

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Análise Teórico-experimental da Deformação Instantânea e Lenta  
de Vigas de Concretos Auto-adensáveis**

**Camila Simonetti**

Porto Alegre  
2008

Camila Simonetti

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO  
INSTANTÂNEA E LENTA DE VIGAS DE CONCRETOS  
AUTO-ADENSÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre  
2008

S598a Simonetti, Camila

Análise teórico-experimental da deformação instantânea e lenta de vigas de concretos auto-adensáveis / Camila Simonetti. – 2008.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2008.

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Pinto da Silva Filho

Co-orientador : Prof. Dr. Américo Campos Filho

1. Concreto auto-adensável. 2. Vigas – Concreto armado. 3. Elementos finitos  
4. Módulo de elasticidade. I. Silva Filho, Luis Carlos Pinto da, orient. II. Campos  
Filho, Américo, co-orient. III. Título.

CDU-691.32(043)

**CAMILA SIMONETTI**

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO  
INSTANTÂNEA E LENTA DE VIGAS DE CONCRETOS  
AUTO-ADENSÁVEIS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, com área de atuação em Estruturas, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de agosto de 2008.

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho  
Ph.D., Leeds Metropolitan University  
orientador

Prof. Américo Campos Filho  
Dr., Escola Politécnica da USP  
co-orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof<sup>a</sup>. Mônica Pinto Barbosa (UNESP)**  
Ph.D., Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon

**Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)**  
Dr., EPUSP

**Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal (UFRGS)**  
Ph.D., North Carolina State University

Dedico este trabalho à minha família, por todo carinho,  
apoio e compreensão, sendo a maior incentivadora na  
concretização dos meus sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Luis Carlos Pinto da Silva Filho e Américo Campos Filho pela confiança depositada, pelo constante suporte e orientação durante o período de realização desta dissertação.

Aos colegas da Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial do LEME e do NORIE, agradeço a cooperação, a amizade e os conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários do LEME, Liliani Gaeversen, pelo auxílio prestado, Flávio Luis César de Lima, Eurípedes Martins Fontes e Diego Sarda da Silva, pelo apoio operacional na montagem das fôrmas, pórtico e instrumentação.

Aos queridos bolsistas Diego Guimarães e Luiz Roberto Meneghetti, por trabalharem comigo neste projeto com dedicação e eficiência inigualáveis, e por divulgarem este trabalho em diversos eventos.

A minha mãe, Maria Augusta Kniphoff, pelo incentivo e apoio incondicional, por estar sempre ao meu lado nesta jornada. A minha família e amigos, pelo companheirismo e torcida. Ao Marcelo Guedes, pelo carinho e pela compreensão.

À CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo suporte financeiro concedido durante parte da elaboração deste trabalho.

À Gerdau pela doação do aço cortado e dobrado.

À Allquímica pela doação dos aditivos para concreto.

À Metacaulim do Brasil pela doação da adição utilizada no concreto auto-adensável.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado!

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimentos, instala-se a dúvida.”

*Johann Goethe*

# **ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO INSTANTÂNEA E LENTA DE VIGAS DE CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**

SIMONETTI, C. Análise Teórico-Experimental da Deformação Instantânea e Lenta de Vigas de Concretos Auto-adensáveis. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A consolidação das técnicas de dosagem e fabricação de concretos auto-adensáveis com reduzida relação a/c pode ser considerada como um dos desenvolvimentos mais impactantes da nova tecnologia do concreto. No Brasil a utilização deste tipo de concreto, apesar de estar aumentando consideravelmente, ainda é relativamente modesta. Projeta-se, todavia, uma considerável expansão nos próximos anos, em função das vantagens que este material oferece. Por isso, várias instituições têm buscado aprofundar o conhecimento sobre o concreto auto-adensável (CAA), através de estudos e pesquisas sobre o comportamento e características desse novo material. Visando colaborar para um melhor conhecimento sobre as propriedades de concretos auto-adensáveis no estado endurecido, foi efetuado um estudo sobre o comportamento, em termos de deformação instantânea e lenta, de vigas fabricadas com CAA. O programa experimental compreendeu a análise de seis vigas de concreto armado dimensionadas segundo as exigências da NBR 6118/2003. Para fabricação das mesmas foi utilizado um concreto convencional, com teor de argamassa de 55%, que serviu como referência, e dois concretos auto-adensáveis, com teores de argamassa de 55% (similar ao do convencional) e 60% (típico de concretos auto-adensáveis). As vigas permaneceram em carga durante aproximadamente cinco meses, durante os quais foi registrada a evolução dos deslocamentos transversais do centro e do terço médio. Os resultados experimentais foram comparados com valores numéricos obtidos através da norma brasileira e do emprego de um modelo computacional baseado em elementos finitos. De uma forma geral, verificou-se que concretos auto-adensáveis possuem comportamento similar ao concreto convencional, podendo ser utilizada, para o dimensionamento de peças com este concreto, a mesma norma utilizada para estruturas de concreto convencional. Verificou-se, porém, que o modelo simplificado da norma brasileira vigente para estimativa da deformação total de longo prazo não apresentou dados coerentes com os resultados coletados em ensaio, subestimando os valores obtidos. Uma análise mais precisa foi possível através de um modelo de elementos finitos. Verificou-se, todavia, que para avaliar o comportamento de vigas de concreto armado em ambiente similar ao do ensaio, é imprescindível a inclusão dos efeitos da retração.

*Palavras-chave: concreto auto-adensável; vigas de concreto armado; fluência  
retração; módulo de elasticidade.*



# **ANALYSIS OF THE BEHAVIOR IN TERMS OF IMMEDIATE AND LONG-TERM DEFLECTIONS OF BEAMS MADE FROM SELF-COMPACTING CONCRETE**

SIMONETTI, C. Análise Teórico-experimental da Deformação Instantânea e Lenta de Vigas de Concretos Auto-adensáveis. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Self-compacting concrete (SCC) is considered by many researchers and field engineers as one of the most important recent developments in concrete technology. Despite the considerable advantages that are associated with the use of this special concrete, its use in Brazil is still limited, although there is a growth trend. A strong market expansion is expected in a short period, reproducing what is now happening in Europe and the US. Therefore, many research institutions have been trying to increase the scientific knowledge about SCC, through studies and researches focused on this new material. In this paper, a study about the immediate and long-term deflections of reinforced concrete beams using SCC is presented, aiming to increase the knowledge about the properties of the self-compacting concrete in its hardened state. In the experimental part of this study, a comparison between the maximum deflections registered in concrete beams under constant load, made with conventional and SCC concrete, is carried out. The experimental program involved the casting and testing of six beams with the same geometry, longitudinal and transversal reinforcement, and subjected to the same load pattern. The beam prototypes were designed according to the Brazilian standard NBR 6118/2003, with a 210cm span and an 18x10cm cross-section. Two types of concrete with different mortar contents have been used: one conventional concrete with a mortar content of 55%, and two SCCs with mortar contents of 55% and 60%. The beams were put under load during approximately five months. The mechanical properties of concrete have been determined and the maximum deflections have been measured throughout this period. The experimental results have been compared with numerical estimates obtained using procedures recommended by the Brazilian standard and with estimates from a FEM computational model. Overall, it was found that self-compacting concrete has a similar behavior to conventional concrete, for the same mortar content, and can be designed with the same criteria used for conventional concrete structures. The estimates obtained using the Brazilian standard, however, underestimated the maximum deflections in relation to the experimental data collected. Better estimates were obtained using the FEM model, when temperature and humidity data was used to account for the shrinkage.

**Key-words:** *self-compacting concrete, creep, beams, long-term deflection*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	21
1.2 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	23
1.3 OBJETIVOS.....	25
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	26
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	26
<b>2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL</b> .....	<b>28</b>
2.1 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO.....	28
2.2 VANTAGENS.....	30
2.3 COMPONENTES DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....	31
2.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO.....	33
2.4.1 Ensaio de espalhamento ( <i>Slump Flow Test</i> ).....	34
2.4.2 <i>V-funnel Test</i> .....	37
2.5 DOSAGEM DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....	38
2.5.1 Dosagem do concreto convencional.....	39
2.5.2 Dosagem do concreto auto-adensável.....	41
<b>3 DEFORMAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO</b> .....	<b>45</b>
3.1 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO CONCRETO.....	45
3.1.1 Deformação imediata.....	45
3.1.2 Fluência do concreto.....	46
3.1.3 Efeitos da retração e da deformação lenta sobre as estruturas.....	50
3.2 CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES DE LONGO PRAZO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA.....	51
3.2.1 Introdução.....	51
3.2.2 Deformação por fluência do concreto.....	51
3.2.3 Deformação do concreto por retração.....	53
3.2.4 Deformação total do concreto.....	54

3.3 CÁLCULO DE FLECHAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA.....	55
3.3.1 Flecha imediata.....	55
3.3.2 Flecha diferida.....	56
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>58</b>
4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	58
4.2 DELINEAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	59
4.3 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS.....	60
4.4 PÓRTICO DE ENSAIO.....	63
4.5 MOLDAGEM DAS VIGAS.....	67
4.5.1 Caracterização dos materiais.....	67
4.5.1.1 Agregados.....	67
4.5.1.2 Cimento.....	69
4.5.1.3 Aditivos.....	70
4.5.1.4 Metacaulim.....	71
4.5.2 Dosagem dos concretos.....	72
4.5.2.1 Dosagem do concreto convencional.....	72
4.5.2.2 Dosagem do concreto auto-adensável.....	74
4.5.3 Preparação do concreto.....	77
4.5.4 Moldagem.....	78
4.5.4.1 Moldagem do concreto auto-adensável.....	78
4.5.4.2 Moldagem do concreto convencional.....	82
4.5.5 Adensamento.....	83
4.5.6 Cura.....	83
4.5.7 Controle tecnológico das propriedades dos concretos.....	84
4.5.7.1 Ensaio de compressão axial.....	84
4.5.7.2 Ensaio de módulo de elasticidade.....	84
4.6 INSTRUMENTAÇÃO.....	85
4.7 CARREGAMENTO.....	87
4.8 MONITORAMENTO DAS FLECHAS E DO MEIO DE INSERÇÃO AO LONGO DO TEMPO.....	90
4.9 RETIRADA DO CARREGAMENTO.....	90

<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>92</b>
5.1 CONTROLE TECNOLÓGICO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS.....	92
5.1.1 Ensaio de Compressão Axial.....	92
5.1.2 Ensaio de Módulo de Elasticidade.....	93
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	95
5.2.1 Flecha Imediata.....	95
5.2.2 Deslocamento ao longo do tempo.....	99
5.2.3 Análise da flecha elástica durante descarregamento das vigas.....	106
5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS ANALÍTICOS OBTIDOS ATRAVÉS DAS RECOMENDAÇÕES DA NBR 6118/2003.....	108
5.3.1 Cálculo das flechas.....	109
5.3.2 Cálculo da flecha imediata.....	109
5.3.3 Cálculo da flecha total.....	111
5.3.4 Comparação dos resultados.....	111
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FORMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS.....	115
5.4.1 Modelo computacional.....	115
5.4.2 Formulações de elementos finitos empregadas para o concreto e para o aço.....	116
5.4.3 Propriedades dos materiais dependentes do tempo.....	117
5.4.4 Resultados do Modelo de Elementos Finitos.....	118
5.4.4.1 Resultados considerando a influência da retração.....	118
5.4.4.2 Resultados sem considerar a influência da retração.....	124
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>129</b>
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
6.2 CONSTATAÇÕES E CONCLUSÕES.....	130
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	132
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>134</b>
<b>ANEXO I – CONTROLE TECNOLÓGICO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS.....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXO II – RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.....</b>	<b>141</b>

<b>ANEXO III – RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FORMULAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA.....</b>	<b>148</b>
<b>ANEXO IV – RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FORMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS.....</b>	<b>152</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: a ponte Akashi Kaikyō (fonte: Public Broadcasting Service).....	22
Figura 2.1: composição típica de um CAA em relação a um concreto convencional (Fonte: OKAMURA, OUCHI; 2003).....	31
Figura 2.2: materiais para o ensaio de espalhamento.....	35
Figura 2.3: resultado de ensaio de espalhamento indicando concreto segregado.....	36
Figura 2.4: resultado de ensaio de espalhamento com concreto pouco fluido.....	36
Figura 2.5: resultado satisfatório de ensaio de espalhamento.....	37
Figura 2.6: geometria e aparência do equipamento V-funnel.....	38
Figura 3.1: representação dos componentes da fluência (fonte: Mehta e Monteiro, 1994).....	47
Figura 3.2: reversibilidade da retração por secagem (fonte: Mehta e Monteiro, 1994).....	49
Figura 4.1: correlações entre as variáveis.....	58
Figura 4.2: fluxograma do experimento.....	59
Figura 4.3: modelo de carregamento.....	60
Figura 4.4: diagrama de esforços cortantes resultante da aplicação do carregamento previsto nas vigas ensaiadas.....	61
Figura 4.5: diagrama de esforços cortantes resultante da aplicação do carregamento previsto nas vigas ensaiadas.....	61
Figura 4.6: detalhamento da armadura das vigas.....	62
Figura 4.7: vista da extremidade da viga MC55-V1 apoiada diretamente no pórtico, antes da desforma do restante do elemento.....	62
Figura 4.8: representação esquemática do sistema de fôrma das vigas.....	63
Figura 4.9: pórtico de suporte das vigas – vista frontal.....	64
Figura 4.10: pórtico de suporte das vigas – vista superior.....	64
Figura 4.11: pórtico de suporte das vigas – vista geral.....	66
Figura 4.12: (a) apoio de 1ª ordem e (b) apoio de 2ª ordem.....	66
Figura 4.13: curva granulométrica do agregado graúdo.....	68

Figura 4.14: curva granulométrica do agregado miúdo.....	68
Figura 4.15: granulometria a laser do cimento.....	70
Figura 4.16: curva granulométrica do metacaulim.....	72
Figura 4.17: curva de dosagem do concreto convencional, $\alpha = 55\%$ .....	73
Figura 4.18: curva de dosagem do concreto auto-adensável, $\alpha = 55\%$ .....	76
Figura 4.19: curva de dosagem do concreto auto-adensável, $\alpha = 60\%$ .....	76
Figura 4.20: aparência do traço de CAA $\alpha = 60\%$ antes (a) e depois (b) da incorporação do aditivo VMA no traço.....	79
Figura 4.21: <i>slump Test</i> realizado para o CAA após correção do traço de CAA com $\alpha =$ $60\%$ .....	80
Figura 4.22: vigas prontas para serem moldadas.....	80
Figura 4.23: transporte do concreto auto-adensável.....	81
Figura 4.24: moldagem das vigas com concreto auto-adensável.....	81
Figura 4.25: moldagem dos corpos-de-prova com concreto auto-adensável.....	81
Figura 4.26: acabamento da superfície das vigas.....	82
Figura 4.27: ensaio de abatimento de tronco de cone – CCV.....	83
Figura 4.28: aparato de ensaio de módulo de elasticidade (a) e corpo-de-prova preparado para o ensaio (b).....	85
Figura 4.29: instrumentação do pórtico - relógios 1 e 2.....	86
Figura 4.30: instrumentação do pórtico - relógios 3 e 4.....	86
Figura 4.31: procedimento de leitura dos pinos metálicos 3 e 4.....	87
Figura 4.32: viga posicionada no pórtico de ensaio ainda com o restante da fôrma.....	88
Figura 4.33: superfície inferior da viga diretamente sob o apoio.....	88
Figura 4.34: vista de uma das vigas após a desforma.....	89
Figura 4.35: vista do elemento com metade do carregamento concentrado aplicado.....	89
Figura 4.36: carregamento concentrado completo.....	90
Figura 4.37: posicionamento dos sensores de controle de deformação elástica nos apoios no descarregamento.....	91

Figura 5.1: evolução da resistência à compressão axial.....	93
Figura 5.2: evolução do módulo de elasticidade.....	94
Figura 5.3: comparação dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente e através da NBR 6118.....	95
Figura 5.4: evolução do deslocamento imediato – CAA55-V1.....	96
Figura 5.5: evolução do deslocamento imediato – CAA55-V2.....	96
Figura 5.6: evolução do deslocamento imediato – CCV-V1.....	97
Figura 5.7: evolução do deslocamento imediato – CCV-V2.....	97
Figura 5.8: evolução do deslocamento imediato – CAA60-V1.....	97
Figura 5.9: evolução do deslocamento imediato – CAA60-V2.....	97
Figura 5.10: evolução do deslocamento imediato – centro.....	98
Figura 5.11: evolução do deslocamento imediato – terço médio.....	98
Figura 5.12: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA55 – V1 e V2 - centro.....	100
Figura 5.13: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CCV – V1 e V2 - centro.....	100
Figura 5.14: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA60 – V1 e V2 - centro. ....	101
Figura 5.15: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA55 – V1 e V2 – terço médio. ....	101
Figura 5.16: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CCV – V1 e V2 – terço médio. ....	102
Figura 5.17: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA60 – V1 e V2 – terço médio. ....	102
Figura 5.18: deslocamento ao longo do tempo – comparativo centro.....	103
Figura 5.19: deslocamento ao longo do tempo – comparativo terço médio.....	103
Figura 5.20: registro da temperatura ao longo do tempo.....	104
Figura 5.21: registro de umidade ao longo do tempo.....	104
Figura 5.22: acompanhamento da deformada dos protótipos ao longo do tempo.....	106
Figura 5.23: evolução do deslocamento elástico – CAA55-V1.....	107



Figura 5.24: evolução do deslocamento elástico – CAA55-V2.....	107
Figura 5.25: evolução do deslocamento elástico – CCV-V1.....	107
Figura 5.26: evolução do deslocamento elástico – CCV-V2.....	107
Figura 5.27: evolução do deslocamento elástico – CAA60-V1.....	108
Figura 5.28: evolução da flecha elástica – CAA60-V2.....	108
Figura 5.29: CAA55-V1: comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.....	112
Figura 5.30: CAA55-V2: comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.....	112
Figura 5.31: CCV-V1: comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.....	113
Figura 5.32: CCV-V2: comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.....	113
Figura 5.33: CAA60-V1: comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma. ....	114
Figura 5.34: CAA60-V2: comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma. ....	114
Figura 5.35: modelo reológico dos materiais. ....	117
Figura 5.36: malha de elementos finitos utilizada. ....	118
Figura 5.37: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA55. ....	119
Figura 5.38: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CCV. ....	119
Figura 5.39: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA60. ....	119
Figura 5.40: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA55-V1.....	120
Figura 5.41: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA55-V2.....	121
Figura 5.42: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CCV-V1.....	121

Figura 5.43: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CCV-V2.....	122
Figura 5.44: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA60-V1.....	122
Figura 5.45: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA60-V2.....	123
Figura 5.46: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA55. ....	124
Figura 5.47: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CCV. ....	124
Figura 5.48: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA60.....	124
Figura 5.49: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA55-V1.....	125
Figura 5.50: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA55-V2.....	125
Figura 5.51: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CCV-V1.....	126
Figura 5.52: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CCV-V2.....	126
Figura 5.53: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA60-V1.....	127
Figura 5.54: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA60-V2.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: valores de espalhamento recomendados por diversos autores (fonte: Tutikian, 2004).....	34
Tabela 2.2: valores de escoamento recomendados por diversos autores para o V-funnel Test (fonte: Tutikian, 2004).....	38
Tabela 3.1: classificação básica das deformações do concreto (fonte: Montoya et al., 1979).....	45
Tabela 3.2: valores do coeficiente $\xi$ em função do tempo.....	57
Tabela 4.1: denominação dos modelos de vigas.....	60
Tabela 4.2: composição granulométrica do agregado graúdo. ....	67
Tabela 4.3: composição granulométrica do agregado miúdo.....	67
Tabela 4.4: características físicas do agregado graúdo.....	68
Tabela 4.5: características físicas do agregado miúdo.....	69
Tabela 4.6: análise química do cimento.....	69
Tabela 4.7: características técnicas do aditivo SP (fonte: fabricante).....	70
Tabela 4.8: características técnicas do aditivo VMA (fonte: fabricante).....	71
Tabela 4.9: análise química do metacaulim.....	72
Tabela 4.10: resultados experimentais para o ajuste de curva de dosagem do concreto convencional.....	73
Tabela 4.11: coeficientes e correlações para a curva de dosagem do concreto convencional.....	74
Tabela 4.12: resultados experimentais no estado fresco para o ajuste de curva de dosagem dos concretos auto-adensáveis.....	75
Tabela 4.13: resultados experimentais no estado endurecido para o ajuste de curva de dosagem dos concretos auto-adensáveis.....	75
Tabela 4.14: coeficientes e correlações para as curvas de dosagem dos concretos auto-adensáveis.....	77
Tabela 4.15: constituição, em massa, dos traços empregados.....	78
Tabela 4.16: avaliação dos CAA's no estado fresco.....	79
Tabela 5.1: resultados de resistência média à compressão.....	93

Tabela 5.2: resultados de ensaios de módulo de elasticidade.....	94
Tabela 5.3: valores numéricos das flechas.....	108
Tabela 5.4: valores do módulo de deformação secante.....	109
Tabela 5.5: flecha imediata estimada através da norma e experimental.....	109
Tabela 5.6: estágio de funcionamento das vigas.....	110
Tabela 5.7: valores estimados pela NBR 6118/03 e experimentais para as flechas totais.....	111
Tabela 5.8: valores estimados pelo MEF e experimentais para as flechas imediatas.....	120
Tabela 5.9: valores estimados pelo MEF e experimentais para as flechas ao longo do tempo. ....	123
Tabela 5.10: valores estimados pelo MEF sem retração e experimentais para as flechas imediatas.....	128
Tabela 5.11: valores estimados pelo MEF sem retração e experimentais para as flechas ao longo do tempo. ....	128

## LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: *American Concrete Institute*

CAA: concreto auto-adensável

CAA55: concreto auto-adensável com teor de argamassa igual a 55%

CAA60: concreto auto-adensável com teor de argamassa igual a 60%

CCV: concreto convencional

CCV55: concreto convencional com teor de argamassa igual a 55%

CEB: *Comite euro-intercinal du beton*

CPV-ARI: Cimento Portland V – Alta Resistência Inicial

EASEC: *East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*

EFNARC: *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

kN: kilonewton

LVDT: *linear variable differential transformer*

MEF: método dos elementos finitos

MPa: megapascal

NBR NM: Norma Brasileira Registrada – Norma Mercosul

NBR: Norma Brasileira Registrada

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

SP: aditivo superplastificante

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VMA: aditivo modificador de viscosidade

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O material estrutural mais largamente usado em construção é o concreto, normalmente feito a partir da mistura de cimento Portland com areia, brita e água. Segundo Mehta (1994), o concreto é o material mais usado na engenharia pela excelente resistência à água, pela facilidade com que se executam elementos estruturais de concreto, numa variedade de formas e tamanhos, e por ser facilmente disponível no canteiro de obras, uma vez que os principais ingredientes para sua execução são comumente encontrados na maior parte do mundo.

Naturalmente, com o incremento no número de obras construídas em concreto ao longo do século XX, e com os eventuais problemas de deterioração detectados, a preocupação com a questão da durabilidade do concreto se tornou cada vez maior. Como salienta Neville (1987), é essencial que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto. Portanto, o concreto deve suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido. Nessas condições, o concreto é considerado durável.

Com o avanço da tecnologia dos materiais de construção nas últimas décadas, foi possível manipular propriedades específicas do concreto, com o intuito de adequá-lo a diversas situações, permitindo elevar consideravelmente sua resistência à compressão, trabalhabilidade e durabilidade, em função da natureza dos seus componentes principais e de suas proporções, bem como da utilização de aditivos ou adições.

Várias pesquisas se voltaram para o tema de desenvolvimento de concretos mais econômicos e duráveis. Por exemplo, a partir de 1983, o problema da durabilidade de estruturas de concreto passou a ser um tópico prioritário para pesquisa no Japão. Para fazer estruturas duráveis, os mesmos consideraram que era necessário adensar melhor o concreto, para expulsar o ar incorporado, reduzindo a permeabilidade, de forma a minimizar o ingresso e a ação de agentes agressivos no concreto e contribuindo para o alcance de resistências mecânicas mais elevadas. Entretanto, foi diagnosticado que a escassez de trabalhadores hábeis conduzia a uma redução na qualidade do trabalho da construção civil no Japão. Uma solução

para alcançar melhoras no desempenho das estruturas de concreto, independentemente da qualidade do trabalho dos operários, foi o emprego do concreto auto-adensável (CAA), o qual dispensa a etapa de vibração (OUCHI; HIBINO, 2001).

Estudos iniciais para o desenvolvimento do CAA, incluindo um estudo da trabalhabilidade deste concreto, foram realizados por Ozawa e por Maekawa na Universidade de Tóquio, sendo que o primeiro protótipo foi concluído em 1988 (OKAMURA; OUCHI, 2003). Dentre as inúmeras razões pelas quais o concreto auto-adensável vem sendo cada vez mais utilizado, pode-se citar a capacidade de espalhar-se devido ao seu peso próprio, sem necessidade de adensamento adicional, reduzindo os ruídos devido à necessidade de vibração. Desta forma, facilita as operações nos canteiros de obras e contribui para melhorar a aparência e a durabilidade do concreto endurecido.

Um exemplo importante de aplicação do concreto auto-adensável ocorreu na ponte *Akashi Kaikyo* (figura 1.1). Atualmente, esta é a ponte pênsil mais longa do mundo, tendo 1991 metros de vão central sobre o estreito de *Akashi*, ligando a cidade de *Kobe* com a ilha de *Awaji-shima*. O volume de CAA empregado em sua execução foi de 290.000m<sup>3</sup> e sua utilização permitiu encurtar o período de construção em 20%, reduzindo o mesmo de 2,5 para 2 anos, segundo Ouchi e Hibino (2001).



Figura 1.1: a ponte *Akashi Kaikyo* (fonte: *Public Broadcasting Service*).

O desenvolvimento do concreto auto-adensável vem ao encontro das necessidades modernas e a uma visão voltada para a eficiência e melhoria do funcionamento de canteiros de obras e da indústria de pré-moldados (GRUNEWALD, 2004). Khayat e Daczko (2002) afirmam que as variáveis influentes na definição de um traço de CAA devem ser examinadas e manipuladas para obter as características de desempenho desejadas e otimizar as proporções da mistura. Complementam ainda que o concreto auto-adensável tem o potencial de revolucionar a indústria da construção.

Diante desta nova realidade que se consolida, na qual o CAA começa a ganhar um espaço cada vez maior nas obras, é natural que vários países e instituições venham buscando desenvolver um conhecimento científico mais aprofundado sobre o concreto auto-adensável, através de investimentos de vulto para a realização de estudos e pesquisas sobre esse novo material (MANUEL, 2005). Esta pesquisa se direciona nesta linha, analisando o desempenho, em termos de deformação ao longo do tempo, de vigas de CAA, em comparação a vigas de concreto convencional, como detalhado a seguir.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Em virtude do elevado emprego de aços de alta resistência, da melhoria da qualidade do concreto e da utilização de seções mais esbeltas, necessita-se de uma determinação mais precisa dos mecanismos de deformação em elementos estruturais de concreto armado (MANTESE; MANTESE, 1981).

Como explica Araújo (2003), o comportamento reológico do concreto, isto é, sua deformabilidade dependente do tempo, tem uma considerável importância na análise estrutural. As deformações diferidas do concreto, ou seja, as deformações dependentes do tempo, são principalmente devidas à fluência, acréscimo contínuo das deformações que ocorre sob ação de uma tensão constante. Verifica-se experimentalmente que uma parcela da deformação de fluência é recuperável, pois corresponde à deformação elástica, enquanto outra parcela é irrecuperável, pois corresponde à deformação plástica diferida.

O fenômeno da fluência apresenta uma série de conseqüências indesejáveis, tais como: aumento das flechas nas lajes e vigas, perdas de protensão em estruturas de concreto protendido, aumento da curvatura de pilares, introdução de esforços adicionais, dentre outros. Devido à sua magnitude, estas deformações, ditas lentas ou de longo prazo, são de



fundamental importância para o desempenho satisfatório de um elemento estrutural em serviço. Elas afetam não somente o desempenho do próprio elemento, mas toda a estrutura da qual este faz parte, pois não só afetarão o comportamento em serviço como causarão efeitos deletérios sobre os elementos não estruturais ligados aos estruturais, que sejam suscetíveis a estas deformações (RUIZ; DUTARI, 1992).

Com a entrada em vigor da nova NBR 6118 (ABNT, 2003) - Projeto de estruturas de concreto, os projetos de estruturas de concreto no Brasil passaram a ser encarados sob um outro prisma, uma vez que a nova norma determina um processo de cálculo mais rigoroso. Apontando uma maior preocupação com a vida útil das estruturas, a norma brasileira inseriu em seu texto a obrigatoriedade da consideração das deformações devido à fluência, controle de fissuração e deslocamentos. Esta busca pelo melhor desempenho e durabilidade dos elementos estruturais contribui para a durabilidade global dos demais elementos do sistema construtivo, como alvenaria e revestimento, por exemplo.

Em virtude dos efeitos do envelhecimento, a fluência depende, além da duração do carregamento, da idade de aplicação de cargas. É razoável supor que alterações na constituição do concreto venham a influenciar o comportamento à fluência. Pode ser o caso do aumento no teor de argamassa e da redução de volume dos agregados, que acontece no caso dos concretos auto-adensáveis.

Assim como a deformação depende das características e da reologia do concreto, seria razoável supor que concretos auto-adensáveis deveriam apresentar um comportamento, frente às deformações, diferente dos tradicionais. Portanto, é imprescindível o desenvolvimento de estudos para verificar se as prescrições encontradas são capazes de estimar o comportamento dos CAA quanto às deformações em longo prazo. Mais ainda, é fundamental verificar se as estimativas da norma se adequam ao uso de concretos auto-adensáveis e desenvolver modelos que possam estimar adequadamente a fluência efetiva que vai ocorrer para diferentes tipos de concretos.

É interessante destacar que a presente pesquisa se relaciona com dois grupos de pesquisas anteriores desenvolvidas no PPGECC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. As pesquisas de Baroni (2003) e Salvador (2007) estudaram o comportamento, em termos de deformação lenta, de vigas de concreto armado e de concretos especiais (com fibras e concreto branco). Tutikian (2004) desenvolveu um método de dosagem de concretos auto-

adensáveis, enquanto Manuel (2007) estudou a influência do teor de argamassa nos concretos auto-adensáveis. Esta pesquisa toma as anteriores como base, unindo os dois temas e ampliando o universo de dados e de comparações possíveis.

### 1.3 OBJETIVOS

Visando colaborar para um melhor e mais profundo conhecimento sobre as propriedades de concretos auto-adensáveis no estado endurecido, o que é considerado essencial devido à crescente utilização deste tipo de concreto, essa pesquisa estabeleceu, como objetivo principal, a coleta e avaliação de dados acerca da evolução das deformações instantânea e lenta de vigas de concretos auto-adensáveis sob um determinado carregamento constante.

Como objetivos secundários, pretende-se:

- a) comparar o comportamento, relativo a deformações instantânea e lenta, de um concreto convencional e de um concreto auto-adensável com igual teor de argamassa.
- b) comparar o comportamento, relativo a deformações instantânea e lenta, de dois concretos auto-adensáveis com dois diferentes teores de argamassa;
- c) avaliar a resistência à compressão e módulos de elasticidade de concretos auto-adensáveis com dois diferentes teores de argamassa;
- d) avaliar a resistência à compressão e módulos de elasticidade dos concretos produzidos;
- e) ao comparar as deformações de concretos auto-adensáveis e convencionais, busca-se, ainda, determinar se a mudança de concreto muda o regime de deformações e se deve implicar em mudanças nos critérios normativos;
- f) verificar como se correlacionam as estimativas de norma com as medições efetivas de deformações;
- g) analisar se um modelo de estimativa de deformações baseado no método de elementos finitos, considerando as variações de temperatura e umidade, é capaz de estimar o comportamento, em termos de deformação, de vigas de concreto convencional e auto-adensável.

## 1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As principais limitações da presente pesquisa estão associadas à necessidade de limitar as variáveis de estudo, viabilizando a realização do trabalho no tempo estipulado para a elaboração de uma dissertação de mestrado. Além disto cabe ressaltar que:

- a) as condições ambientais, especialmente temperatura e umidade, serão apenas monitoradas e não controladas, pela carência de uma câmara de exposição ambiental específico para este fim que pudesse conter as vigas ensaiadas;
- b) o tempo de experimento foi pré-determinado em 5 meses, período representativo do ciclo temperatura/umidade típico do Rio Grande do Sul mas que não contemplam um ciclo anual completo;
- c) limitaram-se os experimentos a vigas moldadas com dois teores de argamassa e submetidas a uma mesma configuração de carregamento, constante e aplicado em uma mesma data;
- d) foram escolhidos apenas um tipo de cimento, um tipo agregado graúdo, um tipo de agregado miúdo, um tipo de adição e um tipo de aditivo para confecção dos concretos.

Cabe ressaltar que a maioria dos materiais empregados é de origem local, comumente encontrados neste Estado e, portanto, futuras comparações de resultados obtidos neste trabalho com estudos que usem materiais de outras regiões devem levar em consideração este fato.

## 1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

No primeiro capítulo é feita uma introdução à pesquisa, apresentando a contextualização do tema, a importância e a justificativa para o seu desenvolvimento. São enumerados os objetivos principais e secundários, bem como as delimitações da pesquisa e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma revisão sobre o concreto auto-adensável, abrangendo a definição, o histórico, as propriedades e vantagens. Também é descrita a dosagem do concreto convencional e do auto-adensável, matérias em estudo nesta pesquisa.

No terceiro capítulo é apresentada uma revisão conceitual sumária sobre as deformações do concreto, focando nos mecanismos envolvidos com a deformação lenta do concreto armado. Esta revisão é realizada baseando-se na literatura disponível e na norma brasileira.

No quarto capítulo é descrita a metodologia de pesquisa, detalhando o programa experimental. Este capítulo contém a descrição dos processos dos experimentos, como a caracterização e confecção das vigas, a descrição dos materiais utilizados, tipo de carregamento e a instrumentação.

No quinto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados, fazendo as constatações pertinentes. Além dos resultados e discussões do ensaio proposto, é feita também uma comparação dos dados obtidos com a análise através de elementos finitos e com o que preconiza a norma brasileira.

No sexto e último capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros na área, de modo a continuar o estudo das deformações instantâneas e de longo prazo de concretos auto-adensáveis e outros concretos especiais.

## 2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

O termo concreto auto-adensável, como utilizado atualmente, se refere a um tipo especial de mistura, caracterizada pela alta fluidez e elevada resistência à segregação, resultando em um concreto que pode ser moldado sem compactação ou vibração. Ademais, a mistura, enquanto flui na forma de concretagem, é capaz de expulsar quase completamente o ar contido na mistura. Conforme cita Bosiljkov (2003, apud Tutikian 2004), a auto-adensabilidade no estado fresco é descrita como a habilidade do material de preencher espaços e envolver as barras de aço e outros obstáculos, através exclusivamente da ação da força da gravidade, mantendo uma homogeneidade adequada.

### 2.1 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO

Embora a técnica de execução de concretos auto-adensáveis esteja recebendo maior atenção e venha conquistando uma importante parcela de mercado na última década, Collepari (2001) ressalta que os dados disponíveis na literatura internacional indicam que concretos não segregantes e auto-nivelantes já eram estudados em 1975 e 1976. Naquela época, todavia, o nível máximo do abatimento de tronco de cone admitido pelo ACI - *American Concrete Institute*, era de 175 mm, o que limitava o uso de misturas muito fluidas.

Na verdade, antes mesmo do advento dos superplastificantes e de outros produtos semelhantes, já existiam situações nas quais o concreto necessitava ser lançado em condições que tornavam a compactação impraticável. As concretagens submersas, as concretagens de estacas e o preenchimento de espaços inacessíveis exigiam misturas com um comportamento reológico no estado fresco que possibilitasse que as mesmas fossem lançadas sem serem compactadas.

Conforme indicações de Collepari (2001), no início da década de 80, misturas precursoras do CAA já estavam disponíveis, não só para estudos laboratoriais, mas também para uso prático em importantes aplicações. Segundo o mesmo, várias análises de casos, incluindo concretos auto-nivelantes lançados sem compactação alguma, foram publicadas por volta de 1980. Neste período, têm-se indicações do uso de concretos reoplásticos para uso submerso, os

quais exploravam o auto-nivelamento subaquático sem vibração, bem como a grande coesão da mistura, para minimizar a dispersão causada pela água do mar.

Segundo Ouchi e Hibino (2001), a idéia de ampliar o campo de aplicação deste tipo de mistura de concreto, para além das aplicações submersas ou com dificuldades de concretagem, foi sugerida pelo professor Hajime Okamura, da Universidade de Tóquio, em 1986. Nesta Universidade foram levados a cabo os primeiros estudos para desenvolver e caracterizar o concreto auto-adensável, como conhecido hoje, começando por um estudo fundamental sobre a trabalhabilidade deste tipo de concreto, desenvolvido pelos pesquisadores Kazumasa Ozawa e Koichi Maekawa<sup>1</sup>.

O primeiro protótipo de um concreto auto-adensável moderno foi moldado em 1988, utilizando materiais já existentes no mercado. Conforme explica Nunes (2001), no ano seguinte, na Universidade de Tóquio, foi realizada uma demonstração do funcionamento deste novo material no estado fresco, para a qual foram convidados cerca de uma centena de investigadores e engenheiros, especialistas na área do concreto.

Continuando com o desenvolvimento do CAA, em janeiro de 1989 Ozawa apresentou o primeiro artigo sobre este novo material no *2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2)*. Mais tarde, a apresentação de Ozawa no “*CANMET & ACI International Conference*” em Istambul, em maio de 1992, permitiu a divulgação do conceito do concreto auto-adensável pelo mundo inteiro. O novo material proposto despertou o interesse de vários centros, que anteviram no mesmo a possibilidade de obter um concreto mais econômico, pela redução do trabalho para compactação, e com melhor qualidade superficial. Desde então, o conceito do concreto auto-adensável se popularizou e conquistou os mais renomados centros de estudos e investigações, com um número sempre crescente de aplicações, a ponto da *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC)* afirmar que o concreto auto-adensável é o mais revolucionário desenvolvimento na construção por diversas décadas.

Dada a grande aceitação deste material, começaram a surgir cada vez mais estudos relativos à caracterização de suas propriedades e de seu comportamento estrutural. Como descrito no

---

<sup>1</sup> Ozawa K., Kunishima, M., Maekawa, K. and Ozawa, K.: *Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Vol. 1, pp. 445-450, January 1989*

Capítulo 1, este trabalho se orienta neste sentido, ao avaliar como respondem vigas moldadas com concreto auto-adensável, em termos de deformação instantânea e de longo prazo.

## 2.2 VANTAGENS

A ausência da etapa de compactação determina uma vantagem fundamental do concreto auto-adensável sobre o concreto convencional, pois o último depende diretamente de uma compactação eficiente durante a concretagem, para atingir a resistência e a durabilidade demandadas. Uma compactação insuficiente tem como consequência uma redução drástica do desempenho estrutural, independentemente da qualidade da produção e da própria composição do material.

A eliminação da etapa de compactação oferece muitas vantagens para a prática da construção, como a redução de custos de material e mão-de-obra - um importante fator nos Estados Unidos e na Europa, devido ao elevado custo da mão-de-obra - e a redução do tempo necessário para a moldagem de um elemento estrutural. Adicionalmente, a supressão da etapa de vibração reduz a poluição sonora durante a concretagem, qualificando o ambiente de trabalho para os operários envolvidos nesta atividade e contribuindo também para o meio-ambiente. Ainda, diminui o barulho que afeta as pessoas em lugares adjacentes à zona de construção, ampliando o potencial de construção de edificações em áreas urbanas densamente povoadas.

Outro ganho ambiental obtido com a utilização do CAA, resulta da possibilidade de reaproveitamento de finos em sua produção como, por exemplo, o pó-de-brita, que freqüentemente não é aproveitado e acaba por ser despejado em rios, causando assoreamentos e poluição. No concreto auto-adensável, que demanda uma grande quantidade de finos, esse material substitui até 65% da areia natural, o que, conseqüentemente, acarreta uma menor exploração das jazidas de areia.

Através do emprego do CAA se alcança excelente qualidade da superfície de acabamento do elemento concretado. Esta característica se deve à homogeneidade da mistura, adquirida com o uso de uma maior quantidade de materiais finos, e à característica auto-nivelante deste concreto, que reduz a necessidade de acabamento de elementos horizontais verticais, permitindo a obtenção de superfícies suaves, uniformes e livres de imperfeições (Nunes, 2001). A característica auto-nivelante do CAA permite, ainda, maior liberdade na

determinação dos pontos de lançamento do concreto nas fôrmas, reduzindo o trânsito de caminhões-betoneira no canteiro de obras e a movimentação de bombas de concretagem. Desta forma, obtém-se uma melhor produtividade no processo de construção e se tem maior liberdade de projeto, possibilitando a adoção de seções mais esbeltas e de geometrias mais complexas.

### 2.3 COMPONENTES DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Holschemacher e Klug (2002) explicam que os componentes básicos empregados em uma mistura de CAA são os mesmos usados no concreto convencional. No entanto, para obter as propriedades desejadas do concreto auto-adensável no estado fresco, é necessária a incorporação de uma proporção mais elevada de materiais finos e de aditivos químicos. A figura 2.1 apresenta um exemplo de composição do concreto auto-adensável em comparação a um concreto convencional, em proporção do volume de seus componentes.

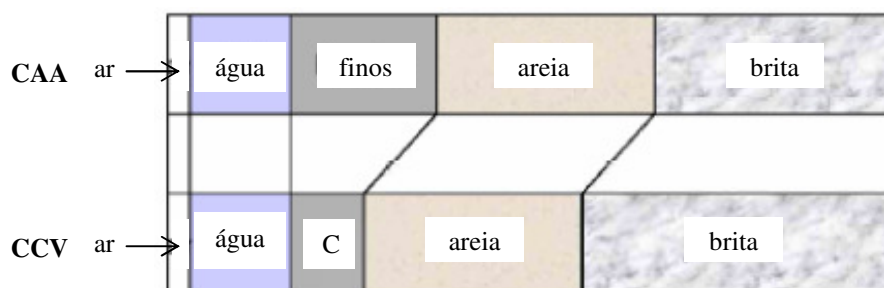


Figura 2.1: composição típica de um CAA em relação a um concreto convencional (Fonte: OKAMURA, OUCHI; 2003).

Nota-se que o CAA emprega uma quantidade maior de finos do que o concreto convencional, com o intuito de diminuir o potencial de segregação. Os materiais finos abrangem as partículas com dimensões inferiores a  $125\mu\text{m}$  e podem ser classificados em pozzolânicos<sup>2</sup> (tais como a cinza de casca de arroz, o metacaulim e a sílica ativa, dentre outros) e não pozzolânicos (como o fíler calcáreo e a fração mais fina da areia). Se os finos forem pozzolânicos os mesmos substituirão o cimento, em massa, já se forem não pozzolânicos, substituirão o agregado miúdo, em massa.

<sup>2</sup> Como é de conhecimento geral, a pozzolanicidade de um material está associada à capacidade do mesmo de, na presença de água, reagir com o hidróxido de cálcio, formando compostos secundários com capacidade cimentante.



A adição de finos no CAA proporciona a melhoria de diversas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Acredita-se que os finos auxiliem as partículas de cimento a sofrer reação mais rápida com a água, ocasionando ganhos de resistências nas primeiras idades. Atuam ainda no aumento do pacote de finos, fazendo com que haja um crescimento na densidade da pasta, dificultando a penetração de agentes agressivos.

Outro elemento imprescindível para a formulação do CAA é o aditivo superplastificante. Este tipo de aditivo químico é adicionado ao concreto para torná-lo mais trabalhável. Podem ser obtidos a partir de lignosulfonatos, sendo os mais conhecidos os superplastificantes à base de naftaleno formaldeído sulfonado ou de melamina formaldeído sulfonado. Gerações mais novas de superplastificantes de alto alcance, apropriados para o uso na produção de CAA, vem sendo desenvolvidas a partir de éteres policarboxílicos.

A função dos superplastificantes é dispersar as partículas de cimento floculadas, mediante um mecanismo de repulsão eletrostática. Nos plastificantes normais, as substâncias ativas são adsorvidas sobre as partículas de cimento, carregando-as negativamente, o que provoca a repulsão entre elas. Nos superplastificantes de naftaleno e de melamina, que são polímeros orgânicos, as moléculas grandes "abraçam" as partículas de cimento, conferindo-lhes uma carga altamente negativa, que provoca uma grande repulsão entre elas.

Adicionalmente ao aditivo superplastificante, pode-se empregar, também, na confecção de um CAA, aditivos modificadores de viscosidade, que interagem com o aditivo superplastificante quando se faz necessária a execução de uma mistura com alta viscosidade e boa trabalhabilidade. O aditivo aumenta a coesão, prevenindo a segregação e exsudação.

A frequência de colisão e contato entre partículas de agregados induz ao surgimento de tensões internas, que consomem a energia necessária para que as partículas se dispersem adequadamente na CAA, resultando no bloqueio destas partículas quando passam por obstáculos. Desta forma, a viscosidade do CAA é geralmente maior do que outros tipos de concretos, característica que, além de evitar o bloqueio dos agregados na passagem por obstáculos, previne o surgimento de tensões internas e inibe a segregação (OKAMURA, OUCHI; 2003).

Em alguns casos, o custo de fabricação do concreto auto-adensável pode ser superior ao custo de um concreto tradicional vibrado. No entanto, quando o CAA é utilizado racionalmente, a redução de custos causados por uma melhor produtividade, menor tempo de execução, menor

número de operários empregados no processo irá compensar os custos mais elevados dos materiais e, em muitos casos, pode resultar em um orçamento mais favorável em relação ao produto final (HOLSHEMACHER; KLUG, 2002).

## 2.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO

As principais mudanças de comportamento do CAA, em relação ao concreto convencional, estão relacionadas com a sua reologia no estado fresco. Grunewald (2004) observa que a trabalhabilidade do CAA é mais elevada do que a de concretos convencionais, e pode ser caracterizada pelas seguintes propriedades:

- a) Habilidade de fluir e passar por obstáculos: é requerida para garantir uma distribuição homogênea dos componentes do CAA na vizinhança dos obstáculos;
- b) Fluidez: o CAA deve preencher todo o espaço dentro da fôrma e fluir no sentido horizontal e vertical sem manter o ar aprisionado dentro do concreto ou na superfície. As forças que dirigem este processo são: o peso próprio do concreto e a energia potencial do trajeto;
- c) Resistência à segregação: é a resistência dos componentes do CAA à separação. As partículas que têm alta densidade ou uma relação baixa de volume-superfície são mais propensas à segregação.

Conforme a EFNARC (2002), muitos métodos diferentes de teste foram desenvolvidos na tentativa de caracterizar as propriedades do CAA no estado fresco. Até hoje, entretanto, nenhum método ou combinação dos métodos conseguiu se consolidar como referência consensual. Similarmente, nenhum método que caracteriza todos os aspectos relevantes da trabalhabilidade foi encontrado. Assim, cada lote de mistura deve ser testado por mais de um método, para que se verifique seu desempenho em termos de diferentes parâmetros de trabalhabilidade. A maioria dos métodos de teste e dos requisitos existentes é indicada para misturas com tamanho de agregado graúdo de até 20 milímetros. Em caso de diâmetros maiores, ou de armaduras muito densas, os equipamentos devem ser modificados.

Ainda em relação a estes testes, ainda não foi estabelecida uma ligação clara entre o desempenho experimental e o desempenho em canteiro de obras das misturas testadas. Os dados existentes sobre eficiência dos métodos são escassos. Também não foi estabelecida,

ainda, a relação entre os resultados de alguns testes e as características reológicas efetivas do concreto quando lançado nas fôrmas. Desta forma, a seleção de procedimentos de ensaio para controlar a trabalhabilidade, característica fundamental dos CAAs, fica a cargo de cada pesquisador.

A seguir serão apresentadas as bases teóricas dos dois procedimentos utilizados na fase experimental desta dissertação para avaliar as propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco.

Alguns fatores foram limitantes para determinar o número de ensaios a utilizar, quais sejam: os recursos financeiros necessários para a confecção de diferentes aparatos; o reduzido número de componentes da equipe de concretagem, para realização de vários ensaios simultâneos; e a preocupação com o tempo de ensaio da mistura no estado fresco. Quanto maior o número de ensaios empregados após a mistura dos materiais, maior o tempo de espera antes da moldagem das vigas e dos corpos-de-prova, o que poderia afetar a qualidade do concreto moldado e a veracidade dos resultados dos múltiplos ensaios no estado fresco. Por estas razões, dentre a gama de opções de procedimentos disponíveis, optou-se por utilizar os dois ensaios de avaliação descritos a seguir que, conjuntamente, são capazes, na opinião da autora, de fornecer uma clara e suficiente avaliação das condições da mistura no estado fresco.

#### 2.4.1 Ensaio de espalhamento (*Slump Flow Test*)

O ensaio de espalhamento é usado para avaliar o fluxo livre horizontal do CAA na ausência de obstruções. Sua metodologia baseia-se no Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone. Este teste abrange um procedimento simples e rápido, sendo um dos mais usados para este fim. O mesmo fornece uma boa avaliação da habilidade de preenchimento e indicação da resistência à segregação, porém não da habilidade do concreto à passagem entre a armadura sem obstrução (EFNARC, 2002).

Para a realização do ensaio são necessários um cone de Abrams e uma base quadrada de material não absorvente, com pelo menos pelo menos 700 mm de lado, conforme mostra a figura 2.2. O procedimento de ensaio consiste em umedecer a base e o interior do cone, posicionando-o no centro da mesma. O cone é então preenchido até o topo, com aproximadamente 6 litros de concreto, como no ensaio de abatimento usado com o concreto convencional, porém sem compactação. Deve-se, então, levantar o cone verticalmente,

permitindo que o concreto flua livremente. O resultado é dado pelo diâmetro final da zona de espalhamento do concreto, medida em dois sentidos perpendiculares. Este valor é tomado como indicativo da capacidade de fluidez da mistura. A tabela 2.1 mostra valores recomendados por diferentes pesquisadores para o diâmetro médio de espalhamento.



Figura 2.2: materiais para o ensaio de espalhamento.

Tabela 2.1: valores de espalhamento recomendados por diversos autores (fonte: Tutikian, 2004).

Referência	Diâmetro de Espalhamento (mm)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC (2002)	650	800
Gomes (2002)	600	700
Gomes et al. (2003a)	600	750
Araújo et al. (2003)	650	800
Rigueira Victor et al. (2003)	600	800
Barbosa et al. (2002)	550	700
Peterssen (1999)	650	725
Coppola (2000)	600	750
Palma (2001)	650	750

O ensaio de espalhamento é um dos métodos mais simples para avaliar a resistência à segregação de um concreto com alta fluidez, através de observação visual, conforme pode-se

verificar comparando as figuras 2.3 a 2.,5, que mostram registros fotográficos de resultados deste ensaio.

A figura 2.3 mostra um concreto auto-adensável segregado, caracterizado pelo acúmulo de brita no centro do círculo, e pela separação do agregado graúdo da pasta cimentícia, indicado pela presença de uma camada de pasta sem brita nas bordas do círculo. Já a figura 2.4 apresenta um CAA com pouca fluidez, que tem pouca capacidade de espalhar-se livremente. A figura 2.5 apresenta um resultado satisfatório de ensaio de espalhamento.



Figura 2.3: resultado de ensaio de espalhamento indicando concreto segregado.



Figura 2.4: resultado de ensaio de espalhamento com concreto pouco fluido.



Figura 2.5: resultado satisfatório de ensaio de espalhamento.

#### 2.4.2 *V-funnel Test*

O principal item de equipamento empregado para este teste consiste em um funil em forma de “V”, conforme mostra a figura 2.6. Um tipo alternativo de funil, com forma circular, também é usado no Japão. O *V-funnel Test* é usado para determinar a habilidade de um concreto em fluir por um estreitamento de canal. O funil é preenchido com aproximadamente 12 litros de um concreto com agregado máximo de 20mm, sendo medido o tempo para que o material passe através do instrumento.

O funil deve ser posicionado em solo firme e nivelado, e as suas superfícies internas devem ser umidificadas, com retirada da água em excesso. Com a portinhola inferior fechada, o funil é preenchido com aproximadamente 12 litros de concreto, sem compactação. Após a colocação do concreto, a porta inferior é aberta e se aciona um cronômetro para medir o tempo que o material leva para correr através do instrumento.

Este teste mede a facilidade de fluxo do concreto, sendo que, quanto menor o tempo medido maior a fluidez do concreto. Tempos elevados de fluxo podem estar associados a uma baixa deformabilidade, devido à viscosidade elevada da pasta, ou com uma alta fricção interpartículas. A tabela 2.2 indica alguns valores de tempo de escoamento recomendados para o *V-funnel Test*.

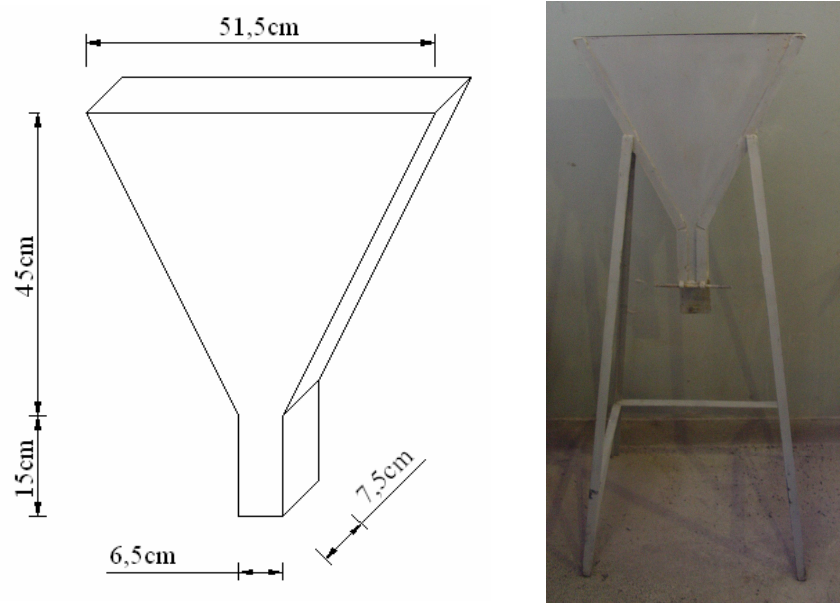


Figura 2.6: geometria e aparência do equipamento *V-funnel*.

Tabela 2.2: valores de escoamento recomendados por diversos autores para o *V-funnel Test* (fonte: Tutikian, 2004).

Referência	Tempo de Escoamento (s)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC (2002)	6	12
Gomes (2002)	10	15
Gomes et al. (2003a)	7	13
Araujo et al. (2003)	6	12
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5
Peterssen (1999)	5	15

## 2.5 DOSAGEM DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

A heterogeneidade dos materiais que compõem os concretos e a complexidade do seu comportamento, tanto no estado fresco quanto no endurecido, representa sempre um desafio aos técnicos responsáveis pela fabricação e emprego de concretos (HELENE; TERZIAN, 1992). A seguir se apresenta como foram dosados os concretos auto-adensáveis utilizados nesta pesquisa. Como base de comparação, faz-se uma breve revisão dos conceitos de dosagem de concreto convencional também empregados no trabalho.

### 2.5.1 Dosagem do concreto convencional

Para a dosagem do concreto convencional utilizou-se o Método do IPT/USP (HELENE; TERZIAN, 1992), onde o diagrama de dosagem é obtido através da determinação de três pontos de uma curva de dosagem, que representem concretos com mesmo teor de argamassa e trabalhabilidade semelhante. Os traços, denominados, como de costume, rico, intermediário e pobre, que foram adotados para construir a curva tinham relações cimento: materiais secos (m) de: 1:3, 1:4,5 e 1:6, respectivamente.

O teor ideal de argamassa foi determinado experimentalmente, empregando-se os mesmos materiais que originaram a curva de dosagem, seguindo-se o procedimento recomendado pelo método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Partindo do traço intermediário 1:4,5, definiu-se, por tentativas e observações práticas, um teor de argamassa que proporcionasse o completo preenchimento dos vazios das britas. Geralmente, este teor fica em torno de 50%. No presente caso, todavia, o teor selecionado foi de 55%. Este teor mais elevado foi selecionado por que desejava, para fins de comparação, fabricar um concreto auto-adensável com o mesmo teor de argamassa, o que não seria viabilizado se fossem adotados teores menores. O teor adotado conferiu um bom acabamento superficial para o concreto convencional.

Para a determinação dos demais traços, fixou-se a trabalhabilidade do concreto em  $100 \pm 20$ mm, sem o emprego de aditivos, determinada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, ou *slump*, realizado conforme a norma *NBR NM 67* (ABNT, 1998) – *Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone*.

A elaboração do diagrama de dosagem é feita segundo leis e correlações, obtidas ao longo dos anos por outros pesquisadores (Abrams, Lyse e Gilberto Molinari, entre outros), descritas pelas equações 2.1 a 2.9.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{(K_2^{a/c})} \quad (\text{eq. 2.1})$$

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad (\text{eq. 2.2})$$

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot a/c} \quad (\text{eq. 2.3})$$



$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 2.4})$$

$$m = a + p \quad (\text{eq. 2.5})$$

$$C = \frac{\gamma}{(1 + a + p + a/c)} \quad (\text{eq. 2.6})$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\left( \frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c \right)} \quad (\text{eq. 2.7})$$

$$A = C.a/c \quad (\text{eq. 2.8})$$

$$Cu = C.\$c + C.a.\$a + C.p.\$p + C.a/c.\$ag \quad (\text{eq. 2.9})$$

Onde:  $f_{cj}$  = resistência à compressão axial, à idade j, em MPa;

$a/c$  = relação água/cimento em massa, em kg/kg;

$a$  = relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

$p$  = relação agregado graúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

$m$  = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

$\alpha$  = teor de argamassa seca, deve ser constante para determinada situação, em kg/kg;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  e  $k_6$  = constante que dependem exclusivamente dos materiais (cimentos, aditivos, agregados);

$C$  = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

$\gamma$  = massa específica do concreto, em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_c$  = massa específica do cimento, em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_a$  = massa específica agregado miúdo, em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_p$  = massa específica agregado graúdo, em kg/dm<sup>3</sup>;

$a_r$  = teor de ar incorporado e/ou aprisionado, em dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$A$  = consumo de água potável por metro cúbico adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

$C_u$  = custo do concreto por metro cúbico;

$\$c$  = custo do kg de cimento;

$\$a$  = custo do kg de agregado miúdo;

$\$p$  = custo do kg de agregado graúdo;

$\$ag$  = custo do litro de água potável.

### 2.5.2 Dosagem do concreto auto-adensável

O método empregado para dosagem do concreto auto-adensável foi desenvolvido por Tutikian (2004), no PPGEC/UFRGS. O mesmo parte do princípio de que, para dosar um traço adequado, deve-se começar definindo os teores dos quatro componentes básicos: cimentos, agregados miúdo e graúdo e água. Em seguida se adiciona o(s) aditivo(s) e o(s) material(ais) fino(s). Seguindo a filosofia do método IPT/EPUSP para concretos convencionais, este procedimento propõe que se molde três traços de concreto da mesma família, para então, se obter o diagrama de dosagem. A seguir, apresentam-se os passos para a dosagem do CAA, baseado no modelo proposto por Tutikian (2004):

- a) Escolha dos materiais;
- b) Determinação do teor de argamassa;
- c) Determinação dos traços – rico, pobre e intermediário;
- d) Colocação do(s) aditivo(s) e conseqüente segregação;
- e) Acerto dos finos por substituição;
- f) Realização de ensaios de trabalhabilidade até o CCV virar CAA;
- g) Ensaios de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias;
- h) Desenho do diagrama.

Os teores de argamassa adotados para confecção do concreto auto-adensável foram 55% e 60%, valores selecionados com base em estudos anteriores realizados com os mesmos materiais utilizados nesta pesquisa. Tutikian (2004) empregou um teor de argamassa de 53% em seu trabalho, mas para os materiais deste trabalho este teor não se mostrou adequado, sendo necessário incrementá-lo para 55%. Já Manuel (2005), em um estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis, encontrou como teor ótimo o valor de 60%..

Para a confecção experimental dos três traços necessários para a montagem do diagrama, procurou-se adequar os resultados do CAA no estado fresco aos valores recomendados no item 2.4.

A obtenção do diagrama de dosagem do CAA foi realizada de forma semelhante à do concreto convencional, alterando-se parte das equações envolvidas para a consideração dos finos e aditivos envolvidos, conforme indicam as equações 2.10 a 2.20.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{(K_2^{a/agl})} \quad (\text{eq. 2.10})$$

$$m = k_3 + k_4 \cdot a / agl \quad (\text{eq. 2.11})$$

$$MC = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot a / agl} \quad (\text{eq. 2.12})$$

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 2.13})$$

$$m = a + p \quad (\text{eq. 2.14})$$

$$C = \frac{\gamma}{(1 + a + p + a / c)} \quad (\text{eq. 2.15})$$

$$MC = \frac{(1000 - ar)}{\left( \frac{c}{\gamma_c} + \frac{fp}{\gamma_{fp}} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a / agl \right)} \quad (\text{eq. 2.16})$$

$$C = MC \cdot C\% \quad (\text{eq. 2.17})$$

$$FP = 1 - C \quad (\text{eq. 2.18})$$

$$A = MC.a / agl \quad (\text{eq. 2.19})$$

$$C_u = C.c + C.fp + C.a + C.p + C.a / agl + C.SP\% + C.MV\% \quad (\text{eq. 2.20})$$

Onde:

$f_{cj}$  = resistência à compressão axial, à idade  $j$ , em MPa;

$a/agl$  = relação água/aglomerante em massa, em kg/kg;

$c$  = relação cimento/aglomerantes em massa, em kg/kg;

$fp$  = relação finos/aglomerantes em massa, em kg/kg;

$m$  = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

$\alpha$  = teor de argamassa seca, deve ser constante para determinada situação, em kg/kg;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  e  $k_6$  = constante que dependem exclusivamente dos materiais (cimentos, aditivos, agregados);

$C$  = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

$MC$  = consumo de materiais aglomerantes por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

$FP$  = consumo do fino pozolânico por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

$SP\%$  = dosagem de aditivo superplastificante por metro cúbico de concreto adensado, em l/m<sup>3</sup>;

$VMA\%$  = dosagem de aditivo modificador de viscosidade por metro cúbico de concreto adensado, em l/m<sup>3</sup>;

$\gamma$  = massa específica do concreto, em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_c$  = massa específica do cimento, em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_{fp}$  = massa específica dos finos pozolânicos, em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_a$  = massa específica agregado miúdo, em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_p$  = massa específica agregado graúdo, em kg/dm<sup>3</sup>;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado, em dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

A = consumo de água potável por metro cúbico adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

Cu = custo do concreto por metro cúbico;

$\$c$  = custo do kg de cimento;

$\$c$  = custo do kg de fino pozolânico;

$\$a$  = custo do kg de agregado miúdo;

$\$p$  = custo do kg de agregado graúdo;

$\$ag$  = custo do litro de água potável.

$\$sp$  = custo do litro de aditivo superplastificante;

$\$mva$  = custo do litro de aditivo modificador de viscosidade.

### 3 DEFORMAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Neste capítulo se apresenta uma breve revisão dos conceitos associados à questão da deformação do concreto ao longo do tempo, focando nas provisões da norma brasileira para lidar com o assunto.

#### 3.1 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO CONCRETO

Conforme definido por Montoya et al. (1979), a reologia é o ramo da Mecânica que estuda a evolução de deformações de um material, produzidas por causas tensionais, ao longo do tempo. De forma geral, segundo estes autores, as deformações do concreto podem ocorrer de forma instantânea ou diferida no tempo, podendo ser dependentes ou não da tensão, como indicado na tabela 3.1.

Tabela 3.1: classificação básica das deformações do concreto.  
(fonte: Montoya et al., 1979).

Deformações	Dependentes da tensão		Independentes da tensão
	Instantâneas	Diferidas (fluência)	
Reversíveis	Elásticas	Elásticas diferidas	Termo-higrométricas
Irreversíveis	Plásticas instantâneas	Plásticas diferidas	Retração

As deformações condicionadas à tensão podem ser classificadas em instantâneas ou diferidas no tempo, sendo estas últimas correspondentes às deformações por fluência. As deformações independentes da tensão são as derivadas da retração e da variação das condições termo-higrométricas.

##### 3.1.1 Deformação imediata

A deformação imediata ou elástica instantânea é a que aparece no momento da aplicação da carga e é dependente da intensidade da tensão aplicada. É importante ressaltar que a velocidade de aplicação do carregamento influencia na deformação instantânea registrada. Este tipo de deformação é influenciado principalmente pelo valor e distribuição de carga, pelo

vão e condições de apoio, pela taxa de armadura, pelas propriedades dos materiais e pela fissuração (MANTESE; MANTESE, 1981).

O comportamento puramente elástico do concreto só ocorre no caso de baixas tensões e de curta duração. As deformações elásticas, devidas ao carregamento ou à temperatura, desaparecem completamente com a retirada do carregamento. Durante o processo de carregamento-descarregamento, estas deformações seguem a conhecida Lei de Hooke (equação 3.1), mantendo uma proporção linear entre tensão e deformação.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{constante} \quad (\text{eq. 3.1})$$

Sendo,  $E$  = módulo de elasticidade (em MPa);

$\sigma$  = tensão (em MPa);

$\varepsilon$  = deformação.

Nos Estados Limites de Serviço, que são relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e boa utilização funcional das mesmas, as peças estruturais, submetidas à flexão, trabalham parcialmente no Estádio I (seção de concreto sem fissuras) e no Estádio II (seção de concreto fissurada), sendo que esta mudança de zona de atuação é definida pelo momento de fissuração. Desta forma, o Estádio I é caracterizado por pequenas cargas, o que permite considerar válida a lei de Hooke e o regime elástico, pois o concreto é capaz de resistir às pequenas trações existentes. No Estádio II, tem-se um aumento de carga que ocasiona a fissuração do concreto na zona tracionada, com conseqüente transferência de carga para a armadura nos pontos de fissuração. Desta forma, a contribuição do concreto à tração é desprezada, embora os modelos mais modernos considerem a contribuição do concreto entre as fissuras através da modificação da curva tensão-deformação do aço.

Para os fins deste trabalho se buscará garantir que as vigas ensaiadas superem o momento de fissuração do concreto, atuando no estágio II, como a maioria das estruturas reais.

### 3.1.2 Fluência do concreto

A fluência pode ser entendida como o acréscimo contínuo das deformações que ocorre ao longo do tempo, quando uma peça de concreto é submetida a um estado de tensão constante.

Em outras palavras, a fluência é o aumento progressivo da deformação de peças de concreto na presença de solicitações externas, como explica Catai (2005).

É interessante notar que a fluência é normalmente classificada em fluência básica e fluência por secagem, evidenciando que existe tanto um componente derivado diretamente da ação das cargas quanto um componente associado ao ambiente de exposição da peça. De fato, segundo o Código Modelo CEB-FIP 1990, dentre os principais fatores que interferem na fluência do concreto encontram-se: a idade de carregamento, a espessura do elemento estrutural, a umidade e a temperatura ambientes, o tipo de cimento, o grau de maturidade do concreto e a resistência do concreto, dentre outros. Sob um ponto de vista qualitativo, pode-se afirmar que maiores valores de fluência são obtidos em ambientes mais secos, peças mais espessas, com maiores consumos de água e cimento, e carregadas em idades menores.

A fluência básica é a que se desenvolve sem transferência de água entre o concreto e o meio ambiente (ARAÚJO, 2003). Uma parcela da deformação de fluência é recuperável, sendo denominada deformação elástica diferida; enquanto outra é irrecuperável, correspondendo a uma deformação plástica diferida, o que origina uma deformação residual final apreciável, mesmo se for retirada a carga. A figura 3.1 ilustra estes conceitos, indicando as parcelas reversíveis e permanentes.

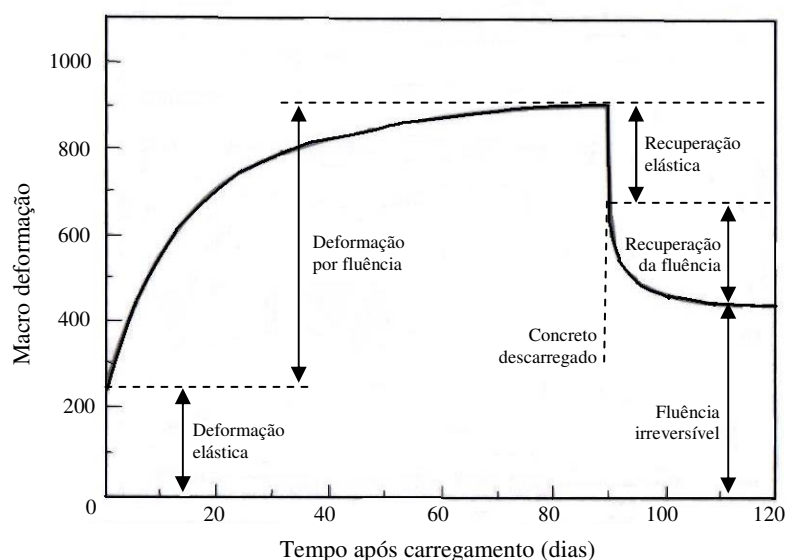


Figura 3.1: representação dos componentes da fluência.  
(fonte: Mehta e Monteiro, 1994).



Segundo Mehta e Monteiro (1994), uma parte da fluência reversível pode ser atribuída à deformação elástica retardada do agregado, que é totalmente recuperável. Uma vez que a pasta de cimento e o agregado estão aderidos, a tensão na primeira diminui gradualmente à medida que a carga é transferida para o último, que deforma elasticamente com o aumento da transferência de carga.

Conforme descrito por Süsskind (1980), observa-se que a deformação lenta se manifesta de forma mais rápida logo após o carregamento, apresentando uma tendência assintótica de crescimento com o tempo, aproximando-se da deformação final após um período da ordem de 2 ou 3 anos. Leonhardt e Mönning (1977) também comentam sobre este comportamento, destacando que a deformação lenta diminui com o passar do tempo e praticamente deixa de aumentar após períodos longos, de cerca de 15 a 20 anos, para estruturas ao ar livre. Salientam, ainda, que, se carregarmos um concreto maduro, com alguns anos de idade, o mesmo não sofrerá deformação lenta, ou esta será muito reduzida, em comparação a uma peça de concreto carregada logo após o endurecimento, que apresenta pequeno grau de maturidade.

A fluência por secagem ocorre ao longo do tempo, devido à exposição ao ambiente, e tem causas semelhantes às da retração, portanto não é surpreendente que os fatores que influenciam ambos os fenômenos sejam similares, porém atuem com intensidades distintas em cada caso.

A retração é caracterizada pela redução do volume do concreto durante o endurecimento, devido à diminuição do volume de água nos poros, sendo um fenômeno independente do carregamento. Usualmente, a retração é dividida em autógena e hidráulica (ou por secagem).

A água contida numa matriz endurecida de concreto tem diferentes comportamentos, dada a sua ligação com os demais elementos. Parte da água está fixada quimicamente, pois se combinou com os componentes do cimento para gerar os cristais hidratados. Parte da água se encontra na forma de uma suspensão coloidal, nos poros do gel de C-S-H, elemento básico da matriz de argamassa. O restante se encontra ocupando, junto com o ar, a estrutura de poros do material. Parte desta água é dita livre, pois pode ser evaporada sem causar alterações na estrutura. A retração ocorre quando se perde a água capilar ou ocorre a contração da massa do gel, por ocasião da evaporação da água não fixada quimicamente do gel de cimento (LEONHARDT; MÖNNIG, 1977).

A retração autógena ocorre em baixas idades, devido à remoção da água de poros capilares pela hidratação do cimento. Neste caso, não ocorre perda de água para o exterior. Já a retração hidráulica é influenciada pelas condições ambientais, como umidade relativa, vento e temperatura. Quanto mais seco for o meio externo, maiores serão os efeitos da retração hidráulica. Desta forma, a temperatura e a umidade se constituem em fatores muito relevantes para este fenômeno.

As deformações devidas à variação da umidade do meio ambiente se traduzem, em geral, por inchamento ou encolhimento, conforme o aumento ou diminuição da umidade. As deformações devidas às variações de temperatura se manifestam como contração ou dilatação, segundo o aumento ou diminuição da temperatura. Segundo Amaral (1971), a variação da temperatura ambiente não se transmite nem integral nem instantaneamente ao concreto, mas acarreta neste uma variação de temperatura retardada e de menor amplitude, amplitude tanto menor quanto mais afastado da superfície exposta do concreto estiver o ponto considerado.

A figura 3.2 apresenta o comportamento típico de um concreto submetido a um ciclo de molhagem e secagem. Conforme descrito por Mehta e Monteiro (1994), após a primeira secagem, o concreto não retorna mais à dimensão original. Assim, pode-se dividir a retração por secagem em dois componentes: uma retração reversível, que é a parte da retração total reproduzível em outro ciclo molhagem-secagem; e uma retração irreversível.

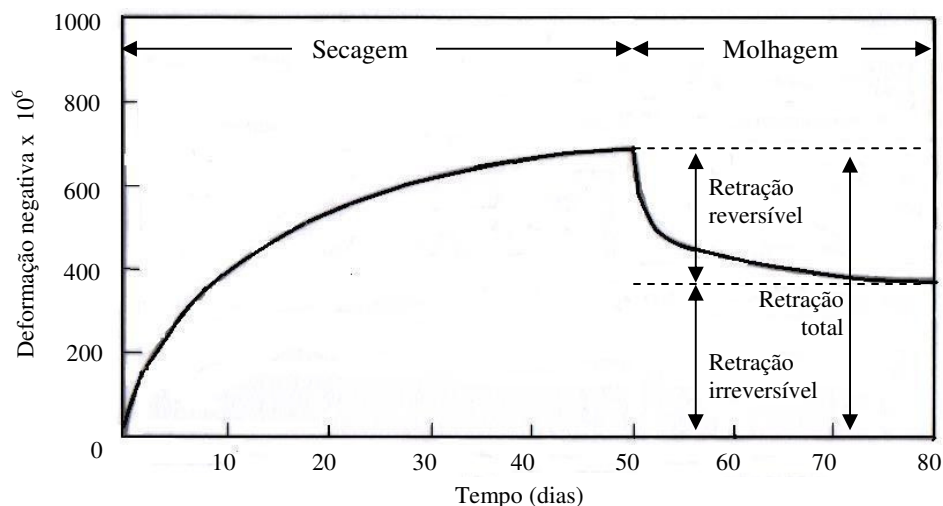


Figura 3.2: reversibilidade da retração por secagem.  
(fonte: Mehta e Monteiro, 1994).

Deve-se salientar que, no processo de retração de uma peça de concreto, a água é inicialmente expulsa das camadas mais externas do material, o que cria condições de deformação

diferenciais entre a periferia e o miolo, gerando tensões capazes de provocar a fissuração do concreto. Esta fissuração pode ser entendida como uma ruptura localizada por tração (SÜSSEKIND, 1980). Para evitar, ou aliviar, os efeitos da retração, podem-se utilizar juntas permanentes ou temporárias. A proteção e cura prolongada de superfícies, especialmente em tempo quente e seco, é fundamental para diminuir a retração nas primeiras idades. Também é conveniente dispor de malha superficial ou armaduras de pele para distribuir as fissuras e diminuir sua espessura, o que pode permitir que as mesmas se tornem praticamente imperceptíveis (MONTROYA ET AL., 1979).

### 3.1.3 Efeitos da retração e da deformação lenta sobre as estruturas

Conforme exemplificado por Leonhardt e Mönnig (1977), os efeitos indesejáveis causados pela retração e pela deformação lenta que ocorrem ao longo do tempo são:

- a) o aumento de flechas devido à retração e à deformação lenta da zona comprimida;
- b) o aumento da curvatura de pilares com cargas excêntricas devido à deformação lenta, o que contribui para que a excentricidade inicial aumente e a capacidade resistente do pilar diminua;
- c) a ocorrência de perdas de protensão em estruturas de concreto protendido;
- d) a eventual redistribuição de tensões em uma peça estrutural, devido à retração e à deformação lenta nos trechos de ligação rígida com outras peças estruturais;
- e) o eventual aparecimento de fissuras nas superfícies externas devido ao desenvolvimento de tensões diferenciadas de retração.

Dentre as influências favoráveis, cita-se:

- a) a eliminação ou redução das concentrações de tensão, devido ao alívio de deformação lenta;
- b) a eliminação das tensões de coação através da relaxação e da deformação lenta, por exemplo, em vigas contínuas ou recalques dos apoios.

## 3.2 CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES DE LONGO PRAZO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA

Neste item, apresentam-se as recomendações relativas à determinação das deformações por fluência e retração do concreto, conforme o anexo A da NBR 6118 (ABNT, 2003) - Projeto de estruturas de concreto.

### 3.2.1 Introdução

A deformação total do concreto, num instante  $t$ , quando uma tensão constante é aplicada ao mesmo no instante  $t_0$ , é dada pela expressão 3.2:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) \quad (\text{eq. 3.2})$$

Sendo que:

$$\varepsilon_c(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}(t_0)}$$

é a deformação imediata, por ocasião do carregamento, com  $E_{ci}(t_0)$

calculado para  $j = t_0$ , pela expressão  $E_{ci} = 5600 f_{ckj}^{1/2}$ ;

$$\varepsilon_{cc}(t) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci28}} \varphi(t, t_0)$$

é deformação por fluência, no intervalo de tempo  $(t, t_0)$ , com

$E_{ci28}$  calculado pela mesma expressão acima para  $j = 28$  dias;

$\varepsilon_{cs}(t)$  é a deformação por retração, no intervalo de tempo  $(t, t_0)$ .

### 3.2.2 Deformação por fluência do concreto

A deformação por fluência do concreto ( $\varepsilon_{cc}$ ) é composta pela parcela correspondente à deformação rápida ( $\varepsilon_{cca}$ ), que é irreversível e ocorre durante as primeiras 24 horas após a aplicação da carga que a originou, e pela parcela correspondente à deformação lenta. Por sua vez, a deformação lenta é formada por duas outras parcelas: a deformação lenta irreversível ( $\varepsilon_{ccf}$ ) e a deformação lenta reversível ( $\varepsilon_{ccd}$ ), dadas pelas equações 3.3 e 3.4.

(eq. 3.3)

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd}$$

$$\varepsilon_{c,t_0} = \varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = \varepsilon_c (1 + \varphi) \quad (\text{eq. 3.4})$$

Sendo que:

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_d \quad (\text{eq. 3.5})$$

Onde:  $\varphi_a$  é o coeficiente de deformação rápida;

$\varphi_f$  é o coeficiente de deformação lenta irreversível;

$\varphi_d$  é o coeficiente de deformação lenta reversível;

Então, no instante t a deformação devida à fluência é dada pela equação 3.6:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccd} + \varepsilon_{ccf} = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} \varphi(t, t_0) \quad (\text{eq. 3.6})$$

com  $E_{c28}$  calculado para  $j = 28$  dias pela expressão  $E_{c28} = E_{ci,28} = 5600 f_{ckj}^{1/2}$  e com o coeficiente de tração dado por  $\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \beta_d$

Onde: t é a idade fictícia do concreto no instante considerado, em dias;

$t_0$  é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento único, em dias;

$t_{0i}$  é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, em dias;

$\varphi_a$  é o coeficiente de fluência rápida, determinada pela expressão abaixo.

$$\varphi_a = 0,8 \left[ 1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right]$$

Sendo que:  $\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)}$  é a função do crescimento da resistência do concreto com a idade;

$\varphi_{fx} = \varphi_{1c} \varphi_{2c}$  é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível;

$\varphi_{1c}$  é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U, em porcentagem, e da consistência do concreto;

$\varphi_{2c}$  é o coeficiente dependente da espessura fictícia  $h_{fic}$  da peça, dado por:

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}}$$

### 3.2.3 Deformação do concreto por retração

O cálculo da deformação do concreto por retração, entre os instantes  $t_0$  e  $t$ , apresenta a seguinte formulação:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (\text{eq. 3.7})$$

Onde:  $\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \varepsilon_{2s}$ ;

$\varepsilon_{cs\infty}$  é o valor final da retração;

$\varepsilon_{1s}$  é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça, dado por  $\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}}$ ;

Sendo que:

$h_{fic}$  é a espessura fictícia, em centímetros;

$\beta_s(t)$  ou  $\beta_s(t_0)$  é o coeficiente relativo à retração, no instante,  $t$  ou  $t_0$ ;

$t$  é a idade fictícia do concreto no instante considerado, em dias;

$t_0$  é a idade fictícia do concreto no instante em que o efeito da retração na peça começa a ser considerado, em dias;

Desta forma, o coeficiente relativo à retração, no instante,  $t$  ou  $t_0$  pode ser determinado conforme equação 3.8:

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A\left(\frac{t}{100}\right)^2 + B\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C\left(\frac{t}{100}\right)^2 + D\left(\frac{t}{100}\right) + E} \quad (\text{eq. 3.8})$$

Onde:  $A = 40$ ;

$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8$ ;

$$C = 2,5h^3 - 8,8h + 40,7;$$

$$D = -75h^3 + 585h^2 + 496h - 6,8;$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584h^2 - 39h + 0,8;$$

$h$  é a altura fictícia, em metros, sendo que, para valores de  $h$  fora do intervalo  $0,05 \leq h \leq 1,6$ , adotam-se os extremos correspondentes;

$t$  é o tempo, em dias ( $t \geq 3$ ).

De uma forma prática, na maioria dos casos correntes em obras de concreto armado, em função da restrição à retração imposta pela armadura para satisfazer o mínimo especificado na NBR 6118/03 (ABNT, 2003), o valor de  $\varepsilon_{c,\infty}(t_\infty, t_0)$  pode ser adotado como igual a  $-15 \cdot 10^{-5}$ . Esse valor é admitido para elementos estruturais com dimensões usuais, variando entre 10cm e 100cm, sujeitos a umidade não inferior a 75%.

Nos elementos estruturais permanentemente submetidos a diferentes condições de umidade em faces opostas, admite-se variação linear da retração ao longo da espessura do elemento estrutural entre os dois valores correspondentes a cada uma das faces.

### 3.2.4 Deformação total do concreto

A deformação total do concreto pode ser calculada pela equação 3.9:

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} + \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{c28}} \varphi(t, t_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \int_{\tau=t_0}^t \frac{\partial \sigma_c}{\partial \tau} \left( \frac{1}{E_{c\tau}} + \frac{\alpha \varphi(\tau, t_0)}{E_{c28}} \right) d\tau \quad (\text{eq. 3.9})$$

Permite-se substituir essa expressão pela equação 3.10:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right] + \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \sigma_c(t, t_0) \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right] \quad (\text{eq. 3.10})$$

Nas expressões de  $\varepsilon_c(t)$ :

$\Delta \sigma_c(t, t_0)$  é a variação total de tensão no concreto, no intervalo  $(t, t_0)$ ;

$\alpha$  é o coeficiente característico que tem valor variável conforme o caso, sendo que em casos usuais pode-se considerar  $\alpha = 0,8$ .

### 3.3 CÁLCULO DE FLECHAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA

A NBR 6118 (ABNT, 2003) - Projeto de estruturas de concreto calcula as flechas em vigas de concreto armado de forma aproximada, pois o comportamento deste conjunto sob carregamento é bastante complexo. Os fatores que intervêm também são de difícil precisão, pois envolvem a estimativa dos efeitos de retração e fluência, que dependem de uma simulação dos ciclos de umidade e temperatura aos quais a peça estará submetida.

#### 3.3.1 Flecha imediata

Devido à propagação de fissuras ao longo da viga, a rigidez efetiva de flexão não é constante. Em uma viga, pode-se verificar em quais zonas o momento de fissuração teórico foi ultrapassado e, portanto, calcular o momento de inércia da seção fissurada e da seção não fissurada (MANTESE; MANTESE; 1981). Neste contexto, a norma brasileira utiliza uma equação de rigidez equivalente dada pela equação a seguir:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ I_c \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 + \left[ 1 - \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (\text{eq. 3.11})$$

Onde:  $I_c$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

$I_{II}$  é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, com

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}};$$

$M_a$  é o momento fletor na seção crítica do vão considerado, momento máximo no vão para vigas bi-apoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações consideradas nessa avaliação;

$M_r$  é o momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas, expresso por:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} I}{y_t}.$$

sendo:  $\alpha = 1,5$  para seções retangulares,



$y_t$  = distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada;

$I$  = momento de inércia da seção bruta de concreto;

$f_{ctm}$  = resistência à tração direta do concreto ( $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$ ).

$E_{cs}$  = módulo de elasticidade secante do concreto ( $E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot f_{ck}^{1/2}$ ).

Neste presente trabalho, para determinar a flecha imediata total de cada viga foram utilizadas as equações 3.12 e 3.13, correspondendo, respectivamente, à flecha calculada em uma viga biapoiada com carga concentrada no centro e à flecha calculada em uma viga biapoiada com carga distribuída uniformemente.

$$f_{carga\_concentrada} = \frac{fl^3}{48EI} \quad (\text{eq. 3.12})$$

$$f_{carga\_distribuída} = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (\text{eq. 3.13})$$

### 3.3.2 Flecha diferida

As flechas diferidas no tempo somam-se às flechas instantâneas, e são originadas pelos efeitos de retração e fluência. Conforme explicado por Montoya et al. (1979), o cálculo preciso e exato da flecha diferida é praticamente imprevisível, por depender de muitas variáveis, como temperatura, umidade, condições de cura, idade do concreto no momento do carregamento, valor da carga permanente, dentre outros fatores.

O cálculo da flecha diferida no tempo para vigas de concreto armado é calculado, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), de maneira aproximada, multiplicando-se a flecha imediata por um fator  $(1 + \alpha_f)$ , obtido pela equação 3.14 abaixo.

$$f_d = f_i(1 + \alpha_f) \quad (\text{eq. 3.14})$$

Onde: 
$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'}$$

$$\rho' = \frac{As'}{bd};$$

$\xi$  é um coeficiente função do tempo, que pode ser obtido diretamente na tabela 3.2, ou calculado a partir das seguintes equações:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0); \quad (\text{eq. 3.15})$$

$$\xi(t) = 0,68(0,996^t)t^{0,32} \text{ para } t \leq 70 \text{ meses}; \quad (\text{eq. 3.16})$$

$$\xi(t) = 2 \text{ para } t \geq 70 \text{ meses}; \quad (\text{eq. 3.17})$$

Sendo:

$t$  = o tempo, em meses, para o qual se deseja o valor da flecha diferida;

$t_0$  = idade, em meses, da data de aplicação da carga de longa duração.

Tabela 3.2: valores do coeficiente  $\xi$  em função do tempo.

<b>Tempo (t) meses</b>	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	$\geq 70$
<b>Coeficiente <math>\xi(t)</math></b>	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A parte experimental desta dissertação compreende a determinação da flecha total em vigas de concreto armado, confeccionadas com concreto convencional e com concreto auto-adensável. O programa experimental proposto envolveu a moldagem, carregamento e acompanhamento das deformações de um conjunto de seis vigas, com mesma geometria, armaduras longitudinal e transversal idênticas e submetidas ao mesmo carregamento, como detalhado neste capítulo.

### 4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Dentro do conjunto amplo de variáveis possíveis e de interesse para a pesquisa foi estabelecido que, neste estudo, se iria trabalhar com dois tipos de concreto e dois teores de argamassa ( $\alpha$ ), para que se pudesse obter a correlação mostrada na figura 4.1. Desta forma se buscava avaliar os efeitos de alteração na constituição do concreto auto-adensável, com redução do teor do agregado graúdo e incremento no teor de finos, ao mesmo tempo em que se capturassem os eventuais efeitos de alteração no teor de argamassa do traço.

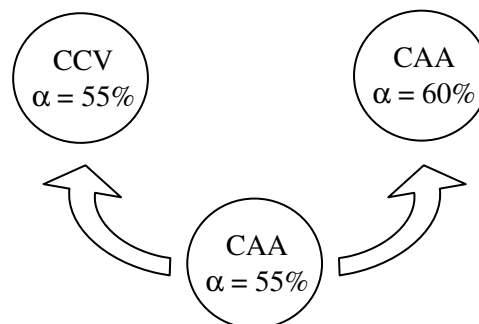


Figura 4.1: correlações entre as variáveis.

Essa combinação de variáveis resultou na confecção um concreto convencional (CCV) com  $\alpha = 55\%$ , que serviu como referência, um concreto auto-adensável (CAA) com  $\alpha = 55\%$ , similar ao convencional, porém com um maior teor de finos e menos agregado graúdo; e um concreto auto-adensável, com  $\alpha = 60\%$ , valor típico para concretos auto-adensáveis. Vale a pena enfatizar que as condições ambientais de temperatura e umidade do ar foram apenas

monitoradas, e não controladas, devido à influência do ambiente nos resultados de deslocamentos.

## 4.2 DELINEAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A partir da estratégia de pesquisa definida se estabeleceu um programa experimental que permitisse obter dados sobre o comportamento efetivo de elementos de concreto convencional e auto-adensável frente à deformação instantânea e lenta. Optou-se por trabalhar com modelos em escala próxima de peças reais, para evitar a extrapolação de dados relativos à aderência e à fissuração de protótipos em escala reduzida.

Foram ensaiados três pares de vigas, sendo um par de elementos de concreto convencional dois pares confeccionados com concreto auto-adensável, com dois teores de argamassa. Optou-se por duplicar o número de vigas de uma mesma variedade a fim de verificar a confiabilidade dos dados. A figura 4.2 mostra o fluxograma de desenvolvimento do programa experimental do presente projeto de pesquisa.

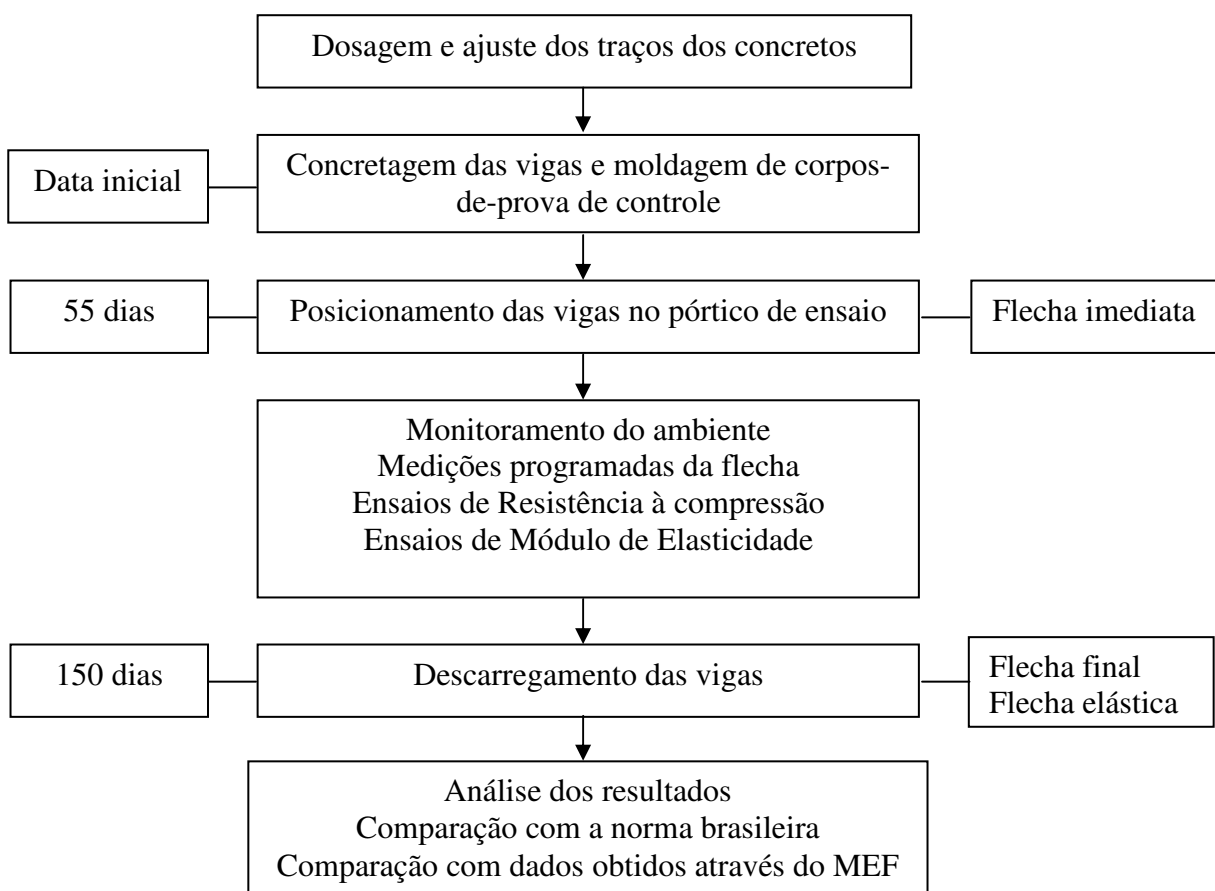


Figura 4.2: fluxograma do experimento.

### 4.3 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

A denominação das vigas ensaiadas seguiu a nomenclatura explicitada na tabela 4.1, sendo que: o código CCV indica as vigas moldadas com concreto convencional; o código CAA indica as vigas moldadas com concreto auto-adensável; os numerais 55 e 60 indicam os teores de argamassa de 55% e 60% e os códigos V1 e V2 indicam a primeira ou a segunda viga do par moldado.

Tabela 4.1: denominação dos modelos de vigas.

Denominação	Descrição do protótipo
CCV-V1	Viga 1 de concreto convencional $\alpha = 55\%$
CCV-V2	Viga 2 de concreto convencional $\alpha = 55\%$
CAA55-V1	Viga 1 de concreto auto-adensável $\alpha = 55\%$
CAA55-V2	Viga 2 de concreto auto-adensável $\alpha = 55\%$
CAA60-V1	Viga 1 de concreto auto-adensável $\alpha = 60\%$
CAA60-V2	Viga 2 de concreto auto-adensável $\alpha = 60\%$

As vigas moldadas apresentavam um comprimento de 210cm, com seção transversal de 18cm de altura e 10cm de largura. O modelo de carregamento adotado contempla uma carga concentrada de 5,5 kN, aplicada no centro do vão, e uma carga distribuída de 0,45 kN/m, correspondente ao peso próprio da viga. O carregamento e as solicitações resultantes podem ser observados nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5, que mostram o modelo de carregamento e os diagramas de cortante e momento, respectivamente.

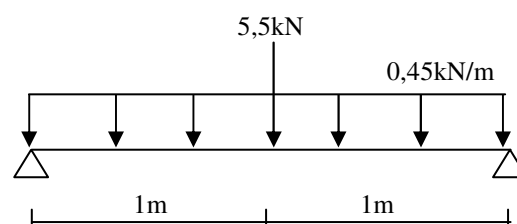


Figura 4.3: modelo de carregamento.

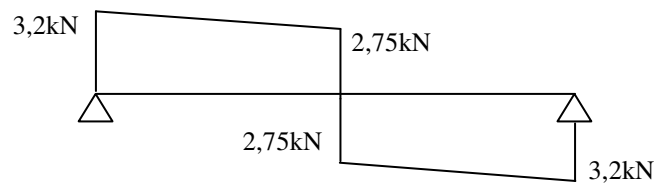


Figura 4.4: diagrama de esforços cortantes resultante da aplicação do carregamento previsto nas vigas ensaiadas.

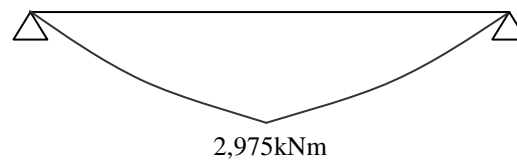


Figura 4.5: diagrama de momentos fletores resultante da aplicação do carregamento previsto nas vigas ensaiadas.

O carregamento permanente da estrutura é representando pela combinação do peso próprio da viga e da carga concentrada no centro do protótipo. O carregamento foi planejado de modo que se obtivesse uma relação entre o peso próprio da viga e o peso permanente total compatível com a observada em peças reais. Assim, decidiu-se que o peso próprio da viga (0,945 kN) representaria cerca de 15% do carregamento permanente total (6,40 kN).

As solicitações indicadas nas figuras 4.4 e 4.5 foram utilizadas para o dimensionamento das vigas, junto com as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2003) - Projeto de estruturas de concreto. Foi considerado que a estrutura estaria numa classe de agressividade ambiental I e foi adotada uma tolerância de execução de 0,5 cm, resultando num cobrimento nominal de 2 cm.

Adotados o momento fletor puro no centro do elemento de 2,975 kN.m e a resistência característica de compressão de 30 MPa, o dimensionamento de seção retangular simples indicou a necessidade de uma armadura longitudinal inferior composta por duas barras de aço CA-50 de 6,3 mm de diâmetro. A armadura de montagem, superior, foi definida como sendo composta por duas barras de aço CA-50 com 5 mm de diâmetro. A armadura transversal foi constituída por estribos de aço CA-60, com 5 mm de diâmetro, espaçados a cada 9cm. O detalhamento da armadura é indicado na figura 4.6. As armaduras utilizadas nas vigas foram fornecidas já cortadas e dobradas pelo fabricante.

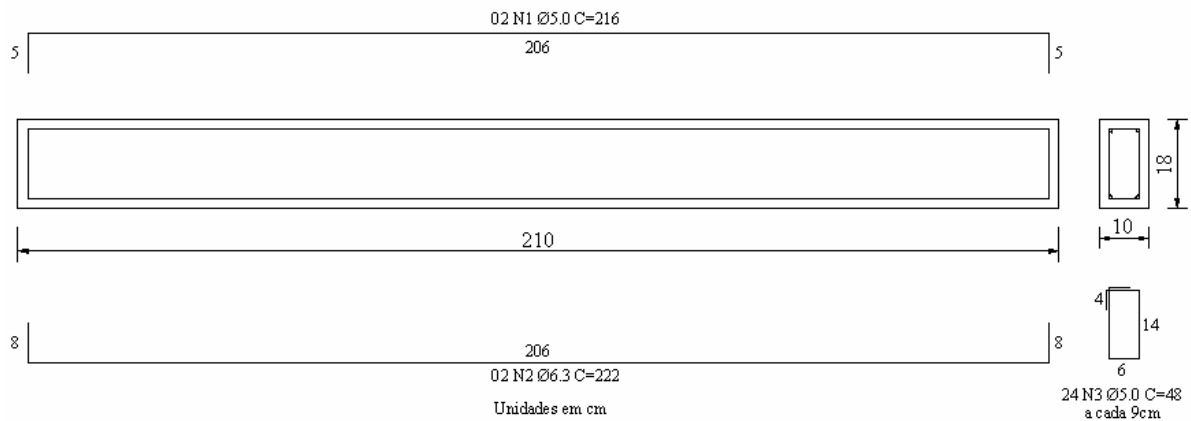


Figura 4.6: detalhamento da armadura das vigas.

As fôrmas das vigas (figura 4.8) foram executadas com chapas de compensado de 20 mm no fundo e nas laterais. As mesmas foram enrijecidas com caibros laterais aplainados com seção transversal de 5x5 cm. As mesmas foram projetadas de modo a que se pudesse desmoldar primeiro um pequeno trecho da extremidade inferior das vigas, o que possibilitou a colocação das mesmas nos apoios do sistema de carregamento, antes que fosse desformado o restante da viga, como se pode ver na figura 4.7.

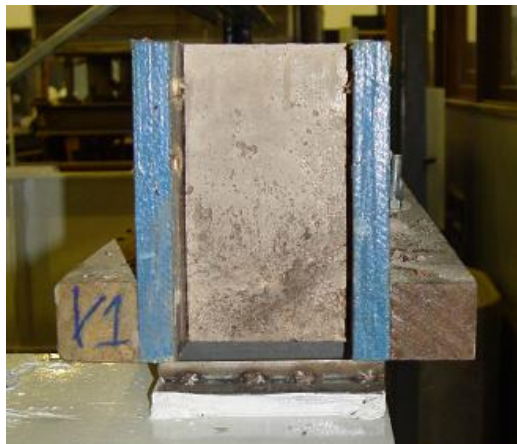


Figura 4.7: vista da extremidade da viga MC55-V1 apoiada diretamente no pórtico, antes da desforma do restante do elemento.

Graças a este sistema, puderam-se obter leituras de deformação antes e depois do desmolde, averiguando se a condição inicial não-deformada foi afetada durante a desforma. As vigas ficaram inteiramente apoiadas no solo até o seu posicionamento no pórtico de apoio, para retirada das fôrmas e aplicação do carregamento.

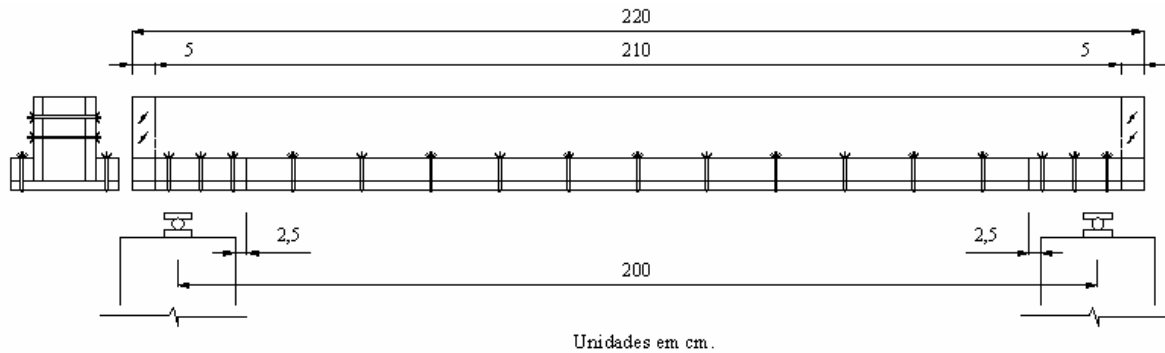


Figura 4.8: representação esquemática do sistema de fôrma das vigas.

#### 4.4 PÓRTICO DE ENSAIO

O pórtico que conferiu suporte às vigas durante o ensaio foi totalmente montado no LEME, a partir de dois cavaletes metálicos. Para aumentar a altura e permitir a aplicação das cargas, em cada cavalete foi sobreposto um perfil de aço tipo I reforçado, no qual foram criados elementos de apoio para as extremidades dos protótipos. Foram criados apoios de primeira e segunda ordem, permitindo a definição de uma condição de apoio bem determinada.

Uma estrutura independente foi confeccionada com perfis metálicos para instalar os sistemas de acompanhamento das flechas. Devido à longa duração do ensaio, optou-se pela utilização de processos mecânicos de leitura das flechas, ao invés da utilização de LVDTs, para evitar a necessidade de montagem de um sistema de monitoramento contínuo com alimentação elétrica garantida.

Desta forma, o sistema de controle de deformações foi montado a partir da combinação de relógios mecânicos e de pinos metálicos, posicionados no centro e no terço médio da viga. As seis vigas receberam um pino metálico no centro e outro no terço médio, mas em apenas três vigas (MC55-V1, MC60-V2 e CCV-V2) foram instalados deflectômetros mecânicos, dois cada viga, um no centro e outro no terço médio, ambos junto ao pino metálico.

Os pinos metálicos, já utilizados por Salvador (2007), garantem a possibilidade de coleta de dados em todas as vigas, mesmo em caso de falha ou bloqueio dos relógios mecânicos. Os relógios servem como controle de aferição e estimativa de erros das leituras com pinos metálicos. Maiores informações sobre os elementos de instrumentação estão no item 4.6 deste capítulo.



A figura 4.9 apresenta uma vista frontal e a figura 4.10 mostra uma vista superior do aparato de ensaio.

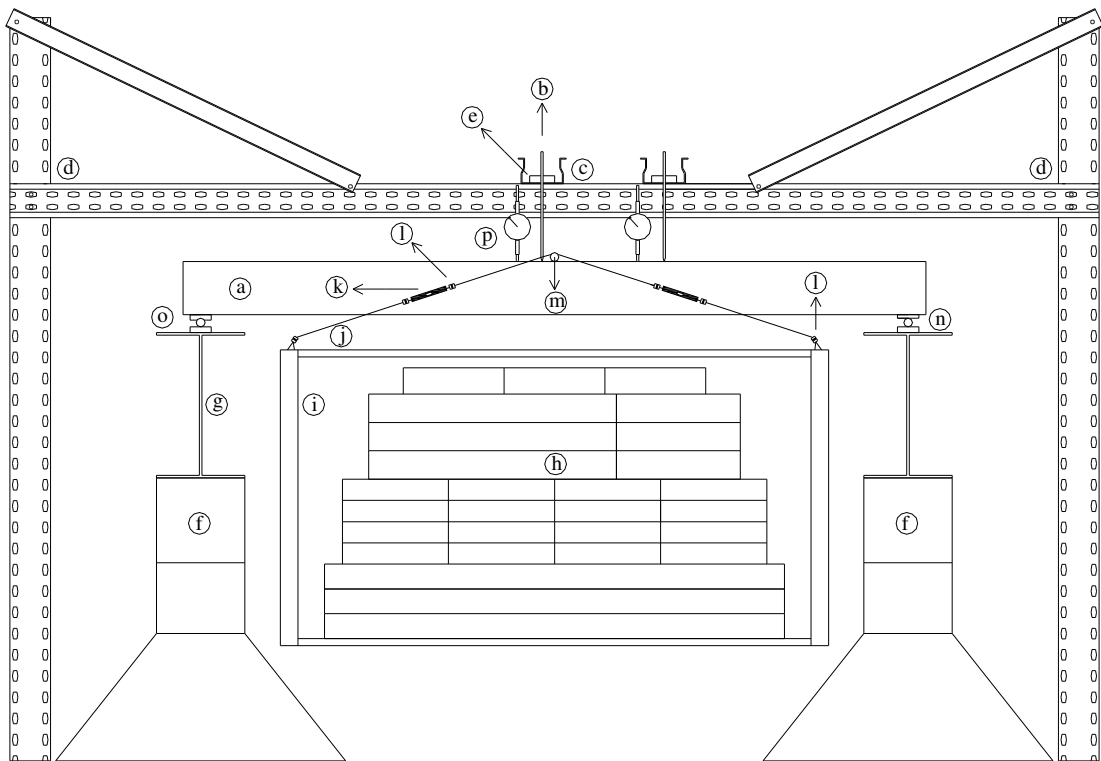


Figura 4.9: pórtico de suporte das vigas – vista frontal.

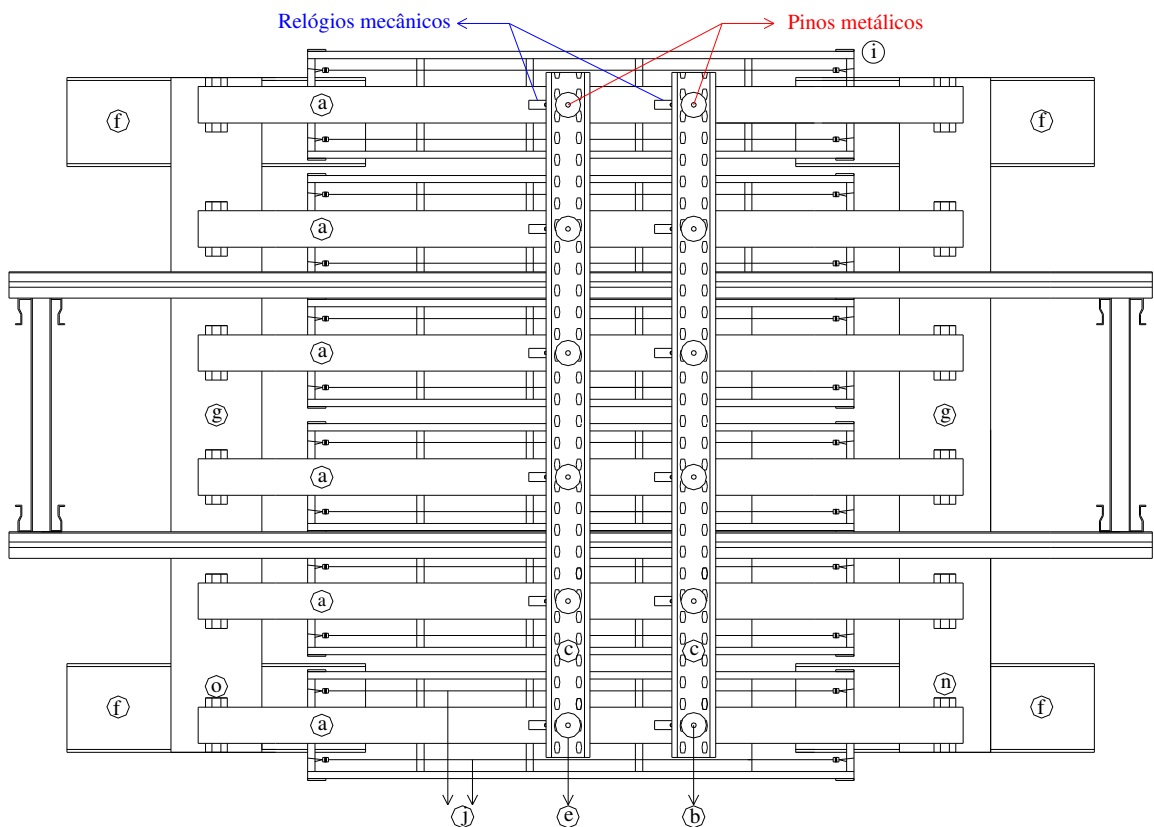


Figura 4.10: pórtico de suporte das vigas – vista superior.

Os itens citados nas figuras referem-se aos seguintes detalhes construtivos:

- a) vigas elaboradas com concreto convencional e auto-adensável;
- b) pinos metálicos que se movimentam livremente na vertical, de latão, com comprimento de aproximadamente 30cm e diâmetro de 6,35mm;
- c) sistema de suporte das hastes metálicas de medição, constituído por perfis metálicos interconectados e pórtico de encaixe com dimensões de aproximadamente 7cm de altura e 12cm de largura;
- d) pórtico para fixação do item c), também constituído por perfis metálicos;
- e) base cilíndrica com furo central, de aproximadamente 7cm de diâmetro e 2cm de altura, para passagem do pino metálico, permitindo livre passagem vertical e impedindo que este se afaste do eixo perpendicular que forma com a viga;
- f) cavalete metálico que compõe o sistema de apoio das vigas, junto com o item g), formado por chapas de 10mm soldadas;
- g) perfil metálico em forma de I, parte componente do sistema de apoio das vigas, utilizado para enrijecer o sistema e ampliar a altura do pórtico em relação ao solo, para que a carga permanente pudesse ser acomodada;
- h) carga permanente aplicada, composta por segmentos de concreto armado retirados de vigas, placas e blocos de concreto previamente moldados no LEME;
- i) gaiola para suporte do carregamento permanente, composta por barras de diâmetro de 20mm na parte inferior, 12,5mm na parte superior e por barras chatas de 9,5mmx50mm;
- j) cabo de aço para sustentação da carga aplicada, com 6,35mm de diâmetro e carga de ruptura nominal de 2230Kg;
- k) esticador para nivelamento e alinhamento dos cabos de 6,35mm;
- l) clips e sapatilhas para amarração, para cabos de 6,35mm;
- m) rolete para apoio dos cabos de aço, com 25,4mm de diâmetro e 240mm de comprimento, provido de ranhuras laterais para acomodação dos cabos, que evitavam que os mesmos escorregassem pelas laterais do rolete;

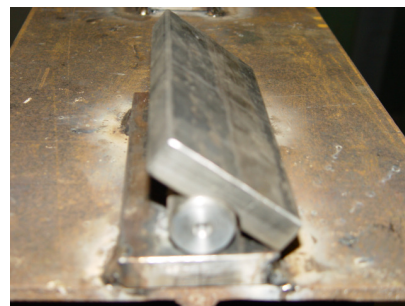
- n) apoio de 1ª ordem, composto por uma chapa de aço de 16x60x150mm, soldada no pórtico, uma barra de 25mm de diâmetro apoiada sobre a primeira chapa e outra chapa de 10x60x150mm sobrepondo a barra redonda;
- o) apoio de 2ª ordem, composto por uma chapa de aço de 16x60x150mm soldada no pórtico, uma barra de 25mm de diâmetro apoiada sobre a chapa e outra chapa de 16x60x150mm, sobreposta à barra, com uma cavidade semicircular para que a mesma pudesse ser encaixada sobre a barra redonda, formando uma rótula;
- p) deflectômetros mecânicos da marca Mitutoyo, com curso de 50mm e precisão de 0,01mm. A figura 4.11 mostra uma foto do pórtico antes da colocação das vigas, enquanto as figuras 4.12 e 4.13 mostram detalhes do sistema de apoio, planejado para gerar vínculos de 1ª. e 2ª. ordem.



Figura 4.11 - pórtico de suporte das vigas – vista geral.



(a)



(b)

Figura 4.12 - (a) apoio de 1ª ordem e (b) apoio de 2ª ordem.

## 4.5 MOLDAGEM DAS VIGAS

Após a obtenção das curvas de dosagem do concreto convencional e do concreto auto-adensável, as seis vigas foram moldadas e posicionadas no aparato de ensaio. Nas seções subsequentes serão apresentados os passos antecedentes e posteriores à concretagem das vigas.

### 4.5.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados na confecção dos concretos foram:

#### 4.5.1.1 Agregados

O agregado graúdo utilizado no estudo tem origem basáltica, sendo extraído de regiões próximas a Porto Alegre. O agregado miúdo utilizado foi a areia dragada do Rio Jacuí. Para caracterizar os agregados foram realizados ensaios de composição granulométrica conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003) – Agregados: determinação da composição granulométrica. Os resultados podem ser visualizados nas figuras 4.13 e 4.14 e nas tabelas 4.2 e 4.3. Outras características físicas dos agregados são apresentadas nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.2: composição granulométrica do agregado graúdo.

Abertura de peneiras (mm)	% Média retida	% Média retida acumulada
25	0	0
19	1	1
12,5	49	50
9,5	33	83
6,3	14	97
4,75	2	99
<4,75	1	100

Tabela 4.3: composição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura de peneiras (mm)	% Média retida	% Média retida acumulada
4,8	0	1
2,4	5	5
1,2	11	16
0,6	24	40
0,3	42	82
0,15	17	99
<0,15	1	100

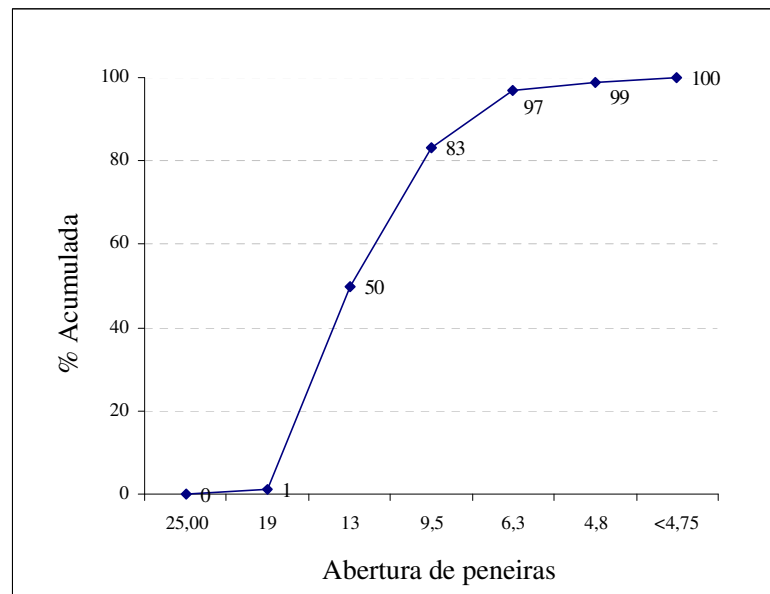


Figura 4.13: curva granulométrica do agregado graúdo.

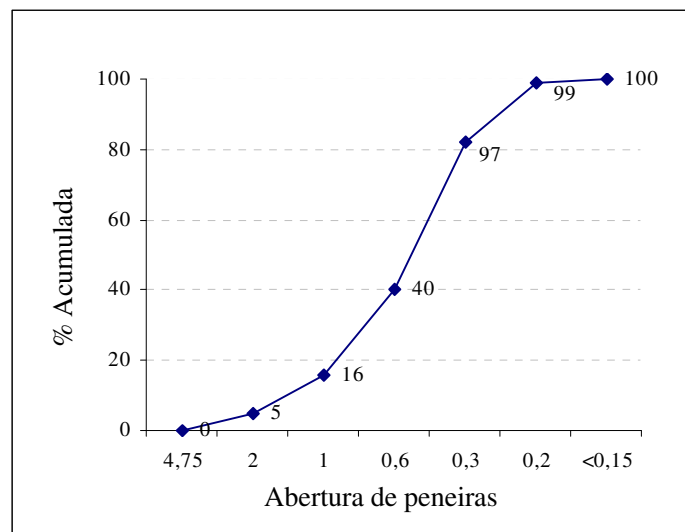


Figura 4.14: curva granulométrica do agregado miúdo.

Tabela 4.4: características físicas do agregado graúdo.

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico (mm)	19	NBR NM 248
Módulo de finura	6,84	NBR NM 248
Massa específica do agregado seco (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,82	NBR NM 52
Massa unitária solta (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,51	NBR 7251

Tabela 4.5: características físicas do agregado miúdo.

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico (mm)	2,4	NBR NM 248
Módulo de finura	2,42	NBR NM 248
Massa específica do agregado seco (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,62	NBR NM 52
Massa unitária solta (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,55	NBR 7251

#### 4.5.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi um cimento Portland de alta resistência inicial, tipo CPV ARI. Todo o cimento usado na dosagem inicial e na moldagem das vigas foi proveniente de um mesmo lote de fabricação. Para caracterizar o cimento foram realizadas, no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS, uma análise química quali-quantitativa e uma análise granulométrica a laser do mesmo, conforme mostram a tabela 4.6 e a figura 4.15. Também foi determinada, em laboratório, a massa específica deste material, conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2000) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, sendo obtido um valor de 3,03g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4.6: análise química do cimento.

Elemento analisado	Proporção (%)
CaO	66,734
SiO <sub>2</sub>	18,801
SO <sub>3</sub>	4,245
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,975
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,967
K <sub>2</sub> O	0,972
MgO	0,926
SrO	0,252
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,124

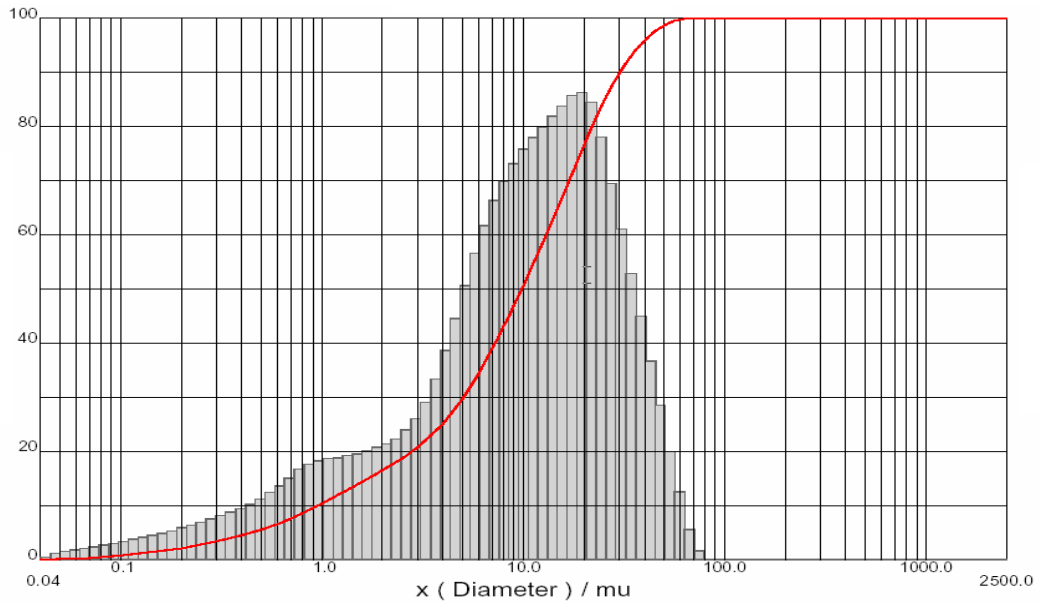


Figura 4.15: granulometria a laser do cimento.

#### 4.5.1.3 Aditivos

Os aditivos utilizados foram um superplastificante (SP) e um modificador de viscosidade (VMA). Nas tabelas 4.7 e 4.8 são apresentadas as características técnicas dos mesmos. O superplastificante utilizado é um produto à base de éter carboxílico modificado, líquido, pronto para uso e isento de cloretos.

Tabela 4.7: características técnicas do aditivo SP (fonte: fabricante).

Item	Descrição
Função principal	hiperplastificante
Aspecto	líquido castanho claro
pH	$6,0 \pm 1,0$
Massa específica	$1,095 \pm 0,02\text{g/cm}^3$
Teor de sólidos	40% +/- 2%

Tabela 4.8: características técnicas do aditivo VMA (fonte: fabricante).

Item	Descrição
Função principal	auxiliar de bombeamento
Aspecto	líquido viscoso
Cor	Incolor
pH	6,0 ± 1,0
Densidade	1,01 ± 0,02g/cm <sup>3</sup>

#### 4.5.1.4 Metacaulim

Utilizou-se, como material fino para confecção dos concretos auto-adensáveis, o metacaulim, material pozolânico constituído basicamente por compostos à base de sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na fase amorfa. Assim como a sílica ativa, o metacaulim se posiciona entre as partículas de cimento, preenchendo os vazios e reagindo quimicamente com os compostos liberados, aumentando os pontos de nucleação. A vantagem de se utilizar um material ativo como fração pulverulenta, ao invés de um fíler como o pó de calcário, é que, dado seu caráter pozolânico, o mesmo se combina com o hidróxido de cálcio, formando C-S-H secundário, o que resulta no refinamento da estrutura de poros.

Com intuito de caracterizar este material fino, foram realizadas, no Laboratório de Cerâmica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, análises químicas e de granulometria a laser, conforme ilustram a tabela 4.9 e a figura 4.16, respectivamente. A determinação da massa específica do metacaulim, conforme indicação da NBR NM 23 (ABNT, 2001) - Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, resultou em um valor de 2,48g/cm<sup>3</sup>. No ensaio de granulometria a laser se determinou que o diâmetro médio das partículas de metacaulim fica em torno de 9,48µm, valor bem inferior ao das partículas do cimento. Desta forma, como esperado, o uso do metacaulim contribui para um melhor empacotamento de grãos, conferindo maior compacidade à mistura.



Tabela 4.9: análise química do metacaulim.

Elemento analisado	Proporção (%)
SiO <sub>2</sub>	54,197
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,696
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,429
CO <sub>2</sub>	2,49
K <sub>2</sub> O	1,168
TiO <sub>2</sub>	0,495
MgO	0,193
F	0,135
CaO	0,111
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,081

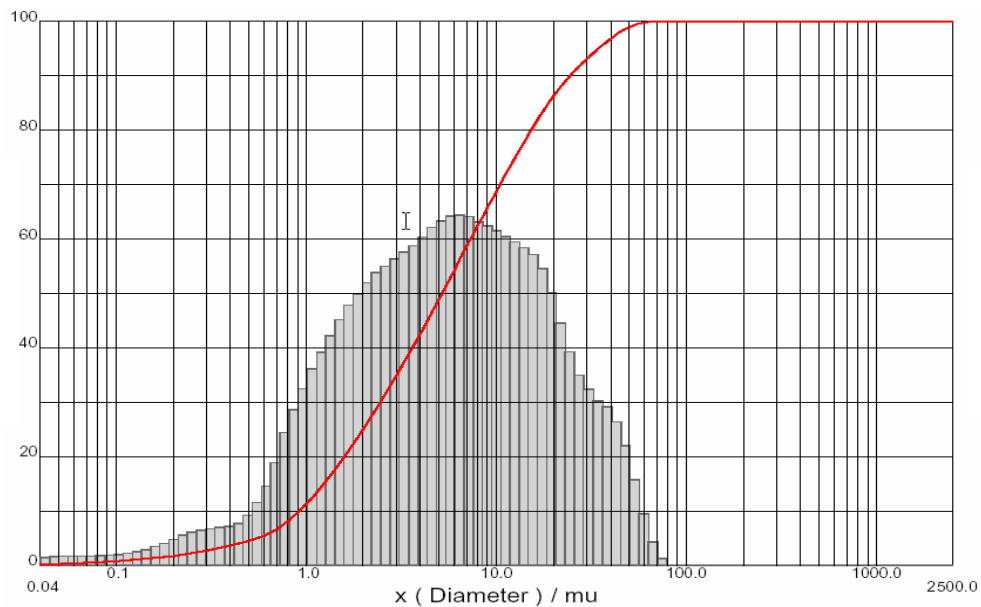


Figura 4.16: curva granulométrica do metacaulim.

## 4.5.2 Dosagem dos concretos

### 4.5.2.1 Dosagem do concreto convencional

Como já mencionado no item 2.5.1, a dosagem do concreto convencional foi baseada nos fundamentos do Método do IPT/USP (HELENE; TERZIAN, 1992). A tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos para o ajuste da curva de dosagem.

Tabela 4.10: resultados experimentais para o ajuste de curva de dosagem do concreto convencional.

Traço unitário	Relação a/c	Abatimento de tronco de cone (mm)	$f_{c3}$ (MPa)	$f_{c7}$ (MPa)	$f_{c28}$ (MPa)	Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )
1:1,2:1,8	0,37	97	40,51	44,89	47,60	556,69
1:2,025:2,475	0,48	110	29,92	36,52	41,89	406,41
1:2,85:3,15	0,64	100	20,15	25,16	30,35	314,98

A figura 4.17 mostra o diagrama de dosagem do concreto convencional obtido com a aplicação das equações 2.1 a 2.9.

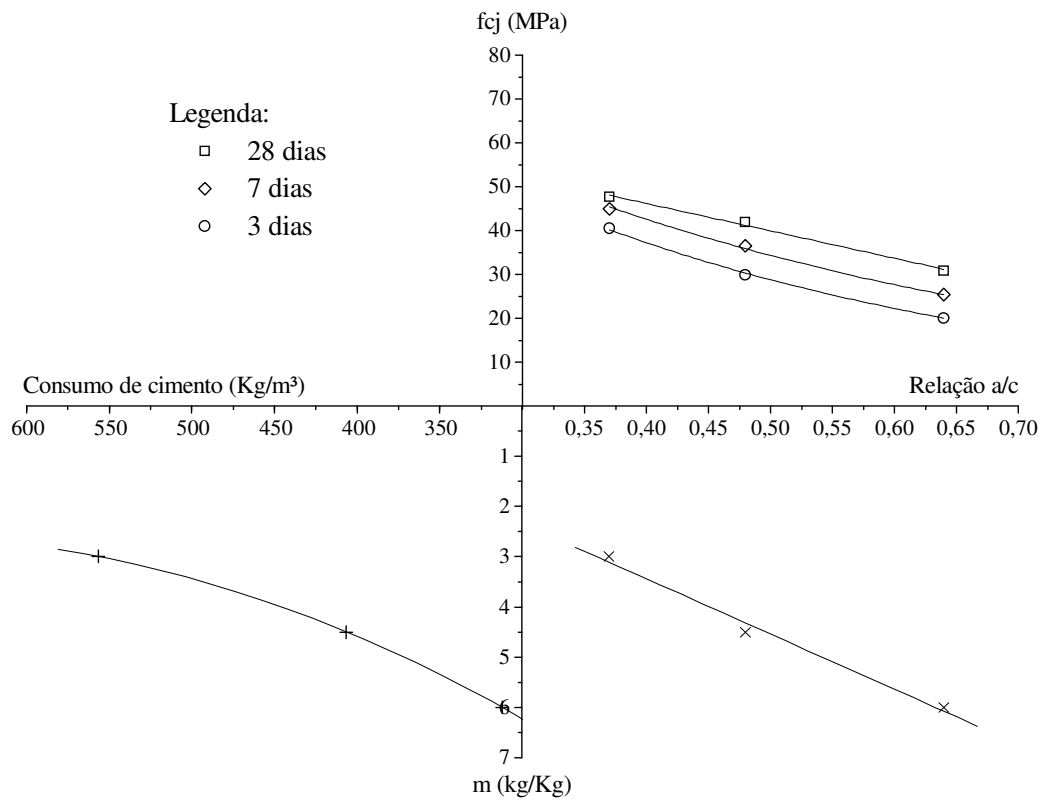


Figura 4.17: curva de dosagem do concreto convencional,  $\alpha = 55\%$ .

A tabela 4.11 mostra os coeficientes e correlações obtidos para a curva de dosagem do concreto convencional. Os mesmos foram utilizados para encontrar um traço específico que resultasse num concreto que apresentasse aproximadamente 30MPa aos 28 dias, dado que esta é a faixa de resistência objeto desta pesquisa.

Tendo estabelecido este valor alvo, o concreto foi dosado de forma a atingir uma determinada resistência média um pouco superior, conforme a equação (3.1). Nesta formulação, a resistência média do concreto a “j” dias é determinada a partir da resistência especificada ( $f_{ck}$ ) agregada de uma parcela equivalente a 1,65 vezes o desvio padrão ( $Sd$ ) obtido no rompimento dos corpos-de-prova que deram origem à curva de dosagem, quando os mesmos são estatisticamente significativos, ou especificado pela norma. Nesta pesquisa, foi utilizado um desvio padrão com valor igual a 2.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.Sd \quad (\text{eq. 3.1})$$

Tabela 4.11: coeficientes e correlações para a curva de dosagem do concreto convencional.

Lei de Abrams			Lei de Lyse
3 dias	7 dias	28 dias	
$f_{c3} = \frac{104,40}{13,17^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{100,90}{8,65^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{90,92}{5,43^{a/c}}$	$m = 10,99 * a / c - 0,96$
$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,98$	$R^2 = 0,99$

Desta forma, utilizando a formulação exposta anteriormente, para que o concreto convencional formulado atinja 30MPa ( $f_{cj} = 33,30\text{MPa}$ ) em 28 dias, constatou-se que se deveria utilizar uma relação materiais secos/cimento ( $m$ ) com valor igual a 5,57 e uma relação água/cimento igual a 0,59.

#### 4.5.2.2 Dosagem do concreto auto-adensável

Como já descrito no item 2.5.2, o método empregado neste trabalho para a dosagem do concreto auto-adensável foi desenvolvido por Tutikian (2004), em trabalho anteriormente executado no PPGEC/UFRGS.

As tabelas 4.12 e 4.13 contém os resultados obtidos, respectivamente, no estado fresco e no estado endurecido, para o ajuste da curva de dosagem dos CAA's. Já as figuras 4.18 e 4.19 mostram os diagramas de dosagem do concreto auto-adensável com  $\alpha = 55\%$  e  $\alpha = 60\%$ , respectivamente.

Tabela 4.12: resultados experimentais no estado fresco para o ajuste de curva de dosagem dos concretos auto-adensáveis.

<b>Tipo</b>	<b>Traço unitário</b>	<b>Relação a/agl</b>	<b>Aditivo SP (%)</b>	<b>Aditivo VMA (%)</b>	<b>Slump Flow Test (cm)</b>	<b>V-Funnel Test (s)</b>
CAA $\alpha = 55\%$	1:1,2:1,8	0,40	0,74	0,53	62,5	7,0
	1:2,025:2,475	0,51	0,74	0,53	58,0	6,0
	1:2,85:3,15	0,59	0,74	0,53	56,0	10,0
CAA $\alpha = 60\%$	1:1,4:1,6	0,39	0,80	-	56,0	8,4
	1:2,3:2,2	0,47	0,80	-	60,5	10,2
	1:3,2:2,8	0,62	0,80	-	55,5	7,5

Tabela 4.13: resultados experimentais no estado endurecido para o ajuste de curva de dosagem dos concretos auto-adensáveis.

<b>Tipo</b>	<b>Traço unitário</b>	$f_{c3}$ (MPa)	$f_{c7}$ (MPa)	$f_{c28}$ (MPa)	<b>Consumo de cimento (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
CAA $\alpha = 55\%$	1:1,2:1,8	36,24	54,34	66,09	543,19
	1:2,025:2,475	25,69	34,26	58,65	399,16
	1:2,85:3,15	15,14	23,93	40,33	318,52
CAA $\alpha = 60\%$	1:1,4:1,6	36,70	53,35	78,87	544,54
	1:2,3:2,2	25,81	35,90	57,45	404,42
	1:3,2:2,8	14,94	20,66	36,18	314,57

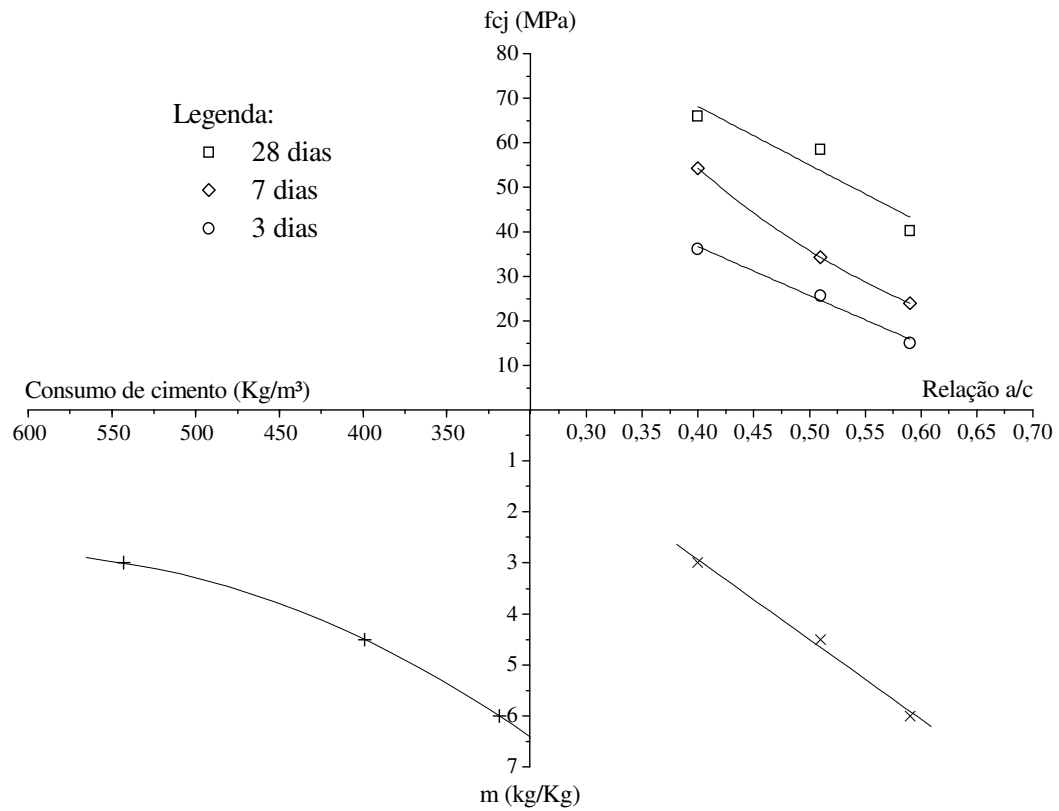


Figura 4.18: curva de dosagem do concreto auto-adensável,  $\alpha = 55\%$ .

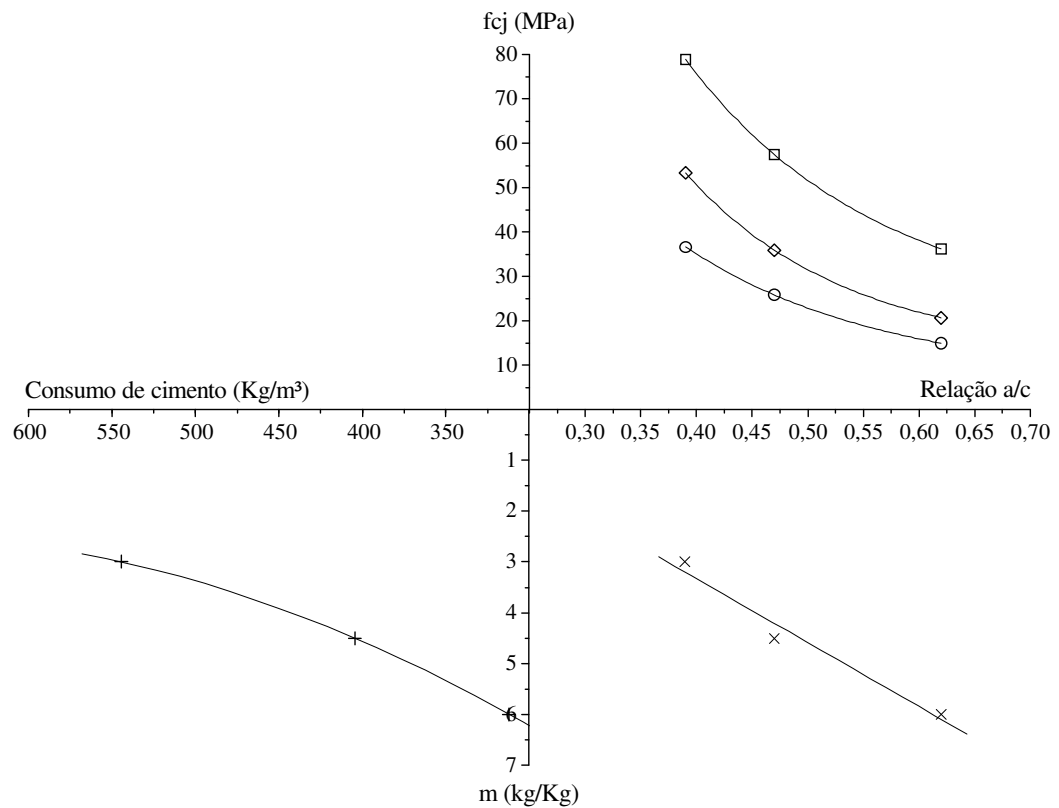


Figura 4.19: curva de dosagem do concreto auto-adensável,  $\alpha = 60\%$ .

A tabela 4.14 mostra os coeficientes e correlações para a curva de dosagem do concreto auto-adensável, para que possa ser encontrado o traço específico para uma mistura que apresente 30MPa aos 28 dias, objeto desta pesquisa.

Tabela 4.14: coeficientes e correlações para as curvas de dosagem dos concretos auto-adensáveis.

	Lei de Abrams			Lei de Lyse
	3 dias	7 dias	28 dias	
CAA55	$f_{c3} = \frac{229,77}{90,49^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{305,70}{74,37^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{188,78}{12,28^{a/c}}$	$m = 15,66 * a / c - 3,33$
	$R^2 = 0,96$	$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,86$	$R^2 = 0,99$
CAA60	$f_{c3} = \frac{304,63}{97,38^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{253,97}{58,61^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{285,57}{28,47^{a/c}}$	$m = 12,65 * a / c - 1,74$
	$R^2 = 0,58$	$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,99$	$R^2 = 0,97$

Desta forma, utilizando a formulação exposta anteriormente, para definição de um concreto auto-adensável com teor de argamassa igual a 55%, que atingisse um valor de 30MPa em 28 dias ( $f_{cj} = 33,3$  MPa), conclui-se que se deve utilizar uma relação agregados secos/cimento ( $m$ ) igual a 7,5 e uma relação água/cimento igual a 0,69.

Já para obter um concreto auto-adensável com teor de argamassa igual a 60%, deve-se utilizar uma relação agregados secos/cimento ( $m$ ) igual a 6,38 e uma relação água/cimento igual a 0,64.

#### 4.5.3 Preparação do concreto

O concreto convencional e o concreto auto-adensável foram executados em uma betoneira de eixo inclinado, sendo os materiais dosados em massa. O ciclo de concretagem foi dividido em três etapas, sendo cada tipo de concreto moldado em três dias diferentes, para que as datas dos carregamentos e ensaios de controle (resistência à compressão e módulo de elasticidade) não fossem concomitantes. A tabela 4.15 indica os três traços utilizados e suas respectivas quantidades em massa.

Tabela 4.15: constituição, em massa, dos traços empregados.

<b>Tipo de concreto</b>		CCV	CAA $\alpha = 55\%$	CAA $\alpha = 60\%$
<b>Traço</b>		1:5,57	1:7,5	1:6,38
<b>Quantidades em massa</b>	<b>Cimento (Kg)</b>	28,29	17,49	18,65
	<b>Metacaulim (Kg)</b>	-	4,37	4,66
	<b>Areia (Kg)</b>	73,93	80,35	79,93
	<b>Brita (Kg)</b>	83,63	83,63	68,83
	<b>Água (Kg)</b>	16,69	15,09	14,92
	<b>Aditivo SP (g)</b>	-	161,79	186,53
	<b>Aditivo VMA (g)</b>	-	92,70	-

#### 4.5.4 Moldagem

Antes da concretagem, as fôrmas foram limpas e receberam aplicação de desmoldante. Conforme citado anteriormente, os protótipos concretados ficaram nas fôrmas, que permaneceram apoiadas no solo, com laterais e fundo montados, até os 28 dias.

##### 4.5.4.1 Moldagem do concreto auto-adensável

A colocação dos materiais na betoneira teve a seguinte ordem:

- a) 100% da brita;
- b) aproximadamente 50% da água;
- c) 100% do cimento;
- d) cerca de 70% do aditivo superplastificante e restante da água;
- e) 100% de areia;
- f) restante do aditivo superplastificante;
- g) aditivo VMA (quando necessário).

Foram realizadas duas betonadas consecutivas, uma para cada viga e seus respectivos vinte e dois corpos-de-prova cilíndricos, com intuito de respeitar a quantidade máxima de material recomendada para a betoneira, para assegurar a qualidade e homogeneidade da mistura. Após cada procedimento de mistura foram realizados o *Slump Flow Test* e o *V-funnel Test*, sendo obtidos os resultados indicados na tabela 4.16, em média.

Tabela 4.16: avaliação dos CAA's no estado fresco.

Tipo de Concreto	<i>Slump Flow Test</i>	<i>V-funnel Test</i>
CAA $\alpha = 55\%$	500 mm	5,33 s
CAA $\alpha = 60\%$	550 mm	6,46 s

Durante a concretagem do CAA com teor de argamassa igual a 60%, verificou-se visualmente a necessidade de acrescentar o aditivo VMA para aumentar a coesão da mistura. Foram adicionadas à mistura 139,86g de VMA, o que corresponde a 0,6% da quantidade de aglomerantes.

A figura 4.20a mostra o concreto antes do acréscimo do aditivo VMA. Observa-se que a mistura está pouco coesa, com tendência à segregação. Já na figura 4.20b observa-se o concreto restaurado, pronto para a moldagem das vigas e corpos-de-prova. Cabe destacar que a figura 4.20b apresenta coloração mais escura devido à variação nas condições de iluminação durante a realização do registro fotográfico. Na figura 4.21 observa-se o resultado do *Slump Flow Test* após o acerto da mistura. Ainda se nota uma pequena tendência à segregação, mas o traço atende às especificações do estudo.

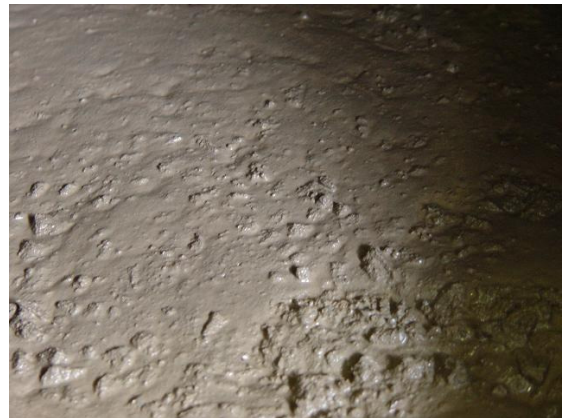


Figura 4.20: aparência do traço de CAA com  $\alpha = 60\%$  antes (a) e depois (b) da incorporação do aditivo VMA no traço.





Figura 4.21: ensaio de *Slump Flow Test* realizado após correção do traço de CAA com  $\alpha = 60\%$ .

Após o procedimento de mistura dos materiais na betoneira, foram moldadas as vigas. Em alguns pontos foram aplicados extensômetros elétricos nas armaduras. A figura 4.19 mostra as fôrmas prontas para concretagem, sendo possível observar os sacos plásticos usados para proteger a instrumentação. As figuras 4.22 a 4.26 mostram as operações de moldagem.



Figura 4.22: vigas prontas para serem moldadas.



Figura 4.23: transporte do concreto auto-adensável.



Figura 4.24: moldagem das vigas com concreto auto-adensável.



Figura 4.25: moldagem dos corpos-de-prova com concreto auto-adensável.



Figura 4.26: acabamento da superfície das vigas.

#### 4.5.4.2 Moldagem do concreto convencional

A colocação dos materiais na betoneira obedeceu a seguinte ordem:

- a) 100% da brita;
- b) aproximadamente 50% da água;
- c) 100% do cimento;
- d) cerca de 40% da água;
- e) 100% da areia;
- f) restante da água.

Foram realizadas duas betonadas consecutivas, uma para cada viga e seus respectivos vinte e dois corpos-de-prova cilíndricos. Após o primeiro procedimento de mistura foi realizado ensaio de abatimento de tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. O abatimento registrado foi de 150mm, como ilustrado na figura 4.27.



Figura 4.27: ensaio de abatimento de tronco de cone – CCV.

O procedimento de moldagem empregado foi o mesmo utilizado para as vigas de concreto auto-adensável, sendo apenas efetuado o adensamento, como descrito a seguir.

#### 4.5.5 Adensamento

O adensamento do concreto convencional foi executado com um vibrador de imersão de agulha, marca Weber Maschinenteknik do Brasil. O diâmetro externo da agulha vibrante era de 25mm.

O vibrador foi utilizado em duas etapas, primeiro quando as fôrmas foram preenchidas com metade do volume total e depois após o preenchimento de 100% do volume, conforme preconiza a NBR 5738 (ABNT, 2003) – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. O concreto auto-adensável dispensou esta etapa, uma vez que o material é projetado para ser empregado sem adensamento, se espalhando sob ação do peso próprio.

#### 4.5.6 Cura

A cura dos protótipos foi realizada com a utilização de sacos de linhagem aplicados sobre as fôrmas após aproximadamente três horas da concretagem até o sétimo dia. Após este período, as vigas ficaram submetidas às condições ambientais do laboratório.

Os corpos-de-prova de controle de 10x20cm foram cobertos com sacos plásticos por cerca de três horas após a moldagem, sendo desformados com 24 horas, conforme indicações da NBR 5738 (ABNT, 2003) – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova . A cura final dos cps de controle cilíndricos, até a data de ensaio, foi realizada em câmara úmida projetada para atender as especificações da NBR 9479 (ABNT, 2006) – Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova.

#### 4.5.7 Controle tecnológico das propriedades dos concretos

Os corpos-de-prova moldados foram identificados pelo nome do protótipo correspondente e pela data da concretagem. Dos vinte e dois corpos-de-prova confeccionados para cada viga, 2 unidades foram utilizadas para a realização de ensaios de compressão axial e duas unidades para ensaio de módulo de elasticidade, em 5 idades diferentes, perfazendo 20 corpos-de-prova. Duas unidades extras foram mantidas para eventuais necessidades, tais como a substituição de cps danificados, que acarretam resultados de ensaio espúrios.

Os ensaios foram efetuados em uma prensa computadorizada SHIMADZU, modelo UH2000kN, com capacidade de 40kN a 2000kN.

##### 4.5.7.1 Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão axial foi executado de acordo com a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 1994) - Concreto - Ensaio de compressão de corpos cilíndricos, sendo adotada uma velocidade de aplicação de carga de 0,3MPa por minuto

##### 4.5.7.2 Ensaio de módulo de elasticidade

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dos concretos produzidos foi realizado segundo as prescrições da norma brasileira NBR 8522 (ABNT, 1983) – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama – Tensão-deformação.

Os valores de carga e deslocamentos verticais foram coletados e armazenados através de um computador conectado à prensa.

O deslocamento transversal foi obtido através da média de leituras obtidas de dois LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*), acoplados ao corpo-de-prova como mostrado na figura 4.28.

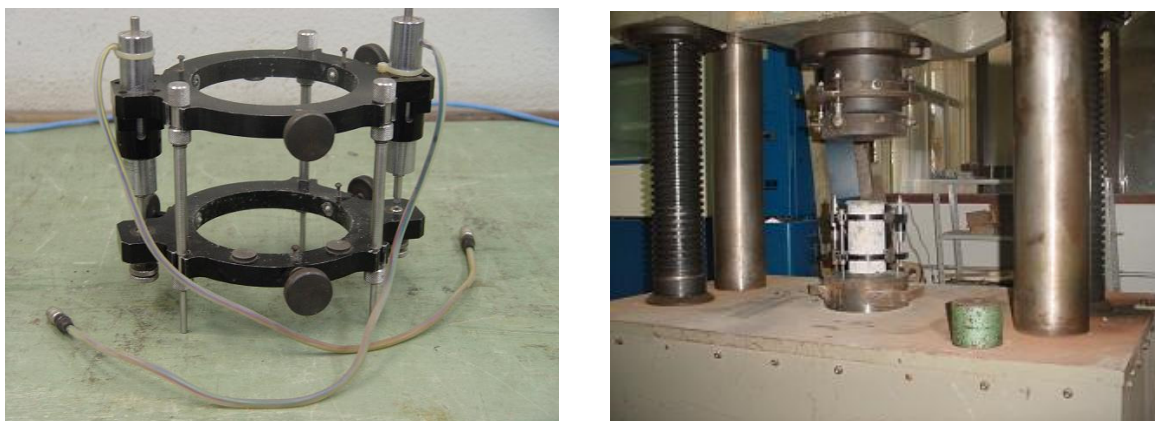


Figura 4.28: aparato de ensaio de módulo de elasticidade (a) e corpo-de-prova preparado para o ensaio (b).

#### 4.6 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação empregada nas vigas moldadas foi estabelecida com o objetivo de possibilitar o acompanhamento dos deslocamentos transversais ocorridos ao longo do tempo depois da aplicação do carregamento. O plano de instrumentação envolveu 3 grupos de sensores: deflectômetros e hastes de deslizamento para medição das flechas diferidas, e extensômetros elétricos para medição das deformações instantâneas no aço e no concreto.

Foram utilizados deflectômetros mecânicos da marca *Mitutoyo*, com curso de 50 mm e precisão de 0,01mm, instalados na parte superior das vigas, no centro e no terço médio. Os relógios foram posicionados com auxílio de bases magnéticas marca *Starret* e *Magnetic Base*, diretamente fixadas no pórtico de instrumentação, o qual é independente do aparato de apoio para as vigas, como já foi comentado.

Com o objetivo de verificar a estabilidade do pórtico de ensaio durante o carregamento das vigas, foram posicionados quatro relógios para leitura dos deslocamentos lineares do perfil I, sendo três relógios digitais da marca *Mitutoyo*, com curso de 30 mm e precisão 0,01, e um relógio mecânico, com as mesmas especificações dos utilizados para aferir as vigas. Instalaram-se dois relógios por cavalete, um na extremidade esquerda e outro na direita, para acompanhar a movimentação em ambas as direções, conforme indicam as figuras 4.29 e 4.30.



Figura 4.29: instrumentação do pórtico - relógios 1 e 2.



Figura 4.30: instrumentação do pórtico - relógios 3 e 4.

Os pinos metálicos de deslizamento utilizados em paralelo aos relógios comparados eram formados por hastes de latão, com comprimento de aproximadamente 30cm e diâmetro de 6,35mm. Este material apresenta resistência adequada para não envergar com o tempo e comprometer as leituras, e também desliza facilmente quando em contato com outro metal. Todos os pinos sofreram torneamento mecânico em uma de suas extremidades, para torná-las pontiagudas, garantindo área de contato com a viga similar à dos deflectômetros empregados.

O controle da movimentação dos pinos metálicos foi efetuado com auxílio de um paquímetro digital, marca Vonder, com 150mm de curso e precisão de 0,01mm. A figura 4.31 ilustra o procedimento de leitura efetuado com paquímetro digital.



Figura 4.31: procedimento de leitura dos pinos metálicos 3 e 4.

## 4.7 CARREGAMENTO

As cargas aplicadas foram colocadas de maneira a obedecer ao modelo estrutural teórico estipulado no planejamento experimental. Além da carga uniformemente distribuída, representada pelo peso próprio das vigas, foi aplicada uma carga central concentrada, equivalente a uma carga real distribuída de uma viga deste tipo que superasse o momento de fissuração.

Decidiu-se aplicar o carregamento externo após 28 dias de idade das vigas, pois esta é uma idade na qual, na prática, usualmente se libera totalmente o carregamento de elementos reais de obras de construção civil. Mas, por atraso na confecção do pórtico de apoio e de instrumentação, as vigas receberam a carga de projeto aos 55 dias.

O carregamento foi gerado através da colocação de uma gaiola metálica com elementos de concreto, suspensa através de fios de aço que se apoiavam num rolete posicionado no centro da viga.

O primeiro passo do carregamento consistiu em deformar uma pequena parte das extremidades inferiores da fôrma, para que a viga pudesse ser posicionada no pórtico de ensaio ainda com o restante da fôrma, mas com a superfície inferior dos protótipos



diretamente em contato com os apoios. A figura 4.32 mostra a viga posicionada no pórtico de ensaio e a figura 4.33 apresenta o detalhe da superfície inferior da viga em contato direto com o apoio.



Figura 4.32: viga posicionada no pórtico de ensaio ainda com o restante da fôrma.

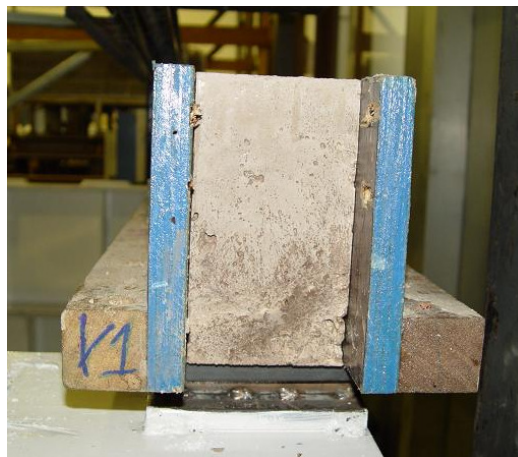


Figura 4.33: superfície inferior da viga diretamente sob o apoio.

Em seguida, instalaram-se os aparatos de instrumentação sobre a viga, nas posições pré-definidas, para que a leitura inicial fosse efetuada antes da retirada da fôrma. A leitura dos deflectômetros foi realizada antes da desforma e logo após a aplicação da carga concentrada, para verificação da flecha imediata.

Após a primeira leitura, cujos resultados foram adotados como marco inicial de referência, retirou-se o restante da fôrma e fez-se uma nova leitura, enquanto a viga estava sujeita apenas ao seu peso próprio (figura 4.34). Prosseguindo com o carregamento do protótipo, posicionou-se o rolete metálico sobre a viga e posicionou-se a gaiola metálica que permitia a colocação

dos pesos de concreto. Quando se alcançou a metade da carga concentrada prevista, fez-se nova leitura para acompanhar o crescimento da flecha (figura 4.35). Novas leituras foram realizadas depois de completado o carregamento concentrado (figura 4.36) e após algumas horas de carregamento, para verificar alguma movimentação adicional.



Figura 4.34: vista de uma das vigas após a desforma.



Figura 4.35: vista do elemento com metade do carregamento concentrado aplicado.



Figura 4.36: carregamento concentrado completo.

#### 4.8 MONITORAMENTO DAS FLECHAS E DO MEIO DE INSERÇÃO AO LONGO DO TEMPO

A partir do final do carregamento e realização das últimas leituras de controle inicial, se estabeleceu um regime de leituras que foi mais concentrado nas primeiras semanas (3 vezes por semana), e que foi reduzido ao longo do tempo, dada a estabilidade das leituras, para uma periodicidade semanal. O procedimento foi o mesmo para todas as seis vigas.

No caso dos pinos metálicos, foram realizadas três leituras independentes em cada ponto, sendo permitida uma variação máxima entre elas de 0,05mm. O valor final registrado era a média das três determinações.

Em paralelo ao registro das leituras dos relógios comparadores e pinos metálicos, foi efetuado um monitoramento das condições ambientais, utilizando um higrotermômetro digital, marca *TFA Dostmann*, para registro da temperatura e umidade do ar. As leituras das condições ambientais foram realizadas sempre que os deflectômetros eram lidos.

#### 4.9 RETIRADA DO CARREGAMENTO

Antes de iniciar o descarregamento de cada viga, fez-se a leitura dos relógios mecânicos e dos pinos metálicos, representando a última coleta de dados com as vigas sob toda a carga

estipulada. Depois disto se retirou a carga atuante em três etapas, aproximadamente iguais, sempre realizando leitura da instrumentação entre cada fase de retirada de carga.

A última leitura ocorreu quando a viga estava apenas sob ação de seu peso próprio. A etapa final consistiu em desacoplar a instrumentação entre o pórtico de apoio onde estavam fixadas e as vigas, para que os protótipos pudessem ser transportados para um local adequado, permitindo acesso à próxima viga.

Para acompanhar o processo de descarregamento das vigas, instalaram-se dois relógios digitais extras no centro dos dois montantes que constituem o pórtico de apoio das vigas, para que pudesse ser registrado o movimento vertical destes componentes, o qual influiria diretamente no valor das flechas verticais obtidas. A figura 4.37 mostra o posicionamento dos dois relógios digitais extras instalados.

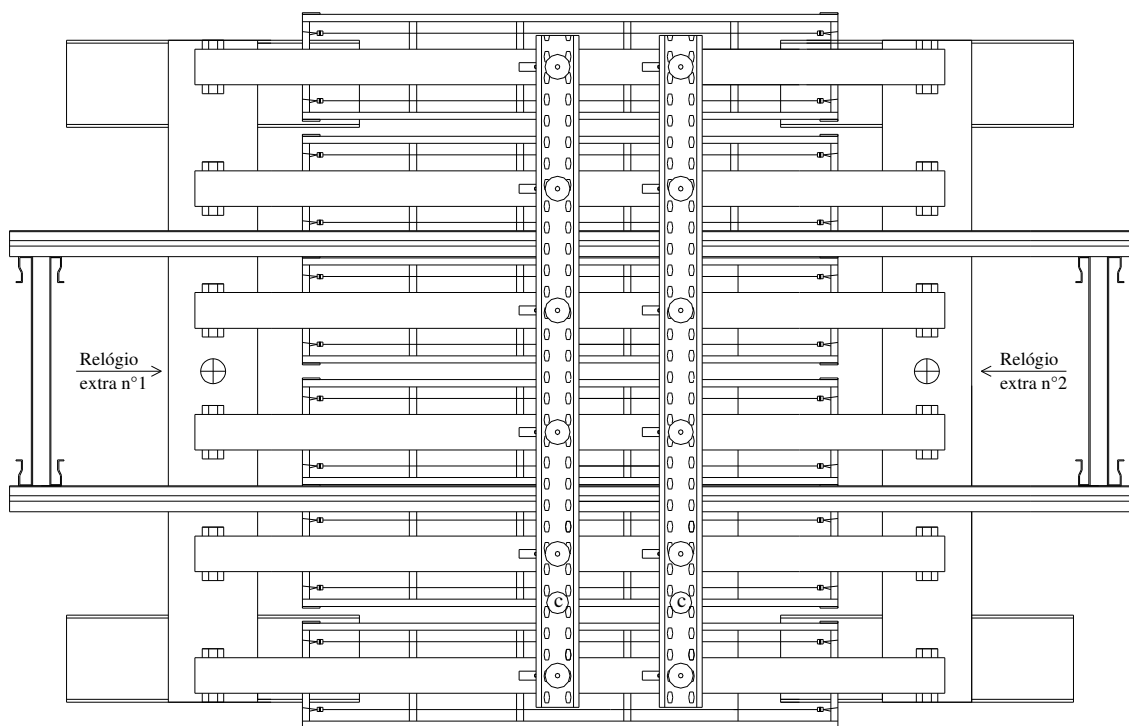


Figura 4.37: posicionamento dos sensores de controle da deformação elástica dos apoios no descarregamento.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para os deslocamentos transversais das vigas confeccionadas neste trabalho. Os dados experimentais são comparados com uma estimativa analítica, obtida através da NBR 6118 (ABNT, 2003) – Projeto de estruturas de concreto, e com uma estimativa numérica, calculada com auxílio de um programa computacional formulado com modelagem em elementos finitos.

A organização dos resultados se dará em quatro etapas: primeiramente se apresentarão os dados coletados através do controle tecnológico dos concretos elaborados. Após, serão expostos os resultados experimentais, analisando as tendências de comportamento ao longo do período de ensaio. A seguir, serão mostrados os resultados analíticos e numéricos, e, para completar a análise, os resultados serão comparados entre si.

### 5.1 CONTROLE TECNOLÓGICO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

Neste item, será apresentado um resumo dos resultados médios de compressão axial e módulo de elasticidade, para cada tipo de concreto produzido, calculados a partir dos dados coletados nos ensaios. Os resultados específicos de cada corpo-de-prova estão no Anexo I.

#### 5.1.1 Ensaio de Compressão Axial

A tabela 5.1 mostra os resultados obtidos em ensaios de compressão axial para os concretos elaborados nesta pesquisa. O ensaio foi regido pelas instruções da NBR 5739 (ABNT, 1994) - Concreto - Ensaio de compressão de corpos cilíndricos, conforme já mencionado no Capítulo 4. Os valores apresentados são provenientes do cálculo da média dos 6 valores individuais de ensaios obtidos para os concretos das vigas 01 e 02. Já a figura 5.1 apresenta um gráfico da evolução da resistência à compressão ao longo do tempo, para que se possa melhor visualizar o crescimento desta propriedade. Observa-se que o concreto CAA55 só atinge a resistência esperada aos 125 dias, provavelmente porque esta mistura não apresenta um teor de argamassa elevado, inferior ao que normalmente se emprega em uma mistura de CAA. Como já discutido, isto foi feito para tentar obter uma mistura intermediária entre as demais.

Tabela 5.1: resultados de resistência média à compressão.

Concreto	Identificação	Valores Médios (MPa)				
		3 dias	7 dias	55 dias	125 dias	208 dias
CCV	Viga 01	18,00	23,50	34,62	37,62	38,82
	Viga 02	19,69	23,82	33,81	37,26	39,24
CAA55	Viga 01	11,01	16,48	33,59	32,85	32,54
	Viga 02	10,16	15,31	29,89	30,98	30,95
CAA60	Viga 01	13,87	21,81	36,73	39,49	40,09
	Viga 02	14,57	23,15	38,08	40,97	39,31

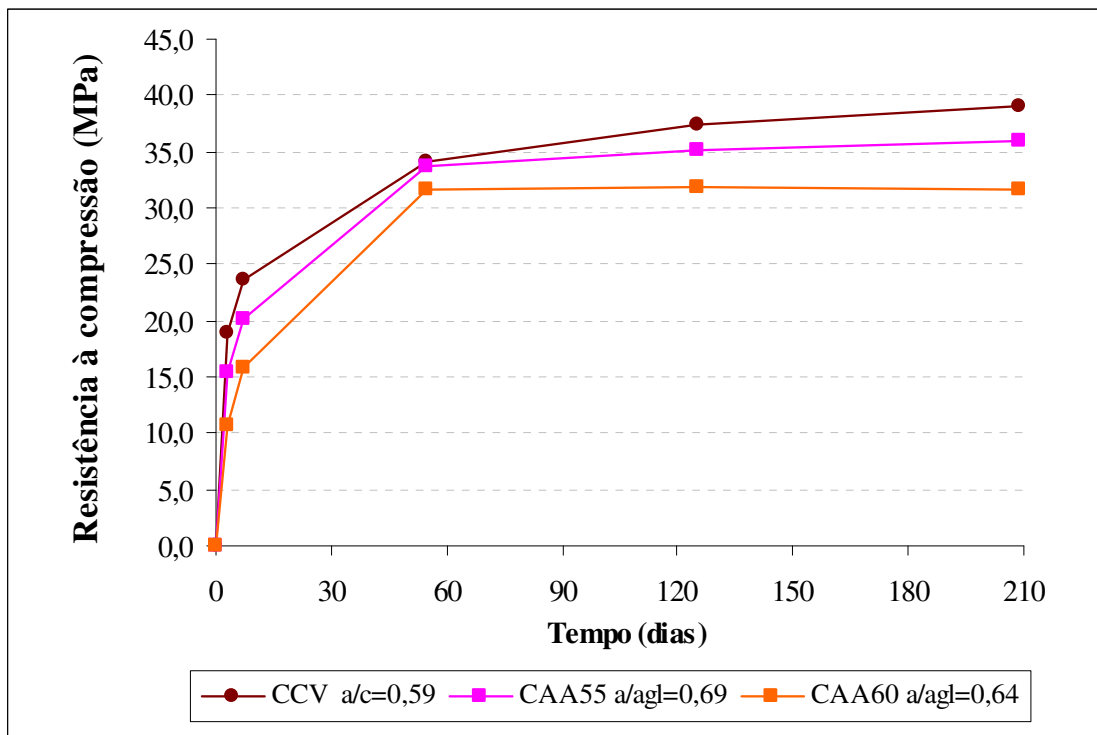


Figura 5.1: evolução da resistência à compressão axial.

### 5.1.2 Ensaio de Módulo de Elasticidade

A tabela 5.2 contém os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, para os concretos elaborados nesta pesquisa. O procedimento de ensaio foi regido pelas instruções da NBR 8522 (ABNT, 1983) – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação, conforme mencionado no Capítulo 4. A figura 5.2 apresenta a evolução do módulo ao longo do tempo, permitindo visualizar o desenvolvimento desta propriedade. Observa-se que todas as misturas apresentam comportamento similar neste ensaio.

Tabela 5.2: resultados de ensaios de módulo de elasticidade.

Concreto	Descrição	Valores Médios (GPa)				
		3 dias	7 dias	55 dias	125 dias	208 dias
CCV	Média experimental	22,76	25,70	31,04	32,45	26,81
	Média NBR 6118	20,95	23,15	27,83	29,12	29,73
CAA55	Média experimental	14,95	20,28	29,65	28,91	28,84
	Média NBR 6118	15,48	18,96	26,05	26,78	26,80
CAA60	Média experimental	17,51	16,07	30,16	30,72	31,97
	Média NBR 6118	17,92	22,56	29,10	30,18	30,13

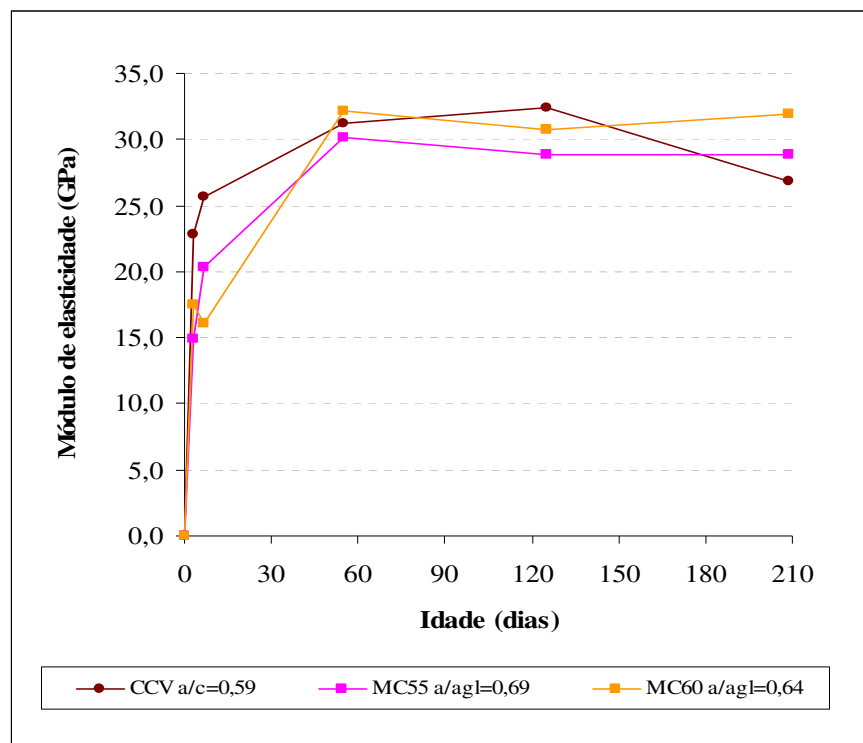


Figura 5.2: evolução do módulo de elasticidade.

Em complementação, a figura 5.3 mostra um comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente e as estimativas de valor de modulos calculadas através da NBR 6118 (ABNT, 2003) – Projeto de estruturas de concreto.

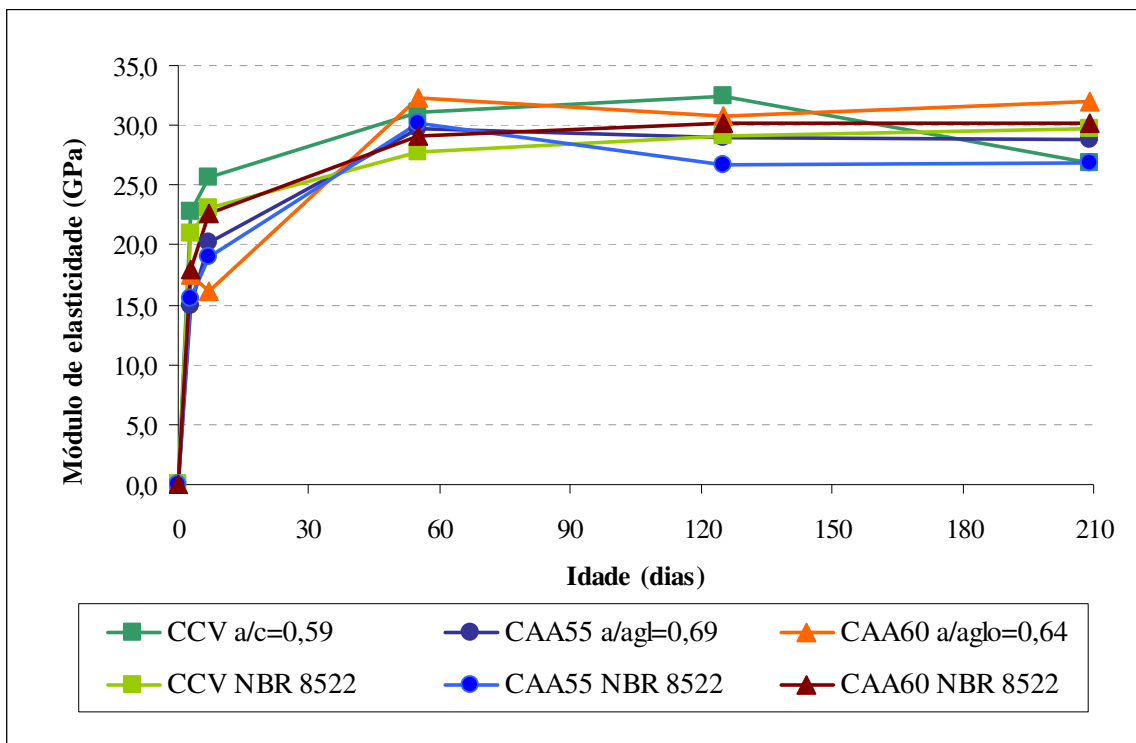


Figura 5.3: comparação dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente e através da NBR 6118.

Observa-se que os resultados calculados a partir da NBR 6118 (ABNT, 2003) – Projeto de estruturas de concreto são bastante próximos aos coletados experimentalmente, formando curvas com desenvolvimento similar, indicando que os resultados da fórmula da Norma Brasileira retratam corretamente os valores reais.

## 5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste item, os dados coletados referentes aos deslocamentos transversais serão avaliados em três etapas distintas: no instante do carregamento, em leituras ao longo do tempo e no momento do descarregamento das vigas, completando a análise do período em que as vigas estiveram em carga.

### 5.2.1 Flecha Imediata

Durante o carregamento das vigas, conforme descrito no Capítulo 4, colocaram-se as vigas em carga em diversas etapas, intercalando estas etapas com a leitura da instrumentação fixada sob as vigas. A seqüência a seguir resume claramente estas etapas já descritas anteriormente:



- a) posicionamento da viga ainda com fôrma sob o pórtico de apoio, fixação da instrumentação prosseguida por uma leitura dos relógios mecânicos e pinos metálicos;
- b) retirada da fôrma e nova leitura da instrumentação, sendo que a viga estava apenas sob seu peso próprio;
- c) início do carregamento com blocos e vigotas de concreto até atingir, aproximadamente, metade do valor da carga estipulada, seguido de nova leitura;
- d) finalização do carregamento e última leitura referente à flecha imediata.

A seguir, apresenta-se, através das figuras 5.4 a 5.9, o desempenho do deslocamento central e do terço médio durante o início do carregamento, mostrando a evolução da flecha imediata de cada viga. Já as figuras 5.11 e 5.12 reúnem os deslocamentos imediatos de todas as vigas, comparando o desempenho do deslocamento central e do terço médio.

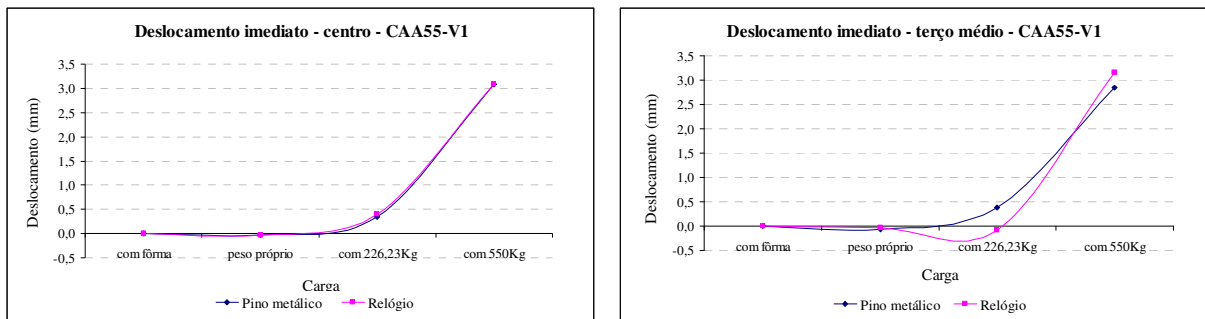


Figura 5.4: evolução do deslocamento imediato – CAA55-V1.

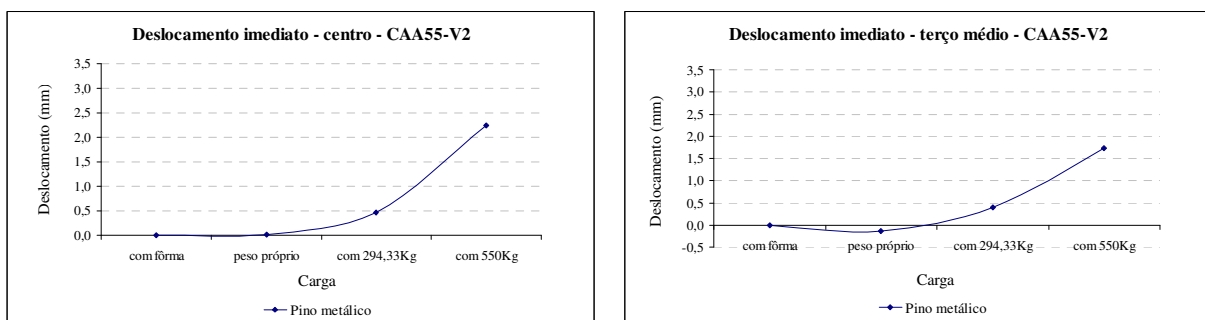


Figura 5.5: evolução do deslocamento imediato – CAA55-V2.

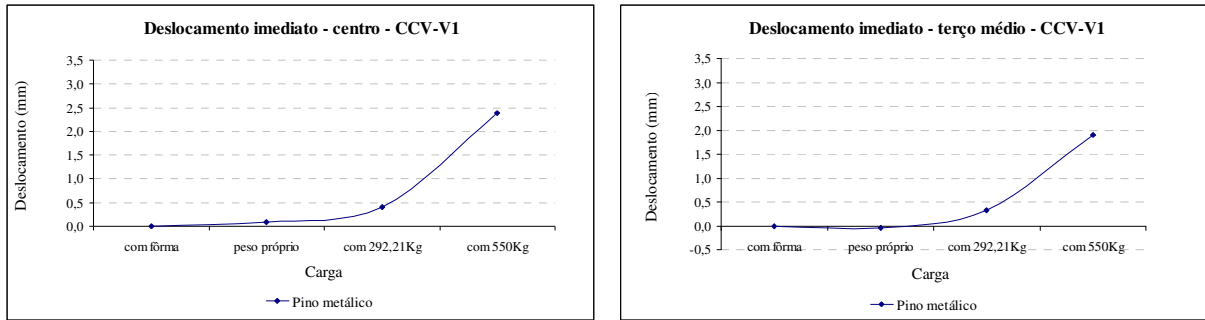


Figura 5.6: evolução do deslocamento imediato – CCV-V1.

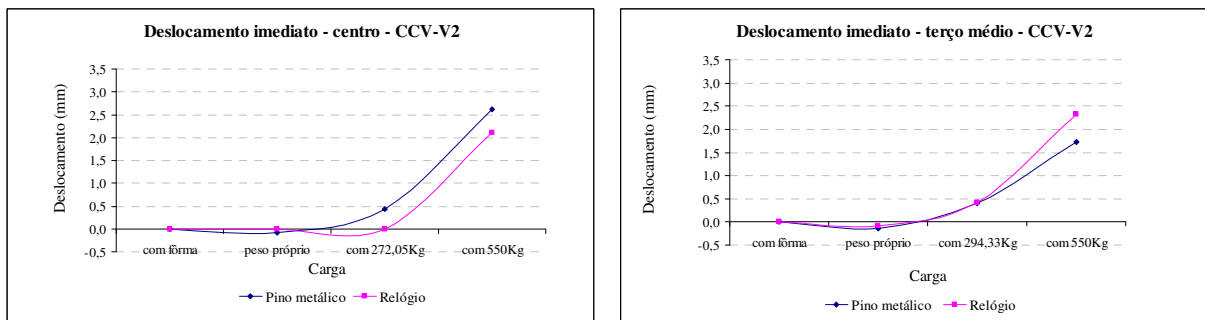


Figura 5.7: evolução do deslocamento imediato – CCV-V2.

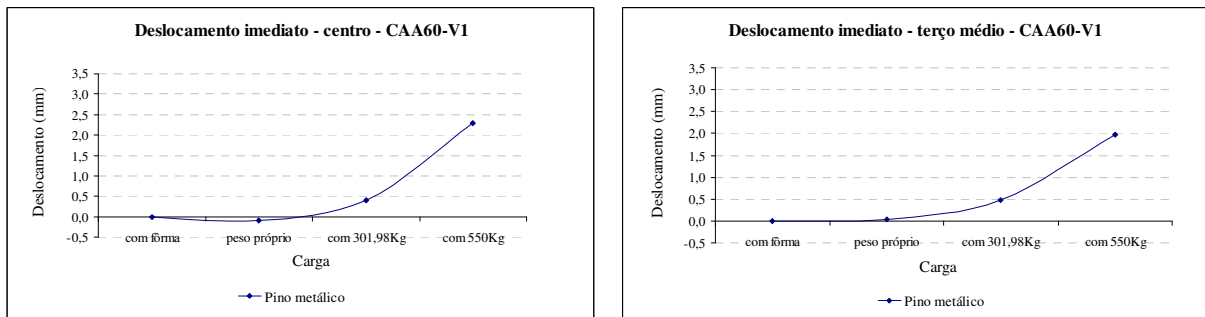


Figura 5.8: evolução do deslocamento imediato – CAA60-V1.

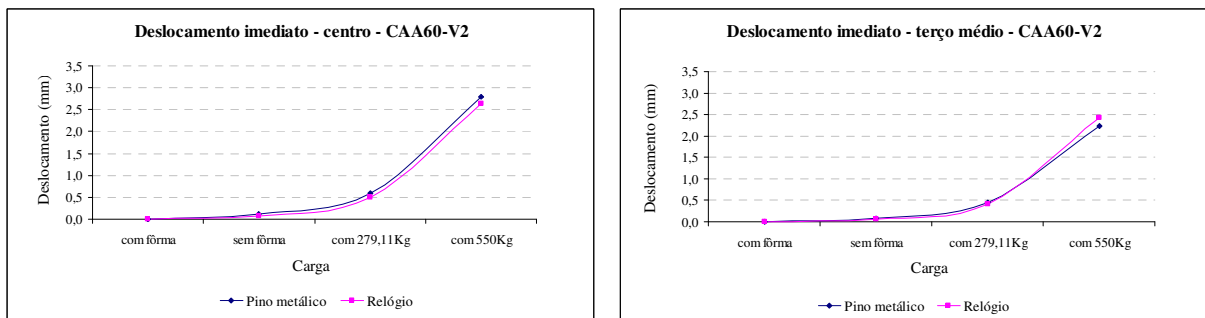


Figura 5.9: evolução do deslocamento imediato – CAA60-V2.

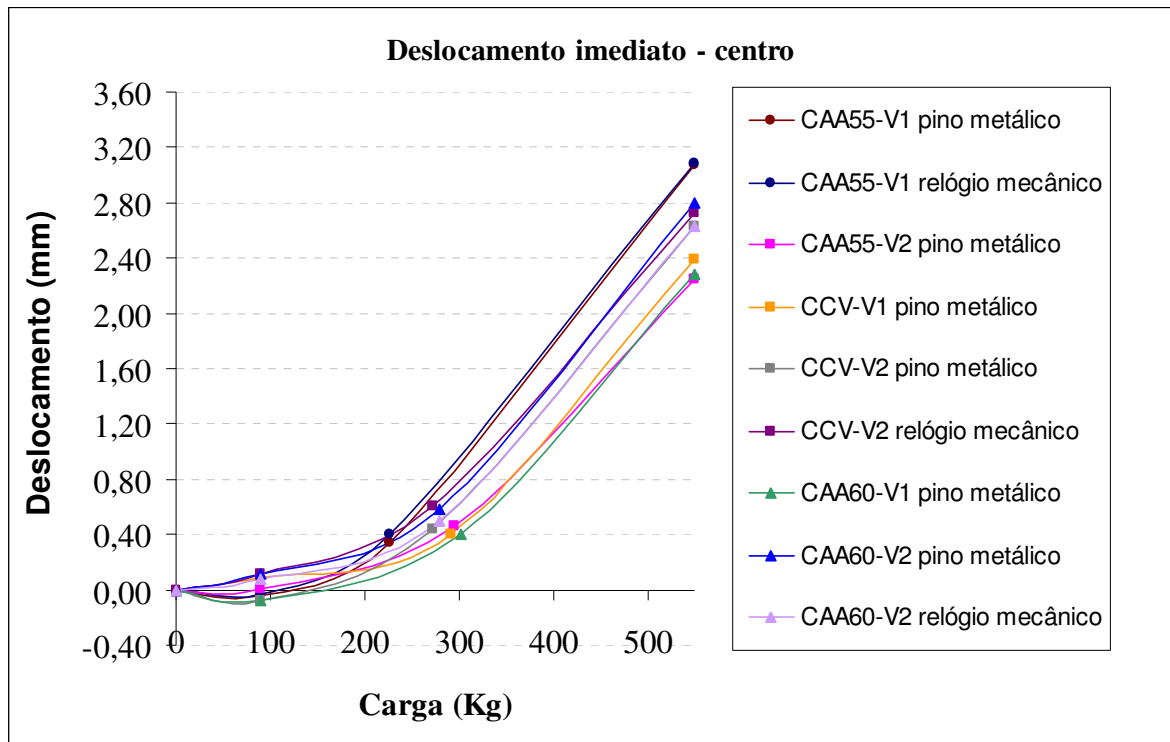


Figura 5.10: evolução do deslocamento imediato – centro.

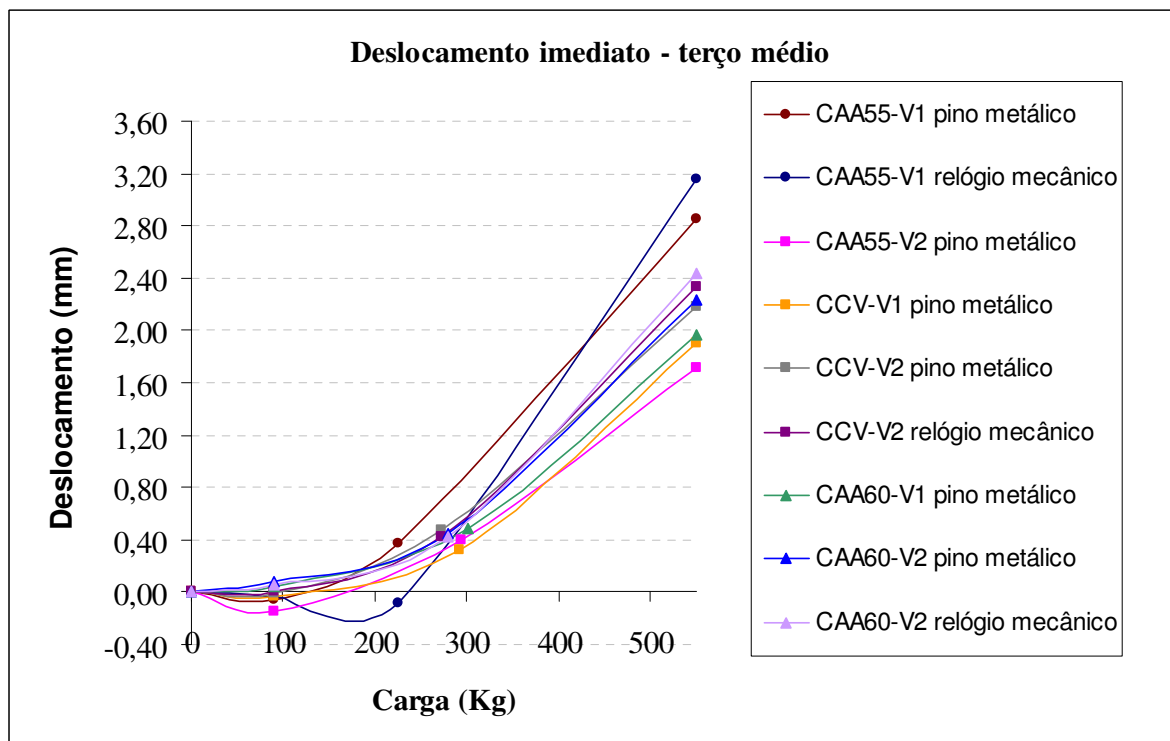


Figura 5.11: evolução do deslocamento imediato – terço médio.

Observa-se através das figuras expostas que as curvas os deslocamentos transversais imediatos, tanto no centro quanto no terço médio, apresentam o mesmo comportamento, mantendo seus valores finais em uma faixa relativamente próxima, sendo que os valores obtidos para o centro são maiores do que os obtidos para o terço médio, como esperado.

### 5.2.2 Deslocamento ao longo do tempo

O carregamento permanente das vigas se iniciou quando os protótipos completaram 55 dias de idade, sendo que as vigas foram colocadas em carga em datas diferentes, pois a montagem e a instrumentação das mesmas são demoradas e requerem atenção especial, não havendo mão-de-obra nem equipamentos especializados no laboratório para carregar as seis vigas num mesmo dia.

O descarregamento das vigas foi realizado em um mesmo dia, visto que o procedimento de retirada de carga e de instrumentação é mais rápido e mais simples do que o de carregamento. Desta forma, os protótipos estiveram, em média, 154 dias em carga.

No Anexo II estão apresentadas as planilhas com as leituras, tomadas ao longo do tempo, dos relógios mecânicos e pinos metálicos posicionados no pórtico de carga e no pórtico de instrumentação. Para a determinação da flecha de cada protótipo, o valor da leitura foi corrigido subtraindo-se o valor do deslocamento na seção central do pórtico de apoio das vigas (0,15mm) e o valor da movimentação indicada pelos relógios mecânicos fixados nas extremidades do perfil I de apoio às vigas (0,05mm).

As figuras 5.12 a 5.19 apresentam os gráficos de deslocamento em função do tempo, que contêm o desenvolvimento das flechas ao longo do tempo para todas as vigas, confeccionadas com diferentes tipos de concretos. Ainda, foram registrados os valores de umidade e temperatura no decorrer do tempo (figuras 5.20 e 5.21), anotando estes valores no instante da medição e os valores máximos e mínimos acumulados no higrôtermômetro digital entre duas leituras. Ambos os gráficos apresentam uma linha vermelha, a qual indica o valor médio das leituras.

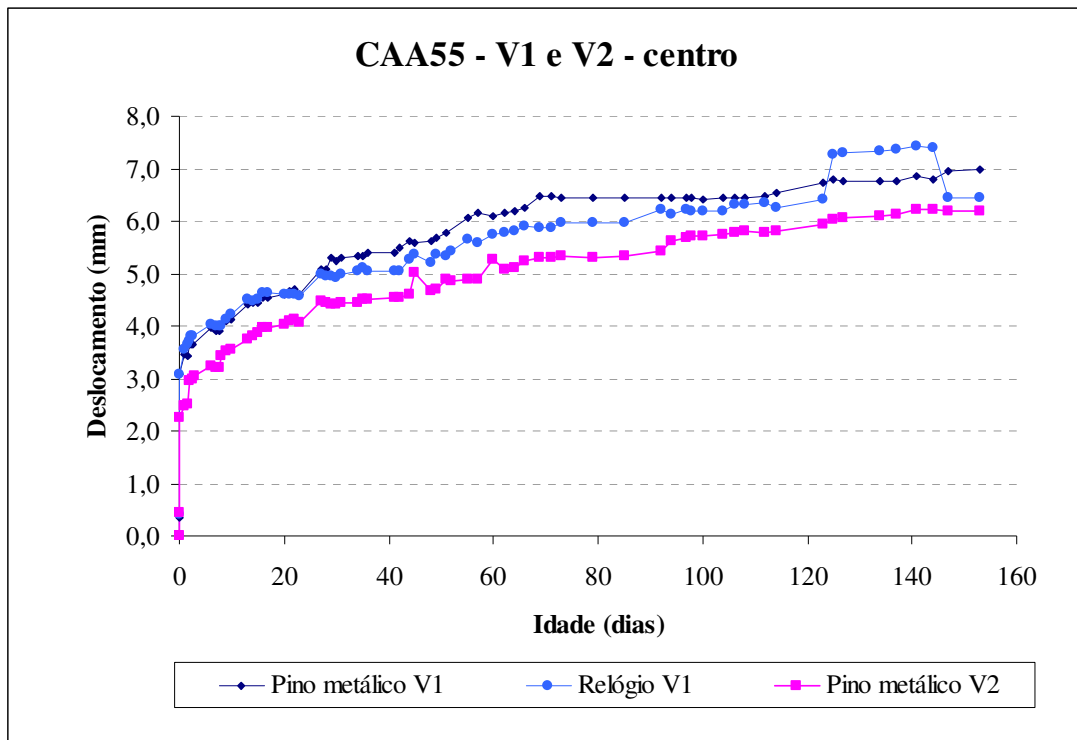


Figura 5.12: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA55 – V1 e V2 - centro.

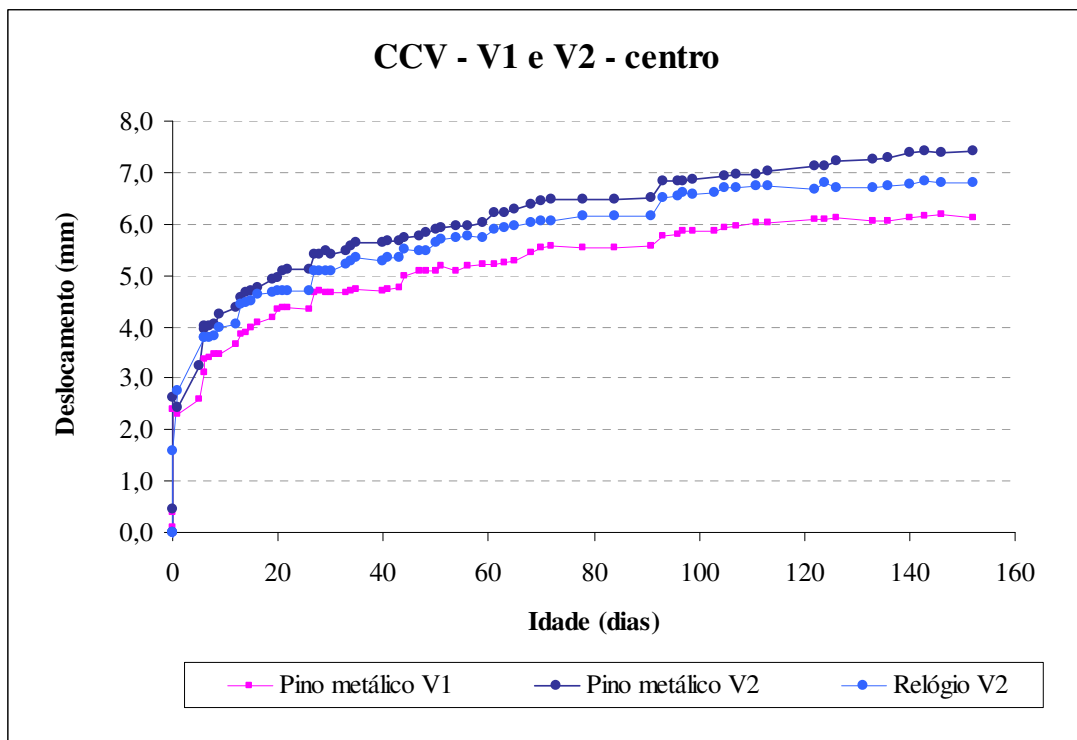


Figura 5.13: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CCV – V1 e V2 - centro.

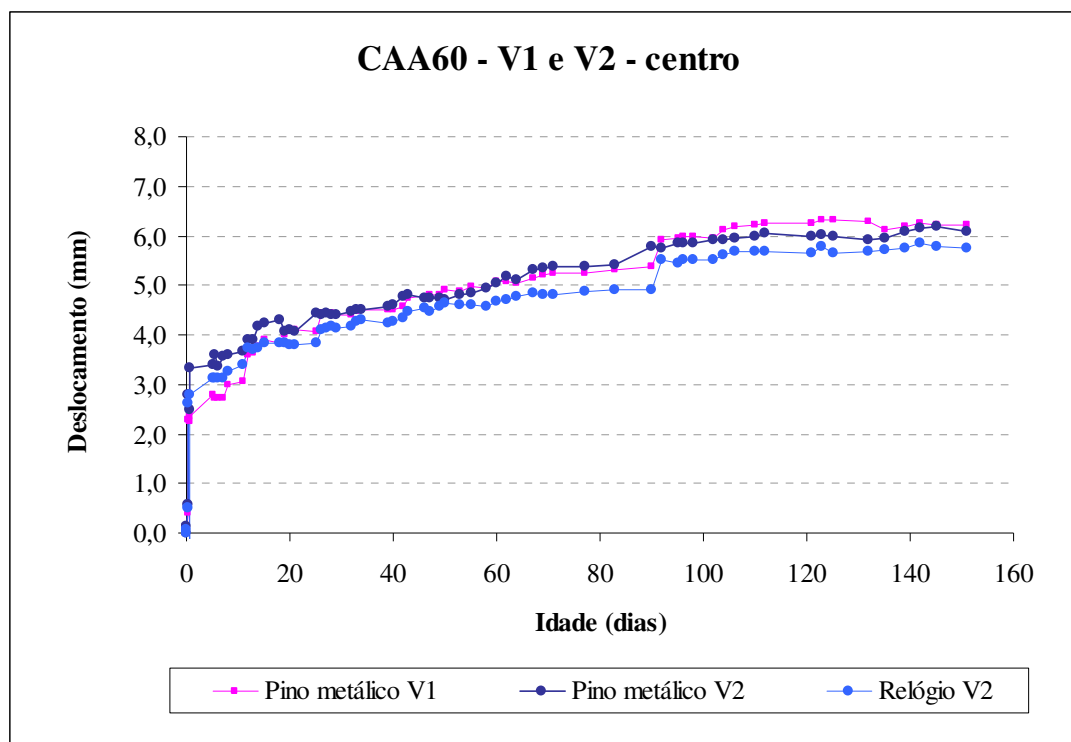


Figura 5.14: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA60 – V1 e V2 - centro.

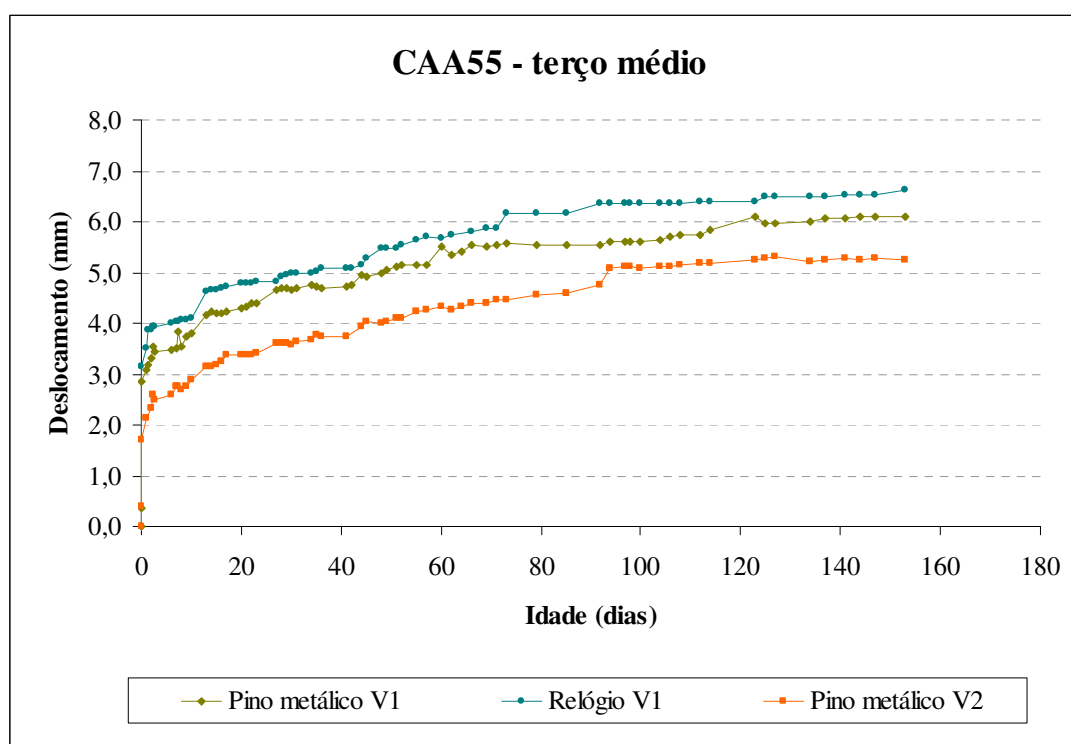


Figura 5.15: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA55 – V1 e V2 – terço médio.

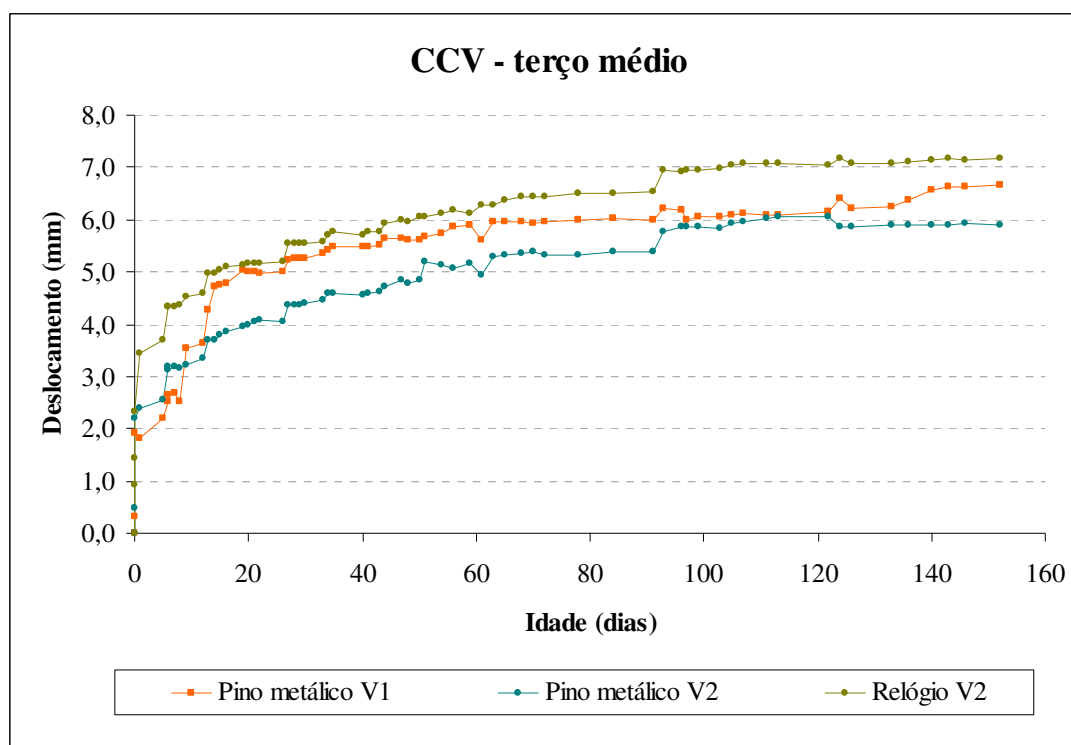


Figura 5.16: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CCV – V1 e V2 – terço médio.

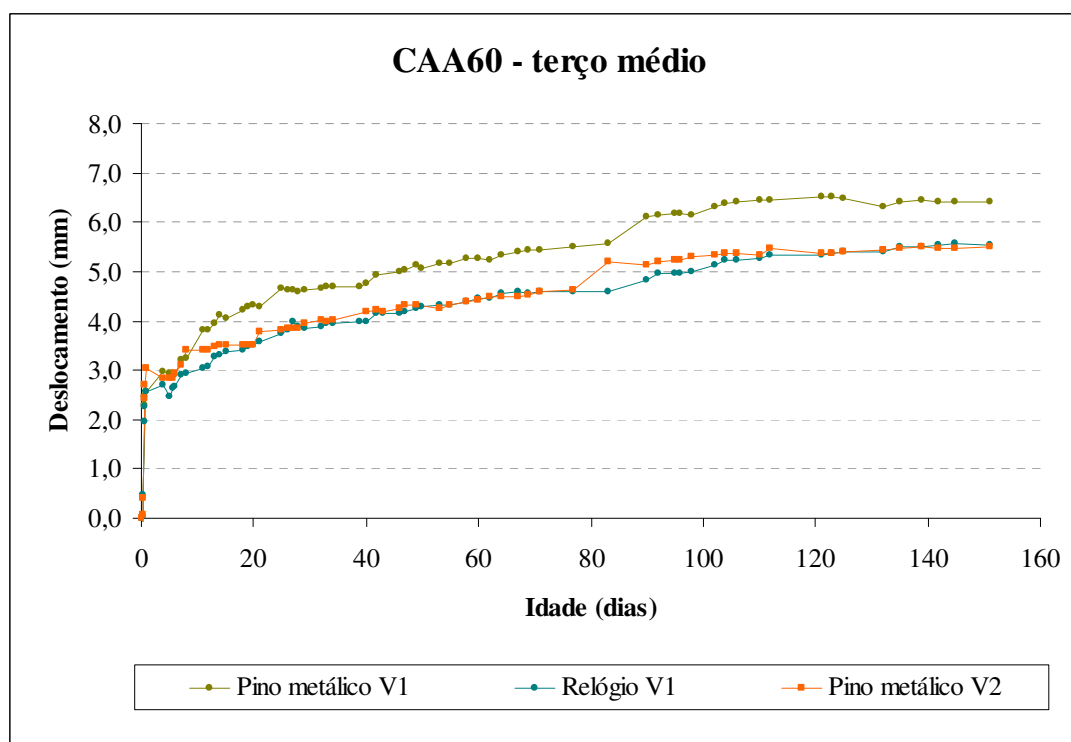


Figura 5.17: deslocamento ao longo do tempo para os protótipos CAA60 – V1 e V2 – terço médio.

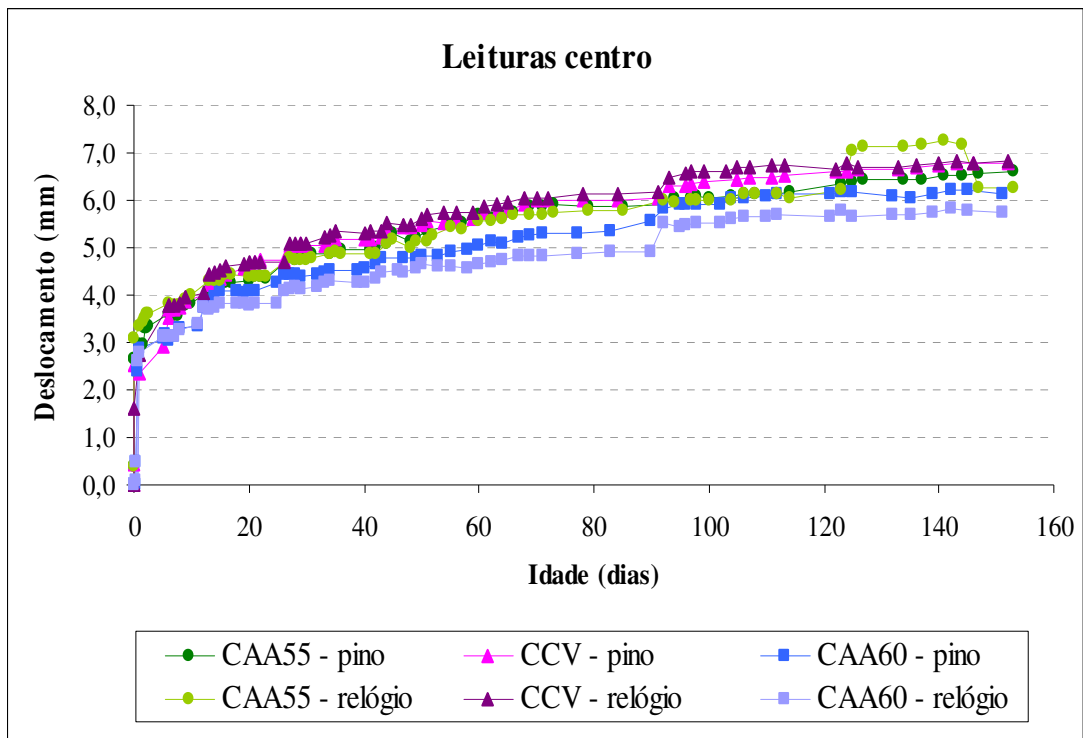


Figura 5.18: deslocamento ao longo do tempo – comparativo centro.

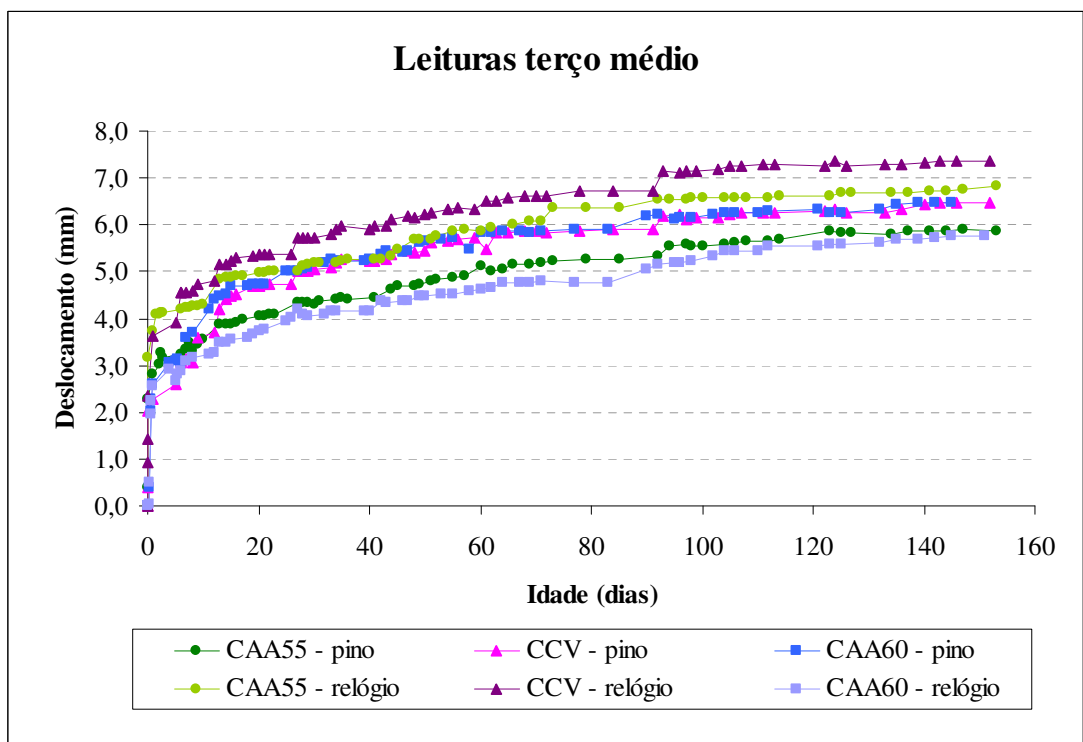


Figura 5.19: deslocamento ao longo do tempo – comparativo terço médio.



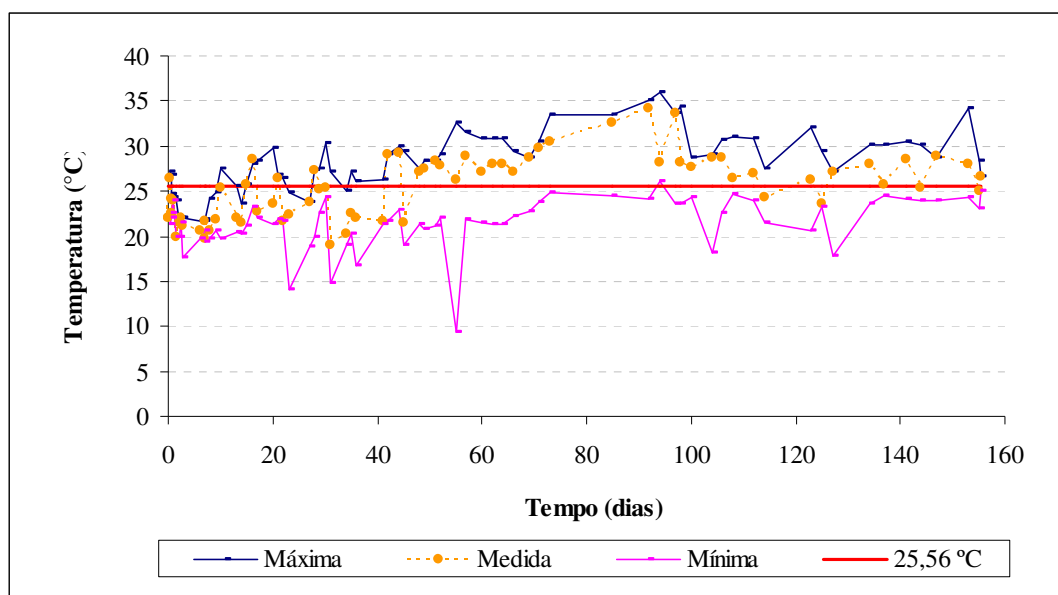


Figura 5.20: registro da temperatura ao longo do tempo.

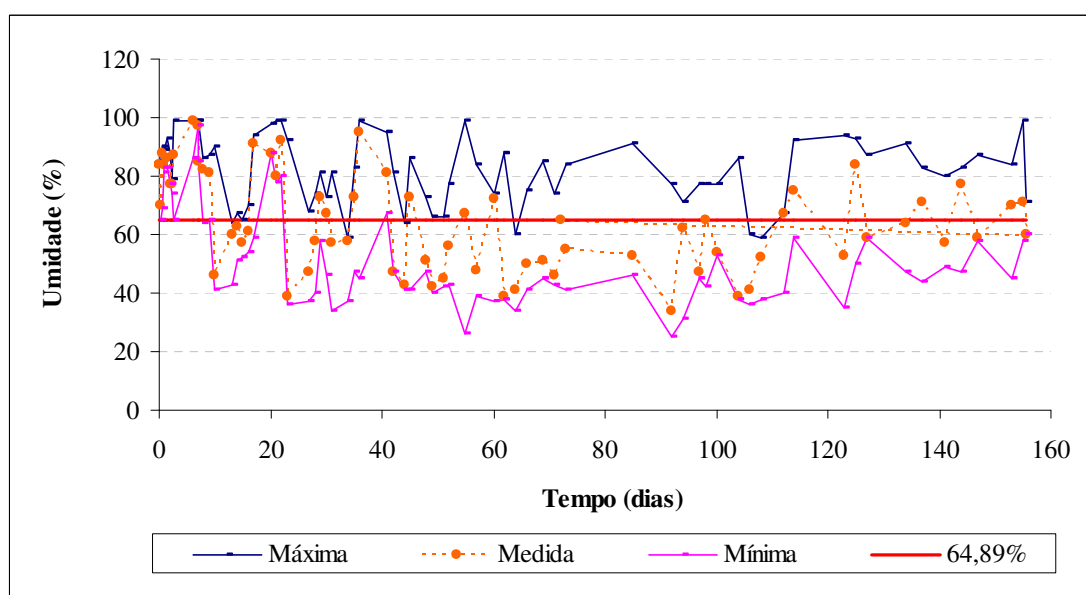


Figura 5.21: registro de umidade ao longo do tempo.

Como se pode observar nas figuras, os protótipos CAA-V1 e CAA-V2 apresentaram comportamentos bastante semelhantes, no que se refere aos deslocamentos verticais centrais. A curva, referente ao relógio metálico da viga 1, sofreu um aumento brusco no final da curva, o que foi atribuído a um eventual erro no procedimento de leitura ou problemas de funcionamento do relógio mecânico.

A semelhança nas curvas pode ser analisada também comparando os resultados das vigas CCV-V1 e CCV-V2, onde se verifica que a tendência de comportamento é muito parecida para os dois testemunhos.

Os protótipos CAA60-V1 e CAA60-V2 também apresentaram deslocamentos verticais muito semelhantes entre si, tendo suas curvas quase sobrepostas.

As curvas obtidas para os resultados do terço médio também apresentam comportamento semelhante quando se analisam os gráficos plotados, para os diferentes tipos de concretos produzidos. Observa-se que a faixa de dispersão dos resultados é levemente maior do que para os resultados de deslocamentos centrais, porém os valores finais encontrados são inferiores aos centrais, como seria de se esperar.

A deformada das vigas fletidas pode ser analisada a figura 5.22, que indica a variação dos deslocamentos ao longo do tempo. Vale a pena ressaltar que nas vigas em que há quatro pontos de leitura, o primeiro ponto é referente a um relógio mecânico e o segundo a um pino metálico.

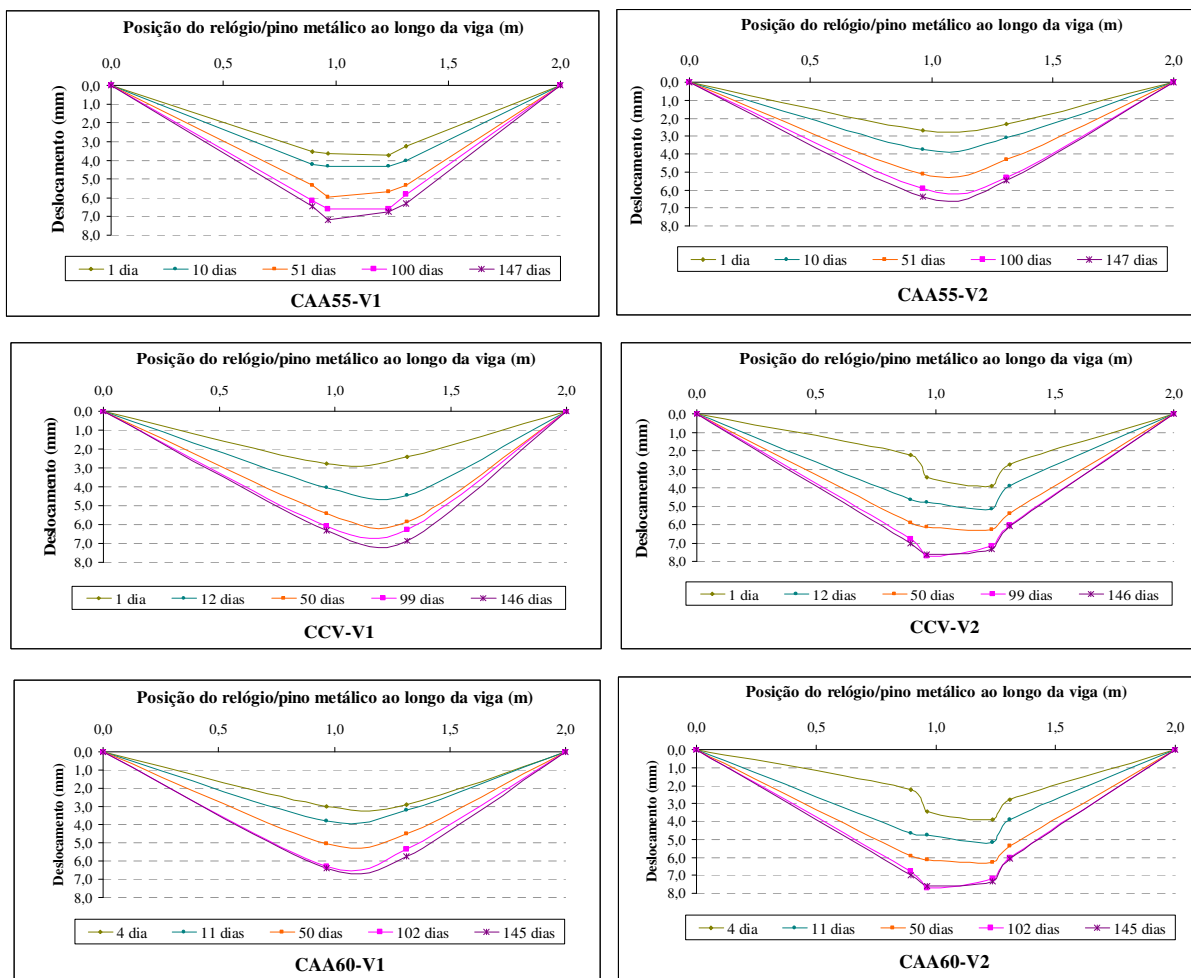


Figura 5.22: acompanhamento da deformada dos protótipos ao longo do tempo.

### 5.2.3 Análise da flecha elástica durante descarregamento das vigas

As flechas elásticas foram medidas durante o procedimento de descarregamento das vigas, o qual teve o intuito de aferir qual o nível de recuperação elástica de cada protótipo.

Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 5.23 a 5.28.

A tabela 5.3 apresenta uma comparação entre os resultados imediatos na época do carregamento, os valores numéricos máximos registrados para a flecha total e os valores da flecha elástica registrados durante o descarregamento.

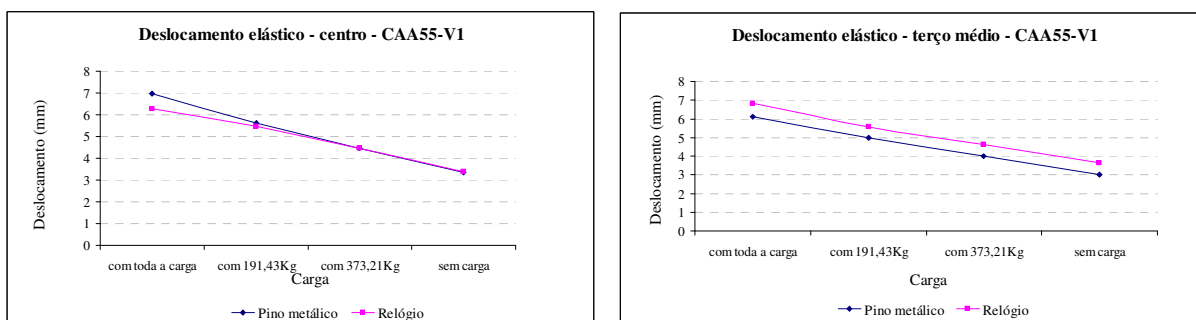


Figura 5.23: Evolução do deslocamento elástico – CAA55-V1.

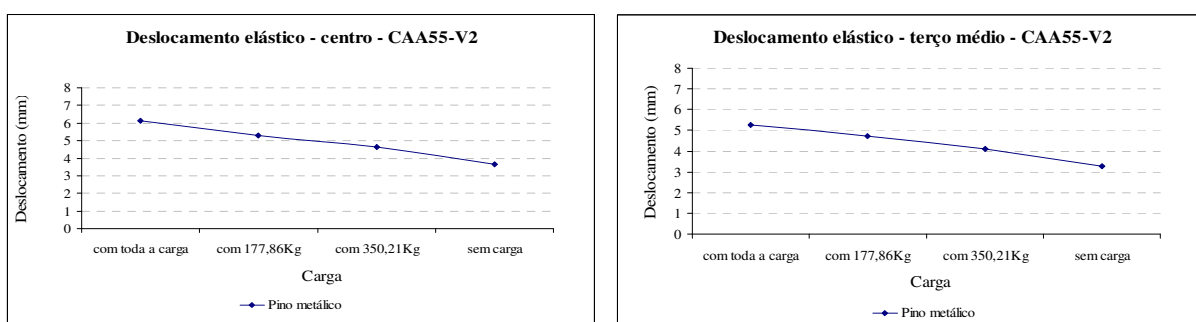


Figura 5.24: Evolução do deslocamento elástico – CAA55-V2.

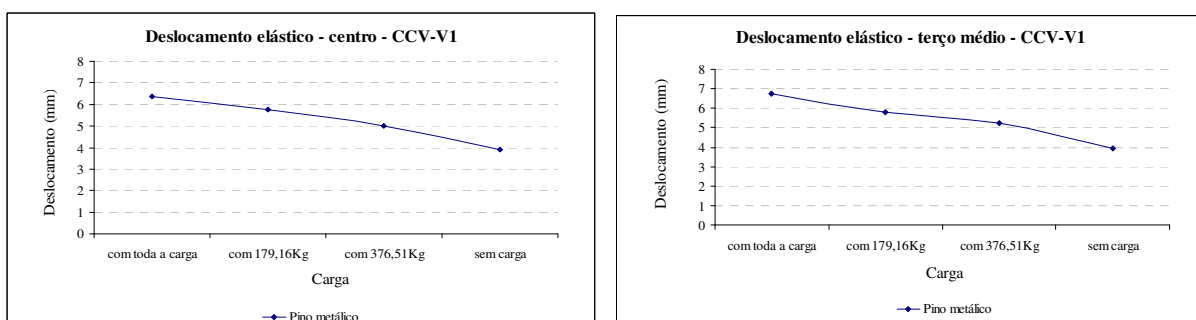


Figura 5.25: Evolução do deslocamento elástico – CCV-V1.

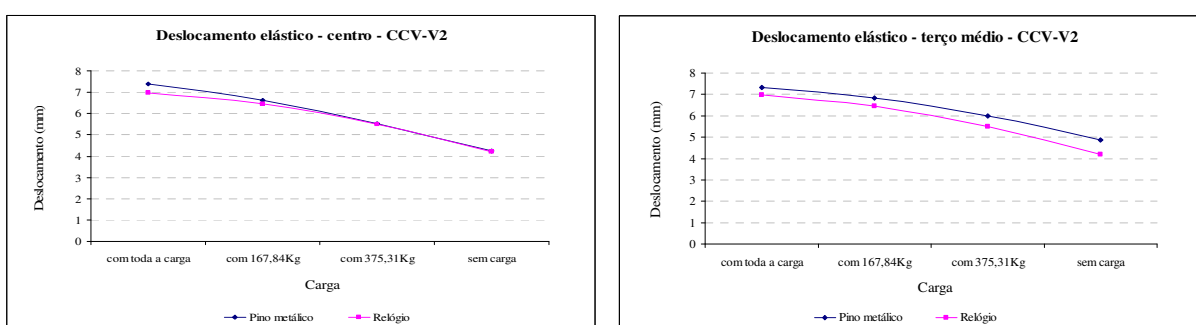


Figura 5.26: Evolução do deslocamento elástico – CCV-V2.

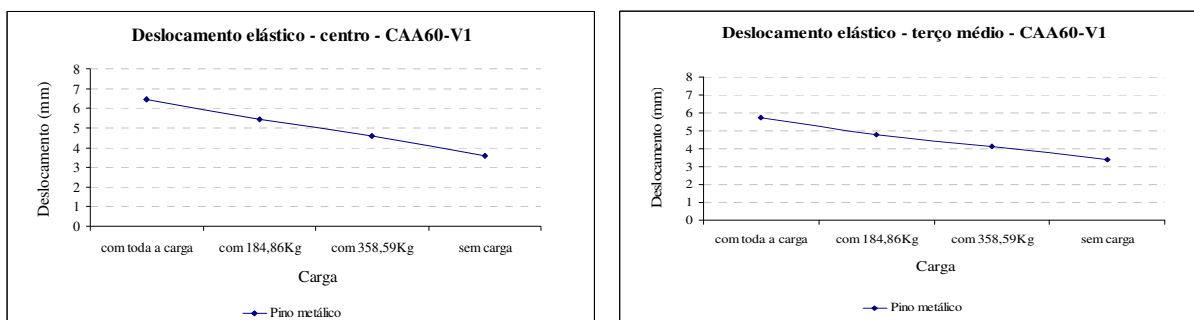


Figura 5.27: Evolução do deslocamento elástico – CAA60-V1.

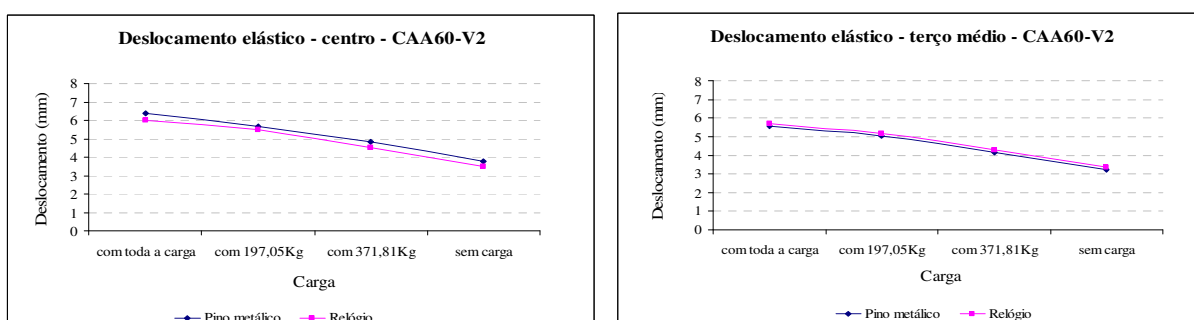


Figura 5.28: Evolução da flecha elástica – CAA60-V2.

Tabela 5.3: valores numéricos das flechas.

Concreto	Identificação	Resultados (mm)		
		Flecha imediata	Flecha total	Flecha elástica
CCV	Viga 01	3,08	6,99	2,48
	Viga 02	2,25	6,19	3,61
CAA55	Viga 01	2,39	6,14	2,44
	Viga 02	2,63	7,42	3,14
CAA60	Viga 01	2,28	6,21	2,89
	Viga 02	2,79	6,07	2,60

### 5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS ANALÍTICOS OBTIDOS ATRAVÉS DAS RECOMENDAÇÕES DA NBR 6118/2003

Em paralelo aos ensaios foi efetuado o cálculo da estimativa de flechas esperadas por um método analítico, usando os parâmetros recomendados pela NBR 6118 (ABNT, 2003) – Projeto de estruturas de concreto, conforme formulação exposta no Capítulo 3. A seguir se encontram os resultados obtidos, que estão detalhados no Anexo III.

### 5.3.1 Cálculo das flechas

O cálculo das flechas foi realizado em duas parcelas: imediata e diferida.

Decidiu-se adotar este procedimento para que se pudessem obter as estimativas dos valores das flechas totais.

Para facilitar a comparação com os resultados experimentais, foram feitos cálculos estimando as flechas para cada parcela do carregamento atuante nas etapas experimentais descritas no Capítulo 4.

### 5.3.2 Cálculo da flecha imediata

No cálculo da estimativa da flecha para a viga simplesmente apoiada, com carga distribuída ( $f_{i1}$ ), obtêm-se o resultado da teoria básica da resistência dos materiais, conforme exemplificado no Capítulo 3.

Como nesta etapa a viga encontra-se no Estádio I, sem fissuras, foi usada para o cálculo da estimativa da flecha, a rigidez da seção sem fissuras. Utilizou-se, portanto, o momento de inércia da seção bruta de concreto e o módulo de deformação secante do concreto (tabela 5.4). Os valores das estimativas das flechas devido ao peso próprio  $f_{i1}$  estão apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5.4: valores do módulo de deformação secante.

<b>Protótipo</b>	<b><math>f_{ck}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{cs}</math> (MPa)</b>
CAA55-V1	33,22	27434,04
CAA55-V2	31,83	26854,75
CCV-V1	25,28	23931,64
CCV-V2	27,34	24887,14
CAA60-V1	34,84	28096,34
CAA60-V2	36,18	28631,92

Tabela 5.5: flecha imediata estimada através da norma e experimental.

<b>Protótipo</b>	$f_{i1}$ (mm) peso próprio NBR 6118/03	$f_{i2}$ (mm) carga concentrada NBR 6118/03	$f_{i\_total}$ (mm) NBR 6118/03	$f_{i\_exp}$ (mm)	<b>Relação</b> $\frac{f_{norma}}{f_{exp}}$
CAA55-V1	0,17	1,68	1,86	3,08	1,66
CAA55-V2	0,15	1,48	1,63	2,25	1,38
CCV-V1	0,1	1,03	1,14	2,39	2,10
CCV-V2	0,11	1,12	1,24	2,63	2,12
CAA60-V1	0,09	0,94	1,03	2,28	2,21
CAA60-V2	0,08	0,87	0,96	2,79	2,91

Ao longo da evolução do carregamento, em função das etapas adotadas para que se pudesse atingir a carga concentrada total prevista, verifica-se que as vigas passam do Estádio I para o Estádio II. Desta forma, foi utilizado, para o cálculo da estimativa da flecha imediata devida ao carregamento externo, o valor da rigidez equivalente  $(EI)_{eq}$ , cuja expressão de cálculo foi apresentada no Capítulo 3.

Comprova-se que as vigas trabalharam no Estádio II uma vez que o momento máximo superou o momento de fissuração da seção. O momento máximo de 2,98 kN.m, exemplificado no Capítulo 4, referente às solicitações resultantes do carregamento. A tabela 5.6 apresenta o Estádio de funcionamento do elemento estrutural, incluindo a resistência à tração e momento de fissuração.

Tabela 5.6: estágio de funcionamento das vigas.

<b>Protótipo</b>	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ctm}$ (MPa)	<b>Momento atuante (kN.m)</b>	$M_r$ (kN.m)	<b>Funcionamento do elemento estrutural</b>
CAA55-V1	33,22	3,10	2,98	2,51	Estádio II
CAA55-V2	31,83	3,01	2,98	2,44	Estádio II
CCV-V1	25,28	2,58	2,98	2,09	Estádio II
CCV-V2	27,34	2,72	2,98	2,21	Estádio II
CAA60-V1	34,84	3,20	2,98	2,59	Estádio II
CAA60-V2	36,18	3,28	2,98	2,66	Estádio II

### 5.3.3 Cálculo da flecha total

Os valores estimados para as flechas totais ( $f_t$ ) resultantes da soma da flecha imediata e da flecha diferida para cada tipo de concreto estão apresentados na tabela 5.7. Nesta tabela, é também apresentado o valor de flecha para o tempo infinito ( $f_\alpha$ ), a última leitura de valores experimentais e uma relação entre o último dado experimental e a flecha para tempo infinito.

Tabela 5.7: valores estimados pela NBR 6118/03 e experimentais para as flechas totais.

Tempo (dias)		10	30	50	100	150	$f_\alpha$	$f_{\text{exp}}$ 150 dias	$\frac{f_{\text{exp}}}{f_\alpha}$
Valor de $\alpha$		0,04	0,11	0,16	0,27	0,36			
Protótipos	CAA55-V1	1,936	2,059	2,168	2,37	2,539	5,162	6,99	1,35
	CAA55-V2	1,699	1,808	1,903	2,08	2,229	4,531	6,19	1,37
	CCV-V1	1,194	1,262	1,325	1,458	1,554	3,163	6,14	1,94
	CCV-V2	1,298	1,371	1,44	1,585	1,688	3,436	7,42	2,16
	CAA60-V1	1,082	1,154	1,205	1,325	1,412	2,876	6,21	2,16
	CAA60-V2	1,002	1,068	1,116	1,226	1,307	2,663	6,07	2,28

### 5.3.4 Comparação dos resultados

Para melhor visualizar a comparação entre os resultados experimentais e os estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2003) – Projeto de estruturas de concreto, plotou-se os gráficos expostos nas figuras 5.29 a 5.34, que apresentam a evolução das flechas ao longo do tempo.

Através do procedimento seguido pela norma brasileira, geraram-se três curvas: uma curva obtida a partir do  $f_{ck} = 30$  MPa, inicialmente previsto, outra curva gerada a partir do  $f_{ck}$  real obtido nos resultados de resistência à compressão axial.

Ainda, plotou-se uma curva com o  $f_{ck}$  real e com o módulo também real, obtido nos ensaios de módulo de elasticidade. O intuito destas curvas é comparar a variação entre os valores admitidos, sejam de procedência estimada via norma ou coletados em ensaios.



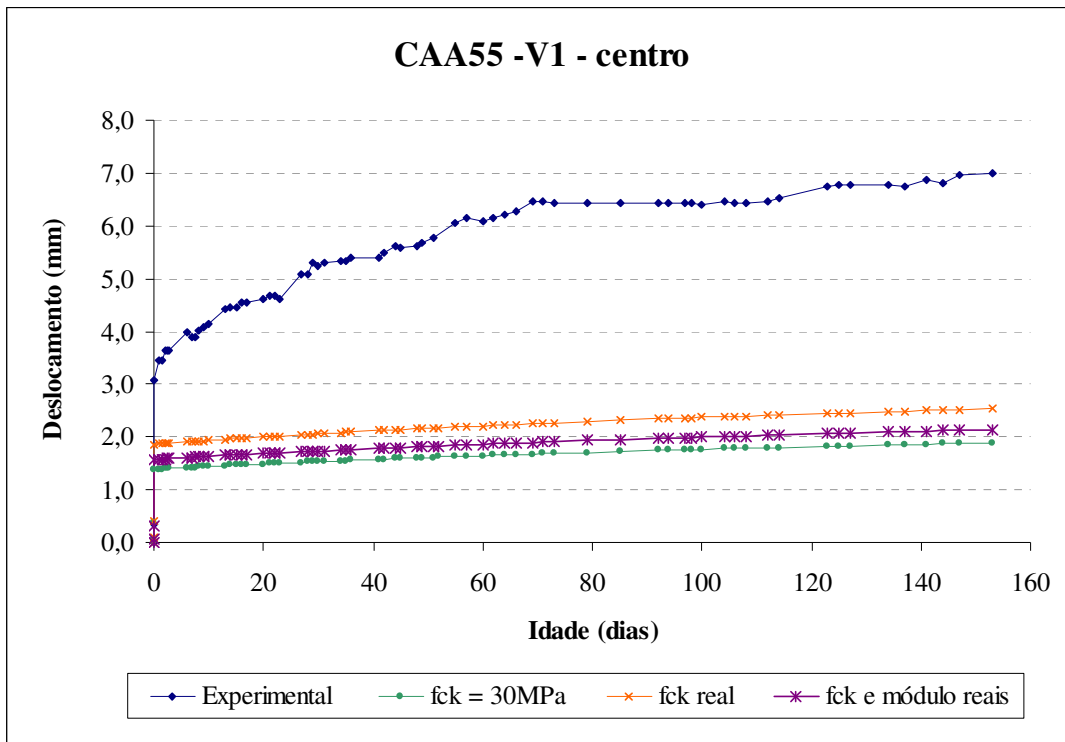


Figura 5.29: CAA55-V1- comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.

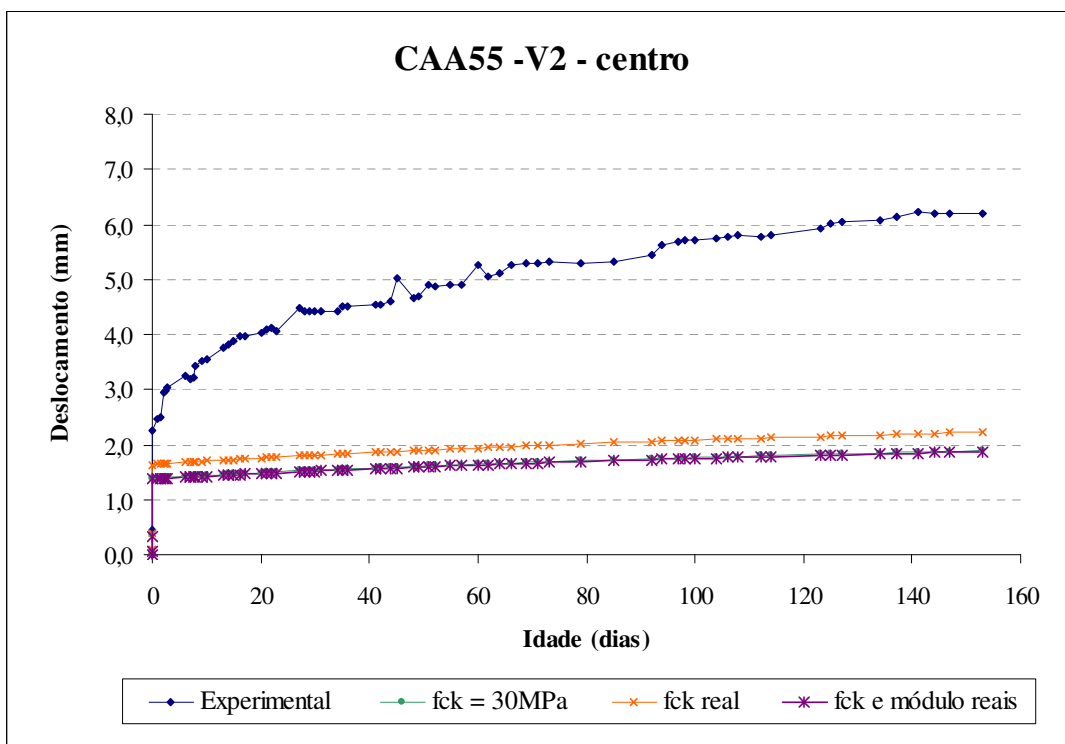


Figura 5.30: CAA55-V2 - comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.

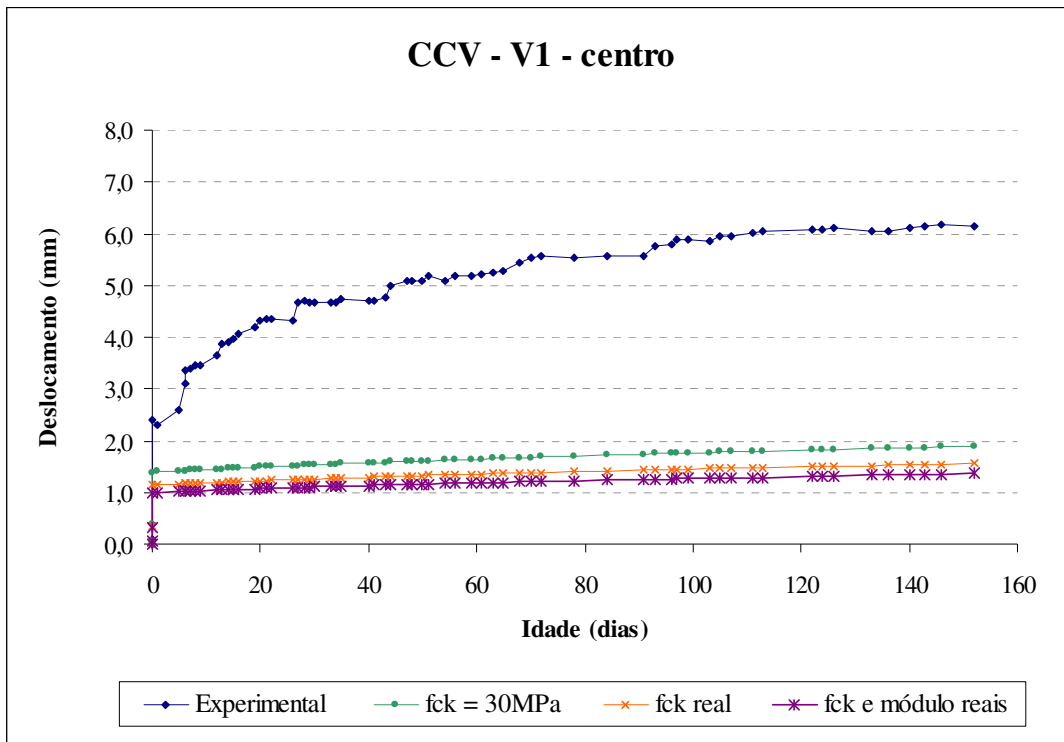


Figura 5.31: CCV-V1- comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.

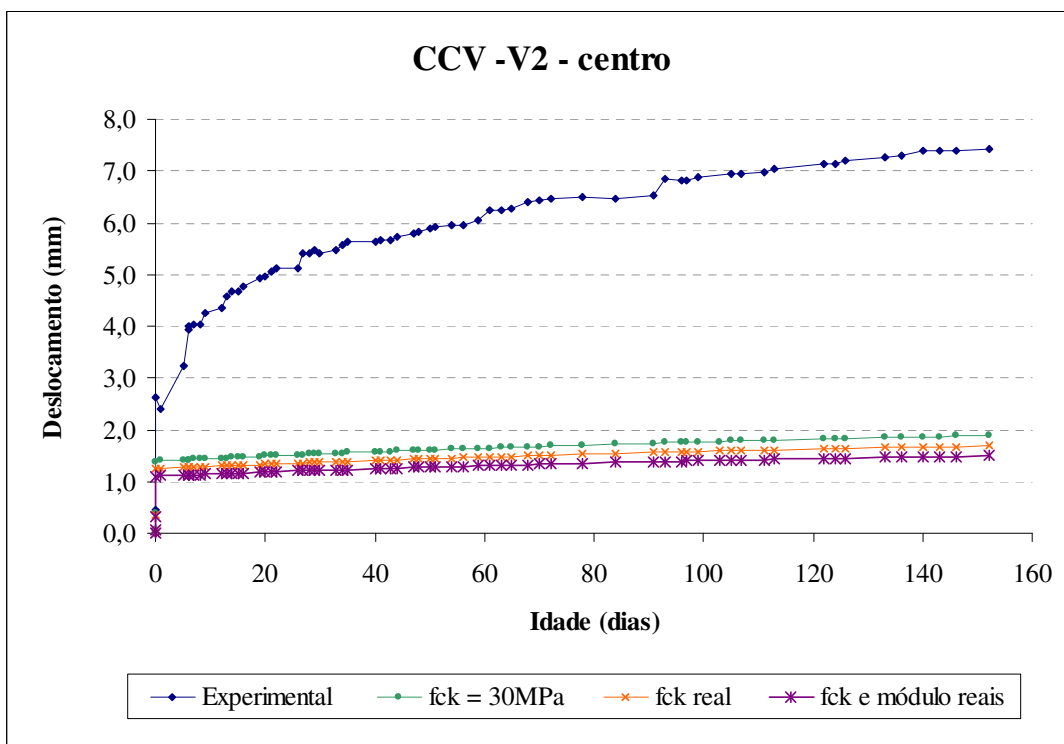


Figura 5.32: CCV-V2 - comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.

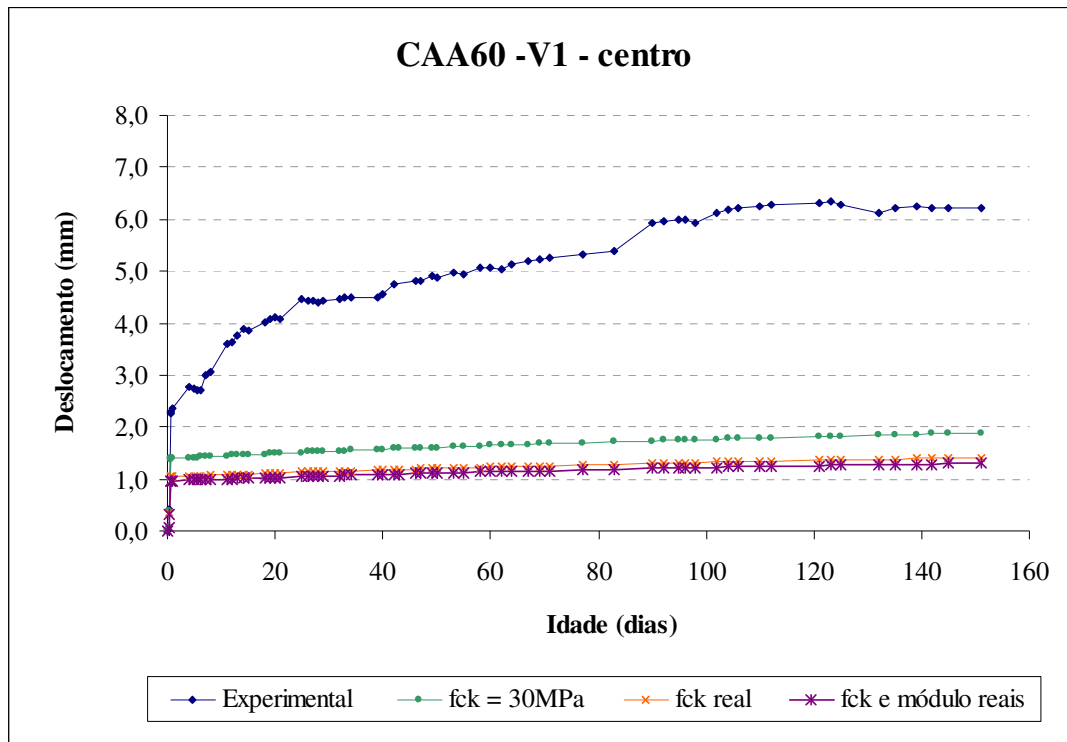


Figura 5.33: CAA60-V1 - comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.

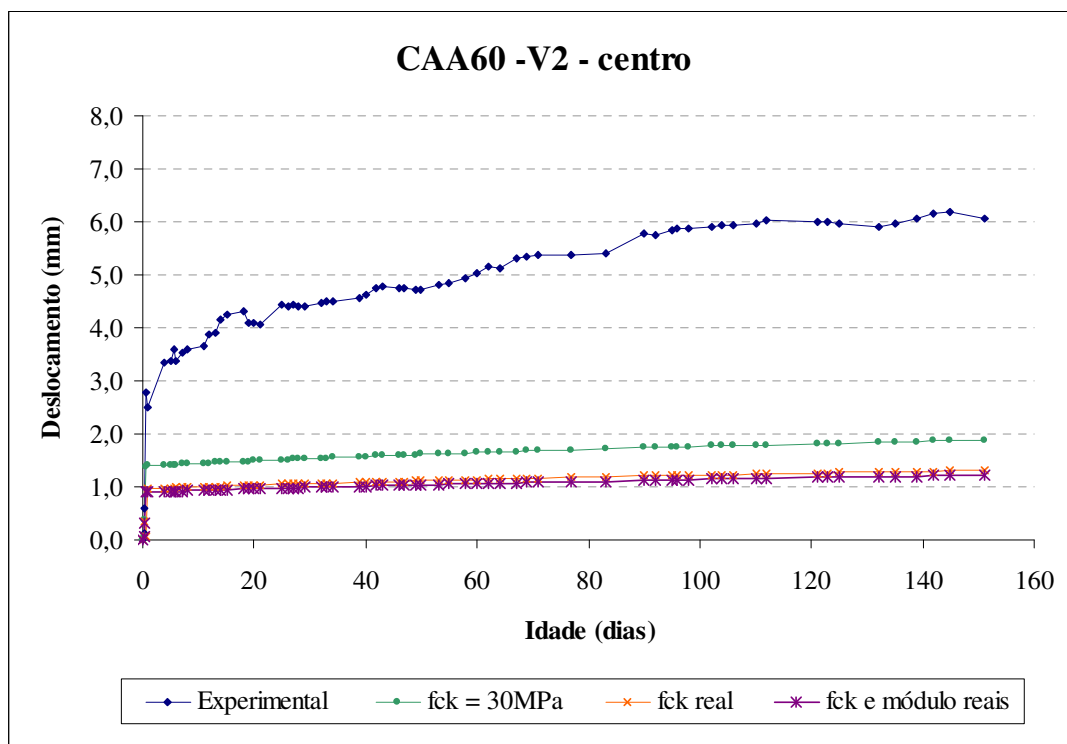


Figura 5.34: CAA60-V2 - comparação entre os resultados experimentais e analíticos obtidos via norma.

Observa-se, analisando os gráficos exemplificados, que as flechas imediatas experimentais apresentaram valores superiores aos encontrados para os resultados analíticos. A média da relação entre a flecha experimental lida aos 150 dias de carregamento e a flecha estimada para o tempo infinito foi de 1,36 para o CAA55, 2,05 para o concreto convencional e 2,22 para o CAA60.

Nota-se ainda que as vigas CAA55 atingiram a flecha estimada para o tempo infinito aos 27 dias de carregamento. Já as vigas CCV e CAA60 ultrapassaram este valor em um tempo mais precoce, aos 6 e 4 dias de carregamento, respectivamente.

Desta forma os resultados indicaram que a estimativa das flechas obtidas através da norma brasileira para o período de ensaio, 154 dias, foi sempre inferior às flechas registradas.

Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que a norma brasileira não contempla o fenômeno da retração, bem como a influência da temperatura e da umidade relativa, em seu processo simplificado de cálculo. Em uma situação usual em canteiro de obras, as vigas, mesmo quando ainda escoradas, encontram-se com todas as faces em exposição às intempéries, enquanto que as vigas ensaiadas mantiveram-se dentro das fôrmas até o dia de seu carregamento. Desta forma, a parcela de deslocamento transversal devido à retração foi significativa durante o período de observação, ocorrendo conjuntamente com o fenômeno da fluência.

## 5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FORMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

Após o cálculo de previsões de flecha baseadas nas prescrições na norma brasileira, optou-se por comparar os resultados experimentais produzidos com os dados obtidos através de uma análise não linear por elementos finitos, que considerou o concreto como um material viscoelástico.

### 5.4.1 Modelo computacional

Owen e Hinton (1980) apresentaram um programa, baseado no método dos elementos finitos, para análise de um material com comportamento elasto-viscoplástico, sob estados planos de tensão. O modelo reológico empregado é representado por uma mola (componente elástica) em série com um conjunto formado por um amortecedor (componente viscosa) e um elemento

de atrito (componente plástica), em paralelo. Com base neste programa, desenvolveu-se o modelo computacional utilizado neste trabalho.

O comportamento viscoelástico pode ser obtido como um caso particular deste modelo. O elemento de atrito é retirado, anulando-se a tensão de plastificação, permitindo-se encontrar a resposta da estrutura frente a cargas de longa duração.

Para muitos materiais com comportamento complexo, como o concreto, o modelo reológico, descrito anteriormente, pode ser muito simples para representar a história de deformação com o tempo. Implementou-se, então, um modelo de camadas superpostas, onde cada uma delas possui propriedades materiais distintas, mas sofre a mesma deformação. O campo de tensões totais é obtido pela soma da contribuição de cada camada.

#### 5.4.2 Formulações de elementos finitos empregadas para o concreto e para o aço

Um elemento finito isoparamétrico quadrangular quadrático de oito nós, com dois graus de liberdade em cada nó, correspondentes às translações na direção dos eixos x-y, sistema global de coordenadas, foi utilizado na modelagem do concreto. Este elemento finito é da família Serendipity e o seu campo de deslocamentos possui uma variação quadrática, enquanto o campo de deformação é linear. As funções de forma para este elemento, as coordenadas naturais e os e fatores de peso dos pontos de integração encontram-se em Owen e Hinton (1977).

Para a representação da armadura, utilizou-se o modelo incorporado, baseado em Elwi e Hrudey (1989), onde se supõe que esta resiste apenas a esforços axiais e que há compatibilidade de deslocamentos entre seus pontos e os pontos de concreto localizados na mesma posição. Desta forma, a matriz de rigidez da armadura tem a mesma dimensão da matriz de rigidez do elemento de concreto e a matriz de rigidez total é a soma das duas. Permite-se, com este modelo, uma disposição aleatória das barras de aço no interior dos elementos de concreto, sem a geração de novas incógnitas no problema. Podem ocorrer várias barras de aço dentro de um mesmo elemento finito de concreto. Admite-se, também, aderência perfeita entre o concreto e o aço.

As barras de armadura, modeladas por elementos uniaxiais isoparamétricos, cujas funções de forma são dadas por Zienkiewicz (1986), podem ter geometria reta, definida por dois pontos, ou curva, definida por três pontos.

### 5.4.3 Propriedades dos materiais dependentes do tempo

A consideração de efeitos dependentes do tempo, fluência e retração no concreto, é de extrema importância na análise de concreto armado. As deformações por fluência e retração, ocorridas no concreto, têm a mesma ordem de grandeza das deformações imediatas, geradas por níveis usuais de tensão.

Uma cadeia em paralelo formada por cinco elementos tipo Maxwell, uma mola em série com um amortecedor, foi adotada para representar o comportamento reológico do concreto, conforme a figura 5.35. Este modelo é computacionalmente atrativo por não necessitar que se conheça toda a história de tensões. Pode ser obtido do modelo viscoelástico básico, admitindo-se que o concreto seja dividido em cinco camadas e que cada uma delas seja representada por um elemento da cadeia de Maxwell. O modelo é calibrado, segundo procedimento sugerido por Bazant e Wu (1974), a partir de uma função de fluência conhecida. Escolheu-se a formulação do Anexo A da NBR 6118 (ABNT, 2003) – Projeto de estruturas de concreto para a determinação das deformações por fluência do concreto. As deformações de retração, determinadas conforme a mesma norma, foram consideradas como deformações impostas ao concreto.

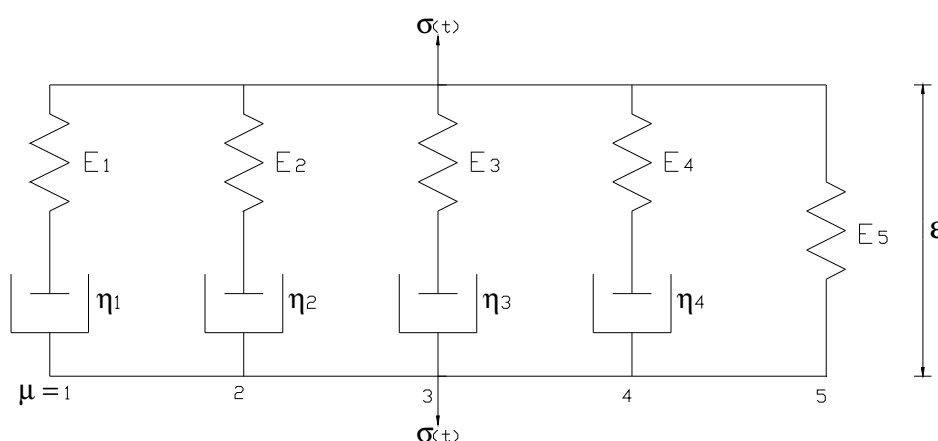


Figura 5.35: modelo reológico dos materiais.

#### 5.4.4 Resultados do Modelo de Elementos Finitos

Para realizar a análise, utilizou-se uma malha dez elementos quadráticos de oito nós para estado plano de tensão na discretização de metade de cada uma das vigas, aproveitando a simetria de geometria e carregamento (figura 5.36).

Consideraram-se também, para a resistência do concreto à compressão, os valores obtidos experimentalmente, referentes à data de aplicação do carregamento.

Ainda, usaram-se como parâmetro os valores médios de temperatura e umidade relativa, resultantes da média das medições efetuadas durante o período de carregamento, que correspondem a 25,56°C e 64,89%, respectivamente.

A saída de dados é fornecida em arquivo de texto, a qual foi exportada para o Excel e tabulada no mesmo formato dos gráficos utilizados durante a apresentação destes resultados. O Anexo IV concentra os dados obtidos através do MEF.

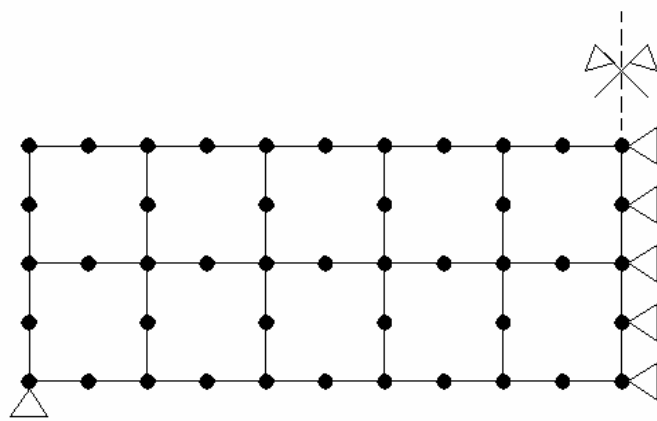


Figura 5.36: malha de elementos finitos utilizada.

##### 5.4.4.1 Resultados considerando a influência da retração

As figuras 5.37 a 5.45 comparam os resultados numéricos obtido pelo modelo de elementos finitos e os experimentais, apontando separadamente o comparativo entre os dados para a flecha imediata e ao longo do tempo. Os resultados pelo modelo de elementos finitos foram obtidos com a consideração da retração em sua formulação.

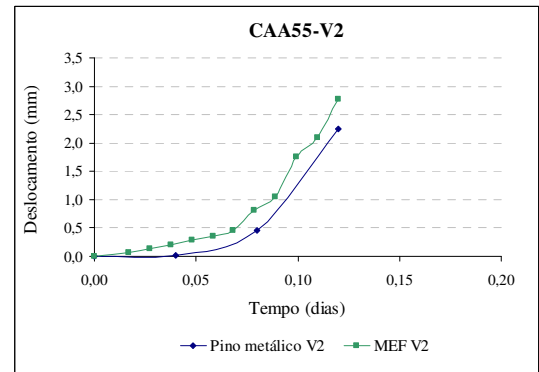
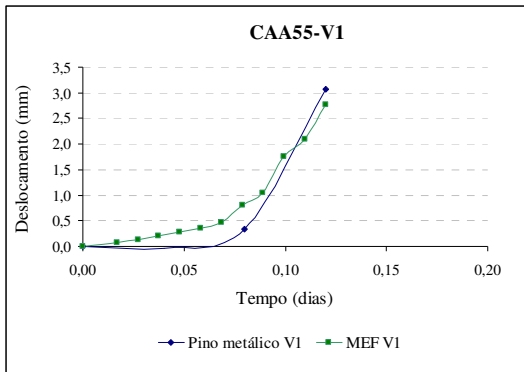


Figura 5.37: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA55.

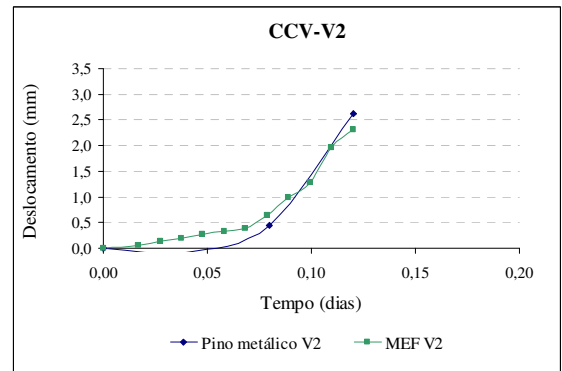
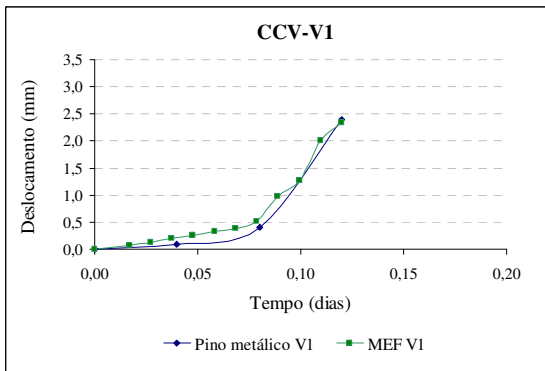


Figura 5.38: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CCV.

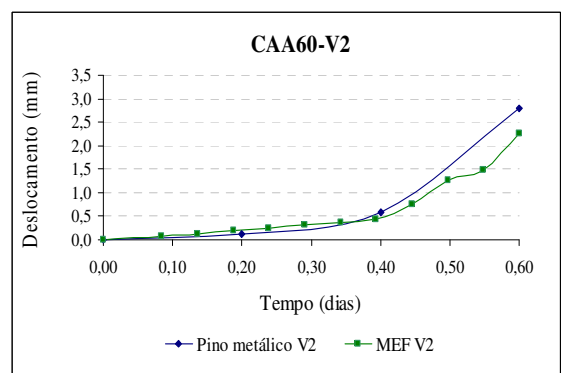
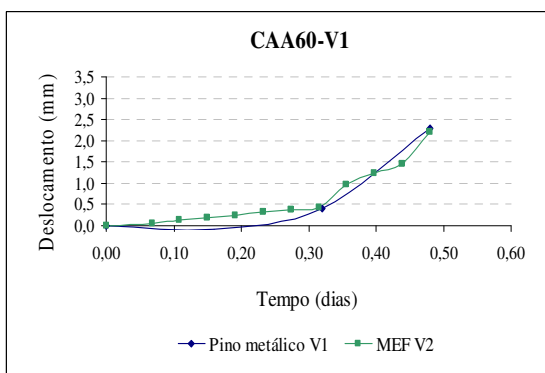


Figura 5.39: flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA60.



Observa-se que, para todos os protótipos, o modelo numérico empregado acompanhou com boa precisão as curvas experimentais obtidas, indicando valores finais de flecha imediata bastante próximos, conforme ratifica a tabela 5.8. Em especial, salienta-se a relação entre resultado experimental e analítico via MEF para as vigas CCV-V1 e CAA60-V2, uma vez que tal relação diferiu-se em aproximadamente apenas 2%.

Tabela 5.8: valores estimados pelo MEF e experimentais para as flechas imediatas.

Protótipos	$f_{i\_mef}$	$f_{i\_exp}$	$\frac{f_{i\_exp}}{f_{i\_mef}}$
CAA55-V1	2,767	3,080	1,113
CAA55-V2	2,776	2,250	0,811
CCV-V1	2,341	2,390	1,021
CCV-V2	2,307	2,620	1,136
CAA60-V1	2,215	2,280	1,029
CAA60-V2	2,251	2,790	1,239

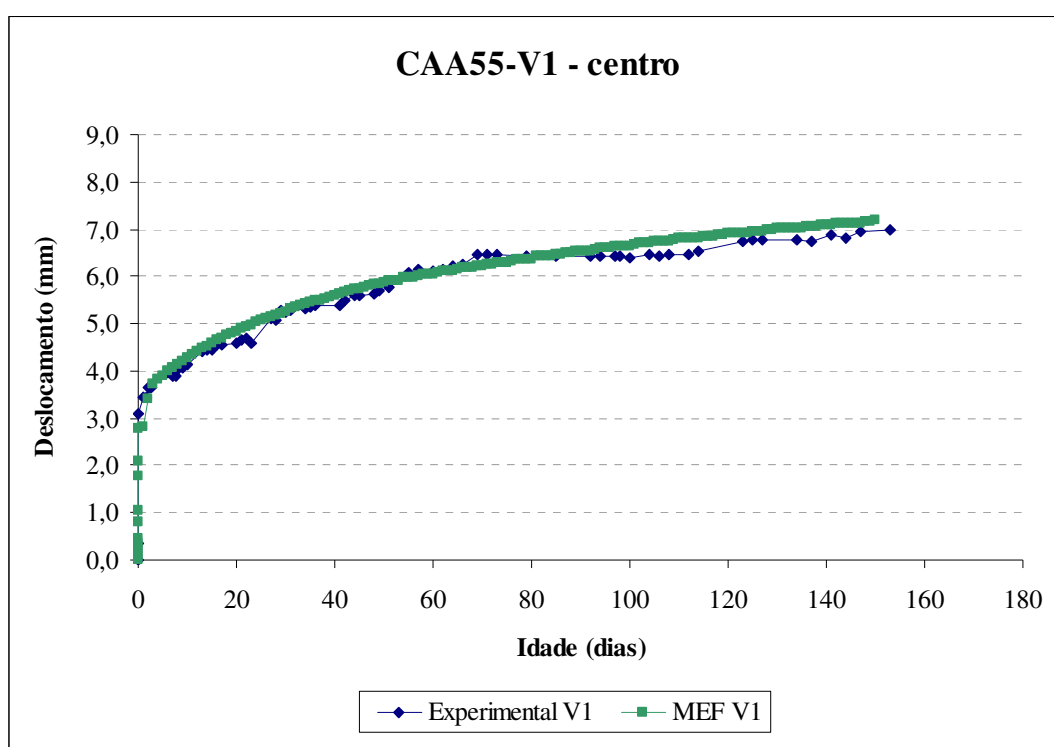


Figura 5.40: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA55-V1.

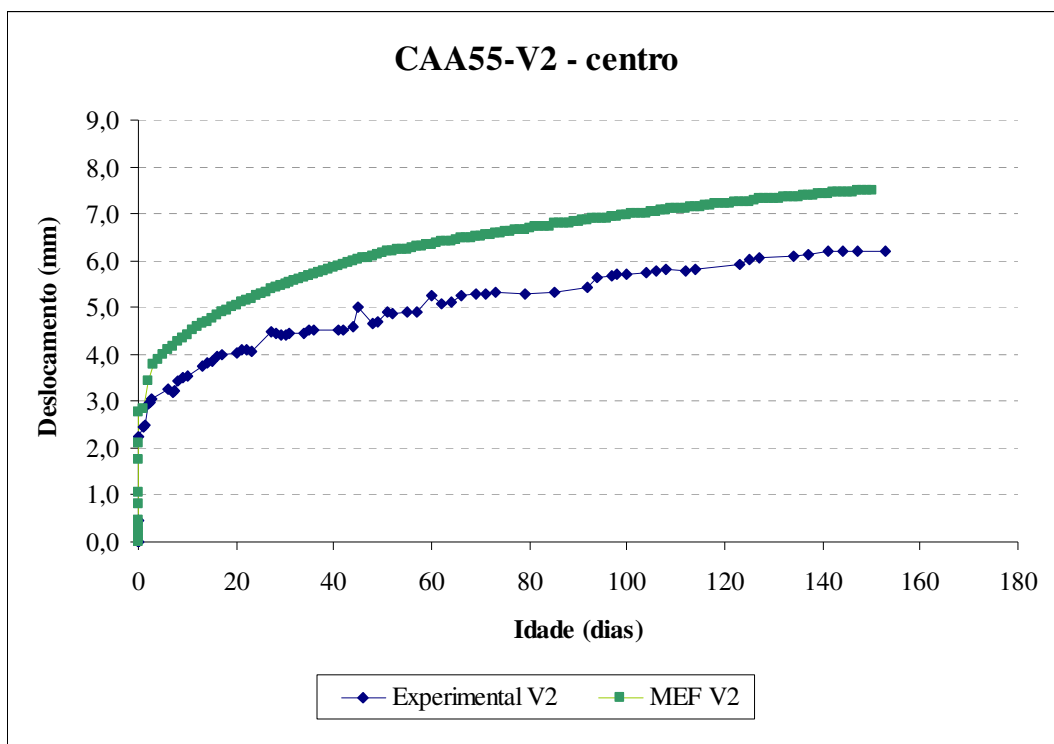


Figura 5.41: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA55-V2.

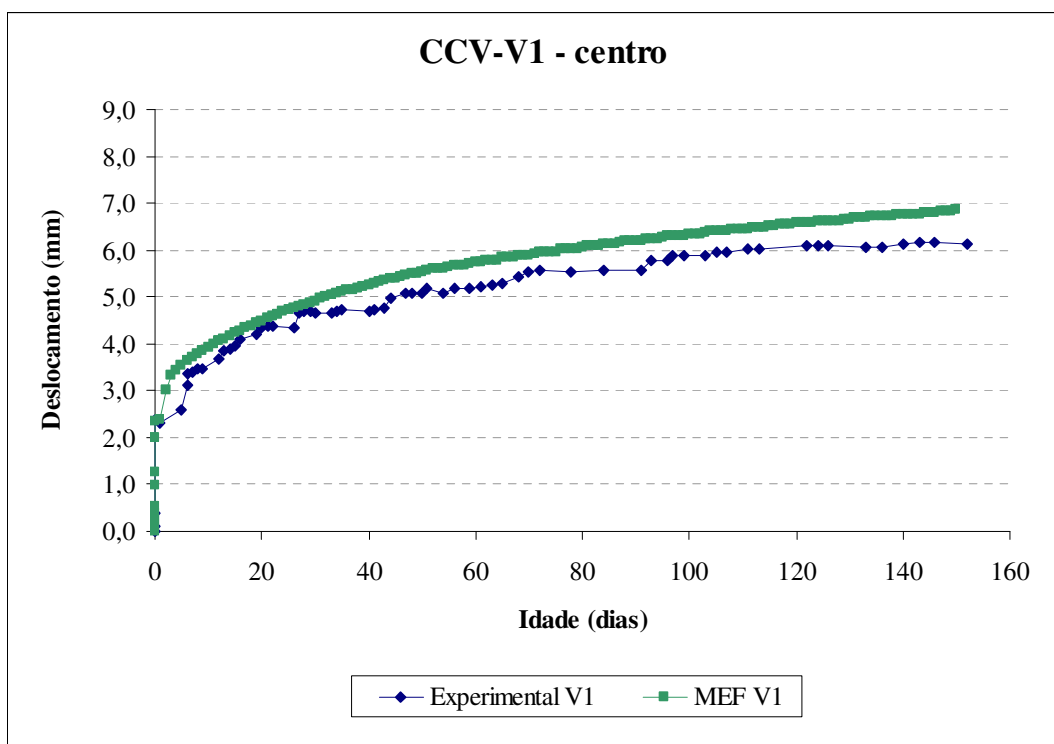


Figura 5.42: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CCV-V1.

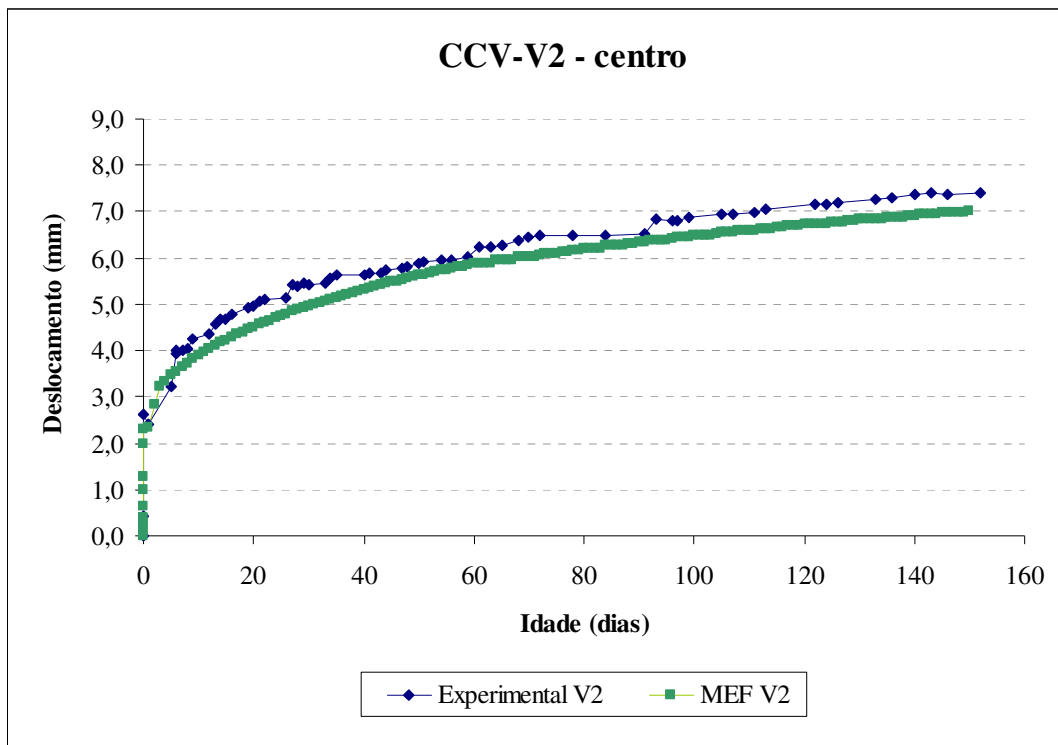


Figura 5.43: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CCV-V2.

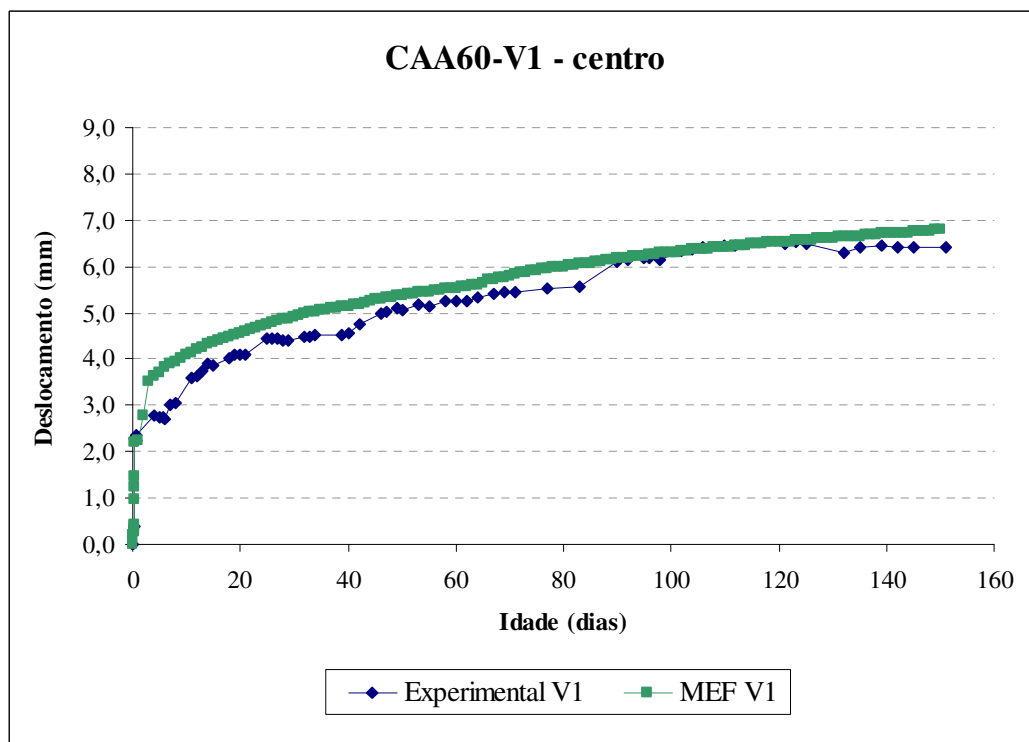


Figura 5.44: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA60-V1.

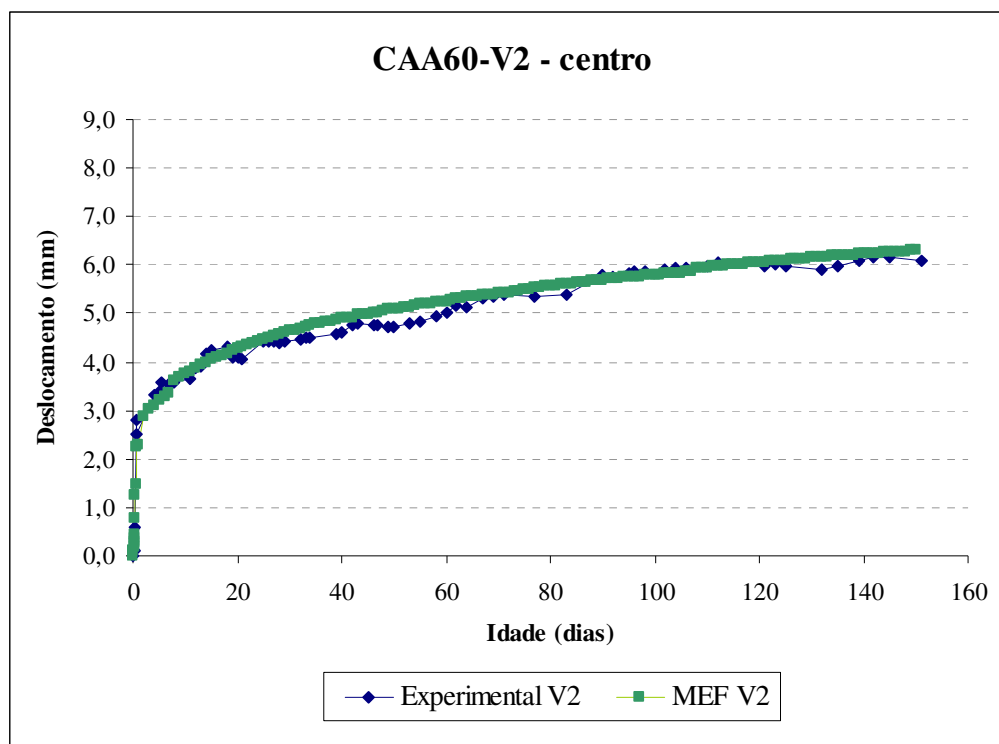


Figura 5.45: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF – CAA60-V2.

Nos gráficos acima apresentados, nota-se que as curvas plotadas com os resultados de MEF aproximam-se às curvas traçadas com os valores experimentais, indicando que a análise não linear através do método dos elementos finitos retrata com bastante similaridade aos resultados coletados em ensaio. O modelo numérico empregado indicou valores de flecha total bastante próximos aos experimentais, conforme aponta a tabela 5.9.

Tabela 5.9: Valores estimados pelo MEF e experimentais para as flechas ao longo do tempo.

Protótipos	$f_{t\_mef}$	$f_{t\_exp}$	$\frac{f_{t\_exp}}{f_{t\_mef}}$
CAA55-V1	7,176	6,990	0,974
CAA55-V2	7,510	6,190	0,824
CCV-V1	6,846	6,140	0,897
CCV-V2	7,016	7,420	1,058
CAA60-V1	6,787	6,410	0,944
CAA60-V2	6,305	6,070	0,963

#### 5.4.4.2 Resultados sem considerar a influência da retração

As figuras 5.46 a 5.54 comparam os resultados numéricos obtido pelo modelo de elementos finitos e os experimentais, sendo que os resultados pelo método dos elementos finitos foram obtidos sem a consideração da retração em sua formulação.

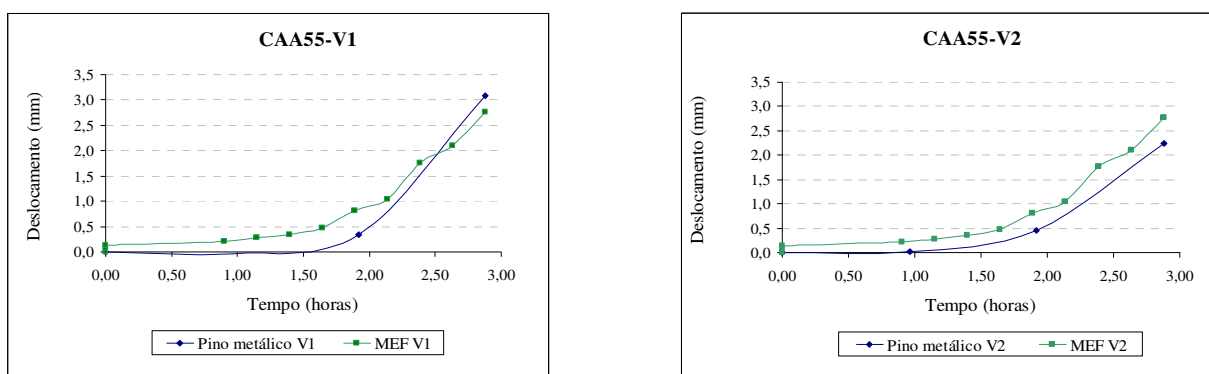


Figura 5.46: Flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA55.

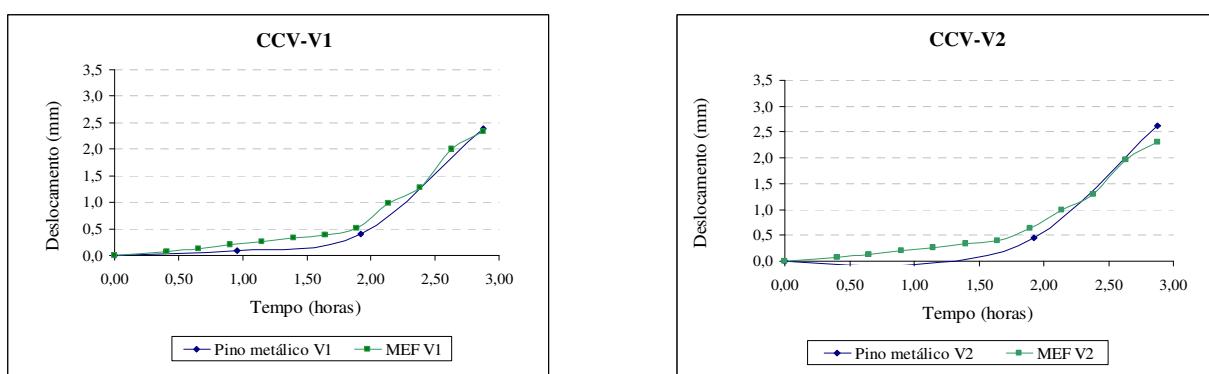


Figura 5.47: Flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CCV

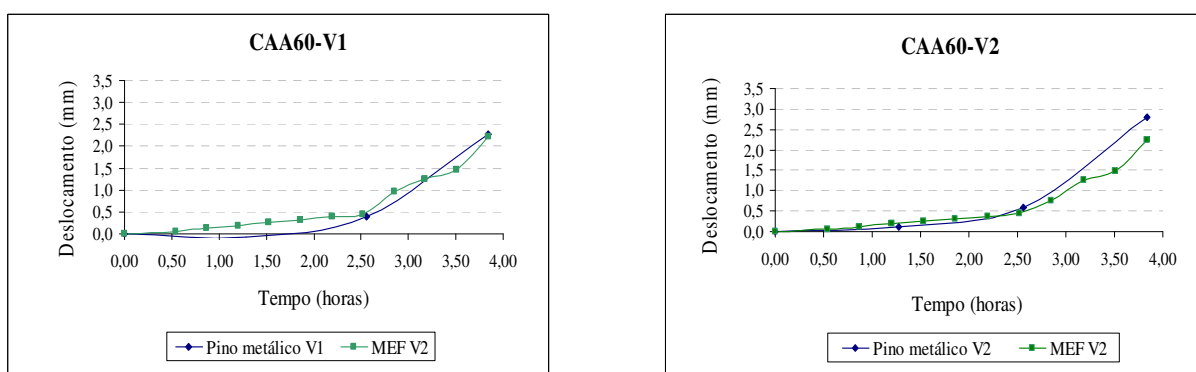


Figura 5.48: Flecha imediata: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA60.

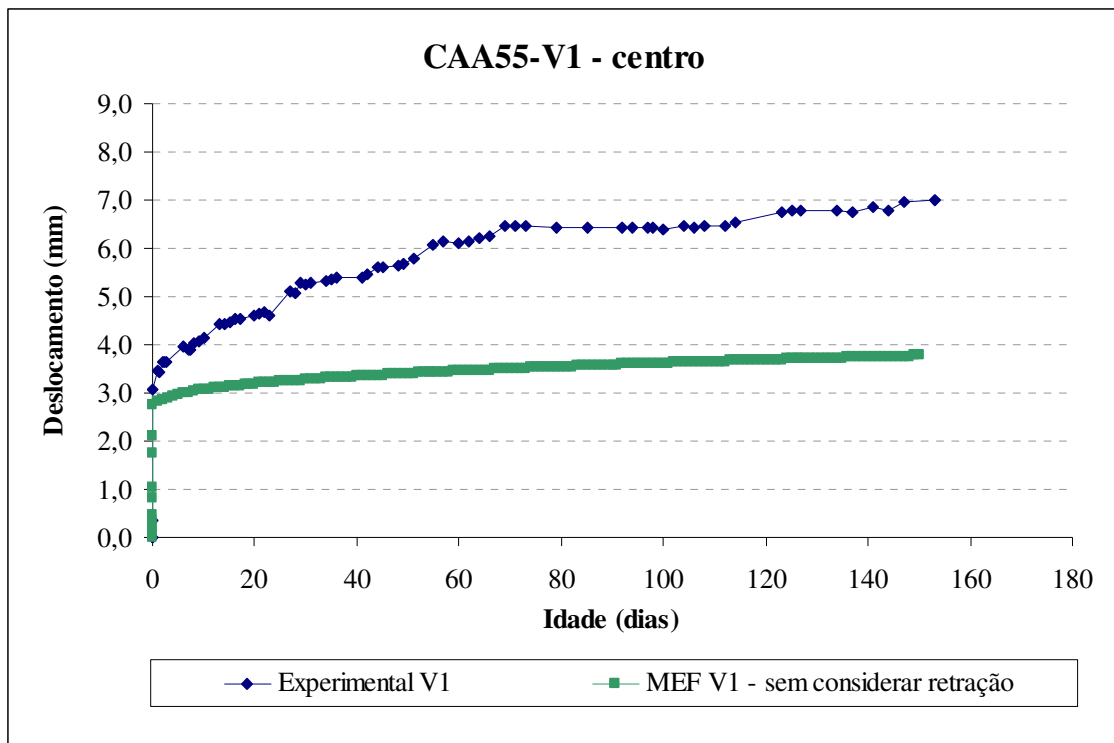


Figura 5.49: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA55-V1.

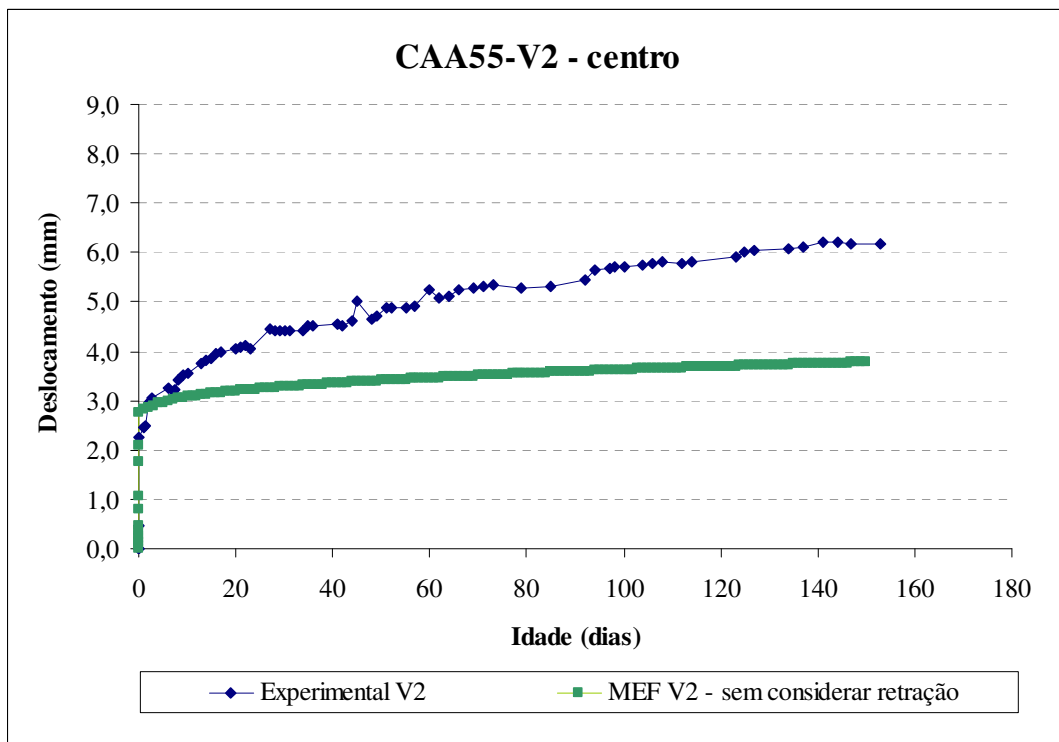


Figura 5.50: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA55-V2.

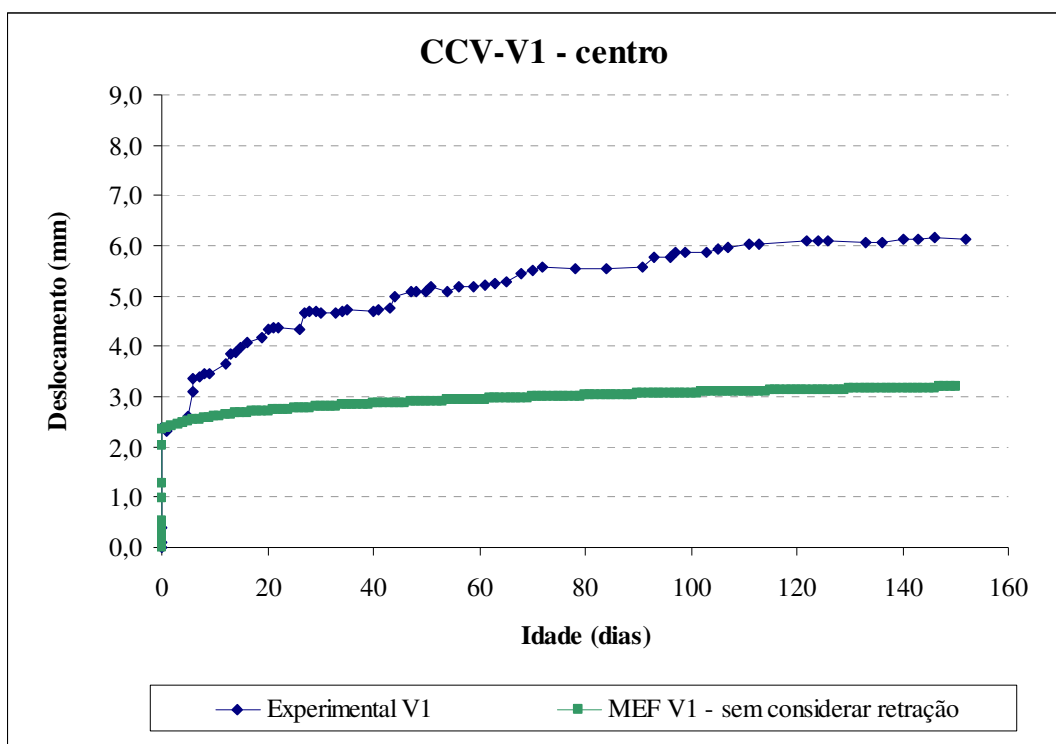


Figura 5.51: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CCV-V1.

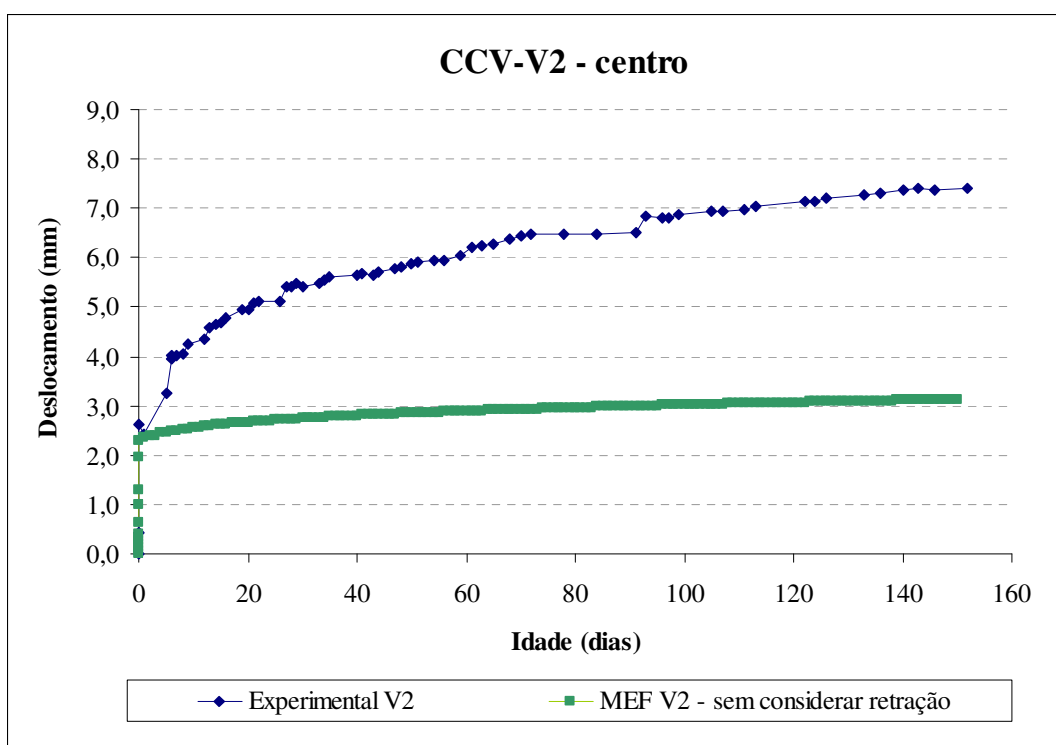


Figura 5.52: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CCV-V2.

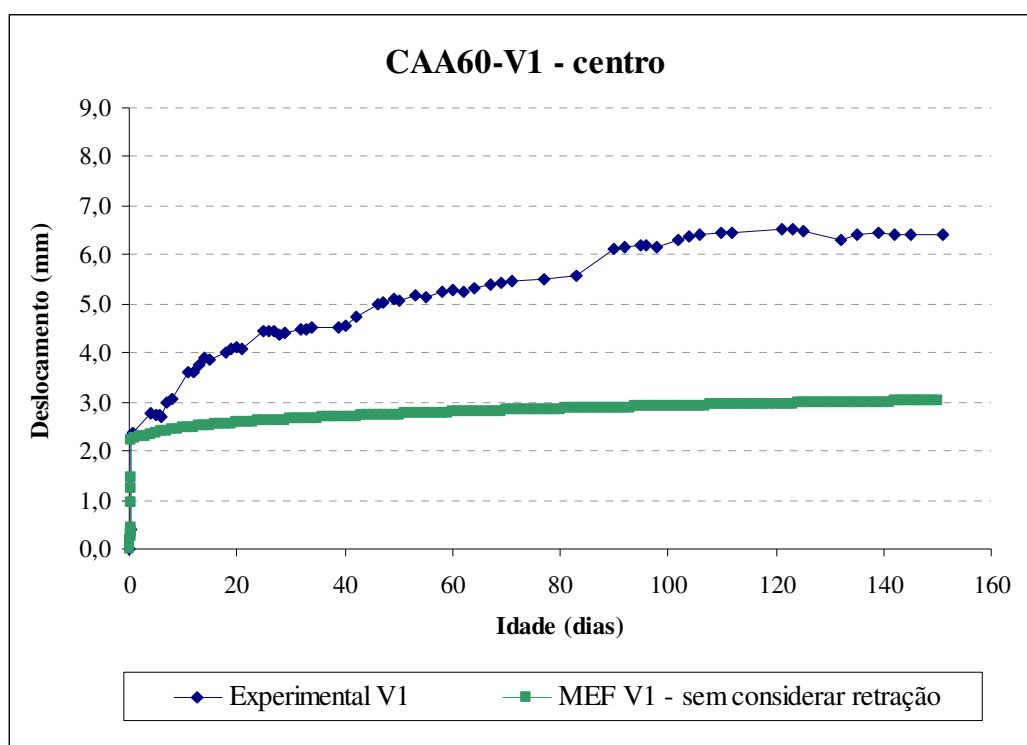


Figura 5.53: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA60-V1.

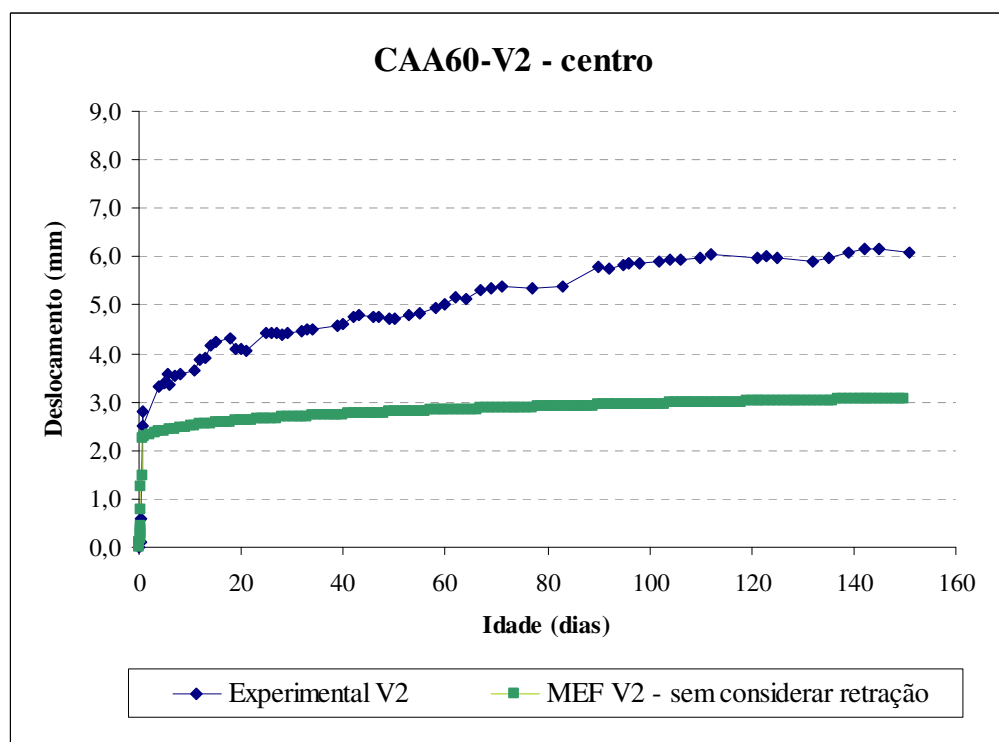


Figura 5.54: flecha ao longo do tempo: comparação entre o resultado experimental e analítico via MEF sem retração – CAA60-V2.



Observa-se que, para todos os protótipos, o modelo numérico empregado acompanhou com boa precisão as curvas experimentais obtidas, indicando também que a não consideração da retração pouco influenciou nos resultados de flecha imediata, conforme mostra a tabela 5.10.

Tabela 5.10: valores estimados pelo MEF sem retração e experimentais para as flechas imediatas.

<b>Protótipos</b>	$f_{i\_mef}$	$f_{i\_exp}$	$\frac{f_{i\_exp}}{f_{i\_mef}}$
CAA55-V1	2,767	3,080	1,113
CAA55-V2	2,772	2,250	0,811
CCV-V1	2,341	2,390	1,021
CCV-V2	2,307	2,620	1,136
CAA60-V1	2,215	2,280	1,029
CAA60-V2	2,251	2,790	1,239

Nota-se que as curvas plotadas com os resultados de MEF sem consideração da retração subestimam os valores experimentais, indicando que o fenômeno da retração é de fundamental importância para a proximidade dos dados numéricos com os experimentais. O modelo numérico empregado sem consideração da retração indicou valores de flecha distantes dos experimentais, conforme ratifica a tabela 5.11.

Tabela 5.11: valores estimados pelo MEF sem retração e experimentais para as flechas ao longo do tempo.

<b>Protótipos</b>	$f_{t\_mef}$	$f_{t\_exp}$	$\frac{f_{t\_exp}}{f_{t\_mef}}$
CAA55-V1	3,771	6,990	0,54
CAA55-V2	3,778	6,190	0,61
CCV-V1	3,186	6,140	0,52
CCV-V2	3,125	7,420	0,42
CAA60-V1	3,021	6,410	0,47
CAA60-V2	3,068	6,070	0,51

## 6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta algumas considerações finais sobre o trabalho realizado, assim como as conclusões e sugestões para trabalhos futuros na área.

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do concreto auto-adensável é uma tendência crescente. Nos últimos anos se multiplicaram os exemplos de aplicação deste material, tanto em nível nacional quanto internacional. Esta tendência certamente está associada às vantagens técnicas e, principalmente, econômicas associadas à dispensa da necessidade de adensamento do concreto, o que representa uma considerável vantagem operacional em relação ao concreto convencional, associada a eventual ocorrência de melhorias em termos de qualidade superficial.

Todavia, o emprego de um novo material sempre enseja cuidados, pois a alteração de sua estrutura e constituição pode acarretar resultados inesperados. A forte tendência de incremento na utilização do CAA deve ser acompanhada pelo desenvolvimento de estudos acerca de seu comportamento e desempenho de curto e longo prazo. É fundamental, ainda, verificar se os critérios normativos e de projeto, desenvolvidos para concretos convencionais com base em experimentos e experiências coletadas com este tipo de material, são aplicáveis ou podem ser estendidos para considerar novos tipos de concreto, como o CAA.

A ausência de conhecimentos amplos sobre todos os aspectos associados ao desempenho e comportamento estrutural, consorciada com a falta de consolidação de técnicas de produção, métodos de dosagens e modelos de cálculo adequados termina por dificultar a disseminação deste tipo de concreto ou, pelo menos, aumentar o risco de produção de peças com desempenho inadequado ou deficiente.

Com o intuito de contribuir para a ampliação do desenvolvimento sobre o concreto auto-adensável, esta pesquisa teve como objetivo principal o estudo do comportamento, em termos de deformação instantânea e lenta, de vigas de concretos auto-adensáveis sob carregamento constante, em comparação a vigas de concreto convencional.

## 6.2 CONSTATAÇÕES E CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados coletados no programa experimental desta dissertação, discutidos no capítulo 5, pode-se efetuar as seguintes constatações:

- a) em termos de reprodutibilidade dos resultados verificou-se que:
  - em geral, vigas do mesmo tipo desenvolvem flechas de curta e longa duração bastante semelhantes. A variação de resultados tendeu a ser menor entre as flechas de longo prazo do que as de curto prazo. O menor percentual de variação na flecha de longo prazo de um par de vigas iguais foi constatado para os elementos de CAA com teor de argamassa de 60%, no qual os resultados variaram em apenas 2%;
  - quando se muda o tipo de concreto, alterando a constituição ou o teor de argamassa, os valores de resistência à compressão e o desenvolvimento das flechas ao longo do tempo varia consideravelmente;
- b) os resultados indicaram que houve uma boa correlação entre a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a magnitude de flecha total, para todos os concretos testados. As vigas de concreto auto-adensável, com teor de argamassa igual a 60%, apresentaram a maior resistência à compressão e a menor flecha ao longo do tempo, como esperado;
- c) o método de estimativa do módulo de deformação indicado pela NBR 6118/03 se mostrou adequado para estimar o módulo de elasticidade tanto dos concretos convencionais como dos concretos auto-adensáveis utilizados neste programa experimental;
- d) as prescrições da NBR 6118/03 para estimativa da flecha imediata e da flecha diferida não se mostraram adequadas nem para as vigas de concreto convencional nem para as vigas de concreto auto-adensável ensaiadas nesta pesquisa. A norma utiliza como informação do material apenas o  $f_{ck}$  e o fator  $\alpha_f$  dependente do tempo, fatores que não se mostraram suficientes para caracterizar o comportamento das peças estruturais ensaiadas;

- e) a retração se apresentou como um fator fundamental para a análise da deformação das vigas ensaiadas nesta pesquisa, com ordem de grandeza tão considerável quanto o deslocamento transversal relativo à fluência. Por isto, as estimativas de flecha só foram ajustadas quando se consideraram, adequadamente, as condições ambientais;
- f) o modelo numérico empregado para realizar a análise não linear, calibrado conforme o anexo A da NBR6118 e que utiliza como dados de entrada a resistência média à compressão do concreto,  $f_{cm}$ , o tipo de cimento, a temperatura e a umidade relativa do ar médias, se mostrou adequado para estimar as flechas imediatas e totais das vigas de concreto elaboradas neste programa experimental. O mesmo apresentou resultados mais coerentes com os dados coletados do que o modelo simplificado da norma brasileira;
- g) verificou-se, ao comparar os dados coletados através dos pinos metálicos com os registrados nos relógios comparadores mecânicos, que os resultados obtidos são bastante similares, o que comprova que este sistema de monitoramento, simples, robusto e de baixo custo, é viável para utilização em ensaios de longa duração.

Com base nestas constatações e nos resultados experimentais pode-se concluir, portanto, em relação aos objetivos propostos para a pesquisa, que:

- a) de forma geral, os concretos auto-adensáveis possuem comportamento similar ao do concreto convencional, podendo ser utilizado o corpo normativo atualmente disponível para projetar peças confeccionadas com este concreto;
- b) concretos convencionais e auto-adensáveis, com igual teor de argamassa, tem comportamento similar em termos de deformações instantâneas e lentas;
- c) a resistência à compressão e o módulo de elasticidade se mostraram correlacionados e variam com o teor de argamassa, que, no presente caso, pode estar relacionado com a compacidade do concreto;
- d) além disto, cabe destacar que os resultados do presente trabalho indicam que o procedimento simplificado para a determinação de flechas em vigas da norma brasileira vigente, NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto (ABNT,

2003), não produz estimativas adequadas das deformações instantâneas e de longo prazo, subestimando as mesmas;

- e) resultados mais adequados foram obtidos através de um procedimento de análise não linear, desde que consideradas as condições ambientais. O trabalho indica que, para vigas de concreto armado em ambientes similares aos dos ensaios, é imprescindível a inclusão do efeito da retração na determinação do deslocamento transversal. As estimativas de flecha infinita, obtidas através do método simplificado, aparentemente, só devem ser utilizadas como referência de cálculo, não se constituindo em boas estimativas do comportamento efetivo de estruturas, o que pode resultar em deformações estruturais maiores que as previstas em projeto.

Vale a pena ressaltar, todavia, que, apesar deste trabalho ser compatível com o proposto e demandado pela literatura existente e ser baseado em dados experimentais coletados em ensaios controlados, os resultados e tendências de comportamento não devem ser tratados como genéricos, uma vez que foram utilizados materiais, métodos e técnicas específicas. Para ratificar e complementar os objetivos aqui alcançados deve-se prosseguir com a expansão de estudos nesta linha de pesquisa.

### 6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as limitações físicas, financeiras, a gama de variáveis existentes e a definição de prazos estipulados, tornou-se inviável explorar todas as possibilidades interessantes de estudo. Trabalhos adicionais podem ajudar a aprofundar, confirmar ou estender o conhecimento gerado no presente estudo. Apontam-se como sugestões para trabalhos futuros, considerados importantes para que se possa prosseguir no estudo e o desenvolvimento do concreto auto-adensável, especialmente quanto ao comportamento em termos de deformações e flechas, os seguintes:

- a) incrementar o programa experimental, com realização de ensaios em vigas confeccionadas com concretos utilizando outras adições, teores de argamassa, tipos de cimentos e proporções de dosagem;
- b) modificar a configuração dos elementos estruturais, alterando tamanhos de vigas, cargas aplicadas e idade de aplicação da carga;

- c) estudar a relação entre flechas imediatas e flechas totais obtidas entre vigas confeccionadas com o mesmo concreto e expostas a diferentes ambientes, incluindo ambiente com temperatura e umidade controladas;
- d) avaliar as flechas imediatas e flechas totais em vigas confeccionadas com concretos especiais não contemplados nesta pesquisa;
- e) avaliar peças estruturais armadas, executadas com concreto convencional e auto-adensável, quando submetidas à corrosão;
- f) avaliar peças estruturais armadas, executadas com concreto convencional e auto-adensável, quando submetidas a altas temperaturas;
- g) analisar e acompanhar o emprego de vigas de concreto auto-adensável em uma situação real.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. M. Curso de concreto armado: de acordo com a nova NBR 6118. Rio Grande: Dunas, 2003.

ARAÚJO, J.L.; BARBOSA, N.P.; DOS SANTOS, S.B.; REGIS, P.A. Concreto auto-adensável com materiais locais do Nordeste brasileiro. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. CD-ROM, Vitória, 2003.

AMARAL, N.A. Construções de concreto. São Paulo: Departamento de livros e publicações do grêmio politécnico, 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo e deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

- BARBOSA, M.P.; BOSCO, A.R.C.; BERTO, R.B.; SALLES, F.M. Um estudo das características e propriedades do concreto auto-adensável (CAA). In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. CD-ROM, Belo Horizonte, 2002.
- BARONI, H.J.M. Avaliação dos deslocamentos transversais ao longo do tempo em vigas de concreto armado não convencional. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2003. Dissertação de Mestrado.
- BOSILJKOV, Violeta B. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash – Preliminary results. *Cement and concrete research* 33, 1279-1286, 2003.
- CATAI, E. Análise dos efeitos da retração e fluência em vigas mistas. São Carlos: EESC/USP, 2005. Dissertação de Mestrado.
- COLLEPARDI, M. *A very close precursor os self-compacting concrete*. In: Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology, Setembro 16-19, 2001.
- COPPOLA, L. *Self-compacting concrete*. In: *Concrete Technology*, p.42-47, 2000.
- EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. In: EFNARC. Fevereiro, 2002.
- GRUNEWALD, S. *Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete*. Delft, 2004. 232p. Delft University of Technology, The Netherlands. Doctoral Thesis.
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual e controle de dosagem do concreto. Pini, São Paulo, 1992.
- GOMES, P.C.C. *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete*. Tese de doutorado, Barcelona, 2002.
- GOMES, P.C.C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos mineirais. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, p.1-14, 2003.
- HOLSCHEMACHER, K; KLUG, Y. A database for the evaluation of hardened properties of SCC. LACER n°7, 2002. HTWK, Leipzig.
- KHAYAT, K.H.; DACZKO, J.A. *The holistic approach to self-consolidating concrete*. In: First north american conference on the design and use of self-compacting concrete. Conference notes November 12-13, 2002 (Evanston, IL). A Hanley-Wood publication, 2003. Addison, IL, USA.



LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construções de Concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. 1ª ed. Rio de Janeiro: Livraria Interciência Ltda, 1977.

MANTESE, J.M.; MANTESE, O. Estudo de flechas em vigas de concreto armado. Estrutura – Revista técnica das construções engenharia e arquitetura, Rio de Janeiro, RJ, ano 22, n.96, p.103-116, set.1981.

MANUEL, P.J.M. Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2005. Dissertação de Mestrado.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A.G.; CABRÉ, F.M. Hormigón Armado. 10 ed. Barcelona: Editorial Gustavo GILI, S.A., 1979.

NEVILLE, A.M. Propriedades do Concreto. 2.ed. São Paulo: PINI, 1997.

NOOR, M.A.; UOMOTO, T. *Three-dimensional discrete element simulation of rheology tests of self-compacting concrete. In: 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete.* Suécia, p.35-46, 1999.

NUNES, S.C.B. Betão Auto-compactável: tecnologia e propriedades. Porto, 2001. 198p. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Dissertação de Mestrado.

OKAMURA, H; OUCHI, M. *Self-compacting concrete.* Journal of Advanced Technology. Vol. 1, No. 1, 5 – 15. Japan Concrete Institute, 2003.

OUCHI, M; HIBINO, M. Development, Applications and Investigations of Self-Compacting Concrete. Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, outubro 23-25, 2001.

PALMA, G. *Ensayos de trabajabilidad al hormigón autocompactante.* Revista BIT, Junho, 2001.

PETERSSEN, Ö. Workability. In: *Brite EuRam Program: Rational production and improves working enviroments through using self-compacting concrete.* Task 2, p.1-56, 1999.

RIGUEIRA VICTOR, J.W.; SERNA ROS, P.; PINTO BARBOSA, M.; MARTI VARGAS, J.R. Utilização de modelos de ensaios reduzidos para a caracterização dos concretos auto-adensáveis. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. CD-ROM, Vitória, 2003.

RUIZ, J.C.; DUTARI, L.G. *Cálculo de flechas em estructuras em hormigon armado.* Madrid: Torreangulo Arte Gráfico, 1992.

SALVADOR, P. F. Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2007. Dissertação de Mestrado.

SÜSSEKIND, J.C. Curso de concreto armado.v. 2. Porto Alegre: Globo, 1980.

TUTIKIAN, B. Método para dosagem de concretos auto-adensáveis. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004. Dissertação de Mestrado.

**ANEXO I – CONTROLE TECNOLÓGICO DAS PROPRIEDADES DOS  
CONCRETOS**

**RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%		
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	
<b>3 DIAS</b>	Tensão 1 (MPa)	17,78	18,56	10,94	9,67	13,83	14,12	
	Tensão 2 (MPa)	18,21	20,82	11,08	10,66	13,90	15,03	
	Média	18,00	19,69	11,01	10,16	13,87	14,57	
	Desvio Padrão	0,30	1,60	0,10	0,70	0,05	0,65	
	<b>7 DIAS</b>							
	<b>7 DIAS</b>	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%	
Identificação		Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	
Tensão 1 (MPa)		23,22	23,85	15,60	16,44	21,88	23,78	
Tensão 2 (MPa)		23,78	23,78	17,36	14,19	21,74	22,51	
Média		23,50	23,82	16,48	15,31	21,81	23,15	
Desvio Padrão		0,40	0,05	1,25	1,60	0,10	0,90	
<b>55 DIAS</b>	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%		
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	
	Tensão 1 (MPa)	34,02	32,96	-	28,79	37,55	37,26	
	Tensão 2 (MPa)	35,22	34,65	33,59	30,98	35,92	38,89	
	Média	34,62	33,81	33,59	29,89	36,73	38,08	
	Desvio Padrão	0,85	1,20	-	1,55	1,15	1,15	
<b>125 DIAS</b>	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%		
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	
	Tensão 1 (MPa)	38,04	37,69	33,59	30,98	39,38	41,43	
	Tensão 2 (MPa)	37,19	36,84	32,11	30,98	39,59	40,51	
	Média	37,62	37,26	32,85	30,98	39,49	40,97	
	Desvio Padrão	0,60	0,60	1,05	0,00	0,15	0,65	
<b>208 DIAS</b>	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%		
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	
	Tensão 1 (MPa)	38,18	38,82	32,61	29,92	39,73	39,17	
	Tensão 2 (MPa)	39,45	39,66	32,46	31,97	40,44	39,45	
	Média	38,82	39,24	32,54	30,95	40,09	39,31	
	Desvio Padrão	0,90	0,60	0,10	1,45	0,50	0,20	

**RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE**

3 DIAS	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%	
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02
	Módulo 1 (GPa)	14,93	14,31	22,39	23,15	17,48	-
	Módulo 2 (GPa)	15,61	14,95	21,51	24,01	17,54	-
	Média	15,27	14,63	21,95	23,58	17,51	-
	Desvio Padrão	0,48	0,46	0,63	0,61	0,04	-
7 DIAS	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%	
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02
	Módulo 1 (GPa)	-	19,50	27,39	24,11	14,64	15,53
	Módulo 2 (GPa)	22,17	17,29	27,33	23,98	-	19,46
	Média	22,17	18,40	27,36	24,04	14,64	17,50
	Desvio Padrão	-	1,56	0,04	0,09	-	2,78
55 DIAS	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%	
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02
	Módulo 1 (GPa)	-	28,58	34,58	28,40	-	-
	Módulo 2 (GPa)	29,65	32,75	28,80	32,38	29,81	34,62
	Média	29,65	30,67	31,69	30,39	29,81	34,62
	Desvio Padrão	-	2,95	4,09	2,81	-	-
125 DIAS	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%	
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02
	Módulo 1 (GPa)	-	30,08	30,60	32,00	29,03	30,09
	Módulo 2 (GPa)	29,01	27,54	33,23	33,97	32,11	31,67
	Média	29,01	28,81	31,92	32,98	30,57	30,88
	Desvio Padrão	-	1,80	1,87	1,40	2,18	1,12
208 DIAS	Concreto	CCV 55%		CAA MC 55%		CAA MC 60%	
	Identificação	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02	Viga 01	Viga 02
	Módulo 1 (GPa)	-	28,00	27,19	26,42	31,18	-
	Módulo 2 (GPa)	-	29,68	-	-	32,76	-
	Média	-	28,84	27,19	26,42	31,97	-
	Desvio Padrão	-	1,19	-	-	1,12	-

## **ANEXO II – RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE**

**Planilha de Leituras - CCV-V1**

Carregamento	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)																																																			
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura																																																				
				0	0,20	0,40		0,60																																																						
	0	10/10/07	com fôrma	98,06	97,93	98,08	98,02	94,09	94,09	94,11	94,10																																																			
	0,20	10/10/07	peso próprio	97,88	97,99	97,91	97,93	94,21	94,04	94,15	94,13																																																			
	0,40	10/10/07	com 292,21Kg	97,60	97,65	97,62	97,62	93,74	93,84	93,74	93,77																																																			
	0,60	10/10/07	com 550Kg	95,61	95,61	95,69	95,64	92,14	92,25	92,20	92,20																																																			
Em carga	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)																																																			
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura																																																				
				0,80	1	5		6	6	7		8	9	12	13	14	15	16	19	20	21	22	26	27	28	29	30	33	34	35	40	41	43	44	47	48	50	51	54	56	59	61	63	65	68	70	72	78	84	91	93	96	97	99	103	105	107	111	113	122	124	126

Descarregamento	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura	
				154	154,3	154,6		154,9			
	154	12/03/08	com toda a carga	91,67	91,66	91,65	91,66	88,21	88,24	88,26	88,24
	154,3	12/03/08	com 376,51Kg	92,26	92,24	92,25	92,25	89,20	89,21	89,17	89,19
	154,6	12/03/08	com 179,16Kg	93,03	93,01	93,00	93,01	89,70	89,72	89,73	89,72
	154,9	12/03/08	sem carga	94,08	94,11	94,11	94,10	91,01	91,01	91,02	91,01





**Planilha de Leituras - CAA55-V1**

Carregamento	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Relógio central (mm)	Leituras pino tero médio (mm)			Média (mm)	Relógio terço médio (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura			1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	0	09/10/07	com fôrma	90,97	91,00	91,02	91,00	42,33	90,82	90,81	90,70	90,78	44,43
	0,04	09/10/07	peso próprio	91,01	91,06	91,03	91,03	42,36	90,84	90,85	90,83	90,84	44,46
	0,08	09/10/07	com 226,23Kg	90,70	90,65	90,61	90,65	41,93	90,42	90,42	90,37	90,40	44,51
	0,12	09/10/07	com 550Kg	88,00	87,90	87,86	87,92	39,25	87,96	87,93	87,89	87,93	41,27
Em carga	Idade (dias)	Data	Horário	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Relógio central (mm)	Leituras pino tero médio (mm)			Média (mm)	Relógio terço médio (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura			1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	1	10/10/07	8:00	87,35	87,35	87,35	87,35	38,78	87,43	87,54	87,55	87,51	40,71
	1,50	10/10/07	15:00	87,38	87,35	87,34	87,36	38,69	87,44	87,38	87,40	87,41	40,35
	2	11/10/07	7:00	87,18	87,14	87,15	87,16	38,62	87,23	87,25	87,28	87,25	40,35
	2,50	11/10/07	11:35	87,18	87,11	87,15	87,15	38,53	87,02	87,02	87,09	87,04	40,30
	2,75	11/10/07	15:00	87,12	87,18	87,15	87,15	38,52	87,13	87,13	87,11	87,12	40,29
	6	15/10/07	16:00	86,82	86,82	86,84	86,83	38,31	86,95	-	87,25	87,10	40,22
	7	16/10/07	11:15	86,89	86,91	86,90	86,90	38,33	87,06	87,05	87,05	87,05	40,21
	7,50	16/10/07	17:25	86,92	86,89	86,89	86,90	38,34	86,75	86,78	86,72	86,75	40,19
	8	17/10/07	13:30	86,76	86,77	86,78	86,77	38,33	87,05	87,04	87,05	87,05	40,18
	9	18/10/07	12:00	86,69	86,72	86,74	86,72	38,21	86,83	86,83	86,82	86,83	40,17
	10	19/10/07	11:30	86,67	86,64	86,68	86,66	38,11	86,76	86,77	86,76	86,76	40,13
	13	22/10/07	17:30	86,37	86,39	86,37	86,38	37,83	86,41	86,43	86,42	86,42	39,61
	14	23/10/07	11:00	86,34	86,36	86,37	86,36	37,84	86,34	86,36	86,38	86,36	39,57
	15	24/10/07	11:00	86,35	86,35	86,31	86,34	37,81	86,37	86,38	86,40	86,38	39,56
	16	25/10/07	15:45	86,25	86,24	86,26	86,25	37,71	86,34	86,38	86,39	86,37	39,53
	17	26/10/07	16:00	86,23	86,25	86,26	86,25	37,71	86,39	86,34	86,32	86,35	39,52
	20	29/10/07	17:00	86,18	86,20	86,20	86,19	37,74	86,26	86,27	86,31	86,28	39,45
	21	30/10/07	16:00	86,15	86,15	86,11	86,14	37,74	86,24	86,23	86,26	86,24	39,44
	22	31/10/07	16:00	86,11	86,11	86,10	86,11	37,73	86,16	86,20	86,18	86,18	39,43
	23	01/11/07	11:00	86,19	86,19	86,20	86,19	37,76	86,20	86,15	86,16	86,17	39,42
	27	05/11/07	14:40	85,69	85,70	85,72	85,70	37,36	85,92	85,92	85,93	85,92	39,40
	28	06/11/07	15:00	85,69	85,69	85,75	85,71	37,38	85,87	85,89	85,92	85,89	39,31
	29	07/11/07	18:00	85,52	85,51	85,49	85,51	37,38	85,90	85,91	85,86	85,89	39,29
	30	08/11/07	13:30	85,52	85,55	85,56	85,54	37,41	85,94	85,93	85,94	85,94	39,25
	31	09/11/07	11:00	85,52	85,50	85,48	85,50	37,36	85,93	85,91	85,80	85,88	39,25
	34	12/11/07	10:00	85,49	85,42	85,48	85,46	37,27	85,87	85,80	85,80	85,82	39,24
	35	13/11/07	10:00	85,43	85,46	85,46	85,45	37,23	85,86	85,86	85,84	85,85	39,20
	36	14/11/07	15:30	85,39	85,38	85,43	85,40	37,28	85,86	85,87	85,89	85,87	39,16
	41	19/11/07	10:30	85,40	85,39	85,39	85,39	37,28	85,86	85,83	85,83	85,84	39,15
	42	20/11/07	09:30	85,35	85,30	85,31	85,32	37,27	85,87	85,82	85,82	85,84	39,15
	44	22/11/07	17:40	85,21	85,19	85,18	85,19	37,05	85,62	85,63	85,64	85,63	39,08
	45	23/11/07	16:40	85,22	85,21	85,19	85,21	36,97	85,63	85,64	85,66	85,64	38,94
	48	26/11/07	11:00	85,15	85,17	85,18	85,17	37,12	85,59	85,59	85,57	85,58	38,75
	49	27/11/07	16:00	85,10	85,11	85,11	85,11	36,98	85,52	85,52	85,58	85,54	38,75
	51	29/11/07	18:00	84,96	85,00	85,10	85,02	36,99	85,46	85,44	85,45	85,45	38,74
	52	30/11/07	14:40	85,99	85,95	85,96	85,97	36,89	85,41	85,45	85,46	85,44	38,68
	55	03/12/07	18:00	84,73	84,76	84,70	84,73	36,69	85,40	85,43	85,43	85,42	38,58
	57	05/12/07	17:00	84,65	84,61	84,67	84,64	36,74	85,40	85,43	85,46	85,43	38,51
	60	08/12/07	15:00	84,68	84,70	84,71	84,70	36,57	85,05	85,08	85,09	85,07	38,55
	62	10/12/07	19:00	84,64	84,65	84,64	84,64	36,56	85,20	85,26	85,24	85,23	38,48
	64	12/12/07	16:00	84,60	84,61	84,57	84,59	36,51	85,18	85,17	85,17	85,17	37,47
	66	14/12/07	19:30	84,54	84,57	84,50	84,54	36,44	85,02	85,03	85,04	85,03	38,42
	69	17/12/07	19:40	84,30	84,35	84,34	84,33	36,45	85,07	85,10	85,08	85,08	38,36
	71	19/12/07	15:45	84,34	84,30	84,35	84,33	36,45	85,07	85,03	85,05	85,05	38,36
	73	21/12/07	18:45	84,35	84,35	84,35	84,35	36,37	85,01	85,02	85,02	85,02	38,08
	79	27/12/07	12:00	84,37	84,36	84,35	84,36	36,36	85,03	85,05	85,02	85,03	38,08
	85	02/01/08	15:00	84,37	84,35	84,38	84,37	36,36	85,03	85,01	85,04	85,03	38,08
	92	09/01/08	17:00	84,38	84,36	84,36	84,37	36,12	85,04	85,03	85,01	85,03	37,88
	94	11/01/08	13:30	84,37	84,35	84,38	84,37	36,19	84,99	84,97	84,99	84,98	37,88
	97	14/01/08	16:30	84,37	84,36	84,37	84,37	36,12	84,97	84,95	84,97	84,96	37,87
	98	15/01/08	17:00	84,38	84,35	84,35	84,36	36,15	84,97	84,98	84,97	84,97	37,86
	100	17/01/08	16:00	84,38	84,39	84,39	84,39	36,15	84,98	84,95	84,94	84,96	37,86
	104	21/01/08	18:00	84,35	84,31	84,35	84,34	36,14	84,93	84,94	84,93	84,93	37,86
	106	23/01/08	17:30	84,37	84,35	84,35	84,36	36,00	84,90	84,93	84,81	84,88	37,86
	108	25/01/08	12:10	84,35	84,35	84,35	84,35	36,01	84,86	84,84	84,83	84,84	37,86
	112	29/01/08	17:00	84,31	84,31	84,34	84,32	35,99	84,82	84,86	84,85	84,84	37,84
	114	31/01/08	16:00	84,25	84,24	84,28	84,26	36,08	84,75	84,73	84,75	84,74	37,83
	123	09/02/08	11:00	84,05	84,05	84,06	84,05	35,92	84,06	84,67	84,67	84,47	37,83
	125	11/02/08	16:00	83,99	84,01	84,04	84,01	35,07	84,59	84,64	84,61	84,61	37,74
	127	13/02/08	10:00	84,01	84,03	84,03	84,02	35,02	84,62	84,61	84,63	84,62	37,74
	134	20/02/08	13:00	84,02	84,02	84,02	84,02	35,00	84,57	84,59	84,61	84,59	37,74
	137	23/02/08	10:00	84,05	84,05	84,04	84,05	34,96	84,51	84,52	84,53	84,52	37,73
	141	27/02/08	19:00	83,93	83,93	83,94	83,93	34,89	84,53	84,49	84,47	84,50	37,71
	144	01/03/08	11:00	84,03	83,96	84,00	84,00	34,94	84,46	84,50	84,51	84,49	37,70
	147	04/03/08	14:20	83,81	83,82	83,86	83,83	35,89	84,48	84,48	84,44	84,47	37,69
	153	10/03/08	17:45	83,80	83,81	83,82	83,81	35,89	84,49	84,46	84,49	84,48	37,62
Descarregamento	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Relógio central (mm)	Leituras pino tero médio (mm)			Média (mm)	Relógio terço médio (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura			1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	155	12/03/08	com toda a carga	84,02	84,04	84,02	84,03	36,05	84,64	84,68	84,64	84,65	37,59
	155,3	12/03/08	com 373,21Kg	85,39	85,38	85,41	85,39	36,87	85,79	85,79	85,78	85,79	38,85
	155,6	12/03/08	com 191,43Kg	86,52	86,52	86,55	86,53	37,88	86,77	86,75	86,75	86,76	39,79
	155,9	12/03/08	sem carga	87,66	87,65	87,60	87,64	38,93	87,78	87,74	87,76	87,76	40,78

## Planilha de Leituras - CAA55-V2

Carrregamento	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura	
	0	09/10/07	com fôrma	97,03	97,06	97,00	97,03	95,84	95,83	95,82	95,83
	0,04	09/10/07	peso próprio	97,02	97,11	96,93	97,02	95,97	95,96	96,00	95,98
	0,08	09/10/07	com 294,33Kg	96,54	96,56	96,61	96,57	95,42	95,43	95,44	95,43
	0,12	09/10/07	com 550Kg	94,83	94,78	94,73	94,78	94,07	94,08	94,18	94,11
Em carga	Idade (dias)	Data	Horário	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura	
	1	10/10/07	08:00	94,40	94,35	94,35	94,37	93,47	93,48	93,58	93,51
	1,50	10/10/07	15:00	94,33	94,32	94,33	94,33	92,08	92,12	92,08	92,09
	2	11/10/07	7:00	93,90	93,85	93,88	93,88	93,33	93,28	93,28	93,30
	2,50	11/10/07	11:35	93,84	93,85	93,86	93,85	93,01	93,07	93,05	93,04
	2,75	11/10/07	15:00	93,77	93,80	93,79	93,79	93,16	93,15	93,12	93,14
	6	15/10/07	16:00	93,58	93,54	93,61	93,58	93,04	93,07	93,00	93,04
	7	16/10/07	11:15	93,64	93,65	93,61	93,63	92,87	92,89	92,89	92,88
	7,50	16/10/07	17:25	93,62	93,64	93,59	93,62	92,86	92,90	92,91	92,89
	8	17/10/07	13:30	93,40	93,37	93,44	93,40	92,93	92,95	92,94	92,94
	9	18/10/07	12:00	93,30	93,32	93,34	93,32	92,86	92,89	92,87	92,87
	10	19/10/07	11:30	93,25	93,30	93,29	93,28	92,73	92,77	92,78	92,76
	13	22/10/07	17:30	93,08	93,08	93,09	93,08	92,47	92,44	92,49	92,47
	14	23/10/07	11:00	93,03	93,03	92,97	93,01	92,49	92,49	92,45	92,48
	15	24/10/07	11:00	93,02	92,96	92,91	92,96	92,47	92,47	92,45	92,46
	16	25/10/07	15:45	92,88	92,86	92,85	92,86	92,38	92,38	92,40	92,39
	17	26/10/07	16:00	92,83	92,87	92,86	92,85	92,28	92,28	92,21	92,26
	20	29/10/07	17:00	92,79	92,79	92,80	92,79	92,25	92,25	92,21	92,24
	21	30/10/07	16:00	92,75	92,72	92,73	92,73	92,25	92,26	92,23	92,25
	22	31/10/07	16:00	92,74	92,71	92,70	92,72	92,24	92,26	92,21	92,24
	23	01/11/07	11:00	92,74	92,77	92,79	92,77	92,20	92,23	92,25	92,23
	27	05/11/07	14:40	92,37	92,33	92,39	92,36	92,02	92,04	92,05	92,04
	28	06/11/07	15:00	92,41	92,39	-	92,40	92,04	92,02	92,01	92,02
	29	07/11/07	18:00	92,38	92,42	92,41	92,40	92,00	92,05	92,01	92,02
	30	08/11/07	13:30	92,38	92,41	92,42	92,40	92,04	92,05	92,04	92,04
	31	09/11/07	11:00	92,42	92,40	92,38	92,40	91,98	91,99	92,03	92,00
	34	12/11/07	10:00	92,38	92,40	92,41	92,40	91,93	91,95	91,96	91,95
	35	13/11/07	10:00	92,33	92,33	92,32	92,33	91,87	91,84	91,85	91,85
	36	14/11/07	15:30	92,33	92,30	92,35	92,33	91,89	91,89	91,89	91,89
	41	19/11/07	10:30	92,29	92,30	92,30	92,30	91,86	91,89	91,91	91,89
	42	20/11/07	09:30	92,28	92,32	92,30	92,30	-	-	-	-
	44	22/11/07	17:40	92,21	92,23	92,25	92,23	91,69	91,70	91,73	91,71
	45	23/11/07	16:40	91,80	91,85	91,81	91,82	91,59	91,60	91,60	91,60
	48	26/11/07	11:00	92,17	92,15	92,18	92,17	91,61	91,62	91,63	91,62
	49	27/11/07	16:00	92,13	92,11	92,14	92,13	91,61	91,59	91,57	91,59
	51	29/11/07	18:00	91,94	91,93	91,94	91,94	91,55	91,54	91,51	91,53
	52	30/11/07	14:40	91,95	91,96	91,97	91,96	91,51	91,51	91,55	91,52
	55	03/12/07	18:00	91,94	91,92	91,96	91,94	91,40	91,42	91,42	91,41
	57	05/12/07	17:00	91,93	91,93	91,93	91,93	91,40	91,37	91,35	91,37
	60	08/12/07	15:00	91,56	91,56	91,60	91,57	91,28	91,28	91,30	91,29
	62	10/12/07	19:00	91,76	91,75	91,78	91,76	91,36	91,35	91,35	91,35
	64	12/12/07	16:00	91,71	91,76	91,72	91,73	91,32	91,30	91,29	91,30
	66	14/12/07	19:30	91,57	91,57	91,59	91,58	91,23	91,24	91,25	91,24
	69	17/12/07	19:40	91,53	91,54	91,55	91,54	91,23	91,23	91,23	91,23
	71	19/12/07	15:45	91,54	91,52	91,52	91,53	91,20	91,18	91,18	91,19
	73	21/12/07	18:45	91,51	91,49	91,48	91,49	91,15	91,18	91,18	91,17
	79	27/12/07	17:00	91,54	91,54	91,54	91,54	91,08	91,06	91,05	91,06
	85	02/01/08	15:00	91,51	91,50	91,52	91,51	91,04	91,06	91,02	91,04
	92	09/01/08	17:00	91,40	91,40	91,39	91,40	90,89	90,89	90,89	90,89
	94	11/01/08	13:30	91,21	91,19	91,20	91,20	90,56	90,54	90,56	90,55
	97	14/01/08	16:30	91,16	91,15	91,17	91,16	90,52	90,49	90,51	90,51
	98	15/01/08	17:00	91,11	91,12	91,09	91,11	90,50	90,52	90,51	90,51
	100	17/01/08	16:00	91,12	91,10	91,11	91,11	90,54	90,52	90,54	90,53
	104	21/01/08	18:00	91,07	91,08	91,08	91,08	90,53	90,53	90,50	90,52
	106	23/01/08	17:30	91,03	91,04	91,06	91,04	90,52	90,49	90,51	90,51
	108	25/01/08	12:10	91,06	91,01	91,03	91,03	90,48	90,47	90,49	90,48
	112	29/01/08	17:00	91,04	91,04	91,05	91,04	90,48	90,47	90,44	90,46
	114	31/01/08	16:00	91,06	91,00	91,01	91,02	90,43	90,47	90,46	90,45
	123	09/02/08	11:00	90,90	90,90	90,91	90,90	90,41	90,39	90,36	90,39
	125	11/02/08	16:00	90,82	90,79	90,81	90,81	90,32	90,35	90,35	90,34
	127	13/02/08	10:00	90,80	90,77	90,74	90,77	90,34	90,30	90,32	90,32
	134	20/02/08	13:00	90,75	90,76	90,74	90,75	90,40	90,40	90,41	90,40
	137	23/02/08	10:00	90,68	90,72	90,72	90,71	90,37	90,37	90,39	90,38
	141	27/02/08	19:00	90,62	90,62	90,61	90,62	90,35	90,36	90,39	90,37
	144	01/03/08	11:00	90,63	90,62	90,61	90,62	90,36	90,37	90,38	90,37
	147	04/03/08	14:20	90,63	90,65	90,63	90,64	90,38	90,36	90,35	90,36
	153	10/03/08	17:45	90,65	90,64	90,62	90,64	90,38	90,38	90,37	90,38
Descarrregamento	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura	
	155	12/03/08	com toda a carga	90,88	90,94	90,94	90,92	90,55	90,55	90,56	90,55
	155,3	12/03/08	com 350,21Kg	91,73	91,76	91,76	91,75	91,09	91,10	91,12	91,10
	155,6	12/03/08	com 177,86Kg	92,41	92,41	92,40	92,41	91,70	91,72	91,72	91,71
155,9	12/03/08	sem carga	93,39	93,40	93,40	93,40	92,57	92,57	92,58	92,57	

**Planilha de Leituras - CAA60-V1**

Carruagem	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)	
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	0	11/10/07	com fôrma	86,70	86,76	86,74	86,73	96,70	96,68	96,72	96,70	
	0,16	11/10/07	peso próprio	86,71	86,85	86,88	86,81	96,70	96,63	96,65	96,66	
	0,32	11/10/07	com 301,98Kg	86,31	86,35	86,34	86,33	96,22	96,19	96,24	96,22	
	0,48	11/10/07	com 550Kg	84,48	84,43	84,45	84,45	94,72	94,75	94,72	94,73	
Em carga	Idade (dias)	Data	Horário	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)	
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	0,64	11/10/07	11:35	84,28	84,28	84,29	84,28	94,46	94,46	94,41	94,44	
	0,8	11/10/07	15:00	84,16	84,16	84,19	84,17	94,11	94,12	94,14	94,12	
	4	15/10/07	16:00	83,72	83,77	83,78	83,76	93,79	93,80	93,80	93,80	
	5	16/10/07	11:15	83,80	83,82	83,80	83,81	94,02	94,02	94,09	94,04	
	5,50	16/10/07	17:25	83,80	83,84	83,79	83,81	93,89	93,87	93,88	93,88	
	6	17/10/07	10:30	83,81	83,82	83,83	83,82	93,84	93,83	93,84	93,84	
	7	18/10/07	12:00	83,55	83,53	83,52	83,53	93,61	93,63	93,60	93,61	
	8	19/10/07	11:30	83,49	83,48	83,47	83,48	93,54	93,53	93,58	93,55	
	11	22/10/07	17:30	82,91	82,94	82,95	82,93	93,46	93,49	93,48	93,48	
	12	23/10/07	11:00	82,94	82,89	82,91	82,91	93,44	93,42	93,40	93,42	
	13	24/10/07	11:00	82,77	82,77	82,79	82,78	93,20	93,24	93,20	93,21	
	14	25/10/07	15:45	82,63	82,60	82,66	82,63	93,20	93,23	93,18	93,20	
	15	26/10/07	16:00	82,67	82,68	82,71	82,69	93,12	93,14	93,15	93,14	
	18	29/10/07	17:00	82,52	82,51	82,54	82,52	93,08	93,10	93,11	93,10	
	19	30/10/07	16:00	82,45	82,45	82,43	82,44	93,03	93,06	93,01	93,03	
	20	31/10/07	16:00	82,40	82,45	82,43	82,43	92,99	92,95	92,99	92,98	
	21	01/11/07	11:00	82,46	82,46	82,44	82,45	92,91	92,95	92,93	92,93	
	25	05/11/07	14:40	82,08	82,08	82,09	82,08	92,72	92,74	92,75	92,74	
	26	06/11/07	15:00	82,09	82,09	82,12	82,10	92,68	92,69	92,71	92,69	
	27	07/11/07	18:00	82,13	82,12	82,05	82,10	92,53	92,53	92,48	92,51	
	28	08/11/07	13:30	82,15	82,17	82,12	82,15	92,58	92,64	92,62	92,61	
	29	09/11/07	11:00	82,09	82,13	82,12	82,11	92,65	92,65	92,64	92,65	
	32	12/11/07	10:00	82,06	82,06	82,06	82,06	92,60	92,61	92,62	92,61	
	33	13/11/07	10:00	82,07	82,02	82,02	82,04	92,54	92,56	92,57	92,56	
	34	14/11/07	15:30	82,02	82,02	82,04	82,03	92,52	92,55	92,56	92,54	
	39	19/11/07	10:30	82,03	82,04	82,01	82,03	92,51	92,51	92,55	92,52	
	40	20/11/07	09:30	81,94	81,97	82,00	81,97	92,52	92,52	92,55	92,53	
	42	22/11/07	17:40	81,78	81,79	81,80	81,79	92,30	92,34	92,36	92,33	
	43	23/11/07	16:40	81,39	81,43	81,42	81,41	92,35	92,34	92,36	92,35	
	46	26/11/07	11:00	81,71	81,74	81,75	81,73	92,32	92,35	92,34	92,34	
	47	27/11/07	16:00	81,71	81,72	81,73	81,72	92,33	92,33	-	92,33	
	49	29/11/07	18:00	81,59	81,62	81,64	81,62	92,22	92,24	92,24	92,23	
	50	30/11/07	14:40	81,65	81,64	81,69	81,66	92,20	92,20	92,24	92,21	
	53	03/12/07	18:00	81,55	81,56	81,55	81,55	92,16	92,18	92,19	92,18	
	55	05/12/07	17:00	81,58	81,57	81,59	81,58	92,20	92,18	92,19	92,19	
	58	08/12/07	15:00	81,45	81,47	81,49	81,47	92,07	92,09	92,13	92,10	
	60	10/12/07	19:00	81,48	81,45	81,46	81,46	92,07	92,05	92,06	92,06	
	62	12/12/07	16:00	81,50	81,50	81,49	81,50	92,06	92,05	92,04	92,05	
	64	14/12/07	19:30	81,39	81,40	81,43	81,41	91,94	91,92	91,94	91,93	
	67	17/12/07	19:40	81,30	81,35	81,37	81,34	91,92	91,91	91,93	91,92	
	69	19/12/07	15:45	81,30	81,31	81,30	81,30	91,93	91,93	91,94	91,93	
	71	21/12/07	18:45	81,29	81,26	81,30	81,28	91,89	91,90	91,92	91,90	
	77	27/12/07	18:10	81,20	81,22	81,24	81,22	91,94	91,91	91,91	91,92	
	83	02/01/08	17:15	81,14	81,16	81,17	81,16	91,94	91,93	91,90	91,92	
	90	09/01/08	17:00	80,61	80,63	80,61	80,62	91,66	91,66	91,65	91,66	
	92	11/01/08	13:30	80,56	80,58	80,59	80,58	91,55	91,54	91,53	91,54	
	95	14/01/08	16:30	80,57	80,53	80,54	80,55	91,53	91,52	91,52	91,52	
	96	15/01/08	17:00	80,58	80,53	80,54	80,55	91,53	91,53	91,51	91,52	
	98	17/01/08	16:00	80,54	80,68	80,56	80,59	91,49	91,50	91,48	91,49	
	102	21/01/08	18:00	80,38	80,42	80,44	80,41	91,33	91,37	91,39	91,36	
	104	23/01/08	17:30	80,38	80,34	80,35	80,36	91,28	91,27	91,25	91,27	
	106	25/01/08	12:10	80,31	80,33	80,32	80,32	91,27	91,28	91,26	91,27	
	110	29/01/08	17:00	80,29	80,29	80,28	80,29	91,24	91,27	91,22	91,24	
	112	31/01/08	16:00	80,30	80,23	80,28	80,27	91,19	91,11	91,21	91,17	
	121	09/02/08	11:00	80,26	80,21	80,21	80,23	91,15	91,18	91,13	91,15	
	123	11/02/08	16:00	80,22	80,19	80,20	80,20	91,11	91,12	91,12	91,12	
	125	13/02/08	10:00	80,26	80,25	80,25	80,25	91,13	91,11	91,10	91,11	
	132	20/02/08	13:00	80,39	80,44	80,44	80,42	91,07	91,08	91,11	91,09	
	135	23/02/08	10:00	80,33	80,33	80,34	80,33	91,02	90,98	90,98	90,99	
	139	27/02/08	19:00	80,29	80,26	80,30	80,28	90,95	91,01	91,03	91,00	
	142	01/03/08	11:00	80,31	80,31	80,32	80,31	90,96	90,94	91,03	90,98	
	145	04/03/08	14:20	80,34	80,32	80,30	80,32	90,95	90,95	90,92	90,94	
	151	10/03/08	17:45	80,32	80,32	80,33	80,32	90,94	90,95	90,97	90,95	
Descarruagem	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)	
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
		153	12/03/08	com toda a carga	80,28	80,27	80,26	80,27	90,94	90,99	90,93	90,95
		153,3	12/03/08	com 358,59Kg	81,33	81,30	81,27	81,30	91,93	91,94	91,94	91,94
		153,6	12/03/08	com 184,86Kg	82,15	82,13	82,13	82,14	92,57	92,56	92,56	92,56
	153,9	12/03/08	sem carga	83,13	83,17	83,18	83,16	93,31	93,34	93,34	93,33	

Planilha de Leituras - CAA60-V2

Carregamento	Idade (dias)	Data	Carga (Kg)	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Relógio central (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)	Relógio terço médio (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura			1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	0	11/10/07	com fôrma	101,03	101,02	101,06	101,04	43,28	88,25	88,28	88,26	88,26	44,94
0,20	11/10/07	sem fôrma	100,95	100,90	100,90	100,92	43,20	88,20	88,15	88,20	88,18	44,88	
0,40	11/10/07	com 279,11Kg	100,43	100,44	100,49	100,45	42,78	87,83	87,82	87,80	87,82	44,52	
0,60	11/10/07	com 550Kg	98,22	98,24	98,27	98,24	40,65	86,00	86,02	86,08	86,03	42,51	
Em carga	Idade (dias)	Data	Horário	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Relógio central (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)	Relógio terço médio (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura			1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	0,80	11/10/07	15:00	98,00	98,98	98,02	98,33	40,30	85,80	85,77	85,78	85,78	42,25
4	15/10/07	15:00	97,51	97,50	97,49	97,50	39,95	85,48	85,54	85,49	85,50	41,91	
5	16/10/07	11:15	97,44	97,44	97,48	97,45	39,97	85,49	85,48	85,50	85,49	41,91	
5,50	16/10/07	17:25	97,22	97,23	97,28	97,24	39,96	85,60	85,57	85,63	85,60	41,90	
6	17/10/07	10:30	97,46	97,46	97,47	97,46	39,94	85,67	85,61	85,67	85,65	41,90	
7	18/10/07	12:00	97,32	97,29	97,26	97,29	39,82	85,42	85,40	85,38	85,40	41,79	
8	19/10/07	11:30	97,21	97,26	97,26	97,24	39,67	85,15	85,11	85,18	85,15	41,62	
11	22/10/07	17:30	97,16	97,18	97,17	97,17	39,36	84,84	84,87	84,89	84,87	41,33	
12	23/10/07	11:00	96,99	96,94	96,91	96,95	39,38	84,78	84,80	84,77	84,78	41,33	
13	24/10/07	11:00	96,92	96,94	96,95	96,94	39,35	84,74	84,77	84,81	84,77	41,32	
14	25/10/07	15:45	96,64	96,69	96,67	96,67	39,26	84,52	84,50	84,54	84,52	41,25	
15	26/10/07	16:00	96,56	96,61	96,62	96,60	39,26	84,46	84,45	84,42	84,44	41,23	
18	29/10/07	17:00	96,53	96,54	96,52	96,53	39,26	84,59	84,60	84,59	84,59	41,22	
19	30/10/07	16:00	96,73	96,76	96,77	96,75	39,29	84,73	84,72	84,72	84,72	41,24	
20	31/10/07	16:00	96,72	96,71	96,77	96,73	39,27	84,70	84,67	84,66	84,68	41,24	
21	01/11/07	11:00	96,77	96,77	96,76	96,77	39,26	84,71	84,70	84,73	84,71	41,23	
25	05/11/07	14:40	96,40	96,41	96,42	96,41	38,98	84,51	84,53	84,54	84,53	40,97	
26	06/11/07	15:00	96,46	96,42	96,40	96,43	38,94	84,45	84,49	84,51	84,48	40,94	
27	07/11/07	18:00	96,41	96,40	96,39	96,40	38,92	82,96	83,11	82,98	83,02	40,88	
28	08/11/07	13:30	96,41	96,42	96,47	96,43	38,96	84,51	84,50	84,54	84,52	40,90	
29	09/11/07	11:00	96,41	96,42	96,43	96,42	38,90	84,53	84,50	84,48	84,50	40,89	
32	12/11/07	10:00	96,35	96,37	96,37	96,36	38,81	84,35	84,36	84,37	84,36	40,79	
33	13/11/07	10:00	96,33	96,34	96,35	96,34	38,78	84,30	84,26	84,32	84,29	40,71	
34	14/11/07	15:30	96,30	96,35	96,35	96,33	38,83	84,39	84,35	84,39	84,38	40,74	
39	19/11/07	10:30	96,25	96,28	96,28	96,27	38,80	84,33	84,33	84,30	84,32	40,71	
40	20/11/07	09:30	96,24	96,24	96,20	96,23	38,74	84,27	84,29	84,32	84,29	40,77	
42	22/11/07	17:40	96,07	96,08	96,08	96,08	38,62	84,17	84,19	84,20	84,19	40,60	
43	23/11/07	16:40	96,08	96,00	96,04	96,04	38,54	84,20	84,19	84,16	84,18	40,57	
46	26/11/07	11:00	96,11	96,08	96,10	96,10	38,61	84,18	84,20	84,16	84,18	40,60	
47	27/11/07	16:00	96,09	96,09	96,07	96,08	38,52	84,16	84,19	84,21	84,19	40,55	
49	29/11/07	18:00	96,11	96,09	96,13	96,11	38,44	84,12	84,08	84,09	84,10	40,48	
50	30/11/07	14:40	96,11	96,15	96,11	96,12	38,47	83,86	83,87	83,84	83,86	40,48	
53	03/12/07	18:00	96,00	96,02	96,05	96,02	38,49	83,75	83,76	83,71	83,74	40,56	
55	05/12/07	17:00	96,01	95,99	96,02	96,01	38,52	83,70	83,72	83,74	83,72	40,56	
58	08/12/07	15:00	95,91	95,91	95,91	95,91	38,42	84,07	84,08	84,02	84,06	40,48	
60	10/12/07	19:00	95,79	95,81	95,82	95,81	38,37	83,73	83,67	83,68	83,69	40,42	
62	12/12/07	16:00	95,70	95,66	95,67	95,68	38,32	83,71	83,68	83,66	83,68	40,37	
64	14/12/07	19:30	95,70	95,72	95,72	95,71	38,25	83,72	83,72	83,71	83,72	40,31	
67	17/12/07	19:40	95,50	95,53	95,50	95,51	38,26	83,79	83,72	83,71	83,74	40,31	
69	19/12/07	15:45	95,50	95,49	95,51	95,50	38,26	83,69	83,72	83,73	83,71	40,30	
71	21/12/07	18:45	95,46	95,49	95,42	95,46	38,19	83,75	83,76	83,73	83,75	40,29	
77	27/12/07	18:10	95,48	95,48	95,46	95,47	38,17	83,73	83,74	83,72	83,73	40,21	
83	02/01/08	17:15	95,42	95,45	95,43	95,43	38,16	83,73	83,71	83,72	83,72	40,19	
90	09/01/08	17:00	95,08	95,03	95,01	95,04	37,56	83,16	83,15	83,17	83,16	39,61	
92	11/01/08	13:30	95,07	95,12	95,06	95,08	37,63	83,45	83,47	83,49	83,47	39,67	
95	14/01/08	16:30	94,97	94,98	95,04	95,00	37,58	83,41	83,42	83,37	83,40	39,61	
96	15/01/08	17:00	94,98	94,98	94,97	94,98	37,56	83,36	83,37	83,39	83,37	39,58	
98	17/01/08	16:00	94,97	94,97	94,98	94,97	37,56	83,32	83,33	83,36	83,34	39,58	
102	21/01/08	18:00	94,96	94,93	94,91	94,93	37,46	83,11	83,15	83,15	83,14	39,50	
104	23/01/08	17:30	94,91	94,90	94,91	94,91	37,41	83,10	83,07	83,08	83,08	39,46	
106	25/01/08	12:10	94,90	94,88	94,90	94,89	37,41	83,02	83,09	83,07	83,06	39,44	
110	29/01/08	17:00	94,88	94,86	94,87	94,87	37,40	83,00	83,01	82,99	83,00	39,43	
112	31/01/08	16:00	94,83	94,75	94,79	94,79	37,44	82,95	82,97	82,97	82,96	39,46	
121	09/02/08	11:00	94,85	94,85	94,85	94,85	37,29	82,86	82,89	82,87	82,87	39,33	
123	11/02/08	16:00	94,87	94,82	94,81	94,83	37,42	82,85	82,85	82,80	82,83	39,43	
125	13/02/08	10:00	94,89	94,86	94,83	94,86	37,39	82,83	82,82	82,82	82,82	39,42	
132	20/02/08	13:00	94,93	94,93	94,92	94,93	37,37	82,82	82,82	82,84	82,83	39,39	
135	23/02/08	10:00	94,93	94,83	94,86	94,87	37,34	82,82	82,82	82,77	82,80	39,36	
139	27/02/08	19:00	94,75	94,78	94,76	94,76	37,24	82,71	82,74	82,75	82,73	39,32	
142	01/03/08	11:00	94,68	94,69	94,71	94,69	37,31	82,64	82,68	82,67	82,66	39,30	
145	04/03/08	14:20	94,68	94,66	94,64	94,66	37,32	82,61	82,64	82,66	82,64	39,34	
151	10/03/08	17:45	94,95	94,67	94,67	94,76	37,29	82,62	82,63	82,62	82,62	39,32	
Descarregamento	Idade (dias)	Data	Horário	Leituras pino central (mm)			Média (mm)	Relógio central (mm)	Leituras pino terço médio (mm)			Média (mm)	Relógio terço médio (mm)
				1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura			1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura		
	153	12/03/08	com toda a carga	94,66	94,67	94,66	94,66	37,30	82,70	82,71	82,69	82,70	39,30
	153,3	12/03/08	com 371,81Kg	95,37	95,38	95,40	95,38	37,81	83,22	83,24	83,26	83,24	39,82
	153,6	12/03/08	com 197,05Kg	96,18	96,18	96,18	96,18	38,79	84,09	84,10	84,11	84,10	40,73
153,9	12/03/08	sem carga	97,25	97,26	97,27	97,26	39,80	85,01	85,04	85,04	85,03	41,62	

**ANEXO III – RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FORMULAÇÃO DA  
NORMA BRASILEIRA**

**RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DAS RECOMENDAÇÕES DA NBR 6118/2003**

Idade (dias)	CCV - V1			CCV - V2		
	$f_{ck} = 30\text{MPa}$	$f_{ck}$ real	$f_{ck}$ e módulo reais	$f_{ck} = 30\text{MPa}$	$f_{ck}$ real	$f_{ck}$ e módulo reais
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06
0,08	0,37	0,35	0,31	0,37	0,36	0,32
0,12	1,39	1,14	1,00	1,39	1,24	1,10
1,0	1,39	1,15	1,00	1,39	1,25	1,10
5,0	1,41	1,16	1,02	1,41	1,27	1,12
6,0	1,42	1,17	1,02	1,42	1,27	1,13
6,0	1,42	1,17	1,02	1,42	1,27	1,13
7,0	1,42	1,17	1,03	1,42	1,27	1,13
8,0	1,43	1,18	1,03	1,43	1,28	1,13
9,0	1,44	1,18	1,03	1,44	1,28	1,14
12,0	1,45	1,19	1,05	1,45	1,30	1,15
13,0	1,46	1,20	1,05	1,46	1,30	1,15
14,0	1,46	1,20	1,05	1,46	1,31	1,16
15,0	1,46	1,21	1,06	1,46	1,31	1,16
16,0	1,47	1,21	1,06	1,47	1,31	1,17
19,0	1,48	1,22	1,07	1,48	1,33	1,18
20,0	1,49	1,23	1,07	1,49	1,33	1,18
21,0	1,49	1,23	1,08	1,49	1,34	1,18
22,0	1,50	1,23	1,08	1,50	1,34	1,19
26,0	1,52	1,25	1,09	1,52	1,36	1,20
27,0	1,52	1,25	1,10	1,52	1,36	1,21
28,0	1,52	1,25	1,10	1,52	1,36	1,21
29,0	1,53	1,26	1,10	1,53	1,37	1,21
30,0	1,53	1,26	1,10	1,53	1,37	1,22
33,0	1,54	1,27	1,11	1,54	1,38	1,22
34,0	1,55	1,28	1,12	1,55	1,39	1,23
35,0	1,55	1,28	1,12	1,55	1,39	1,23
40,0	1,57	1,29	1,13	1,57	1,41	1,25
41,0	1,58	1,30	1,14	1,58	1,41	1,25
43,0	1,58	1,30	1,14	1,58	1,42	1,26
44,0	1,59	1,31	1,14	1,59	1,42	1,26
47,0	1,60	1,32	1,15	1,60	1,43	1,27
48,0	1,60	1,32	1,16	1,60	1,43	1,27
50,0	1,61	1,33	1,16	1,61	1,44	1,28
51,0	1,61	1,33	1,16	1,61	1,44	1,28
54,0	1,62	1,34	1,17	1,62	1,45	1,29
56,0	1,63	1,34	1,18	1,63	1,46	1,29
59,0	1,64	1,35	1,18	1,64	1,47	1,30
61,0	1,65	1,36	1,19	1,65	1,47	1,31
63,0	1,65	1,36	1,19	1,65	1,48	1,31
65,0	1,66	1,37	1,20	1,66	1,49	1,32
68,0	1,67	1,38	1,20	1,67	1,49	1,32
70,0	1,68	1,38	1,21	1,68	1,50	1,33
72,0	1,68	1,39	1,21	1,68	1,51	1,33
78,0	1,70	1,40	1,23	1,70	1,52	1,35
84,0	1,72	1,42	1,24	1,72	1,54	1,36
91,0	1,74	1,43	1,25	1,74	1,56	1,38
93,0	1,74	1,44	1,26	1,74	1,56	1,38
96,0	1,75	1,44	1,26	1,75	1,57	1,39
97,0	1,76	1,45	1,27	1,76	1,57	1,39
99,0	1,76	1,45	1,27	1,76	1,58	1,40
103,0	1,77	1,46	1,28	1,77	1,58	1,40
105,0	1,78	1,46	1,28	1,78	1,59	1,41
107,0	1,78	1,47	1,28	1,78	1,59	1,41
111,0	1,79	1,48	1,29	1,79	1,60	1,42
113,0	1,80	1,48	1,30	1,80	1,61	1,43
122,0	1,82	1,50	1,31	1,82	1,63	1,44
124,0	1,82	1,50	1,32	1,82	1,63	1,45
126,0	1,83	1,51	1,32	1,83	1,64	1,45
133,0	1,84	1,52	1,33	1,84	1,65	1,46
136,0	1,85	1,52	1,34	1,85	1,66	1,47
140,0	1,86	1,53	1,34	1,86	1,66	1,48
143,0	1,87	1,54	1,35	1,87	1,67	1,48
146,0	1,87	1,54	1,35	1,87	1,68	1,49
152,0	1,89	1,55	1,36	1,89	1,69	1,50

**RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DAS RECOMENDAÇÕES DA NBR 6118/2003**

Idade (dias)	CAA60 - V1			CAA60 - V2		
	$f_{ck} = 30\text{MPa}$	$f_{ck}$ real	$f_{ck}$ e módulo reais	$f_{ck} = 30\text{MPa}$	$f_{ck}$ real	$f_{ck}$ e módulo reais
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06
0,4	0,37	0,34	0,32	0,37	0,34	0,31
0,6	1,39	1,04	0,96	1,39	0,07	0,89
0,8	1,39	1,04	0,96	1,39	0,96	0,90
4,0	1,39	1,04	0,96	1,41	0,98	0,91
5,0	1,41	1,06	0,97	1,41	0,98	0,91
5,5	1,41	1,06	0,98	1,42	0,98	0,91
6,0	1,42	1,06	0,98	1,42	0,98	0,92
7,0	1,42	1,06	0,98	1,42	0,99	0,92
8,0	1,42	1,07	0,99	1,43	0,99	0,92
11,0	1,43	1,07	0,99	1,45	1,00	0,93
12,0	1,45	1,08	1,00	1,45	1,01	0,94
13,0	1,45	1,09	1,00	1,46	1,01	0,94
14,0	1,46	1,09	1,01	1,46	1,01	0,94
15,0	1,46	1,09	1,01	1,46	1,02	0,95
18,0	1,46	1,10	1,01	1,48	1,03	0,95
19,0	1,48	1,11	1,02	1,48	1,03	0,96
20,0	1,48	1,11	1,03	1,49	1,03	0,96
21,0	1,49	1,11	1,03	1,49	1,04	0,96
25,0	1,49	1,12	1,03	1,51	1,05	0,98
26,0	1,51	1,13	1,05	1,52	1,05	0,98
27,0	1,52	1,13	1,05	1,52	1,05	0,98
28,0	1,52	1,14	1,05	1,52	1,06	0,98
29,0	1,52	1,14	1,05	1,53	1,06	0,99
32,0	1,53	1,14	1,06	1,54	1,07	0,99
33,0	1,54	1,15	1,07	1,54	1,07	1,00
34,0	1,54	1,16	1,07	1,55	1,07	1,00
39,0	1,55	1,16	1,07	1,57	1,09	1,01
40,0	1,57	1,17	1,09	1,57	1,09	1,01
42,0	1,57	1,18	1,09	1,58	1,10	1,02
43,0	1,58	1,18	1,09	1,58	1,10	1,02
46,0	1,58	1,19	1,10	1,59	1,11	1,03
47,0	1,59	1,19	1,10	1,60	1,11	1,03
49,0	1,60	1,20	1,11	1,61	1,11	1,04
50,0	1,61	1,20	1,11	1,61	1,12	1,04
53,0	1,61	1,21	1,11	1,62	1,12	1,05
55,0	1,62	1,21	1,12	1,63	1,13	1,05
58,0	1,63	1,22	1,13	1,64	1,14	1,06
60,0	1,64	1,23	1,13	1,64	1,14	1,06
62,0	1,64	1,23	1,14	1,65	1,14	1,07
64,0	1,65	1,24	1,14	1,66	1,15	1,07
67,0	1,66	1,24	1,15	1,67	1,16	1,08
69,0	1,67	1,25	1,15	1,67	1,16	1,08
71,0	1,67	1,25	1,16	1,68	1,16	1,08
77,0	1,68	1,26	1,16	1,70	1,18	1,10
83,0	1,70	1,27	1,18	1,72	1,19	1,11
90,0	1,72	1,29	1,19	1,74	1,20	1,12
92,0	1,74	1,30	1,20	1,74	1,21	1,12
95,0	1,74	1,30	1,21	1,75	1,21	1,13
96,0	1,75	1,31	1,21	1,75	1,22	1,13
98,0	1,75	1,31	1,21	1,76	1,22	1,13
102,0	1,76	1,32	1,22	1,77	1,23	1,14
104,0	1,77	1,32	1,22	1,77	1,23	1,14
106,0	1,77	1,33	1,23	1,78	1,23	1,15
110,0	1,78	1,33	1,23	1,79	1,24	1,15
112,0	1,79	1,34	1,24	1,79	1,24	1,16
121,0	1,79	1,34	1,24	1,82	1,26	1,17
123,0	1,82	1,36	1,26	1,82	1,26	1,18
125,0	1,82	1,36	1,26	1,83	1,27	1,18
132,0	1,83	1,37	1,26	1,84	1,28	1,19
135,0	1,84	1,38	1,28	1,85	1,28	1,19
139,0	1,85	1,39	1,28	1,86	1,29	1,20
142,0	1,86	1,39	1,29	1,87	1,29	1,20
145,0	1,87	1,40	1,29	1,87	1,30	1,21
151,0	1,87	1,40	1,30	1,88	1,31	1,22

**RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DAS RECOMENDAÇÕES DA NBR 6118/2003**

Idade (dias)	CAA55 - V1			CAA55 - V2		
	$f_{ck} = 30\text{MPa}$	$f_{ck}$ real	$f_{ck}$ e módulo reais	$f_{ck} = 30\text{MPa}$	$f_{ck}$ real	$f_{ck}$ e módulo reais
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08	0,06
0,08	0,37	0,40	0,33	0,37	0,39	0,32
0,12	1,39	1,86	1,57	1,39	1,64	1,37
1,0	1,39	1,87	1,58	1,39	1,64	1,38
1,5	1,39	1,87	1,58	1,39	1,65	1,38
2,0	1,40	1,88	1,58	1,40	1,65	1,38
2,3	1,40	1,88	1,59	1,40	1,65	1,39
2,6	1,40	1,88	1,59	1,40	1,65	1,39
6,0	1,42	1,91	1,61	1,42	1,67	1,41
7,0	1,42	1,91	1,61	1,42	1,68	1,41
7,5	1,43	1,92	1,62	1,43	1,68	1,41
8,0	1,43	1,92	1,62	1,43	1,69	1,42
9,0	1,44	1,93	1,63	1,44	1,69	1,42
10,0	1,44	1,94	1,63	1,44	1,70	1,43
13,0	1,46	1,96	1,65	1,46	1,72	1,44
14,0	1,46	1,96	1,65	1,46	1,72	1,45
15,0	1,46	1,97	1,66	1,46	1,73	1,45
16,0	1,47	1,98	1,67	1,47	1,73	1,46
17,0	1,47	1,98	1,67	1,47	1,74	1,46
20,0	1,49	2,00	1,69	1,49	1,76	1,47
21,0	1,49	2,01	1,69	1,49	1,76	1,48
22,0	1,50	2,01	1,70	1,50	1,77	1,48
23,0	1,50	2,02	1,70	1,50	1,77	1,49
27,0	1,52	2,04	1,72	1,52	1,79	1,51
28,0	1,52	2,05	1,73	1,52	1,80	1,51
29,0	1,53	2,05	1,73	1,53	1,80	1,51
30,0	1,53	2,06	1,74	1,53	1,81	1,52
31,0	1,54	2,06	1,74	1,54	1,81	1,52
34,0	1,55	2,08	1,75	1,55	1,83	1,53
35,0	1,55	2,09	1,76	1,55	1,83	1,54
36,0	1,56	2,09	1,76	1,56	1,84	1,54
41,0	1,58	2,12	1,79	1,58	1,86	1,56
42,0	1,58	2,12	1,79	1,58	1,86	1,57
44,0	1,59	2,13	1,80	1,59	1,87	1,57
45,0	1,59	2,14	1,80	1,59	1,88	1,58
48,0	1,60	2,15	1,82	1,60	1,89	1,59
49,0	1,61	2,16	1,82	1,61	1,89	1,59
51,0	1,61	2,17	1,83	1,61	1,90	1,60
52,0	1,62	2,17	1,83	1,62	1,91	1,60
55,0	1,63	2,19	1,84	1,63	1,92	1,61
57,0	1,63	2,20	1,85	1,63	1,93	1,62
60,0	1,64	2,21	1,86	1,64	1,94	1,63
62,0	1,65	2,22	1,87	1,65	1,95	1,64
64,0	1,66	2,23	1,88	1,66	1,96	1,64
66,0	1,66	2,24	1,89	1,66	1,96	1,65
69,0	1,67	2,25	1,90	1,67	1,97	1,66
71,0	1,68	2,26	1,90	1,68	1,98	1,66
73,0	1,69	2,27	1,91	1,69	1,99	1,67
79,0	1,70	2,29	1,93	1,70	2,01	1,69
85,0	1,72	2,31	1,95	1,72	2,03	1,71
92,0	1,74	2,34	1,97	1,74	2,05	1,73
94,0	1,75	2,35	1,98	1,75	2,06	1,73
97,0	1,76	2,36	1,99	1,76	2,07	1,74
98,0	1,76	2,36	1,99	1,76	2,07	1,74
100,0	1,76	2,37	2,00	1,76	2,08	1,75
104,0	1,77	2,38	2,01	1,77	2,09	1,76
106,0	1,78	2,39	2,02	1,78	2,10	1,76
108,0	1,78	2,40	2,02	1,78	2,11	1,77
112,0	1,79	2,41	2,03	1,79	2,12	1,78
114,0	1,80	2,42	2,04	1,80	2,12	1,78
123,0	1,82	2,45	2,06	1,82	2,15	1,80
125,0	1,83	2,45	2,07	1,83	2,15	1,81
127,0	1,83	2,46	2,07	1,83	2,16	1,81
134,0	1,85	2,48	2,09	1,85	2,18	1,83
137,0	1,85	2,49	2,10	1,85	2,19	1,84
141,0	1,86	2,50	2,11	1,86	2,20	1,85
144,0	1,87	2,51	2,12	1,87	2,21	1,85
147,0	1,88	2,52	2,13	1,88	2,21	1,86
153,0	1,89	2,54	2,14	1,89	2,23	1,87



**ANEXO IV – RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FORMULAÇÃO DE  
ELEMENTOS FINITOS**



