBR* – Norma Brasileira

*PPGEC* – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

*UFU* – Universidade Federal de Uberlândia

*ABESC* - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem

*ABCP* - Associação Brasileira de Cimento Portland

*IBTS* – Instituto Brasileiro de Telas Soldadas

*BCCA* - Blocos de Concreto Celular Autoclavado

# SUMÁRIO

---

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	12
1    Introdução.....	12
1.1    Importância.....	12
1.2    Justificativas.....	15
1.3    Objetivos.....	16
1.4    Estrutura do trabalho .....	16
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	18
2    Parede de Concreto com ar Incorporado.....	18
2.1    Generalidades .....	18
2.2    Parede de concreto.....	20
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	26
3    Desempenho estrutural.....	26
3.1    Desempenho .....	26
3.2    Requisitos gerais .....	29
3.2.1    Métodos de Avaliação.....	33
3.3    Impactos de Corpo Mole.....	34
3.3.1    Método de Ensaio .....	34
3.3.2    Aparelhagem .....	36
3.3.3    Avaliação e Resultados.....	37
3.3.4    Resultados encontrados na literatura .....	41
3.4    Impactos de Corpo Duro.....	43
3.4.1    Método de ensaio .....	43
3.4.2    Aparelhagem .....	44
3.4.3    Avaliação e Resultados.....	45
3.4.4    Resultados encontrados na literatura .....	48
3.5    Choque Térmico .....	49
3.5.1    Conceitos básicos .....	49

<b>3.5.2 Ensaio de exposição ao calor e ao choque térmico .....</b>	51
<b>3.5.2.1 Aparelhagem.....</b>	51
<b>3.5.2.2 Método de ensaio .....</b>	52
<b>3.5.2.3 Avaliação e resultados.....</b>	54
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	55
<b>4 Programa Experimental – Materiais e Ensaios.....</b>	55
<b>4.1 Introdução .....</b>	55
<b>4.2 Planejamento experimental .....</b>	56
<b>4.3 Preparação do conjunto amostral.....</b>	58
<b>4.3.1 Protótipos de casas com paredes de concreto .....</b>	60
<b>4.3.2 Painéis de concreto .....</b>	70
<b>4.3.3 Corpos de prova cilíndricos.....</b>	71
<b>4.4 Métodos de ensaio.....</b>	71
<b>4.4.1 Verificação da resistência ao impacto de corpo mole.....</b>	72
<b>4.4.2 Verificação da resistência ao impacto de corpo duro.....</b>	75
<b>4.4.3 Verificação da exposição à ação do calor e ao choque térmico .....</b>	78
<b>4.4.4 Ensaio de resistência à compressão.....</b>	82
<b>4.4.5 Ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial.....</b>	83
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	85
<b>5 Resultados e Análises .....</b>	85
<b>5.1 Introdução .....</b>	85
<b>5.2 Concreto no estado fresco .....</b>	85
<b>5.2.1 Abatimento de tronco de cone .....</b>	85
<b>5.2.2 Massa específica no estado fresco.....</b>	86
<b>5.2.3 Teor de ar no concreto fresco .....</b>	86
<b>5.2.4 Composição do concreto .....</b>	88
<b>5.3 Concreto no estado endurecido .....</b>	88
<b>5.3.1 Resistência à compressão .....</b>	89
<b>5.3.2 Módulo de elasticidade.....</b>	90
<b>5.4 Ensaios de desempenho .....</b>	92
<b>5.4.1 Ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo mole .....</b>	92
<b>5.4.2 Ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo duro .....</b>	97
<b>5.4.3 Ensaio de verificação da exposição ao calor e ao choque térmico.....</b>	101

<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	111
<b>6    Conclusões e Trabalhos Futuros.....</b>	111
<b>6.1    Conclusões .....</b>	111
<b>6.2    Trabalhos Futuros .....</b>	113
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	114

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 IMPORTÂNCIA

A história da construção civil está ligada ao desenvolvimento do homem. Primeiramente, estava associada a questões de proteção e segurança, mas gradativamente foi se transformando em um mercado promissor, que leva a provocar o expressivo desenvolvimento imobiliário no início do século XXI.

A evolução das ferramentas e máquinas para a produção de bens permitiu que a história da mecanização se identificasse com a história da industrialização da construção. Serra, Ferreira e Pigozzo (2005), organizam essa evolução em três grandes fases:

1. Nos primórdios da era industrial quando surgem as máquinas genéricas ou polivalentes.
2. Período em que os mecanismos substituem o homem na capacidade de repetir ciclos. Surgem os estudos dos tempos e movimentos, com o objetivo de gerar melhores resultados econômicos e qualitativos.
3. Chamado de Segunda Revolução Industrial, este período é caracterizado pela substituição das atividades que o homem exercia sobre a máquina (raciocínio, concepção) por mecanismos eletrônicos (automatismos).

Segundo Gehbauer (2004), a maioria das construções civis opera num nível de tecnologias médias e de implementação artesanal, o que a torna objeto de muitos estudos de racionalização de métodos e processos. O sucesso de um empreendimento depende do

máximo de racionalidade na realização dos projetos, das atividades produtivas, com o menor trabalho e visando os menores custos, com a mais alta taxa de produtividade e máximo de segurança no ambiente de trabalho.

No Brasil, principalmente nos últimos 50 anos, políticas habitacionais de responsabilidade das esferas municipais, estaduais e federais foram uma constante, desencadeando programas habitacionais mais estruturados, e provocando um avanço significativo na área habitacional. E nesse mesmo espaço de tempo, segundo Borges e Sabbatini (2008), o conceito de desempenho de edificações vem sendo estudado, e pode ser entendido como o comportamento em uso das construções ao longo da vida útil.

Ainda de acordo com Borges e Sabbatini (2008), a palavra desempenho normalmente está associada a um nível de desempenho desejado comparado a um desempenho entregue, e é utilizado de maneira coloquial por toda a sociedade. O desempenho de um aluno e de um esportista, pode ser citado como exemplo de comparação.

O desenvolvimento histórico do arcabouço normativo para a construção civil, tanto no Brasil como nos países desenvolvidos, é prescritivo, ou seja, especifica os meios e não os fins que se deseja atingir, o que contraria o conceito de desempenho e é uma das maiores dificuldades para a sua aplicação.

Também há grande dificuldade na tradução das exigências dos usuários em requisitos e critérios de desempenho, estas são variáveis, crescentes e subjetivas, o que torna sua definição muito difícil. O conceito de desempenho é sistêmico e probabilístico, e sempre atenderá uma parte da população numa parte do tempo.

Atualmente, o respeito à natureza, o aproveitamento racional de recursos, o desenvolvimento tecnológico, os modelos econômicos e a organização social passam por intensas transformações afetando diretamente as sociedades modernas. De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2013), os textos da normalização brasileira de desempenho de habitações foram desenvolvidos dentro desse quadro de mudanças. O texto original, previsto para entrar em vigor em março de 2010, apresentava algumas exigências

aquém das expectativas da sociedade, e outras com certa dissonância em relação à atual capacidade econômica do país. E em consenso com órgãos governamentais, associações de profissionais, universidades, instituições técnicas e setor produtivo, a CBIC solicitou à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a revisão de tão importante conjunto normativo. Com participação jamais vista em Comissões de Estudos de normas técnicas no Brasil e após quase dois anos de trabalhos de revisão, a norma ABNT NBR 15575 “Edificações Habitacionais – Desempenho” entrou oficialmente em vigor a partir de julho de 2013, sendo um importante e indispensável marco para a modernização tecnológica da construção brasileira e melhoria da qualidade de nossas habitações.

Essa norma se torna de grande valia para os consumidores que buscam na hora de adquirir seu imóvel, conforto, estabilidade, vida útil adequada da edificação, segurança estrutural e contra incêndios.

A norma de desempenho ANBT NBR 15575:2013 estabelece parâmetros, objetivos e quantitativos que podem ser medidos. Dessa forma, buscam-se o disciplinamento das relações entre os elos da cadeia econômica (rastreabilidade), a diminuição das incertezas dos critérios subjetivos (perícias), a instrumentação do Código de Defesa do Consumidor, o estímulo à redução da concorrência predatória e um instrumento de diferenciação das empresas.

Para cada necessidade do usuário e condição de exposição, aparecem a sequência de requisitos de desempenho, critérios de desempenho e respectivos métodos de avaliação. A norma ABNT NBR 15575:2013 foi redigida segundo modelos internacionais de normalização de desempenho. O conjunto normativo compreende seis partes:

Parte 1: Requisitos gerais;

Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;

Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;

Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;

Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas; e

Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Dentro dessa gama de requisitos de desempenho, este trabalho se prende na importância dos requisitos para sistemas estruturais, destacando as ações decorrentes do uso e ocupação do imóvel (impactos de corpo mole e corpo duro), e na durabilidade destacando a ação do choque térmico nos elementos estruturais.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Para possibilitar o atendimento aos requisitos do usuário, com soluções tecnicamente adequadas e economicamente viáveis, acredita-se na inter-relação entre Normas de desempenho e Normas prescritivas.

Diante disso, na tentativa de aplicar os requisitos de desempenho mencionados foi escolhido um material amplamente utilizado em todo mundo na construção civil (concreto), aplicado em um sistema construtivo em crescimento (paredes de concreto), e com uma alternativa tecnológica para melhor desempenho (aditivo incorporador de ar).

Segundo Corsini (2012), há mais de 30 anos que o sistema construtivo parede de concreto é utilizado no Brasil, porém somente em 2012 a ABNT NBR 16055 - Parede de concreto moldado no local para a construção de edificação – Requisitos e Procedimentos, foi publicada com a regulamentação de seu dimensionamento e execução. Mesmo sendo um elemento estrutural em concreto, uma parede de concreto não se comporta da mesma forma que os elementos especificados na ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

No sistema construtivo parede de concreto a sua funcionalidade depende diretamente do desempenho do concreto aplicado, evitando segregação, exsudação e apresentando uma superfície acabada de boa qualidade através de um material com fluidez e coesão adequadas para um bom preenchimento da fôrma. O que demanda cuidados especiais do concreto para a obtenção de resultados satisfatórios (SANTOS; CASTRO, 2013).

As vantagens da utilização do concreto auto-adensável com ar incorporado vão além da facilidade e rapidez de aplicação, acabamento, e redução da mão de obra, pois o fato do concreto conter ar incorporado melhora o desempenho quanto ao isolamento acústico e térmico, a resistência quanto a ciclos de congelamento e descongelamento, e também suas propriedades de durabilidade em regiões marítimas.

No Brasil, os novos sistemas construtivos com inovações tecnológicas são lançados no mercado sem ter a devida avaliação de seu desempenho. Normalmente, os sistemas eram avaliados somente pelos seus custos iniciais, deixando de lado custos de operação, manutenção e recuperação ficando em segundo plano a preocupação com o desempenho.

Com as recomendações da ABNT NBR 15575:2013, as exigências, antes subjetivas, viraram requisitos técnicos, com parâmetros determinados, como por exemplo, a durabilidade do sistema e a manutenibilidade da edificação. Contudo, tais requisitos e critérios mesmo sendo a Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575:2013) um grande passo na construção civil, sofrem muitos questionamentos. Estudos relacionados se tornam de grande valia para um esclarecimento das exigências, análise e justificativa técnica.

### **1.3 OBJETIVOS**

Esta dissertação tem o objetivo de avaliar, com base principalmente na ABNT NBR 15575:2013, requisitos de desempenho de paredes de concreto produzidas com ar incorporado. Essa avaliação será por meio de ensaios de corpo mole e corpo duro, e ensaios de choque térmico, portanto, será possível avaliar requisitos de desempenho estrutural e durabilidade.

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho vem ao encontro dos objetivos da ABNT e reforça a importância da difusão das melhores práticas e demonstra o alto grau de maturidade da engenharia e a consciência de seu papel na defesa da qualidade de habitação no Brasil. Ele está sendo desenvolvido em seis capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – Introdução;
- Capítulo 2 – Paredes de concreto com ar incorporado;
- Capítulo 3 – Desempenho Estrutural;
- Capítulo 4 – Programa Experimental – Materiais e Ensaios;
- Capítulo 5 – Resultados e Análises;
- Capítulo 6 – Conclusões;
- Referências.

---

# CAPÍTULO 2

## 2 PAREDE DE CONCRETO COM AR INCORPORADO

### 2.1 GENERALIDADES

Segundo Roque (2009), a alvenaria de blocos cerâmicos, ou de concreto, compõe o sistema de vedação vertical mais utilizado para edificações habitacionais atualmente no Brasil, que continua sendo um método construtivo tradicional e muito artesanal. Entretanto, o método construtivo de parede de concreto vem ganhando espaço no mercado e tornando-se cada vez mais presente na construção civil, sendo utilizado principalmente em conjuntos habitacionais e em obras onde se deseja reduzir o prazo de execução.

No cenário atual do mercado, a busca por métodos construtivos inovadores e que garantam a melhor relação custo benefício torna-se inevitável. O sistema de parede de concreto é um método mais recente e que vem substituindo a alvenaria convencional em muitos casos, principalmente em conjuntos residenciais (LEITE, 2013).

De acordo com Silva (2013), o sistema paredes de concreto possui a dupla função de elemento estrutural e vedação. As paredes são moldadas no local e as instalações hidrossanitárias e elétricas são posicionadas, conforme projeto, no interior das fôrmas antes da concretagem. O conjunto de fôrmas utilizado permite a produção em larga escala em um curto espaço de tempo.

Segundo a “Coletânea de Ativos - Paredes de Concreto” (2011/2013), que são documentos publicados pelo Grupo Parede de Concreto, no qual foi formado em 2007 pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), ABESC, Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (IBTS) e mais a associação de quatorze grandes empresas, o número de construtoras que adota o sistema parede de concreto vem aumentando desde 2010. Obras que eram executadas

em alvenaria estão sendo substituídas por este sistema, principalmente devido à redução do prazo de conclusão da obra. Na Figura 2.1 pode ser observado como o número de unidades habitacionais que utilizam as paredes de concreto vem aumentando.

2.1 - 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)

O sistema parede de concreto vem conquistando o mercado brasileiro. Podem ser citadas as seguintes vantagens deste método: velocidade de execução, industrialização do processo, maior controle de qualidade, redução de etapas, redução dos desperdícios e qualificação da mão de obra. O sistema pode ser utilizado em diferentes tipos de edificações: casas térreas, edifícios baixos, médios e altos, até 30 pavimentos (COLETÂNEA DE ATIVOS, 2013).

De acordo com a ABESC (2014), encontram-se obras recentes e consideráveis feitas com paredes de concreto no Brasil e em países da América do Sul, como os edifícios de até 25 pavimentos na Colômbia. A CEF também forneceu informações de obras financiadas por ela com paredes de concreto em Uberlândia-MG e região. No ano de 2014, foram feitos dois conjuntos residenciais no bairro Tocantins em Uberlândia-MG com 288 unidades em cada um, e também um conjunto residencial em Ituiutaba-MG, com 364 unidades. Já em 2014, foi assinado um contrato dentro do Programa Minha Casa Minha Vida para construção de 5200 habitações de interesse social na região oeste de Uberlândia-MG. As várias empresas

---

envolvidas na construção desse empreendimento estão utilizando o sistema de paredes de concreto na construção das habitações de interesse social.

## 2.2 PAREDE DE CONCRETO

A ABNT NBR 16055:2012 se aplica a Paredes de Concreto moldadas no local e com fôrmas removíveis. Estas paredes são definidas pela referida norma como um “elemento estrutural autoportante moldado no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz de suportar carga no mesmo plano da parede”. A espessura da parede deve ser igual ou maior que 10 cm para altura de até 3 m, salvo situações especificadas no item 13.1 da ABNT NBR 16055:2012.

No sistema estrutural parede de concreto, considera-se que as lajes fazem parte do sistema, ou seja, as paredes, em conjunto com a laje, formam um sistema monolítico. Segundo a ABNT NBR 16055:2012, as paredes podem estar submetidas à carga axial, com ou sem flexão, concretadas com todos os elementos que farão parte da construção final. Desta maneira, todas as paredes de um determinado trecho são concretadas de uma única vez, já contendo as tubulações e eletrodutos, além dos vãos das portas e janelas. Vale ressaltar que não são permitidas tubulações horizontais, salvo em pontos especificados na referida norma, e que não pode haver tubulações no encontro das paredes.

Os requisitos referentes à qualidade e durabilidade da estrutura são os mesmo que para outras estruturas de concreto armado, portanto, devem-se seguir as recomendações da ABNT NBR 6118:2014. Da mesma maneira para a forma de preparar, caracterizar e analisar o concreto. Não há especificação em relação ao tipo de concreto a ser utilizado nas paredes de concreto, a única observação é que ele tenha um  $f_{ck}$  menor ou igual a 40 MPa, porém a ABNT NBR 6118:2014, a qual a ABNT NBR 16055:2012 remete para os aspectos de durabilidade, prescreve que a resistência mínima do concreto estrutural é de 20 MPa. Para Misurelli e Massuda (2009), é recomendável que o concreto seja auto-adensável. Também não há especificação em relação ao aço. Podem ser usadas telas soldadas, treliças ou barras, contanto que o aço tenha a mesma qualidade em toda a parede de concreto.

---

As paredes de concreto são construídas sempre com armadura de ligação e armadura para resistir aos esforços, de forma monolítica. A ABNT NBR 16055:2012 recomenda que o travamento seja feito sempre que o comprimento da parede entre os travamentos ultrapassar duas vezes a sua altura geométrica. A parede deve ser calculada como um pilar ou um pilar-parede caso não seja possível travá-la.

O fato desse sistema estrutural não ser formado por pórticos, não há vigas nem pilares, ou seja, as paredes de concreto suportam a carga da estrutura. Por isso, a remoção ou abertura de paredes sem consulta prévia ao projetista pode comprometer a estabilidade do sistema estrutural.

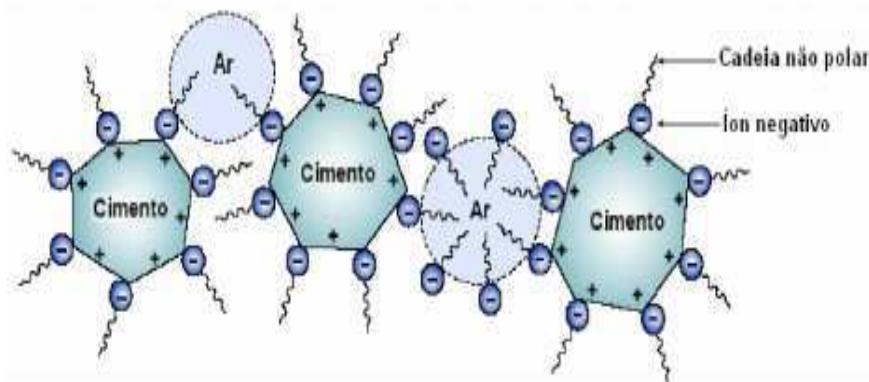
O sistema estrutural de paredes de concreto apresenta rápida execução e diminuição de perdas, sendo bem aceito pelo mercado, que principalmente neste século, procura novas técnicas construtivas que favoreçam na diminuição dos custos e no tempo de duração da construção.

Aliado a esse sistema construtivo em expansão, este trabalho também aborda uma tecnologia em crescimento, que procura aumentar o desempenho do concreto utilizado nas paredes através de aditivos incorporadores de ar (AIA).

A ABNT NBR 11768:2011 define aditivos como “produtos que adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”. É importante salientar, que a eficácia de um aditivo depende de sua dosagem no concreto e não é uma solução para corrigir uma formulação de concreto incorreta, ele representa um meio suplementar para melhorar a qualidade do concreto (BARBAR; PERUZZI; ROSSIGNOLO, 2014).

Hoje em dia, segundo Barbar, Peruzzi e Rossignolo (2014), dentre os aditivos utilizados na produção de concreto, os aditivos incorporadores de ar (ou aerantes), têm recebido especial atenção. Eles reduzem a tensão superficial da água adicionando ar ao concreto e prendendo-os em pequenas bolhas (FIGURA 2.2), que variam de tamanho em uma faixa de poucos micrômetros.

Figura 2.2 – Mecanismo de incorporação de ar



Fonte: Mehta e Monteiro, (2008).

Os vazios de ar aprisionado, que na maioria das vezes são causados por deficiência nas dosagens e escolha dos materiais, são nefastos à qualidade final do concreto, podendo comprometer as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Outro aspecto negativo em relação à presença de vazios de ar aprisionado no concreto é a aparência final, com a formação de macro bolhas superficiais. No caso de concreto aparente a presença de macro bolhas superficiais é totalmente indesejável.

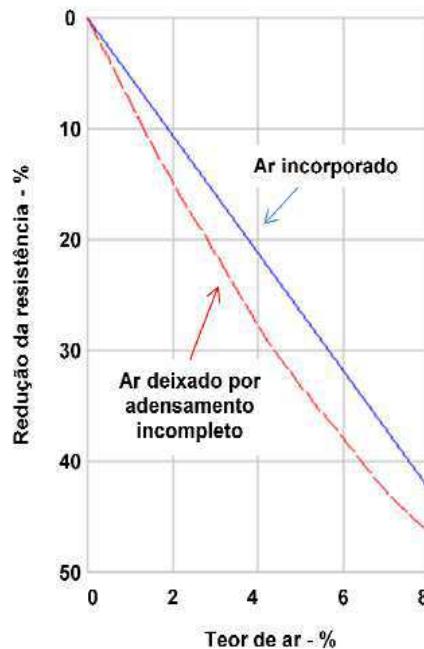
A incorporação através de aditivos se dá em casos especiais com os objetivos de redução do tamanho das macro bolhas (vazios de ar aprisionado), aumento da trabalhabilidade do concreto, redução do consumo de cimento, melhoria da qualidade do concreto quanto a ação de gelo e degelo, obtenção de uma massa específica menor, isolamento térmico e absorção acústica.

Junto ao incremento da trabalhabilidade, a incorporação de ar ao concreto aumenta a coesão entre as partículas, provocando diminuição da tendência à segregação e tornando a exsudação mais difícil. O aumento da coesão pela incorporação de bolhas de ar faz com que a ascensão capilar e absorção d'água pelo concreto sejam menores, pois as bolhas interrompem os capilares cujos diâmetros são sensivelmente menores que os das bolhas (AGNESINI, 1988).

Com tudo, segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência mecânica está baseada na parte sólida de um material, sendo assim, os vazios devido à incorporação de ar são prejudiciais a

mesma. Ao incorporar ar no concreto sem qualquer outra alteração nas proporções dos materiais da mistura, há uma redução na resistência como apresenta a Figura 2.3. Essa redução é proporcional ao volume de ar presente, e isso vale tanto para vazios devido à incorporação de ar quanto para vazios devido ao mau adensamento.

Figura 2.3 – Efeito do ar incorporado e do ar accidental sobre a resistência do concreto



Fonte: Neville, (1997).

De acordo com Rosa (2013), a utilização de aditivos incorporadores de ar no concreto também pode trazer consequências negativas como a redução da resistência à compressão, da resistência à tração e módulo de elasticidade. A autora também destaca fatores que afetam o teor de ar incorporado, como: a quantidade e dimensão do agregado miúdo, a quantidade de materiais finos e as condições de mistura dos materiais.

Para Romano *et al.* (2007), apesar de certo domínio da tecnologia e da química dos aditivos, a incorporação do ar nos materiais cimentícios ainda é bastante empírico e, se tem baseado muito na experiência.

O estudo das propriedades do concreto com ar incorporado é de grande valia para parametrizar e sistematizar procedimentos que garantam sua qualidade e durabilidade. As melhorias dessas propriedades podem ser atingidas otimizando-se o teor de aditivo, de modo

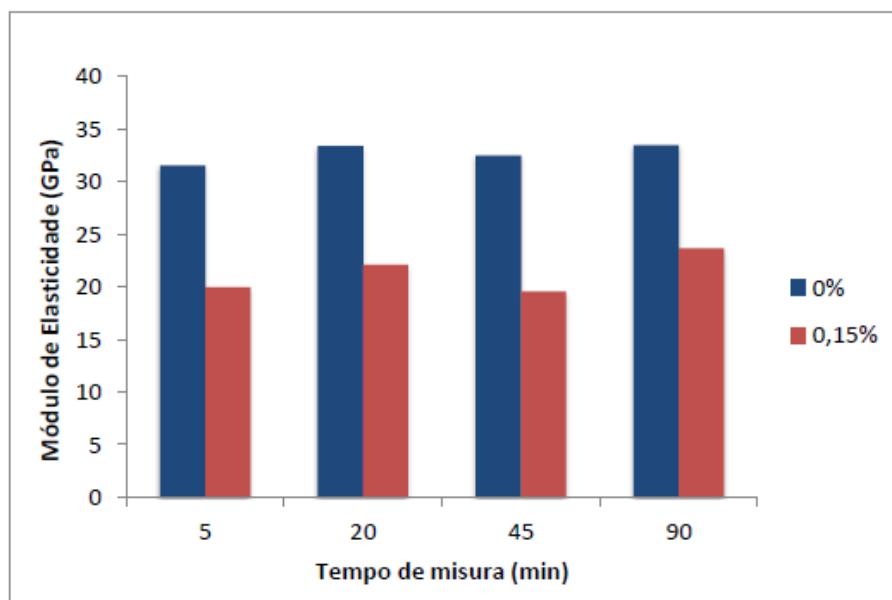
---

a obter o teor de ar incorporado ideal que proporcione em um concreto com desempenhos satisfatórios, e nada melhor para avaliar esses desempenhos que ensaios normatizados.

No trabalho de Rosa (2013), foi feita a verificação da variação dos valores de módulo de elasticidade, resistências à compressão e à tração, para concretos, com e sem aditivo incorporador de ar, em relação ao tempo de mistura dos materiais. A Figura 2.4 apresenta um comparativo das médias dos resultados para módulo de elasticidade e para resistência à compressão, encontradas nos concretos produzidos com e sem aditivo incorporador de ar.

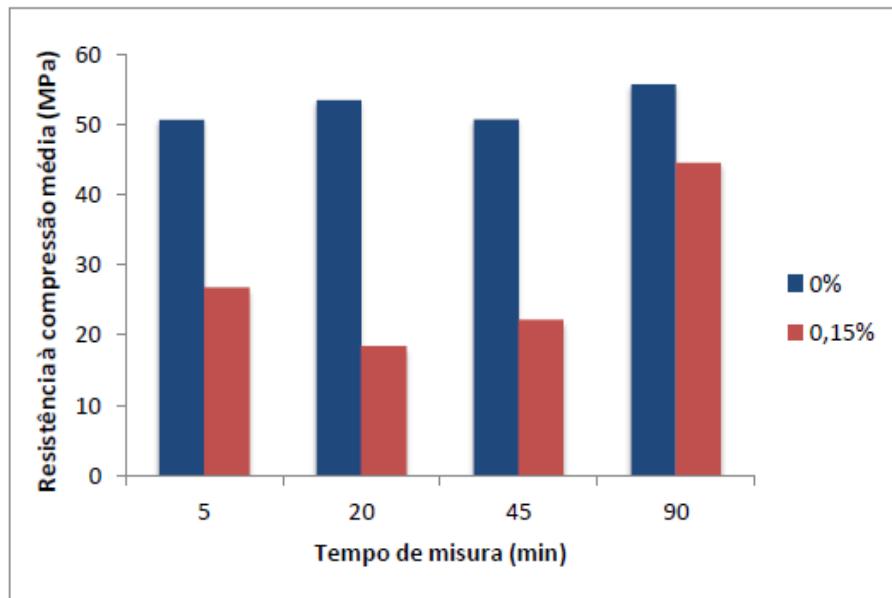
Figura 2.4 – Média dos resultados

a) Módulo de elasticidade



---

b) Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias



Fonte: Rosa, (2013).

De acordo com o trabalho de Santos e Castro (2013), o comportamento mecânico do concreto auto-adensável estudado foi influenciado significantemente com o aumento do teor de ar incorporado (14% e 15%), reduzindo em aproximadamente 70% a resistência mecânica obtida para as misturas de referência (produzidas sem AIA). Os autores ressaltam a importância de pesquisas para buscar teores de ar incorporado que atendam as especificações inicialmente propostas tanto para as propriedades no estado fresco, quanto para as propriedades mecânicas no estado endurecido.

# CAPÍTULO 3

## 3 DESEMPENHO ESTRUTURAL

### 3.1 DESEMPENHO

A evolução do conceito de desempenho na construção civil no Brasil foi descrita por Borges (2008), através de vários trabalhos. O mesmo participou da equipe que escreveu esse momento na história da construção civil do país, e com base em seus trabalhos é apresentado, na sequência, um pouco dessa evolução.

No Brasil, as primeiras apresentações do conceito de desempenho ocorreram na década de 70, época de grande crescimento da economia brasileira e de grandes investimentos na Construção Civil, houve um estímulo à racionalização e industrialização da construção, o que trouxe alternativas aos produtos e processos tradicionais, através do surgimento de novos sistemas construtivos.

Nesse cenário, os responsáveis pelo setor perceberam que se tornava fundamental a criação de instrumentos para avaliar tecnicamente as soluções inovadoras, com base em critérios que permitissem prever o comportamento das edificações durante a sua vida útil esperada.

Na prática, houve a implementação de tecnologias ainda não suficientemente consolidadas ou desenvolvidas para as necessidades específicas do Brasil, e com resultados, na maioria dos casos, desastrosos, gerando prejuízos a todos os responsáveis intervenientes no processo da construção. A falta de referências e a consequente dificuldade de avaliação desses sistemas inovadores restringiram sua utilização na escala prevista e da forma tecnicamente correta.

A sucessão de experiências fracassadas na utilização de soluções inovadoras prejudicou o setor da Construção Civil, o tornou menos receptivo às inovações tecnológicas e ainda mais desatualizados tecnologicamente, se comparado a outros setores produtivos da economia brasileira.

Na década de 80, principalmente pelo trabalho do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), do Estado de São Paulo, o tema “Desempenho de edificações” se evidenciou no Brasil. O Banco Nacional da Habitação (BNH), o maior órgão financiador de habitações populares do Brasil na década de 70, buscando resolver o problema de falta de normas técnicas no país, através do IPT, investiu em pesquisas para a elaboração de critérios voltados à avaliação de sistemas construtivos inovadores. Esse foi um dos primeiros trabalhos baseados no conceito de desempenho.

Nessa época, toda a normalização brasileira era prescritiva, e hoje quase toda ainda é, ou seja, voltada à especificação de soluções construtivas e sem a descrição de limites mínimos de qualidade que pudessem servir de referência para a avaliação de desempenho de novos produtos ou sistemas. Foram elaboradas várias normas que levaram em conta o aspecto desempenho, ao longo da década de 80, muito em função do trabalho realizado pelo IPT em 1981, mas não de maneira uniforme ou sistêmica.

O fato de que em 1986 o BNH foi extinto e a Caixa Econômica Federal (CEF) assumiu seu lugar, acarretou uma descontinuidade na busca por instrumentos que pudessem servir de base para a avaliação de sistemas construtivos e inovadores.

No ano de 2000, a CEF financiou, através da Financiadora de Projetos Especiais (Finep), um projeto para a criação de um sistema de avaliação de sistemas construtivos inovadores baseado no conceito de desempenho, que resultou na publicação, em 2008, da Norma Brasileira de Desempenho de Edifícios até 5 pavimentos. Os objetivos do projeto inicial foram ampliados, e a Norma especificou também requisitos de desempenho mínimos para vários sistemas das edificações, inovadores ou não, e definiu as incumbências dos intervenientes para a obtenção do desempenho ao longo de uma vida útil mínima obrigatória.

---

Nesse cenário, e em consenso com órgãos governamentais, associações de profissionais, universidades, instituições técnicas e setor produtivo, a CBIC solicitou à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a revisão de tão importante conjunto normativo. Essa Comissão de Estudos obteve destaque pelas várias participações e após quase dois anos de trabalhos de revisão, a norma ABNT NBR 15575 “Edificações Habitacionais – Desempenho” entrou oficialmente em vigor a partir de julho de 2013, sendo um importante e indispensável marco para a modernização tecnológica da construção brasileira e melhoria da qualidade de nossas habitações.

De acordo com Furnas (2008), a avaliação de desempenho se resume em prever o comportamento potencial do sistema construtivo ao longo do seu uso, considerando-se duas vertentes: as exigências do usuário e as condições de exposição da habitação.

Seis exigências dos usuários traduzem essas premissas:

1. Desempenho estrutural;
2. Estanqueidade à água;
3. Segurança ao fogo;
4. Conforto térmico;
5. Conforto acústico;
6. Durabilidade.

Conhecido internacionalmente como abordagem de desempenho, este método de avaliação está consagrado na normalização internacional (normas ISO), e utilizado constantemente para a avaliação e desenvolvimento de tecnologias inovadoras em diferentes países do mundo. Essa abordagem de desempenho busca avaliar a adequação ao uso das novas tecnologias e inclui exigências relativas, principalmente, a:

- Segurança estrutural;
- Segurança ao fogo;
- Adequação de projeto;
- Durabilidade e manutenção;
- Conforto térmico e acústico;

- 
- Estanqueidade;
  - Gestão da qualidade e custos.

Todos os requisitos e critérios de avaliação são apresentados para cada exigência. Dentre esses critérios podem-se destacar três tipos: os eliminatórios que prescrevem um nível mínimo de desempenho abaixo do qual a tecnologia não é aceita, os classificatórios nos quais possuem uma escala de classificação de desempenho da tecnologia, e por fim, os eliminatórios e classificatórios que incorporam características de ambos.

### **3.2 REQUISITOS GERAIS**

As normas de projeto e execução de estruturas enfocam normalmente a estabilidade e segurança da construção frente a cargas gravitacionais, à ação do vento e a outras. As normas de desempenho incluem ainda ações decorrentes do uso e ocupação do imóvel, por exemplo, resistência a impactos, capacidade de paredes e tetos suportarem cargas, dentre outros.

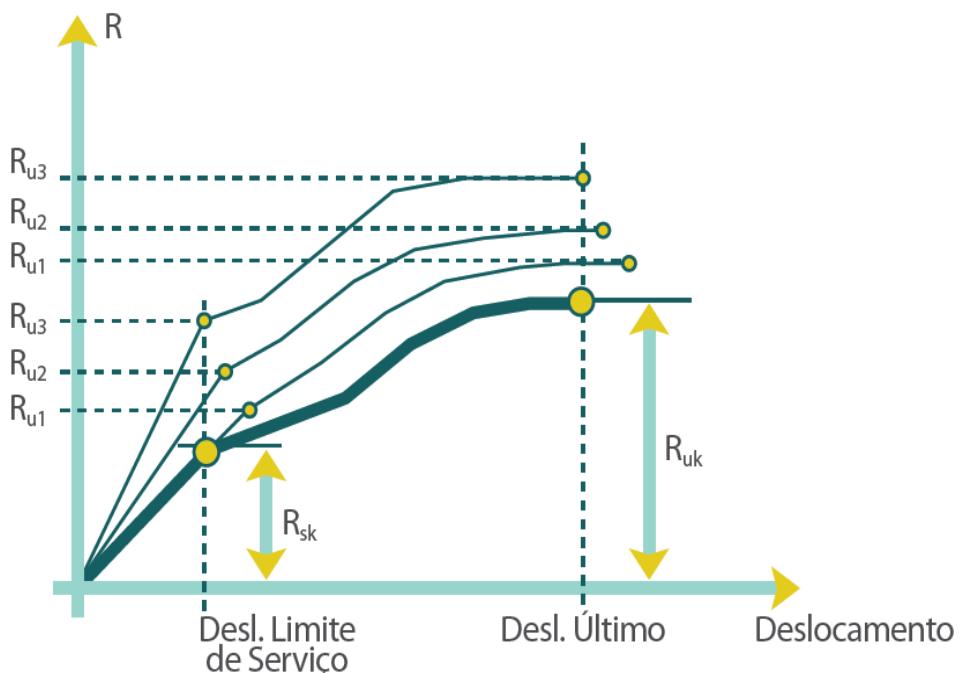
Na ABNT NBR 15575:2013 os estados limites últimos e os de utilização implicam no prejuízo da utilização da obra por fissuração ou deformações excessivas, comprometimento da durabilidade da estrutura ou ocorrência de falhas localizadas que possam prejudicar os níveis de desempenho previstos para a estrutura e os demais elementos e componentes da edificação, incluindo as instalações hidrossanitárias e demais sistemas prediais. Sob as diversas condições de exposição a estrutura deve atender, durante a vida útil de projeto, aos seguintes requisitos:

- a. Não ruir ou perder a estabilidade de qualquer de suas partes;
- b. Prover segurança aos usuários sob ação de impactos, choques, vibrações e outras solicitações decorrentes da utilização normal da edificação, previsíveis na época do projeto;
- c. Não provocar sensação de insegurança aos usuários pelas deformações de quaisquer elementos da edificação;
- d. Não repercutir em estados inaceitáveis de fissuras de vedação e acabamentos;

- e. Não prejudicar a manobra normal de partes móveis, como portas e janelas, nem prejudicar funcionamento normal das instalações em fase das deformações dos elementos estruturais;
- f. Atender às disposições das normas relativas às interações com o solo e com o entorno da edificação.

Para estruturas e materiais não cobertos pelas normas específicas, ou sempre que a modelagem matemática do comportamento conjunto dos materiais e componentes que constituem o sistema não for conhecida e consolidada por experimentação, a ABNT NBR 15575:2013 indica que, para edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, a resistência do sistema estrutural deve ser estabelecida por meio de ensaios destrutivos e do traçado do correspondente diagrama carga x deslocamento conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Gráfico carga x deslocamento para determinação de  $R_{ud}$  e  $R_{sd}$  por meio de ensaio



Fonte: CBIC, 2013.

A respeito dos deslocamentos e estados de fissuração do sistema estrutural, sob a ação de cargas gravitacionais, temperatura, vento (ABNT NBR 6123:2013), recalques diferenciais das fundações (ABNT NBR 6122:2010) ou quaisquer outras solicitações

passíveis de atuarem sobre a construção, conforme ABNT NBR 8681:2004, os componentes estruturais não podem apresentar:

- Deslocamentos maiores que os estabelecidos nas normas de projeto estrutural anteriormente mencionados ou, na falta de norma brasileira específica, os valores indicados nas Tabelas 3.1 e 3.2;
- Fissuras com aberturas maiores que os limites indicados nas ABNT NBR 6118, ABNT NBR 9062 ou outra norma específica para o método construtivo adotado, ou ainda abertura superior a 0,6 mm em qualquer situação.

Tabela 3.1 – Deslocamentos-limites para cargas permanentes e cargas acidentais em geral

Razão da limitação	Elemento	Deslocamento limite	Tipo de deslocamento
Visual/insegurança psicológica	Pilares, paredes, vigas, lajes (componentes visíveis)	L/250 ou H/300 <sup>a</sup>	Deslocamento final incluindo fluência (carga total)
Destacamentos, fissuras em vedações ou acabamentos, falhas na operação de caixilhos e instalações	Caixilhos, instalações, vedações e acabamentos rígidos (pisos, forros etc.)	L/800	Parcela da flecha ocorrida após a instalação da carga correspondente ao elemento em análise (parede, piso etc.)
	Divisórias leves, acabamentos flexíveis (pisos, forros etc.)	L/600	
Destacamentos e fissuras em vedações	Paredes e/ou acabamentos rígidos	L/500 ou H/500 <sup>a</sup>	Distorção horizontal ou vertical provocada por variações de temperatura ou ação do vento, distorção angular devida ao recalque de fundações (deslocamentos totais)
	Paredes e acabamentos flexíveis	L/400 ou H/400 <sup>a</sup>	

H - é a altura do elemento estrutural.  
 L - é o vão teórico do elemento estrutural.  
<sup>a</sup> Para qualquer tipo de solicitação, o deslocamento horizontal máximo no topo do edifício deve ser limitado a  $H_{total}/500$  ou 3 cm, respeitando-se o menor dos dois limites.  
 NOTA. Não podem ser aceitas falhas, a menos aquelas que estejam dentro dos limites previstos nas normas prescritivas específicas.

Fonte: ABNT NBR 15575-2:2013.

Tabela 3.2 – Flechas máximas para vigas e lajes – Cargas gravitacionais permanentes e acidentais

Parcela de carga permanente sobre vigas e lajes		Flecha imediata <sup>a</sup>			Flecha final (total) <sup>c</sup>
		S <sub>gk</sub>	S <sub>qk</sub>	S <sub>gk</sub> + 0,7 S <sub>qk</sub>	S <sub>gk</sub> + 0,7 S <sub>qk</sub>
Paredes monolíticas, em alvenaria ou painéis unidos ou rejuntados com material rígido	Com aberturas <sup>b</sup>	L/1 000	L/2 800	L/800	L/400
	Sem aberturas	L/750	L/2 100	L/600	L/340
Paredes em painéis com juntas flexíveis, divisorias leves, gesso acartonado	Com aberturas <sup>b</sup>	L/1 050	L/1 700	L/730	L/330
	Sem aberturas	L/850	L/1 400	L/600	L/300
Pisos	Constituídos e/ ou revestidos com material rígido	L/700	L/1 500	L/530	L/320
	Constituídos e/ ou revestidos com material flexível	L/750	L/1 200	L/520	L/280
Forros	Constituídos e/ ou revestidos com material rígido	L/600	L/1 700	L/480	L/300
	Forros falsos e/ ou revestidos com material flexível	L/560	L/1 600	L/450	L/260
Laje de cobertura impermeabilizada, com inclinação $i \geq 2\%$		L/850	L/1 400	L/600	L/320
Vigas calha com inclinação $i \geq 2\%$		L/750	–	–	L/300

<sup>a</sup> L é o vão teórico.  
<sup>b</sup> Para vigas e lajes em balanço, são permitidos deslocamentos correspondentes a 1,5 vez os respectivos valores indicados.  
<sup>c</sup> No caso do emprego de dispositivos e detalhes construtivos que absorvam as tensões concentradas no contorno das aberturas das portas e janelas, as paredes podem ser consideradas "sem aberturas".  
<sup>c</sup> Para a verificação dos deslocamentos na flecha final, reduzir a rigidez dos elementos analisados pela metade.

Fonte: ABNT NBR 15575-2:2013.

Os limites de deslocamentos instantâneos ( $d_h$ ) e residuais ( $d_{hr}$ ) de sistemas de vedação verticais internos e externos (SVVIE), considerando as combinações de cargas passíveis de atuarem, devem atender os limites conforme Tabela 3.3, sem apresentar falhas que caracterizem o estado-limite de serviço.

Tabela 3.3 – Critérios e níveis de desempenho quanto a deslocamentos e ocorrência de falhas sob ação de cargas de serviço.

Elemento	Solicitação	Critério
SVVIE com função estrutural	Cargas verticais: $S_d = S_{gk} + 0,7 S_{gk} + S_{wk}$ (desconsiderar $S_{wk}$ no caso de alívio da compressão)	Não ocorrência de falhas; Limitação dos deslocamentos horizontais: $d_h \leq h/500$ $d_{hr} \leq h/2\ 500$
SVVIE com ou sem função estrutural	Cargas permanentes e deformações impostas $S_d = S_{gk} + S_{ek}$	Não ocorrência de falhas, tanto nas paredes como nas interfaces da parede com outros componentes
SVVE (paredes de fachadas) com ou sem função estrutural	Cargas horizontais: $S_d^a = 0,9 S_{gk} + 0,8 S_{wk}$	Não ocorrência de falhas; Limitação dos deslocamentos horizontais <sup>b</sup> : $d_h \leq h/500$ (SVVE com função estrutural); $d_{hr} \leq h/2\ 500$ (SVVE com função estrutural); $d_h \leq h/350$ (SVVE com função de vedação); $d_{hr} \leq h/1\ 750$ (SVVE com função de vedação). Entende-se neste critério como SVVE as paredes de fachada

<sup>a</sup> No caso de ensaios de tipo considerar  $S_d = S_{gk} + 0,8 S_{wk}$ .  
<sup>b</sup> Para paredes de fachada leves ( $G \leq 60 \text{ Kgf/m}^2$ ), sem função estrutural, os valores de deslocamento instantâneo ( $d_h$ ) podem atingir o dobro dos valores indicados nesta Tabela.

onde

$h$  é altura do elemento parede;  
 $d_h$  é o deslocamento horizontal instantâneo;  
 $d_{hr}$  é o deslocamento horizontal residual;  
 $S_{gk}$  é a solicitação característica devida à cargas permanentes;  
 $S_{ek}$  é o valor característico da solicitação devida à deformação específica do material;  
 $S_{gk}$  é o valor característico da solicitação devida às cargas acidentais ou sobrecargas de uso;  
 $S_{wk}$  é o valor característico da solicitação devida ao vento.

NOTA Estes limites aplicam-se, a princípio, a SVVIE destinados a edificações de até cinco pavimentos.

Fonte: ABNT NBR 15575-4:2013.

### 3.2.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Na edificação habitacional, a análise do projeto dos componentes estruturais deve ser feita com base nas Normas Brasileiras específicas (ABNT NBR 6118, ABNT NBR 6120, ABNT NBR 6123, ABNT NBR 7190, ABNT NBR 8681, ABNT NBR 8800, ABNT NBR 9062, ABNT NBR 15961 e ABNT NBR 14762) em função do tipo de estrutura, ou nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 já apresentadas.

Como já citado, quando não for conhecida e consolidada por experimentação a modelagem matemática do comportamento do conjunto dos materiais e componentes que constituem o sistema, ou não existir norma técnica, permite-se, desde que aplicado a edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, estabelecer uma modelagem matemática do comportamento conjunto para as deformações de serviço através de ensaios destrutivos e do traçado do correspondente diagrama carga x deslocamento (FIGURA 3.1), conforme

---

indicado no Anexo A e B da ABNT NBR 15575:2013. Em relação ao nível de desempenho, o atendimento dos requisitos estabelecidos corresponde ao nível de desempenho mínimo (M), conforme a ABNT NBR 15575:2013.

Efetuar cálculos ou ensaio descritos na ABNT NBR 15575-2:2013 para sistemas de vedações verticais externas e internas com função estrutural, e nos sistemas de vedações verticais externas sem função estrutural, realizar ensaio de tipo, análise de projeto ou cálculos, considerando também os esforços que simulam as ações horizontais devidas ao vento. Deve-se, também, considerar as fixações e vinculações, bem como o desenho específico para cada caso, incluindo as justificativas do modelo adotado.

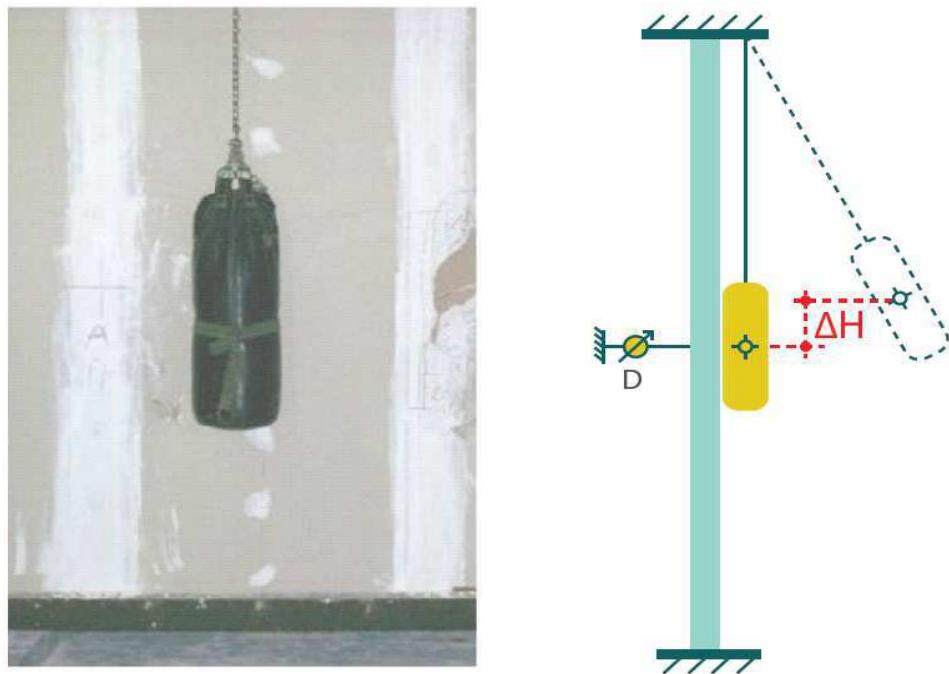
### **3.3 IMPACTOS DE CORPO MOLE**

#### **3.3.1 MÉTODO DE ENSAIO**

De acordo com a ABNT NBR 15575-4:2013, o ensaio consiste em aplicar impactos com um corpo mole e procura representar choques acidentais gerados pela utilização, atos de vandalismo, tentativas de intrusão, dentre outras. Os impactos tem sua energia expressa em Joules ( $1J = N.m$ ), onde as maiores energias referem-se ao estado limite último (impactos de segurança). Seu princípio baseia-se em um corpo com massa e forma conhecidas, liberado de altura estabelecida para ensaios de elementos estruturais ou componentes, que, ao atingir o componente, provoca deslocamentos ou deformações ou rupturas verificáveis.

Os impactos do ensaio de corpo mole são aplicados por um saco cilíndrico de couro, com diâmetro de 35 cm, altura de 90 cm e massa de  $400\text{ N} \pm 4\text{ N}$ . Na Figura 3.2 é mostrado o esquema do ensaio, onde é possível produzir, por exemplo, impactos de 480 J pelo movimento pendular do corpo a partir de  $\Delta H = 1,20\text{ m}$  ( $480\text{ J} = 400\text{ N} \times 1,2\text{ m}$ ).

Figura 3.2 – Saco de couro para impactos e esquema do ensaio de impacto de corpo mole



Fonte: CBIC, (2013).

Para verificar os deslocamentos ou deformações provenientes do impacto de corpo mole sobre elementos estruturais e componentes, a ABNT NBR 15575:2013 recomenda aplicar energias de impacto indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Massa de corpo mole, altura e energia do impacto.

Impacto	<b>m</b>	<b>ΔH</b>	<b>E</b>
	<b>kg</b>	<b>m</b>	<b>J</b>
Aplicar um impacto de corpo mole para cada energia	40	0,30	120
	40	0,45	180
	40	0,60	240
	40	0,90	360
	40	1,20	480
	40	1,80	720
	40	2,40	960

Fonte: Adaptada ABNT NBR 15575-2:2013.

---

### 3.3.2 APARELHAGEM

De acordo com a ABNT NBR 11675:1990 Versão Corrigida: 2011, a aparelhagem necessária para realização do ensaio consiste em:

- Estrutura vertical com forma de quadro com altura e vão reguláveis, apta a receber no seu contorno o corpo de prova. Esta estrutura vertical, mediante enrijecimento e/ou contraventamento, deve atender aos seguintes requisitos:
  - Sob a ação de impactos de corpo mole com energia de 240 J, aplicados perpendicularmente ao plano do quadro e a meia altura dos seus montantes, os deslocamentos horizontais medidos nas regiões da aplicação dos impactos e nas extremidades dos montantes não devem ultrapassar  $h/2000$ , sendo “ $h$ ” a altura livre do quadro;
  - Sob a ação de impactos de corpo mole com energia de 240 J, aplicados perpendicularmente ao plano do quadro e a meio comprimento de suas travessas, os deslocamentos horizontais medidos nas regiões da aplicação dos impactos e nas extremidades das travessas não devem ultrapassar  $L/2000$ , sendo “ $L$ ” o vão livre do quadro;
  - Sob a ação de seu próprio peso, a travessa superior do quadro não deve apresentar deslocamento vertical superior a  $L/1000$ , sendo “ $L$ ” o vão livre do quadro;
  - Sob a ação de seu próprio peso e do peso próprio da divisória, a travessa inferior do quadro não deve apresentar deslocamento vertical superior a  $L/500$ , sendo “ $L$ ” o vão livre do quadro.
- Saco cilíndrico de couro, com diâmetro aproximado de 350 mm e altura aproximada de 900 mm, com peso total de  $400 \text{ N} \pm 4 \text{ N}$ , e contendo no seu interior areia seca e serragem para ser usado como corpo mole.
- Sistema pendular constituído de um suporte com altura superior à altura do corpo de prova a ser ensaiado e um fio de aço destinado à sustentação do saco cilíndrico.

- 
- Dispositivo para registro dos deslocamentos transversais do corpo de prova ensaiado.
  - Paquímetro de profundidade com resolução igual ou inferior a 0,1 mm.

### **3.3.3 AVALIAÇÃO E RESULTADOS**

Sob ação de impactos de corpo mole, a medição dos deslocamentos horizontais, verticais e residuais, incluindo a observação visual, os componentes da estrutura:

- a) não podem sofrer ruptura ou instabilidade sob as energias de impacto estabelecidas nas Tabelas 3.5 e 3.6 retiradas da ABNT NBR 15575-2:2013, sendo tolerada a ocorrência de fissuras, escamações, delaminações e outros danos em impactos de segurança, respeitados os limites para deformações instantâneas e residuais dos componentes;
- b) não podem causar danos a outros componentes acoplados aos componentes sob ensaio.

Tabela 3.5 - Critérios e níveis de desempenho para elementos estruturais localizados na fachada da edificação, em exteriores acessíveis ao público — Impacto de corpo mole na face externa, ou seja, de fora para dentro

Energia de impacto de corpo mole (J)	Critério de desempenho	Nível de desempenho		
		M	I	S
<b>960</b>	Não ocorrência de ruína Não ocorrência de falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)			x
<b>960</b>	Não ocorrência de ruína; são permitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x	x	
<b>720</b>	Não ocorrência de ruína Não ocorrência de falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)			x
<b>720</b>	Não ocorrência de ruína; são permitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x	x	
<b>480</b>	Não ocorrência de ruína Não ocorrência de falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x	x	x
<b>480</b>	Não ocorrência de ruína; são permitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x		
<b>360</b>	Não ocorrência de falhas Limitações do deslocamento horizontal: $d_h \leq \frac{h}{250}$ e $d_{hr} \leq \frac{h}{1250}$ para pilares, sendo h a altura do pilar $d_h \leq \frac{L}{200}$ e $d_{hr} \leq \frac{L}{1000}$ para vigas, sendo L o vão teórico da viga	x	x	x
<b>360</b>	Não ocorrência de ruína; são permitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x		
<b>240</b>	Não ocorrência de falhas Limitações do deslocamento horizontal: $d_h \leq \frac{h}{250}$ e $d_{hr} \leq \frac{h}{1250}$ para pilares, sendo h a altura do pilar $d_h \leq \frac{L}{200}$ e $d_{hr} \leq \frac{L}{1000}$ para vigas, sendo L o vão teórico da viga	x	x	x
<b>180</b>	Não ocorrência de falhas	x	x	x
<b>120</b>	Não ocorrência de falhas	x	x	x

Fonte: Adaptada ABNT NBR 15575-2:2013

Tabela 3.6 - Critérios e níveis de desempenho para elementos estruturais localizados no interior da edificação e na fachada - Impacto de corpo mole aplicado na face interna, ou seja, de dentro para fora

Energia de impacto de corpo mole (J)	Critério de desempenho	Nível de desempenho		
		M	I	S
480	Não ocorrência de ruína Não ocorrência de falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)			x
480	Não ocorrência de ruína; são permitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x	x	
360	Não ocorrência de ruína Não ocorrência de falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)			x
360	Não ocorrência de ruína; são permitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x	x	
240	Não ocorrência de falhas Limitações do deslocamento horizontal: $d_h \leq \frac{h}{250}$ e $d_{hr} \leq \frac{h}{1000}$ para pilares, sendo h a altura do pilar $d_h \leq \frac{L}{200}$ e $d_{hr} \leq \frac{L}{1000}$ para vigas, sendo L o vão teórico da viga	x	x	x
240	Não ocorrência de ruína; são permitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)	x		
180	Não ocorrência de falhas	x	x	x
120	Não ocorrência de falhas Limitações do deslocamento horizontal: $d_h \leq \frac{h}{250}$ e $d_{hr} \leq \frac{h}{1250}$ para pilares, sendo h a altura do pilar $d_h \leq \frac{L}{200}$ e $d_{hr} \leq \frac{L}{1000}$ para vigas, sendo L o vão teórico da viga	x	x	x

Fonte: Adaptada ABNT NBR 15575-2:2013

Alguns sistemas podem ou não atender aos critérios em função da bitola e espaçamento dos montantes, espessura e número de chapas em cada face da parede, como é caso de paredes de gesso acartonado, *steel frame* ou *wood frame*. Para casos de sistemas inovadores há necessidade de realizar ensaios. A ABNT NBR 14718:2008 traz os requisitos que devem ser atendidos pelos guarda-corpos instalados em terraço, coberturas acessíveis, dentre outros lugares.

---

Segundo a CBIC (2013), elementos e componentes lineares das estruturas convencionais de aço, madeira ou concreto armado, projetados e construídos de acordo com as respectivas normas da ABNT, atendem a todos os valores especificados para o ensaio. Para paredes com alturas  $\leq 3\text{m}$  em concreto armado ou alvenaria de tijolos maciços, blocos cerâmicos vazados, blocos de concreto vazados, bloco de concreto celular e blocos sílico-calcários com espessura  $\geq 14\text{ cm}$  ocorre o mesmo. As alvenarias com largura de 9 cm têm potencial de atender tais exigências apenas no caso de serem revestidas nas duas faces. Lembrando que em qualquer situação, a resistência a impactos de corpo mole pode ser convenientemente aumentada com a introdução de cintas de amarração, pilares armados e grauteados, barras de aço corridas nas juntas de assentamento, telas metálicas embutidas nos revestimentos das paredes e dentre outros recursos.

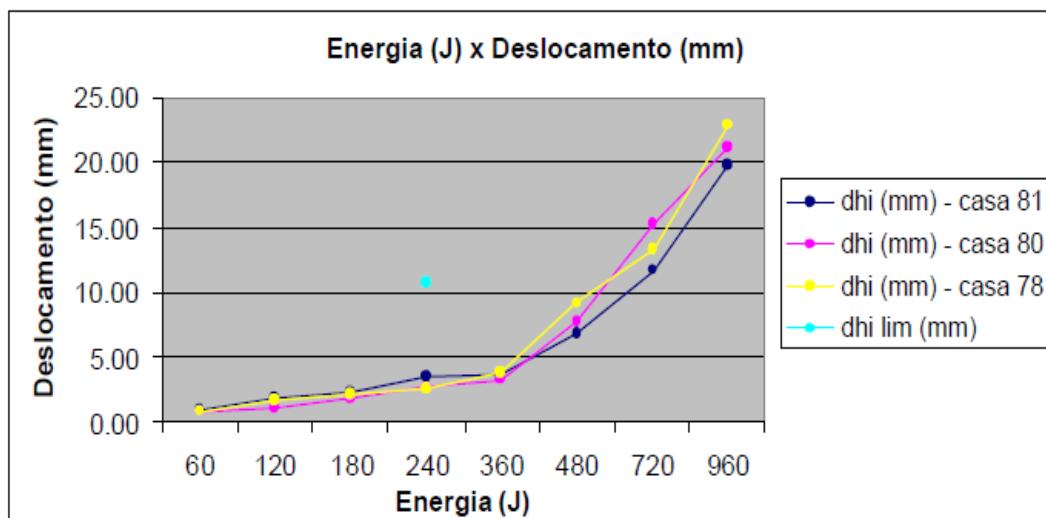
A ABNT NBR 15575:2013 recomenda a elaboração do relatório de ensaio onde deve conter no mínimo as seguintes informações:

- a. identificação do solicitante;
- b. identificação do fornecedor;
- c. identificação da amostra e de todos os corpos de prova;
- d. desenho do ensaio de tipo e sua geometria;
- e. caracterização dos constituintes;
- f. data do recebimento da amostra;
- g. deslocamentos;
- h. análise visual;
- i. fotos;
- j. nível de desempenho;
- k. data do ensaio;
- l. referência a norma;
- m. registros sobre eventos não previstos no decorrer dos ensaios.

### 3.3.4 RESULTADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

No trabalho de Menezes (2006) realizado no Estado do Amazonas, foi feita a avaliação de desempenho das unidades habitacionais de solo-cimento e concreto celular através da verificação da resistência ao impacto. Os ensaios de verificação da resistência a impactos de corpo mole foram feitos tendo como referência o Projeto de Norma 02.136.01.004 da ABNT de 2004. A Figura 3.3 apresenta o gráfico dos deslocamentos horizontais imediatos e horizontal imediato limite de três unidades em solo-cimento rejuntado.

Figura 3.3 – Gráfico dos deslocamentos horizontais imediatos das três unidades habitacionais de solo-cimento rejuntado devido ao ensaio de impacto de corpo mole.



Fonte: Menezes, (2006).

Em 2007, o Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.C) de FURNAS Centrais Elétricas S.A. por solicitação da Caixa Econômica Federal e da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem – ABESC, elaborou um relatório que descreve as conclusões das avaliações de desempenho dos sistemas construtivos que utilizam paredes de concreto armado, seja moldado *in loco* ou *tilt-up*, e estabeleceu os requisitos técnicos que estes sistemas devem seguir. Dentro desse trabalho foram feitos ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo mole em paredes. Os deslocamentos horizontais obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 3.7.

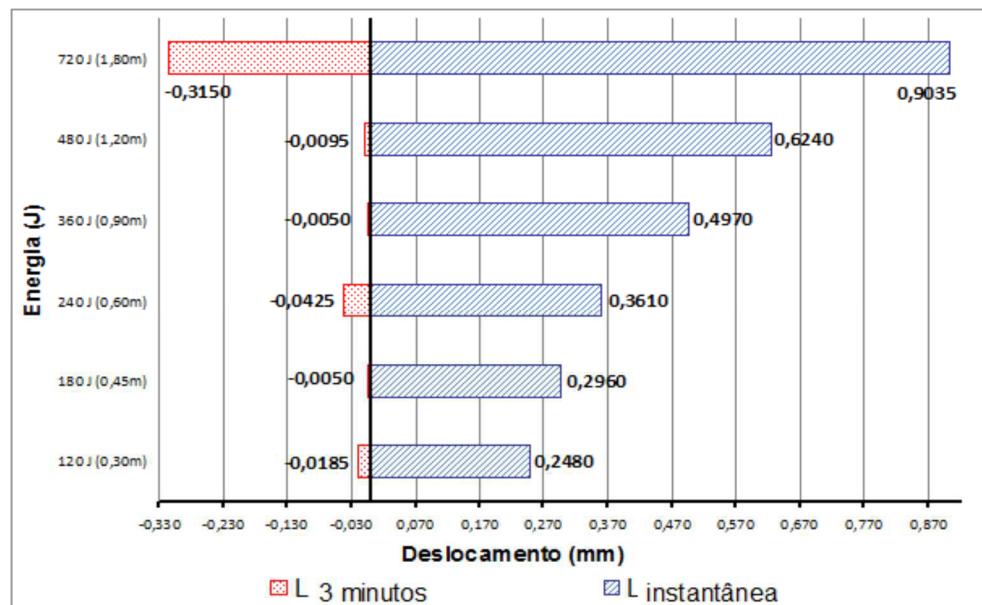
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de impacto de corpo mole em paredes

Estrutura	Deslocamentos (mm)		Limites
Parede 15.0089.2005 (moldado <i>in loco</i> )	1º pavimento	Dhi = 0,3	
		Dhr = 0,0	
	2º pavimento	Dhi = 0,6	
		Dhr = 0,0	
Protótipo 15.0013.2006 (moldado <i>in loco</i> )	Externa	Dhi = 0,4	
		Dhr = 0,1	
	Interna	Dhi = 0,9	Dhi $\leq$ h/250 = 10,4 mm
		Dhr = 0,0	
Parede 15.0012.2006 ( <i>tilt-up</i> )	1º pavimento	Dhi = 0,7	Dhr $\leq$ h/1250 = 2,1 mm
		Dhr = 0,2	
	2º pavimento	Dhi = 0,5	
		Dhr = 0,0	
Protótipo 15.0014.2006 ( <i>tilt-up</i> )	Externa	Dhi = 0,7	
		Dhr = 0,0	
	Interna	Dhi = 1,2	
		Dhr = 0,1	

Fonte: FURNAS, (2007).

A pesquisa de Varisco (2014) foi realizada com o objetivo de analisar o desempenho de um sistema de vedação vertical externo (SVVE), sem função estrutural, construído com Blocos de Concreto Celular Autoclavado (BCCA), nesse trabalho foram feitos ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo mole de acordo com a ABNT NBR 15575:2013. A Figura 3.4, apresenta o gráfico com os deslocamentos no momento do impacto ( $L_{instantânea}$ ) e após três minutos ( $L_3\ minutos$ ) de seis impactos realizados no ensaio.

Figura 3.4 – Representação gráfica dos deslocamentos dos seis impactos do ensaio de corpo mole



Fonte: Varisco, (2014).

### 3.4 IMPACTOS DE CORPO DURO

#### 3.4.1 MÉTODO DE ENSAIO

Os ensaios de corpo duro verificam o comportamento de elementos estruturais e componentes quando submetidas a choques gerados pela utilização da edificação, acidentes, atos de vandalismos e dentre outros. A verificação da resistência e mossa provocada pelo impacto de corpo duro é feita mediante ensaios em laboratório, protótipo, ou obra, devendo o corpo de prova representar fielmente as condições de obra, inclusive tipos de apoio e vinculações.

De acordo com ABNT NBR 15575:2013, os impactos são aplicados por esferas de aço com diâmetro de 5 cm e massa de 0,5 kg (impactos de utilização) e diâmetro de 6,25 cm e massa de 1,0 kg (impactos de segurança), em movimento pendular (FIGURA 3.5). Deve-se aplicar 10 impactos (sem repiques) de cada modalidade (utilização e segurança), regularmente distribuídos pela superfície de uma das faces do corpo de prova. Após os impactos, inspecionar visualmente o corpo de prova, com respeito a existência ou não de fissuras,

---

escamações, destacamentos das capas e mossas, devendo-se medir a profundidade destas últimas e registrar as distâncias para as quais entes são perceptíveis a olho nu.

Figura 3.5 – Pórtico para movimento pendular do corpo duro



Fonte: LACTEC, (2013) apud Varisco, (2014).

### 3.4.2 APARELHAGEM

De acordo com a ABNT NBR 11675:1990 Versão Corrigida: 2011, a aparelhagem necessária para realização do ensaio consiste em:

- Estrutura vertical com forma de quadro com altura e vão reguláveis, apta a receber no seu contorno o corpo de prova. Esta estrutura vertical, mediante enrijecimento e/ou contraventamento, deve atender aos seguintes requisitos:
  - Sob a ação de impactos de corpo mole com energia de 240 J, aplicados perpendicularmente ao plano do quadro e a meia altura dos seus montantes, os deslocamentos horizontais medidos nas regiões da aplicação dos impactos e nas extremidades dos montantes não devem ultrapassar  $h/2000$ , sendo “ $h$ ” a altura livre do quadro;
  - Sob a ação de impactos de corpo mole com energia de 240 J, aplicados perpendicularmente ao plano do quadro e a meio comprimento de suas

---

travessas, os deslocamentos horizontais medidos nas regiões da aplicação dos impactos e nas extremidades das travessas não devem ultrapassar 1/2000, sendo “l” o vão livre do quadro;

- Sob a ação de seu próprio peso, a travessa superior do quadro não deve apresentar deslocamento vertical superior a 1/1000, sendo “l” o vão livre do quadro;
  - Sob a ação de seu próprio peso e do peso próprio da divisória, a travessa inferior do quadro não deve apresentar deslocamento vertical superior a 1/500, sendo “l” o vão livre do quadro.
- Duas esferas maciças de aço para serem usadas como corpo duro:
    - Esfera com diâmetro de 50 mm e massa de 0,5 kg;
    - Esfera com diâmetro de 63 mm e massa de 1,0 kg.
  - Sistema pendular constituído de um suporte com altura superior à altura do corpo de prova a ser ensaiado e um fio de aço destinado à sustentação da esfera maciça de aço.
  - Dispositivo para registro dos deslocamentos transversais do corpo de prova ensaiado.
  - Paquímetro de profundidade com resolução igual ou inferior a 0,1mm.

### **3.4.3 AVALIAÇÃO E RESULTADOS**

Os resultados da inspeção visual são descritivos, e os valores das mossas devem ser apresentados com arredondamento para décimo de milímetro, sendo que os elementos impactados não podem:

- a) Ser transpassados, sofrer ruptura ou instabilidade sobre ações de impactos de segurança com energias indicadas nas Tabelas 3.8 e 3.9;
- b) Apresentar fissuras, escamações, delaminações ou outras falhas que comprometam o estado de utilização, sob ação dos impactos de utilização indicados nas Tabelas 3.8 e 3.9.

Tabelas 3.8 – Critérios e níveis de desempenho para impacto de corpo duro na face externa de elementos estruturais localizados na fachada da edificação e nas faces externas acessíveis ao público

Energia de impacto <sup>a</sup> de corpo mole (J)	Critério de desempenho	Nível de desempenho
3,75	Não ocorrência de falhas Mossas com qualquer profundidade	M
20	Não ocorrência de ruína e traspassamento Permitidas falhas superficiais como mossas, fissuras e desagregações	
3,75	Não ocorrência de falhas Profundidade da mossa: $p \leq 5 \text{ mm}$	I
20	Não ocorrência de ruína e traspassamento Permitidas falhas superficiais como mossas, fissuras e desagregações	
3,75	Não ocorrência de falhas Profundidade da mossa: $p \leq 2 \text{ mm}$	S
20	Não ocorrência de ruína e traspassamento Permitidas falhas superficiais como mossas, fissuras e desagregações	

<sup>a</sup> Sentido do impacto de fora para dentro

Fonte: Adaptada ABNT NBR 15575-2:2013.

Tabela 3.9 - Critérios e níveis de desempenho para elementos estruturais localizados no interior da edificação e na fachada

Energia de impacto <sup>a</sup> de corpo mole (J)	Critério de desempenho	Nível de desempenho
2,75	Não ocorrência de falhas Mossas com qualquer profundidade	M
10	Não ocorrência de ruína e traspassamento Permitidas falhas superficiais como mossas, fissuras e desagregações	
2,75	Não ocorrência de falhas Profundidade da mossa: $p \leq 5 \text{ mm}$	I
10	Não ocorrência de ruína e traspassamento Permitidas falhas superficiais como mossas, fissuras e desagregações	
2,75	Não ocorrência de falhas Profundidade da mossa: $p \leq 2 \text{ mm}$	S
10	Não ocorrência de ruína e traspassamento Permitidas falhas superficiais como mossas, fissuras e desagregações	

<sup>a</sup> Sentido do impacto de dentro para fora, aplicado na face interna.

Fonte: Adaptada ABNT NBR 15575-2:2013.

Salienta-se que, toda essa verificação da resistência e depressão provocada pelo impacto de corpo duro por meio dos referidos ensaios executados em protótipos ou obra, deve ser feita com corpos de prova que representem fielmente as condições executivas da obra, inclusive tipos de apoio e vinculações.

A ABNT NBR 15575:2013 recomenda a elaboração do relatório de ensaio onde deve apresentar as seguintes informações:

- a. valor do impacto;
- b. massa do corpo percussor de impacto;
- c. registro de todas as falhas e fissuras e das medidas dos deslocamentos ou movimentos;
- d. detalhes e descrição do sistema de fixação recomendado pelo fabricante ou fornecedor, incluindo todos os acessórios e componentes do sistema;
- e. identificação do fornecedor;

- 
- f. descrição e memorial de elemento parede;
  - g. referência a norma.

#### 3.4.4 RESULTADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

Menezes (2006), também realizou os ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo duro nas unidades habitacionais de solo-cimento e concreto celular tendo como referência o Projeto de Norma 02.136.01.004 da ABNT de 2004. A Figura 3.6 ilustra a falha (traspassamento) ocorrida na parede de solo-cimento rejuntada pela esfera de aço de grande dimensão durante o ensaio de impacto de corpo duro.

Figura 3.6 – Falha na parede de solo-cimento rejuntada devido ao ensaio de impacto de corpo duro



Fonte: Menezes, (2006).

Voltando ao relatório de FURNAS (2007), as avaliações de desempenho dos sistemas construtivos que utilizam paredes de concreto armado, seja moldado *in loco* ou *tilt-up*, também contou com os ensaios de resistência ao impacto de corpo duro em paredes. As estruturas foram avaliadas na pior condição, tendo ocorrido à formação de mossas, sem o aparecimento de fissuras, trincas, rupturas ou estilhaçamentos no concreto moldado *in loco* ou *tilt-up*.

Com base no trabalho de Varisco (2014), a Tabela 3.10 apresenta os dados do ensaio da verificação da resistência ao impacto de corpo duro realizados no sistema de vedação vertical

externo em paredes de blocos de concreto celular autoclavado. Lembrando que o ensaio foi realizado segundo as diretrizes da ABNT NBR 15575-4:2013.

Tabela 3.10 – Dados do ensaio de impacto de corpo duro.

Energia (J)	$\Delta H$ (m)	Profundidade da mossa (mm)	Ocorrências	Requisitos da NBR 15575-4 (ABNT, 2013)
3,75	0,75	1,03	Apenas mossa	Não ocorrência de falhas, inclusive no revestimento. Mossas com $p > 5$ mm (Nível M)
		0,94	Apenas mossa	
		0,86	Apenas mossa	
		1,02	Apenas mossa	
		0,80	Apenas mossa	Não ocorrência de falhas, Mossas $5 \text{ mm} \geq p > 2$ mm (Nível I)
		0,79	Apenas mossa	
		0,70	Apenas mossa	
		0,68	Apenas mossa	Não ocorrência de falhas. Mossa $p \leq 2,0$ mm (Nível S)
		0,65	Apenas mossa	
		0,58	Apenas mossa	

Fonte: Adaptada Varisco, (2014).

### 3.5 CHOQUE TÉRMICO

#### 3.5.1 CONCEITOS BÁSICOS

A temperatura é um reconhecido agente de degradação mecânica dos materiais de base cimentícia, pois sua variação provoca, inevitavelmente, tensões de tração, que são prejudiciais devido a menor resistência à tração do concreto. Essas tensões provocadas pela variação de temperatura são usualmente denominadas tensões térmicas.

Há várias situações na engenharia que implicam em severas tensões térmicas, sendo necessária a seleção de materiais e componentes adequados. As características do fluxo de calor, especialmente a velocidade com que a variação de temperatura ocorre, além das propriedades do material são determinantes para suportar essas condições de trabalho.

---

Existe ainda uma situação crítica que depende da taxa (velocidade) com que ocorre a variação de temperatura provocada pelo gradual aumento ou diminuição da mesma. Se o elemento estiver exposto em um ambiente em que a temperatura variar rapidamente, será produzido um gradiente entre a superfície do elemento e seu interior, o que pode provocar tensões de elevada magnitude, fenômeno denominado de choque térmico.

De acordo com Kingery (1955); Gatewood (1957); Manson (1966) apud Esquivel (2009) define-se como choque térmico “um fenômeno produzido por uma variação de temperatura rápida e transiente em um sólido, cujo resultado é um estado de tensões térmicas”.

Uma diversidade de possibilidades se encaixa nessa definição genérica de choque térmico. Para melhor análise do fenômeno precisam-se definir características do fenômeno como: velocidade da variação de temperatura (minutos, segundos), a faixa de variação de temperatura, o meio em que ocorre (líquido ou gasoso), o tipo de variação (aumento ou diminuição), direção do fluxo de calor e formas de transferência de calor atuantes (condução, convecção, radiação). As condições de contorno também condicionam a resposta do material ao choque térmico. Por exemplo, se houver restrições externas à livre deformação do sólido, o estado de tensões será agravado.

Para os elementos de uma edificação são diversas as situações em que o choque térmico pode ocorrer, seja na exposição ao meio ambiente (períodos de aquecimento solar seguidos de períodos de chuva, ciclos de gelo e degelo), ou pelas várias condições de uso (pisos, fornos, saunas, entre outros), ou também em casos de incêndio.

Kingery (1960); Hasselman (1969); Biswas (1973) apud Esquivel (2009) destacam a existência de duas teorias que explicam a falha por choque térmico em materiais cerâmicos. A primeira está relacionada quando a resistência mecânica do material é superada, ocorrendo a fratura, e a segunda é promovida pela energia elástica armazenada no momento da fratura provocando a propagação de fissuras.

Um material não pode ter sua resistência ao choque térmico estimada precisamente, porque não é uma propriedade intrínseca do material, podendo variar de acordo com tipo de tensão,

---

com o tamanho do sólido, com a velocidade de carregamento e com outras condições de aplicação da tensão, por exemplo, as características do fluxo de calor.

### **3.5.2 ENSAIO DE EXPOSIÇÃO AO CALOR E AO CHOQUE TÉRMICO**

A ABNT NBR 15575-4:2013 especifica o princípio do ensaio em seu Anexo E, um método para verificar o comportamento de sistemas de vedação vertical externo (SVVE) submetidos a ciclos sucessivos de calor proveniente de fonte radiante e resfriamento por meio de jatos de água.

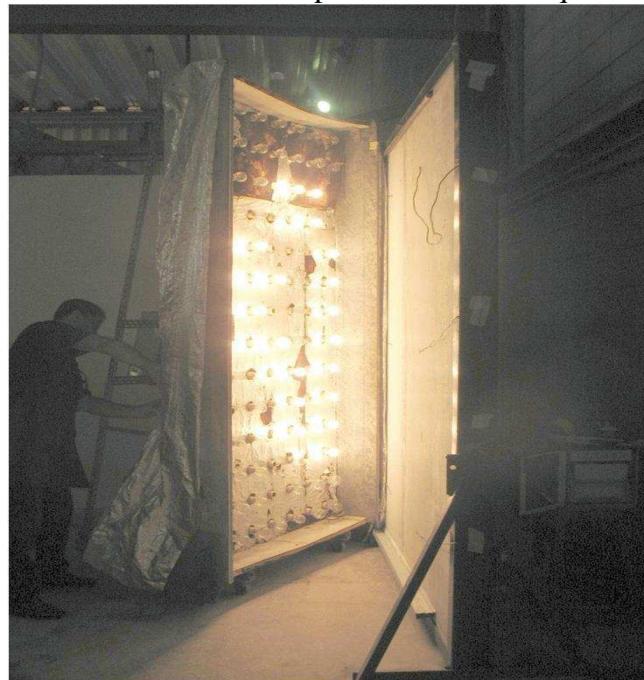
#### **3.5.2.1 APARELHAGEM**

Segundo a ABNT NBR 15575-4:2013, a aparelhagem necessária para realizar o ensaio de choque térmico consiste em:

- Painel radiante capaz de fornecer calor em quantidade tal que a face externa da parede atinja temperatura igual a  $(80 \pm 3) ^\circ\text{C}$ , a Figura 3.7 apresenta um exemplo de painel radiante que pode ser utilizado.
- Dispositivo para aspersão de água sobre o corpo de prova em sua face externa.
- Termopares e registrador das temperaturas superficiais da parede.
- Medidor de deslocamento linear de haste, com resolução de 0,02 mm.
- Dispositivo para fixação do corpo de prova, de forma a deixá-lo simplesmente apoiada em seus bordos inferior e superior, conforme Figura 3.8 (b).

---

Figura 3.7 – Painel radiante para ensaio de choque térmico



Fonte: CBIC, (2013).

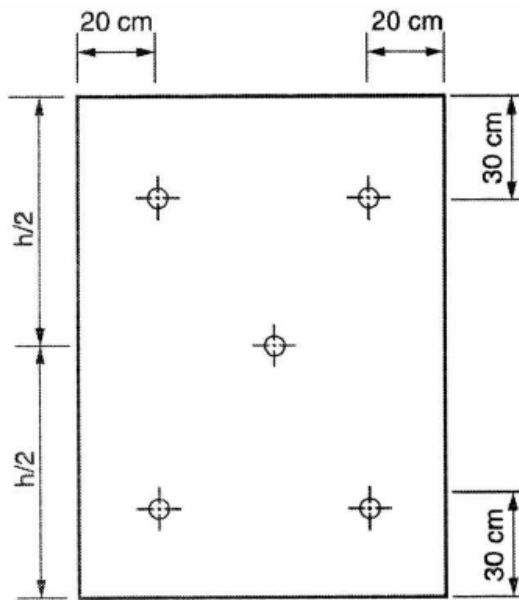
### **3.5.2.2 MÉTODO DE ENSAIO**

Para o ensaio de choque térmico, pelo menos dois corpos de prova devem ser constituídos por um trecho de parede acabada, executada com os detalhes construtivos a serem empregados em uma obra, incluindo juntas, com extensão mínima de  $1,20 \pm 0,20$  m e a espessura característica.

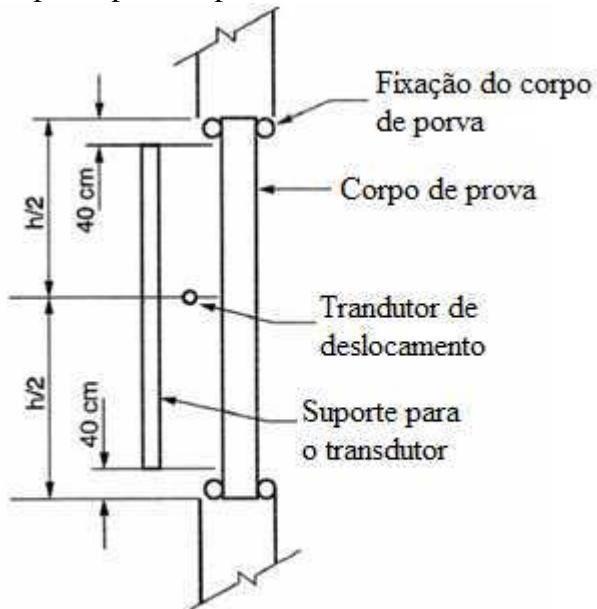
O corpo de prova deve ser simplesmente apoiado em seus bordos superior e inferior, os termopares devem ser colocados em sua face (em um total de cinco), e o medidor de deslocamentos instalado no ponto central do corpo de prova na face oposta à incidência de radiação, conforme Figura 3.8.

Figura 3.8 – Esquema de montagem e instrumentação do corpo de prova

a) Posicionamento dos termopares na superfície do corpo de prova



b) Fixação do corpo de prova e posicionamento do Medidor de deslocamento



Fonte: ABNT NBR 15575-4: 2013.

A uma distância tal que a temperatura superficial da face exterior se mantenha uniforme e igual a  $(80 \pm 3)^\circ\text{C}$ , o painel radiante deve ser disposto defronte o corpo de prova. Devem ser realizados dez ciclos de ação do calor e da água, de maneira que em cada ciclo:

- 
- Ação do calor: depois de atingida a temperatura superficial de  $(80 \pm 3)$  °C mantê-la durante 1 h;
  - Ação da água: imediatamente após a supressão da radiação, resfriar a face exterior do corpo de prova por meio de jatos de água aspergidos sobre toda a sua superfície, até se atingir temperatura superficial igual a  $(20 \pm 5)$  °C.

Durante e ao final do ensaio devem ser registrados a ocorrência de fissuras, trincas, deslocamentos ou outras deteriorações em ambas as faces do corpo de prova, e o deslocamento horizontal após 45 min da estabilização da temperatura superficial em  $(80 \pm 3)$  °C e imediatamente após o resfriamento.

### **3.5.2.3 AVALIAÇÃO E RESULTADOS**

Para cada corpo de prova deve-se registrar a ocorrência de degradações ao longo do ensaio, indicando o instante de ocorrência e o tipo, e os deslocamentos horizontais em milímetros, em cada ciclo, durante a ação do calor e após o resfriamento.

Para o relatório de ensaio deve apresentar as seguintes informações:

- a. Local da ocorrência da degradação e instante;
- b. Deslocamentos verificados;
- c. Identificação do fornecedor;
- d. Descrição e memorial do elemento parede;
- e. Referência ao Anexo E da ABNT NBR 15575-4:2013.

# CAPÍTULO 4

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL – MATERIAIS E ENSAIOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores, estão reunidas informações sobre o desempenho estrutural de edificações destacando avaliação pelos os ensaios de impacto de corpo mole e corpo duro, além de uma análise do desempenho estrutural sob a ação do choque térmico, ressaltando o ensaio de verificação da exposição ao calor e ao choque térmico. E também direcionou a aplicação desses ensaios em paredes de concreto com ar incorporado.

Com o objetivo de aplicar os requisitos de desempenho e avaliar o sistema construtivo de paredes de concreto produzidas com ar incorporado, o programa experimental engloba a montagem da aparelhagem para os ensaios de desempenho e a confecção e caracterização de diferentes concretos com ar incorporado para produção de paredes e corpos de prova.

O Laboratório de Estruturas e Materiais da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV – UFU) foi utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, proporcionando suporte para produção e caracterização do conjunto amostral de corpos de prova. O conjunto amostral foi utilizado para execução dos ensaios de desempenho e caracterização do concreto, no qual, se dividiu em:

- Paredes de concreto (300 cm x 272 cm x 10 cm);
- Painéis de concreto (110 cm x 110 cm x 10 cm);
- Corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm).

---

Ressaltando que as paredes e painéis de concreto foram produzidas a partir da construção de protótipos de casas, que além de contribuírem para essa dissertação também farão parte do programa experimental de outras pesquisas.

## 4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar o desempenho das paredes de concreto com ar incorporado foram utilizados três tipos de concreto com a mesma proporção entre os materiais (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água), porém com teores diferentes de aditivo incorporador de ar, sendo um sem aditivo incorporador de ar, como referência, e outros dois com teores de 50% e 100% do limite máximo recomendado pelo fabricante. Tais teores de aditivo se justificam pelo fato de se buscar um teor que proporcione um melhor desempenho das paredes de concreto.

Para aplicar os ensaios de desempenho mencionados nos capítulos anteriores, foram avaliados os grupos amostrais das paredes e dos painéis de concreto. Os corpos de prova cilíndricos serviram para caracterização do concreto. A variável de entrada foi o teor de aditivo incorporador de ar e as variáveis de saída, ou seja, o que foi medido, foram:

- No estado fresco:

- massa específica do concreto;
- teor de ar; e
- composição real do concreto.

- No estado endurecido:

- resistência à compressão normal;
- resistência ao impacto de corpo mole;
- resistência ao impacto de corpo duro;
- resistência ao choque térmico;
- módulo de elasticidade; e
- massa específica do concreto.

---

O grupo amostral das paredes de concreto foi formado pela construção de protótipos de casas. A proposta foi a construção de 3 protótipos que foram compostos por 4 paredes de concreto com dimensões de 3,00 m x 2,72 m x 0,10 m. Desse modo foi confeccionado um protótipo utilizando o concreto referência (sem aditivo incorporador de ar) e mais 2 protótipos com as dimensões estipuladas, com teores de 50% e 100% do limite máximo do aditivo (incorporador de ar) no concreto. Esse grupo amostral foi utilizado para os ensaios de impactos de corpo mole e corpo duro.

O outro grupo amostral, para ensaio de exposição ao calor e ao choque térmico foi obtido pela confecção de fôrmas com madeira e moldagem de 9 painéis de concreto nas dimensões de 1,10 m x 1,10 m x 0,10 m, sendo 3 painéis utilizando o concreto referência (sem aditivo incorporador de ar) e mais 6 painéis com as dimensões citadas, 3 painéis com teores de 50% e 3 painéis com 100% do limite máximo do aditivo (incorporador de ar) no concreto. A concretagem dos painéis também foi realizada na vertical.

Também dentro do processo de fabricação dos protótipos com paredes de concreto foi prevista a moldagem de 24 corpos de prova cilíndricos com 10 cm x 20 cm, de cada tipo de concreto. Esses corpos de prova foram utilizados para caracterização do concreto endurecido através de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

A composição real do concreto no estado fresco foi obtida pela separação dos agregados mediante a lavagem e peneiramento do concreto. Esse procedimento consistiu na lavagem de parte do volume de concreto utilizado nos ensaios de massa específica (ABNT NBR 9833:2008) e de teor de ar (ABNT NM 47:2002) do concreto fresco. Essa lavagem do concreto fresco foi feita utilizando as peneiras de 4,76 mm e 150  $\mu\text{m}$ , dessa maneira foi possível determinar a quantidade de agregado graúdo e miúdo presente no referido volume de concreto, bem como a quantidade de pasta. O intuito foi obter de um determinado volume de concreto, a massa específica no estado fresco, o teor de ar, a massa específica no estado endurecido, a resistência à compressão aos 28 dias de idade e a composição real do concreto. Esse procedimento foi feito para cada tipo de concreto utilizado nos protótipos.

A Figura 4.1 apresenta um resumo das etapas do programa experimental através de um fluxograma.

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas do programa experimental



Fonte: Autor

### 4.3 PREPARAÇÃO DO CONJUNTO AMOSTRAL

Para a moldagem dos concretos em paredes (3,00 m x 2,72 m x 0,10 m), em painéis (1,10 m x 1,10 m x 0,10 m), e em corpos de prova cilíndricos (0,10 m x 0,20 m), conforme, respectivamente, as prescrições da ABNT NBR 16055:2012 e ABNT NBR 5738:2008 foram empregados os materiais com as características apresentadas na Tabela 4.1. A massa dos materiais foi fornecida pela usina de concreto.

Tabela 4.1 – Características e materiais empregados na fabricação do concreto

Materiais/Informações	Características	Massa dos matérias (kg/m <sup>3</sup> )	Traço em massa
<b>Aglomerante</b>	Cimento CP V	320	1
<b>Agregado miúdo</b>	Pó de brita+Areia natural de rio	570+520	3,4
<b>Agregado graúdo</b>	Brita basáltica	820	2,56
<b>Fibra de polipropileno</b>		0,3	
<b>Aditivo superplastificante</b>		2,7	
<b>Água</b>	Rede pública de abastecimento	200	0,62
<b>Aditivo incorporador de ar</b>	Micro Air® FC		
<b>Cura</b>	Úmida		
<b><math>f_{ck}</math></b>	20 MPa		
<b>Ensaio de abatimento do concreto</b>	200 ± 30 mm		

Fonte: Autor

Para uma melhor homogeneidade e execução dos protótipos foi utilizado concreto usinado com  $f_{ck} = 20$  MPa e abatimento com  $(200 \pm 30)$  mm para o concreto sem ar incorporado. O concreto foi produzido na usina e transportado até o laboratório na FECIV-UFU por caminhão betoneira, onde o aditivo incorporador de ar foi adicionado e misturado ao concreto utilizando o próprio caminhão betoneira por 10 min, e posteriormente, lançado nas fôrmas das paredes por meio de bomba lança. Exceto para o concreto sem aditivo, previamente à incorporação do aditivo, era retirado material para a caracterização do concreto no estado fresco e no estado endurecido, somente depois era adicionado o aditivo e, novamente era retirado material para a caracterização do concreto.

A usina forneceu o concreto com o cimento Portland CP V em função de sua grande utilização em paredes de concreto em obras na cidade de Uberlândia e região, ou seja, utilizou-se o tipo de concreto que estava sendo fornecido para execução de residências em parede de concreto. A caracterização do cimento consistiu na realização de ensaios de massa específica, área superficial específica, água da pasta de consistência normal, tempos de início e fim de pega, e resistência à compressão, nos quais, os resultados foram fornecidos pela usina de concreto. Da mesma forma, os agregados utilizados no concreto também foram caracterizados pela usina responsável pela produção do concreto.

---

O aditivo incorporado de ar utilizado foi o Micro Air® FC produzido a base de resinas sintéticas pela BASF. Ele é um aditivo líquido avermelhado, livre de cloretos, para concretos e argamassas que introduz micro bolhas de ar, e é recomendado para uso em: concretos que sofrerão ciclos de gelo-degelo, concretos leves e concretos usinados. De acordo com o fabricante o aditivo deve ser adicionado após o final da mistura dos componentes do concreto e deve ser utilizado nas dosagens de 0,05% a 1,0% sobre o peso de cimento. O aditivo Micro Air® FC foi adicionado ao concreto dentro do caminhão betoneira que também realizou a mistura do mesmo por 10 min, posteriormente, foi realizado o ensaio de determinação do teor de ar em concreto fresco (ABNT NM 47:2002).

#### **4.3.1 PROTÓTIPOS DE CASAS COM PAREDES DE CONCRETO**

Os ensaios de verificação da resistência ao impacto de corpo mole e de corpo duro foram realizados nas paredes dos protótipos de casas. O projeto desse protótipo foi feito com base no projeto de casas com paredes de concreto executadas em residenciais. A Figura 4.2 ilustra uma visão 3D dos protótipos.

Figura 4.2 – Visão 3D dos protótipos



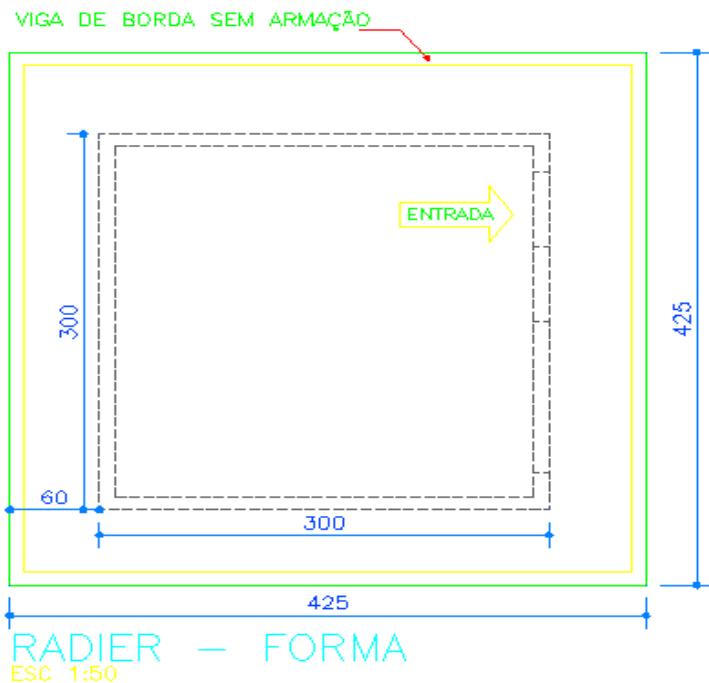
Fonte: Autor

O projeto foi desenvolvido de forma a representar as condições reais da utilização de concreto com ar incorporado e permitir a avaliação do sistema construtivo através dos ensaios de desempenho já mencionados nessa dissertação. A fundação, as paredes e as armaduras que foram utilizadas são similares às empregadas em unidades residenciais em execução.

Basicamente, o projeto do protótipo se resume em:

- Radier de 4,25 m x 4,25 m x 0,08 m (FIGURA 4.3);

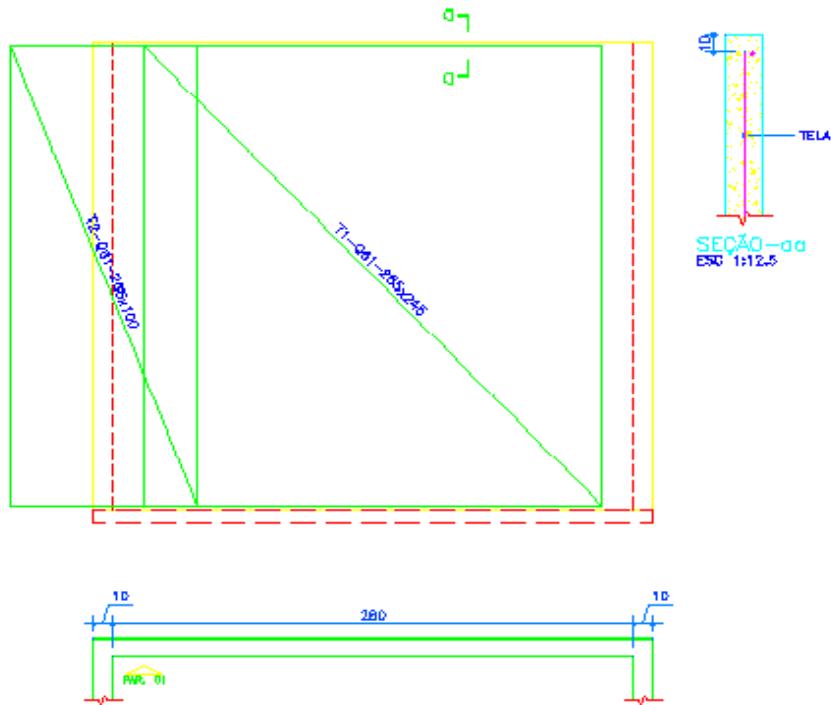
Figura 4.3 – Radier de concreto armado



Fonte: Autor

- Parede 01, 02 e 03 de 3,00 m x 2,72 m x 0,10 m (FIGURA 4.4);

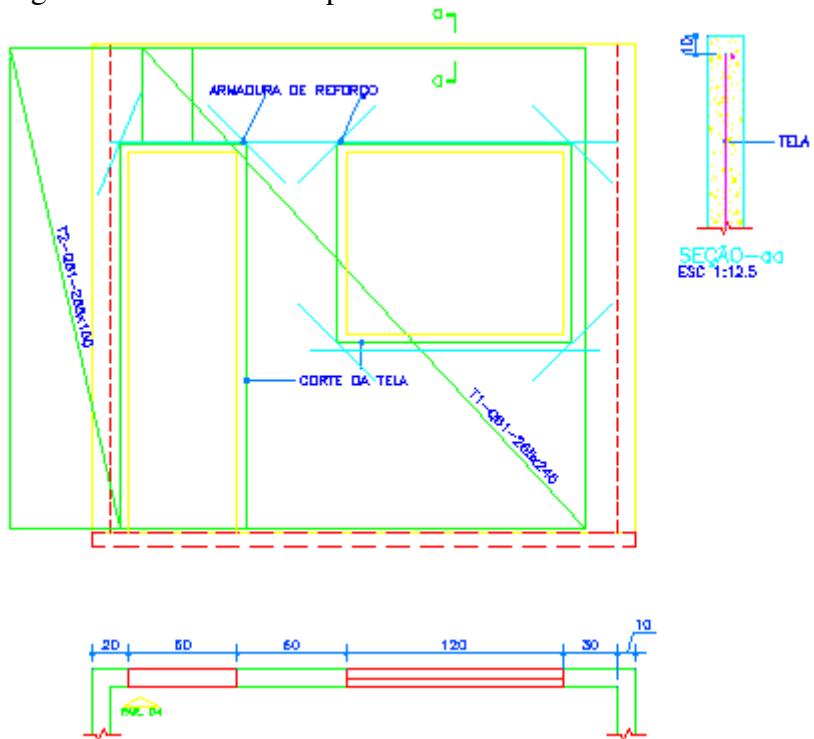
Figura 4.4 – Desenho das paredes 01, 02 e 03 com detalhe das armaduras



Fonte: Autor

- Parede 04 de 3,00 m x 2,72 m x 0,10 m com uma abertura para porta de 0,60 m x 2,10 m e uma janela de 1,20 m x 1,00 m (FIGURA 4.5);

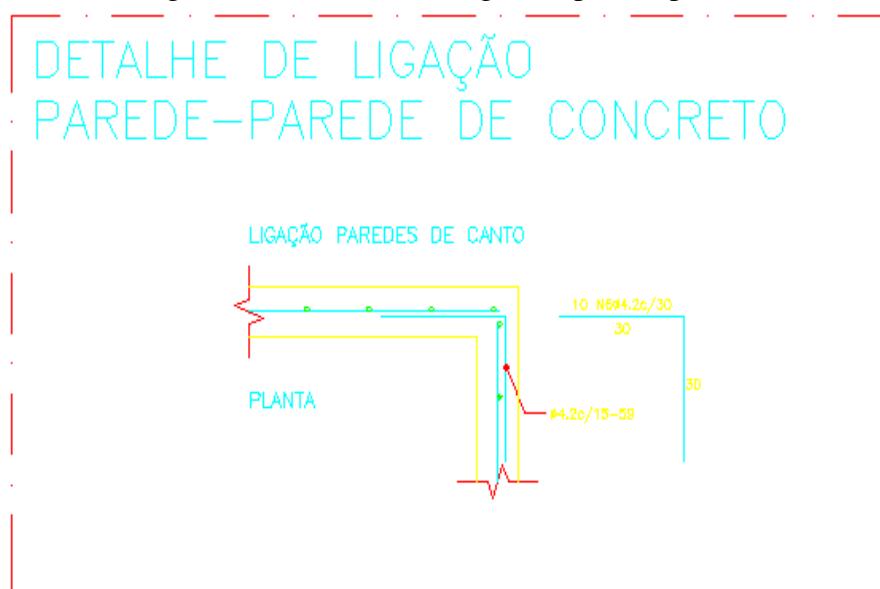
Figura 4.5 – Desenho da parede 04 com detalhe das armaduras



Fonte: Autor

No projeto foi especificado a utilização de tela Q61 (aço CA-60, 3,40 mm, malha 15 cm x 15 cm), no radier e nas paredes, e também barras de aço CA-50 (diâmetro de 8 mm) para reforço nos vãos das esquadrias. A ligação entre as paredes e o radier foi por contato por meio do peso próprio das paredes e na ligação parede-parede com a própria tela de aço Q61. A Figura 4.6 ilustra detalhe das ligações parede-parede. Para a concretagem das paredes utilizou-se fôrmas metálicas.

Figura 4.6 – Detalhe das ligações parede-parede



Fonte: Autor

De acordo com o projeto e as condições encontradas, a execução dos protótipos das casas ocorreu da seguinte maneira:

1. Execução da fundação tipo radier: Foi realizado a limpeza e nivelamento do terreno com retroescavadeira, locação e nivelamento do radier com teodolito e estacas de madeira, montagem das fôrmas utilizando sarrafos, aplicação de lastro de brita, impermeabilização através de lona plástica, posicionamentos da tela soldada Q61 com o auxílio de espaçadores (treliças de aço) e lançamento do concreto usinado através de caminhão betoneira (bica). Após o fim de pega do concreto foi realizado cura úmida (aspersão de água) por 14 dias. A Figura 4.7 ilustra algumas etapas da execução dos radiers.

---

Figura 4.7 – Execução da fundação tipo radier

a) Nivelamento do terreno e montagem das fôrmas



b) Posicionamento da lona plástica, espaçadores e tela soldada



---

c) Concretagem da fundação tipo radier

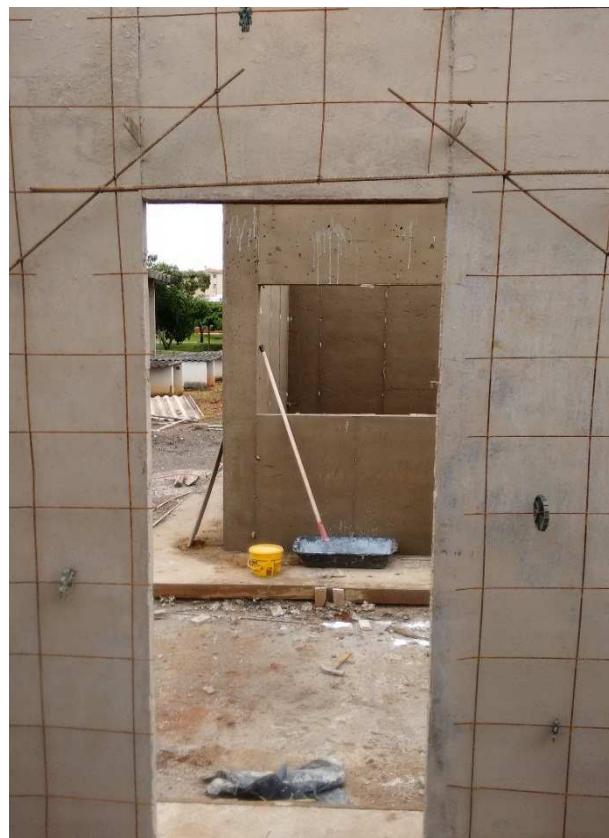


Fonte: Autor

2. Posicionamento da armadura das paredes: A armadura utilizada foi a tela soldada Q61 com dimensões de 2,45 m x 6,00 m, malha de 15 cm x 15 cm e fios com diâmetro de 3,8 mm, e também barras de aço CA50 de 6,3 mm e 8 mm. O posicionamento das telas foi realizado com o auxílio de espaçadores circulares de plástico, que garantia o espaçamento entre as fôrmas e o cobrimento de concreto nas armaduras, prevenindo a corrosão do aço. As barras de aço foram utilizadas como reforço nos vãos da porta e da janela, como ilustra a Figura 4.8. Ressaltando que não foram feitas instalações hidrossanitárias e elétricas.

---

Figura 4.8 – Reforço da armadura no vão da porta



Fonte: Autor

3. Montagem das fôrmas metálicas: Foram utilizados painéis de alumínio com altura de 2,72 m e largura variando de 0,2 m a 0,6 m, com o uso de três elementos, os pinos, as cunhas e os espaçadores internos (faquetas), as fôrmas foram travadas entre si e garantido o espaçamento entre as faces das fôrmas conforme a espessura prevista, além de resistir ao esforço proveniente da pressão do concreto. Também foi utilizado uma bainha poliestireno para encamisar o espaçador interno, facilitando sua remoção da parede moldada. Outros detalhes importantes foram a aplicação de desmoldante nos painéis antes da montagem dos mesmos e o posicionamento de alinhadores horizontais nas paredes para garantir a ausência de deformações e impedir o desaprumo. A Figura 4.9 ilustra a montagem das fôrmas metálicas.

---

Figura 4.9 – Montagem das fôrmas metálicas

a) Travamento das fôrmas – Pino e cunha metálicos



b) Posicionamento das fôrmas internas



---

c) Fôrmas prontas para concretagem



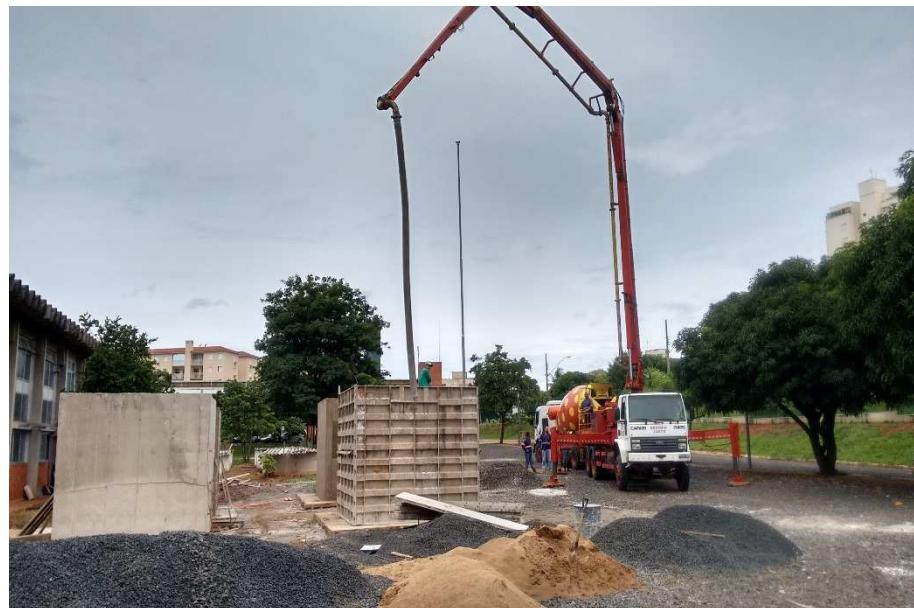
Fonte: Autor

4. Concretagem: A fim de assegurar a geometria conforme o projeto, antes do lançamento do concreto, as fôrmas foram devidamente conferidas, analisando as dimensões e posições (prumo, alinhamento, nivelamento). Na concretagem de cada protótipo, foram utilizados 3 m<sup>3</sup> de concreto usinado auto adensável e utilizou-se um caminhão betoneira e um caminhão bomba lança, conforme ilustrado na Figura 4.10.

---

Figura 4.10 – Concretagem de um dos protótipos

a) Concretagem através do caminhão bomba lança



b) Protótipos concretados



Fonte: Autor

5. Retirada das fôrmas: Após 24 h da concretagem as fôrmas e os espaçadores internos (faquetas) foram retiradas e preparadas para serem usadas novamente. Como ocorre na maioria das obras que utilizam esse sistema construtivo, não foi feito nenhum tipo específico de cura.

#### 4.3.2 PAINÉIS DE CONCRETO

Para realização dos ensaios de verificação da exposição ao calor e ao choque térmico foram utilizados painéis de concreto de 1,10 m x 1,10 m x 0,10 m que foram moldados juntamente com as paredes de concreto utilizando fôrmas de compensado plastificado. A produção dos painéis seguiu basicamente o mesmo princípio das paredes de concreto, montagem das fôrmas, aplicação do desmoldante, posicionamento da armadura juntamente com os espaçadores, e a concretagem. Diferente das paredes, o concreto usinado dos painéis foram lançados manualmente com uso de baldes, porém manteve a concretagem na posição vertical.

Infelizmente ao concretar os painéis, alguns tiveram problemas no travamento das fôrmas de madeira compensada e sofreram variações na espessura. Dessa forma, o número de amostras de painéis com as mesmas dimensões diminuíram, ficando um total de 9 painéis, sendo 3 painéis para cada tipo de concreto.

A Figura 4.11 ilustra um dos nove painéis moldados no processo de cura ao ar livre.

Figura 4.11 – Painel de concreto para ensaio de verificação da exposição ao calor e ao choque térmico.



Fonte: Autor

### **4.3.3 CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS**

A caracterização do concreto endurecido foi realizada através do ensaio de resistência à compressão conforme ABNT NBR 5739:2007 e o ensaio de módulo de elasticidade seguiu a ABNT NBR 8522:2008.

Esses ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm. Para cada tipo de concreto foi moldado um total de 24 cp's durante a concretagem dos protótipos das casas. O adensamento do concreto auto adensável foi feito de forma manual, em uma camada e 15 golpes, de acordo a ABNT NBR 5738:2015. O acabamento da face superior dos corpos de prova foi feito com colher de pedreiro. Todos os corpos de prova cilíndricos moldados foram mantidos na câmara úmida até a desmoldagem e logo após foram submetidos à cura submersa até sua utilização, possibilitando dessa maneira a uniformização da cura.

### **4.4 MÉTODOS DE ENSAIO**

Os concretos endurecidos foram caracterizados pelos ensaios de módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) e resistência à compressão ( $f_c$ ) nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias. Também foram analisados pelos ensaios de desempenho de verificação da resistência ao impacto de corpo mole e de corpo duro, e de verificação da exposição à ação do calor e ao choque térmico em diferentes idades.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Uberlândia utilizando os aparelhos desenvolvidos de acordo com a ABNT NBR 15575:2013 e uma prensa eletromecânica (EMIC).

---

#### 4.4.1 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE

O ensaio para a verificação da resistência ao impacto de corpo mole em um sistema de vedação vertical interno e externo – SVVIE, foi realizado em paredes de concreto com e sem ar incorporado de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 15575-4:2013 e a ABNT NBR 11675:1990 Versão Corrigida: 2011, utilizando os seguintes equipamentos, já citados no item 2.3.2 dessa dissertação:

- Estrutura metálica vertical composta por duas torres e duas vigas metálicas formando o pórtico para sustentação do corpo mole e desenvolvimento do sistema pendular, conforme ilustra a Figura 4.12;

Figura 4.12 – Estrutura metálica destinada a sustentação do corpo mole e sistema pendular



Fonte: Autor

- Saco cilíndrico de couro, com diâmetro aproximado de 350 mm e altura aproximada de 900 mm, com massa total de 40 kg, e contendo no seu interior areia seca e serragem para ser usado como corpo mole (FIGURA 4.13);

Figura 4.13 – Saco cilíndrico utilizado como corpo mole



Fonte: Autor

- Sistema pendular constituído de um suporte com altura superior à altura da parede do protótipo a ser ensaiado e um fio de aço destinado à sustentação do saco cilíndrico;
- Dispositivo para registro dos deslocamentos transversais do corpo de prova ensaiado (FIGURA 4.14);

Figura 4.14 – Dispositivo utilizado nos ensaios para registro dos deslocamentos



Fonte: Autor

- Paquímetro de profundidade com resolução igual ou inferior a 0,1mm.

A Figura 4.15 ilustra o momento do ensaio de corpo mole realizado nas paredes de concreto dos protótipos.

Figura 4.15 – Execução de ensaio de corpo mole



Fonte: Autor.

O ensaio consistiu em submeter a face ensaiada da parede de concreto a seis impactos com o corpo mole, com as características segundo a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Impactos de corpo mole para vedações verticais externas de casas térreas, com função estrutural.

Sistema	Impacto	Energia de impacto (J)	Critérios de desempenho
Vedações verticais com função estrutural para casas térreas	Impacto externo (acesso externo do público)	720	Não ocorrência de ruína (estado-limite último)
		480	
		360	
		240	Não ocorrência de falhas (estado-limite de serviço) Limitação dos deslocamentos horizontais: $d_h \leq h/250$ e $d_{hr} \leq h/1250$
		180	Não ocorrência de falhas (estado-limite de serviço)
		120	
		480	Não ocorrência de ruína (estado-limite último)
		240	
		180	Não ocorrência de falhas (estado-limite de serviço)
	Impacto interno	120	Não ocorrência de falhas (estado-limite de serviço) Limitação dos deslocamentos horizontais: $d_h \leq h/250$ e $d_{hr} \leq h/1250$

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15575-4:2013

---

Foram feitas três leituras junto ao medidor de deslocamentos a cada impacto sob a face da parede de concreto, a primeira é a leitura inicial, a segunda é a leitura instantânea, (registrada no momento do impacto) e a terceira é a leitura efetuada após 3 minutos do impacto.

Importante ressaltar que após cada impacto, a parede foi minuciosamente vistoriada, observando em ambas as faces a presença de falhas, que foram registradas junto ao resultado do ensaio.

#### **4.4.2 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO**

O ensaio para a verificação da resistência ao impacto de corpo duro em um sistema de vedação vertical interno e externo – SVVIE, foi realizado em paredes de concreto com e sem ar incorporado de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 15575-4:2013 e a ABNT NBR 11675:1990 Versão Corrigida: 2011, utilizando os seguintes equipamentos, já citados na seção 2.4.2 dessa dissertação:

- Estrutura metálica vertical (mesma usada no ensaio de impacto do corpo mole conforme ilustra a Figura 4.16), apta a sustentar os corpos duros e o sistema pendular.

Figura 4.16 – Estrutura metálica vertical utilizada no ensaio de impacto de corpo duro



Fonte: Autor

- Duas esferas maciças de aço para serem usadas como corpo duro (FIGURA 4.17):
  - Esfera com diâmetro de 50 mm e massa de 0,5 kg;
  - Esfera com diâmetro de 63 mm e massa de 1,0 kg.

Figura 4.17 – Esferas de aço utilizadas como corpo duro



Fonte: Autor

- Sistema pendular constituído de um suporte com altura superior à altura das paredes de concreto dos protótipos ensaiados e um fio de aço destinado à sustentação das esferas maciças de aço.
- Dispositivo para registro dos deslocamentos transversais do corpo de prova ensaiado (mesmo utilizado no ensaio de impacto de corpo mole).
- Paquímetro de profundidade com resolução igual ou inferior a 0,1 mm.

O ensaio consistiu em submeter a face ensaiada da parede de concreto a duas séries de impactos. A primeira série foi composta por 10 impactos sucessivos, em pontos aleatórios e distintos, provocados pela esfera de aço de 0,5 kg, que saiu do repouso com uma altura diferencial de 0,75 m, exerceu uma trajetória pendular e se chocou com a superfície da parede, com energia de impacto de 3,75 J. A segunda série foi composta por 10 impactos sucessivos, sendo que cada impacto foi aplicado em um ponto diferente e sem repiques, provocados pela esfera de aço de 1,0 kg, que saiu do repouso com uma altura diferencial de 2,00 m, exerceu uma trajetória pendular e se chocou com a superfície da parede, com energia de impacto de 20 J (FIGURA 4.18).

---

Figura 4.18 – Execução do ensaio de impacto de corpo duro (esfera de 1,0 kg).



Fonte: Autor.

Foram determinadas as medidas das profundidades das mossas que surgiram na superfície da parede ensaiada, como ilustra a Figura 4.19.

Figura 4.19 – Mossas que surgiram na superfície das paredes ensaiadas



Fonte: Autor

A Tabela 4.3 sintetiza as ações a serem seguidas nesse ensaio.

Tabela 4.3 – Impactos de corpo duro para vedações verticais externas de casas térreas, com ou sem função estrutural.

Sistema	Impacto	Energia de impacto (J)	Critérios de desempenho
<b>Vedações verticais com ou sem função estrutural</b>	Impacto externo (acesso externo do público)	3,75	Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço
		20	Não ocorrência de ruína, caracterizada por ruptura ou traspassamento (estado-limite último)
		2,5	Não ocorrência de falhas que comprometam o estado-limite de serviço
	Impacto interno	10	Não ocorrência de ruína, caracterizada por ruptura ou traspassamento (estado-limite último)

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15575-4:2013

Também foram feitas três leituras junto ao medidor de deslocamentos a cada impacto sob a face da parede de concreto, a primeira foi a leitura inicial, a segunda a leitura instantânea (registrada no momento do impacto) e a terceira a leitura efetuada após 3 minutos do impacto.

Importante ressaltar que após cada impacto, a parede foi minuciosamente vistoriada, observando em ambas as faces a presença de falhas ou qualquer tipo de alteração.

#### **4.4.3 VERIFICAÇÃO DA EXPOSIÇÃO À AÇÃO DO CALOR E AO CHOQUE TÉRMICO**

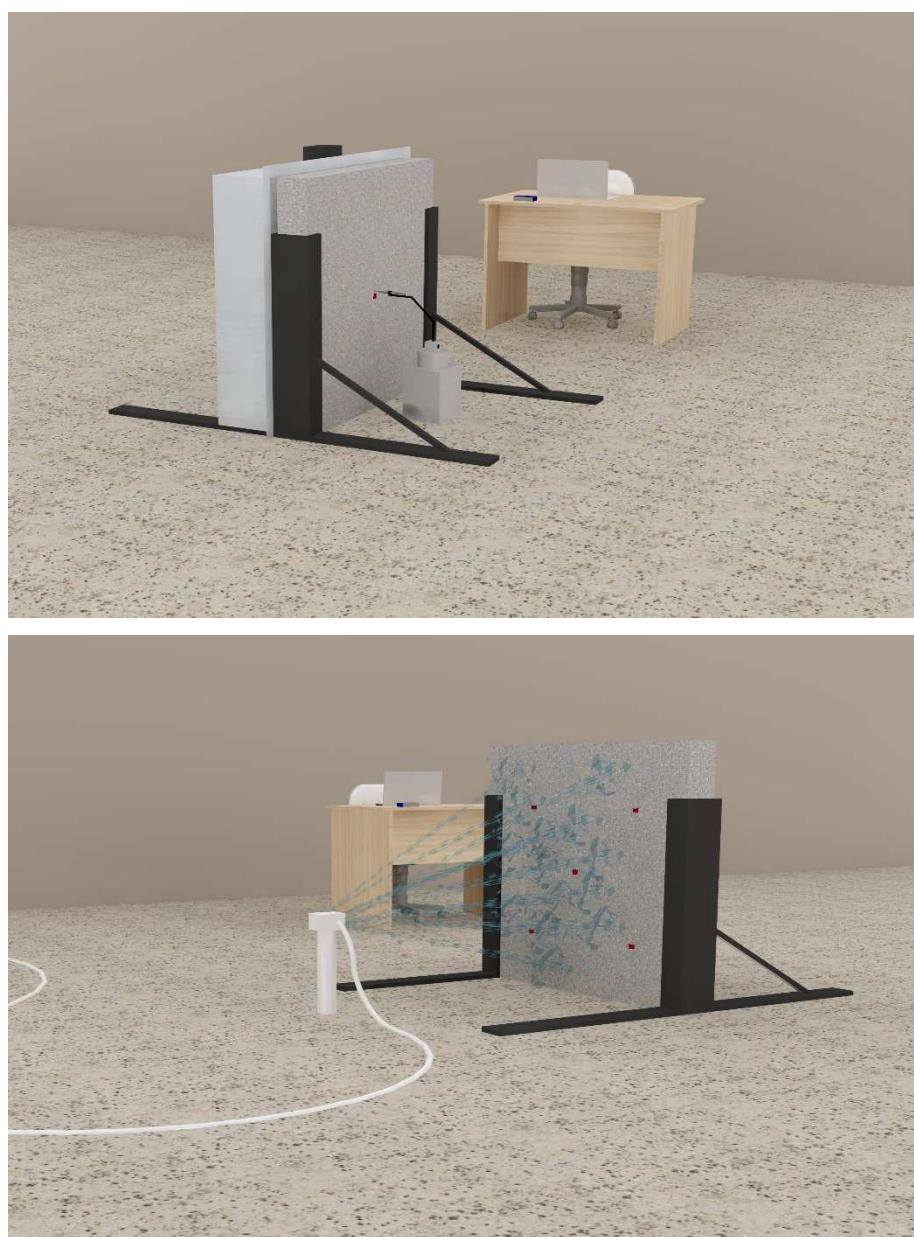
Os painéis de concreto que foram moldados juntamente com as paredes dos protótipos foram submetidos a ensaios para a verificação de seu comportamento quando exposto à ação de calor e ao choque térmico. Esse ensaio foi realizado segundo a diretriz da ABNT NBR 15575-4:2013 e utilizando os seguintes equipamentos (citados na seção 3.4.1 dessa dissertação):

- Painel radiante capaz de fornecer calor em quantidade tal que a face externa da parede atinja temperatura igual a  $(80 \pm 3) ^\circ\text{C}$ ;
- Dispositivo para aspersão de água sobre a face externa do corpo de prova;

- 
- Termopares e registrador das temperaturas superficiais da parede;
  - Medidor de deslocamento de haste, com resolução de 0,02 mm;
  - Dispositivo para fixação do corpo de prova, de forma a deixá-lo simplesmente apoiado em seus bordos inferior e superior.

A Figura 4.20 ilustra um esquema com todos os aparelhos utilizados para a realização do ensaio.

Figura 4.20 – Esquema do ensaio de verificação da exposição a ação do calor e ao choque térmico (3D).



Fonte: Autor

---

O ensaio consiste em submeter a face externa de pelo menos dois corpos de prova do sistema de vedação vertical interno e externo (SVVIE), os painéis de concreto com e sem ar incorporado, a 10 ciclos sucessivos de calor e resfriamento em cada um deles. Os ciclos necessitam de equipamentos capazes de fornecer calor, e posteriormente efetuar um choque térmico na mesma face da parede de concreto ensaiada através do resfriamento superficial por meio de aspersores de água.

A fonte de aquecimento utilizada no ensaio foi um forno modular do Laboratório de Estruturas e Materiais da FECIV-UFU com configuração para realizar o referido ensaio (FIGURA 4.21). O forno foi construído em chapas de aço inoxidável espessura 2 mm, isolamento de lã de rocha entre as chapas, e composto de 4 módulos com resistência tubular aletada, tubo e aletas em aço 1020, com 2 unidades com  $\varnothing$  11,2 x 400 mm - 630W- 220V em cada módulo, podendo atingir a temperatura máxima de 200° C.

Figura 4.21 – Fonte de calor para realização do ensaio



Fonte: Autor

---

O sistema utilizado no resfriamento foi um aspersor conectado a uma mangueira de 20 mm de diâmetro, conforme Figura 4.22, formando um jato uniforme e cuja a área de abrangência era igual a área do painel.

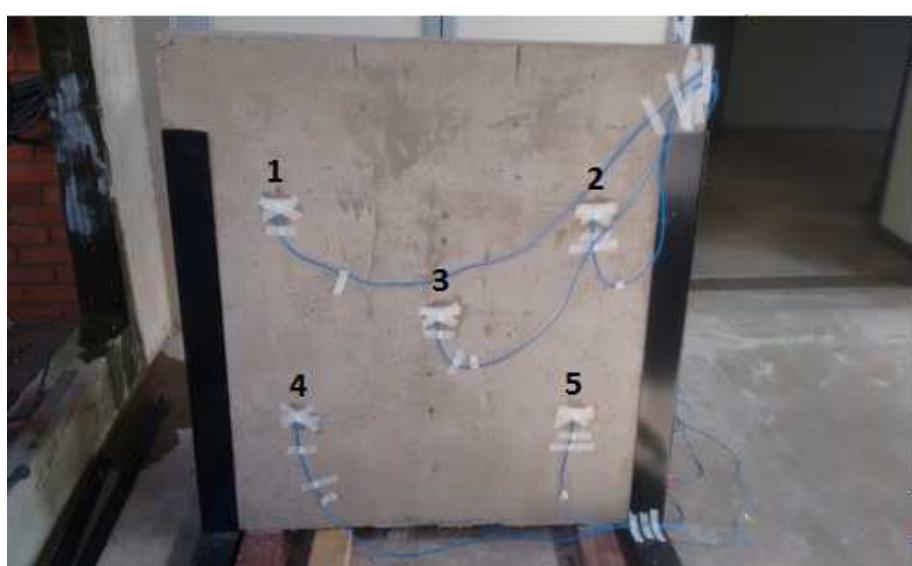
Figura 4.22 – Resfriamento do painel por aspersão de água.



Fonte: Autor

A parede de concreto foi instrumentada de modo a fornecer dados da verificação da temperatura e sua homogeneidade, bem como dados referentes aos deslocamentos ocorridos durante o ensaio. Na monitoração térmica, foram utilizados 6 termômetros com seus respectivos cabos e termopares, 5 deles foram posicionados na superfície analisada conforme Capítulo 3, seção 3.4.2 e um no centro da superfície oposta. (FIGURA 4.23)

Figura 4.23 – Posicionamento dos termopares



Fonte: Autor

---

Quanto à monitoração do deslocamento horizontal, foi utilizado um medidor de deslocamentos instalado no centro geométrico da área posterior estudada, conforme também já mencionado anteriormente, ilustrado na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Posicionamento do medidor de deslocamento e do termopar para monitoramento.



Fonte: Autor

Assim procedendo, em cada ciclo foram efetuadas cinco leituras por minuto nos termopares e no medidor de deslocamentos, destacando as leituras a 45 minutos da estabilização da temperatura superficial e as leituras logo após o resfriamento da superfície. Para finalizar o ciclo, foi efetuada uma inspeção visual, cuja ocorrência de falhas, ou seja, fissuras, trincas, descolamentos ou outras deteriorações em ambas as faces do corpo de prova analisado, informando tais ocorrências junto aos resultados.

#### **4.4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A determinação da resistência à compressão do concreto utilizado compreendeu a realização de dois ensaios para cada uma das idades, além dos dois resultados encontrados após o ensaio de módulo de elasticidade.

---

A regularização das faces de aplicação de carga dos corpos de prova (base e topo) foi feita com enxofre de acordo com o prescrito pela ABNT NBR 5738:2015 (FIGURA 4.25). O diâmetro utilizado para o cálculo da área da seção transversal foi determinado, com exatidão de  $\pm 0,1$  mm, pela média de dois diâmetros, medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo de prova.

Figura 4.25 – Corpos de prova com as faces regularizadas com enxofre.



Fonte: Autor

A carga aplicada durante o ensaio foi com velocidade de carregamento constante de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa /s e maneira continua e sem choques. A máquina usada foi a prensa servohidráulica da EMIC.

#### **4.4.5 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE INICIAL**

Dos quatro corpos de prova moldados para cada idade, dois corpos de prova foram ensaiados à compressão para determinar o nível de carregamento a ser aplicado no ensaio de módulo. Os outros corpos de prova foram centralizados nos pratos da prensa e os medidores de deformação posicionados de forma equidistantes dos extremos do corpo de prova para realizar o ensaio de módulo de elasticidade (FIGURA 4.26).

---

Sem especificar um tipo de instrumento em particular, a norma ABNT NBR 8522:2008, recomenda a utilização de instrumentos mecânicos, elétricos que possibilitem a realização do ensaio sem interferência dos operadores, com resolução de  $\pm 1 \times 10^{-3}$  mm e erro relativo máximo inferior a 1 %. Optou-se por utilizar a instrumentação *clip gage* devido a menor influência deste instrumento no resultado do ensaio.

Antes da realização dos ensaios, o diâmetro e a altura dos corpos de prova foram determinados com 0,1 mm de precisão. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 8522:2008.

Figura 4.26 – Ensaio de módulo de elasticidade do concreto em execução na prensa servohidráulica da EMIC no laboratório da FECIV – UFU



Fonte: Autor

---

# CAPÍTULO 5

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas e de desempenho dos concretos produzidos. Primeiramente, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para caracterização do concreto fresco, a saber, abatimento de tronco de cone, massa específica, teor de ar incorporado e composição do concreto. Posteriormente, serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios em corpos de prova do concreto no estado endurecido de resistência à compressão e módulo de elasticidade e resultados dos ensaios de desempenho nas paredes e painéis de concreto. Em seguida, será feita uma análise dos valores obtidos experimentalmente em relação a cada situação proposta.

A nomenclatura adotada para apresentação dos resultados é composta pelo teor de aditivo incorporador de ar adicionado ao concreto utilizado nos protótipos (C0%, C0,5%, C1%) e nos painéis (P0%, P0,5%, P1%).

### 5.2 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### 5.2.1 ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

Os valores dos abatimentos para os concretos usinados utilizados são apresentados na Tabela 5.1. Salienta-se que, embora a nomenclatura inclua o percentual de aditivo, os ensaios foram realizados antes da incorporação do aditivo, ou seja, nas mesmas condições que chegaram da usina.

Tabela 5.1 – Abatimentos dos concretos estudados (sem aditivos)

Concreto	Abatimento (mm)
C0% (protótipo 1)	185
C0% (protótipo 2)	200
C0% (protótipo 3)	200

Fonte: Autor

Os valores dos abatimentos apresentados indicam que ficaram dentro do esperado ( $200 \pm 30$ ) mm.

### 5.2.2 MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO

As massas específicas dos concretos estudados são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Massa específica dos concretos estudados

Concreto	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	
	Sem aditivo	Com aditivo
C0% (protótipo 1)	2,31	-
C0,5% (protótipo 2)	2,34	2,15
C1% (protótipo 3)	2,28	2,04

Fonte: Autor

Nota-se pouca variação na massa específica do concreto fresco utilizado nos protótipos com média de 2,31 kg/dm<sup>3</sup> e um desvio relativo máximo de 1,3 %. A redução das massas específicas com a adição do aditivo incorporador de ar foi de 8,12 %, com 0,5 % de aditivo, e 10,53 % com 1% de aditivo.

### 5.2.3 TEOR DE AR NO CONCRETO FRESCO

O teor de ar no concreto fresco foi determinado de acordo com a ABNT NM 47:2002 pelo método pressométrico. A Figura 5.1 ilustra o equipamento utilizado no momento do ensaio.

Figura 5.1 – Equipamento utilizado no ensaio de determinação do teor de ar em concreto fresco



Fonte: Autor

Os resultados de teor de ar no concreto fresco são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Teor de ar no concreto fresco

Concreto	Teor de ar (%)	
	Sem aditivo	Com aditivo
<b>C0% (protótipo 1)</b>	1,29	-
<b>C0,5% (protótipo 2)</b>	1,95	9,5
<b>C1% (protótipo 3)</b>	1,25	14,5

Fonte: Autor

O teor de ar no concreto fresco sem aditivo se manteve na faixa de 1% a 2%, porém com a adição do aditivo incorporador de ar, se descontado o teor de ar sem aditivo, houve um

---

aumento de 7,55% com 0,5% de aditivo (em relação consumo de cimento), e 13,25% com 1,0% de aditivo.

#### 5.2.4 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

De acordo com o método adotado para determinação da composição do concreto no estado fresco a Tabela 5.4 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 5.4 – Composição do concreto no estado fresco

Tipo de Concreto	Composição do concreto							
	Vol. (dm <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Teor de ar (%)	Massa agregado miúdo (kg)	Massa agregado graúdo (kg)	Volume material (dm <sup>3</sup> )	Massa espec. material (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa da pasta (kg)
<b>C0% (1)</b>	7,645	17,65	1,29	6,33	6,11	7,55	2,34	3,99
<b>C0,5% (2)</b>	7,645	16,45	9,5	3,54	7,05	6,92	2,38	2,48
<b>C1% (3)</b>	7,645	15,50	14,5	5,97	4,73	6,54	2,37	4,23

Fonte: Autor

Foi realizada somente uma determinação para cada tipo de concreto e verificou-se que, apesar das massas dos agregados encontradas não mantiveram uma correlação com o traço. Desta forma, a composição da amostra não manteve a proporção nominal da mistura. Apesar disto, as massas específicas dos materiais (sem ar) ficaram próximas.

#### 5.3 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

As duas propriedades do concreto endurecido que serão abordadas neste item serão resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Como já mencionado, o interesse nessas propriedades é para caracterização e comparação com os resultados dos ensaios de desempenho.

---

### 5.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à compressão dos concretos utilizados na moldagem das paredes e painéis são apresentados na Tabela 5.5.

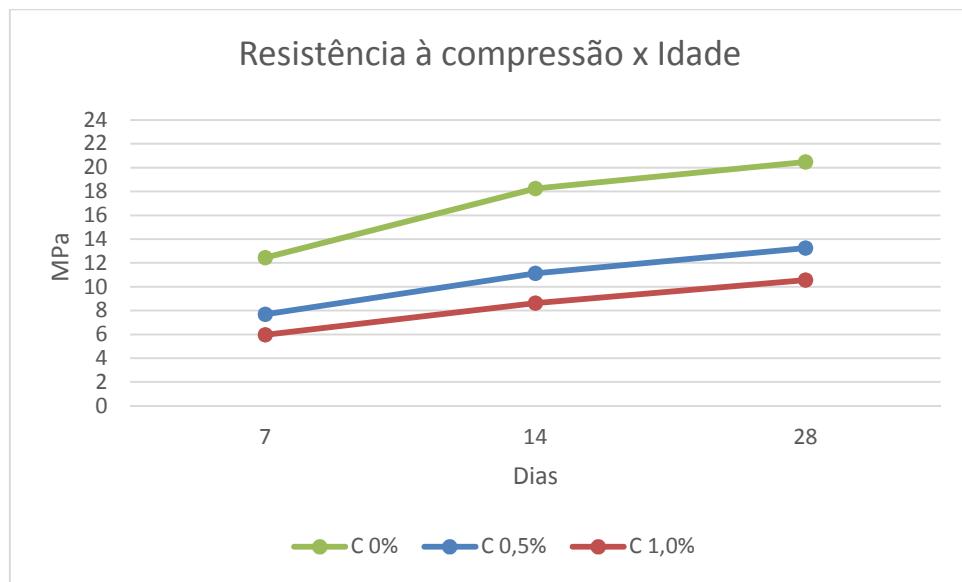
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos utilizados na moldagem das paredes e painéis.

Protó-tipo	Teor de Aditivo (%)	Teor de ar (%)	Idade (dias)	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	CP 3 (MPa)	CP 4 (MPa)	Média (MPa)
1	0,0	1,29	7	11,82	13,16	12,80	12,00	12,45
			14	16,6	22,82	16,70	16,90	18,26
			28	20,82	19,10	21,70	20,30	20,48
2	0,5	9,50	7	7,55	7,57	7,70	7,90	7,68
			14	11,12	10,91	11,30	11,20	11,13
			28	12,87	13,22	14,00	12,90	13,25
	0,0	1,95	28	20,17	20,59	19,20	20,30	20,07
3	1,0	14,50	7	6,06	5,65	5,90	6,20	5,95
			14	8,82	8,50	8,80	8,40	8,63
			28	10,88	10,66	10,70	10,00	10,56
	0,0	1,25	28	17,38	16,30	16,20	18,50	17,10

Fonte: Autor

A Figura 5.2 ilustra a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos concretos utilizados na confecção dos grupos amostrais.

Figura 5.2 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos concretos.



Fonte: Autor

A análise dos resultados indica que houve uma diminuição, conforme esperada, nos valores da resistência à compressão, quando houve o aumento do teor de ar no concreto. Comparando os resultados aos 28 dias, houve uma redução de 34% no concreto C0,5% e de 38% no concreto C1,0%. Porém, deve-se considerar que o concreto antes da adição do aditivo também teve uma diminuição, infelizmente, não foram realizados ensaios suficientes no concreto que permitisse justificar essa variação.

### 5.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados encontrados para os ensaios de módulo de elasticidade realizados nos concretos utilizados para moldagem das paredes e painéis.

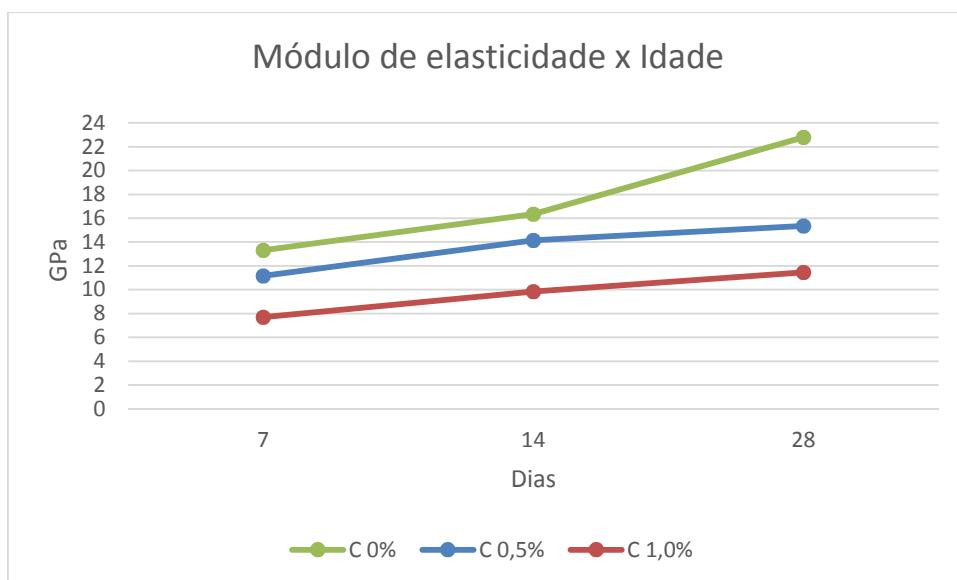
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos concretos utilizados na moldagem das paredes e painéis

Protótipo	Teor de Aditivo (%)	Idade (dias)	CP 1 (GPa)	CP 2 (GPa)	Média (GPa)
1	0,0	7	15,30	11,30	13,30
		14	14,60	18,10	16,35
		28	20,80	24,80	22,80
2	0,5	7	11,10	11,20	11,15
		14	14,10	14,20	14,15
		28	16,60	14,10	15,35
	0,0	28	18,00	20,00	19,00
3	1,0	7	7,80	7,60	7,70
		14	10,60	9,10	9,85
		28	10,80	12,10	11,45
	0,0	28	14,70	16,60	15,65

Fonte: Autor

A Figura 5.3 ilustra a evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo dos concretos utilizados na confecção dos grupos amostrais.

Figura 5.3 – Evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo dos concretos utilizados.



Fonte: Autor

Também conforme esperado, a análise dos resultados indica uma redução nos valores de módulo de elasticidade com o aumento do teor de ar no concreto. Comparando os resultados aos 28 dias, houve uma redução de 19% no concreto C0,5% e de 27% no concreto C1,0%. Porém, deve-se considerar que o concreto (C1,0%) antes da adição do aditivo também teve uma diminuição, infelizmente, não foram realizados ensaios suficientes no concreto que permitisse justificar essa variação.

## 5.4 ENSAIOS DE DESEMPENHO

### 5.4.1 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE

As Tabelas 5.7 apresenta os resultados dos ensaios de impacto de corpo mole das paredes de cada protótipo. Nas Tabelas 5.7, a primeira é a leitura inicial, a segunda é a leitura instantânea, (registrada no momento do impacto) e a terceira é a leitura efetuada após 3 minutos do impacto. Os gráficos apresentados na Figura 5.4 foram gerados com a leitura instantânea.

Tabelas 5.7 – Resultados dos ensaios de impacto de corpo mole nas paredes dos protótipos, impactos externos.

Energia (J)	Altura (m)	Deslocamentos (mm) - Paredes 1			Ocorrências	Requisitos da ABNT
		Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3		
120	0,30	-0,0490	0,0002	0,0339	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0214	0,0473	0,1120		
		-0,0484	-0,0068	0,0328		
180	0,45	-0,0002	-0,0139	-0,0003	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0678	0,0820	0,1065		
		-0,0160	0,0081	0,0359		
240	0,60	0,0004	-0,0123	0,0006	Nenhuma	Não ocorrência de falhas $d_h \leq h/125$ ; $d_{hr} \leq h/625$
		0,0973	0,1161	0,1460		
		0,0107	-0,0007	0,0426		
360	0,90	0,0000	-0,0002	-0,0040	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0988	0,1388	0,1500		

		0,0477	-0,0016	0,0212		
480	1,20	0,0002	-0,0143	-0,0207	Nenhuma	Não ocorrência de ruína ou ruptura
		0,1189	0,1482	0,1773		
		0,0088	0,0078	0,0172		
720	1,80	-0,0017	0,0014	-0,0044	Nenhuma	Não ocorrência de ruína ou ruptura
		0,1503	0,1623	<b>0,2042</b>		
		0,0358	0,0436	0,0551		

Energia (J)	Altura (m)	Deslocamentos (mm) - Paredes 2			Ocorrências	Requisitos da ABNT
		Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3		
120	0,30	-0,0074	-0,0496	-0,0944	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0326	0,0036	-0,0019		
		-0,0110	-0,0514	-0,1087		
180	0,45	0,0012	-0,0003	-0,0015	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0436	0,0954	0,1485		
		-0,0041	-0,0065	0,1500		
240	0,60	0,0012	-0,0006	-0,0006	Nenhuma	Não ocorrência de falhas $d_h \leq h/125$ ; $d_{hr} \leq h/625$
		0,0520	0,0962	0,1538		
		-0,0120	-0,0026	0,0427		
360	0,90	-0,0027	0,0000	0,0002	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0891	0,1007	0,1638		
		-0,0074	-0,0052	-0,0098		
480	1,20	-0,0142	-0,0008	-0,0004	Nenhuma	Não ocorrência de ruína ou ruptura
		0,1352	0,1040	0,1836		
		-0,0194	-0,0930	0,0431		
720	1,80	-0,0038	-0,0129	-0,0042	Nenhuma	Não ocorrência de ruína ou ruptura
		0,1502	0,1162	<b>0,2633</b>		
		0,0089	-0,0215	0,0432		

Energia (J)	Altura (m)	Deslocamentos (mm) - Paredes 3			Ocorrências	Requisitos da ABNT
		Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3		
120	0,30	-0,0007	0,0001	0,0000	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0289	0,0007	0,0606		
		0,0177	-0,0601	0,0551		

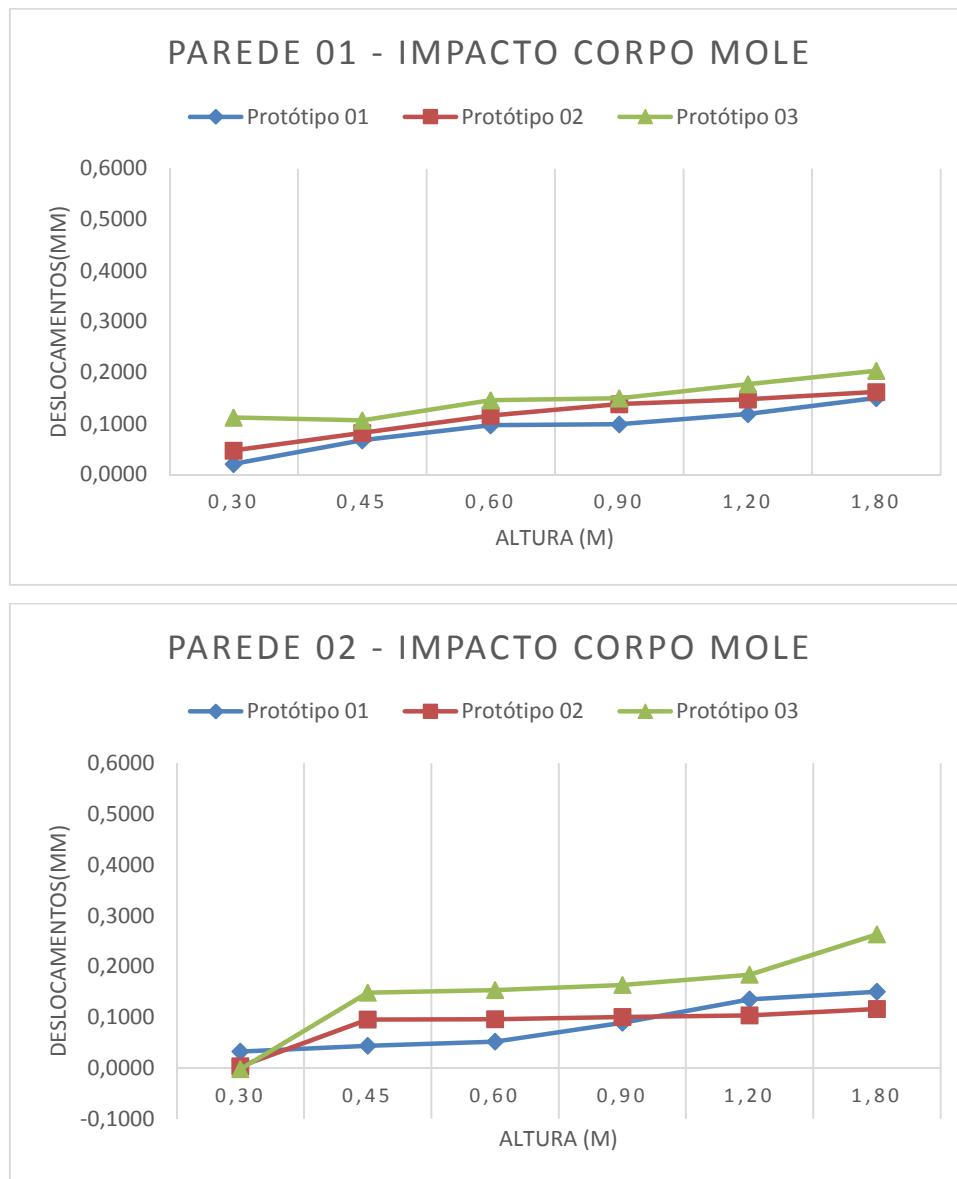
180	0,45	-0,0001	-0,0010	-0,0003	Nenhuma	
		0,0318	0,1145	0,0920		
		0,0181	-0,0008	0,0029		
240	0,60	0,0001	0,0007	0,0017	Nenhuma	Não ocorrência de falhas $d_h \leq h/125$ ; $d_{hr} \leq h/625$
		0,0450	0,1146	0,1066		
		0,0786	-0,0021	0,0388		
360	0,90	0,0001	-0,0005	0,0003	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0599	0,1508	0,1737		
		0,0453	0,0020	0,0665		
480	1,20	-0,0070	0,0010	0,0021	Nenhuma	Não ocorrência de ruína ou ruptura
		0,0644	0,1660	0,1913		
		0,0469	0,0269	0,0019		
720	1,80	0,0219	0,0002	-0,0126	Nenhuma	
		0,0688	0,2571	<b>0,3663</b>		
		0,0485	0,0335	0,1461		

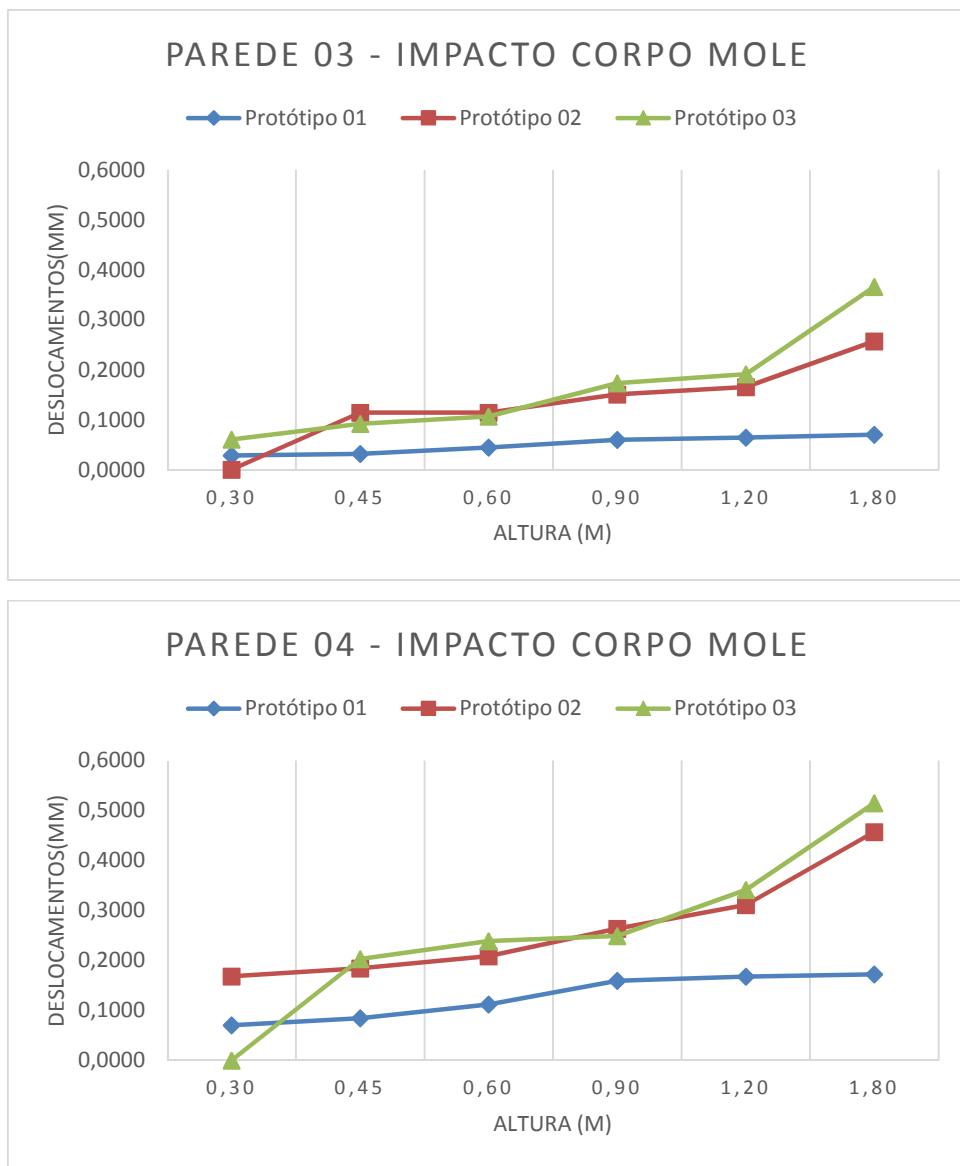
Energia (J)	Altura (m)	Deslocamentos (mm) - Paredes 4			Ocorrências	Requisitos da ABNT
		Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3		
120	0,30	0,0199	0,0015	-0,0003	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,0705	0,1682	0,0001		
		0,0407	-0,0230	-0,1865		
180	0,45	-0,0001	0,0010	0,0001	Nenhuma	
		0,0842	0,1846	0,2030		
		0,0248	0,0513	0,1059		
240	0,60	-0,0020	0,0001	0,0003	Nenhuma	Não ocorrência de falhas $d_h \leq h/125$ ; $d_{hr} \leq h/625$
		0,1121	0,2084	0,2389		
		0,0840	-0,0907	0,2150		
360	0,90	-0,0001	0,0002	0,0001	Nenhuma	Não ocorrência de falhas
		0,1593	0,2635	0,2488		
		0,1099	-0,3721	0,0881		
480	1,20	0,0000	-0,0001	-0,0003	Nenhuma	Não ocorrência de ruína ou ruptura
		0,1676	0,3111	0,3413		
		0,0921	0,0151	-0,0570		
720	1,80	0,0011	-0,0187	0,0055	Nenhuma	

		0,1721	0,4572	<b>0,5147</b>		
		0,0493	-0,1468	0,3167		

Fonte: Autor

Figura 5.4 – Deslocamentos instantâneos causados pelos impactos de corpo mole nas paredes dos protótipos.





Fonte: Autor

Observando nas Tabelas 5.7 os deslocamentos obtidos, verifica-se que o maior deslocamento de 0,5147 mm (Protótipo 03 – parede 04), corresponde a  $h/5285$  ( $h=2720$  mm) e não houve sinais de falhas. Nos gráficos da Figura 5.4, pode-se notar que a tendência dos deslocamentos manteve uma correlação positiva com o teor de ar e com à energia do impacto, representada pela altura de lançamento do saco cilíndrico. Importante ressaltar que as paredes 04 dos protótipos são as que possuem as aberturas para portas e janelas, e apresentaram os resultados com uma ordem de grandeza maior que as outras paredes.

Segundo Varisco (2013), o referido ensaio em paredes BCCA, de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15575:2013, classificam o SVVE com nível de desempenho I ou S, o mesmo encontrado para as paredes de concreto, entretanto, comparando os dois SVVE, as paredes de concreto apresentaram um melhor desempenho.

#### **5.4.2 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO**

Na Tabela 5.8 são indicados os resultados estatísticos relativos aos valores de profundidade das mossas medidos após ensaio de impacto de corpo duro. Os resultados de profundidade das mossas encontradas no ensaio de impacto de corpo duro, realizado conforme procedimentos descritos anteriormente, foram representados por meio de gráficos, conforme Figura 5.5.

Tabela 5.8 – Valores estatísticos dos resultados do ensaio de impacto de corpo duro nas paredes dos protótipos.

Grupo	Esferas de 0,5 kg			Esferas de 1,0 kg		
	Profundidade Média (mm)	Variância	Coeficiente Variação (%)	Média (mm)	Variância	Coeficiente Variação (%)
Protótipo 1 0,0%	0,022241	1,09E-05	14,830910	0,040988	1,66E-05	9,954516
Protótipo 2 0,5%	0,024938	7,5E-06	10,983670	0,054213	2,73E-05	9,638991
Protótipo 3 1,0%	0,031010	8,39E-06	9,341352	0,063663	5,62E-05	11,772670

Fonte: Autor

Pode-se notar que os valores das médias aumentaram conforme aumento do teor de aditivo. A variância manteve a ordem de grandeza em torno de  $10^{-6}$ . Assim pode-se considerar razoável a análise variância-ANOVA para verificar a influência do teor de ar nos resultados de impacto de corpo duro, conforme apresentada na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – ANOVA dos resultados do ensaio de impacto de corpo duro nas paredes dos protótipos.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre protótipos - 0,5 kg	0,001614	2	0,000807	90,41	1,83E-24	3,07
Entre protótipos - 1,0 kg	0,010378	2	0,005189	155,48	1,13E-33	3,07

SQ é a soma dos quadrados de todos os desvios em relação à média de todas as observações (entre e dentro das amostras); gl é o grau de liberdade; MQ é a média quadrática (entre e dentro das amostras)

$$F = \frac{\text{variância entre amostras}}{\text{variância dentro das amostras}}$$

valor-P é a probabilidade da hipótese nula ser verdadeira. Adotou-se o nível de significância do teste de 0,05

$F_{\text{crítico}}$  é o valor calculado em função do nível de significância e dos graus de liberdade da variância entre e dentro das amostras.

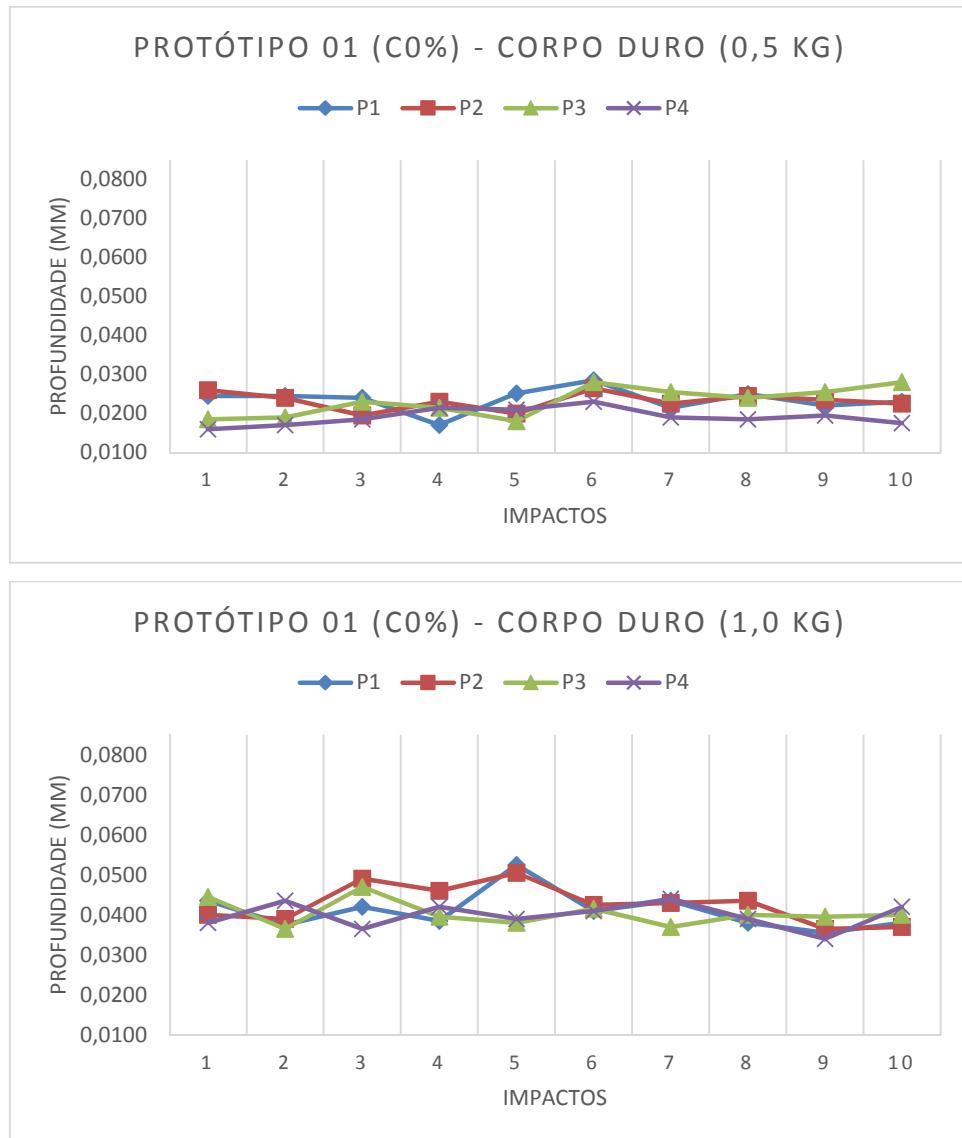
---

Fonte: Autor

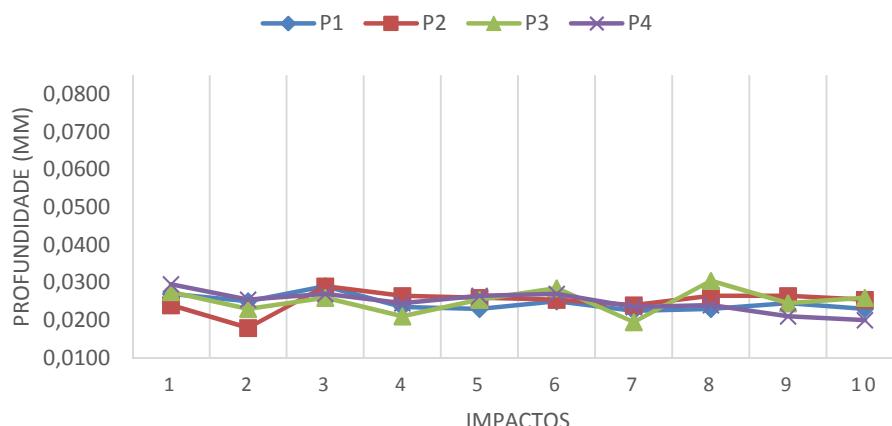
Conforme pode ser verificado na Tabela 5.9, houve evidências sobre a influência do teor de ar no concreto nos resultados do ensaio de impacto de corpo duro nas paredes dos protótipos, tanto para o ensaio com esfera de 0,5 kg, pois  $F=90,41$  é maior que  $F_{\text{crítico}}=3,07$  e o valor-P foi inferior a 0,05, assim como para o ensaio com esfera de 1,0 kg, pois  $F=155,48$  é maior que  $F_{\text{crítico}}=3,07$  e o valor-P foi inferior a 0,05.

Pela Figura 5.5, verifica-se que a profundidade das mossas foi inferior a 0,085 mm para todas as paredes e protótipos. Também não houve ocorrência de falhas em nenhuma das paredes, a marca deixada encontra-se ilustrada na Figura 4.19. Dessa maneira, de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15575-4:2013, os resultados encontrados caracterizam os protótipos no Nível Superior (S).

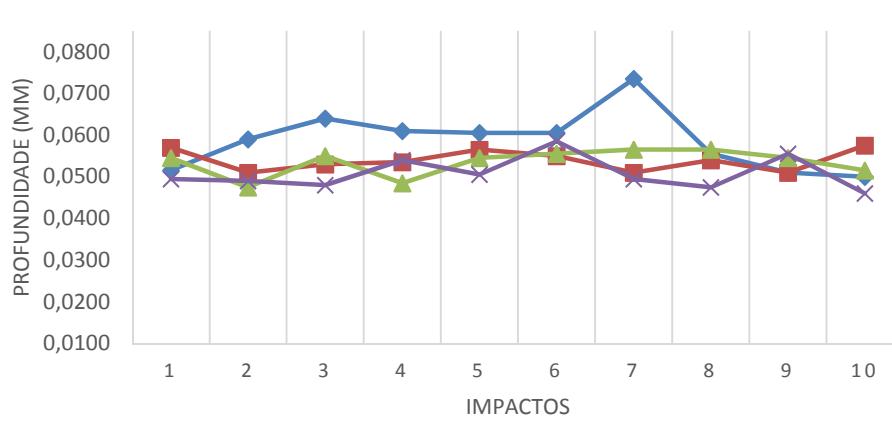
Figura 5.5 – Profundidades das mossas causadas pelos impactos de corpo duro nas paredes dos protótipos



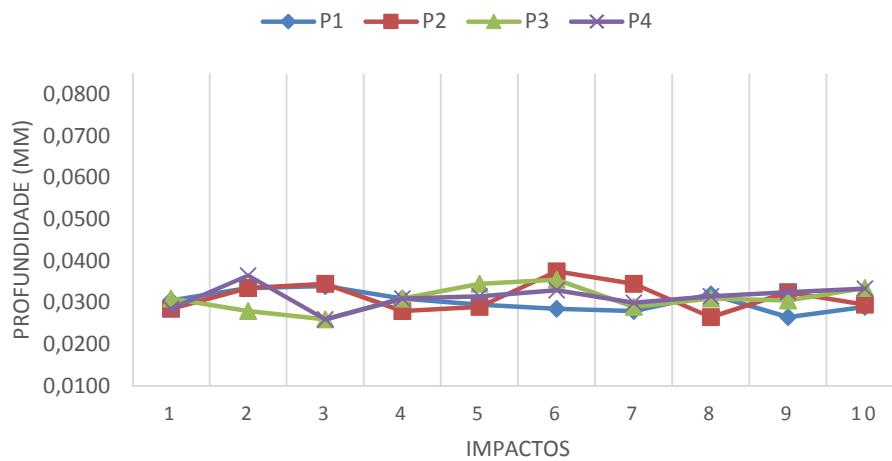
PROTÓTIPO 02 (C0,5%) - CORPO DURO (0,5 KG)

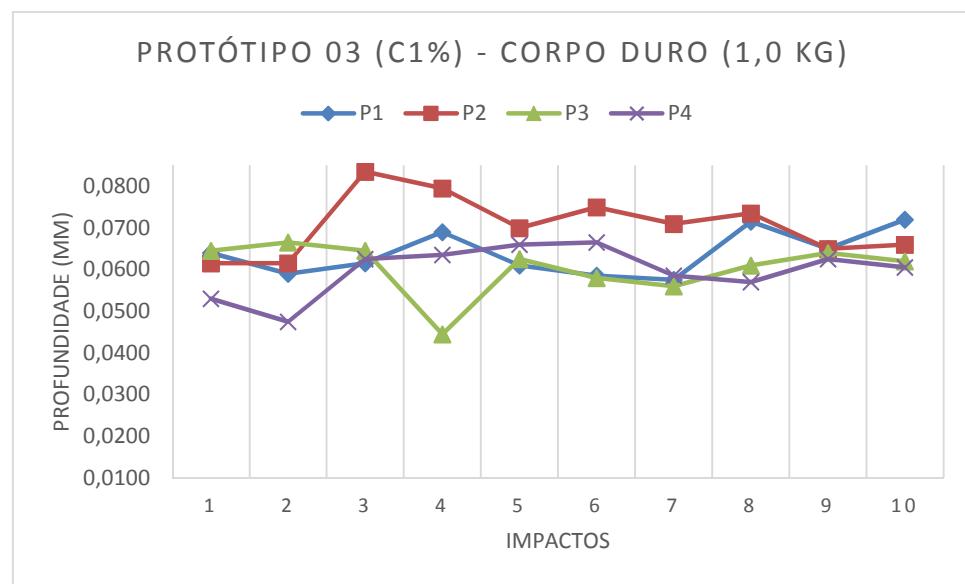


PROTÓTIPO 02 (C0,5%) - CORPO DURO (1,0 KG)



PROTÓTIPO 03 (C1%) - CORPO DURO (0,5 KG)





Fonte: Autor

Comparando com os resultados de Varisco (2014) em paredes de BCCA, ambos os SVVE podem ser classificados com nível de desempenho superior (S) de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15575:2013. Com tudo, as paredes de concreto apresentaram um desempenho melhor do que as paredes de BCCA.

#### 5.4.3 ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO CALOR E AO CHOQUE TÉRMICO

Os resultados do ensaio de verificação da exposição ao calor e ao choque térmico são apresentados na Tabela 5.10 indicando os deslocamentos no início do aquecimento, 45 minutos depois, e no início e final do resfriamento. Também são indicadas as ocorrências de cada ciclo e os requisitos da ABNT NBR 15575:2013.

Conforme esquema na Figura 4.20 e ilustrado na Figura 4.24, o medidor de deslocamentos foi posicionado na face oposta à aplicação da fonte de calor, portanto, valores negativos indicam que o medidor está a face convexa do painel.

Tabela 5.10 – Resultados do ensaio de verificação da exposição ao calor e ao choque térmico

Concreto – C1 0%									
Painel	Ciclo	Deslocamentos (mm)				Ocorrências	Requisitos da ABNT NBR 15575:2013		
		Aquecimento		Resfriamento					
		Início	45 minutos	Início	Final				
1	1	-0,0080	-0,4090	-0,3530	-0,0350	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	-0,1790	-0,6260	-0,6030	-0,4660				
	3	-0,0002	-0,1752	0,0588	0,4372				
	4	-0,5420	-0,6680	-0,5640	-0,4030				
	5	-0,0369	-0,1817	-0,1513	0,0638				
	6	-0,1352	-0,4249	-0,2496	0,0549				
	7	-0,0510	-0,2707	-0,1890	0,0582				
	8	0,4383	0,2500	0,2710	0,3969				
	9	0,0019	-0,2060	-0,2419	0,0946				
	10	-0,0618	-0,2349	-0,2625	-0,0631				
2	1	-0,0085	-0,2434	-0,2346	0,0767	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	-0,1393	-0,2910	-0,2846	-0,0154				
	3	-0,1226	-0,2984	-0,2687	-0,0058				
	4	-0,0805	-0,2566	-0,2260	0,0211				
	5	-0,0730	-0,2362	-0,2016	0,0621				
	6	-0,0514	-0,2126	-0,1925	0,0793				
	7	-0,0558	-0,1647	-0,1261	0,1117				
	8	-0,1163	-0,1888	-0,1322	0,0909				
	9	-0,0252	-0,1247	-0,1193	0,0843				
	10								
3	1	-0,2169	-0,7579	-0,6370	-0,1674	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	0,0031	-0,2294	-0,2522	0,1609				
	3	-0,0036	-0,3803	-0,2548	0,2009				
	4	-0,0010	-0,1531	-0,0177	0,3398				
	5	0,0304	-0,2551	-0,0437	0,3380				
	6	-0,1041	-0,1805	-0,0225	0,4092				
	7	-0,0254	-0,2893	0,0261	0,5209				
	8	-0,0206	-0,0315	0,0232	0,3259				
	9	-0,0387	-0,1366	0,0608	0,3524				
	10								

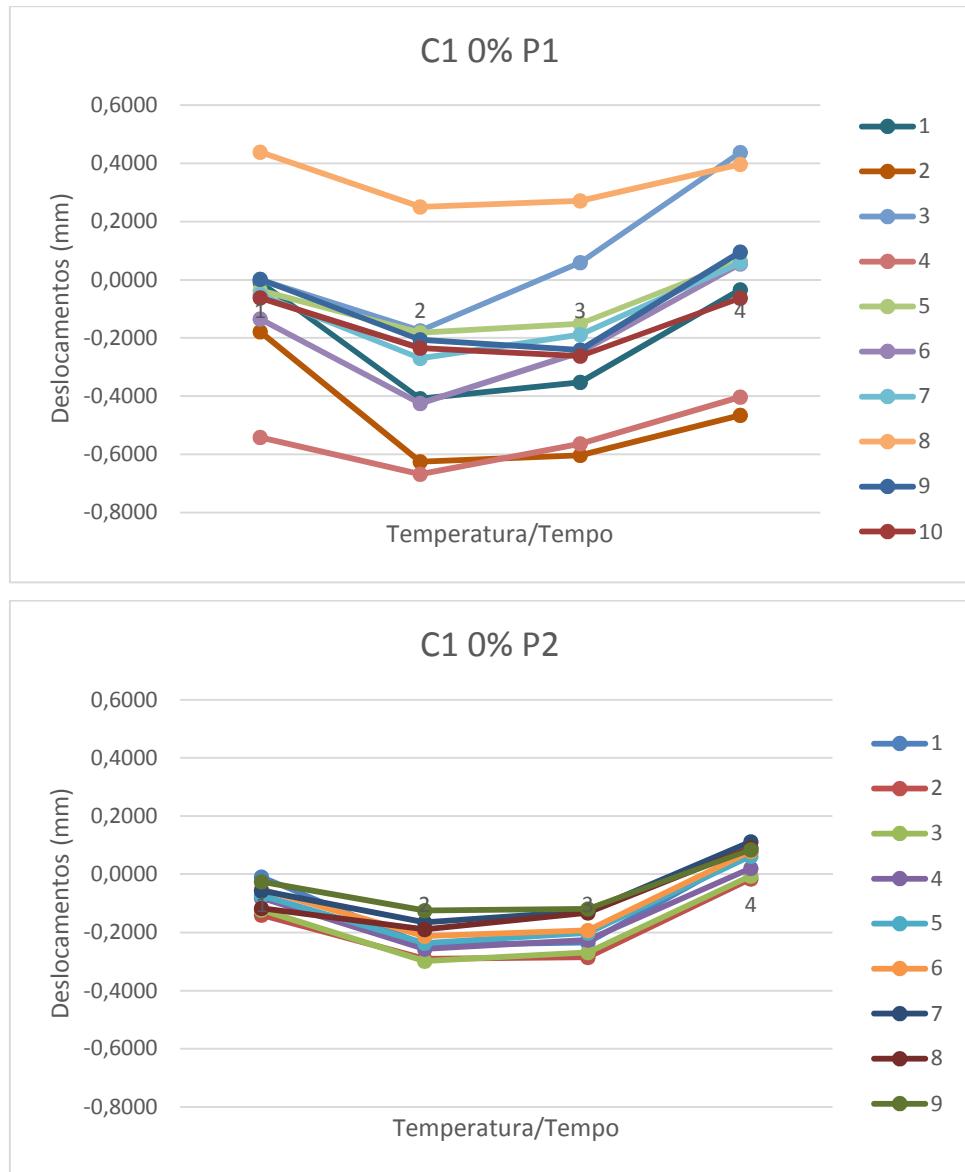
Concreto – C2 0,5%									
Painel	Ciclo	Deslocamentos (mm)				Ocorrências	Requisitos da ABNT NBR 15575:2013		
		Aquecimento		Resfriamento					
		Início	45 minutos	Início	Final				
1	1	-0,0012	-0,2128	-0,2585	-0,1973	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	0,0004	-0,2211	-0,2763	-0,1393				
	3	-0,0778	-0,2779	-0,2983	-0,1386				
	4	-0,0933	-0,2467	-0,2502	-0,0417				
	5	-0,0302	-0,1275	-0,1700	0,0016				
	6	-0,0669	-0,1655	-0,2529	-0,0760				
	7	-0,0337	-0,0809	-0,1395	0,0418				
	8	0,0004	-0,0037	-0,0261	0,1596				
	9	-0,0017	-0,1061	-0,2122	-0,0600				
	10								
2	1	-0,0069	-0,3481	-0,3175	-0,1367	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	-0,0224	-0,1734	-0,2984	-0,3054				
	3	-0,0001	-0,0207	-0,1144	-0,1196				
	4	0,0000	-0,1374	-0,3517	-0,1263				
	5	-0,0044	-0,3176	-0,3924	-0,3850				
	6	-0,0068	-0,0964	-0,1359	-0,1330				
	7	-0,0125	-0,1520	-0,1755	0,1492				
	8	-0,0053	-0,1188	-0,2052	-0,1997				
	9	0,0000	-0,1292	-0,2628	-0,1293				
	10	0,0004	-0,0548	-0,2213	-0,1777				
3	1	-0,0590	-0,3243	-0,3459	-0,1330	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	-0,0071	-0,2570	-0,3018	-0,0504				
	3	-0,0039	-0,2410	-0,2703	-0,0327				
	4	-0,0011	-0,2354	-0,2648	-0,0674				
	5	-0,0021	-0,2080	-0,2645	-0,0239				
	6	-0,0044	-0,2727	-0,2909	-0,0356				
	7	-0,0017	-0,1697	-0,1854	0,0310				
	8	-0,0038	-0,2115	-0,2432	0,0551				
	9	-0,0032	-0,1502	-0,1743	-0,0781				
	10	-0,0024	-0,1670	-0,2150	0,0036				

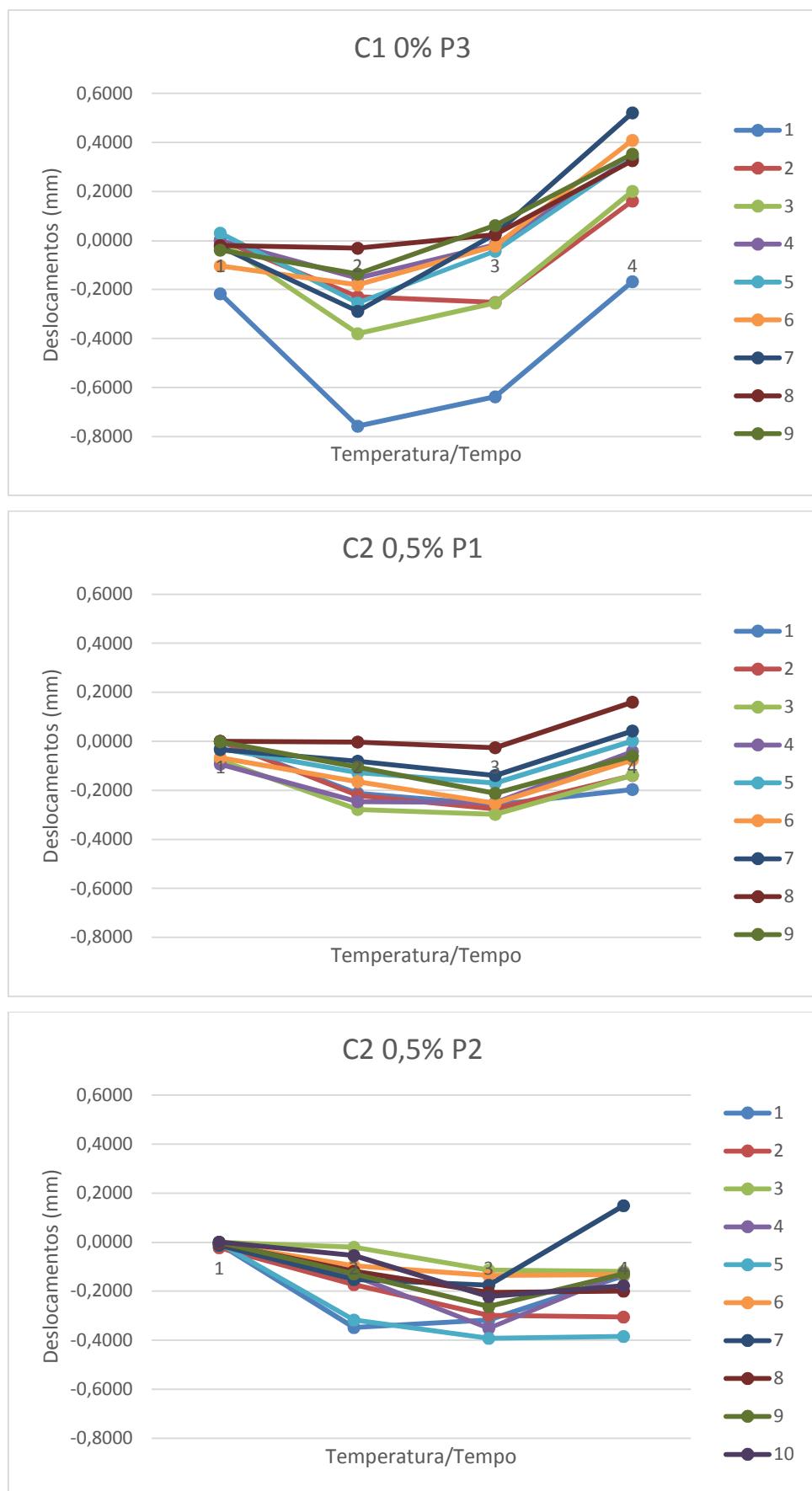
Concreto – C3 1,0%									
Painel	Ciclo	Deslocamentos (mm)				Ocorrências	Requisitos da ABNT NBR 15575:2013		
		Aquecimento		Resfriamento					
		Início	45 minutos	Início	Final				
1	1	-0,1036	-0,3795	-0,2434	-0,0800	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	0,0048	-0,2815	-0,1143	-0,0015				
	3	0,0531	-0,1250	-0,0274	0,0753				
	4	0,1017	-0,1757	-0,0663	0,1277				
	5	0,0945	-0,0890	0,0400	0,1248				
	6	0,0491	-0,0955	0,0317	0,1105				
	7	0,0037	-0,1019	0,0234	0,0962				
	8	0,0849	-0,0383	0,0256	0,1545				
	9	0,0233	-0,0698	0,0713	0,2149				
	10	0,0892	0,0572	0,1248	0,1997				
2	1	-0,1186	-0,5336	-0,6007	-0,3714	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	-0,0646	-0,4128	-0,4700	-0,1533				
	3	-0,0993	-0,4496	-0,5139	-0,1858				
	4	-0,0853	-0,3387	-0,3836	-0,2430				
	5	-0,0197	-0,2693	-0,2978	-0,0713				
	6	-0,0311	-0,1852	-0,2219	-0,1100				
	7	-0,0371	-0,2191	-0,2837	-0,1198				
	8	-0,0441	-0,1366	-0,2464	-0,0949				
	9	-0,0489	-0,1782	-0,1469	-0,0706				
	10								
3	1	-0,0023	-0,3570	-0,3570	0,0156	Nenhuma	Deslocamento horizontal: $d_h \leq h/300$ ; $d_h \leq 1100/300 = 3,67$ ; $d_h \leq 3,67$ mm  Não ocorrência de falhas		
	2	-0,0082	-0,2932	-0,2799	0,0267				
	3	-0,0050	-0,2679	-0,2424	0,0710				
	4	-0,0019	-0,2043	-0,2030	0,0768				
	5	-0,0027	-0,1377	-0,1734	0,1571				
	6	0,0000	-0,1627	-0,2178	0,0396				
	7	-0,0019	-0,3961	-0,4541	-0,1561				
	8	-0,0080	-0,3311	-0,4797	-0,4850				
	9	0,0009	-0,0222	-0,1939	-0,2052				
	10	0,0010	-0,2111	-0,2639	-0,2547				

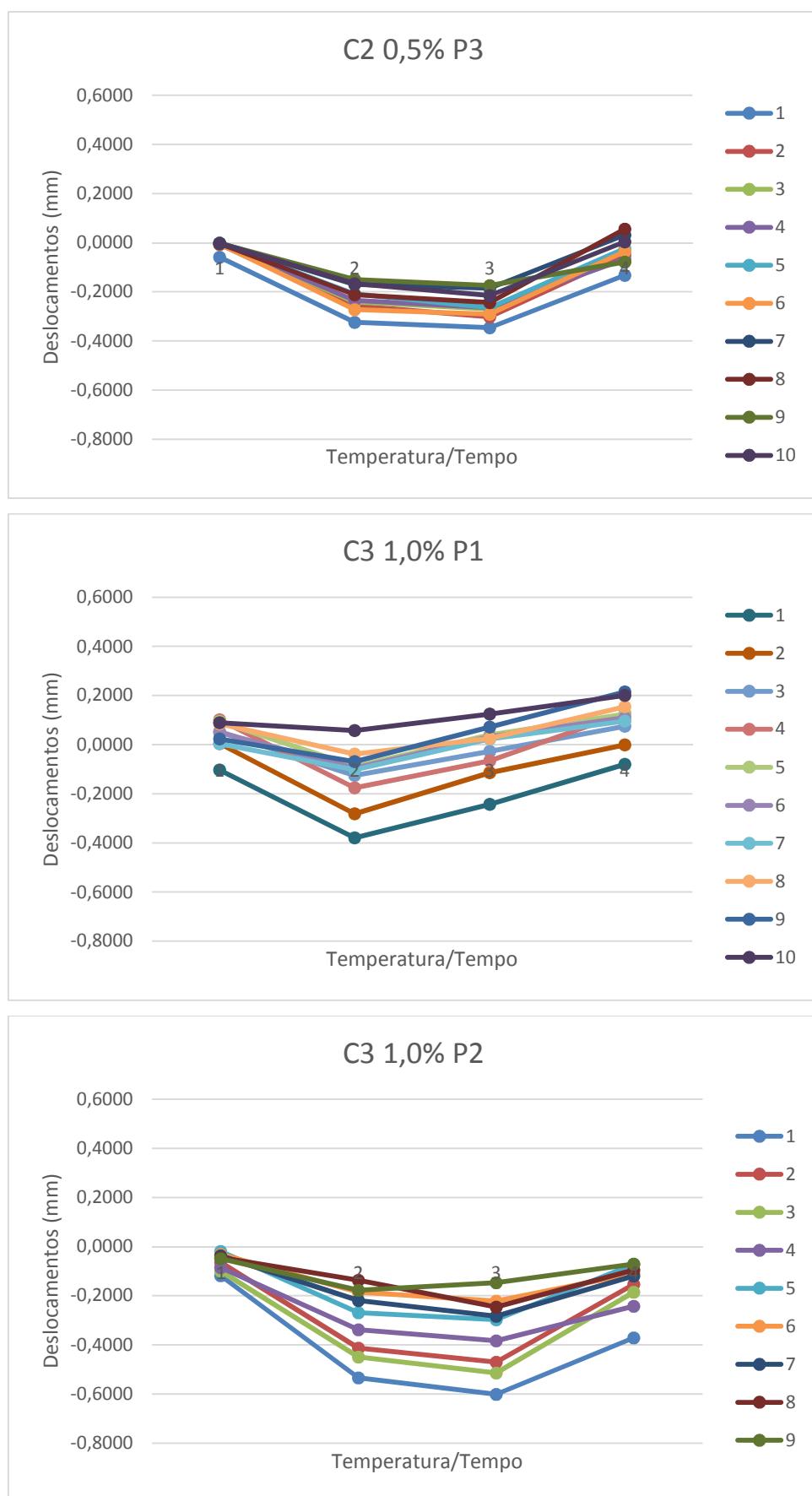
Fonte: Autor

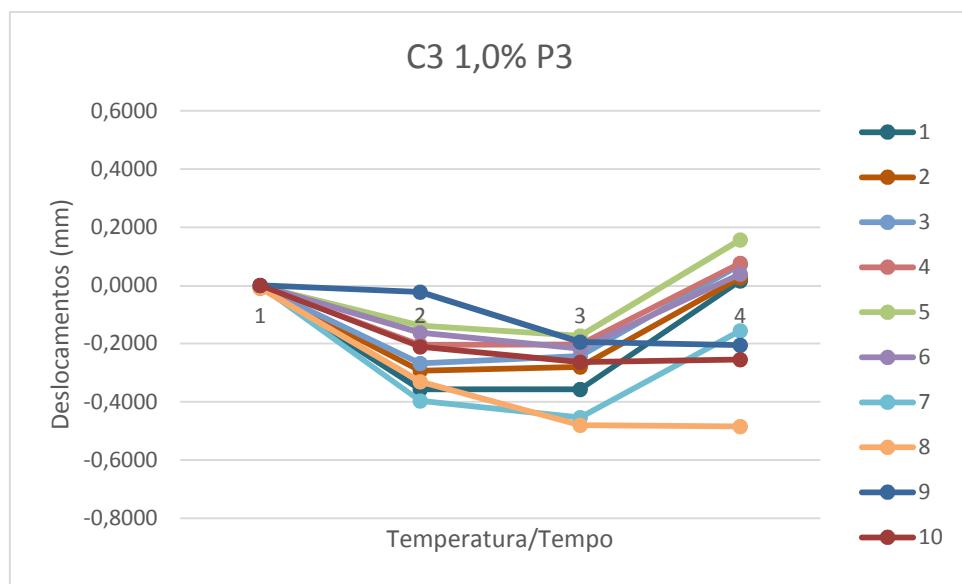
Na Figura 5.6 são apresentados os gráficos de cada painel representando os deslocamentos ocorridos de acordo com a Tabela 5.10.

Figura 5.6 – Gráficos representando os deslocamentos ocorridos de acordo com a Tabela 5.10.









Fonte: Autor

Observando as tabelas e gráficos apresentados percebe-se que todos os ciclos atenderam os requisitos da ABNT e houve uma tendência na maioria dos ciclos de retração no aquecimento e de expansão no resfriamento da face oposta. Apesar da diferença ser pequena percebe-se que os painéis com menos ar incorporado sofreram maior influência com as mudanças na temperatura. Não foi detectada nenhuma ocorrência na superfície dos painéis.

Comparando os resultados apresentados com os resultados encontrados por Varisco (2014), nos ensaios com paredes de BCCA, o SVVE construída em concreto obteve melhores resultados, porém, de acordo com a ABNT NBR 15575:2013 ambos SVVE ensaiados possuem nível de desempenho mínimo (M).

Foi realizada a análise de variância-ANOVA para verificar a influência do teor de ar nos resultados dos deslocamentos produzidos no ensaio de choque térmico, conforme apresentado na Tabela 5.11. A análise A1 foi realizada com a diferença entre as leituras do final do resfriamento menos as leituras do início do ensaio. A análise A2 foi realizada com a diferença entre as leituras do final do resfriamento menos as leituras do início do resfriamento.

Tabela 5.11 – ANOVA nos resultados dos deslocamentos produzidos no ensaio de choque térmico nos painéis.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos – A1	0,8592	2	0,4296	20,117	6,59E-08	3,1013
Entre grupos – A2	0,2762	2	0,1381	11,196	4,71E-05	3,1013

SQ é a soma dos quadrados de todos os desvios em relação à média de todas as observações (entre e dentro das amostras); gl é o grau de liberdade; MQ é a média quadrática (entre e dentro das amostras)

$$F = \frac{\text{variância entre amostras}}{\text{variância dentro das amostras}}$$

valor-P é a probabilidade da hipótese nula ser verdadeira. Adotou-se o nível de significância do teste de 0,05

F<sub>crítico</sub> é o valor calculado em função do nível de significância e dos graus de liberdade da variância entre e dentro das amostras.

Fonte: Autor

Conforme pode ser verificado na Tabela 5.11, houve evidências sobre a influência do teor de ar no concreto dos deslocamentos produzidos no ensaio de choque térmico nos painéis de concreto, pois F=20,117 é maior que F<sub>crítico</sub>=3,1013 para a análise A1 e F=11,196 é maior que F<sub>crítico</sub>=3,1013 para A2 e o valor-P foi inferior a 0,05 para ambas análises.

Foram obtidas as médias das diferenças entre as medidas de deslocamentos das 30 medidas (10 medidas em 3 painéis). Inicialmente foram obtidas as diferenças entre a leitura instantânea aos 45 minutos e a leitura inicial, caracterizando o final da primeira etapa. A segunda análise foi para a etapa de resfriamento, daí as diferenças foram entre as leituras do fim e início do resfriamento. Por último, foi analisado o deslocamento residual no painel ao final do resfriamento. A Tabela 5.12 contempla os resultados obtidos em cada análise.

Tabela 5.12 – Resultados das diferenças ao final das etapas

Diferenças entre médias das medidas	C1 (0%)	C2 (0,5%)	C3 (1,0%)
45 min - inicial	-0,192	-0,159	-0,208
fim - início (do resfriamento)	0,277	0,152	0,168
final - inicial	0,158	-0,063	-0,031

Fonte: Autor

---

Os resultados indicam que todos os painéis apresentaram deslocamento horizontal residual ao final do ensaio. O concreto C1, sem aditivo incorporador, apresentou as maiores variações que os com aditivo e ao final a face onde estava o medidor de deslocamento estava côncava. Entre os concretos com aditivo, o C3 (1,0%) apresentou maiores curvaturas que o C2 (0,5%) nas fases intermediárias do ensaio, porém foi o menor deslocamento horizontal residual ao final do ensaio.

# CAPÍTULO 6

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

Em concordância com o objetivo do trabalho são apresentadas as conclusões obtidas, no intuito de avaliar o desempenho de paredes de concreto com ar incorporado de acordo com a ABNT NBR 15575:2013. Ao analisar os resultados obtidos quanto às propriedades dos concretos e quanto aos ensaios de desempenho realizados, chegaram-se às seguintes conclusões:

Os resultados dos ensaios no concreto fresco confirmaram a ação do aditivo na incorporação de ar no concreto.

Os resultados dos ensaios de desempenho no concreto endurecido, especificamente nos protótipos de paredes de concreto com ar incorporado, indicaram que:

- ✓ O deslocamento instantâneo gerado pelo ensaio de impacto de corpo mole correspondeu a  $h/13320$  ( $h=2720$  mm) e não houve sinais de falhas;
- ✓ Os deslocamentos mantiveram uma correlação negativa com o teor de ar e positiva em relação à energia do impacto, representada pela altura de lançamento do saco cilíndrico;
- ✓ A profundidade das mossas foi inferior a 0,085 mm para todas as paredes e protótipos;

- ✓ Pela ANOVA, houve evidências sobre a influência do teor de ar no concreto nos resultados do ensaio de impacto de corpo duro nas paredes dos protótipos;
- ✓ O SVVE pode ser classificado com nível de desempenho superior (S) de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15575:2013.

Ainda no concreto endurecido, porém analisando os resultados encontrados nos painéis de concreto, conclui-se que:

- ✓ Mesmo sendo pequenas as diferenças encontradas, o teor de ar no concreto influenciou positivamente os resultados da ação do choque térmico;
- ✓ De acordo com a ABNT NBR 15575:2013 o SVVE ensaiado possui nível de desempenho M;
- ✓ Os resultados em relação à resistência ao choque térmico indicam que a incorporação de ar reduziu as curvaturas durante a ação do calor.

Assim, conclui-se que os protótipos, construídos com processo construtivo e dimensões similares às de edifícios reais, com paredes de concreto com os teores de ar incorporado até 14,5%, atendem aos critérios de desempenho no ensaio de impacto externo de corpo mole e de corpo duro da ABNT NBR 15575:2013. Considerando que os painéis foram construídos com a mesma espessura e tipo de concreto que os protótipos, pode-se considerar que os protótipos também possuem nível de desempenho mínimo (M) em relação ao choque térmico.

---

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Os ensaios aqui apresentados são para verificação de desempenho conforme a ABNT NBR 15575:2013 e alguns já eram executados antes da vigência da norma, porém, o ensaio de choque térmico apresenta um grau maior de dificuldade. Neste sentido, os trabalhos futuros podem ser direcionados para o desenvolvimento de equipamentos que permitam a execução deste ensaio, indicando a potência da fonte de calor para atingir o valor necessário, o sistema de ventilação para uniformizar a temperatura na face e a vazão da água necessária.

Os protótipos poderão ser analisados para os outros requisitos de desempenho da ABNT NBR 15575:2013, como por exemplo, ensaios de estanqueidade, de durabilidade, e de desempenho térmico e acústico.

---

# REFERÊNCIAS

AGNESINI, M. V. C. Concretos com ar incorporado: efeitos produzidos pela incorporação de ar sobre as propriedades dos concretos dosados com os agregados usualmente empregados na região de São Carlos. 24 Ed. São Carlos: EESC-USP, v. 1, 1988.

ALBUQUERQUE, G. B. M. L. Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2012. 245 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NRB 15575**: Coletânea de Normas Técnicas - Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11675**: Divisórias leves internas moduladas - Verificação da resistência a impactos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 14718**: Guarda-corpos para edificações. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 16055**: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

---

\_\_\_\_\_. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 6123:** Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 9062:** Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 14037:** Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações – Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 5674:** Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 14432:** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833:** Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento Portland - Especificação. Rio de Janeiro, 2011.

**ASSOCIAÇÃO MERCUSUL DE NORMALIZAÇÃO. NM 47:** Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Brasil, 2002.

BARBAR, J. S.; PERUZZI, A. P.; ROSSIGNOLO, J. A. Análise microestrutural de pastas de cimento Portland com ar incorporado por meio de aditivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 56, 2014. **Anais...** IBRACON, 2014.

---

BORGES, C. A. M. O Conceito de Desempenho de Edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-SP, 2008.

BORGES, C. A. M.; SABBATINI, F. H. O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2008.

BRANCO, F. A.; SANTOS, J. R. Avaliação da espessura degradada em estruturas de betão sujeitas à ação do fogo (FBTEST). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, ICIST. Lisboa, 2000.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, CBIC. Desempenho de Edificações Habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575:2013. Brasília: Gadioli Cipolia Comunicação, 2013.

COLETÂNEA DE ATIVOS. **Paredes de Concreto. Comunidade da construção 2011/2013.** Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/download/coletanea-de-ativos-em-paredes-de-concreto-2011-2013/>>. Acesso em: jan. 2016.

CORSINI, R; Paredes Normatizadas. In: Revista Téchne, V.183, 2012.

CUOGHI, R. S. Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2006. 239 p.

DHIR, R. K. et al. Concrete for fire engineering. Walford: HIS BRE Press, 2008. 332 p.

ESQUIVEL, J. F. T. Choque térmico nos revestimentos de argamassa. Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP. São Paulo, 2009.

---

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. Relatório DCT.C.15.001.2007-R0 – Caixa Econômica Federal – Avaliações de sistemas construtivos e estabelecimentos de requisitos para edificações térreas com paredes de concreto armado. Goiânia-GO, 2007.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. Relatório DCT.C.AC.003.2006-R1 – ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem – Sistemas construtivos em concreto moldado in loco e tilt-up – Avaliação de Desempenho. Goiânia-GO, 2008.

GEHBAUER, F., Racionalização na Construção Civil – Como melhorar processos de produção e de gestão. 1<sup>a</sup> edição, Recife, SENAI, 2004.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. Progress in structural Engineering and Materials, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.

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.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. McGraw-Hill, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MENEZES, R. A. Avaliação de desempenho estrutural dos sistemas construtivos de solo-cimento e concreto celular aplicados em edificações de casas populares no estado do Amazonas. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2006. 166 p.

MISURELLI, H.; MASSUDA, C.; Como construir Paredes de concreto. In: Téchne, 2009. Edição 147, ano 17, p. 74-80.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Pini. São Paulo, 1997.

---

PURKISS, J. A. *Fire safety engineering*. 2 ed. Oxford, Reino Unido: Elsevier, 2007.

ROMANO, R. C. O.; MENDES, T. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Efeito do tempo de mistura nas propriedades de argamassas com ar incorporado, In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VII SBTA, ANTAC, Recife – PE, 2007.

ROQUE, J. A. O desempenho quanto à durabilidade de alvenarias de blocos cerâmicos de vedação com função auto-portante: o caso da habitação de interesse social. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ROSA, P. Concreto com ar incorporado: Variação das propriedades mecânicas em função do tempo de mistura dos materiais. Trabalho de Diplomação – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2013.

SANTOS, R. F. C.; CASTRO, A. L. Dosagem de concreto autoadensável com alto teor de ar incorporado aplicado em paredes de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 55, 2013. *Anais...* IBRACON, 2013.

SERRA, S. M. B., FERREIRA, M. de A., PIGOZZO, B. N. Evolução dos Pré-Fabricados de concreto. In. 1º. Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, 1, 2005, São Carlos. Anais. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2005.

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.

VARISCO, M. Q. Análise do desempenho de blocos de concreto celular autoclavado em um sistema de vedação externa. Dissertação (Mestrado) – Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC. Curitiba, 2014.