

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INFLUÊNCIA DOS CICLOS DE EXECUÇÃO NAS
DEFORMAÇÕES DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO DE EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS**

Paulo Fernando Salvador

Porto Alegre

Julho 2007

PAULO FERNANDO SALVADOR

**INFLUÊNCIA DOS CICLOS DE EXECUÇÃO NAS
DEFORMAÇÕES DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO DE EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS**

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 na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

Julho 2007

S182i Salvador, Paulo Fernando
Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos / Paulo Fernando Salvador. – 2007.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.

Orientação : Prof^ª. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Com a colaboração do Prof. MSc João Ricardo Masuero

1. Estruturas de concreto armado – Deformação. 2. Estruturas (Engenharia) – Ensaios. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Título.

CDU-624.012.45(043)

PAULO FERNANDO SALVADOR

**INFLUÊNCIA DOS CICLOS DE EXECUÇÃO NAS
DEFORMAÇÕES DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO DE EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de julho de 2007

Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dr.^a pela Universidade de São Paulo

Orientadora

Prof. João Ricardo Masuero
MSc pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Colaborador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
PhD pela Pennsylvania State University (EUA)

Prof. Cláudio de Souza Kazmierczak (UNISINOS)
Dr. pela Escola Politécnica da USP

Prof. Ricardo Leopoldo e Silva França (EPUSP)
Dr. pela Escola Politécnica da USP

*Dedico este trabalho aos meus
pais e a todos amigos que me incentivaram*

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, auxiliaram na realização desta dissertação:

Aos meus pais, Antônio e Conceição, por tudo que fizeram e fazem por mim até hoje e sempre.

À professora Denise Dal Molin e ao prof. João Masuero, pela orientação, pelo conhecimento transmitido e pela amizade.

Aos demais professores do NORIE, pelos conhecimentos transmitidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor João Campagnolo pela oportunidade de fazer o estágio em sua disciplina, permitindo o retorno à docência nas salas de aula da faculdade de arquitetura.

À professora Ângela Masuero pela confiança e apoio.

Aos professores Américo Campos Filho e Alexandre Pacheco, pelo apoio e troca de informações.

Ao professor Luís Carlos P. da Silva Filho pela doação dos cavaletes de aço para o ensaio e pela colaboração.

Ao professor Fernando Schnaid pelo empenho e colaboração.

A todos os amigos do NORIE, em especial aos colegas que ingressaram comigo em 2006, pelo companheirismo e amizade: Camile Moura, Caroline Kehl, Cecília Rocha, Guilherme Biesek, Ilídio Alexandre, Fernando Felix, Juliana Cruz e Patrícia Tillmann.

Ao Ilídio Alexandre, pela amizade, pela torcida e pela ajuda na montagem dos ensaios nos finais de semana e no carnaval.

À Edna Possan, pela disponibilidade em ajudar nas análises estatísticas, ao Paulo Manuel pela ajuda nos ensaios de módulo e à Patrícia Lovato pela ajuda na formatação dos textos.

Às colegas do grupo de pesquisa Simone Venquiaruto, Geilma Vieira e Lucília Bernardino, pela troca de informações e experiências.

À Cristiane Moura, Daniel Pagnussat e Simone Venquiaruto, pela eficiência nas programações do laboratório.

Aos colegas do LEME, Luciane Fonseca e Camila Simonetti pela ajuda nos ensaio e ao Uziel Quinino pela doação dos blocos de concreto.

Ao meu sobrinho Mateus Salvador pela ajuda na montagem dos ensaios.

Ao meu primo Luiz Salvador, pelo serviço de serralheria e ajuda na concepção do aparato de ensaio.

Aos amigos da Deltacon Engenharia, especialmente ao Eng. Martin Beier, Eng^a Vera Fritsh e Eng. Paulo Machado, pelo apoio intelectual e pelo empréstimo de livros e artigos internacionais.

Ao Eurípedes Fontes do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), pelo apoio intelectual nas invenções e na confecção das fôrmas de madeira.

Ao Éder e ao Airton, pela ajuda prestada no laboratório do NORIE.

À Belgo Arcelor Brasil, na pessoa do Sr. René Kahler, Eng^a Cinara Wastowski e Eng^a Margarete Cerutti, pela doação do aço para os ensaios.

À Indústria Nacional de Aço Pronto, na pessoa do Eng Roque Echel, pela doação do serviço de corte e dobra do aço.

À JACP Produtos Industriais, na pessoa do Sr Rogério Kffuri, pela doação dos espaçadores de argamassa.

À Companhia de Cimento Itambé, na pessoa do Eng Jorge Aoki, pela doação do cimento CP V-ARI.

Aos funcionários do NORIE, Simone e Luiz Carlos, pela disponibilidade em ajudar no que fosse necessário.

Às funcionárias do PPGEC, Ana Luísa, Carmem, Liliani e Rita, pelo empenho e colaboração.

A todas às pessoas que, por esquecimento, não foram citadas aqui, mas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigado !

RESUMO

SALVADOR, P. F. **Influência dos Ciclos de Execução nas Deformações das Estruturas de Concreto Armado de Edifícios de Andares Múltiplos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Este trabalho discute as conseqüências nas deformações de estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos, moldadas através de ciclos de execução rápidos. Em recente revisão, as normas da ABNT sugerem uma maior preocupação com as solicitações aplicadas nas estruturas, quando o concreto apresenta idade inferior a vinte e oito dias. A literatura pesquisada também indica a ocorrência de manifestações patológicas decorrentes de deformações excessivas nas estruturas devido às ações de construção, que inclusive podem superar o que é previsto em projeto. Neste trabalho é mostrado um estudo experimental de caráter exploratório, buscando analisar a influência do carregamento precoce, nas deformações de vigas de concreto armado. Foram propostos dois tipos de pré-carregamento, um de curta duração, onde são aplicados três níveis de carregamento aos três dias de idade, e outro de longa duração, onde são aplicados carregamentos em idades de acordo com as ações construtivas decorrentes de dois ciclos de execução rápidos. Foram utilizados concretos produzidos com dois tipos de cimento, um de cura rápida (CP V-ARI) e outro de cura lenta (CP IV-32RS). Os resultados apontam para a confirmação do que preconizam a literatura e as normas nacionais e internacionais, se consideradas as deformações resultantes em valores absolutos. No entanto, o pré-carregamento parece afetar favoravelmente as taxas de deformação por fluência por um determinado período, podendo inclusive promover um ganho de rigidez instantânea em níveis de carregamento próximos aos de projeto.

Palavras-chave: carregamento precoce; ciclos de execução; estruturas de concreto armado; concreto jovem; ações de construção.

ABSTRACT

SALVADOR, P. F. **Influência dos Ciclos de Execução nas Deformações das Estruturas de Concreto Armado de Edifícios de Andares Múltiplos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Construction Cycles Influence on the Deformation of Reinforced Concrete Structures of Multistory Buildings

This paper discuss the consequences on deformations of reinforced concrete structures of multistory buildings, cast during cycles of quick construction. ABNT codes, in recent reviews, suggest more attention with load application on structures when concrete presents a lower age than twenty-eight days. The literature also indicates the incidence of pathological manifestations resulting from excessive deformation on structures due to the actions during construction that could even overcome those predicted on designs. It is shown in this paper an experimental study of exploratory character, trying to analyze the influence of early loading on the deformability of reinforced concrete beams. Two types of preloading were considered: an instantaneous one, where three levels of loading for three days of age each were applied, and a continuous one, where loadings where on ages applied in accordance with construction steps due to two cycles of quick construction. Concretes produced with two types of cement were used: one of fast curing (CP V-ARI) and another of slow curing (CP IV-32RS). The results confirm what the literature and national and international codes specify, when deflections in absolute values are considered. Nevertheless, preloading seems to positively affect creep for a determined period, even promoting a gain in instantaneous stiffness on levels of loading near those of design.

Key-words: early loading; cycles of construction; reinforced concrete structures; young concrete; construction actions.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	15
SIGLAS	16
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA	20
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	21
2 COMPORTAMENTO DO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO	22
2.1 RESISTÊNCIA DO CONCRETO	22
2.2 DEFORMAÇÕES	25
2.2.1 Deformação Imediata	26
2.2.2 Deformação Diferida no Tempo	27
2.2.2.1 Deformação por Retração	27
2.2.2.1.1 <i>Retração por Secagem ou Retração Hidráulica</i>	28
2.2.2.1.2 <i>Reversibilidade da Retração por Secagem</i>	29
2.2.2.2 Deformação por Fluência ou Deformação Lenta	29
2.2.2.2.1 <i>Reversibilidade da Fluência</i>	30
2.2.2.2.2 <i>Fatores que Influenciam a Fluência</i>	31
3 EFEITO DA TÉCNICA CONSTRUTIVA NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO	34
3.1 FÔRMAS	34
3.2 CARREGAMENTO PRECOCE	35
3.3 AÇÕES CONSTRUTIVAS	40
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	46
4.1 MÉTODO DE PESQUISA	46
4.1.1 Ensaio de Pré-carregamento de Curta Duração	46
4.1.2 Ensaio de Pré-carregamento de Longa duração	47
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS	48
4.2.1 Cimento	49
4.2.1.1 Cimento CP V-ARI	49
4.2.1.2 Cimento CP IV-32RS	50
4.2.2 Agregados	51
4.2.3 Armadura	52

4.2.4 Água	53
4.3 MÉTODO DE ENSAIO	53
4.3.1 Geometria e Modelo Matemático das Vigas	53
4.3.2 Produção e Verificação das Propriedades Mecânicas do Concreto	54
4.3.2.1 Dosagem dos Concretos	54
4.3.2.2 Mistura	56
4.3.2.3 Adensamento	57
4.3.2.4 Cura	57
4.3.2.4.1 Cura das Vigas	57
4.3.2.4.2 Cura dos Corpos-de-prova	58
4.3.2.5 Propriedades Mecânicas dos Concretos	58
4.3.2.5.1 Resistência à compressão Uniaxial (f_c)	58
4.3.2.5.2 Resistência à Tração Direta (f_{ct})	59
4.3.2.5.3 Módulo de Elasticidade Secante (E_{cs})	60
4.3.2.5.4 Resultados dos Ensaios (f_c , f_{ct} e E_{cs})	61
4.3.3 Ensaio das Vigas	67
4.3.3.1 Aparato de Ensaio	67
4.3.3.1.1 Sistema de Medição	71
4.3.3.2 Ensaio de Pré-carregamento de Curta Duração	71
4.3.3.2.1 Forma de Carregamento	72
4.3.3.2.2 Dimensionamento das Vigas	72
4.3.3.2.3 Preparo dos Protótipos	73
4.3.3.2.4 Pré-carregamento de Curta Duração	73
4.3.3.2.5 Carregamento Permanente	77
4.3.3.3 Ensaio de Pré-carregamento de Longa Duração	79
4.3.3.3.1 Forma de Carregamento	80
4.3.3.3.2 Dimensionamento das Vigas	85
4.3.3.3.3 Preparo dos Protótipos	86
4.3.3.3.4 Pré-carregamento de Longa Duração e Carregamento Permanente	88
4.3.3.4 Extração de Testemunhos	93
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
5.1 PRÉ-CARREGAMENTO DE CURTA DURAÇÃO	95
5.1.1 Flecha Imediata	95
5.1.1.1 Flecha Imediata Considerando a Deformação Residual	95
5.1.1.2 Flecha Imediata Desconsiderando a Deformação Residual	96

5.1.2 Flecha Diferida no Tempo	97
5.1.2.1 Flecha Diferida no Tempo Considerando a Deformação Residual e a Inicial	98
5.1.2.2 Flecha Diferida no Tempo Desconsiderando a Deformação Residual e a Inicial	98
5.1.3 Fissuração	100
5.2. PRÉ-CARREGAMENTO DE LONGA DURAÇÃO	101
5.2.1 Flecha em Função do Carregamento	101
5.2.2 Flecha em Função do Tempo	104
5.2.3 Fissuração	109
5.3 EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS	111
5.3.1 Resultados Obtidos	112
5.3.1.1 Vigas que sofreram Pré-carregamento de Curta Duração	112
5.3.1.1.1 <i>Análise Estatística</i>	112
5.3.1.2 Vigas que Sofreram Pré-carregamento De Longa Duração	113
5.3.1.2.1 <i>Análise Estatística</i>	114
5.3.2 Comparação de f_c das Vigas e dos Corpos-de-prova	114
5.4 DISCUSSÃO	115
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
6.1 CONCLUSÕES	118
6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	119
REFERÊNCIAS	120
ANEXOS	124
ANEXO 1: PRÉ-CARREGAMENTO DE CURTA DURAÇÃO – Flecha Imediata	125
Desconsiderando a Deformação Residual	
ANEXO 2 : PRÉ-CARREGAMENTO DE CURTA DURAÇÃO – Flecha Diferida no	127
Tempo Desconsiderando a Deformação Residual e a Inicial	
ANEXO 3 : PRÉ-CARREGAMENTO DE LONGA DURAÇÃO – Flechas Até os 28	130
Dias de Idade	
ANEXO 4 : PRÉ-CARREGAMENTO DE LONGA DURAÇÃO – Flechas a Partir	137
dos 28 Dias de Idade	

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: crescimento da resistência proposto por CEB - FIP Model Code 1990	24
Figura 02: reversibilidade da retração por secagem	29
Figura 03: reversibilidade da fluência	30
Figura 04: exemplo de construção com pavimentos ligados por escoras e reescoras	36
Figura 05: plano de reescoramento (ABECE)	38
Figura 06: Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial	40
Figura 07: análise seqüencial	41
Figura 08: pórtico plano submetido à ação de peso próprio da estrutura	42
Figura 09: estudo de Grundy e Kabaila (1963) considerando E_c variável e $m=3$	43
Figura 10: estudo feito por França (2005)	44
Figura 11: fatores k em função da idade para o pavimento 3	44
Figura 12: fatores k em função da idade	48
Figura 13: dimensões das vigas e configuração básica da armadura utilizada	54
Figura 14: modelo matemático das vigas ensaiadas	54
Figura 15: diagrama de dosagem	56
Figura 16: ensaio de compressão uniaxial	59
Figura 17: ensaio de tração indireta	60
Figura 18: ensaio de módulo de elasticidade secante	61
Figura 19: crescimento das propriedades mecânicas dos concretos	63
Figura 20: coeficientes de crescimento em função da idade	64
Figura 21: resistência à compressão (ensaio de pré-carregamento de curta duração – CP V-ARI)	65
Figura 22: resistência à compressão (ensaio de pré-carregamento de longa duração – CP V-ARI)	66
Figura 23: resistência à compressão (ensaio de pré-carregamento de longa duração – CP IV-32RS)	66
Figura 24: desenho do aparato de ensaio	69
Figura 25: (a) aparato sem as vigas, (b) detalhe dos pinos de medição sobre a superfície das vigas e pino de suporte do carregamento, (c) detalhe do apoio e do pórtico, (d) vista geral do aparato com o máximo de quatro vigas carregadas	70
Figura 26: (a) vínculo de 1º ordem, (b) vínculo de 2º ordem	70
Figura 27: modo de medição das flechas	71
Figura 28: dimensões das vigas e armadura utilizada	73

Figura 29: (a) armadura, (b) fôrma, (c) fôrma e armadura, (d) fôrma e armadura concluídas, (e) vigas concretadas (f) cura inicial	73
Figura 30: (a) vigas após a desforma, (b) perfil I sobre a prensa, (c) viga V1 antes do carregamento, (d) viga V1 no final do carregamento, (e) pré-carregamento da viga V2, (f) vigas acomodadas após o pré-carregamento	76
Figura 31: viga V1 no instante do esgotamento da capacidade de carga da viga	76
Figura 32: (a) viga V5, (b) viga V2, (c) vigas V5 e V2, (d) vigas V5, V2, V3 e V4	78
Figura 33: estado da viga V4 (96%) antes do carregamento permanente	79
Figura 34: nomenclatura dos pavimentos	81
Figura 35: seqüência construtiva genérica	84
Figura 36: dimensões das vigas e armadura utilizada	85
Figura 37: desenho da fôrma	87
Figura 38: (a) armadura, (b) armadura dentro da fôrma, (c) fôrma e armadura concluídas, (d) formas, armadura e corpos-de-prova no local de moldagem, (e) concretagem concluída, (f) cura inicial das vigas e dos corpos-de-prova	87
Figura 39: (a) viga V4d no aparato de ensaio, (b) viga V4d em processo de desforma, (c) viga V4d quase desformada, (d) viga V4d totalmente desformada, (e) viga V4d com o primeiro carregamento, (f) viga V4d em continuidade do processo de cura, (g) vigas V4d e V7d parcialmente carregadas, (h) vigas V4d e V7d totalmente carregadas, (i) vigas V4d, V7d e V28d totalmente carregadas	92
Figura 40: (a) marcação e numeração dos furos nas vigas, (b) equipamento de extração, (c) vigas furadas, (d) testemunhos, (e) capeamento dos testemunhos, (f) ensaio de ruptura à compressão	94
Figura 41: flechas em função da carga concentrada	95
Figura 42: flechas em função da carga concentrada	96
Figura 43: temperatura, umidade relativa do ar e flechas em função da idade	99
Figura 44: fissuração das vigas após o ensaio de longa duração	100
Figura 45: flecha em função da carga concentrada	102
Figura 46: flecha em função da carga concentrada, desconsiderando a deformação por fluência	103
Figura 47: temperatura, umidade relativa do ar e flechas em função da idade (CP V-ARI)	105
Figura 48: temperatura, umidade relativa do ar e flechas em função da idade (CP IV-32RS)	106
Figura 49: flechas em função da idade das vigas V4d (CP V-ARI e CP IV-32RS)	107
Figura 50: flechas em função da idade das vigas V7d (CP V-ARI e CP IV-32RS)	108
Figura 51: flechas em função da idade das vigas V28d (CP V-ARI e CP IV-32RS)	109
Figura 52: fissuras aparentes das vigas V4d (CP V-ARI e CP IV-32RS)	110
Figura 53: fissuras aparentes das vigas V7d (CP V-ARI e CP IV-32RS)	110

Figura 54: fissuras aparentes das vigas V28d (CP V-ARI e CP IV-32RS)	111
Figura 55: resistência à compressão de corpos-de-prova e testemunhos	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: coeficientes de correção da resistência do concreto ao longo do tempo	24
Tabela 02: propriedades físicas e químicas do CP V-ARI	50
Tabela 03: propriedades físicas e químicas do CP IV-32RS	51
Tabela 04: composição granulométrica e características físicas da areia	52
Tabela 05: composição granulométrica e características físicas da brita	52
Tabela 06: diâmetros, resistência característica de escoamento, classe, categoria e diâmetro dos pinos de dobras do aço	53
Tabela 07: resultados do ajuste da curva de dosagem experimental	55
Tabela 08: resultados dos ensaios em corpos-de-prova	62
Tabela 09: coeficientes de determinação	63
Tabela 10: resultados obtidos no pré-carregamento	75
Tabela 11: cronograma físico para o ciclo de 4 dias	82
Tabela 12: cronograma físico para ciclo de 7 dias	83
Tabela 13: identificação da seqüência construtiva com as idades e os fatores k para os ciclos de execução adotados	85
Tabela 14: cálculo do momento fletor máximo de projeto	90
Tabela 15: cronograma de pré-carregamento de longa duração das vigas	91
Tabela 16: resistência à compressão dos testemunhos	112
Tabela 17: resultados de ruptura dos testemunhos	113
Tabela 18: resistência à compressão dos testemunhos	113
Tabela 19: resultados de ruptura dos testemunhos	114

SIGLAS

ABECE: Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

kN: quilonewton

MPa: megapascal

NBR: Norma Brasileira Registrada

NBR NM: Norma Brasileira Registrada – Norma Mercosul

NORIE: Núcleo Orientado para Inovação da Edificação

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

SINDUSCON: Sindicato da Indústria da Construção Civil

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

Visando se tornar mais atrativa para os agentes financeiros, em especial através de um retorno mais rápido aos investidores, a indústria da construção civil tem utilizado sistemas de execução mais rápidos, entre os quais a redução dos ciclos de execução¹ das estruturas de concreto armado. Assahi (2005) afirma que a execução da estrutura sempre faz parte do caminho crítico na composição do cronograma físico da obra, e que a execução das formas pode consumir aproximadamente 30% do prazo total do empreendimento.

Contudo, a aceleração dos ciclos de execução tem conseqüências sobre a resistência e durabilidade das estruturas de concreto. A remoção ou movimentação prematura do escoramento em peças de concreto faz com que as mesmas sejam solicitadas pelo peso próprio do pavimento correspondente e dos pavimentos superiores que nele estejam escorados. As ações decorrentes deste carregamento vão depender da parcela de carga absorvida pelo pavimento, do grau de fissuração e da rigidez das peças na idade em que ocorre o evento.

Na medida em que os elementos estruturais, submetidos predominantemente à flexão (vigas e lajes), são carregados antes das idades previstas em projeto, pode-se iniciar um processo de maximização das deformações, acarretando no surgimento de manifestações patológicas nos materiais de revestimento e nas alvenarias, se estes já estiverem executados.

Recentes revisões das normas da ABNT têm enfatizado esta problemática, em especial as normas NBR 12655/2006, NBR 6118/2003, NBR14931/2004, dando conta das propriedades do concreto e das ações decorrentes dos processos construtivos, considerando os eventos críticos que ocorrem nas estruturas dos pavimentos em suas respectivas idades e rigidezes. Estas normas enfatizam as conseqüências de um carregamento precoce no comportamento diferido no tempo.

¹ Ciclo de execução é o período de tempo compreendido entre uma concretagem de um pavimento e outro subsequente.

França (2005) destaca a resposta de vigas às deformações, principalmente pela sua resistência no primeiro carregamento, enfatizando a necessidade de assegurar medidas adequadas para obter resistências altas à compressão e à tração e ótimo reescoramento. Nas primeiras idades, a peça estrutural não possui resistência à tração adequada para evitar a fissuração, de maneira que um elemento fissurado poderá ter uma flecha várias vezes maior que um não fissurado.

Um carregamento prematuro em peças fletidas pode não só provocar fissuras no banzo tracionado, mas também microfissuras na zona comprimida. De acordo com Metha e Monteiro (1994), a evolução da microfissuração do concreto passa por vários estágios que dependem do nível da tensão aplicada.

Assim, este trabalho procura demonstrar o comportamento de elementos estruturais fletidos quando submetidos a cargas prematuras por aceleração de ciclos construtivos. Os resultados dão uma idéia ilustrativa da problemática que gira em torno desta questão na construção brasileira.

Outras pesquisas nesta área vêm sendo desenvolvidas no NORIE / UFRGS, dando conta da influência da microfissuração causada por um carregamento precoce no concreto produzido com diferentes tipos de cimento. As pesquisadoras e seus temas específicos são:

- a) Geilma Vieira: influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade) de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento;
- b) Simone Venquiaruto: influência da microfissuração causada por carregamento precoce na durabilidade de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento;
- c) Lucília Bernardino: influência da microfissuração causada por carregamento precoce na retração de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento.

Estas pesquisas estão sendo realizadas em corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, e além de testarem diferentes tipos de cimento, utilizam três relações água/cimento (0,35; 0,5 e 0,7), três idades de pré-carregamento (1, 3 e 7 dias) e três níveis de tensão (25%, 50% e 75% da carga de ruptura na respectiva idade). Aos 28 dias são testados os corpos-de-prova e comparados os resultados dos concretos pré-carregados com aqueles que não foram

submetidos ao carregamento precoce. Os pré-carregamentos são de curta duração, sendo removida a carga e os corpos-de-prova mantidos em câmara úmida até os 28 dias.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral, realizar um estudo experimental de caráter exploratório, buscando avaliar as deformações em vigas de concreto armado, quando submetidas a diferentes carregamentos nas idades iniciais, de modo a verificar as conseqüências do possível dano provocado no concreto em função de um carregamento precoce. Aos 28 dias, as vigas recebem um carregamento permanente.

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar as flechas em vigas de concreto armado quando submetidas a dois tipos de pré-carregamento, um de curta duração², aplicado aos três dias de idade e outro de longa duração³, aplicado em níveis e idades de acordo com os ciclos de execução, utilizando concreto produzido com dois tipos de cimento;
- b) Avaliar a fissuração das vigas até o instante da aplicação do carregamento permanente aos 28 dias;
- c) Avaliar a resistência à compressão uniaxial de testemunhos extraídos das vigas após a conclusão dos ensaios de fluência;

² O pré-carregamento de curta duração pressupõe a aplicação de um carregamento nas primeiras idades do concreto e a manutenção deste por um tempo reduzido, sendo removido e posteriormente aplicado um carregamento permanente aos 28 dias de idade.

³ O pré-carregamento de longa duração está associado a um carregamento incremental a partir das primeiras idades do concreto, em níveis e idades de acordo com os ciclos de execução, para posterior aplicação de um carregamento permanente aos 28 dias de idade.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa foi estruturada em seis capítulos, conforme segue:

No primeiro capítulo apresenta-se um contexto do problema de pesquisa destacando-se a problemática dos ciclos de execução adotados nas obras correntes, e suas conseqüências no comportamento das estruturas de concreto armado. Além disso, relacionam-se os objetivos, estrutura e limitações da pesquisa.

No segundo capítulo discute-se o comportamento do concreto ao longo do tempo, na medida em sua resistência é afetada quando há níveis de tensão aplicados com o processo de endurecimento em curso. É abordado também o fenômeno das deformações às quais uma estrutura é submetida quando expostas ao ambiente e às cargas.

O terceiro capítulo apresenta uma visão do efeito da técnica construtiva no comportamento do concreto, enfatizando o uso dos sistemas de formas e escoramento, as formas de aplicação do carregamento precoce, as ações construtivas num processo de execução corrente e os ciclos de execução.

No quarto capítulo expõe-se o programa experimental, materiais e métodos relativos à pesquisa. Neste capítulo relacionam-se a geometria e modelo matemático das vigas, o aparato de ensaio criado, os dois tipos de pré-carregamento adotados, e a extração de testemunhos como ensaio complementar.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados e a discussão dos ensaios, fazendo as constatações pertinentes e comparando com o que preconiza a literatura. Além dos resultados e discussões dos dois tipos de ensaios propostos, é feita também uma verificação dos resultados obtidos da extração de testemunhos das vigas ensaiadas.

No sexto capítulo abordam-se as conclusões relacionadas aos objetivos da pesquisa, finalizando-se com sugestões para futuros trabalhos nesta área de conhecimento.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No decorrer desta pesquisa, foram observadas as seguintes limitações:

- a) os ensaios das vigas foram realizados com apenas um corpo-de-prova para cada fator controlável, inviabilizando conclusões estatisticamente embasadas;
- b) os ensaios de longa duração tiveram seu prazo máximo fixado em 115 dias, em função das limitações de tempo para uma pesquisa em nível de mestrado;
- c) as vigas que foram ensaiadas tiveram seção transversal e vão em escala real, porém não representativas de uma estrutura corrente, em decorrência de limitações de espaço físico e de operação logística;
- d) no ambiente de ensaio das vigas, apesar de ser uma sala isolada, ocorreram variações climáticas, no entanto, as conclusões não ficam comprometidas, na medida em que os valores absolutos resultantes serão objeto de comparação com testemunhos executados as mesmas condições.

2 COMPORTAMENTO DO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO

O comportamento das estruturas de concreto armado é influenciado por vários fatores que afetam o seu desempenho ao longo do tempo, seja durante o período de crescimento das propriedades mecânicas, seja durante as etapas construtivas, ou mesmo ao longo de sua vida útil. O concreto armado é um material composto obtido pela utilização de armaduras em uma matriz de concreto, formando um conjunto capaz de receber e transmitir esforços oriundos do seu próprio peso, dos materiais componentes da edificação e das cargas de utilização. Neste contexto, faz-se necessário um entendimento do processo construtivo como um todo, na medida em que os acontecimentos se sobrepõem; o endurecimento do concreto e o surgimento dos esforços. O tempo necessário para crescimento das propriedades mecânicas varia de acordo com os materiais utilizados, especialmente o tipo de cimento, podendo obter ganho de resistência até em idades avançadas. Mesmo para cimentos de cura rápida, as etapas construtivas ocorrem durante o endurecimento do concreto, desta forma os materiais são submetidos a níveis de tensão que variam de acordo com as práticas de execução adotadas. Não obstante, o próprio concreto, sob tensão permanente, sofre modificações em sua estrutura interna, dentre as quais podemos citar a resistência à compressão, a microfissuração interna e as deformações por fluência e por retração.

2.1 RESISTÊNCIA DO CONCRETO

A resistência do concreto sob tensão de compressão ou tração permanente ao longo do tempo, é influenciada por dois fenômenos antagônicos:

- a) o endurecimento progressivo devido a fenômenos físico-químicos relacionados ao processo de hidratação da matriz cimentícia, que promove o aumento de suas propriedades mecânicas (f_c – resistência à compressão, f_{ct} – resistência à tração e E_c – módulo de elasticidade);
- b) a propagação interna de microfissuras, sob o efeito das tensões permanentes, reduz a sua resistência.

A NBR 6118/2003 apresenta valores orientativos para estimar resistência do concreto com idades superiores à 28 dias e neste cenário, os tipos de cimento são agrupados por

semelhanças de ganho de resistência mecânica devido a velocidade que ocorre o processo de hidratação da matriz cimentícia. Sem a atribuir valores numéricos, pode-se agrupá-los como cimentos de cura rápida, normal e lenta conforme segue:

- a) CP V-ARI (alta resistência inicial): cimento de cura rápida;
- b) CP I (comum) e CP II (composto): cimentos de cura normal;
- c) CP III (alto forno) e CP IV (pozolânico): cimentos de cura lenta.

Na medida em que o ganho de resistência é mais rápido, menor será o crescimento em idades avançadas.

As contribuições de Cunha e Angelo (2003), dando conta da previsibilidade da resistência do concreto com o tempo, indicam que os ganhos de resistência do concreto podem ser eliminados, diante das influências deletérias dos carregamentos permanentes, principalmente em casos em que não haja mais uma expectativa de ganho com os fenômenos físico-químicos nas idades mais avançadas.

Este fenômeno, que reduz a resistência potencial do concreto em consequência do carregamento permanente, foi colocado em evidência por Rüsç (1960) na década de 50. Outros pesquisadores como Fouré e Bronsart (1990) estudaram este fenômeno em diversos trabalhos realizados nos anos 70 e 80.

O fenômeno observado por Rüsç (1960) pode ser melhor entendido, se aplicada uma tensão num corpo-de-prova de concreto em uma determinada idade, inferior a tensão de ruptura nesta mesma idade, e mantida aplicada por um determinado tempo. O corpo-de-prova poderá virtualmente entrar em ruptura após um período de tempo.

Desta forma, Cunha e Angelo (2003) concluem que a perda relativa da resistência será maior quanto menor for a expectativa de aumento da resistência do concreto, a partir da data do carregamento com tensão permanente.

Este fenômeno deve ser objeto de fator de correção para utilização em projeto, tendo em vista a necessidade de considerar essas perdas.

A NBR 6118/2003 adota o coeficiente 0,85 para corrigir a resistência do concreto ao longo do tempo, como sendo o produto do coeficiente de crescimento do f_{ck} após t_0 até $t_{infinito}$ (1,2) pelo coeficiente de decréscimo de f_{ck} devido às cargas de longa duração, aplicadas na idade t_0 até $t_{infinito}$ (0,71), sendo t_0 a idade de aplicação da carga de longa duração, $t_{infinito}$ correspondente a 100 anos e a carga de longa duração como sendo a carga permanente mais parte da carga acidental.

Já o CEB - FIP Model Code 1990 propõe um coeficiente de 0,73 para os efeitos de decréscimos de resistência devido às cargas de longa duração, porém sugere valores distintos para o coeficiente de crescimento, para cada tipo de cimento, ambos pressupondo uma idade $t_{infinito}$ correspondente a 100 anos. Os valores aparecem na figura 01.

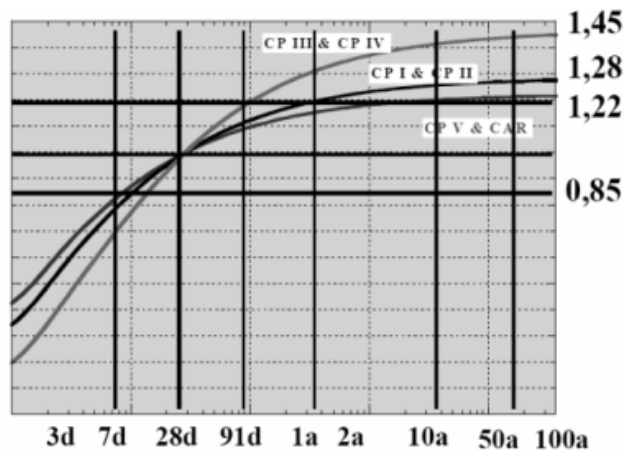


Figura 01: crescimento da resistência proposto por CEB - FIP Model Code 1990

Helene (2007) compara os coeficientes de correção da resistência do concreto ao longo do tempo, propostos por Rüsçh (1960), CEB - FIP Model Code 1990 e NBR 6118/2003, para idade $t_{infinito}$ de 100 anos. Os valores podem ser visualizados na tabela 01.

Tabela 01: coeficientes de correção da resistência do concreto ao longo do tempo

		Coeficiente de correção da resistência do concreto para $t_{infinito}=100$ anos		
		Cresce	Decresce	Resulta
Rüsçh (1960)		1,30	0,75	0,98
CEB 1990	CP V-ARI	1,22	0,73	0,88
	CP I e CP II	1,28	0,73	0,92
	CP III e CP IV	1,45	0,73	1,05
NBR 6118/2003		1,20	0,71	0,85

O coeficiente proposto por Rüsç (1960) e pela NBR 6118/2003, não leva em consideração o tipo de cimento utilizado no concreto. Os valores propostos pelo CEB - FIP Model Code 1990 parecem estar relacionados a um modelo de comportamento mais apurado.

2.2 DEFORMAÇÕES

Quando os elementos estruturais, submetidos predominantemente à flexão (vigas e lajes), são solicitados pela ação de algum carregamento ou pela retirada ou movimentação da estrutura provisória que os apóia, dá-se início um processo de deformação que acompanha a vida útil da estrutura por um longo período de tempo. Em geral, as estruturas recebem o carregamento para o qual foram projetadas, de maneira gradual, inclusive ocorrendo períodos de redução das cargas, em decorrência dos processos executivos ou mesmo da sua utilização pós-ocupação. Neste contexto, fez-se necessário um entendimento dos fenômenos físico-químicos que promovem o aumento, a redução e a reversibilidade das deformações.

Neville (1997) classifica três tipos principais de deformações ao longo do tempo: deformação imediata ou elástica instantânea, deformação elástica retardada e deformação por fluência ou lenta. A deformação imediata ou elástica instantânea ocorre simultaneamente à aplicação do carregamento, sendo considerado que existe uma total reversibilidade se o ciclo de carga e descarga ocorrer num curto intervalo de tempo. A deformação elástica retardada ou deformação parcial ocorrerá em decorrência do aumento no tempo do ciclo de carga e descarga que provoca uma reversibilidade parcial da deformação. Já a deformação por fluência ou lenta se desenvolve vagarosamente com o tempo com a manutenção do carregamento. Neste contexto, é difícil distinguir a deformação elástica retardada e a deformação por fluência, ou mesmo definir o tempo a partir do qual, cessa a deformação imediata e inicia a deformação lenta.

A NBR 6118/2003 descreve que quando não há impedimento à livre deformação do concreto, e a ele é aplicada, no tempo t_0 , uma tensão constante no intervalo $t-t_0$, sua deformação total no tempo t , será a soma da deformação imediata, da deformação por retração e da deformação por fluência ou lenta. Segundo Gravina (1956), em condições desfavoráveis, a deformação total pode ser de 4 a 5 vezes maior que a deformação imediata.

Tanto a deformação por retração como a deformação por fluência ou lenta dependem de fatores temporais, por este motivo serão aqui tratados como deformações diferidas no tempo.

2.2.1 Deformação Imediata

A deformação imediata ocorre no instante em que o carregamento é aplicado, e é totalmente dependente da intensidade da tensão aplicada. Até certos limites de tensão, esta deformação se dá em regime elástico, proveniente de uma relação entre tensão e deformação de acordo com a Lei de Hooke. No entanto, como o concreto não é um material elástico até a ruptura, suas deformações não são uniformes ao longo do elemento estrutural, sendo válida a Lei de Hooke apenas para tensões baixas. Nos estados limites de serviço⁴, os elementos estruturais submetidos predominantemente à flexão, atuam parcialmente no estágio I (seção de concreto sem fissuras) e parcialmente no estágio II (seção de concreto fissurada). A mudança de estágio é definida quando se atinge um momento de fissuração, a partir do qual, a seção irá fissurar.

O Estádio I se caracteriza pelos carregamentos iniciais, sendo válida a Lei de Hooke. No Estádio II, as tensões de tração foram superadas pela resistência a tração do concreto, acarretando no surgimento de fissuras no banzo tracionado, fazendo com que essas tensões sejam absorvidas exclusivamente pela armadura.

De acordo com Pfeil (1989), no processo analítico para determinação de deformações imediatas, podem ser consideradas três situações para as seções das vigas ao longo do seu comprimento: seção não fissurada (Estádio I), seção entre fissuras e seção fissurada (Estádio II), sendo a última, a situação de deformações unitárias mais elevadas.

Ao longo do tempo, a parcela da deformação total, correspondente à deformação imediata, apresenta uma redução progressiva em função do aumento das propriedades mecânicas do concreto, em especial do módulo de elasticidade. Neste cenário, o tipo de cimento utilizado no concreto é de grande importância, na medida em que essa redução será maior com o tempo, quanto maior for o período de ganho de resistência apresentado após o carregamento. O

⁴ Estados limites de serviço estão relacionados à boa utilização, ao conforto dos usuários, à aparência e à durabilidade das estruturas.

cimento CP V-ARI, por exemplo, após os 28 dias, tem um ganho de resistência muito pequeno, logo se o carregamento for aplicado próximo desta idade, a redução progressiva da deformação imediata com o tempo será muito pequena. Já com o cimento CP IV, o ganho de resistência após os 28 dias é bem maior, e nas mesmas condições do CP V-ARI, a redução progressiva será maior.

2.2.2 Deformação Diferida no Tempo

Ao longo do tempo, as estruturas de concreto em geral estão sujeitas ao equilíbrio com o meio onde se encontram e às cargas permanentes. Segundo Hasparyk et al. (2005) as condições de secagem ambiental e os carregamentos constantes podem refletir em variações dimensionais que estão diretamente e principalmente ligadas à remoção da água adsorvida da pasta de cimento, aquela fisicamente aderida no produto de hidratação conhecido como C-S-H (silicato de cálcio hidratado). No primeiro caso, se a umidade do ambiente está abaixo da saturação, o concreto ficará sujeito à deformação denominada retração por secagem. Já no segundo caso de carregamento mantido constante no tempo, ocorre a perda da água fisicamente adsorvida, refletindo na maior parte da deformação conhecida como fluência (METHA e MONTEIRO, 1994).

Para Holt (2001) as mudanças de volume do concreto resultante de fatores ambientais e estruturais é um fenômeno aceitável, sendo que na maioria dos casos esta mudança de volume é assumida no início do carregamento ou da secagem, apesar de iniciar imediatamente após a água e o cimento entrarem em contato durante a mistura do concreto. Nas primeiras horas, essas mudanças de volume são ignoradas nos projetos de estruturas de concreto, desde que sua magnitude seja muito menor que a retração por secagem.

2.2.2.1 Deformação por Retração

A retração é um fenômeno relacionado ao concreto sem que haja qualquer tipo de carregamento. De forma geral, a principal causa da retração está associada à perda de água da pasta de cimento. Para Aitcin (2000) as deformações por retração são oriundas da ação

combinada da retração plástica, retração autógena, retração térmica, retração por carbonatação e retração por secagem ou hidráulica. Esta última consiste no principal fenômeno que será discutido neste trabalho, ficando as demais restritas a um comentário sucinto.

A retração plástica ocorre com o concreto no estado fresco antes do fim de pega e as demais ocorrem no estado endurecido. A retração autógena está relacionada à retração química que ocorre com a hidratação do cimento Portland, sendo desenvolvida nas primeiras 24 horas e de grandeza desprezível se comparada com a retração por secagem, para concretos convencionais. A retração térmica ocorre durante a hidratação do cimento Portland, dando origem a tensões que tracionam o concreto na sua fase de resfriamento. A retração por carbonatação é provocada pela reação do CO₂ com os produtos hidratados.

2.2.2.1.1 Retração por Secagem ou Retração Hidráulica

Cánovas (1988) define a retração por secagem como sendo um fenômeno natural que ocorre em decorrência da hidratação dos compostos anidros dos cimentos Portland e que é tanto mais acentuada quanto maior é a perda de água que estes sofrem como consequência de um ambiente mais ou menos seco.

Estudos feitos por Trouxell et al. apud Neville (1997), num período de 20 anos, constatou que somente 20 a 25% da retração por secagem aconteceu em duas semanas, 50 a 60% em três meses e 75% a 80% em um ano.

Segundo Metha e Monteiro (1994), as adições como pozolanas e escória tendem a aumentar o volume de poros finos no produto de hidratação do cimento. Como a retração está relacionada à água contida em pequenos poros, estas adições aumentam a retração por secagem.

A espessura dos elementos estruturais afeta a retração hidráulica, na medida em que diminuindo o caminho a ser percorrido pela água até a superfície, maior será a facilidade de migração da água, aumentando a retração. L'Hermite (1918) apud Neville (1997) observou que a secagem atinge 75 mm de profundidade em um mês, no entanto atinge 600 mm somente após dez anos.

2.2.2.1.2 Reversibilidade da Retração por Secagem

A retração pós-secagem apresenta um determinado grau de reversibilidade citado por Metha e Monteiro (1994) diante de condições de secagem e molhagem. Foi classificada como retração reversível, a parte da retração total reproduzível em ciclos de molhagem-secagem, e irreversível a parte da retração total na primeira secagem que não pode ser reproduzida em ciclos subsequentes de molhagem-secagem. Na figura 02 este fenômeno pode ser visualizado.

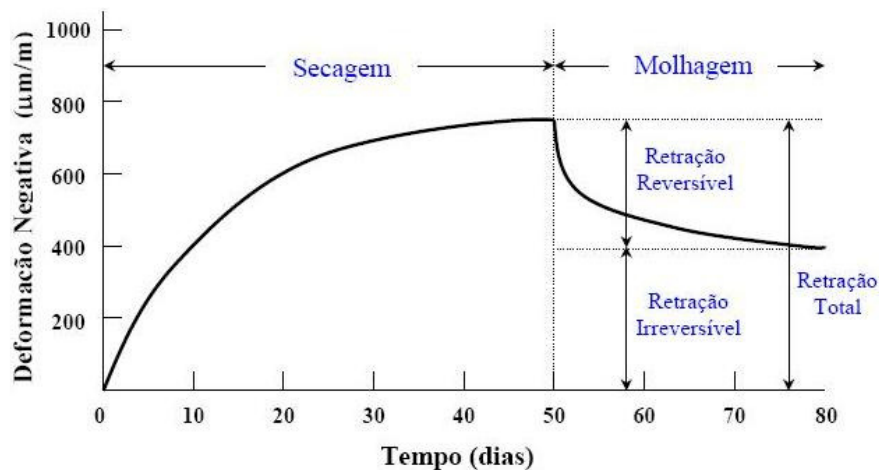


Figura 02: reversibilidade da retração por secagem (METHA e MONTEIRO, 1994)

2.2.2.2 Deformação por Fluência ou Deformação Lenta

A fluência é o fenômeno de deformação sob cargas de longa duração.

A fluência, de acordo com Rüsç (1981), tende a aumentar assintoticamente para um valor final, alcançado na prática após dois ou três anos. Neville (1997) relata que mesmo um concreto com 50 anos pode sofrer deformação por fluência. L'Hermite (1969) indica que depois de 6 anos a velocidade de deformação é muito baixa, que atualmente é impossível dizer se tenderá para um limite, e que certos ensaios apontam para 20 anos, porém com importância mais teórica do que prática.

A fluência total consiste da soma de duas parcelas, a fluência básica e a fluência por secagem. A fluência básica ocorre por deformação no concreto, em condições de elevada umidade (100%), sob carregamento constante, sem perda de umidade para o ambiente. A fluência por

secagem ocorre por perda de umidade para o ambiente mantendo-se o carregamento constante (AMARAL FILHO, 1978; METHA MONTEIRO, 1994).

Segundo Metha e Monteiro (1994), a fluência por secagem no concreto pode ser atribuída em parte à microestrutura da pasta, mas também pode ter a contribuição da deformação retardada do agregado. Desta forma, a microfissuração que surge na zona de transição gerada a partir de elevadas tensões (maiores de 40 a 60% da carga de ruptura) em combinação com a secagem do concreto, também pode ocasionar um incremento nas deformações por fluência.

É difícil distinguir claramente as parcelas referentes à deformação imediata e a deformação por fluência, tendo em vista a improvável aplicação integral de um carregamento num curto espaço de tempo. Desta forma, a prática de execução das edificações pressupõe um carregamento gradual das estruturas, fazendo com que esses dois fenômenos se confundam.

2.2.2.2.1 Reversibilidade da Fluência

Para Metha e Monteiro (1994) o comportamento típico do concreto no carregamento e descarregamento é muito semelhante ao comportamento na molhagem e na secagem. Ambos apresentam um grau de irreversibilidade que possui importância prática. A curva de fluência para um concreto submetido à compressão uniaxial constante por 90 dias e descarregado a seguir, pode ser visualizado na figura 03.

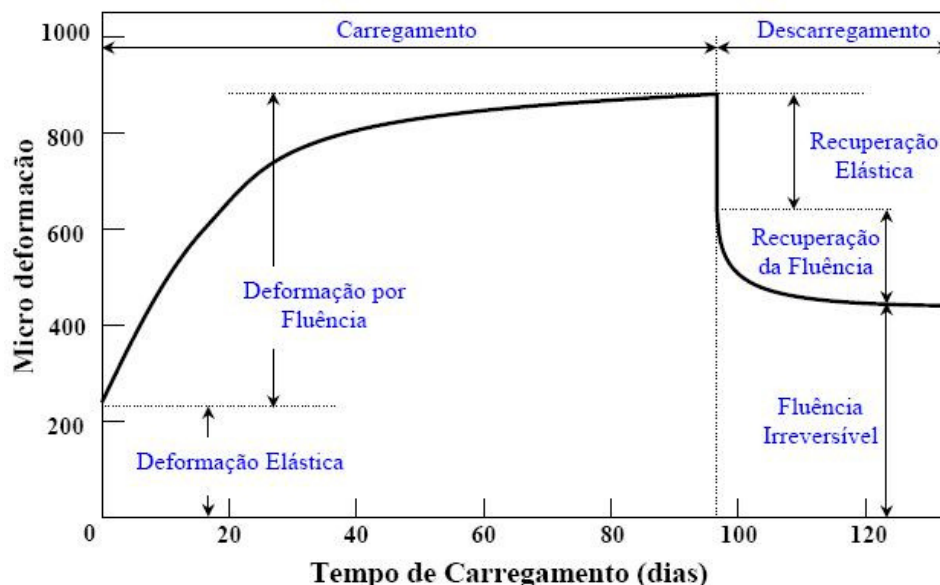


Figura 03: reversibilidade da fluência (METHA e MONTEIRO, 1994)

Quando o concreto é descarregado, a recuperação instantânea ou elástica depende da idade de carga e descarga, e da velocidade das reações químicas da matriz cimentícia. A recuperação elástica é seguida por uma redução gradual chamada recuperação da fluência. Mesmo com a recuperação da fluência ocorrendo rapidamente, a reversão não é total, desta forma temos a fluência irreversível.

De acordo com Süsskind (1987), se o carregamento for restabelecido aos 140 dias, por exemplo, haveria outra deformação elástica, menor que a primeira, já que o módulo de elasticidade aumentou em função da maior idade, seguindo uma tendência de aumento por fluência. A deformação final que teríamos se não houvesse o descarregamento, é ligeiramente maior que a deformação final com o descarregamento, já que houve um hipotético período de 50 dias sem incremento de deformações por fluência.

2.2.2.2.2 Fatores que Influenciam a Fluência

Vários fatores influenciam a fluência no concreto e muitas vezes ocorrem simultaneamente, sendo divididos em:

- a) características dos materiais (teor da pasta de cimento, relação água/cimento, proporção entre os materiais na dosagem, tipo de cimento, tipo de agregado e grau de compactação);
- b) níveis de resistência e tensão aplicada;
- c) fatores temporais;
- d) condições ambientais;
- e) dimensão e geometria da peça.

Neste trabalho, discute-se sucintamente apenas os fatores que afetam o estudo experimental, objeto desta pesquisa. Não são comentados fatores como teor da pasta de cimento, relação água/cimento, proporção entre materiais na dosagem, tipo de agregado, grau de compactação, dimensões e geometria da peça. Estes fatores foram mantidos constantes em todos os experimentos deste estudo, não afetando a análise comparativa.

De acordo com Neville (1970; 1977) o tipo de cimento afeta o valor da fluência indiretamente, por afetar a resistência do concreto quando carregado. Cimentos de maior finura podem aumentar a fluência nas primeiras idades em função do ganho de resistência mais rápido, porém em idades avançadas a fluência passa a ser menor. Neville (1970) indica ainda a influência da composição do cimento. No contexto desta pesquisa, para uma determinada idade, o cimento CP V-ARI apresentaria menor fluência que o CP IV, no entanto outros autores como Brooks (1994), destacam a falta estudos para corroborar essa afirmação.

Para Metha e Monteiro (1994); Neville (1997); Brooks (1994), a resistência do concreto afeta de forma considerável a fluência. Para o mesmo concreto, a fluência será diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente à resistência na idade do carregamento. De acordo com Neville (1970; 1997), os estudos feitos por Washa e Fluck (1950) mostraram que com o crescimento da relação tensão-resistência a fluência aumenta linearmente, crescendo também com o aumento do tempo sob carregamento. Neste contexto, o cimento CP IV possui relação tensão-resistência reduzida ao longo do tempo, já que apresenta ganho de resistência durante o carregamento, com tensão constante, promovendo menor fluência. A pesquisa realizada parece indicar que a influência do tipo de cimento necessita estudos mais claros e conclusivos.

A idade de aplicação do carregamento permanente pode afetar o valor da fluência. Conforme Furnas (1997), a fluência no concreto jovem pode atingir o dobro do valor encontrado, se comparado com o concreto carregado em idades mais avançadas. Pode-se então concluir que quanto mais cedo o concreto for solicitado, maior será a fluência total em decorrência de sua menor maturidade, logo este fenômeno também é influenciado pelo tipo de cimento utilizado no concreto.

Por último, comenta-se a influência das condições ambientais. De acordo com Brooks (1994), a umidade do ar é um dos principais fatores externos que influenciam a fluência. Por definição, a fluência total é o somatório da fluência básica e a fluência por secagem, sendo afetada pela umidade do ambiente, porém de forma indireta. Para Metha e Monteiro (1994), quanto menor a umidade do ar, mais favorável será o processo de secagem do concreto, refletindo maior fluência. No entanto, Brooks (1994) destaca que quando o concreto atinge o equilíbrio higroscópico antes da aplicação da carga, a umidade pode ter influência mínima ou nenhuma na fluência. A temperatura do ambiente também tem alguma influência, na medida

em que, quanto maior for a temperatura durante o carregamento, maiores serão as deformações por fluência. Em geral, no sul do país, estas condições ambientais ocorrem com alguma simultaneidade, alta temperatura e baixa umidade relativa do ar.

3 EFEITO DA TÉCNICA CONSTRUTIVA NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO

O estudo dos ciclos de execução das estruturas de concreto armado passa por uma análise do efeito da técnica construtiva no comportamento do concreto ao longo do tempo. A utilização racional de sistemas de fôrmas e a escolha de modelos de gestão, capazes de promover uma maior rapidez de execução, trazem consigo conseqüências a curto e longo prazo que devem ser levados em consideração pelos gestores e projetistas através de critérios técnicos de segurança e eficiência.

Neste cenário, cabe uma discussão a respeito dos sistemas de fôrmas utilizados neste processo de aceleração dos ciclos de execução e as conseqüências de um eventual ou até provável carregamento precoce, decorrente da técnica construtiva. As ações que ocorrem nas estruturas por conseqüência das etapas executivas também devem ser analisadas e por fim, alguns resultados numéricos decorrentes da análise numérica de distribuição destas ações de construção.

3.1 FÔRMAS

O uso de fôrmas no Brasil, ainda que utilizada racionalmente para moldagem das estruturas de concreto armado, é um serviço que geralmente é executado por profissionais que se utilizam mais de conhecimentos empíricos do que propriamente de conhecimento técnico. No final da década de 80, algumas empresas no Brasil demonstraram preocupação com a utilização das fôrmas, publicando normas internas para aperfeiçoar seus processos, objetivando criar uma estrutura básica para projetar, produzir e montar as fôrmas. Esta preocupação é fruto mais da necessidade de racionalizar processos e custos do que propriamente de garantir uma adequabilidade da técnica construtiva com a aplicação de esforços nas estruturas respeitando as ações previstas em projeto.

A madeira ainda consiste no material mais utilizado no Brasil para produção de fôrmas. Para Moliterno (1989) a construção brasileira, no que tange à execução de fôrmas de madeira, já saiu do estágio quase artesanal, caminhando cada vez mais para a industrialização e especialização, em decorrência da necessidade imperativa de reduzir custos e prazos, mesmo

se tratando de fôrmas convencionais. Vilaverde (1998) afirma que, de modo geral, as fôrmas ainda são entendidas como um item auxiliar para moldar o concreto armado, tendo como função básica suportar o concreto no estado fresco até seu auto-suporte. Assahi (2005) destaca outras funções importantes, como a proteção contra impactos nas primeiras horas, variações de temperatura e perda de água.

O significado de estrutura provisória dá ao sistema de fôrmas como um todo um caráter secundário, o que consiste numa omissão dos construtores, dos projetistas e dos educadores.

Ratay (2004) destaca as falhas e acidentes que ocorrem pela falta de cuidado com as estruturas provisórias de construção, inclusive da necessidade de desenvolver projetos específicos com esta finalidade, já que requererem a consideração de práticas de execução, como cronograma físico, movimentação de equipamentos, seqüência construtiva, dentre outros.

Para Assahi (2005) o desempenho do sistema de fôrma⁵ exerce forte influência na qualidade e no custo do empreendimento, e recomenda que o projeto de produção de fôrmas contemple o cimbramento e o reescoramento além das informações operacionais e detalhes de montagem, de desforma, de retirada do escoramento e demais peças do cimbramento.

A NBR 14931/2004 recomenda que o escoramento deva ser projetado de modo que não ocorram nem deformações prejudiciais ao formato da estrutura, nem esforços não previstos no concreto. Essas deformações e esforços ocorrem pela ação das cargas acidentais de execução e do peso próprio da estrutura permanente e provisória.

3.2 CARREGAMENTO PRECOCE

A movimentação ou retirada do escoramento ou reescoramento dos sistemas de fôrmas, acarreta na aplicação de algum nível de carregamento na estrutura de concreto. Este processo, quando precoce, pode se tornar problemático e até levar a ocorrência de manifestações

⁵ Segundo Assahi (2005), pode-se chamar de sistema de fôrma o conjunto completo dos elementos que o compõe, incluindo a fôrma, os elementos de cimbramento, o reescoramento, os acessórios de travamento, costuras, transporte e manutenção. Dentre os elementos de cimbramento, encontra-se o escoramento.

patológicas, pois o concreto é solicitado sem ter atingido resistência suficiente para resistir aos níveis de tensão decorrentes da movimentação do sistema de fôrmas.

Resultados preliminares das pesquisas realizadas no NORIE / UFRGS constataram que o pré-carregamento aplicado nas idades iniciais promove algum ganho nas propriedades mecânicas do concreto em corpos-de-prova cilíndricos, podendo estar associado a fenômenos químicos e microestruturais. No entanto, o pré-carregamento aumenta a ação de agentes agressivos no concreto, reduzindo sua durabilidade.

A aceleração dos ciclos de execução das estruturas de concreto armado implica na movimentação ou retirada prematura das escoras ou reescoras e na ligação de vários pavimentos por meio destes elementos, como pode ser visualizado na figura 04. Estas práticas requerem cuidados especiais, especialmente em nível de projeto, que ainda não fazem parte do escopo da maioria dos projetistas, expondo as estruturas a conseqüências ainda não totalmente estudadas de maneira conclusiva.



Figura 04: exemplo de construção com pavimentos ligados por escoras e reescoras

A NBR 6118/2003 afirma que a deformação real da estrutura depende também do processo executivo, bem como das propriedades dos materiais no instante de sua efetiva solicitação.

Discussões promovidas pelo SINDUSCON do estado de São Paulo de 1999 a 2005, através de ciclos de debate coordenados pelo professor Dr. Ricardo Leopoldo e Silva França, apontam para problemas de desempenho, danos nas vedações, deformações excessivas e fatores críticos na execução das estruturas de concreto armado, sob a ótica dos atuais métodos

utilizados para determinação dos cronogramas físicos de execução. Problemas desta natureza tem sido alvo de recentes revisões das normas técnicas da ABNT pertinentes ao assunto, fruto de novos conceitos incorporados aos processos de execução.

A NBR 12655/2005 recomenda que o responsável pelo projeto estrutural deve especificar o f_{cj} (resistência à compressão do concreto aos j dias de idade) e o módulo de deformação mínimo para cada etapa construtiva, como a retirada do cimbramento. Já a NBR 6118/2003 define que o projeto estrutural deva fornecer as informações necessárias para a execução da estrutura, inclusive a necessidade de considerar todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura. Esta norma ainda descreve as ações variáveis durante a construção, sempre que a verificação da obra pronta não satisfizer as fases construtivas, considerando a parte da estrutura já executada e as estruturas provisórias auxiliares com os respectivos pesos próprios e cargas acidentais de execução.

De acordo com a NBR 14931/2004, a retirada das formas e do escoramento só pode ser realizada quando o concreto apresentar resistência suficiente para resistir às ações que atuam na estrutura. A probabilidade de grande deformação diferida no tempo é enfatizada, para situações em que o concreto é solicitado com pouca idade, tendo em vista o baixo valor do módulo de elasticidade do concreto, podendo promover deformações inaceitáveis.

Ratay (2004) lembra que o projetista da estrutura permanente não tem responsabilidade pela estrutura provisória, já que ele não tem controle dos métodos, da seqüência, dos procedimentos e da adequação de segurança do trabalho de construção. O mesmo autor destaca ainda a necessidade de existir um profissional capaz de planejar e adequar todos os requisitos de execução ao projeto da estrutura permanente, devendo inclusive participar da concepção inicial e prever as ações de construção decorrentes das técnicas e dos procedimentos que serão adotados. No Brasil, a ABNT atribui ao projetista da estrutura permanente a responsabilidade pela estrutura provisória.

Para Hervé Neto (2007), o escopo resultante dessas exigências demonstra a necessidade de que o projeto da estrutura permanente tenha um caráter nitidamente executivo, envolvendo a aprovação do sistema de movimentação do escoramento, respeitando as propriedades mecânicas do concreto, obrigatoriamente fornecida pelo projetista, para as idades em que ocorrerá essa movimentação, em atendimento ao cronograma executivo.

Com o objetivo de evitar maiores danos à estrutura pela movimentação desordenada do escoramento, a ABECE sugere aos projetistas um procedimento genérico, através de um plano de reescoramento. Este procedimento pode provocar inversão de esforços nos pavimentos com escoramento inferior a 100%. O desenho deste plano pode ser visualizado na figura 05.

TEMPO DECORRIDO APÓS A CONCRETAGEM (DIAS):						% DE REESCORAMENTO A SER MANTIDO
0						
7						>= 100%
14						>= 100%
21						>= X%
28						>= Y%
						SEM REESCORAMENTO

Figura 05: plano de reescoramento (ABECE)

Para Freitas (2004), toda estrutura deve satisfazer às exigências de segurança e deformação adequadas aos limites normativos em qualquer idade, inclusive durante a construção. Assim, é imprescindível que o processo construtivo das estruturas de concreto seja estudado com a mesma atenção dada ao projeto estrutural, garantindo que as condições últimas e de serviço sejam admissíveis.

Mosallam e Chen (1992) mostram a importância de o projetista estrutural ter conhecimento das práticas de obra para ter condições de prever as ações de construção. Da mesma forma, o engenheiro de obra não pode ignorar os critérios adotados em projeto para garantir a segurança da construção.

Prado e Corrêa (2002) afirmam ainda que as ações que atuam nos pavimentos durante a construção podem ultrapassar as ações em serviço consideradas do projeto. Além disso, as ações de construção normalmente solicitam o concreto antes que o mesmo tenha atingido as características de resistência e deformabilidade previstas aos 28 dias. Para Prado et al. (1998), mesmo que não ocorra um comprometimento imediato, esta combinação prematura produz

efeitos como fissuração e perda de rigidez que influenciarão as deformações ao longo do tempo.

França (2003) destaca que a resposta de vigas a deformações é principalmente determinada pela sua resistência no primeiro carregamento e não tanto pela sua resistência final. Se o cronograma de execução prever um carregamento prematuro, devem-se adotar procedimentos adequados para obter resistências altas à compressão e tração, incluindo um ótimo reescoramento quando do primeiro carregamento. O autor também cita que nesta fase de construção, embora a peça estrutural possa ter resistência para suportar o carregamento, ela não possui uma adequada resistência à tração para não fissurar, desta forma, um elemento fissurado poderá ter deformações várias vezes maior que um não fissurado. O carregamento precoce também aumenta a fluência, aumentando consideravelmente as deformações diferidas no tempo.

Toda e qualquer ação no sentido de provocar solicitações nas peças estruturais, decorrentes ou não da movimentação de escoras ou reescoras, podem trazer conseqüências à microestrutura do concreto. Segundo METHA e MONTEIRO (1994), a evolução da microfissuração interna do concreto passa por vários estágios, que dependem do nível da tensão aplicada. A Figura 06 mostra uma representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.

A figura ilustra a evolução da microfissuração do concreto na zona de transição, na medida em que a tensão aplicada se aproxima da tensão de ruptura.

O nível da tensão aplicada na estrutura pela movimentação do escoramento, é de difícil análise, no entanto, uma avaliação aproximada das ações decorrentes dos processos executivos, para os eventos mais críticos ao concreto, é discutida a seguir.

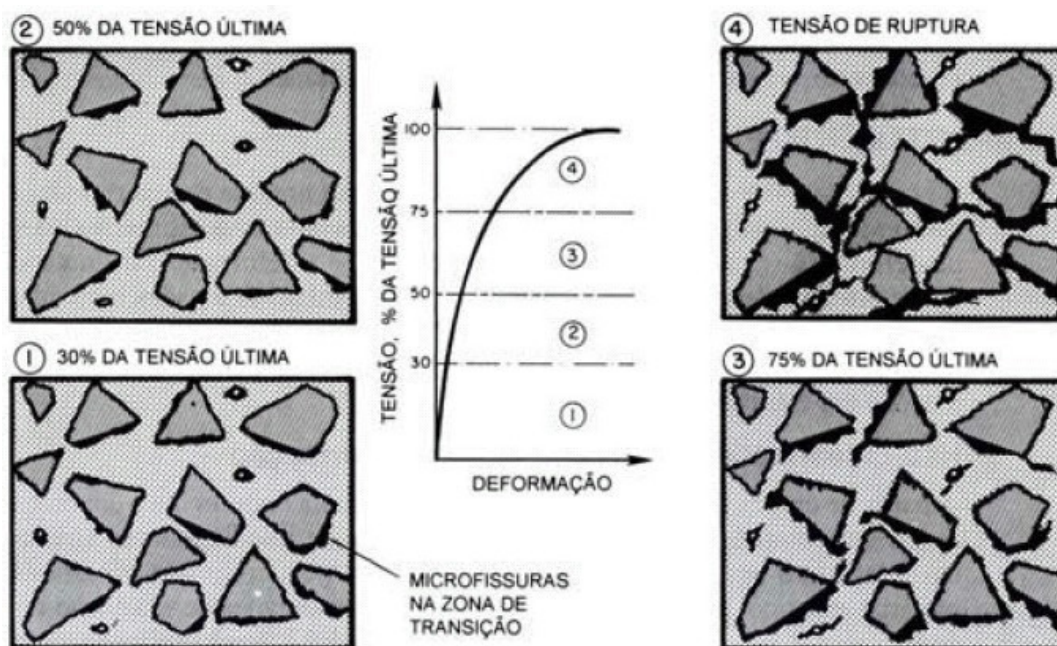


Figura 06: Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial. (Baseado em Glucklich, 1968)

3.3 AÇÕES CONSTRUTIVAS

As ações construtivas são decorrentes das práticas adotadas durante a execução, e faz-se necessária a consideração destas ações no projeto das estruturas permanentes para fins de dimensionamento no estado limite último⁶. Prado et al. (1998) define as ações construtivas como o resultado de vários esquemas estáticos com ações temporárias diversas, decorrentes de um conjunto de procedimentos necessários para concretar cada pavimento.

A aceleração dos ciclos de execução faz com que se tenham vários jogos de escoras ou reescoras, com intuito de fazer um aproveitamento do sistema de fôrmas de modo racional, porém garantindo um tempo maior de apoio para os pavimentos em construção. Neste cenário, têm-se pavimentos recém concretados que são temporariamente suportados por pavimentos inferiores através do sistema de fôrmas, fazendo parte de um sistema de sustentação estrutural composto por vários pavimentos conectados entre si através de ligações rotuladas. As ações de construção se distribuem entre os pavimentos ligados por escoras, e

⁶ Estado limite último está relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determina a paralisação do uso da estrutura.

cada um absorve uma parcela de carga de acordo com sua rigidez, tendo em vista que cada pavimento possui idade diferente, consequentemente propriedades mecânicas diferentes.

Outro aspecto importante é a consideração da seqüência construtiva, na medida em que a estrutura de um edifício de andares múltiplos passa por diversas etapas do início ao término. Em geral, as estruturas são analisadas considerando que toda edificação está pronta quando ocorrem as ações de projeto. No entanto esta análise não é válida se considerarmos a ação do peso próprio para cada estágio de construção. Conforme Prado et al. (1998), uma análise seqüencial elástico-linear de uma estrutura de três pavimentos, submetida apenas ao peso próprio e considerando a hipótese de superposição de efeitos válida, pode ser feita conforme o esquema mostrado na figura 07.

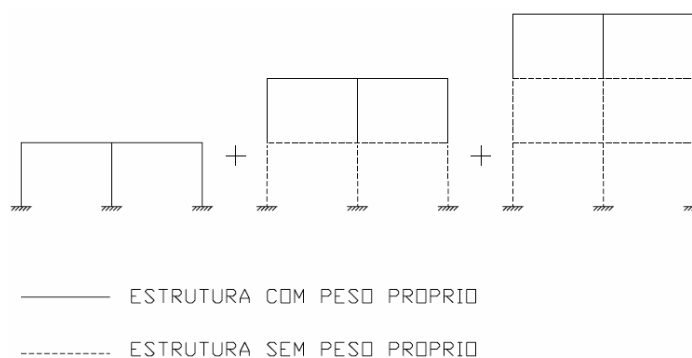


Figura 07: análise seqüencial

Prado et al. (1998) apresenta um exemplo numérico adaptado de Selvaraj e Sharma (1974), para um pórtico plano com quatorze pavimentos, mostrando a importância de considerar a seqüência construtiva na análise das ações verticais de peso próprio. Este exemplo pode ser visualizado na figura 08. É possível notar que, apesar de se tratar de um exemplo bastante simples, importantes diferenças nos momentos fletores são obtidos considerando a seqüência de construção ou a estrutura pronta. Em especial, os momentos na seção da viga junto ao pilar central apresentaram valores maiores nos pavimentos superiores.

Para uma análise seqüencial são necessários procedimentos mais refinados, dando conta de outras ações durante a construção e não somente o peso próprio. Para isso faz-se necessário um conhecimento das práticas construtivas adotadas, do sistema de fôrmas e do cronograma de execução, em especial, a definição dos ciclos de execução. A seqüência evolutiva prossegue até a remoção das escoras ou reescoras de suporte do último pavimento.

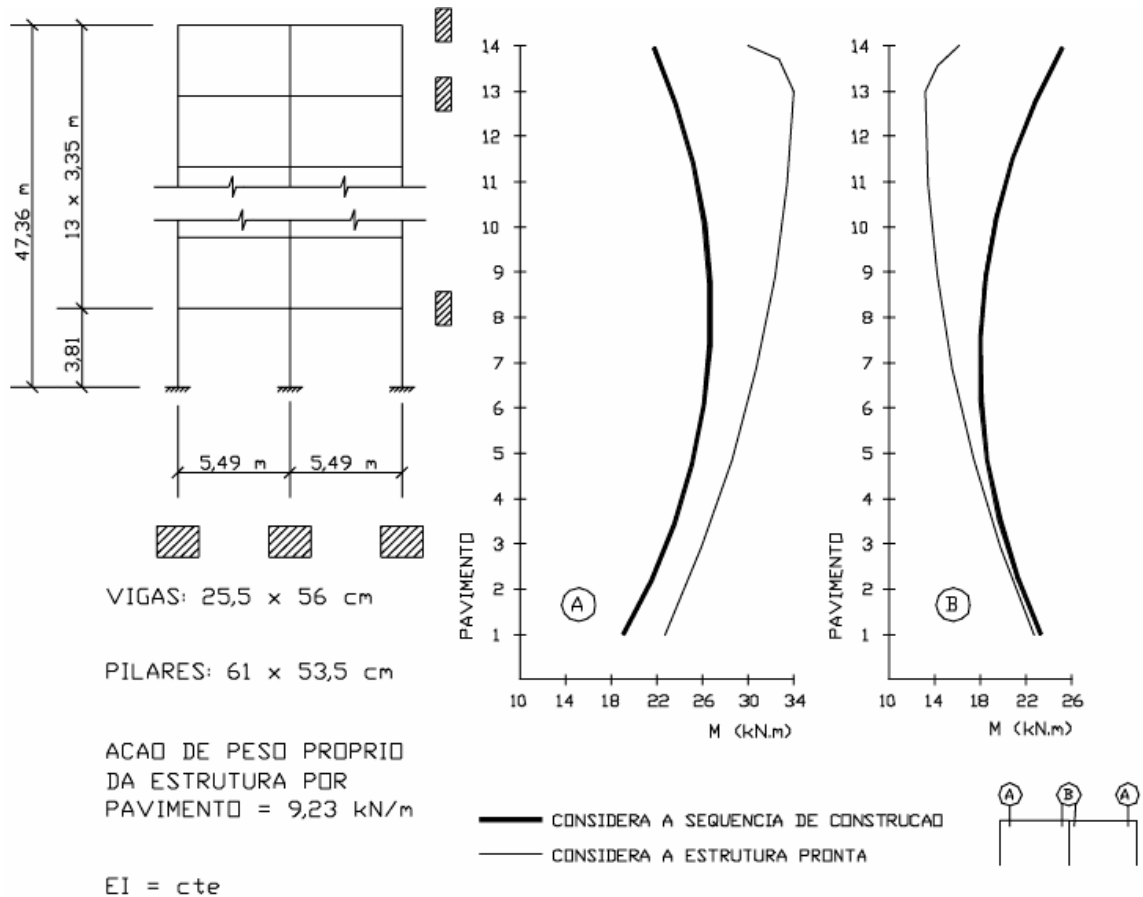


Figura 08: pórtico plano submetido à ação de peso próprio da estrutura.

O estudo das ações construtivas tem sido objeto de muitas pesquisas, no entanto há uma predominância de análises feitas com sistemas estruturais e práticas construtivas utilizadas nos Estados Unidos da América, havendo uma demanda por pesquisas voltadas a realidade brasileira.

Para o estudo das distribuições das ações construtivas, de acordo com os eventos críticos que ocorrem durante a execução, há a necessidade de definir o conceito de fator de carga construtiva (k) nos pavimentos ou nas escoras. Estes fatores são expressos em função do valor da ação de peso próprio do pavimento por m^2 através da equação 01, refletindo numa média para o pavimento.

$$k = \frac{\text{ação total suportada pelo pavimento (ou escora)}}{\text{peso próprio do pavimento}} \quad (01)$$

onde:

k = fator de carga construtiva do pavimento ou da escora.

O ACI – Formwork for Concrete recomenda o método descrito por Grundy e Kabaila (1963) para avaliar a distribuição das ações de construção. Neste estudo, o ciclo de construção é de sete dias, sendo que os eventos críticos considerados são a concretagem de um novo pavimento e a retirada do primeiro escoramento, sendo este último, ocorrido cinco dias após a concretagem. A figura 09 apresenta os resultados do referido método, considerando o módulo de elasticidade variável entre os pavimentos e três jogos de escoras ($m=3$), ficando até quatro pavimentos unidos por escoras, através de ligações rotuladas.

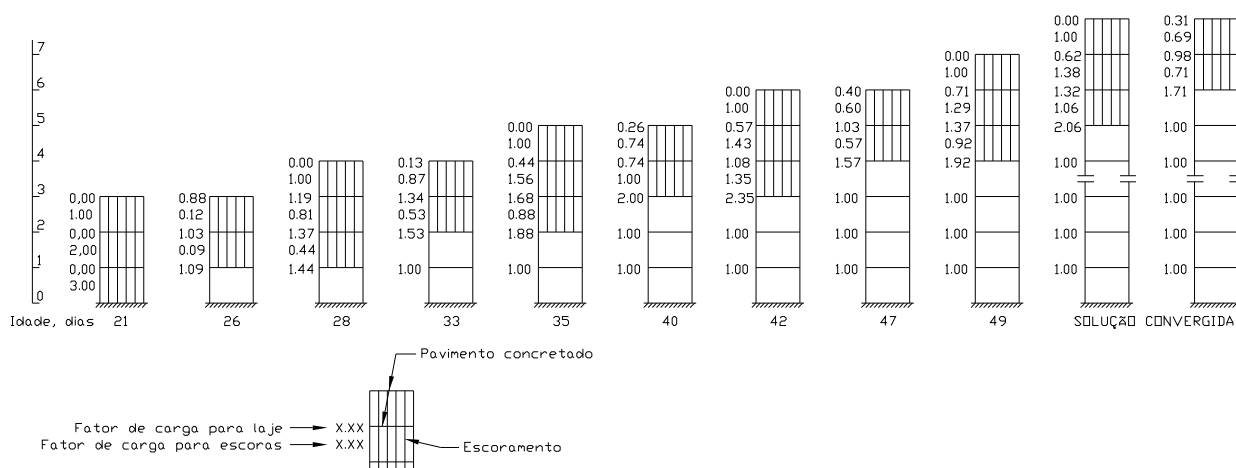


Figura 09: estudo de Grundy e Kabaila (1963) considerando E_c variável e $m=3$

Grundy e Kabaila (1963) também propuseram o mesmo estudo considerando o módulo de elasticidade constante.

França (2005) apresenta outro estudo, considerando um ciclo de quatro dias, com seis dias de trabalho por semana, sendo que os eventos críticos considerados são a concretagem de um novo pavimento e a retirada do primeiro reescoramento, sendo este último, ocorrido um dia após a concretagem. Na figura 10 podem ser visualizados os resultados, considerando um jogo de escoramento, dois jogos de reescoramento, ficando até quatro pavimentos unidos por escoras, através de ligações rotuladas.

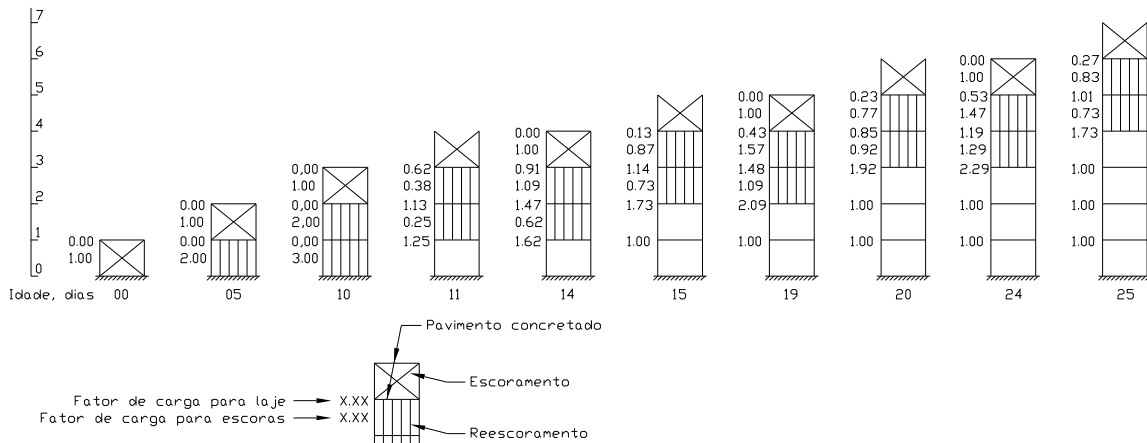


Figura 10: baseado no estudo feito por França (2005)

Em ambos os estudos, o pavimento mais desfavorável é o pavimento 3. Na figura 11, podem ser comparados os fatores de carga construtiva das duas análises, para este pavimento. Este gráfico estabelece o histórico de carregamento dos elementos estruturais durante a execução da estrutura de concreto armado, mesmo considerando que estes valores são médios, podendo existir regiões menos ou mais solicitadas.

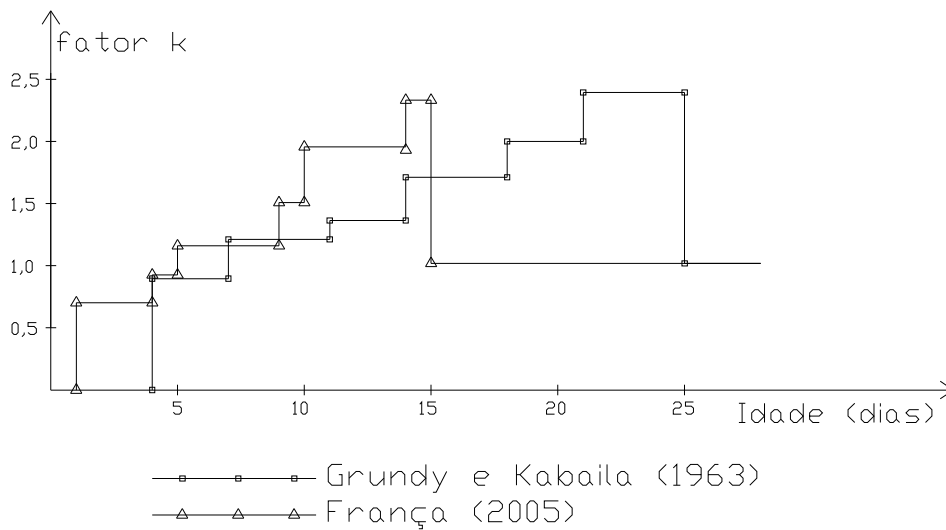


Figura 11: fatores k em função da idade para o pavimento 3

Outros métodos são propostos, dentre os quais, podemos citar o de Prado (1999), chamado de método das estruturas primárias, aplicado por Freitas (2004), com modelagem tridimensional utilizando o método dos elementos finitos.

Liu et al. (1985) desenvolveu um modelo computacional em três dimensões para a análise das ações de construção. Posteriormente, Mosallam e Chen (1991), melhoraram o modelo anterior, considerando outros parâmetros construtivos além de ações móveis e variáveis. Em

seguida, Mosallam e Chen (1992) aperfeiçoaram o modelo computacional simulando sistemas de escoras com contraventamento levando em consideração as ações horizontais provocadas pela ação do vento. Estes três estudos são coordenados pelo pesquisador e professor americano Dr. Wai Fah Chen.

Dentre as práticas adotadas na construção civil, muitos são os fatores que afetam os resultados das análises de distribuição de ações, dentre as quais se podem citar as escoras, que em processos mais simplificados são consideradas infinitamente rígidas em comparação com os pavimentos, no que se refere aos deslocamentos verticais. No entanto, Mosallam e Chen (1991) constataram que o comportamento não-linear das escoras de madeira e a deformação do material têm pequeno efeito na distribuição das cargas de construção. O pavimento “zero”, térreo ou fundação é considerado como um suporte rígido, porém esta consideração tem pouca relevância prática. Outro aspecto que surpreendentemente se mostrou de pequena importância é a maturidade do concreto, ou seja, a consideração do módulo de elasticidade variável entre os pavimentos. Prado e Corrêa (2002) confirmaram esta constatação utilizando o método das estruturas primárias. Royer (2004) também corrobora analisando os dois estudos feitos por Grundy e Kabaila (1963), um com módulo de elasticidade variável, apresentado neste capítulo, e outro considerando constante esta propriedade. O autor faz exceção a casos mais extremos de carregamento com um ou dois dias de idade, sugerindo inclusive uma análise para estas condições mais severas.

Royer (2004) discute o trabalho de Grundy e Kabaila (1963), e destaca que, em condições normais de execução, a estrutura recebe as maiores solicitações durante a construção, e que o procedimento de escorar os pavimentos nos andares abaixo consiste numa prática perigosa. Royer (2004) salienta ainda os cuidados que devem ser tomados nos processos de reescoramento, para não provocar o surgimento de momentos fletores ao inverso do que foi concebido em projeto. Pode-se citar como exemplo, a colocação de uma reescora no meio do vão de uma viga isostática, o que provocaria um momento fletor negativo, sendo esta, hipótese não considerada no cálculo da viga.

Royer (2004) conclui que a consideração das ações construtivas, num processo acelerado de execução onde os pavimentos são apoiados sobre seus antecessores, é de fácil compreensão e utilização, não se justificando qualquer omissão a esse fato.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental é apresentado a seguir, descrevendo-se o método de pesquisa, os materiais utilizados e os métodos de ensaio.

4.1 MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa foi dividido em dois tipos principais de ensaios, um de pré-carregamento de curta duração, utilizando um concreto produzido com cimento CP V-ARI e outro de pré-carregamento de longa duração, utilizando dois tipos de cimento, o CP V-ARI e o CP IV-32RS.

O ensaio de pré-carregamento de curta duração fez parte da primeira etapa da investigação experimental e tem como objetivo refinar as questões de pesquisa, seguindo a mesma estratégia experimental adotada nos demais trabalhos deste projeto de pesquisa em andamento no NORIE / UFRGS.

O ensaio de pré-carregamento de longa duração foi proposto objetivando simular de maneira aproximada, as ações decorrentes do processo executivo.

Nesta seção também apresenta-se o delineamento da pesquisa.

4.1.1 Ensaio de Pré-carregamento de Curta Duração

O primeiro ensaio que foi realizado consiste em promover um pré-carregamento de curta duração nas idades iniciais do concreto, para posterior ensaio de carregamento permanente, com protótipos confeccionados com concreto produzido com cimento CP V-ARI.

Foi aplicada uma carga instantânea aos três dias de idade, em três vigas de concreto armado, para posterior aplicação de um carregamento permanente equivalente a uma solicitação de projeto aos vinte e oito dias. Os níveis de carregamento precoce propostos são equivalentes a 32%, 64% e 96% (aproximadamente 1/3, 2/3 e 3/3) da carga necessária para esgotar a

capacidade de carga das vigas, de modo a abranger uma gama bastante ampla de níveis de carregamento precoce.

Para determinação dos níveis de carregamento, aos três dias de idade uma viga foi carregada até o esgotamento da sua capacidade de carga. A partir desta carga obtida, outras três vigas receberam os três níveis de carregamento propostos e a última viga não recebeu nenhum carregamento, sendo utilizada como viga de controle ou viga testemunho.

As vigas foram numeradas da seguinte forma:

- a) V1 – viga levada ao esgotamento de sua capacidade de carga aos três dias de idade;
- b) V2 – viga pré-carregada com 32% da carga da viga V1;
- c) V3 – viga pré-carregada com 64% da carga da viga V1;
- d) V4 – viga pré-carregada com 96% da carga da viga V1;
- e) V5 – viga sem pré-carregamento (viga de controle ou viga testemunho).

4.1.2 Ensaio de Pré-carregamento de Longa Duração

O segundo ensaio realizado consiste em promover um pré-carregamento de longa duração a partir das idades iniciais do concreto, de acordo com níveis de carga e idades de acordo com dois ciclos de execução, para posterior ensaio de carregamento permanente, com protótipos confeccionados com concreto produzido com cimento CP V-ARI e CP IV-32RS.

Foram feitos ensaios em vigas de concreto armado, carregadas de acordo com os fatores de carga k propostos por Krundy e Kabaila (1963) e França (2005), para ciclos de 7 e 4 dias respectivamente, para o pavimento mais desfavorável (pavimento 3). Uma terceira viga será carregada aos 28 dias, sendo utilizada como viga de controle ou testemunho.

As vigas foram numeradas da seguinte forma:

- a) V4d - viga carregada de acordo com ciclo de execução de 4 dias;

b) V7d - viga carregada de acordo com ciclo de execução de 7 dias;

c) V28d - viga sem pré-carregamento (viga de controle ou viga testemunho).

O fator de carga $k=1$, referente ao peso próprio do pavimento, será considerado como sendo 50% da carga total de projeto. Desta forma, as três vigas passarão a receber o carregamento previsto em projeto aos 28 dias com fator de carga $k=2$. Para definir estes valores, partiu-se do valor médio adotado nas edificações residenciais que utilizam estruturas de concreto armado moldado *in loco* e sistema estrutural composto por lajes, vigas e pilares. Foi considerado que um pavimento possui 9 kN/m^2 (900 kgf/m^2) de carga total, para uma espessura média de laje⁷ da ordem de 18 cm. Desta forma, o peso próprio da estrutura foi de $4,5 \text{ kN/m}^2$ (450 kgf/m^2). A figura 12 ilustra as idades e os fatores de carga aplicados.

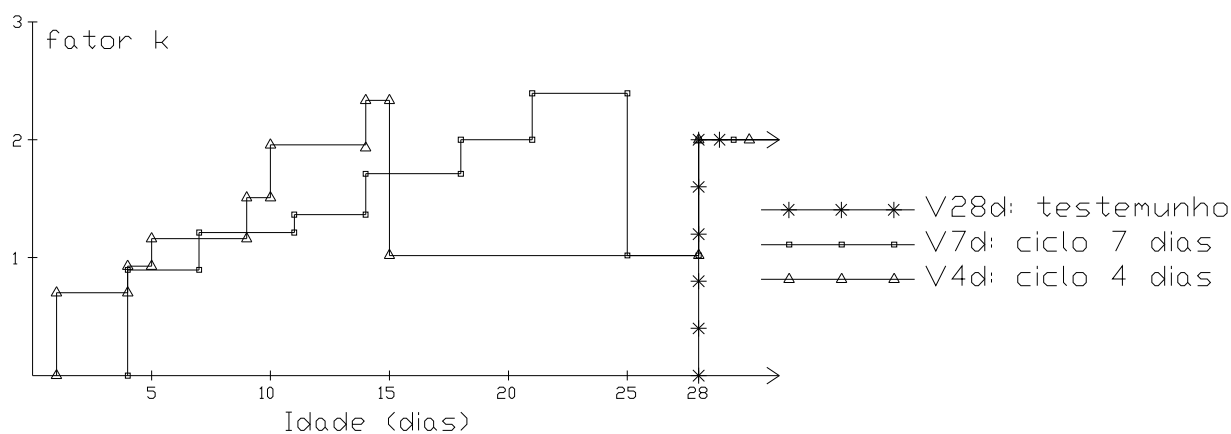


Figura 12: fatores k em função da idade

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa são facilmente encontrados no comércio de Porto Alegre, e por este motivo foram adotados.

⁷ Espessura média de laje consiste no volume total de concreto de um pavimento (vigas, lajes e pilares) dividido pela área do respectivo pavimento.

4.2.1 Cimento

Objetivando-se utilizar cimentos com ganho de resistência mecânica rápido e lento, optou-se pelos cimentos CP V-ARI e o CP IV-32RS, respectivamente, para a produção dos concretos. A caracterização destes cimentos segue abaixo.

4.2.1.1 Cimento CP V-ARI

O cimento CP V-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial) tem, como principal característica, a capacidade de atingir altas resistências nas primeiras idades, devido a uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, garantindo um ganho de resistência com maior velocidade ao reagir com a água. Este cimento deve possuir, em massa, 95 a 100% de clínquer mais gesso e zero a 5% de material carbonático, sendo normalizado pela NBR 5733/1991. A tabela 02 apresenta as propriedades físicas e químicas do CP V-ARI e as respectivas limitações normativas, conforme dados do fabricante.

Tabela 02: propriedades físicas e químicas do CP V-ARI, segundo dados do fabricante

Propriedades Físicas do CP V-ARI	
Blaine (cm ² /g)	4457 > 2600
Tempo de início de pega (h:min)	02:11 > 60
Tempo de fim de pega (h:min)	03:00 ≤ 600
Finura na peneira # 200 (%)	0,12 ≤ 12,0
Finura na peneira # 325 (%)	1,19
Expansibilidade a quente (mm)	0,64 ≤ 5,0
Consistência normal (%)	29,33
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	24,7
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	35,7 > 10,0
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	41,5 ≥ 20,0
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	49,7 ≥ 32,0
Propriedades Químicas do CP V-ARI	
Perda ao fogo (%)	3,41 < 6,5
Resíduo insolúvel (%)	2,20 ≤ 2,5
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	2,76 ≤ 4,0
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	1,01
Óxido de magnésio - MgO (%)	4,20 ≤ 6,5
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	11,27
Óxido de silício - SiO ₂	31,35
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	3,42
Óxido de cálcio - CaO (%)	41,33
Equivalente alcalino (%)	0,88

4.2.1.2 Cimento CP IV-32RS

O cimento CP IV-32RS (cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos) possui materiais pozolânicos em sua composição, e se caracteriza pela diminuição do calor de hidratação, pela melhor trabalhabilidade e pelo aumento de ganho de resistência à compressão em idades avançadas, além da propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados. Este cimento deve possuir, em massa, 85 a 45% de clínquer mais gesso, 15 a 50% de material pozolânico e zero a 5% de material carbonático, sendo normalizado pela NBR 5736/1999. A tabela 03 apresenta as propriedades físicas e químicas do CP IV-32RS e as respectivas limitações normativas, conforme dados do fabricante.

Tabela 03: propriedades físicas e químicas do CP IV-32RS, segundo dados do fabricante

Propriedades Físicas do CP IV-32RS	
Blaine (cm ² /g)	4321 > 2600
Tempo de início de pega (h:min)	03:01 > 60
Tempo de fim de pega (h:min)	03:54 ≤ 600
Finura na peneira # 200 (%)	0,32 ≤ 12,0
Finura na peneira # 325 (%)	2,17
Expansibilidade a quente (mm)	0,20 ≤ 5,0
Consistência normal (%)	30,99
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	11,8
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	21,8 > 10,0
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	27,4 ≥ 20,0
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	39,1 ≥ 32,0
Propriedades Químicas do CP IV-32RS	
Perda ao fogo (%)	3,54 < 6,5
Resíduo insolúvel (%)	3,22 ≤ 2,5
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	3,22 ≤ 4,0
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	1,41
Óxido de magnésio - MgO (%)	5,07 ≤ 6,5
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	4,35
Óxido de silício - SiO ₂	18,93
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	2,57
Óxido de cálcio - CaO (%)	60,25
Equivalente alcalino (%)	0,59

4.2.2 Agregados

Os concretos foram produzidos com agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (brita), procedente da região metropolitana de Porto Alegre. A composição granulométrica, módulo de finura, bem como a dimensão máxima característica da areia foram obtidos através da realização do ensaio descrito na NBR NM 248/2003. Esta norma também prescreve o método para determinação da composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica da brita. Os resultados destes ensaios encontram-se nas tabelas 04 e 05, respectivamente. A brita utilizada nas concretagens é basáltica e foi peneirada, empregando-se apenas o material passante na peneira de abertura de 19 mm. A areia é quartzosa e, de acordo com a NBR 7211/2005, é classificada como areia de graduação média (Zona 3). A graduação da brita foi classificada, conforme a mesma norma, como brita 1. A massa específica da areia,

obtida conforme especificações da NBR NM 52/2003, resultou em 2,626 g/cm³. Quanto à brita, segundo a prescrição da NBR NM 53/2003, obtiveram-se os valores de 2,81 g/cm³ e 1,67%, como resultados de sua massa específica e absorção, respectivamente.

Tabela 04: composição granulométrica e características físicas da areia

Peneira (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
4,80	0	0
2,40	5	5
1,20	16	21
0,60	31	52
0,30	40	92
0,15	8	100
< 0,15	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		2,40
Módulo de finura		2,69

Tabela 05: composição granulométrica e características físicas da brita

Peneira (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
19	0	0
12,5	61	61
9,5	28	89
6,3	9	98
4,8	1	99
< 4,8	1	100
< 0,15	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		19
Módulo de finura		6,88

4.2.3 Armadura

As armaduras utilizadas foram produzidas de acordo com a NBR 7480/1996, cortadas e dobradas em processo industrializado, respeitando os pinos de dobra de acordo com a NBR 6118/2003. Os diâmetros utilizados e respectivos valores característicos da resistência de escoamento, classe, categoria e diâmetro do pino de dobra, encontram-se na tabela 06.

Tabela 06: diâmetros, resistência característica de escoamento, classe, categoria e diâmetro dos pinos de dobras do aço

\varnothing (mm)	f_{yk} (Mpa)	Classe	Categoria	\varnothing do pino de dobra (mm)
4,2	600	B	CA-60B	26
5	600	B	CA-60B	30
6,3	500	A	CA-50A	32

4.2.4 Água

A água utilizada foi proveniente da rede potável de abastecimento público do município de Porto Alegre.

4.3 MÉTODO DE ENSAIO

4.3.1 Geometria e Modelo Matemático das Vigas

As vigas que foram ensaiadas possuem seção transversal de 15 x 8 cm e 200 cm de vão. A armadura longitudinal inferior é constituída de três barras de aço de bitolas diferentes para o primeiro ensaio e os dois seguintes. Foi disposta também uma armadura transversal de distribuição de aço CA-60B de diâmetro 4,2 mm, com espaçamentos igualmente diferenciados. O dimensionamento, para cada caso, foi realizado de modo a se obter flechas iniciais, para um carregamento de projeto, próximas de 10 mm, e falha por flexão, não sendo necessária armadura transversal. Foram utilizados espaçadores de argamassa fixados na armadura de distribuição (pastilhas PAC PC15, $f_{ck}=50\text{MPa}$, cimento CP V-ARI RS). A configuração dos protótipos pode ser visualizada na figura 13.

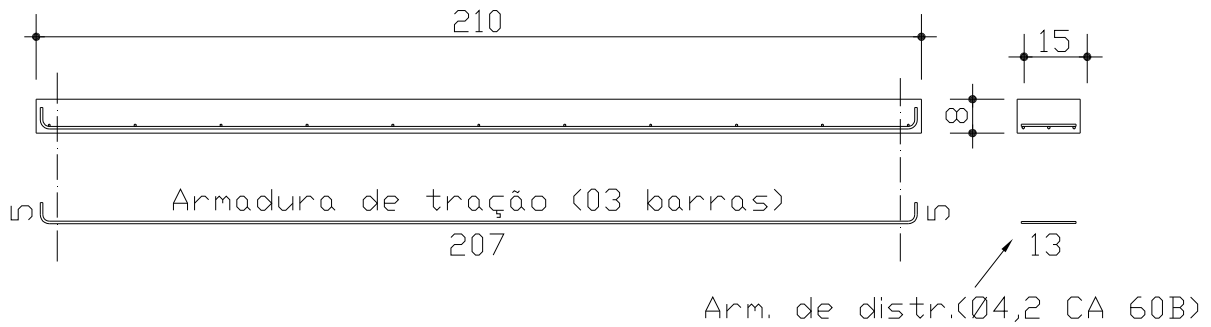


Figura 13: dimensões das vigas e configuração básica da armadura utilizada

As vigas foram simplesmente apoiadas, e submetidas a um carregamento uniformemente distribuído de 0,3 kN/m (30 kgf/m), referente ao peso próprio, e uma carga P concentrada no centro do vão que varia de acordo com o ensaio realizado. O modelo esquemático pode ser visualizado na figura 14.

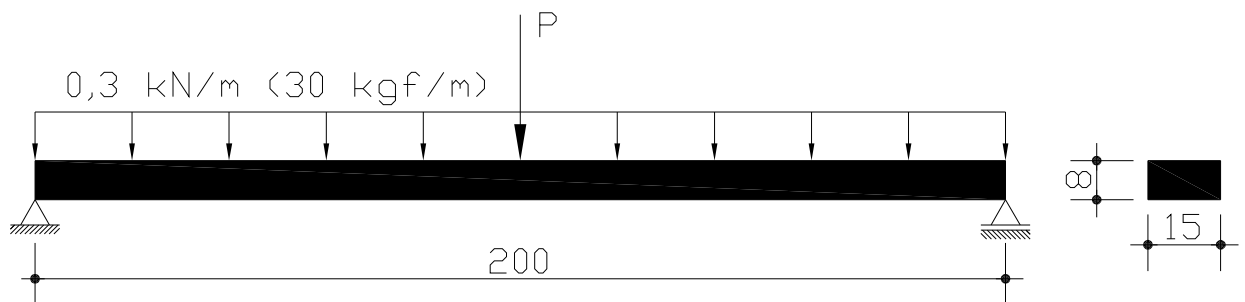


Figura 14: modelo matemático das vigas ensaiadas

4.3.2 Produção e Verificação das Propriedades Mecânicas do Concreto

4.3.2.1 Dosagem dos Concretos

Utilizou-se o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), na elaboração da dosagem experimental deste trabalho. Neste método, o diagrama de dosagem (constituído por quatro eixos representados pela resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, relação água/aglomerante, traço unitário e consumo de cimento) é obtido através da determinação experimental de pelo menos três pontos da curva de dosagem.

Desta forma, foram selecionados três traços, representantes dos três pontos da curva de dosagem, sendo eles: um traço intermediário, 1:5 (cimento : agregados secos totais, em massa); um traço rico em cimento, 1:2,5 e um traço pobre em cimento, 1:8.

O teor ideal de argamassa foi então determinado experimentalmente, utilizando-se os materiais descritos (cimento, agregados e água), seguindo-se o procedimento recomendado pelo método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Através do traço intermediário 1:5, define-se, por tentativas e observações práticas, o menor teor de argamassa que proporciona o completo preenchimento dos vazios das britas e um bom acabamento superficial. A determinação do teor mínimo de argamassa no concreto produz uma mistura adequada para lançamento na fôrma, com menos riscos de fissuração de origem térmica ou retração por secagem (HELENE; TERZIAN, 1992).

Fixou-se a consistência do concreto em 100 ± 20 mm, medido através do ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR NM 67/1998). O teor de argamassa encontrado experimentalmente para este trabalho foi de 53%, resultando numa relação água/cimento igual a 0,51 para o cimento CP V-ARI e 0,58 para o cimento CP IV-32RS, para o traço 1:5.

Sabendo-se o valor do teor de argamassa, e considerando-se o mesmo abatimento, determinou-se a relação água/cimento para os traços auxiliares. Após a mistura de cada um dos traços, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (9,5 x 19 cm) de concreto (2 para cada traço), obtendo-se as resistências à compressão, aos 28 dias, de cada um dos traços executados, afim de completar o diagrama de dosagem. A tabela 07 apresenta, resumidamente, os resultados obtidos neste ajuste das curvas de dosagem para os dois cimentos utilizados. Os diagramas de dosagem podem ser observados na figura 15.

Tabela 07: resultados do ajuste da curva de dosagem experimental

	Traço unitário	Relação água/cimento	fc28 (MPa)	Consumo de cimento (kg/m³)
CP V-ARI	1 : 2,5	0,33	50,14	717,90
	1 : 5	0,51	31,20	421,90
	1 : 8	0,73	17,65	282,20
CP IV-32RS	1 : 2,5	0,38	42,59	699,40
	1 : 5	0,58	26,08	411,46
	1 : 8	0,82	14,53	276,00

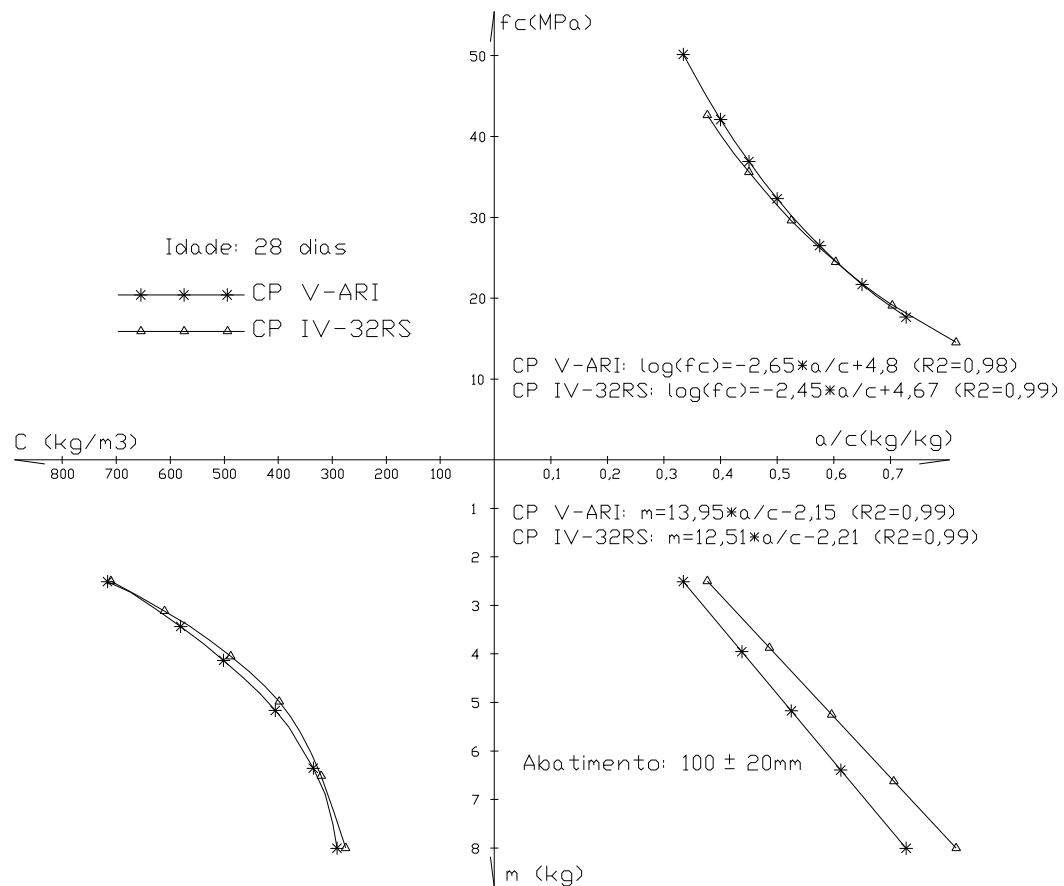


Figura 15: diagrama de dosagem

No contexto deste projeto de pesquisa, do qual também fazem parte três teses de doutorado, foram fixadas três relações água-cimento, 0,35; 0,5 e 0,7. Para as vigas e os corpos-de-prova deste trabalho, foi adotada uma relação água/cimento igual a 0,5. Os traços obtidos para cada cimento foram os seguintes:

- a) cimento CP V-ARI: 1 : 2,09 : 2,74;
- b) cimento CP IV-32RS: 1: 1,68 : 2,37.

4.3.2.2 Mistura

A mistura dos materiais constituintes do concreto ocorreu em betoneira de eixo inclinado com capacidade para até 320 litros, previamente imprimada com argamassa.

A colocação dos materiais na betoneira foi feita na seguinte ordem:

- a) toda quantidade de brita;
- b) aproximadamente metade da quantidade de água;
- c) toda quantidade de cimento;
- d) restante da quantidade de água;
- e) toda quantidade de areia.

Para cada procedimento de mistura (betonada) realizou-se a verificação da consistência do concreto (*slump*), através do método de abatimento do tronco de cone (NBR NM 67/1998).

4.3.2.3 Adensamento

O adensamento do concreto, tanto para os corpos-de-prova quanto para as vigas, foi efetuado utilizando-se um vibrador de imersão, seguindo os procedimentos preconizados pela NBR 5738/2003.

4.3.2.4 Cura

Os processos de cura foram iguais para todas as vigas, no entanto diferentes para os corpos-de-prova e são descritos a seguir.

4.3.2.4.1 Cura das Vigas

As vigas receberam uma cura inicial nas primeiras 6 h, cobertas com lona plástica, de acordo com a NBR 5738/2003. Após, permaneceram cobertas com sacos de linhagem umedecidos sob lona plástica, até completar 72 h. No período restante, as vigas permaneceram em ambiente de laboratório com médias de 25° C de temperatura e 65% de umidade relativa do ar.

No ensaio de pré-carregamento de longa duração, a viga V4d recebeu o primeiro carregamento com um dia de idade. Desta forma, o processo de cura foi interrompido por aproximadamente 3 h, tempo este necessário para a montagem do ensaio. Mesmo parcialmente carregada, esta viga teve seu período de 72 h de cura mantido e inclusive com a perda de 3 h compensada no final.

4.3.2.4.2 Cura dos Corpos-de-prova

Para os ensaios em corpos-de-prova foram utilizados dois processos de cura:

- a) cura em condições normalizadas (utilizado para acompanhar o crescimento das propriedades mecânicas do concreto): realizou-se uma cura inicial de 24h de acordo com a NBR 5738/2003, para posterior desmoldagem e armazenagem em câmara úmida, projetada para atender as exigências da NBR 5738/2003, permanecendo neste local até o dia do ensaio.
- b) cura em condições semelhantes às das vigas: este processo de cura foi realizado conforme descrito em 4.3.2.4.1, sendo que os corpos-de-prova foram desmoldados somente no dia do ensaio.

4.3.2.5 Propriedades Mecânicas dos Concretos

Foram feitos ensaios em corpos-de-prova cilíndricos (9,5 x 19 cm) para acompanhar o crescimento das propriedades mecânicas dos concretos utilizados e para verificar as condições dos concretos utilizados nas vigas. Foram adotadas no mínimo duas amostras para cada ensaio. Os ensaios mecânicos foram realizados em uma prensa da marca SHIMADZU, modelo UH2000kN, com capacidade entre 40 a 2000 kN.

4.3.2.5.1 Resistência à Compressão Uniaxial (f_c)

O ensaio de resistência à compressão uniaxial do concreto foi feito de acordo com a NBR 5739/2007, e consiste em aplicar uma carga vertical, perpendicular à seção transversal do

corpo-de-prova, a uma velocidade de 300 kN por minuto, até atingir a ruptura do material. Antes da execução, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre, garantindo uma superfície lisa e perpendicular ao eixo longitudinal. O resultado de f_c foi obtido dividindo-se a leitura da força aplicada no instante da ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova (70,88 cm²). A figura 16 ilustra a realização do ensaio.



Figura 16: ensaio de compressão uniaxial

4.3.2.5.2 Resistência à Tração Direta (f_{ct})

A resistência à tração direta (f_{ct}) foi determinada indiretamente através do ensaio de tração por compressão diametral ($f_{ct,cp}$), de acordo com a NBR 7222/1994, que consiste em aplicar uma carga perpendicular ao eixo longitudinal do corpo-de-prova ao longo das duas geratrizes diametralmente opostas, a uma velocidade de 300 kN por minuto, até atingir a ruptura do material. O resultado de f_{ct} foi obtido através da expressão 02:

$$f_{ct} = 0,9 \cdot 2 \cdot F \div (\pi \cdot d \cdot L) \quad (02)$$

onde:

F: força aplicada no instante da ruptura do material;

d: diâmetro do corpo-de-prova;

L: altura do corpo-de-prova.

O valor 0,9 se refere ao coeficiente de minoração proposto pela NBR 6118/2003 - item 8.2.5, para obter a resistência à tração direta através do ensaio de tração indireta. A figura 17 ilustra a realização do ensaio.



Figura 17: ensaio de tração indireta

4.3.2.5.3 Módulo de Elasticidade Secante (E_{cs})

O ensaio de módulo de elasticidade secante foi realizado com auxílio de dois medidores LVDT⁸ em posição diametralmente opostas, onde o valor médio é utilizado para o cálculo dos deslocamentos. O resultado de E_{cs} é obtido conforme prescreve a NBR 8522/2003, e consiste em obter o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos pontos A e B, onde:

A: tensão de 0,5 MPa;

B: 40% da tensão de ruptura.

A figura 18 ilustra a realização do ensaio.

⁸ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) são sensores para medição de deslocamento linear.



Figura 18: ensaio de módulo de elasticidade secante

4.3.2.5.4 Resultados dos Ensaios (f_c , f_{ct} e E_{cs})

Os resultados dos ensaios para acompanhar o crescimento das propriedades mecânicas (f_c , f_{ct} e E_{cs}) dos concretos utilizados, bem como os ensaios de resistência à compressão (f_c) que foram realizados juntamente com os três ensaios de pré-carregamento das vigas, são mostrados a seguir. Os valores médios podem ser vistos na tabela 08, para cada condição de cura. Em função do reduzido número de corpos-de-prova não são apresentados os desvios padrão e coeficiente de variação, ficando este último entre 0,07 % e 12 %.

Tabela 08: resultados dos ensaios em corpos-de-prova

				Idade (dias)					Cura
				1	3	7	14	28	
Crescimento das propriedades mecânicas		CP V-ARI	f_c (MPa)	18,53	24,29	26,90	28,71	32,68	Condições ideais
			f_{ct} (MPa)	2,29	2,63	2,90	3,27	3,04	
			E_{cs} (GPa)	25,08	25,53	27,49	30,83	32,34	
		CP IV-32RS	f_c (MPa)	5,01	11,92	13,97	19,15	23,10⁹	
			f_{ct} (MPa)	0,56	1,43	1,63	2,27	2,51	
			E_{cs} (GPa)	9,09	17,15	22,03	24,36	27,81	
Verificação das condições do concreto utilizado nas vigas	Pré-carregamento de curta duração	CP V-ARI	f_c (MPa)	-	25,68	-	-	39,43	Condições semelhantes às das vigas
		CP V-ARI	f_c (MPa)	17,54	25,75	29,27	33,15	37,67	
	Pré-carregamento de longa duração	CP IV-32RS	f_c (MPa)	5,61	12,45	18,13	21,80	28,20	

⁹ Este valor de f_c não foi utilizado para o cálculo do momento fletor de projeto em decorrência de limitações de prazo, conforme explicitado no item 4.3.3.3.4

A figura 19 apresenta um gráfico com o crescimento das propriedades mecânicas (f_c , f_{ct} e E_{cs}) dos concretos produzidos com cimento CP V-ARI e CP IV-32RS, curados em condições normalizadas de acordo com a NBR 5738/2003. Os valores nas idades intermediárias foram preditos e os coeficientes de determinação (R^2) aparecem na tabela 09.

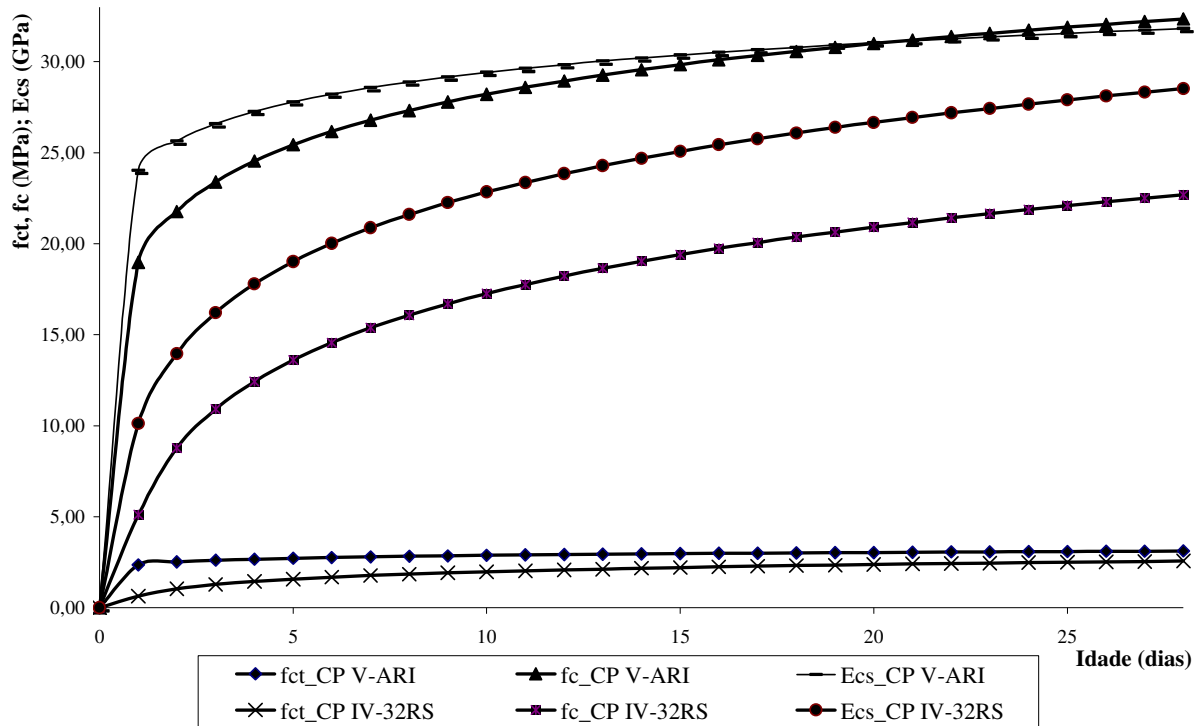


Figura 19: crescimento das propriedades mecânicas dos concretos

Tabela 09: coeficientes de determinação

	CP V-ARI			CP IV-32RS		
	f_c	f_{ct}	E_{cs}	f_c	f_{ct}	E_{cs}
R^2	0,95	0,67	0,77	0,97	0,95	0,97

Na figura 20 são apresentados os mesmos resultados, no entanto, os valores absolutos foram substituídos por coeficientes de crescimento, desta forma é possível avaliar a fração obtida em cada idade, com relação aos valores obtidos aos 28 dias.

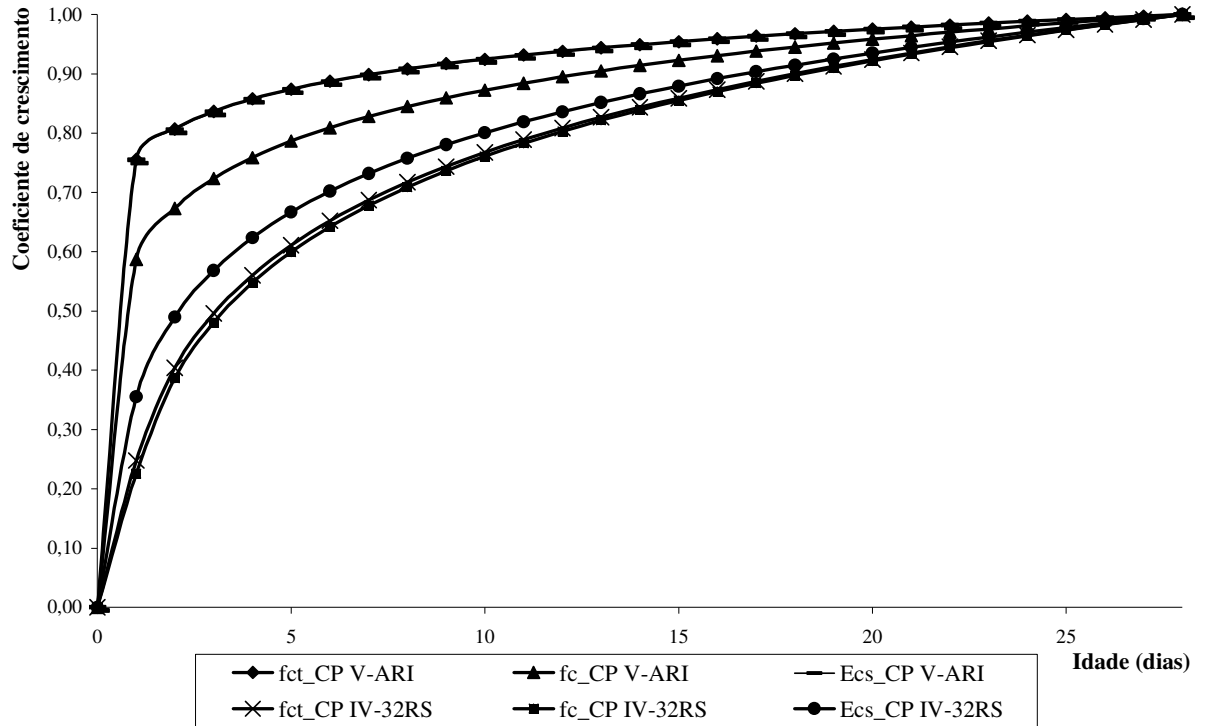


Figura 20: coeficientes de crescimento em função da idade

A seguir são apresentados três gráficos com os resultados de resistência à compressão (f_c), mostrados anteriormente, e resultados em corpos-de-prova moldados e curados juntamente com as vigas, para os três ensaios de pré-carregamento. Este comparativo serve para avaliar as condições existentes entre o concreto curado em condições normalizadas e o concreto curado em condições semelhantes às das vigas.

Na figura 21 são comparados os resultados, com os corpos-de-prova (Cps) moldados com as vigas do ensaio de pré-carregamento de curta duração utilizando cimento CP V-ARI. O coeficiente de determinação (R^2) de predição nas idades intermediárias foi de 0,92.

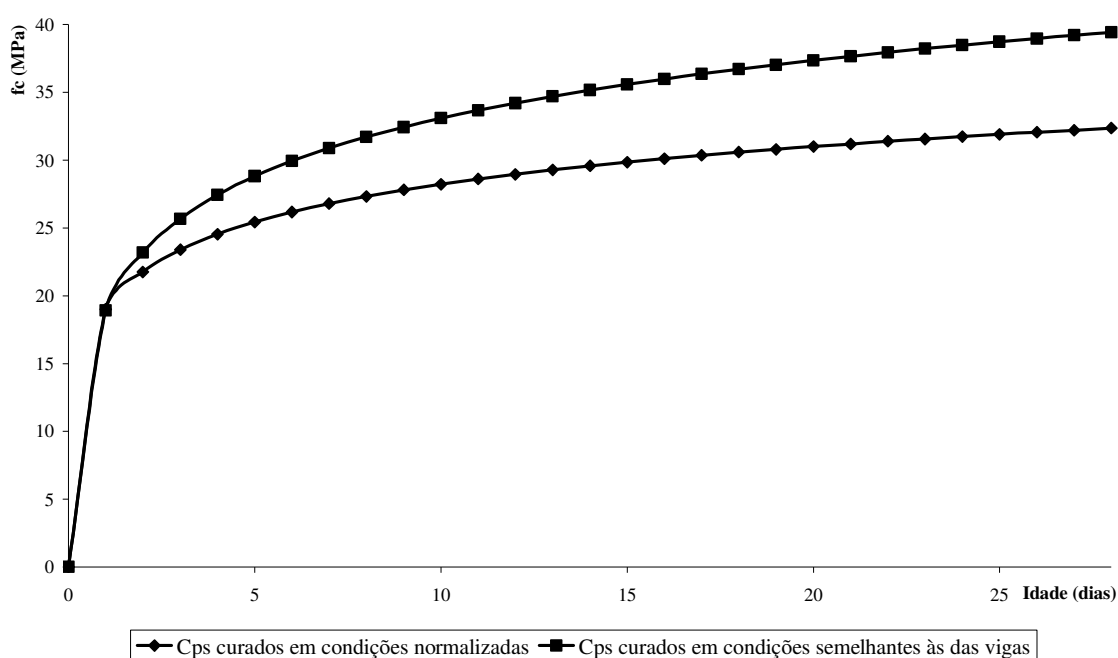


Figura 21: resistência à compressão (ensaio de pré-carregamento de curta duração - CP V-ARI)

Na figura 22 são comparados os resultados, com os Cps moldados com as vigas do ensaio de pré-carregamento de longa duração utilizando cimento CP V-ARI. O coeficiente de determinação (R^2) de predição nas idades intermediárias foi de 0,95.

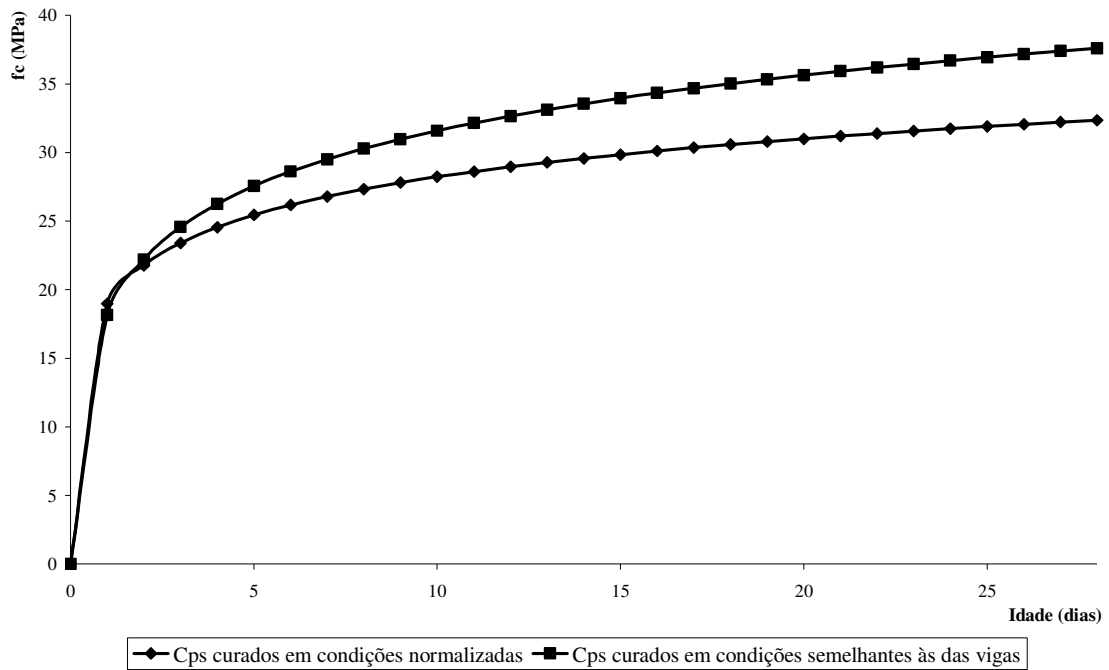


Figura 22: resistência à compressão (ensaio de pré-carregamento de longa duração - CP V-ARI)

Na figura 23 são comparados os resultados, com os Cps moldados com as vigas do ensaio de pré-carregamento de longa duração utilizando cimento CP IV-32RS. O coeficiente de determinação (R^2) de predição nas idades intermediárias foi de 0,99.

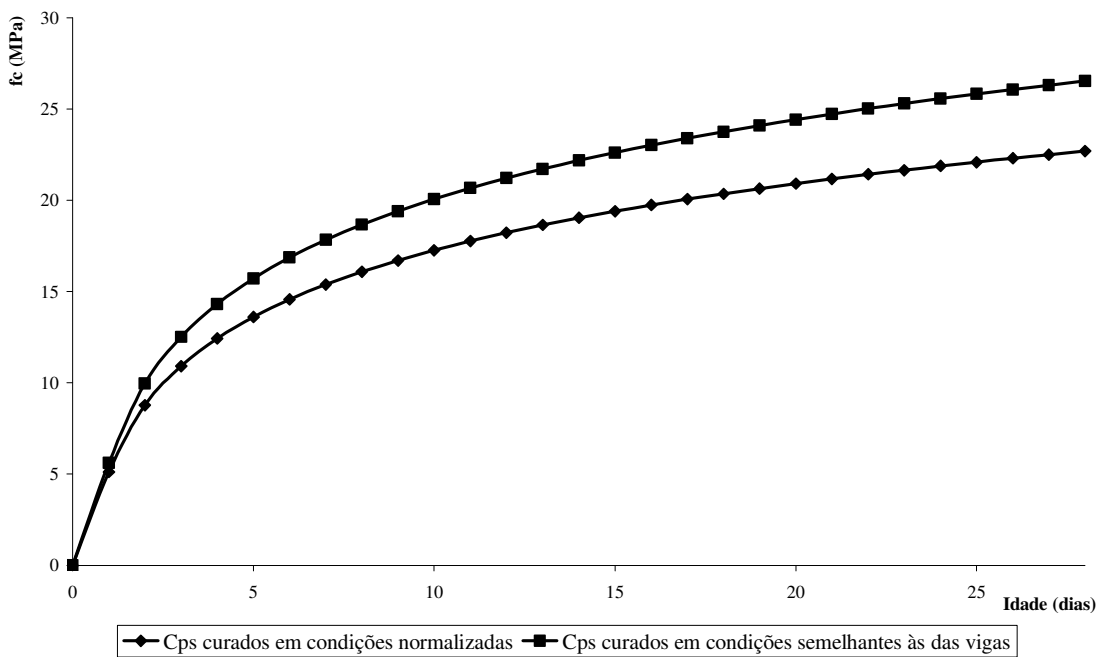


Figura 23: resistência à compressão (ensaio de pré-carregamento de longa duração - CP IV-32RS)

Observa-se, nos três comparativos, que os corpos-de-prova curados em condições normalizadas apresentam resistências à compressão (f_c) inferiores à dos Cps curados em condições semelhantes às das vigas, ou seja, em ambiente de laboratório. A cura de acordo com a NBR 5738/2003 prevê a manutenção dos corpos-de-prova em câmara úmida até o momento do ensaio. Desta forma, a presença de água nos poros do concreto no instante da ruptura, dá a esse modo normalizado, uma condição desfavorável, se comparada com a cura em ambiente de laboratório. Pôde-se observar este fenômeno, mergulhando-se em água dois corpos-de-prova, que estavam em condições semelhantes às das vigas, 20 horas antes da ruptura aos 28 dias, resultando numa perda de resistência à compressão da ordem de 5 %, o que corresponde a aproximadamente um terço da perda que se tem com o concreto curado em condições normalizadas. A norma não estabelece uma condição ótima de cura, mas sim uma condição padronizada.

4.3.3 Ensaio das Vigas

4.3.3.1 Aparato de Ensaio

Para realizar o ensaio de longa duração foi concebido um aparato para apoiar até quatro vigas, aplicar o carregamento e medir os deslocamentos. O carregamento também é concentrado no centro do vão e, por este motivo, a medição da flecha foi deslocada 2,5 cm do centro geométrico das vigas.

A figura 24 apresenta um desenho detalhado do aparato criado. Suas especificações gerais são:

- a) viga de concreto armado, objeto dos ensaios;
- b) pino passante de medição das flechas - barra quadrada 10 mm (aço SAE 1020). No contato do pino com a viga, foi colada uma chapa de aço galvanizado;
- c) travessa de suporte dos pinos de medição - tubo vazado 80 x 80 x 2 mm (aço SAE 1020);

- d) furos para passagem dos pinos com 15 mm de diâmetro e chapas laterais de 10 x 15 x 3 para impedir a rotação do pino;
- e) pórtico de suporte da travessa - tubo vazado 80 x 80 x 2 mm (aço SAE 1020);
- f) cavalete de suporte das vigas e do pórtico - chapa 10 mm soldada (aço SAE 1020);
- g) carregamento de permanente, composto por blocos de concreto e tijolos maciços. O espaço disponível permite a aplicação de até 3,35 kN (335 kgf) de carga concentrada;
- h) bandeja de suporte do carregamento permanente - viga de concreto armado (15 x 8 x 150 cm) com armadura longitudinal de quatro barras de 5 mm de diâmetro (aço CA-60B) e 15 estribos com 4,2 mm de diâmetro espaçados de 10 cm;
- i) cabo de sustentação do carregamento - aço com 4 mm de diâmetro;
- j) suporte da bandeja - duas barras de aço com 25 mm de diâmetro e 23 cm de comprimento com ranhuras para acomodar o cabo de aço. Ligação através de barras de 8 mm de diâmetro e tensores e pinos de rigidez de 6 mm de diâmetro (aço SAE 1020);
- k) esticador para nivelamento e prumagem, para cabo de 8 mm;
- l) clips e sapatilhas para amarração, para cabo de 4 mm;
- m) pino de suporte do carregamento: barra de 25 mm de diâmetro e 23 cm de comprimento (aço SAE 1020), com ranhuras para acomodar o cabo de aço. Entre o pino e a superfície do concreto, foi colocada uma manta de couro com 2 mm de espessura;
- n) vínculo de 1ª ordem: quatro chapas de aço 60 x 150 x 10 (para as quatro vigas), sobre quatro barras de 25 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, apoiadas em uma chapa de aço 60 x 980 x 16 (aço SAE 1020);
- o) vínculo de 2ª ordem: quatro chapas de aço 60 x 150 x 16 (para as quatro vigas) com reentrância semicircular, sobre uma barra de 25 mm de diâmetro e 960 mm de comprimento, soldada sobre uma chapa de aço 60 x 980 x 16 (aço SAE 1020).

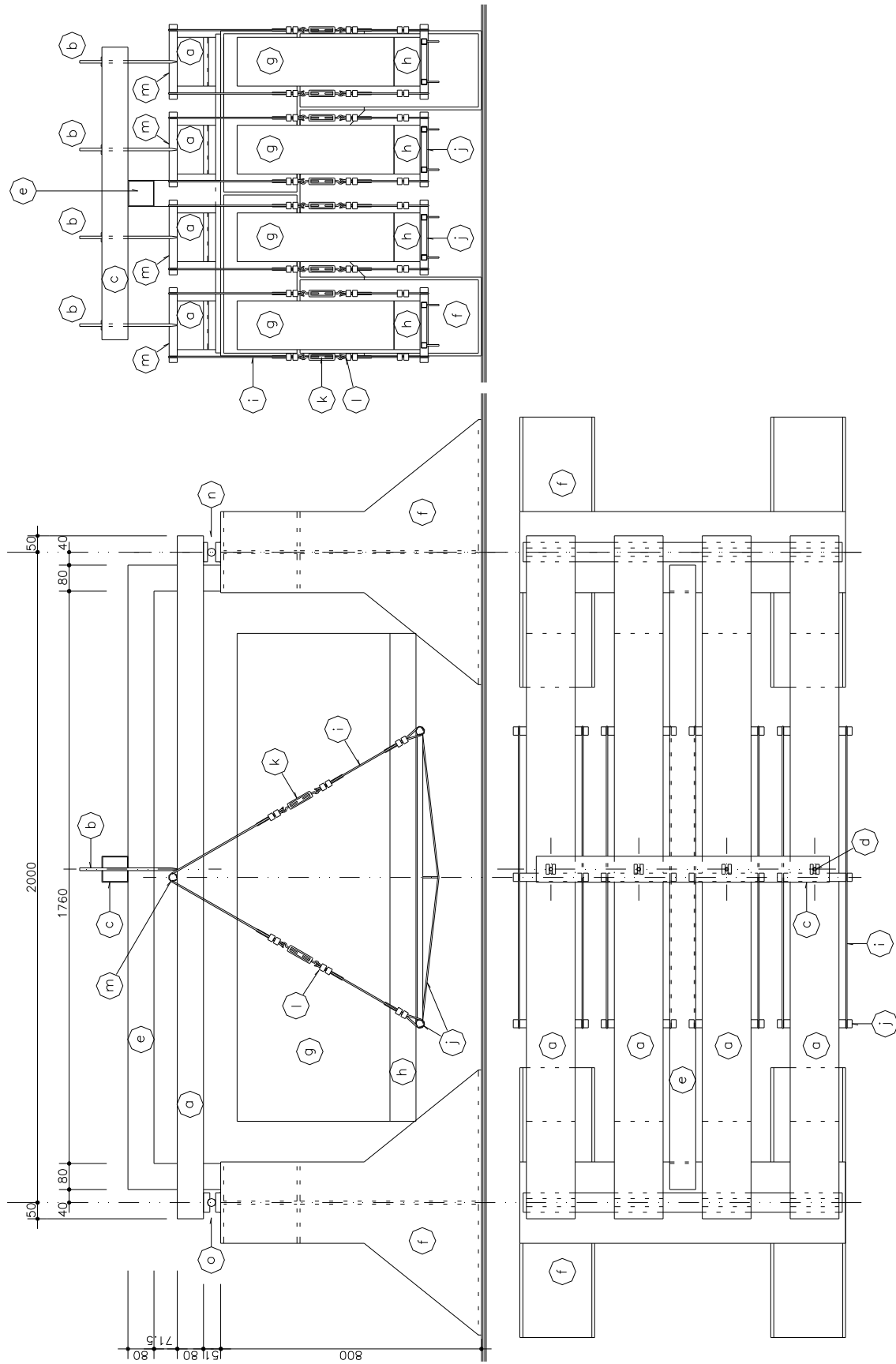
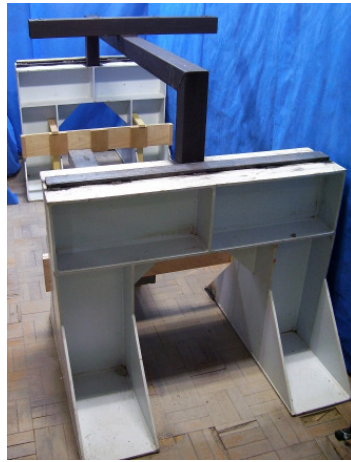


Figura 24: desenho do aparato de ensaio

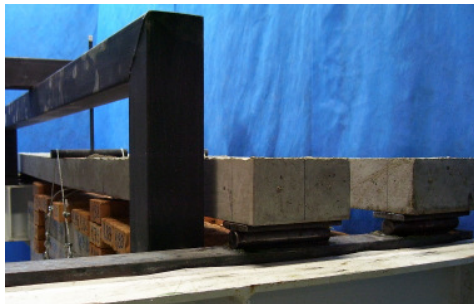
A figura 25 mostra fotos do aparato de ensaio.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25: (a) aparato de ensaio sem as vigas, (b) detalhe dos pinos de medição sobre a superfície das vigas e pino de suporte do carregamento, (c) detalhe do apoio e do pórtico, (d) vista geral do aparato com o máximo de quatro vigas carregadas.

Na figura 26 aparecem os vínculos de 1ª e 2ª ordens.



(a)



(b)

Figura 26: (a) vínculo de 1ª ordem, (b) vínculo de 2ª ordem

4.3.3.1.1 Sistemas de Medição

As flechas foram aferidas com paquímetro digital (modelo Absolute, marca Mitutoyo) com precisão de 0,01mm e são determinadas pela medida diferencial entre o topo do pino (item b da figura 24) e o topo da travessa (item c da figura 24). A figura 27 mostra o modo de medição.



Figura 27: modo de medição das flechas

A temperatura e a umidade relativa do ar no local do ensaio foram acompanhadas por um termo higrômetro digital (modelo HT-208, marca Icel).

Os elementos que compõe o carregamento permanente (itens b, g, h, i, j, k, l e m da figura 24) foram pesados em balança de precisão, e somados até atingir o peso desejado.

4.3.3.2 Ensaio de Pré-carregamento de Curta Duração

O ensaio de pré-carregamento de curta duração é o primeiro experimento desta pesquisa, e teve como objetivo, provocar a microfissuração no concreto em uma idade inicial, através a aplicação de três níveis de carregamento. O concreto deste ensaio foi produzido com cimento

CP V-ARI em decorrência de sua grande utilização nas obras correntes de Porto Alegre e região metropolitana.

4.3.3.2.1 Forma de Carregamento

Foram produzidas cinco vigas em concreto armado de características idênticas (geometria, material, processo de execução e exposição ao ambiente), com objetivo de eliminar da análise comparativa, qualquer influência destes fatores. As vigas foram numeradas sequencialmente de um a cinco.

Aos três dias de idade, a viga V1 foi submetida a um carregamento concentrado no centro do vão, até atingir o esgotamento de sua capacidade de carga. A partir deste valor, foram determinados os valores dos pré-carregamentos de curta duração das vigas V2, V3 e V4, que foram respectivamente 32%, 64% e 96% da carga de ruptura da viga V1, igualmente aplicados aos três dias de idade. A viga V5 não sofreu nenhum tipo de pré-carregamento, sendo considerada como viga de controle ou viga testemunho. A partir dos 28 dias iniciou-se o carregamento permanente com uma carga concentrada no centro do vão, de modo a solicitar a seção central da viga com o momento fletor de projeto.

4.3.3.2.2 Dimensionamento das Vigas

As vigas ensaiadas apresentam seção transversal e vão conforme os padrões adotados neste projeto e descritos no item 4.3.1. As armaduras também obedecem estes padrões, com três barras de aço CA-50A de 6,3 mm de diâmetro, dispostas longitudinalmente, e onze barras de aço CA-60B de 4,2 mm de diâmetro, espaçadas a cada vinte centímetros, dispostas transversalmente. O dimensionamento proposto tem como objetivo atingir um carregamento de projeto que não ultrapasse 3,35 kN (335 kgf) (carga concentrada máxima aplicável dentro do espaço disponível no aparato de ensaio), falha por flexão que dispensa o uso de armadura transversal, e permitir a obtenção de flechas iniciais próximas de 10 mm, para que os valores das flechas não ultrapassem a precisão do equipamento de leitura. Foram utilizados espaçadores de argamassa de 16 mm fixados na armadura de distribuição, resultando em

cobrimento da armadura longitudinal de 9,7 mm. A configuração dos protótipos pode ser visualizada na figura 28.

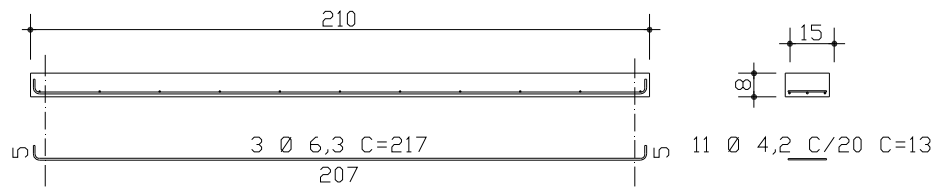


Figura 28: dimensões das vigas e armadura utilizada

4.3.3.2.3 Preparo dos Protótipos

O preparo da armadura, as fôrmas e a cura inicial podem ser vistas na figura 29.

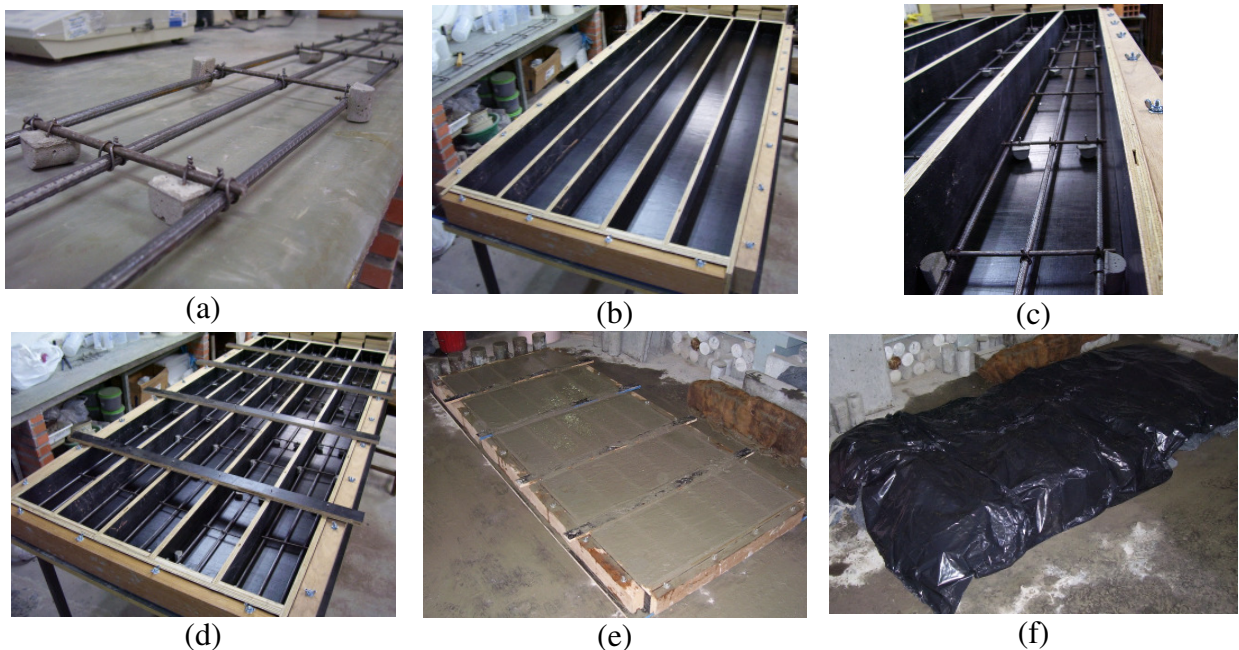


Figura 29: (a) armadura, (b) fôrma, (c) fôrma e armadura, (d) fôrma e armadura concluídas, (e) vigas concretadas (f) cura inicial.

4.3.3.2.4 Pré-carregamento de Curta Duração

O pré-carregamento foi aplicado aos três dias de idade sob a forma de uma carga concentrada no centro do vão. As vigas foram apoiadas de modo isostático nas extremidades através de um

perfil I de aço encarregado de transmitir as reações à base da prensa. O carregamento foi aplicado a uma velocidade de 4,0 kN por minuto, permanecendo constante, no seu valor máximo, por até dois minutos.

As vigas receberam os seguintes tratamentos:

- a) a viga V1 foi carregada até se obter o esgotamento de sua capacidade. A carga necessária foi de 7,8 kN. Este valor serviu de referência para as demais, sendo a viga descartada após este ensaio;
- b) a viga V2 recebeu um pré-carregamento de 2,5 kN (32% da carga de ruptura da V1).
- c) a viga V3 recebeu um pré-carregamento de 5,0 kN (64% da carga de ruptura da V1);
- d) a viga V4 recebeu um pré-carregamento de 7,5 kN (96% da carga de ruptura da V1);
- e) a viga V5 não recebeu nenhum carregamento (viga de controle ou viga testemunho).

A flecha da viga V1, medida no momento da ruptura, foi da ordem de 4,9 cm, sendo que a avaliação aproximada da flecha imediata, calculada de acordo com a NBR 6118/2003 (baseado em Branson, 1965), seria da ordem de 2,6cm, considerando:

- a) $f_{ck}=f_{c(03)}=25,7$ MPa;
- b) $(EI)_{eq}=530.000\text{kN.cm}^2$ ($E_{cs}=2.413\text{kN/cm}^2$; $M_r=41,8\text{kN.cm}$; $M_a=405\text{kN.cm}$; $I_c=640\text{cm}^4$; $I_{II}=219\text{cm}^4$; $E_s=21.000\text{kN/cm}^2$);
- c) $b_w=15\text{cm}$;
- d) $h=8\text{cm}$;
- e) $d=6,715\text{cm}$.

A tabela 10 apresenta os valores da carga concentrada no centro do vão (P), o momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$), considerando também o peso próprio da viga, a flecha esperada calculada de acordo com a NBR 6118/2003, a flecha medida no instante da aplicação da carga máxima e a flecha residual medida imediatamente após a retirada do carregamento.

Tabela 10: resultados obtidos no pré-carregamento

	%	Carga P	M _{máx}	Flecha esperada	Flecha medida	Flecha residual
		(kN)	(kN.cm)	NBR 6118/2003 (cm)	(cm)	(cm)
V2	32	2,5	140	0,9	1,0	0,4
V3	64	5,0	265	1,7	2,1	0,6
V4	96	7,5	390	2,5	4,0	2,3

O valor da flecha calculada de acordo com a NBR 6118/2003 da viga V4 diferiu bastante do valor obtido experimentalmente, em decorrência da carga aplicada ser muito superior a uma situação de projeto, objeto desta Norma.

Após o pré-carregamento, as vigas permaneceram em ambiente de laboratório até os vinte e oito dias de idade. As vigas foram acomodadas com a deformação obtida após a retirada do pré-carregamento e mantidas na posição deformada, com apoios nas extremidades e nos terços do vão, ajustados à configuração deformada existente. O objetivo deste procedimento foi de simular um reescoramento, de modo que nem a deformação residual aumente em decorrência da ação do peso próprio da viga e nem a viga seja forçada pelo peso próprio a diminuir a deformação oriunda do pré-carregamento.

A figura 30 mostra fotos do pré-carregamento e as vigas depositadas no laboratório.

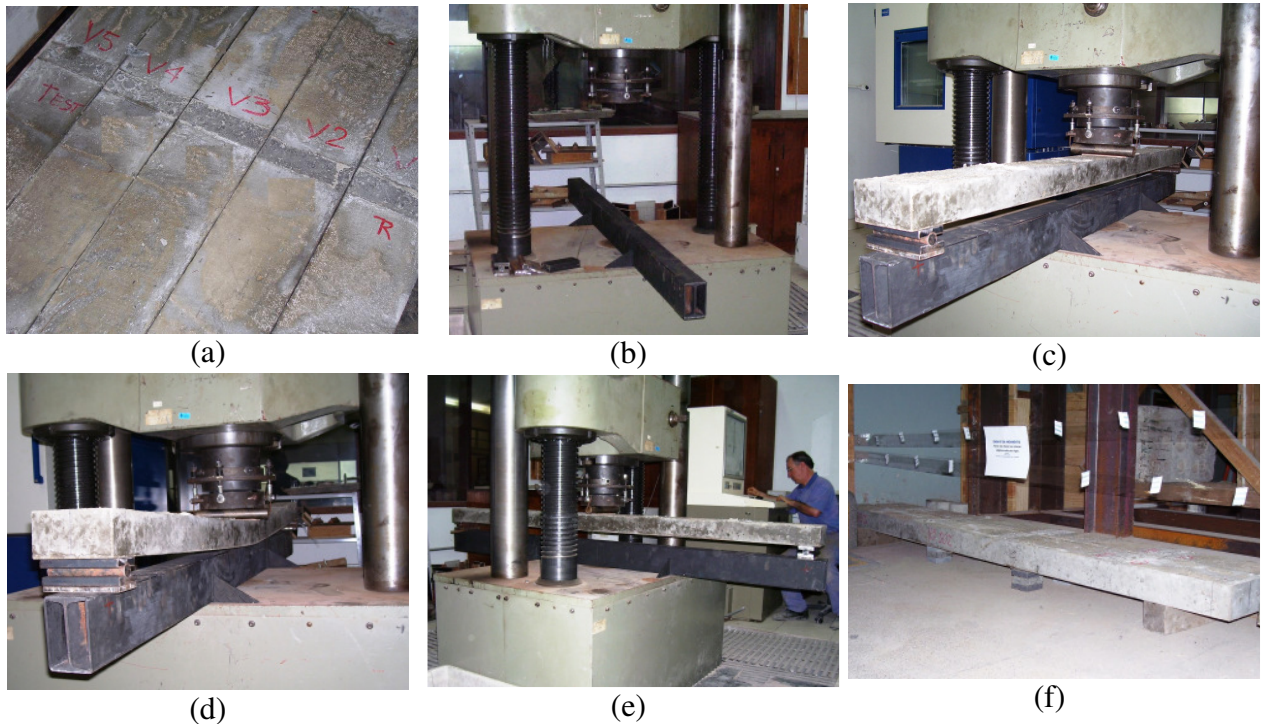


Figura 30: (a) vigas após a desforma, (b) perfil I sobre a prensa, (c) viga V1 antes do carregamento, (d) viga V1 no final do carregamento, (e) pré-carregamento da viga V2, (f) vigas acomodadas após o pré-carregamento.

A figura 31 mostra a viga V1 no instante do esgotamento da capacidade de carga da viga, destacando que a linha vertical que aparece na foto foi riscada para indicar a posição central exata de aplicação do carregamento.



Figura 31: viga V1 no instante do esgotamento da capacidade de carga da viga

4.3.3.2.5 Carregamento de Permanente

O carregamento permanente foi aplicado aos vinte e oito dias e seu valor é o equivalente à carga necessária para provocar um momento fletor máximo de projeto, aplicando-se todos os coeficientes de segurança determinados pela NBR 6118/2003. Para calcular o momento fletor máximo de projeto resistido pela viga, foram considerados os seguintes valores:

a) $f_{ck} = f_{c(28)} = 39,43 \text{ Mpa}$;

b) $A_s = 0,94 \text{ cm}^2$;

c) $b_w = 15 \text{ cm}$;

d) $d = 6,715 \text{ cm}$

e) $f_{yk} = 500 \text{ Mpa}$.

O momento fletor último de projeto resultante é igual a 178 kN.cm, o qual corresponde a 3,26 kN (326 kgf) de carga concentrada no centro do vão, considerando a carga distribuída referente ao peso próprio da viga. Este carregamento foi aplicado em etapas de 0,4 kN (40 kgf) (aproximadamente), e foram medidas as flechas a cada nível intermediário de carga.

A figura 32 mostra alguns detalhes das vigas carregadas aos 28 dias.

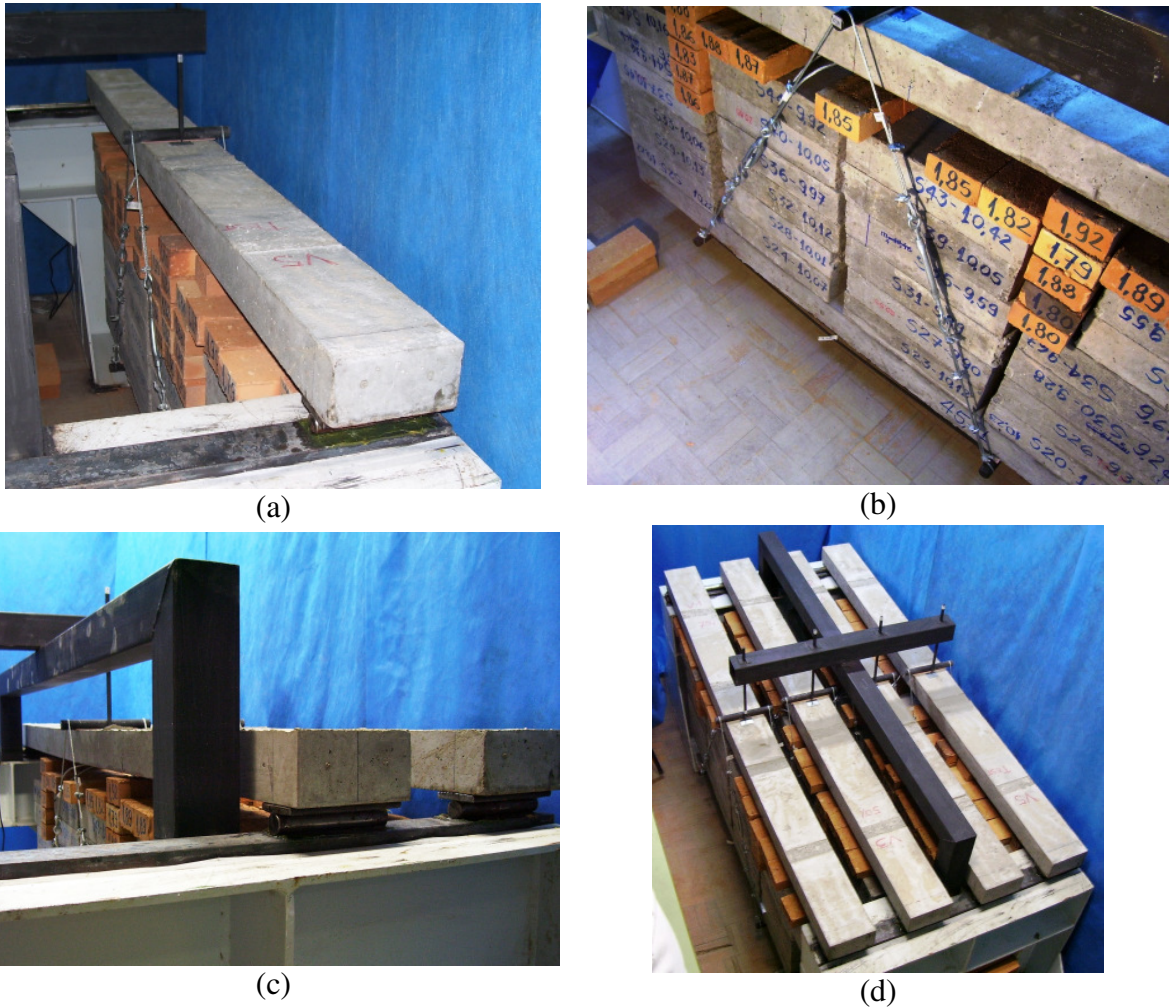


Figura 32: (a) viga V5, (b) viga V2, (c) vigas V5 e V2, (d) vigas V5, V2, V3 e V4.

Na figura 33 é possível observar as condições de fissuração da viga V4 (96%) no centro do vão, antes da aplicação do carregamento permanente. Este estado é proveniente do pré-carregamento aplicado aos três dias de idade. É possível observar que além das fissuras na zona tracionada, o banzo comprimido também apresenta comprometimento no centro do vão.



Figura 33: estado da viga V4 (96%) antes do carregamento permanente

4.3.3.3 Ensaio de Pré-carregamento de Longa Duração

Os ensaios de pré-carregamento de longa duração fazem parte da continuidade da investigação experimental, e foram definidos em função da necessidade observada de reproduzir uma condição real de obra, mantendo abertas as fissuras e dificultando o crescimento dos cristais que possam proporcionar uma possível regeneração da matriz cimentícia do concreto.

Este experimento foi dividido em duas etapas, uma utilizando concreto produzido com cimento CP V-ARI e outra utilizando cimento CP IV-32RS. A adoção de um segundo tipo de cimento se deu em função da necessidade de testar o pré-carregamento com um cimento que tenha ganho de resistência mecânica mais lenta, visto que o cimento CP V-ARI, com um dia de idade, apresentou aproximadamente 60% da resistência à compressão esperada para os 28 dias, e o CP IV-32RS apenas 23%, conforme observado nos resultados dos ensaio apresentados no item 4.3.2.5.4 deste trabalho.

4.3.3.3.1 Forma de Carregamento

Foram produzidas três vigas em concreto armado de características idênticas (geometria, material, processo de execução e exposição ao ambiente), com o objetivo de eliminar da análise comparativa qualquer influência destes fatores. Duas vigas foram carregadas conforme níveis e idades de acordo com dois ciclos de execução. A terceira viga recebeu o carregamento aos 28 dias de idade, sendo considerada viga de controle ou viga testemunho.

As idades adotadas foram de acordo com ciclos de execução de 4 e 7 dias, ou seja, um pavimento executado a cada 4 e 7 dias, respectivamente. Estes ciclos foram adotados tendo em vista que um representa uma situação limite de rapidez e agressividade (ciclo de 4 dias) e o outro, apesar de ser um ciclo rápido, é mais comumente utilizado em obras correntes observadas, principalmente, em Porto Alegre e região metropolitana (ciclo de 7 dias).

Os níveis de carregamento foram determinados conforme os fatores de carga construtiva (k) propostos por França (2005) e Krundy e Kabaila (1963), para o pavimento mais desfavorável (pavimento 3), tendo em vista que estes fatores foram analisados para os mesmos ciclos propostos (4 e 7 dias respectivamente).

As vigas foram numeradas de acordo com os ciclos de execução: V4d (ciclo de 4 dias), V7d (ciclo de 7 dias) e V28d (viga de controle ou viga testemunho). Esta última é tida como representante de um carregamento aplicado na idade prevista em projeto (28 dias), ou seja, idade na qual os materiais constituintes do concreto apresentam as propriedades mecânicas consideradas no cálculo da estrutura. A partir dos 28 dias as três vigas passaram a ser submetidas ao mesmo carregamento permanente.

As idades de aplicação seguiram os cronogramas físicos propostos por França (2005), para ciclos de 4 dias, e uma adaptação do cronograma proposto por Zorzi (2002), para ciclos de 7 dias, porém com um jogo a menos de reescoramento, para que seja possível utilizar os fatores k propostos por Krundy e Kabaila (1963). Os cronogramas são apresentados a seguir.

Para facilitar a compreensão, os andares de uma edificação hipotética serão numerados sequencialmente e o pavimento 3, objeto deste estudo, será considerado como pavimento “n”, sendo os anteriores “n-x” e os posteriores “n+x”. A figura 34 apresenta esquematicamente estas denominações.

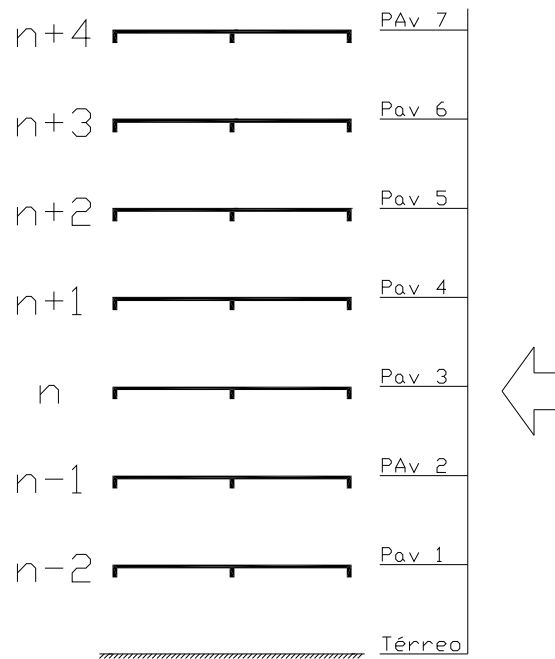


Figura 34: nomenclatura dos pavimentos

Para o cronograma físico proposto por França (2005), referente ao ciclo de 4 dias, foram considerados um jogo de escoramento e dois jogos de reescoramento¹⁰, e os eventos críticos foram os dias de concretagem e o dia de retirada de todo reescoramento. Para cada evento crítico, corresponderá a um fator de carga construtiva (k) a que o pavimento em estudo foi submetido.

De maneira simplificada, as atividades estão listadas a seguir:

- i : início das fôrmas;
- ii : reescoramento das vigas e lajes;
- iii : retirada de todo reescoramento (evento crítico);
- iv : término das fôrmas e início da armação;
- v : término da armação e embutidos;
- vi : concretagem (evento crítico).

¹⁰ O reescoramento proposto, pressupõe a substituição do escoramento de forma gradual e criteriosa.

Este ciclo prevê 6 dias de trabalho por semana, com folga apenas aos domingos. Na tabela 11, são indicadas cada atividade no seu respectivo pavimento e idade.

Tabela 11: cronograma físico para o ciclo de 4 dias

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda	Terça	
Idade	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
n + 4																i	7
n + 3										i	iv	v			vi	ii	6
n + 2						i	iv	v	vi	ii							5
n + 1		i	iv	v	vi	ii										iii	4
n	vi	ii								iii							3
n - 1						iii											2
n - 2		iii															1
																	Tér.

No cronograma da tabela 11 é possível observar que na idade zero, ocorreu a concretagem do pavimento “n” (pav. 3), objeto deste estudo. Na idade 1 foi retirado todo reescoramento do pavimento “n-2” (pav. 1) e foram reescoradas as vigas e lajes do pavimento “n” (pav. 3), iniciando as fôrmas do pavimento “n+1” (pav. 4). Na idade 2 foram concluídas as fôrmas e iniciada a armação do pavimento “n+1” (pav. 4). Na idade 3 foi concluída a armação e os embutidos do pavimento “n+1” (pav. 4). Na idade 4 foi concretado o pavimento “n+1” (pav. 4). É possível observar, também, que na idade 15 foi retirado todo o reescoramento do pavimento “n+1” (pav. 4). Desta forma, a partir deste momento, o pavimento “n” (pav. 3) deixa de ter vinculação com os demais, sendo submetido somente à ação do seu próprio peso ($k=1$).

As idades em que ocorrem os eventos críticos são 1, 4, 5, 9, 10, 14, 15.

O ciclo de 4 dias apresenta dificuldade para concretagem das vigas, tendo em vista que os pilares são concretados na mesma etapa.

Para o cronograma físico proposto por Zorzi (2002), referente ao ciclo de 7 dias, foram considerados um jogo de escoramento e dois jogos de reescoramento, e os eventos críticos foram os dias de concretagem e o dia de retirada do reescoramento das lajes.

De maneira simplificada, as atividades estão listadas a seguir:

i : início das fôrmas e armação dos pilares;

ii : reescoramento das vigas;

iii : retirada do reescoramento das vigas;

iv : continuação das fôrmas;

v : reescoramento das lajes;

vi : retirada do reescoramento das lajes (evento crítico);

vii : término das fôrmas e concretagem dos pilares;

viii : conferência das fôrmas;

ix : concretagem das vigas e lajes (evento crítico).

Este ciclo prevê 5 dias de trabalho por semana, com folga aos sábados e domingos e as concretagens ocorrem sempre nas sextas-feiras. Na tabela 12, são indicadas cada atividade no seu respectivo pavimento e idade.

Tabela 12: cronograma físico para ciclo de 7 dias

	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda	Terça		
Idade	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
n + 4																									i	iv	7	
n + 3																		i	iv	vii	viii	ix			ii	v	6	
n + 2										i	iv	vii	viii	ix				ii	v							iii	vi	5
n + 1				i	iv	vii	viii	ix		ii	v															iii	vi	4
n	ix			ii	v													iii	vi									3
n - 1										iii	vi																	2
n - 2				iii	vi																							1
																												Tér.

No cronograma da tabela 12 é possível observar que na idade zero, ocorreu a concretagem do pavimento “n” (pav. 3), objeto deste estudo. Na idade 3 foi retirado o reescoramento das vigas do pavimento “n-2” (pav. 1) e foram reescoradas as vigas do pavimento “n” (pav. 3), iniciando as fôrmas e armação dos pilares do pavimento “n+1” (pav. 4). Na idade 4 continuaram as fôrmas do pavimento “n+1” (pav. 4), foi retirado o reescoramento das lajes do pavimento “n-2” (pav. 1) e foram reescoradas as lajes do pavimento “n” (pav. 3). Na idade 5 foram concluídas as fôrmas e concretados os pilares do pavimento “n+1” (pav. 4). Na idade 6

foram conferidas as fôrmas, armação e embutidos do pavimento “n+1” (pav. 4). Na idade 7 foi concretado o pavimento “n+1” (pav 4). É possível observar, também, que na idade 25 foi retirado todo o reescoramento das lajes do pavimento “n+1” (pav. 4). Desta forma, a partir deste momento, o pavimento “n” (pav. 3) deixa de ter vinculação com os demais, sendo submetido somente à ação do seu próprio peso ($k=1$).

As idades em que ocorrem os eventos críticos são 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25.

Para facilitar a visualização da seqüência construtiva, a figura 35 mostra a evolução dos pavimentos de acordo com os eventos críticos descritos. As idades, os fatores de carga construtiva para cada ciclo de execução e a identificação da etapa construtiva são mostrados na tabela 13.

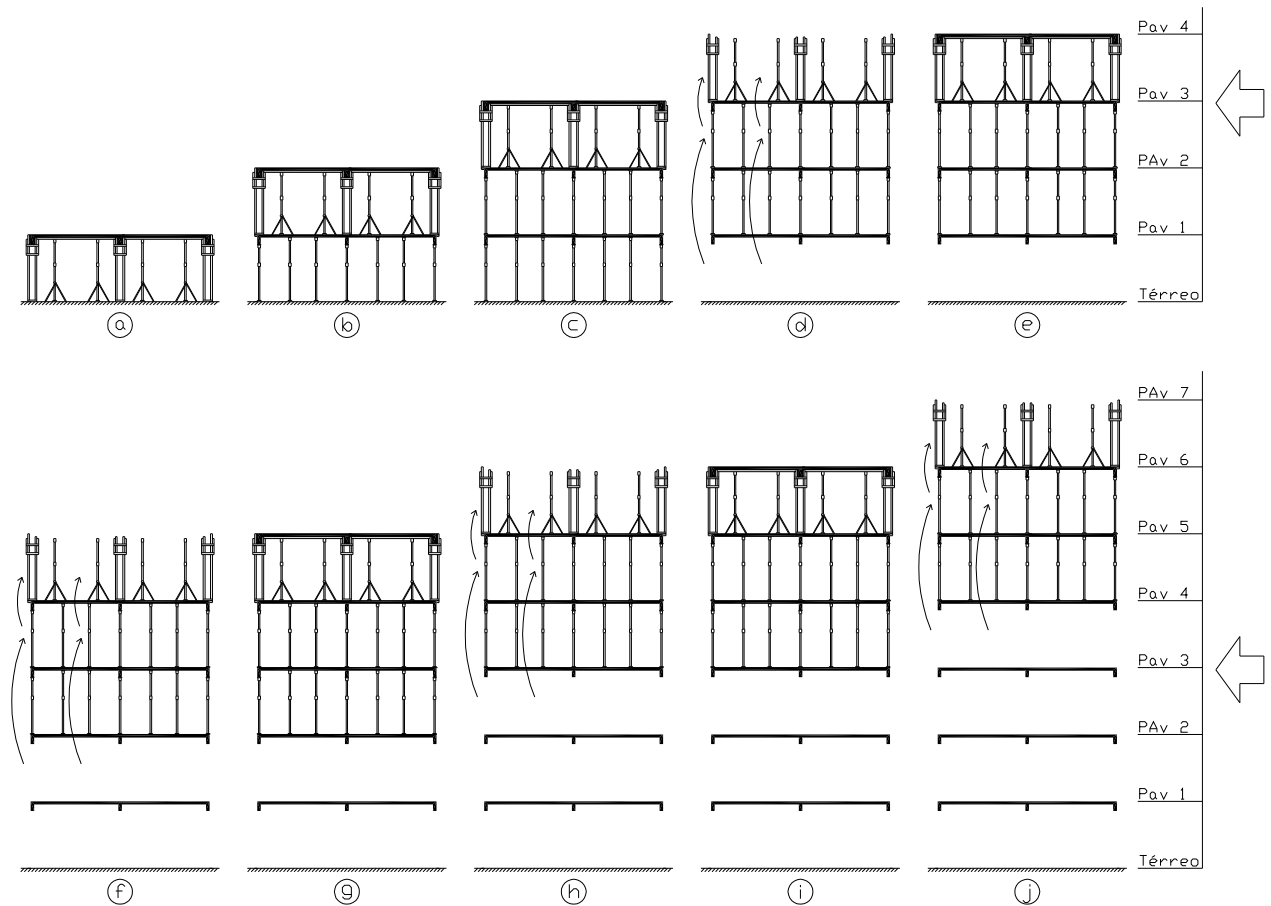


Figura 35: seqüência construtiva genérica

Tabela 13: identificação da seqüência construtiva com as idades e os fatores k para os ciclos de execução adotados

Identificação da seqüência construtiva na figura 35		d	e	f	g	h	i	j
Ciclo de 4 dias	Idade (dias)	1	4	5	9	10	14	15
	Fator k	0,62	0,91	1,14	1,48	1,92	2,29	1,00
Ciclo de 7 dias	Idade (dias)	4	7	11	14	18	21	25
	Fator k	0,88	1,19	1,34	1,68	2,00	2,35	1,00

O fator de carga construtiva $k=1$ corresponde à ação do peso próprio da estrutura do pavimento, não havendo mais ligação com os pavimentos superiores através das escoras.

4.3.3.3.2 Dimensionamento das Vigas

As vigas ensaiadas apresentam seção transversal e vão conforme os padrões adotados neste projeto e descritos no item 4.3.1. As armaduras também obedecem estes padrões, com três barras de aço CA-60B de 5,0 mm de diâmetro, dispostas longitudinalmente, e quatorze barras de aço CA-60B de 4,2 mm de diâmetro, espaçadas a cada quinze centímetros, dispostas transversalmente. Este dimensionamento tem como objetivo atingir um carregamento máximo que não ultrapasse 3,35 kN (335 kgf) (carga concentrada máxima aplicável dentro do espaço disponível no aparato de ensaio), falha por flexão que dispensa o uso de armadura transversal, e permitir a obtenção de flechas nas primeiras idades próximas de 10 mm para que os valores das flechas não ultrapassem a precisão do equipamento de leitura. Foram utilizados espaçadores de argamassa de 15 mm fixados na armadura de distribuição, resultando em cobertura da armadura longitudinal de 10 mm. A configuração dos protótipos pode ser visualizada na figura 36.

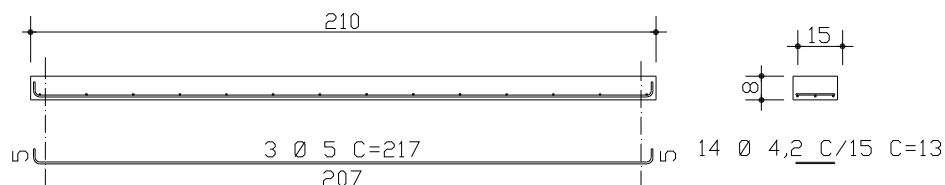


Figura 36: dimensões das vigas e armadura utilizada

4.3.3.3.3 *Preparo dos Protótipos*

Neste experimento, além dos cuidados já tomados no ensaio anterior, foi necessária a produção de fôrmas de madeira individuais, para que as vigas pudessem ser transportadas do local de moldagem ao local do ensaio, sem sofrer deformações decorrentes da ação do peso próprio. Para isso, foram utilizadas chapas de madeira compensada plastificada, reforçada com ripas. O referido transporte foi feito manualmente.

A desforma das vigas foi realizada no local do ensaio e as leituras iniciais (flecha zero) foram feitas antes da retirada das fôrmas. Para isso foram posicionadas, niveladas e ajustadas ainda sob a guarda da estrutura provisória de madeira. Para permitir este procedimento, foi deixado um fundo móvel nas extremidades, equivalente ao espaço necessário para ajustar a superfície de concreto, no fundo da viga, nos aparelhos de apoio do aparato de ensaio.

A figura 37 apresenta um desenho da fôrma utilizada. Suas especificações gerais são:

- a) fundo móvel;
- b) ripas de cedrinho 2,5 x 2,5 cm;
- c) fundo da fôrma de compensado plastificado com 14 mm de espessura;
- d) laterais da fôrma de compensado plastificado com 14 mm de espessura;
- e) barra rosqueada, arruela lisa e porca borboleta, de 6,3 mm.

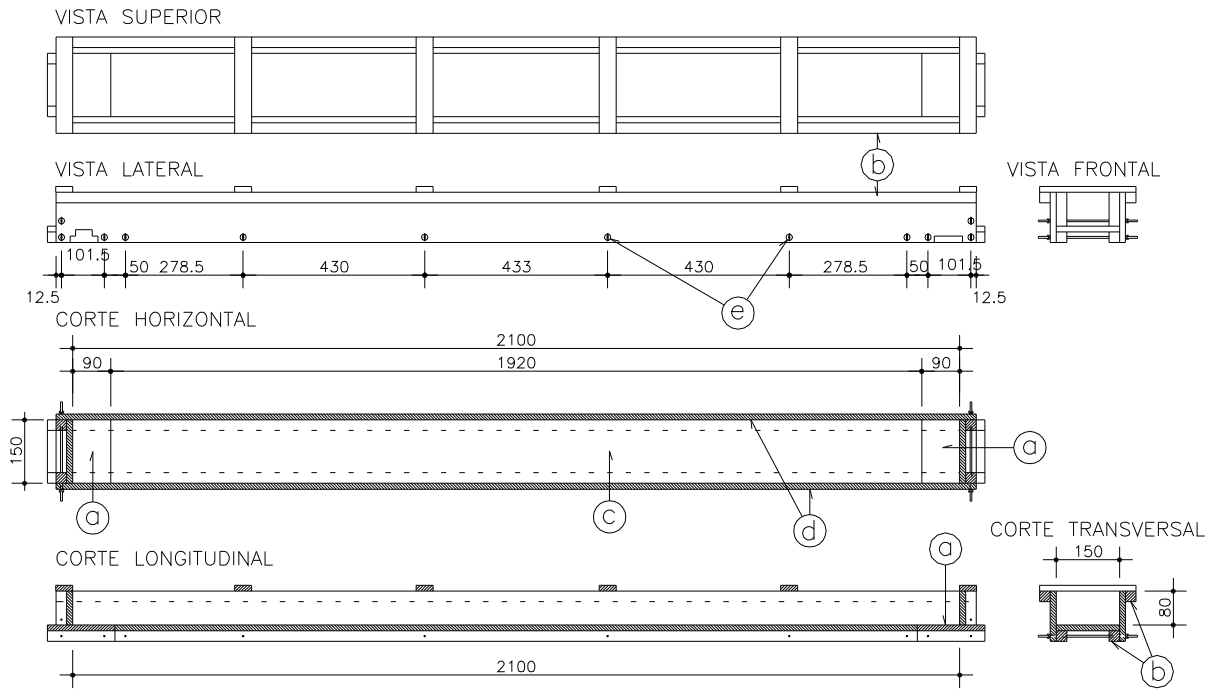


Figura 37: desenho da fôrma

O preparo da armadura, as fôrmas e a cura inicial podem ser vistas na figura 38.

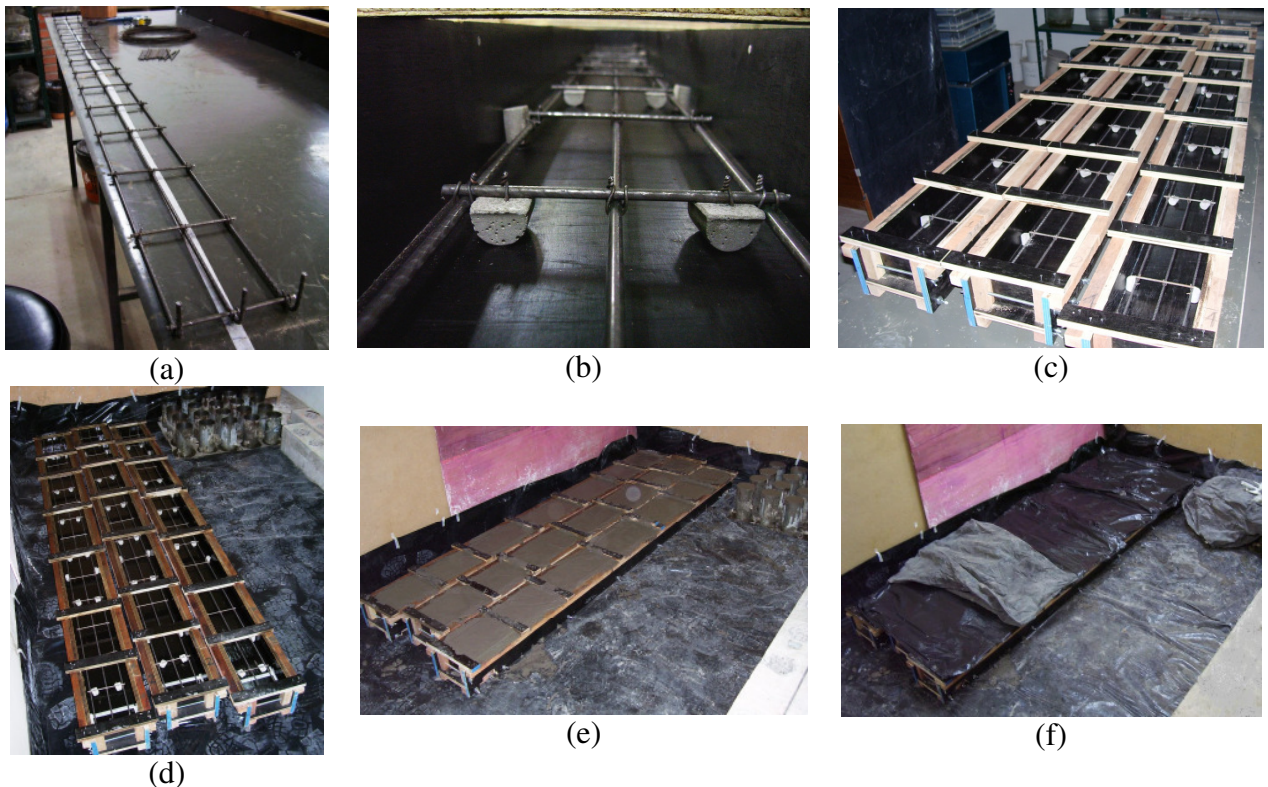


Figura 38: (a) armadura, (b) armadura dentro da fôrma, (c) fôrma e armadura concluídas, (d) fôrmas, armadura e corpos-de-prova no local de moldagem, (e) concretagem concluída, (f) cura inicial das vigas e dos corpos-de-prova.

4.3.3.3.4 Pré-carregamento de Longa Duração e Carregamento Permanente

Os carregamentos dependem dos valores correspondentes aos fatores de carga construtiva apresentados no item 4.3.3.3.1. Para isso, é necessário saber que fração do carregamento total de projeto corresponde ao peso próprio da estrutura ($k=1$).

Para determinar o carregamento total de projeto, foram considerados os seguintes critérios:

- a) edificação residencial;
- b) estrutura de concreto armado *moldado in loco*;
- c) sistema estrutural composto por vigas, lajes e pilares;
- d) paredes externas de tijolos furados e internas de divisórias leves (exemplo: gesso acartonado).

Para esta configuração de edificação, as cargas médias seriam próximas dos seguintes valores:

- a) peso próprio da estrutura (espessura média das lajes = 18 cm): 4,5 kN/m² (450 kgf/m²);
- b) carga accidental: 1,5 kN/m² (150 kgf/m²);
- c) revestimento dos pisos: 0,8 kN/m² (80 kgf/m²);
- d) paredes: 2,2 kN/m² (220 kgf/m²).

O carregamento de projeto totaliza 9 kN/m² (900 kgf/m²). O fator de carga construtiva $k=1$, que corresponde ao peso próprio da estrutura do pavimento, totaliza 4,5 kN/m² (450 kgf/m²). Desta forma, o carregamento de projeto equivale a $k=2$, sendo este o fator correspondente à carga necessária para provocar um momento fletor máximo de projeto, aplicando-se todos os coeficientes de segurança determinados pela NBR 6118/2003.

Esta configuração não busca um valor de carregamento específico para uma determinada edificação. A soma do carregamento equivalente aos revestimentos dos pisos e das paredes (3 kN/m²), para um sistema de construção racionalizada, abrange outros tipos de edificação. Pode-se citar, como exemplo, edificações que utilizam contra-piso zero, piso do tipo *carpet* e alvenarias de tijolos furados ou bloco cerâmico vazado nas paredes internas e externas.

O cálculo do momento fletor máximo de projeto foi realizado através da verificação do momento fletor último resistido pela seção transversal de concreto e pela armadura, adotando critérios de projeto, ou seja, aplicando todos os coeficientes de segurança determinados pela NBR 6118/2003. Para determinar o valor da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), foram adotados os valores de f_c médios obtidos em corpos-de-prova cilíndricos aos 28 dias de idade, e aplicados os critérios de cálculo de resistência de dosagem, preconizados pela NBR 12655/2006, como se esse fosse o f_{ck} especificado em projeto, através da equação:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (03)$$

logo,

$$f_{ck} = f_{cj} - 1,65 \cdot S_d \quad (04)$$

onde:

f_{cj} é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em MPa;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

S_d é o desvio padrão da dosagem, em MPa.

O desvio padrão a ser adotado depende da condição de preparo do concreto. De acordo com os procedimentos de preparo do concreto adotados neste experimento, o desvio padrão equivale a 4,0 MPa (condição A, tabela 6, item 5.6.3.3 da NBR 12655/2006).

Para o cimento CP V-ARI, o valor de $f_{c(28)\text{médio}}$ foi obtido dos ensaios de crescimento das propriedades mecânicas (item 4.3.2.5.4). Para o cimento CP IV-32RS, o mesmo procedimento não foi possível em decorrência de limitações de prazo para conclusão do trabalho, já que seriam necessários 28 dias para obter a resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos, para a partir daí, iniciar o ensaio com as vigas. Desta forma, optou-se por adotar os resultados obtidos na pesquisa de Vieira (integrante deste projeto de pesquisa), em que foram utilizados os mesmos materiais, o mesmo traço e a mesma relação água/cimento, resultando num $f_{c(28)\text{médio}} = 30,20$ MPa. Os resultados obtidos nos corpos-de-prova de controle foram inferiores, porém os corpos-de-prova feitos junto às vigas ficaram mais próximos.

Na tabela 14 aparecem os valores considerados no cálculo do momento fletor máximo de projeto para cada tipo de cimento.

Tabela 14: cálculo do momento fletor máximo de projeto

	CP V-ARI	CP IV-32RS
$f_{c(28)\text{médio}}$ (MPa)	32,68	30,20
S_d (MPa)	4,00	4,00
f_{ck} (MPa)	26,08	23,60
A_s (cm ²)	0,59	0,59
b_w (cm)	15	15
d (cm)	6,75	6,75
f_{yk} (MPa)	600	600
Tipo de aço	B	B
M (kN.cm)	134,00	132,00

onde:

- a) $f_{c(28)\text{médio}}$ é a resistência média do concreto à compressão aos 28 dias de idade;
- b) A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal de tração;
- c) b_w é a largura da alma da viga;
- d) d é a altura útil da viga;
- e) f_{yk} é resistência característica ao escoamento do aço de armadura passiva;
- f) M é o momento fletor último resistido pela viga, para $k=2$.

Para cada fator de carga construtiva (k), corresponde um momento fletor de projeto. O valor calculado anteriormente corresponde a $k=2$. Para $k=1$, o momento será a metade do valor apresentado, sendo esta a razão de proporcionalidade para todos os fatores de carga construtiva.

Para cada momento fletor, há um valor de carga concentrada no centro do vão que provoca esta solicitação máxima, considerando o peso próprio da viga de 0,3 kN/m (30 kgf/m).

Na tabela 15 estão listados os fatores de carga construtiva (k), o momento fletor (M) e a carga concentrada no centro do vão (P) correspondentes, para cada tipo de cimento. Estão listadas também as idades de aplicação do carregamento para cada viga, sendo este o cronograma de aplicação do pré-carregamento de longa duração.

Tabela 15: cronograma de pré-carregamento de longa duração das vigas

		V4d			V7d			V28d		
		Ciclo de 4 dias			Ciclo de 7 dias			Testemunho (28 dias)		
Idade (dias)	k	M (kN.cm)	P (kN)	k	M (kN.cm)	P (kN)	k	M (kN.cm)	P (kN)	
CP V-ARI	1	0,62	41,54	0,53						
	4	0,91	60,97	0,92	0,88	58,96	0,88			
	5	1,14	76,38	1,23						
	7				1,19	79,73	1,29			
	9	1,48	99,16	1,68						
	10	1,92	128,64	2,27						
	11				1,34	89,78	1,50			
	14	2,29	153,43	2,77	1,68	112,56	1,95			
	15	1,00	67,00	1,04						
	18				2,00	134,00	2,38			
	21				2,35	157,45	2,85			
	25				1,00	67,00	1,04			
	28	2,00	134,00	2,38	2,00	134,00	2,38	2,00	134,00	2,38
CP IV-32RS	1	0,62	40,92	0,52						
	4	0,91	60,06	0,90	0,88	58,08	0,86			
	5	1,14	75,24	1,20						
	7				1,19	78,54	1,27			
	9	1,48	97,68	1,65						
	10	1,92	126,72	2,23						
	11				1,34	88,44	1,47			
	14	2,29	151,14	2,72	1,68	110,88	1,92			
	15	1,00	66,00	1,02						
	18				2,00	132,00	2,34			
	21				2,35	155,10	2,80			
	25				1,00	66,00	1,02			
	28	2,00	132,00	2,34	2,00	132,00	2,34	2,00	132,00	2,34

Conforme pode-se observar na tabela 15, todas as vigas passaram a receber o mesmo carregamento a partir dos 28 dias de idade. Esta premissa se apóia em uma pressuposta conclusão das alvenarias e contra-pisos nesta idade, ficando uma carga acidental por conta da movimentação de operários, equipamentos e materiais de obra. Desta forma, poderia se afirmar que a partir desta idade, a estrutura pode estar sendo submetida a todo o carregamento previsto em projeto. Sabe-se, porém, que dificilmente isso ocorreria de maneira permanente, mesmo após a conclusão e ocupação da edificação. No entanto este critério será adotado no

sentido de dar o mesmo tratamento às três vigas a partir de um carregamento e uma idade, objeto dos critérios adotados em projeto conforme a NBR 6118/2003.

A figura 39 mostra o manuseio das vigas no aparato de ensaio.



Figura 39: (a) viga V4d no aparato de ensaio com 1 dia de idade, (b) viga V4d em processo de desforma com 1 dia, (c) viga V4d quase desformada com 1 dia, (d) viga V4d totalmente desformada com 1 dia, (e) viga V4d com o primeiro carregamento com 1 dia, (f) viga V4d em continuidade do processo de cura com 1 dia, (g) vigas V4d e V7d parcialmente carregadas com 4 dias de idade, (h) vigas V4d e V7d totalmente carregadas com 28 dias de idade, (i) vigas V4d, V7d e V28d totalmente carregadas com 28 dias de idade.

4.3.3.4 Extração de Testemunhos

A extração de testemunhos foi realizada observando as prescrições da NBR 7680/2007. Foram extraídos lotes de 10 testemunhos de cada viga. O diâmetro da extração foi de 74,8 mm, e para isso foi utilizada uma broca diamantada com diâmetro externo de 83 mm, da marca Hilti. Os testemunhos foram extraídos perpendicularmente à face superior da viga. Com isso a relação h/d (altura / diâmetro) teve que ser corrigida: $h = 80$ mm; $d = 74,8$ mm; $h/d = 1,07$. Interpolando linearmente, obtém-se um fator de correção de 0,85.

Não foram feitas extrações para as vigas com pré-carregamento de longa duração utilizando o cimento CP IV-32RS, de forma a preservá-las até a idade de 120 dias, já que o cimento CP IV-32RS apresenta ganho de resistência com altas idades e esta característica pode indicar algum caminho futuro a ser investigado.

A extração foi realizada perpendicularmente à face superior da viga, cortando a armadura que foi mantida no testemunho.

Em todas as vigas a extração foi numerada sequencialmente da mesma forma (1 a 10), para que fosse possível realizar uma análise de variância estatística entre as vigas e individualmente com duas repetições, já que as vigas foram submetidas simetricamente a diferenças de tensões ao longo do seu comprimento, por estarem simplesmente apoiadas e simetricamente carregadas.

A resistência à compressão do testemunho é obtida dividindo-se a leitura da força aplicada no instante da ruptura pela área da seção transversal ($43,94 \text{ cm}^2$) e multiplicada pelo fator de correção 0,85. Na figura 40 é possível visualizar os procedimentos de extração, preparo e ruptura dos testemunhos.

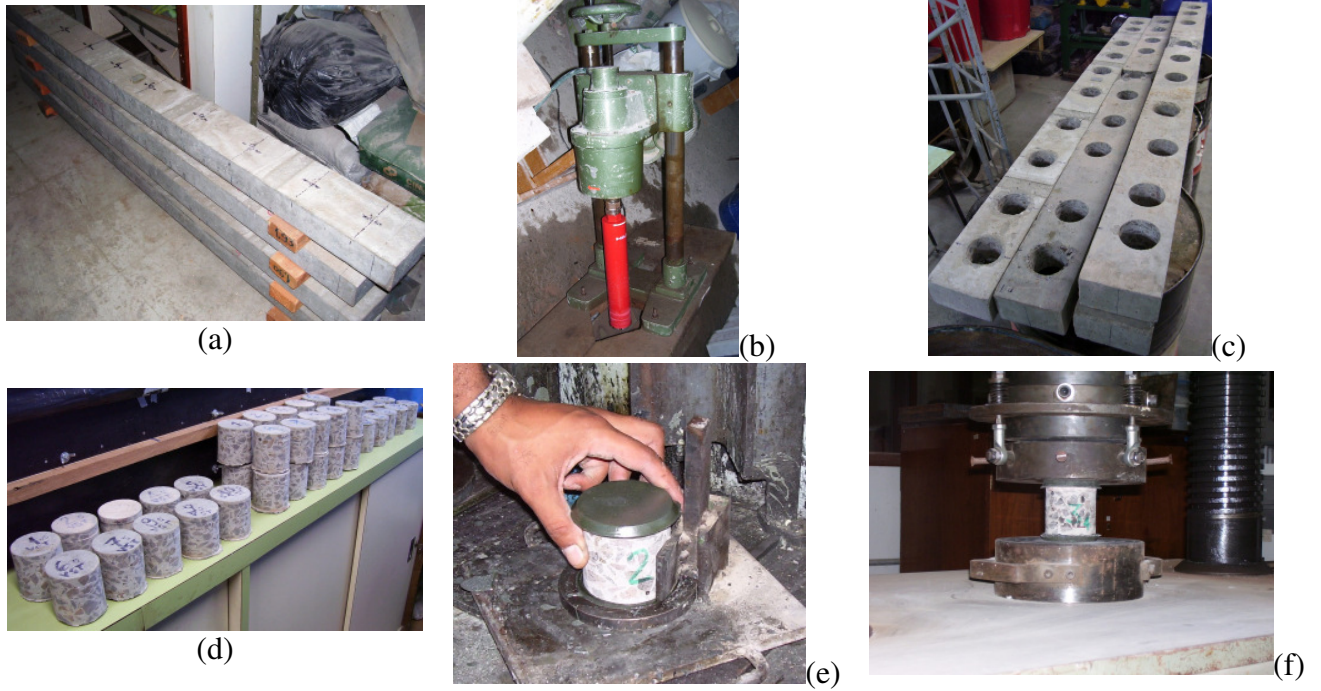


Figura 40: (a) marcação e numeração dos furos nas vigas, (b) equipamento de extração, (c) vigas furadas, (d) testemunhos, (e) capeamento dos testemunhos, (f) ensaio de ruptura à compressão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões dos ensaios de pré-carregamento serão apresentados em duas etapas. A primeira etapa será dedicada ao experimento de pré-carregamento de curta duração e a segunda ao de pré-carregamento de longa duração. Na seqüência serão mostrados os resultados e discussão do ensaio complementar de extração de testemunhos.

5.1 PRÉ-CARREGAMENTO DE CURTA DURAÇÃO

Foram avaliados os resultados da flecha imediata e diferida no tempo até o concreto completar 114 dias de idade.

5.1.1 Flecha Imediata

As flechas imediatas avaliadas neste experimento foram analisadas de duas maneiras. Uma considerando a deformação residual decorrente do pré-carregamento ocorrido aos três dias de idade e outra desconsiderando este evento.

5.1.1.1 Flecha Imediata Considerando a Deformação Residual

Na figura 41 estão plotadas as flechas em função da carga concentrada aplicada no centro do vão e uma estimativa calculada de acordo com a NBR 6118/2003.

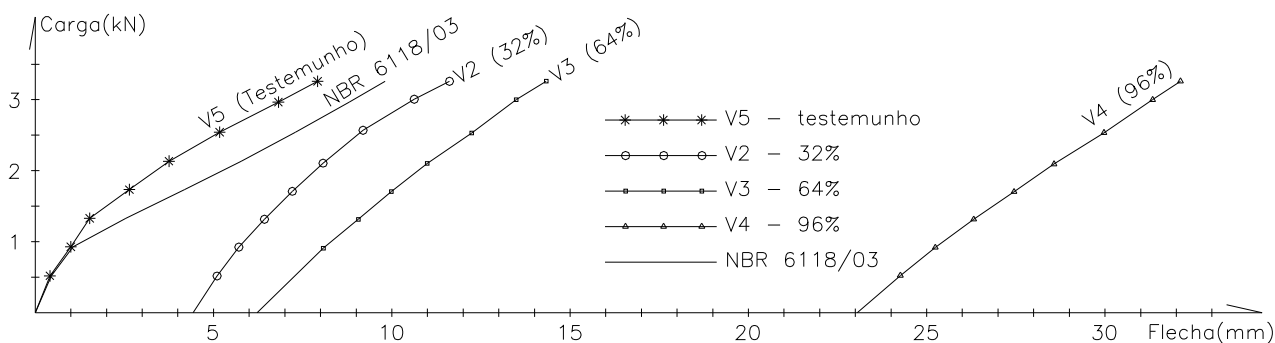


Figura 41: flechas em função da carga concentrada

Observa-se o comportamento da viga V5 (testemunho ou controle) muito próximo da previsão calculada de acordo com a NBR 6118/2003, principalmente até uma carga próxima de 1,0 kN, onde ocorre a mudança do estágio I (viga não fissurada) para o estágio II (viga fissurada). A fissuração, neste estágio de carregamento, foi verificada através de observação visual. A carga concentrada esperada para abertura da primeira fissura era de 0,83 kN, o que corresponde a um momento de fissuração $M_r = 55,6$ kN.cm. Tendo em vista que as formulações preconizadas pela Norma são aproximadas, as diferenças constatadas, a partir dos 1,5 kN de carga, são razoáveis.

As diferenças entre as demais vigas são decorrentes do pré-carregamento aplicado aos três dias de idade. As vigas V3 e V4 receberam um pré-carregamento 153% e 230% maior que a carga permanente, respectivamente, o que explica as deformações residuais elevadas.

5.1.1.2 Flecha Imediata Desconsiderando a Deformação Residual

Na figura 42 estão plotadas as flechas em função da carga concentrada aplicada no centro do vão, desconsiderando a deformação residual. Os valores estão no anexo 1.

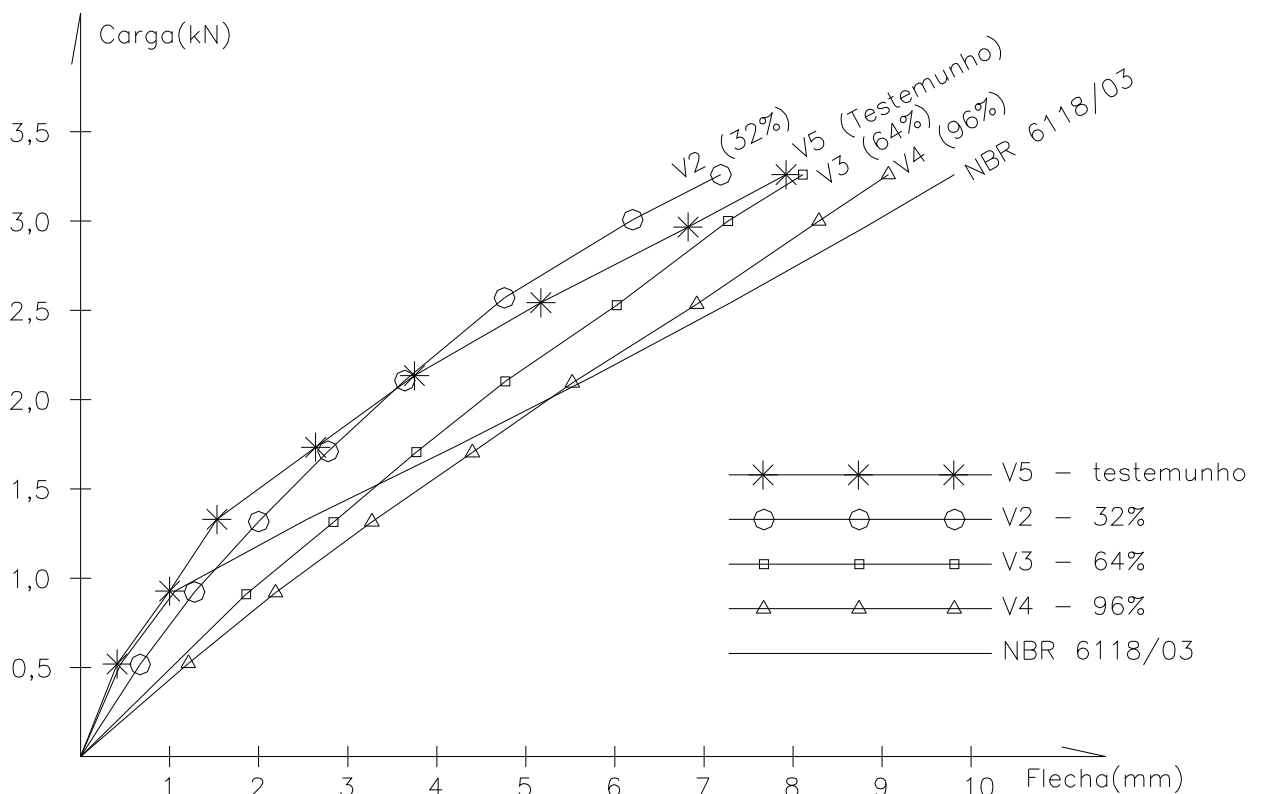


Figura 42: flechas em função da carga concentrada

Apesar de os ensaios terem sido realizados com apenas um corpo-de-prova para cada nível de pré-carregamento, inviabilizando conclusões estatisticamente embasadas, algumas tendências no comportamento podem ser observadas. Considerando-se apenas as flechas a partir da aplicação da carga permanente, é possível observar uma diminuição da rigidez secante na medida em que aumentam os níveis de pré-carregamento. Além disso, parece que, quanto maior o nível de pré-carregamento da viga, mais próximo fica seu comportamento do regime elástico linear, em um fenômeno macroscopicamente semelhante ao de encruamento do aço. Pode-se observar, também, que a rigidez tangente das três vigas que sofreram pré-carregamento aparenta convergir para o mesmo valor a partir de 2 kN de carga, apesar do grau de fissuração bastante diferente experimentados na fase de pré-carregamento. O fato da viga testemunho (V5) apresentar rigidez secante inferior ao da viga com pré-carregamento moderado (V2), praticamente igual ao do pré-carregamento médio (V3) e, principalmente, rigidez tangente final inferior ao de todas as vigas com pré-carregamento (o que conduziria a maiores deformações que as demais vigas em níveis mais altos de carga), não poderia ser definido como uma tendência de comportamento ou como variabilidade natural decorrente dos processos de execução das vigas e ensaio, em função do reduzido número de corpos-de-prova empregados.

5.1.2 Flecha Diferida no Tempo

As flechas diferidas no tempo foram analisadas de duas maneiras. Uma considerando a deformação residual e a inicial, outra considerando apenas a deformação por fluência ou diferida. Esta última é interessante na medida em que desconsidera todo o passado das vigas, uma vez que na prática de uma obra os deslocamentos anteriores são zerados com um simples nivelamento ou uso de contra-flecha no valor equivalente aos deslocamentos residual e inicial.

O carregamento permanente das vigas V3 e V4 iniciou aos 29 dias, por restrições experimentais, visto que a montagem das vigas no aparato de carga é demorada e requer cuidados especiais, não havendo recursos humanos nem equipamentos especiais no laboratório utilizado para carregar as quatro vigas no mesmo dia.

Na Figura 43 são mostrados os resultados das leituras de temperatura e umidade relativa do ar durante o período do ensaio de longa duração.

5.1.2.1 Flecha Diferida no Tempo Considerando a Deformação Residual e a Inicial

Na figura 43a estão plotadas as flechas em função da idade. É interessante observar que as flechas têm seu crescimento desacelerado, ou até mesmo invertido, em períodos que invariavelmente coincidem com os de umidade relativa do ar próximo de 70%, o que confirma os conceitos descritos por Süsserkind (1987), de que o processo de aumento progressivo da deformação por retração é atenuado na presença de ambientes com alta umidade do ar.

5.1.2.2 Flecha Diferida no Tempo Desconsiderando a Deformação Residual e a Inicial

Na figura 43b estão plotadas as flechas em função da idade, desconsiderando toda a deformação inicial e residual das vigas e avaliando somente o incremento depois de atingida a flecha inicial. Os valores estão no anexo 2.

Este gráfico parece sugerir que não há evidências de mudança de comportamento diferido entre as vigas, apesar da enorme diferença de fissuração inicial causada pelo pré-carregamento. É interessante lembrar que a viga V4 foi levada quase à ruptura aos três dias de idade, e a viga V5 recebeu o primeiro carregamento somente aos 28 dias.

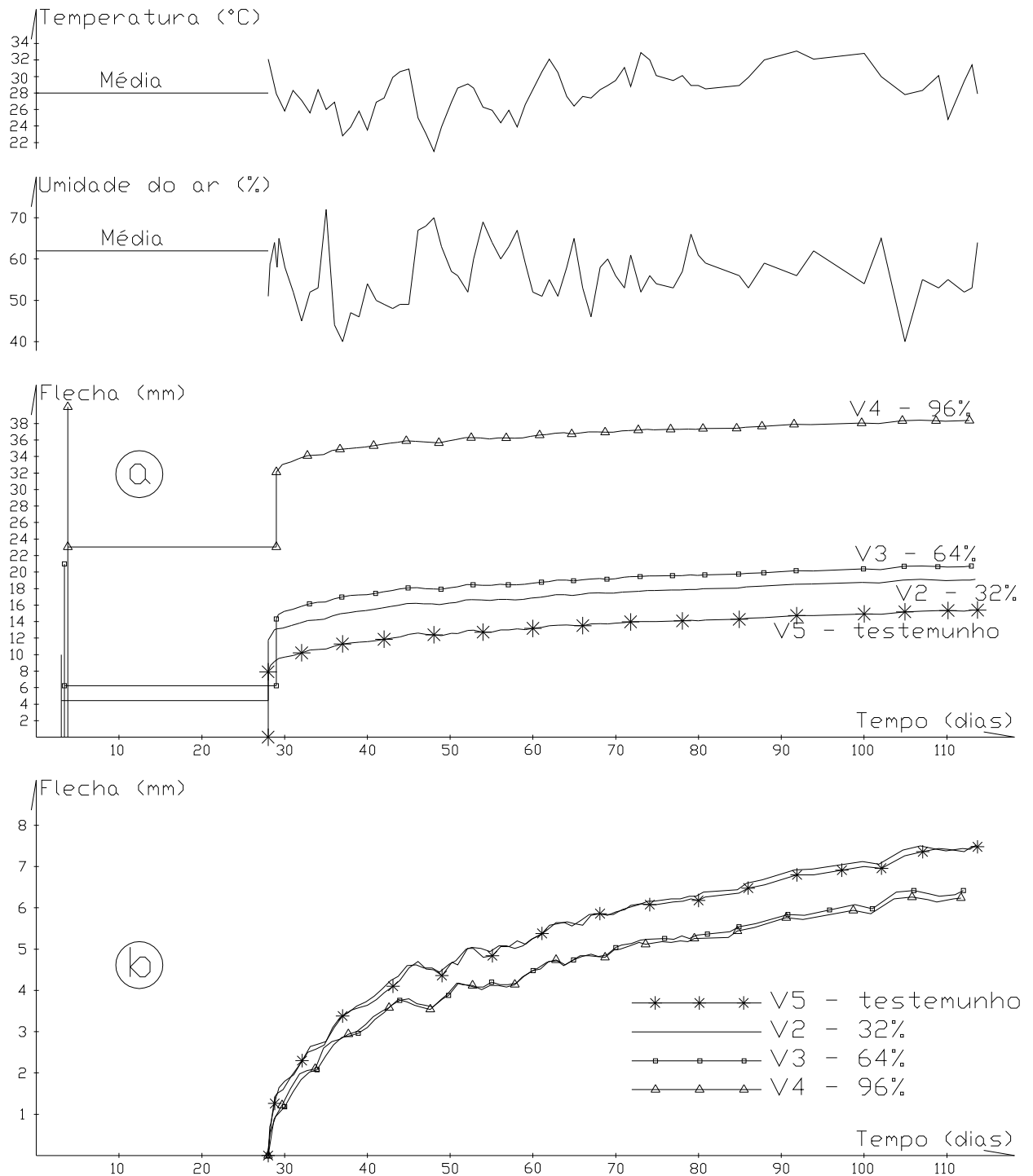


Figura 43: temperatura, umidade relativa do ar e flechas em função da idade

A existência de flechas indica que as fissuras e microfissuras geradas nas idades iniciais pelo pré-carregamento, tanto na parte tracionada como na parte comprimida, não voltam a se fechar perfeitamente após a redução ou remoção total da carga, gerando concentrações de tensões em função do desencaixe das partículas constituintes do concreto que deveriam reduzir a rigidez instantânea, e constituir-se em caminhos preferenciais de percolação de água,

facilitando sua saída, causa principal da deformação por fluência. Contudo, ambos os efeitos não foram observados. Mesmo considerando-se que os efeitos do pré-carregamento sejam minimizados pelo uso do cimento CP V-ARI, visto que com um dia de idade, já havia sido atingida 60% da resistência à compressão esperada aos 28 dias, os resultados obtidos parecem indicar que fenômenos químicos e microestruturais ocorrem após a fissuração nas idades iniciais, que possibilitam a recuperação da resistência mecânica do concreto. Tais fenômenos precisam ser confirmados.

5.1.3 Fissuração

A fissuração foi observada visualmente em uma das laterais das vigas. Na figura 44 aparece o nível de fissuração aparente das quatro vigas após a conclusão do ensaio de longa duração. As fissuras foram marcadas com caneta colorida para facilitar a visualização.



Figura 44: fissuração das vigas após o ensaio de longa duração

É possível observar que os níveis de fissuração aumentaram bastante na medida em que crescem os níveis de pré-carregamento.

5.2 PRÉ-CARREGAMENTO DE LONGA DURAÇÃO

Foram avaliados os resultados da flecha em função do carregamento e flecha em função do tempo, até completar 111 dias de idade, para o concreto produzido com cimento CP V-ARI e 81 dias para o CP IV-32RS.

5.2.1 Flecha em Função do Carregamento

Na figura 45 estão plotadas as flechas em função da carga concentrada aplicada no centro do vão. As alterações nas flechas, sem incremento de carga, são decorrentes da deformação por fluência entre etapas e após o último o carregamento. Os valores estão no anexo 3.

Os gráficos estão organizados seguinte forma:

- a) vigas V4d, V7d e V28d produzidas com cimento CP V-ARI;
- b) vigas V4d, V7d e V28d produzidas com cimento CP IV-32RS;
- c) vigas V4d produzidas com cimento CP V-ARI e CP IV-32RS;
- d) vigas V7d produzidas com cimento CP V-ARI e CP IV-32RS;
- e) vigas V28d produzidas com cimento CP V-ARI e CP IV-32RS;
- f) vigas V4d, V7d e V28d produzidas com cimento CP V-ARI e CP IV-32RS.

Na figura 45e foram incluídas as flechas teóricas calculadas de acordo com a NBR 6118/2003 (baseado em Branson, 1965), sendo que, para o cimento CP V-ARI foi considerado um $f_{ck} = f_{c(28)} = 37,7$ MPa, e para o cimento CP IV-32RS um $f_{ck} = f_{c(28)} = 28,2$ MPa. Estes valores de $f_{c(28)}$ são oriundos dos resultados obtidos nos corpos-de-prova curados em condições semelhantes às das vigas. Observa-se que os resultados experimentais obtidos com as vigas produzidas com cimento CP V-ARI foram semelhantes às flechas esperadas no cálculo teórico. Nas vigas produzidas com cimento CP IV-32RS, as flechas teóricas foram sensivelmente maiores que as experimentais.

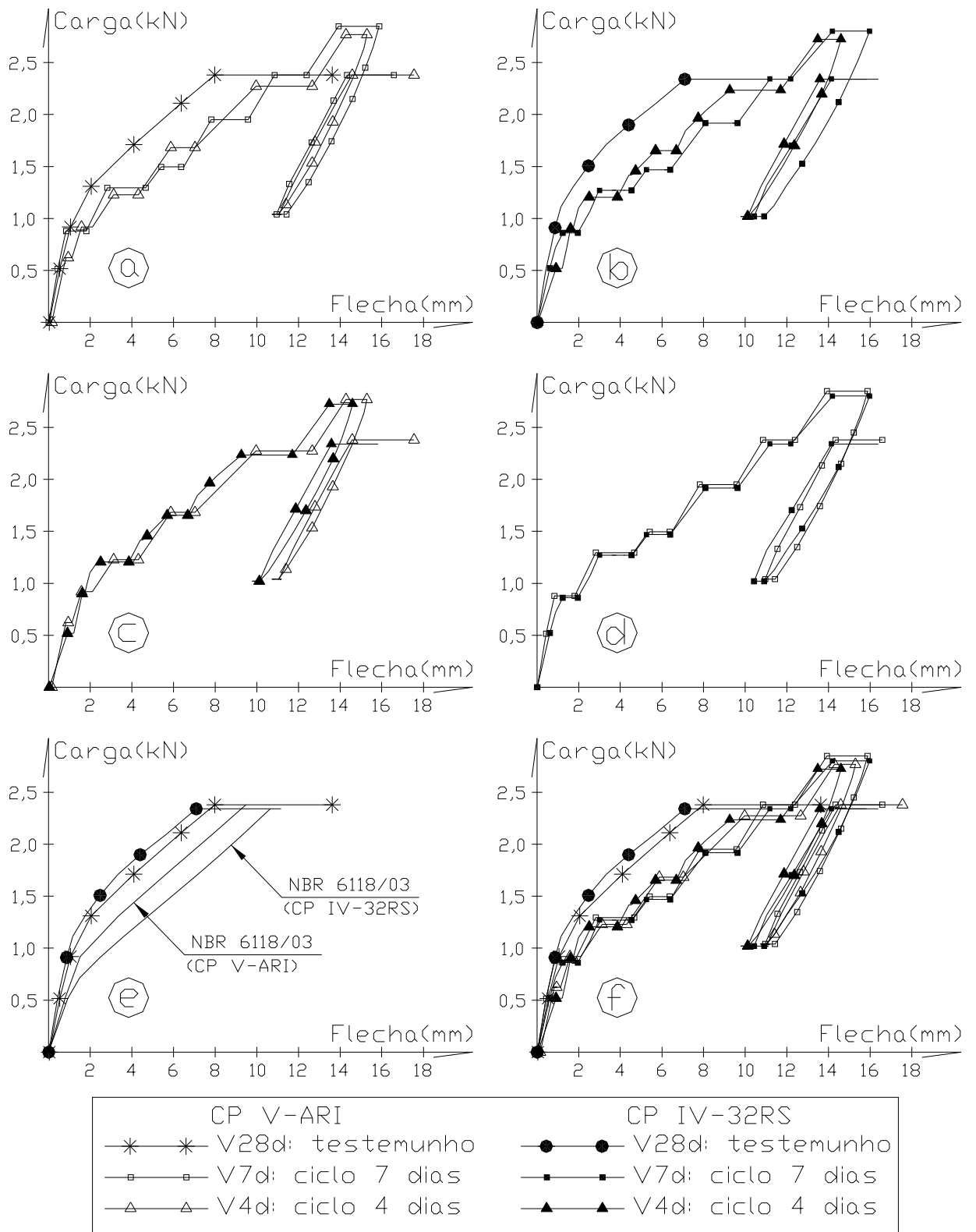


Figura 45: flecha em função da carga concentrada

Na figura 46 estão plotadas as flechas em função da carga concentrada aplicada no centro do vão, desconsiderando as deformações por fluência entre etapas e após os últimos carregamentos.

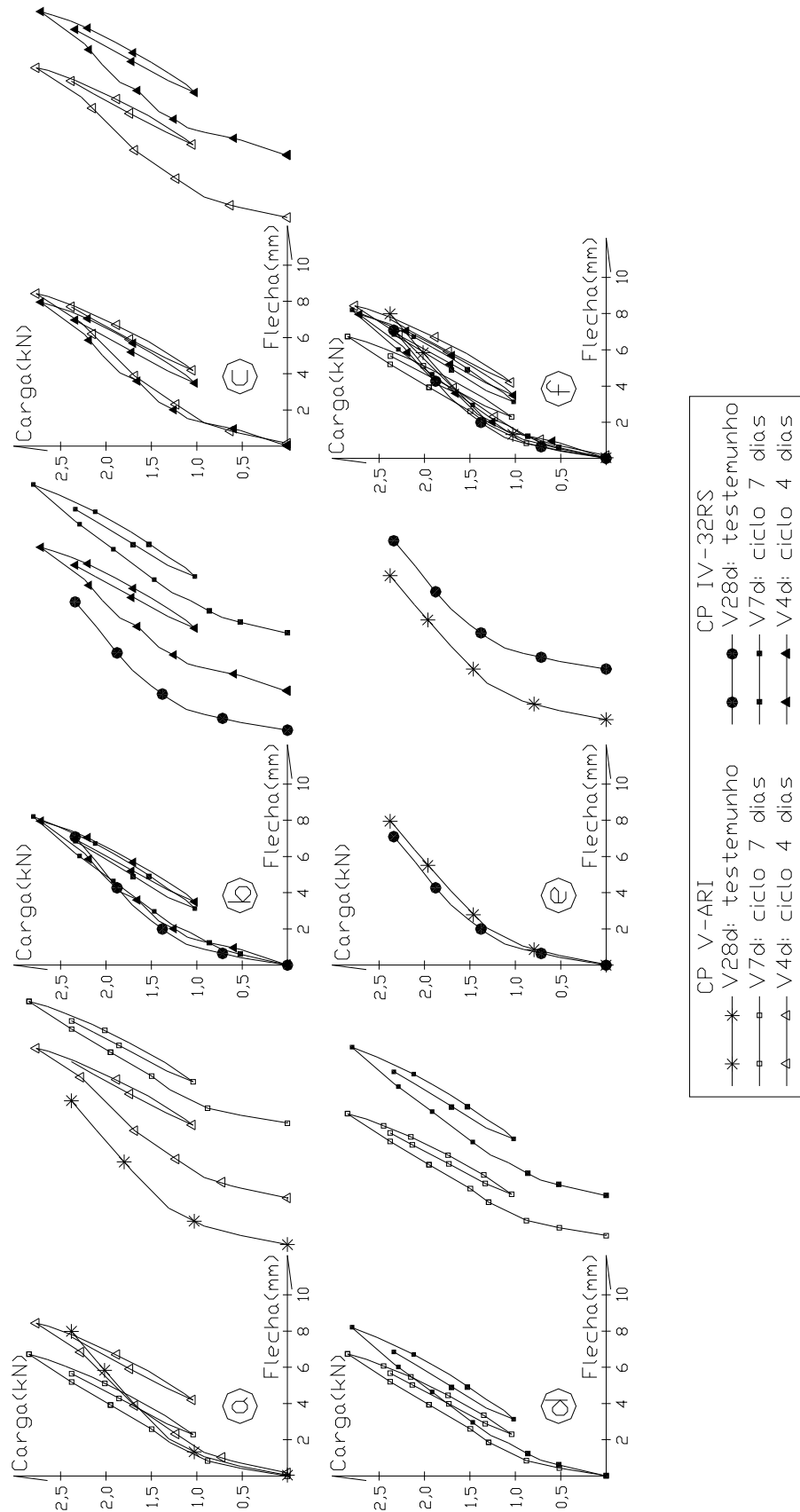


Figura 46: flecha em função da carga concentrada, desconsiderando a deformação por fluência

Ao lado de cada gráfico foram plotadas as curvas com afastamento, com o objetivo de facilitar a visualização. Os gráficos foram organizados de “a” a “f”, seguindo o mesmo critério da figura 45.

Apesar destes ensaios também terem sido realizados com apenas um corpo-de-prova para cada viga, inviabilizando conclusões estatisticamente embasadas, algumas tendências no comportamento podem ser observadas. É possível notar que o comportamento das vigas sofre alteração entre 1 e 1,3 kN, caracterizando a mudança do estágio I (viga não fissurada) para o estágio II (viga fissurada). Observa-se, também, que no estágio I, todas as vigas apresentam comportamento muito semelhante. Já no estágio II, as vigas V4d e V7d, produzidas com os dois tipos de cimento, aparentam possuir módulo tangente também semelhante, no entanto, superior ao da viga V28d, se desconsiderada a deformação por fluência entre etapas de carregamento, especialmente em relação aos maiores níveis de carga. Este fenômeno pode ser melhor observado nos gráficos da figura 46. Esta análise conduziria a pressupor menor rigidez instantânea nas vigas V28d, com maior acréscimo de deformação para um mesmo acréscimo de tensão, especialmente por aparentarem comportamentos muito semelhantes para os dois tipos de cimento testados, apesar de que poderia ser definido como variabilidade natural decorrente dos processos de execução das vigas e ensaio, em função do reduzido número de corpos-de-prova empregados.

5.2.2 Flecha em Função do Tempo

Na figura 47 são mostradas as leituras de temperatura, umidade relativa do ar e flechas, em função da idade, para as vigas produzidas com cimento CP V-ARI. Os valores estão nos anexos 3 e 4.

Neste gráfico também é possível observar que as flechas têm seu crescimento desacelerado, em períodos que invariavelmente coincidem com os de umidade relativa do ar próximo de 70%, o que confirma os conceitos descritos por Süsskind (1987).

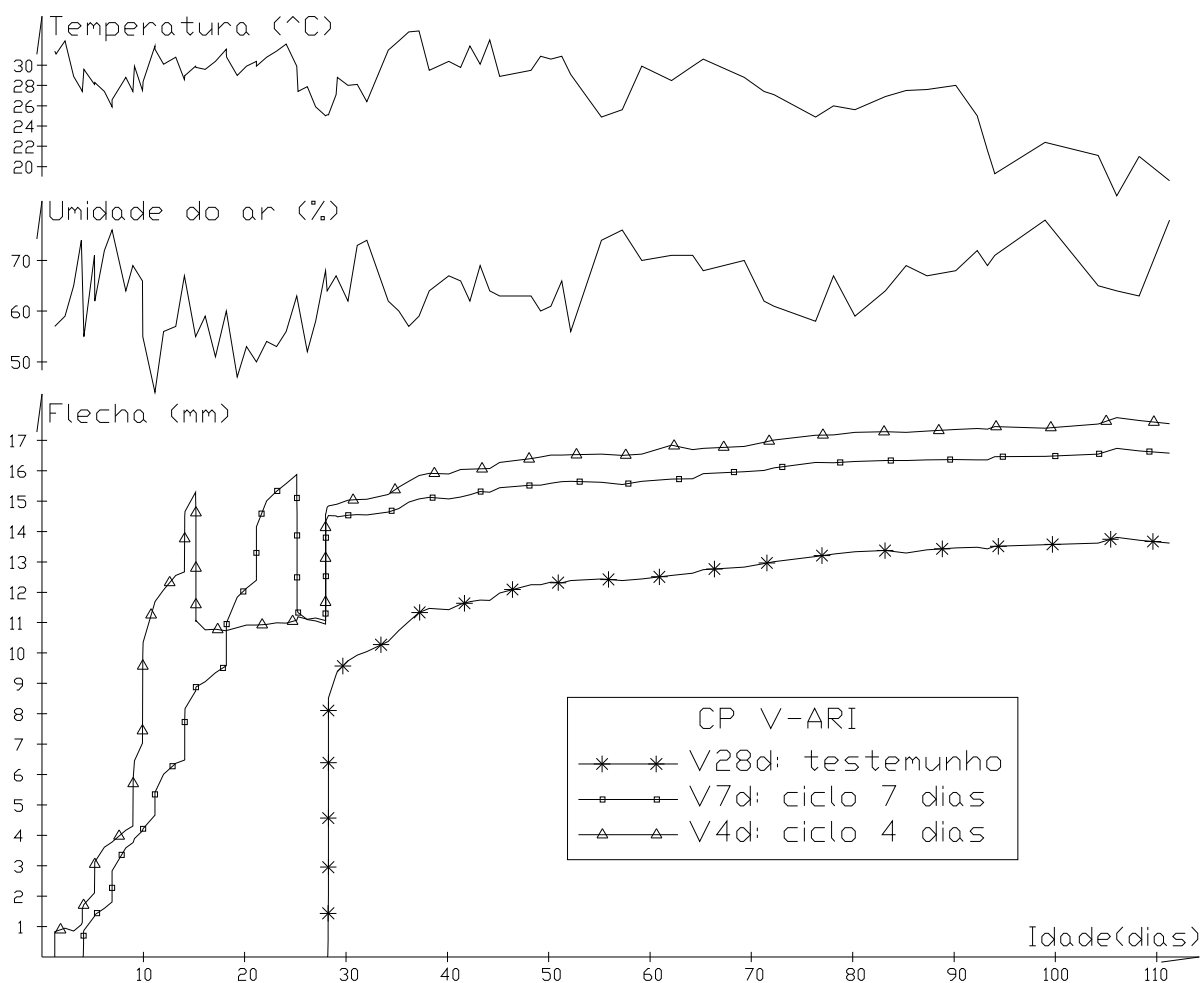


Figura 47: temperatura, umidade relativa do ar e flechas em função da idade (CP V-ARI)

O gráfico da figura 47 parece sugerir que as flechas diferidas no tempo apresentam comportamentos diferentes, para o mesmo carregamento (a partir dos 28 dias), até aproximadamente 50 dias de idade, sendo que, a partir daí, o incremento nos deslocamentos é muito semelhante, apesar das vigas terem sido carregadas em idades distintas. As diferenças de comportamento entre 28 e 50 dias de idade parecem não confirmar o comportamento teórico indicado nas normas e na literatura, pois há falta de paralelismo evidente entre elas. A viga V28d tem a curva de maior inclinação nas primeiras idades a partir dos 28 dias. É possível notar, também, que nos períodos em que as vigas tiveram sua carga P reduzida para 1,04 kN (V4d – entre 15 e 28 dias, V7d – entre 25 e 28 dias), as flechas parecem ter atingido níveis muito próximos, mesmo com o carregamento anterior em idades e níveis diferentes.

Na figura 48 são mostradas as leituras de temperatura, umidade relativa do ar e flechas, em função da idade, para as vigas produzidas com cimento CP IV-32RS. Os valores estão nos anexos 3 e 4.

Neste gráfico o mesmo fenômeno, no qual as flechas têm seu crescimento desacelerado, ocorre nos períodos de umidade relativa do ar próximo de 70%.

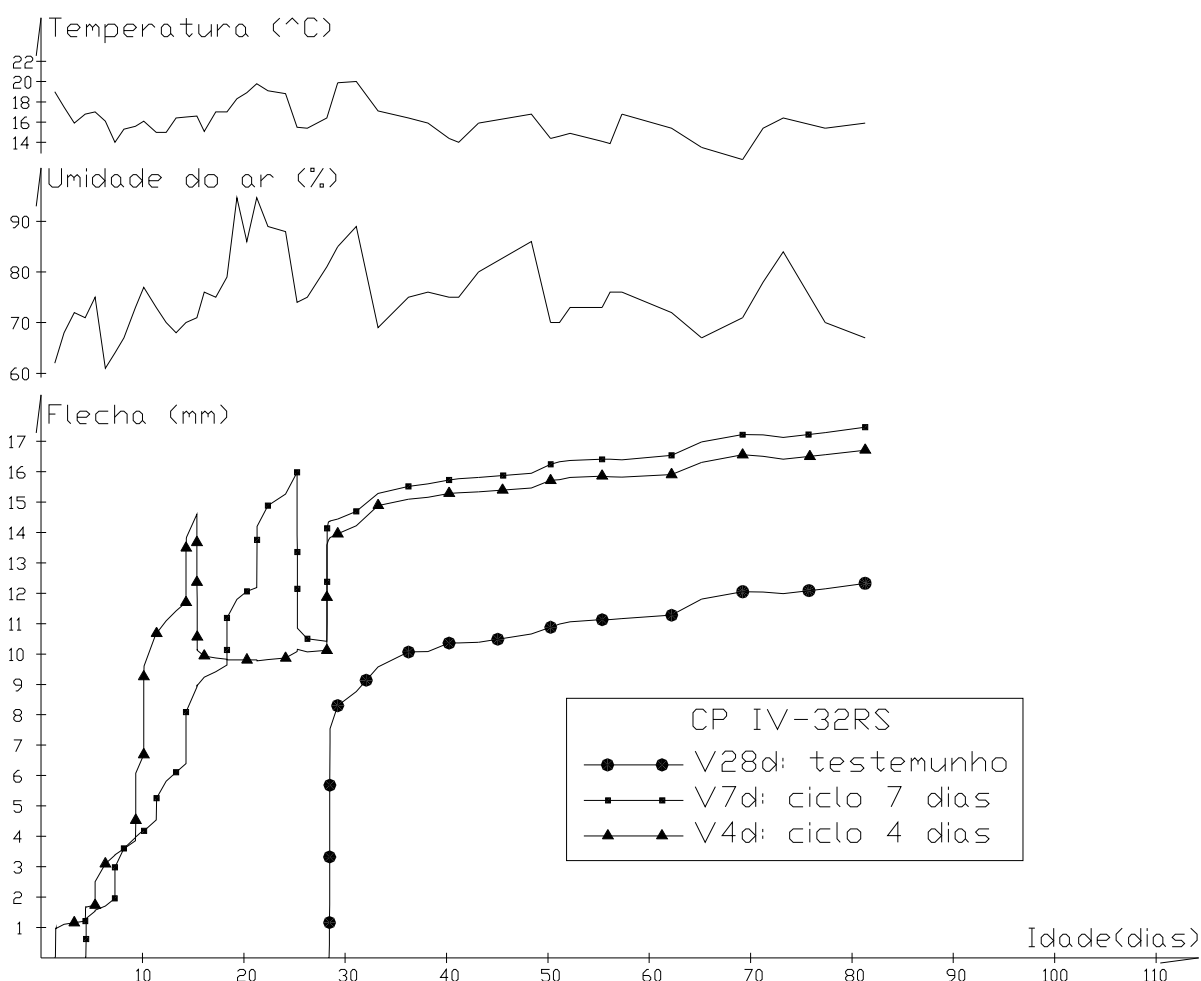


Figura 48: temperatura, umidade relativa do ar e flechas em função da idade (CP IV-32RS)

O gráfico da figura 48 parece sugerir que as flechas diferidas no tempo também apresentam comportamentos diferentes, para o mesmo carregamento (a partir dos 28 dias), até aproximadamente 40 dias de idade, sendo que, a partir daí, o incremento nos deslocamentos é muito semelhante, apesar das vigas terem sido carregadas em idades distintas. Comparando com a mesma análise feita na figura 47 (CP V-ARI), observa-se apenas uma alteração na idade, a partir da qual, inicia o aparente paralelismo das curvas (50 para 40 dias de idade), o que poderia ser definido como uma variabilidade natural decorrente dos processos de execução das vigas e ensaio, em função do reduzido número de corpos-de-prova empregados. É possível notar, também, que nos períodos em que as vigas tiveram sua carga P reduzida para 1,02 kN (V4d – entre 15 e 28 dias, V7d – entre 25 e 28 dias), as flechas parecem ter atingido níveis próximos, mesmo com o carregamento anterior em idades e níveis diferentes.

Na figura 49 aparece um comparativo das vigas V4d produzidas com os dois tipos de cimento.

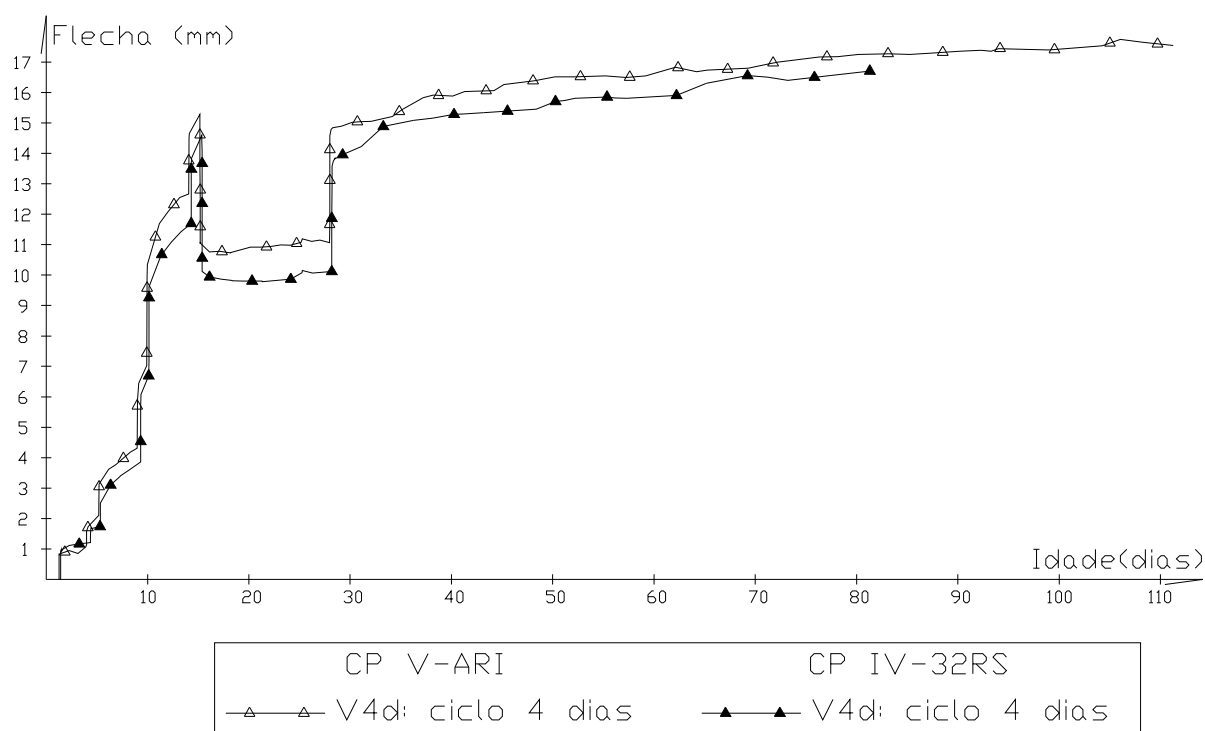


Figura 49: flechas em função da idade das vigas V4d (CP V-ARI e CP IV-32RS)

Este gráfico sugere flechas menores para a V4d produzida com cimento CP IV-32RS, porém com crescimento mais acelerado entre 28 e 40 dias.

Na figura 50 aparece um comparativo das vigas V7d produzidas com os dois tipos de cimento.

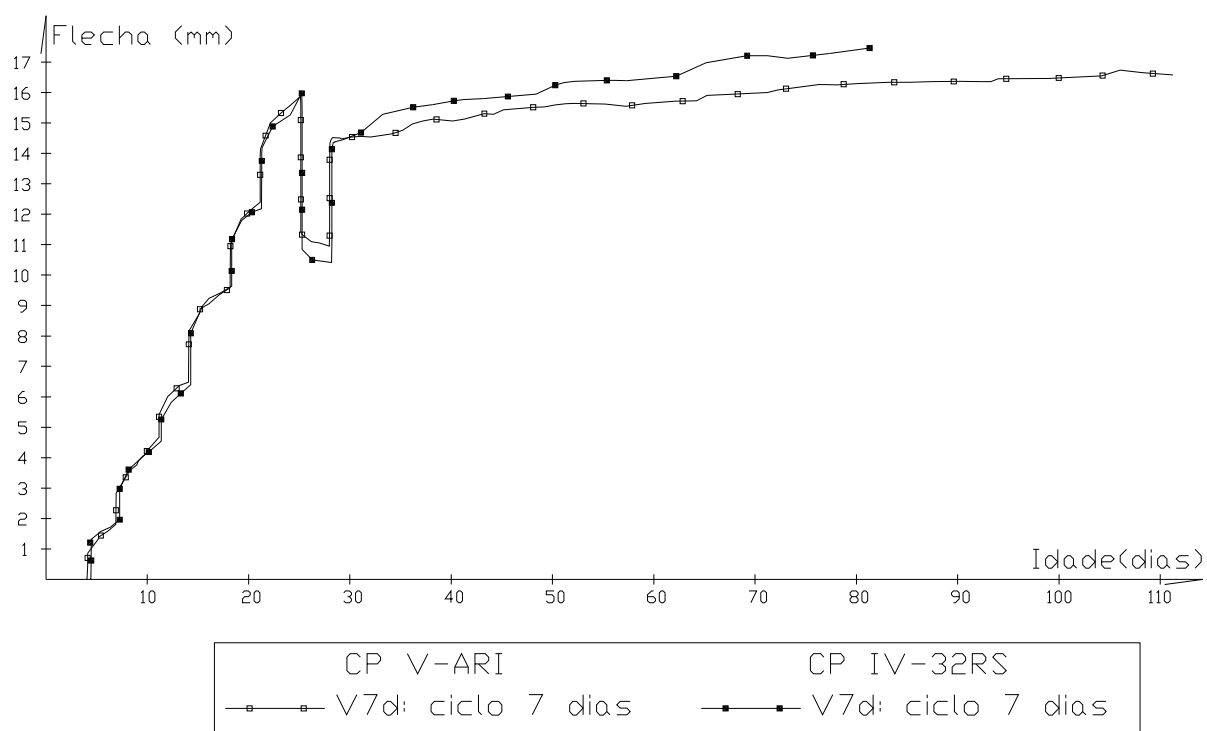


Figura 50: flechas em função da idade das vigas V7d (CP V-ARI e CP IV-32RS)

Este gráfico sugere flechas maiores para a V4d produzida com cimento CP IV-32RS, porém com crescimento mais acelerado entre 28 e 40 dias.

Na figura 51 aparece um comparativo das vigas V28d produzidas com os dois tipos de cimento.

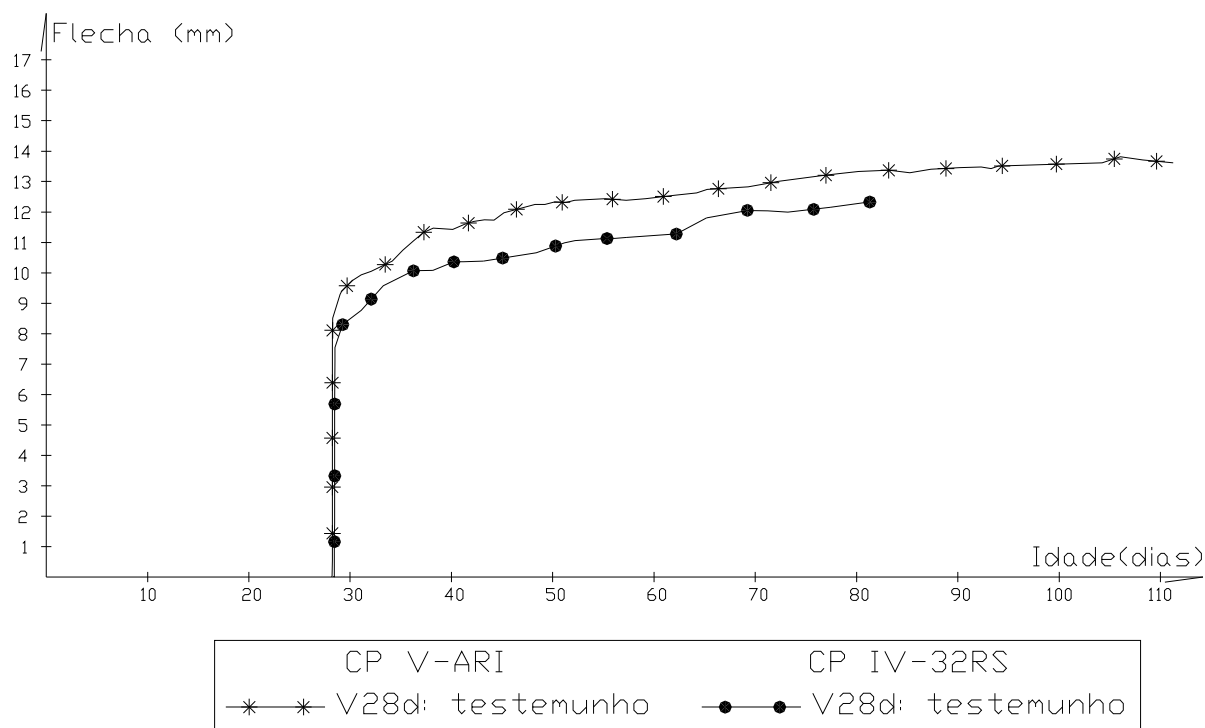


Figura 51: flechas em função da idade das vigas V28d (CP V-ARI e CP IV-32RS)

Este gráfico sugere flechas menores para a V28d produzida com cimento CP IV-32RS, porém com crescimento muito semelhante a partir dos 28 dias.

5.2.3 Fissuração

A fissuração foi observada visualmente em uma das laterais das vigas até os 28 dias. A partir desta idade, somente as fissuras da viga V28d podem ser bem visualizada por razões operacionais. São apresentados desenhos com a evolução das fissuras, estabelecendo um comparativo entre as mesmas vigas produzidas com cimentos diferentes. São colocadas lado a lado situações em que se tenha a mesma idade e fator de carga construtiva.

Na figura 52 aparece o nível de fissuração aparente das vigas V4d.

V4d (ciclo 4 dias)					
CP V-ARI			CP IV-32RS		
Idade (dias)	Carga (kN)	k	Idade (dias)	Carga (kN)	k
05	1,23	1,14			
09	1,23	1,14			
09	1,68	1,48	09	1,65	1,48
10	2,27	1,92	10	2,23	1,92
			11	2,23	1,92
14	2,27	1,92			
14	2,77	2,29	14	2,72	2,29

Figura 52: fissuras aparentes das vigas V4d (CP V-ARI e CP IV-32RS)

Este estado de fissuração aparenta não indicar nenhuma diferença importante entre as duas situações apresentadas, no entanto, a primeira fissura da viga V4d, produzida com cimento CP IV-32RS, foi observada com nível de carregamento e idade superiores.

Na figura 53 aparece o nível de fissuração aparente das vigas V7d.

V7d (ciclo 7 dias)					
CP V-ARI			CP IV-32RS		
Idade (dias)	Carga (kN)	k	Idade (dias)	Carga (kN)	k
07	1,29	1,19	07	1,27	1,19
09	1,29	1,19	09	1,27	1,19
11	1,29	1,19			
11	1,49	1,34	11	1,47	1,34
			12	1,47	1,34
14	1,95	1,68	14	1,92	1,68
18	1,95	1,68			
18	2,38	2,00	18	2,34	2,00
21	2,85	2,35	21	2,80	2,35

Figura 53: fissuras aparentes das vigas V7d (CP V-ARI e CP IV-32RS)

Este estado de fissuração aparenta não indicar nenhuma diferença importante entre as duas situações apresentadas, inclusive quando à primeira fissura. Comparando com as vigas V4d, no último nível de carregamento, também não aparenta diferenças importantes, apesar da evolução mais lenta, em decorrência de prazos maiores entre etapas de carregamento.

Na figura 54 aparece o nível de fissuração aparente das vigas V28d.

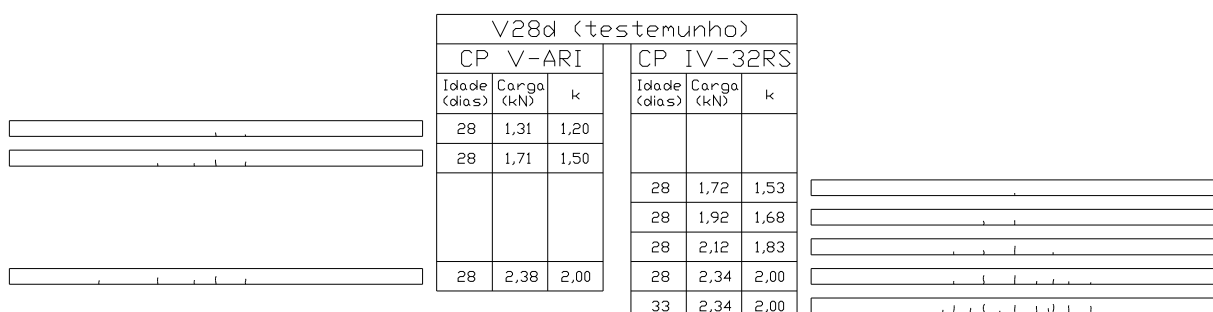


Figura 54: fissuras aparentes das vigas V28d (CP V-ARI e CP IV-32RS)

Este estado de fissuração aparenta indicar um acréscimo importante na viga produzida com cimento CP IV-32RS, no entanto a primeira fissura foi visualizada com nível de carregamento superior. A viga V28d produzida com cimento CP IV-32RS aparenta um estado de fissuração ligeiramente inferior ao das demais vigas (V7d e V4d), se comparados os últimos estágios de carregamento. Já na viga V28d, produzida com cimento CP V-ARI, é facilmente observado um menor nível de fissuração.

Nos períodos em que as vigas V4d e V7d tiveram sua carga P reduzida (V4d – entre 15 e 28 dias, V7d – entre 25 e 28 dias), as fissuras tiveram sua medida de abertura reduzida, voltando a abrir aos 28, dias quando o carregamento foi restabelecido. Como o carregamento imposto aos 28 dias foi inferior ao último estágio de pré-carregamento, não se observou abertura de novas fissuras nestas vigas.

5.3 EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS

O ensaio complementar de extração de testemunhos foi realizado apenas para as vigas produzidas com cimento CP V-ARI. Foram comparados os resultados da resistência à compressão média do concreto extraído das vigas com os corpos-de-prova apresentados no item 4.3.2.5.4.

5.3.1 Resultados Obtidos

5.3.1.1 Vigas que Sofreram Pré-carregamento de Curta Duração

A resistência à compressão, obtida nos testemunhos extraídos das vigas que sofreram pré-carregamento de curta duração, é apresentada na tabela 16. A ruptura ocorreu aos 212 dias de idade.

Tabela 16: resistência à compressão dos testemunhos

		V2	V3	V4	V5
		32%	64%	96%	Testemunho
f _c (MPa)	1	39,0	39,8	38,2	40,2
	2	40,2	35,9	39,1	38,3
	3	40,6	38,4	38,7	36,3
	4	34,5	39,4	39,2	37,1
	5	40,3	36,0	38,3	39,3
	6	37,6	33,9	31,6	36,6
	7	41,1	34,7	39,6	37,2
	8	37,5	34,9	38,7	41,0
	9	43,0	39,3	39,1	37,5
	10	42,7	39,6	38,3	39,8

5.3.1.1.1 Análise Estatística

Fez-se uma análise de variância (ANOVA¹¹) a fim de verificar se o efeito do pré-carregamento de curta duração era ou não significativo. O resultado da análise concluiu que não foi significativo, logo pode ser feita a média dos resultados para se obter a resistência à compressão do concreto extraído das vigas. Os resultados de f_c (médio), o desvio padrão e o coeficiente de variação aparecem na tabela 17.

¹¹ ANalysis Of VAriance

Tabela 17: resultados de ruptura dos testemunhos

Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
38,31	2,34	6,10

Fez-se outra análise de variância a fim de verificar se a posição dos testemunhos era ou não significativa, agrupando-os dois a dois de maneira simétrica. O resultado da análise concluiu que não foi significativa, logo, a distribuição de tensões simétricas aplicada nas vigas, ao longo do seu comprimento, não alterou significativamente a resistência à compressão do concreto extraído das vigas.

5.3.1.2 Vigas que Sofreram Pré-carregamento de Longa Duração

A resistência à compressão, obtida nos testemunhos extraídos das vigas que sofreram pré-carregamento de longa duração, é apresentada na tabela 18. A ruptura ocorreu aos 147 dias de idade.

Tabela 18: resistência à compressão dos testemunhos

		V4d	V7d	V28d
		Ciclo de 4 dias	Ciclo de 7 dias	Testemunho
f _c (MPa)	1	38,3	37,7	35,5
	2	35,5	38,3	41,3
	3	30,3	37,2	37,1
	4	35,6	34,3	39,4
	5	36,1	32,2	38,1
	6	35,5	33,5	40,4
	7	34,8	37,4	37,0
	8	35,8	35,1	35,1
	9	35,3	40,3	40,5
	10	33,6	33,8	28,4

5.3.1.2.1 Análise Estatística

A análise de variância, com objetivo de verificar se o efeito do pré-carregamento de longa duração era ou não significativo, concluiu que não foi significativa. Deste modo, a média da resistência à compressão do concreto extraído das vigas, o desvio padrão e o coeficiente de variação são mostrados na tabela 19.

Tabela 19: resultados de ruptura dos testemunhos

Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
36,11	2,93	8,13

A segunda análise de variância, com objetivo de verificar se a posição dos testemunhos era ou não significativa, concluiu que também não foi significativa. Os testemunhos foram agrupados dois a dois simetricamente. Neste ensaio também se conclui que a distribuição de tensões simétricas, aplicada nas vigas ao longo do seu comprimento, não alterou significativamente a resistência à compressão do concreto extraído das vigas.

5.3.2 Comparação de f_c das Vigas e dos Corpos-de-prova

A extração de testemunhos foi feita com concretos produzidos com cimento CP V-ARI, o qual possui a característica de apresentar ganho de resistência rápido nas primeiras idades. Porém, em idades avançadas, este ganho é muito pequeno. Por este motivo, apresentam-se as resistências médias à compressão dos concretos utilizados nas vigas e nos corpos-de-prova, apesar das diferenças de idade:

- a) $f_{c(28)} = 32,68$ MPa para corpos-de-prova com cura em condições normalizadas;
- b) $f_{c(28)} = 39,43$ MPa para corpos-de-prova com cura em condições semelhantes às vigas do ensaio de pré-carregamento de curta duração;
- c) $f_{c(212)} = 38,31$ MPa para testemunhos extraídos das vigas submetidas ao pré-carregamento de curta duração;

d) $f_{c(28)} = 37,67$ MPa para corpos-de-prova com cura em condições semelhantes às vigas do ensaio de pré-carregamento de longa duração;

e) $f_{c(147)} = 36,11$ MPa para testemunhos extraídos das vigas submetidas ao pré-carregamento de longa duração.

Na figura 55 pode-se visualizar os mesmos resultados.

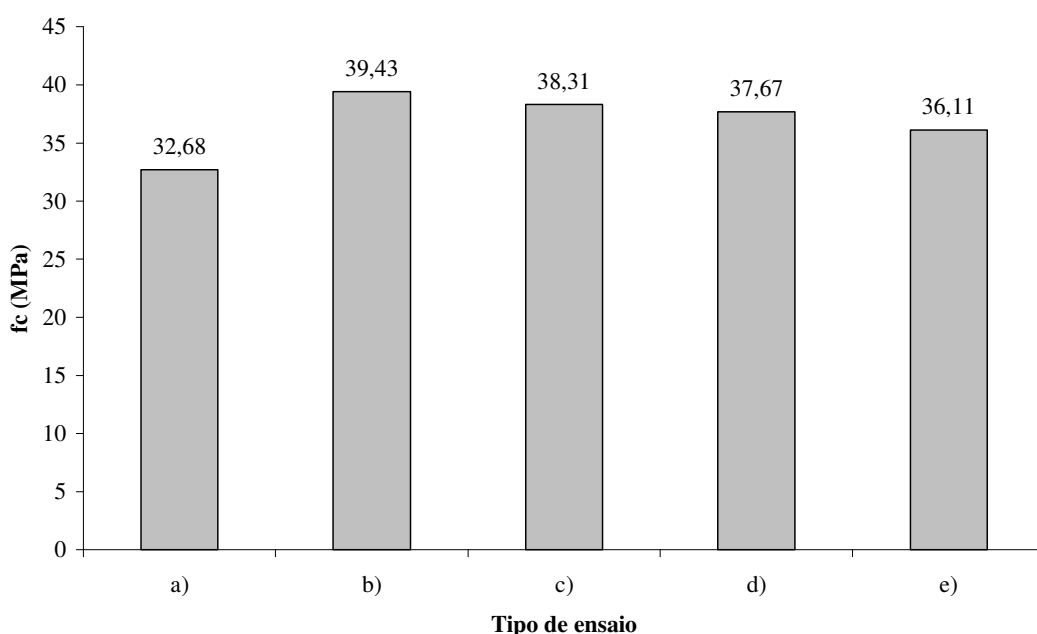


Figura 55: resistência à compressão de corpos-de-prova e testemunhos

5.4 DISCUSSÃO

As vigas que sofreram o pré-carregamento de curta duração apresentaram deformações totais maiores na medida em que foram aumentados os níveis de pré-carregamento, no entanto, este aumento é decorrente das deformações residuais provocadas na ocasião do carregamento precoce. Desta forma, o comportamento diferido no tempo não aparentou diferenças de comportamento.

Os dois ciclos de carregamento incremental, promovidos pelo ensaio de pré-carregamento de longa duração, parecem ser equivalentes em termos de deformação total aos 28 dias. Os ciclos de 4 e 7 dias aparentam um equilíbrio, na medida em que os carregamentos são aplicados em

idades e níveis com agressividades antagônicas. O ciclo de 7 dias poderia ser considerado menos agressivo por aplicar o carregamento em idades mais avançadas, no entanto, os fatores de carga construtiva são maiores e o tempo decorrido entre uma etapa de carregamento e outra é maior, proporcionando maiores deformações por fluência.

A deformação absoluta das vigas que sofreram o pré-carregamento de longa duração é sensivelmente maior que as vigas testemunho (V28d) nos primeiros 28 dias. Neste período, em um ciclo de execução real, elas estariam escorando os andares superiores. Deformando mais ao longo do tempo, transferem maiores parcelas de carga para os pavimentos superiores. Desta forma, para determinar os fatores de carga construtiva, é fundamental considerar a deformação por fluência, ou um modelo visco-elástico com envelhecimento.

As vigas V4d e V7d, entre 28 e 50 dias (CP V-ARI) ou 28 e 40 dias (CP IV-32RS), apresentam neste período menores taxas de crescimento das deformações que as verificadas na vigas sem o pré-carregamento. Considerando um ciclo de execução real, durante esse período estariam sendo executadas as alvenarias. Se as flechas existentes aos 28 dias fossem anuladas com um simples nivelamento ou com uso de contra-flecha com valores equivalentes aos deslocamentos medidos até aquela idade, as deformações que teriam efeitos sobre as alvenarias seriam apenas aquelas que acontecessem a partir desta idade. Neste caso a existência de pré-carregamento de longa duração leva a menores incrementos (taxas) de deformação nos 12 (CP V-ARI) ou 22 (CP IV-32RS) dias subseqüentes à idade de 28 dias verificado nas vigas que são carregadas somente nessa idade, sendo portanto benéfica para o sistema construtivo.

Pelo que apresentaram os resultados dos ensaios, a partir das idades de 40 (CP V-ARI) ou 50 (CP IV-32RS) dias, obtém-se um paralelismo entre as curvas de deformação por fluência para as diversas vigas, aparentemente indicando que os níveis de pré-carregamento empregados não interferem com a velocidade de deformação por fluência resultante, e confirmando as curvas teóricas do Anexo A da NBR 6118/2003.

As curvas de dosagem dos cimentos CP V-ARI e CP IV-32RS deveriam conduzir a resistências à compressão muito próximas, para a relação água/cimento de 0,5, no entanto, os resultados dos corpos-de-prova cilíndricos curados em condições normalizadas, não confirmaram esta tendência. Aos 28 dias, os corpos-de-prova produzidos com cimento CP IV-32RS apresentaram uma redução de 29% na resistência à compressão, 17% na resistência a

tração e 14% no módulo de elasticidade, se comparados com os mesmos resultados obtidos com o cimento CP V-ARI. A diferença observada na resistência à compressão poderia ser em decorrência do cimento CP IV-32RS utilizado na dosagem ser de lote de fabricação diferente dos utilizados nos demais ensaios feitos com este cimento.

Nas vigas produzidas com cimento CP IV-32RS, o dimensionamento do pré-carregamento de longa duração foi realizado com os valores de resistência a compressão obtidos por Vieira (integrante deste projeto de pesquisa), os quais foram 31% superiores aos obtidos nos ensaios em corpos-de-prova com cura normalizada. Isto resultou em um carregamento utilizado nos ensaios para o CP IV-32RS bastante próximo do utilizado para o cimento CP V-ARI. Verificando as deformações instantâneas obtidas com cargas aplicadas somente aos 28 dias (V28d), constata-se que a viga produzida com concreto CP V-ARI apresenta uma flecha de 7,98 mm, e a viga produzida com cimento CP IV-32RS uma flecha de 7,45mm, resultando numa diferença de 7%. Isso indica que as vigas com os dois concretos possuem rigidezes muito próximas, e sendo também as cargas aplicadas muito próximas, é possível uma comparação direta entre as flechas obtidas para os dois concretos para as demais vigas.

Comparando o resultado teórico e o experimental (figura 45e) das flechas da viga V28d produzida com cimento CP IV-32RS, observa-se uma sensível diferença de valores, o que levaria a intuir que a resistência do concreto da viga é maior que os valores obtidos aos 28 dias nos corpos-de-prova curados em condições semelhantes às das vigas. No entanto só poderá ser verificada com exatidão após a extração de testemunhos destas vigas.

A fissuração nas vigas que sofreram o pré-carregamento de curta duração aparentou ser mais intensa na medida em que foram aumentados os níveis de pré-carregamento. Já nas vigas que sofreram o pré-carregamento de longa duração, os níveis de fissuração aparentaram semelhanças, porém ligeiramente mais intensas que nas vigas sem o pré-carregamento.

A extração de testemunhos nas vigas produzidas com cimento CP V-ARI não se mostrou capaz de evidenciar a influência dos pré-carregamentos na resistência à compressão, nem os diferentes níveis de tensão ao longo do comprimento longitudinal das vigas.

Mesmo não se tendo observado um comprometimento estrutural de curto prazo, faz-se necessária a consideração dos efeitos da microfissuração na durabilidade das estruturas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, foi possível concluir que alguns aspectos do comportamento estrutural são contra-intuitivos, na medida em que apresentam alguns resultados que parecem diferir do que preconizam a literatura e as normas nacionais e internacionais, apesar da realização de apenas um corpo-de-prova para cada experimento, inviabilizando conclusões estatisticamente embasadas. Tais resultados servem de estímulo para a continuidade da investigação experimental, tendo em vista a necessidade de uma resposta conclusiva, sob pena de deixar em aberto uma lacuna de conhecimento importante para os processos construtivos racionalizados. Desta forma, para as condições ambientais de laboratório e para os materiais e tipos de solicitações empregadas nesta pesquisa, destacam-se as seguintes conclusões:

- a) as normas e a literatura estão corretas em afirmar que quanto mais cedo for aplicado o carregamento, maiores serão as deformações resultantes em termos absolutos.
- b) a determinação dos fatores de carga construtiva deve considerar as deformações por fluência que ocorrem durante os ciclos de execução. As cargas decorrentes desses ciclos podem ser mais críticas que as cargas de projeto.
- c) A utilização de ciclos de execução mais intensos implica em maiores deformações, necessitando uma verificação de projeto que contemple as etapas construtivas e os fatores de carga decorrentes.
- d) o pré-carregamento parece afetar favoravelmente as taxas de crescimento da deformação por fluência por um certo período, após a desvinculação existente entre os pavimentos por meio de escoras, quando o pavimento passa a suportar as cargas de projeto (alvenarias, revestimentos). Isso pode ter reflexos positivos sobre as alvenarias executadas neste período.
- e) as taxas de crescimento da deformação por fluência após um determinado período (40 a 50 dias de idade, dependendo do tipo de cimento) parecem ser independentes do nível de pré-carregamento aplicado.

- f) a deformação por fluência parece ser independente do tipo de cimento empregado.
- g) os níveis de fissuração observados até os 28 dias de idade, aparentam uma tendência de aumento decorrente do pré-carregamento.
- h) o pré-carregamento parece não ter afetado a resistência à compressão do concreto extraído das vigas produzidas com cimento CP V-ARI.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Diante do que foi estudado nesta pesquisa, ficou clara a necessidade de ampliar a investigação experimental. Neste sentido pode-se sugerir duas possibilidades de pesquisa:

- a) repetição dos ensaios realizados nesta pesquisa, o que permitiria estabelecer conclusões estatisticamente embasadas;
- b) ampliação da investigação experimental com outros tipos de cimento, geometrias, taxas de armadura e consumo de cimento.

REFERÊNCIAS

- AITCIN, P. C. Autogenous shrinkage measurement. In Tazawa, Ei-ichi. Autogenous shrinkage of concrete. Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute. London: E & FN Spon, 1999a. p. 257-268.
- AMARAL FILHO, E. M. Deformação lenta. In: Colóquio Sobre Retração e Deformação Lenta do Concreto. Anais. São Paulo: IBRACON, 1978. p. 1-44.
- ASSAHI, P. N. Sistema de fôrma para estrutura de concreto / Concreto–Ensino, pesquisa e realizações (G.C.Isaia; São Paulo: IBRACON, 2005): p. 407-437.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5.733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5.736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5.738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5.739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.211: Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.480: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.680: Concreto - Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14.931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto - 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.
- BRANSON, D. E. Instantaneous and time-dependent deflections on simple and continuous reinforced concrete beams. HPR Report. N. 7 Part 1. Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads. Aug., 1965. p.1-78.
- BREUGEL, K. V.; LOKHORST, S. J. Stress-based crack criterion for concrete at early ages, IABSE Symposium – Rio de Janeiro, 1999. p.665-672.
- BROOKS, J. J. Factors influencing movements of concrete and creep effects. In: Workshop: Influence of Creep on Design, Performance na Safety of Concrete Dams. Proceedings. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994.
- CÁNOVAS, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. Tradução de Luiz Alfredo Falcão Bauer. São Paulo: Pini, 1988.
- CEB FIP Model Code 1990. Comité Euro-International du Béton. London: Thomas Telford, 1993.
- CUNHA, J. C.; ANGELO, A. M. V. Contribuição para a determinação da resistência do concreto na análise de estruturas periciadas, IBAPE – XII COBREAP, Belo Horizonte (2003): p.15.
- FOURÉ, B.; BRONSART, O. Étude de la resistance du béton de T.H.R. sous cantrainte soutenue, Project Nacional, Voies Nouvelles du Matériau Béton – Relatório interno do CEBTP – 1990.
- FRANÇA, R. L. S. Principais fatores que influenciam nas deformações de estruturas de concreto, 5º Seminário de Tecnologia de Estruturas, São Paulo, 2003.
- FRANÇA, R. L. S. Fatores críticos de execução de obras e as conseqüências para as deformações de estruturas de concreto, 7º Seminário de Tecnologia de Estruturas, São Paulo, 2005.
- FREITAS, A. A. Situações críticas no projeto de edifícios de concreto armado submetidos a ações de construção. São Carlos, 2004. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

FURNAS, Laboratório de concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico. In: ANDRADE, Pacelli (ed.). Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. São Paulo: Pini, 1997.

GLUCKLICH, J. Int. Conf. on the Structure of Concrete. Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, U. K., 1968, pp. 179-85.

GRUNDY, P.; KABAILA, A. Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings, ACI Concrete International, vol 26, nº 7, July, 2004 (1963): pp. 99-108.

HASPARYK, N, P.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. Deformações por retração e fluência / Concreto–Ensino, pesquisa e realizações (G.C.Isaia; São Paulo: IBRACON, 2005): p. 655-685.

HELENE, P. R. L. Considerações sobre o efeito Rüsç na idade de controle da resistência do concreto, Instituto de Engenharia, São Paulo, 2007.

HELENE, P.R. L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto (São Paulo : Pini; Brasília:SENAI, 1992): p.349.

HERVÉ NETO, E. Estruturas de concreto: projeto e economia. Revista Técnica, São Paulo: Pini, 2007.

HOLT, E. E. Early age autogenous shrinkage of concrete. Espoo 2001. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 446. 184p + app. 9p.

L'HERMITE, R. Société de Diffusion Des Techniques du Bâtiment Et Des Travaux Publics – Paris.(1969) SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – Brasil.

LIU, X.; CHEN, W. F.; BOWMAN, M. Construction load analysis for concrete structures (1985). Journal of Structural Engineering - ASCE, v.111, No 5, May., pp. 1019-1036.

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

MOLITERNO, A. Escoramentos, cimbramentos, fôrmas para concreto e travessias em estruturas de madeira (São Paulo, Edgard Blücher, 1989): p. 379.

MOSSALLAN, K.; CHEN, W. F. Determining shoring loads for reinforced concrete construction (1991). ACI Structural Journal, v.88, No 3, May-June., pp. 340-350.

MOSSALLAN, K.; CHEN, W. F. Construction Load Distributions For Laterally Braced Formwork (1992). ACI Structural Journal, v.89, No 4, July-Aug., pp. 415-424.

NEVILLE, A. M. Creep of concrete: plain, reinforced, and prestressed. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1970.

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

PFEIL, W. Concreto armado, volume 3 (Rio de Janeiro, LTC,1989): p. 812.

PRADO, J. F. M. A. Estruturas de edifícios em concreto armado submetidas a ações de construção. São Carlos, 1999. 184p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PRADO, J. F. M. A.; CORRÊA, M. R. S. Estruturas de edifícios em concreto armado submetidas a ações de construção, Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 19 (2002): pp. 51-79.

PRADO, J. F. M. A.; RAMALHO, M.; CORRÊA, M. R. S. Panorama sobre ações construtivas em estruturas de edifícios em concreto armado. Revista IBRACON, São Paulo, v. No. 21, p. 21-31, 1998.

RATAY, R. T. Temporary structures in construction – USA practices. Structural Engineering International. April, 2004. p. 292-295.

ROYER, K. ACI Concrete International, vol 26, nº 7, july, 2004: pp. 109-112.

RÜSCH, H. Researches toward a general flexural theory for structural concrete – ACI Journal, July 1960. p. 1-28.

RÜSCH, H. Concreto armado e protendido, propriedades dos materiais e dimensionamento – Rio de Janeiro, Ed. Campus, 1981.

SELVARAJ, S.; SHARMA, S. P. Influence of construction sequence on the stresses in tall building frames. Regional Conference on Tall Buildings, Bangkok, Jan., 1974, pp. 197-211.

SÜSSEKIND, J. C. Concreto armado - volume I, (Rio de Janeiro, Globo, 1987): p. 376.

VILAVERDE, A. Curso de fôrmas para estruturas de concreto (Porto Alegre, 1998): p.143.

ZORZI, A. C. Fôrma com molde em madeira para estrutura de concreto armado: recomendações para melhoria da qualidade e da produtividade com redução de custos. São Paulo: IPT, 2002. Dissertação (Mestrado Profissional em Habitação), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2002.

ANEXOS

ANEXO 1: PRÉ-CARREGAMENTO DE CURTA DURAÇÃO - Flecha
Imediata Desconsiderando a Deformação Residual

VIGA V5 (testemunho) - 28 dias de idade									
Data	Hora	Temp.	Umid.	Carga		Leitura (mm)		Média	Flecha
		(° C)	(%)	(kN)	(kgf)	L1	L2	(mm)	(mm)
30/out	10:39	27,6	71	0,00	0,00	86,79	86,79	86,79	0,00
30/out	12:10	30,9	58	0,52	51,94	86,38	86,38	86,38	0,41
30/out	12:30	31,1	55	0,93	92,72	85,79	85,79	85,79	1,00
30/out	12:45	31,1	54	1,33	132,87	85,26	85,26	85,26	1,53
30/out	14:00	31,6	54	1,73	173,32	84,18	84,12	84,15	2,64
30/out	14:10	32,1	54	2,13	213,39	83,03	83,05	83,04	3,75
30/out	14:35	32,5	53	2,54	254,25	81,59	81,66	81,63	5,17
30/out	14:50	32,4	53	2,97	296,66	79,82	80,12	79,97	6,82
30/out	15:29	32,1	51	3,26	326,00	78,89	78,86	78,88	7,92

VIGA V2 (32 %) - 28 dias de idade									
Data	Hora	Temp.	Umid.	Carga		Leitura (mm)		Média	Flecha
		(° C)	(%)	(kN)	(kgf)	L1	L2	(mm)	(mm)
30/out	17:30	30,6	49	0,00	0,00	85,08	85,15	85,12	0,00
30/out	19:15	29,9	57	0,52	51,63	84,45	84,45	84,45	0,67
30/out	19:30	29,8	56	0,92	92,27	83,78	83,90	83,84	1,28
30/out	19:40	29,5	58	1,32	131,64	83,00	83,24	83,12	2,00
30/out	19:55	29,4	57	1,71	170,99	82,28	82,39	82,34	2,78
30/out	20:05	29,1	58	2,11	210,67	81,39	81,56	81,48	3,64
30/out	20:25	29,0	58	2,57	256,99	80,35	80,35	80,35	4,76
30/out	20:40	28,9	59	3,01	300,75	78,97	78,86	78,92	6,20
30/out	21:20	28,5	59	3,26	326,00	77,93	77,93	77,93	7,19

VIGA V3 (64 %) - 29 dias de idade									
Data	Hora	Temp.	Umid.	Carga		Leitura (mm)		Média	Flecha
		(° C)	(%)	(kN)	(kgf)	L1	L2	(mm)	(mm)
31/out	11:40	27,9	61	0,00	0,00	83,85	83,88	83,87	0,00
31/out	14:34	28,1	61	0,91	90,93	81,99	82,02	82,01	1,86
31/out	14:55	28,4	59	1,31	131,40	81,00	81,05	81,03	2,84
31/out	15:05	28,4	58	1,71	170,67	80,02	80,17	80,10	3,77
31/out	15:55	27,9	59	2,10	210,15	79,11	79,07	79,09	4,77
31/out	16:15	27,9	59	2,53	252,93	77,74	77,96	77,85	6,02
31/out	16:40	27,9	59	3,00	300,09	76,57	76,61	76,59	7,27
31/out	17:20	27,9	58	3,26	326,00	75,69	75,83	75,76	8,11

VIGA V4 (96 %) - 29 dias de idade									
Data	Hora	Temp.	Umid.	Carga		Leitura (mm)		Média	Flecha
		(° C)	(%)	(kN)	(kgf)	L1	L2	(mm)	(mm)
31/out	19:25	27,6	63	0,00	0,00	65,77	65,87	65,82	0,00
31/out	21:15	27,5	55	0,52	52,30	64,59	64,63	64,61	1,21
31/out	21:25	27,5	54	0,92	91,84	63,56	63,70	63,63	2,19
31/out	21:35	27,4	64	1,32	131,50	62,55	62,54	62,55	3,27
31/out	21:45	27,4	64	1,70	170,34	61,38	61,46	61,42	4,40
31/out	21:55	27,4	65	2,09	209,39	60,31	60,28	60,30	5,52
31/out	22:10	27,4	65	2,53	253,42	58,84	58,95	58,90	6,92
31/out	22:20	27,4	65	3,00	300,05	57,55	57,52	57,54	8,29
31/out	22:40	27,4	65	3,26	326,00	56,73	56,77	56,75	9,07

ANEXO 2: PRÉ-CARREGAMENTO DE CURTA DURAÇÃO - Flecha
Diferida no Tempo Desconsiderando a Deformação Residual e a Inicial

Flecha Diferida no Tempo Desconsiderando a Deformação Residual e a Inicial																						
Idade (dias)	Temp. (°C)	Umid. (%)	V5 (testemunho)					V2 (32%)					V3 (64%)					V4 (96%)				
			Leitura(mm)		Média (mm)	Flecha (mm)	Leitura(mm)	Leitura(mm)		Média (mm)	Flecha (mm)	Leitura(mm)	Leitura(mm)		Média (mm)	Flecha (mm)	Leitura(mm)	Leitura(mm)		Média (mm)	Flecha (mm)	
			L1	L2	L1	L2		L1	L2	L1	L2		L1	L2	L1	L2		L1	L2	L1	L2	
28	28,5	59	78,89	78,86	78,88	0,00	77,93	77,93	77,93	0,00	75,69	75,83	75,76	0,00	56,73	56,77	56,75	0,00	56,75	0,00		
28	28,4	59	78,10	78,12	78,11	0,77	77,70	77,86	77,78	0,15	75,16	75,32	75,24	0,52	56,17	56,14	56,16	0,59	56,16	0,59		
29	27,4	64	77,63	77,60	77,62	1,26	77,01	76,92	76,97	0,96	74,81	74,85	74,83	0,93	55,89	55,82	55,86	0,89	55,86	0,89		
29	27,9	59	77,44	77,43	77,44	1,44	76,50	76,55	76,53	1,40	74,57	74,59	74,58	1,18	55,53	55,53	55,53	1,22	55,53	1,22		
29	27,3	65	77,17	77,29	77,23	1,65	76,38	76,50	76,44	1,49	74,22	74,25	74,24	1,52	55,11	55,12	55,12	1,64	55,12	1,64		
30	25,8	58	76,95	77,20	77,08	1,80	76,35	76,33	76,34	1,59	73,91	73,94	73,93	1,83	54,75	54,78	54,77	1,99	54,77	1,99		
31	28,3	52	76,90	76,90	76,90	1,97	75,94	76,10	76,02	1,91	73,76	73,72	73,74	2,02	54,64	54,74	54,69	2,06	54,69	2,06		
32	27,1	45	76,46	76,68	76,57	2,31	75,73	75,73	75,73	2,20	73,65	73,74	73,70	2,07	54,62	54,67	54,65	2,11	54,65	2,11		
33	25,6	52	76,13	76,34	76,24	2,64	75,42	75,43	75,43	2,50	73,29	73,38	73,34	2,42	54,12	54,17	54,15	2,61	54,15	2,61		
34	29,4	53	76,05	76,29	76,17	2,71	75,35	75,35	75,35	2,58	73,04	73,15	73,10	2,66	53,95	54,03	53,99	2,76	53,99	2,76		
35	26,0	72	76,00	76,22	76,11	2,77	75,24	75,28	75,26	2,67	72,91	72,92	72,92	2,85	53,91	53,92	53,92	2,84	53,92	2,84		
36	26,9	44	75,81	75,72	75,77	3,11	74,81	74,86	74,84	3,09	72,86	72,87	72,87	2,89	53,82	53,79	53,81	2,95	53,81	2,95		
37	22,8	40	75,39	75,60	75,50	3,38	74,59	74,62	74,61	3,32	72,79	72,84	72,82	2,94	53,72	53,75	53,74	3,02	53,75	3,02		
38	23,9	47	75,27	75,45	75,36	3,52	74,46	74,49	74,48	3,45	72,65	72,67	72,66	3,10	53,50	53,63	53,57	3,19	53,57	3,19		
39	25,8	46	75,30	75,29	75,30	3,58	74,30	74,33	74,32	3,61	72,41	72,52	72,47	3,29	53,43	53,35	53,39	3,36	53,35	3,36		
40	23,5	54	75,20	75,27	75,24	3,64	74,20	74,25	74,23	3,70	72,30	72,33	72,32	3,44	53,23	53,27	53,25	3,50	53,27	3,50		
41	26,9	50	75,04	75,12	75,08	3,79	74,07	74,07	74,07	3,86	72,12	72,14	72,13	3,63	53,18	53,15	53,17	3,59	53,15	3,59		
42	27,4	49	74,91	74,95	74,93	3,94	73,90	73,91	73,91	4,02	71,92	72,07	72,00	3,76	52,96	52,98	52,97	3,78	52,97	3,78		
43	29,9	48	74,74	74,80	74,77	4,11	73,66	73,73	73,70	4,23	71,96	71,98	71,97	3,79	53,04	53,02	53,03	3,72	53,03	3,72		
44	30,6	49	74,63	74,65	74,64	4,24	73,56	73,64	73,60	4,33	72,03	72,16	72,10	3,66	53,10	53,11	53,11	3,65	53,11	3,65		
45	30,9	49	74,22	74,46	74,34	4,54	73,34	73,35	73,35	4,58	72,06	72,19	72,13	3,63	53,16	53,17	53,17	3,59	53,17	3,59		
46	25,0	67	74,17	74,19	74,18	4,69	73,32	73,32	73,32	4,61	72,12	72,21	72,17	3,60	53,21	53,21	53,21	3,54	53,21	3,54		
47	23,1	68	74,22	74,47	74,35	4,53	73,39	73,40	73,40	4,53	71,92	72,02	71,97	3,79	52,96	52,97	52,97	3,79	52,97	3,79		
48	20,9	70	74,27	74,49	74,38	4,50	73,40	73,40	73,40	4,53	71,82	71,95	71,89	3,88	52,79	52,88	52,84	3,92	52,84	3,92		
49	23,9	63	74,46	74,55	74,51	4,37	73,48	73,50	73,49	4,44	71,53	71,64	71,59	4,17	52,55	52,59	52,57	4,18	52,57	4,18		
50	26,9	57	74,08	74,32	74,20	4,68	73,26	73,33	73,30	4,63	71,62	71,64	71,63	4,13	52,60	52,59	52,60	4,16	52,60	4,16		
51	28,6	56	74,23	74,26	74,25	4,63	73,24	73,21	73,23	4,70	71,69	71,69	71,68	4,08	52,65	52,59	52,62	4,13	52,62	4,13		
52	29,1	52	73,76	73,96	73,86	5,02	72,95	72,90	72,93	5,00	71,65	71,73	71,69	4,07	52,72	52,74	52,74	4,02	52,74	4,02		
53	28,6	60	73,96	73,73	73,85	5,03	72,86	72,92	72,89	5,04	71,57	71,57	71,56	4,20	52,60	52,64	52,62	4,13	52,62	4,13		
54	26,3	69	74,12	74,03	74,08	4,80	72,89	72,93	72,91	5,02	71,54	71,70	71,62	4,14	52,61	52,64	52,63	4,13	52,63	4,13		
55	25,9	64	74,05	74,03	74,04	4,84	73,02	72,96	72,99	4,94	71,55	71,57	71,56	4,20	52,60	52,64	52,62	4,13	52,62	4,13		
56	24,4	60	73,68	73,95	73,82	5,06	72,83	72,87	72,85	5,08	71,54	71,70	71,62	4,14	52,61	52,64	52,63	4,13	52,63	4,13		
57	25,9	63	73,68	73,94	73,81	5,07	72,85	72,87	72,86	5,07	71,54	71,70	71,62	4,14	52,61	52,64	52,63	4,13	52,63	4,13		
58	23,9	67	73,67	73,67	73,67	5,21	72,86	72,97	72,92	5,01	71,54	71,70	71,62	4,14	52,61	52,64	52,63	4,13	52,63	4,13		

Idade (dias)	Temp. (°C)	Umid. (%)	Flecha Diferida no Tempo Desconsiderando a Deformação Residual e a Inicial - continuação															
			V5 (testemunho)				V2 (32%)				V3 (64%)				V4 (96%)			
			L1	L2	Média	Flecha	L1	L2	Média	Flecha	L1	L2	Média	Flecha	L1	L2	Média	Flecha
59	26,6	59	73,66	73,85	73,76	5,12	72,82	72,91	72,87	5,06	71,56	71,70	71,63	4,13	52,68	52,65	52,67	4,09
60	28,4	52	73,52	73,70	73,61	5,27	72,68	72,71	72,70	5,23	71,51	71,65	71,58	4,18	52,60	52,61	52,61	4,15
61	30,6	51	73,35	73,64	73,50	5,38	72,57	72,64	72,61	5,32	71,38	71,48	71,43	4,33	52,41	52,45	52,43	4,32
62	32,1	55	73,29	73,30	73,30	5,58	72,42	72,54	72,48	5,45	71,29	71,30	71,30	4,46	52,27	52,28	52,28	4,47
63	30,5	51	73,13	73,36	73,25	5,63	72,29	72,30	72,30	5,63	71,23	71,26	71,25	4,51	52,21	52,21	52,21	4,54
64	27,6	58	73,08	73,33	73,21	5,67	72,30	72,30	72,30	5,63	71,06	71,08	71,07	4,69	52,07	52,06	52,07	4,69
65	26,4	65	73,13	73,38	73,26	5,62	72,36	72,39	72,38	5,55	71,02	71,08	71,05	4,71	51,95	52,04	52,00	4,76
66	27,6	53	73,26	73,31	73,29	5,59	72,20	72,29	72,25	5,68	71,11	71,17	71,14	4,62	52,14	52,15	52,15	4,61
67	27,4	46	72,96	73,16	73,06	5,82	72,09	72,10	72,10	5,83	71,01	71,03	71,02	4,74	52,01	52,02	52,02	4,74
68	28,4	58	72,88	73,16	73,02	5,86	72,07	72,08	72,08	5,85	70,93	70,94	70,94	4,82	51,90	51,90	51,90	4,85
69	28,9	60	72,94	73,18	73,06	5,82	72,04	72,16	72,10	5,83	70,88	70,88	70,88	4,88	51,90	51,91	51,91	4,85
70	29,5	56	72,87	73,09	72,98	5,90	72,05	72,14	72,10	5,83	70,95	70,95	70,95	4,81	51,88	51,96	51,92	4,83
71	31,1	53	72,77	73,04	72,91	5,97	71,96	71,99	71,98	5,95	70,90	70,89	70,90	4,86	51,94	51,93	51,94	4,82
72	28,8	61	72,70	72,94	72,82	6,06	71,88	71,98	71,93	6,00	70,66	70,77	70,72	5,04	51,77	51,76	51,77	4,99
73	32,9	52	72,64	72,90	72,77	6,10	71,85	71,88	71,87	6,06	70,62	70,70	70,66	5,10	51,72	51,76	51,74	5,01
74	32,0	56	72,78	72,80	72,79	6,09	71,72	71,83	71,78	6,15	70,56	70,70	70,63	5,13	51,64	51,68	51,66	5,09
75	30,1	54	72,79	72,79	72,79	6,08	71,74	71,82	71,78	6,15	70,53	70,56	70,55	5,21	51,59	51,57	51,58	5,17
77	29,5	53	72,73	72,73	72,73	6,15	71,72	71,72	71,72	6,21	70,47	70,60	70,54	5,22	51,63	51,63	51,63	5,12
78	30,1	57	72,68	72,73	72,71	6,17	71,71	71,71	71,71	6,22	70,49	70,52	70,51	5,26	51,57	51,57	51,57	5,18
79	28,9	66	72,62	72,67	72,65	6,23	71,62	71,67	71,65	6,28	70,53	70,53	70,53	5,23	51,59	51,58	51,59	5,17
80	28,9	61	72,68	72,71	72,70	6,18	71,66	71,65	71,66	6,27	70,47	70,40	70,44	5,32	51,54	51,55	51,55	5,21
81	28,5	59	72,60	72,61	72,61	6,27	71,55	71,55	71,55	6,38	70,49	70,50	70,50	5,26	51,55	51,57	51,56	5,19
85	28,9	56	72,49	72,53	72,51	6,37	71,47	71,53	71,50	6,43	70,42	70,44	70,43	5,33	51,50	51,48	51,49	5,26
86	29,9	53	72,38	72,41	72,40	6,48	71,28	71,38	71,33	6,60	70,25	70,42	70,34	5,42	51,48	51,44	51,46	5,29
88	32,0	59	72,31	72,31	72,31	6,57	71,21	71,30	71,26	6,67	70,23	70,23	70,23	5,53	51,34	51,28	51,31	5,44
92	33,1	56	72,06	72,07	72,07	6,81	70,98	71,06	71,02	6,91	70,14	70,17	70,16	5,60	51,22	51,21	51,22	5,54
94	32,1	62	72,07	72,08	72,08	6,80	70,96	71,03	71,00	6,93	69,94	69,90	69,92	5,84	50,96	50,99	50,98	5,78
100	32,8	54	71,82	71,91	71,87	7,01	70,80	70,83	70,82	7,11	69,93	69,95	69,94	5,82	51,00	51,03	51,02	5,74
102	30,0	65	71,90	71,91	71,91	6,97	70,83	70,90	70,87	7,06	69,68	69,71	69,70	6,07	50,80	50,82	50,81	5,94
105	27,8	40	71,55	71,66	71,61	7,27	70,54	70,52	70,53	7,40	69,78	69,81	69,80	5,96	50,88	50,87	50,88	5,88
107	28,3	55	71,48	71,55	71,52	7,36	70,41	70,47	70,44	7,49	69,31	69,46	69,39	6,38	50,51	50,54	50,53	6,23
109	30,1	53	71,32	71,56	71,44	7,44	70,48	70,54	70,51	7,42	69,27	69,40	69,34	6,42	50,49	50,48	50,49	6,27
110	24,8	55	71,33	71,58	71,46	7,42	70,55	70,58	70,57	7,36	69,42	69,44	69,43	6,33	50,52	50,55	50,54	6,22
112	29,4	52	71,51	71,51	71,51	7,36	70,50	70,51	70,51	7,42	69,49	69,47	69,48	6,28	50,58	50,62	50,60	6,15
113	31,4	53	71,50	71,28	71,39	7,49	70,51	70,52	70,52	7,41	69,42	69,46	69,44	6,32	50,54	50,51	50,53	6,23
114	27,9	64	71,38	71,40	71,39	7,49	70,41	70,44	70,43	7,50	69,30	69,39	69,35	6,41	50,49	50,51	50,50	6,25

ANEXO 3: PRÉ-CARREGAMENTO DE LONGA DURAÇÃO – Flechas Até
os 28 Dias de Idade

VIGA V4d (ciclo 4 dias) - CP V-ARI									
Dia / Hora	Idade (dias)	Temp. (° C)	Umid. (%)	Carga		Leitura (mm)		Média (mm)	Flecha (mm)
				(kN)	(kgf)	L1	L2		
24/1/07 18:25	1,27	31,4	57	0,00	0,00	90,26	90,32	90,29	0,00
24/1/07 18:25	1,27	-	-	P.P.	P.P.	90,09	90,17	90,13	0,16
24/1/07 18:25	1,27	-	-	0,52	51,85	89,43	89,72	89,58	0,71
24/1/07 18:25	1,27	-	-	0,62	62,32	89,34	89,57	89,46	0,83
24/1/07 21:05	1,38	31,1	57	0,62	62,32	89,55	89,53	89,54	0,75
25/1/07 18:10	2,26	32,4	59	0,62	62,32	89,33	89,36	89,35	0,94
25/1/07 18:10	2,26	-	-	0,62	62,32	89,30	89,35	89,33	0,97
25/1/07 18:10	2,26	-	-	0,62	62,32	89,31	89,34	89,33	0,96
26/1/07 15:05	3,13	28,9	65	0,62	62,32	89,41	89,47	89,44	0,85
26/1/07 15:05	3,13	-	-	0,62	62,32	89,42	89,45	89,44	0,85
27/1/07 9:16	3,89	27,6	74	0,62	62,32	89,21	89,25	89,23	1,06
27/1/07 11:36	3,98	27,4	56	0,62	62,32	89,15	89,17	89,16	1,13
27/1/07 11:36	3,98	-	-	0,92	91,94	88,68	88,73	88,71	1,58
27/1/07 15:20	4,14	29,6	55	0,92	91,94	88,54	88,58	88,56	1,73
28/1/07 16:30	5,19	28,1	71	0,92	91,94	88,18	88,19	88,19	2,10
28/1/07 16:50	5,20	28,3	62	1,23	122,76	87,15	87,17	87,16	3,13
29/1/07 16:10	6,17	27,4	72	1,23	122,76	86,67	86,68	86,68	3,61
30/1/07 9:35	6,90	25,9	76	1,23	122,76	86,47	86,56	86,52	3,77
30/1/07 10:00	6,92	26,6	76	1,23	122,76	86,48	86,56	86,52	3,77
31/1/07 18:50	8,28	28,8	64	1,23	122,76	86,10	86,14	86,12	4,17
1/2/07 11:10	8,97	27,4	69	1,23	122,76	85,96	86,00	85,98	4,31
1/2/07 11:40	8,99	27,9	65	1,68	168,32	84,40	84,43	84,42	5,87
1/2/07 15:10	9,13	29,9	61	1,68	168,32	83,81	83,87	83,84	6,45
2/2/07 10:00	9,92	27,5	66	1,68	168,32	83,25	83,27	83,26	7,03
2/2/07 10:35	9,94	27,9	55	2,27	227,28	80,32	80,33	80,33	9,97
2/2/07 11:10	9,97	28,4	53	2,27	227,28	79,93	79,95	79,94	10,35
3/2/07 15:35	11,15	31,9	44	2,27	227,28	78,59	78,63	78,61	11,68
3/2/07 15:50	11,16	31,6	42	2,27	227,28	78,60	78,61	78,61	11,69
4/2/07 12:20	12,01	30,1	56	2,27	227,28	78,20	78,23	78,22	12,08
5/2/07 16:30	13,19	30,8	57	2,27	227,28	77,71	77,76	77,74	12,56
6/2/07 13:20	14,06	28,6	67	2,27	227,28	77,60	77,65	77,63	12,67
6/2/07 13:52	14,08	28,9	57	2,77	276,86	75,99	76,03	76,01	14,28
6/2/07 14:10	14,09	29,0	54	2,77	276,86	75,75	75,84	75,80	14,50
6/2/07 15:00	14,13	29,4	56	2,77	276,86	75,59	75,67	75,63	14,66
7/2/07 16:00	15,17	29,9	55	2,77	276,86	74,97	75,03	75,00	15,29
7/2/07 16:07	15,17	-	-	2,64	263,83	75,10	75,20	75,15	15,14
7/2/07 16:15	15,18	-	-	2,34	234,01	75,65	75,75	75,70	14,59
7/2/07 16:23	15,18	-	-	1,93	193,01	76,61	76,67	76,64	13,65
7/2/07 16:30	15,19	-	-	1,53	153,39	77,60	77,66	77,63	12,66
7/2/07 16:38	15,19	-	-	1,13	113,48	78,84	78,94	78,89	11,40
7/2/07 16:45	15,20	-	-	1,04	104,00	79,22	79,28	79,25	11,04
7/2/07 16:50	15,20	29,8	50	1,04	104,00	79,23	79,24	79,24	11,06
7/2/07 17:00	15,21	29,8	50	1,04	104,00	79,22	79,24	79,23	11,06
8/2/07 14:30	16,10	29,6	59	1,04	104,00	79,50	79,55	79,53	10,77
9/2/07 14:40	17,11	30,4	51	1,04	104,00	79,48	79,53	79,51	10,79
10/2/07 16:25	18,18	31,6	60	1,04	104,00	79,56	79,57	79,57	10,73
10/2/07 16:45	18,20	31,1	54	1,04	104,00	79,55	79,57	79,56	10,73
10/2/07 17:00	18,21	30,8	49	1,04	104,00	79,54	79,57	79,56	10,74
11/2/07 18:00	19,25	29,0	47	1,04	104,00	79,41	79,50	79,46	10,84
12/2/07 16:05	20,17	29,9	53	1,04	104,00	79,34	79,41	79,38	10,92
13/2/07 15:35	21,15	30,4	50	1,04	104,00	79,36	79,39	79,38	10,92
13/2/07 15:50	21,16	30,1	46	1,04	104,00	79,36	79,39	79,38	10,92
13/2/07 16:05	21,17	29,9	43	1,04	104,00	79,36	79,39	79,38	10,92
14/2/07 15:45	22,16	30,8	54	1,04	104,00	79,32	79,38	79,35	10,94
15/2/07 15:45	23,16	31,4	53	1,04	104,00	79,29	79,31	79,30	10,99
16/2/07 14:45	24,11	32,1	56	1,04	104,00	79,30	79,31	79,31	10,99
17/2/07 15:25	25,14	29,9	63	1,04	104,00	79,20	79,22	79,21	11,08
17/2/07 18:45	25,28	27,4	50	1,04	104,00	79,09	79,11	79,10	11,19
18/2/07 16:35	26,19	27,9	52	1,04	104,00	79,17	79,20	79,19	11,11
19/2/07 12:00	27,00	25,9	58	1,04	104,00	79,11	79,17	79,14	11,15
20/2/07 11:20	27,97	25,0	68	1,04	104,00	79,20	79,25	79,23	11,07
20/2/07 11:26	27,98	-	-	1,34	134,06	78,52	78,54	78,53	11,76
20/2/07 11:33	27,98	-	-	1,74	173,62	77,49	77,50	77,50	12,80
20/2/07 11:40	27,99	-	-	2,14	214,16	76,38	76,42	76,40	13,89
20/2/07 11:50	27,99	-	-	2,38	238,00	75,67	75,76	75,72	14,58
20/2/07 11:55	28,00	-	-	2,38	238,00	75,67	75,74	75,71	14,59
20/2/07 15:00	28,13	25,1	64	2,38	238,00	75,47	75,52	75,50	14,80
20/2/07 18:41	28,28	25,1	55	2,38	238,00	75,46	75,44	75,45	14,84

VIGA V7d (ciclo 7 dias) - CP V-ARI									
Dia / Hora	Idade (dias)	Temp. (° C)	Umid. (%)	Carga		Leitura (mm)		Média (mm)	Flecha (mm)
				(kN)	(kgf)	L1	L2		
27/1/07 12:00	4,00	27,6	55	0,00	0,00	90,10	90,08	90,09	0,00
27/1/07 13:20	4,06	-	-	P.P.	P.P.	90,02	90,04	90,03	0,06
27/1/07 14:20	4,10	29,0	54	0,52	51,53	89,86	89,90	89,88	0,44
27/1/07 14:40	4,11	29,3	54	0,88	87,92	89,46	89,50	89,48	0,84
27/1/07 15:20	4,14	29,6	55	0,88	87,92	89,44	89,46	89,45	0,87
28/1/07 16:30	5,19	28,1	71	0,88	87,92	88,98	88,99	88,99	1,34
28/1/07 16:50	5,20	28,3	62	0,88	87,92	88,93	88,93	88,93	1,39
29/1/07 16:10	6,17	27,4	72	0,88	87,92	88,72	88,73	88,73	1,60
30/1/07 9:35	6,90	25,9	76	0,88	87,92	88,51	88,51	88,51	1,81
30/1/07 10:00	6,92	26,6	76	1,29	129,46	87,42	87,57	87,50	2,83
31/1/07 18:50	8,28	28,8	64	1,29	129,46	86,75	86,71	86,73	3,59
1/2/07 11:10	8,97	27,4	69	1,29	129,46	86,55	86,57	86,56	3,76
1/2/07 11:40	8,99	27,9	65	1,29	129,46	86,53	86,57	86,55	3,77
1/2/07 15:10	9,13	29,9	61	1,29	129,46	86,35	86,50	86,43	3,90
2/2/07 10:00	9,92	27,5	66	1,29	129,46	86,15	86,20	86,18	4,15
2/2/07 10:35	9,94	27,9	55	1,29	129,46	86,11	86,16	86,14	4,19
2/2/07 11:10	9,97	28,4	53	1,29	129,46	86,11	86,10	86,11	4,22
3/2/07 15:35	11,15	31,9	44	1,29	129,46	85,63	85,68	85,66	4,67
3/2/07 15:50	11,16	31,6	42	1,50	149,56	84,86	84,95	84,91	5,42
4/2/07 12:20	12,01	30,1	56	1,50	149,56	84,29	84,33	84,31	6,01
5/2/07 16:30	13,19	30,8	57	1,50	149,56	83,94	83,96	83,95	6,37
6/2/07 13:20	14,06	28,6	67	1,50	149,56	83,84	83,85	83,85	6,48
6/2/07 13:52	14,08	28,9	57	1,50	149,56	83,82	83,84	83,83	6,49
6/2/07 14:10	14,09	29,0	54	1,95	195,12	82,48	82,53	82,51	7,82
6/2/07 15:00	14,13	29,4	56	1,95	195,12	82,16	82,14	82,15	8,17
7/2/07 16:00	15,17	29,9	55	1,95	195,12	81,56	81,58	81,57	8,75
7/2/07 16:50	15,20	29,8	50	1,95	195,12	81,45	81,43	81,44	8,88
7/2/07 17:00	15,21	29,8	50	1,95	195,12	81,43	81,43	81,43	8,89
8/2/07 14:30	16,10	29,6	59	1,95	195,12	81,25	81,27	81,26	9,06
9/2/07 14:40	17,11	30,4	51	1,95	195,12	80,96	80,98	80,97	9,35
10/2/07 16:25	18,18	31,6	60	1,95	195,12	80,68	80,8	80,74	9,58
10/2/07 16:45	18,20	31,1	54	2,38	238,00	79,44	79,49	79,47	10,86
10/2/07 17:00	18,21	30,8	49	2,38	238,00	79,29	79,33	79,31	11,01
11/2/07 18:00	19,25	29,0	47	2,38	238,00	78,49	78,48	78,49	11,84
12/2/07 16:05	20,17	29,9	53	2,38	238,00	78,20	78,19	78,20	12,13
13/2/07 15:35	21,15	30,4	50	2,38	238,00	77,92	77,94	77,93	12,39
13/2/07 15:50	21,16	30,1	46	2,85	284,90	76,40	76,39	76,40	13,93
13/2/07 16:05	21,17	29,9	43	2,85	284,90	76,15	76,19	76,17	14,15
14/2/07 15:45	22,16	30,8	54	2,85	284,90	75,30	75,33	75,32	15,01
15/2/07 15:45	23,16	31,4	53	2,85	284,90	75,03	74,97	75,00	15,32
16/2/07 14:45	24,11	32,1	56	2,85	284,90	74,73	74,75	74,74	15,58
17/2/07 15:25	25,14	29,9	63	2,85	284,90	74,43	74,46	74,45	15,88
17/2/07 15:32	25,15	-	-	2,64	264,28	74,74	74,74	74,74	15,58
17/2/07 15:40	25,15	-	-	2,45	245,13	75,09	75,13	75,11	15,21
17/2/07 15:47	25,16	-	-	2,15	215,04	75,70	75,74	75,72	14,60
17/2/07 15:56	25,16	-	-	1,74	174,21	76,72	76,75	76,74	13,59
17/2/07 16:02	25,17	-	-	1,35	134,94	77,82	77,84	77,83	12,49
17/2/07 16:10	25,17	-	-	1,04	104,00	78,88	78,90	78,89	11,43
17/2/07 18:45	25,28	27,4	50	1,04	104,00	78,97	79,01	78,99	11,33
18/2/07 16:35	26,19	27,9	52	1,04	104,00	79,21	79,24	79,23	11,10
19/2/07 12:00	27,00	25,9	58	1,04	104,00	79,27	79,26	79,27	11,06
20/2/07 11:20	27,97	25,0	68	1,04	104,00	79,35	79,38	79,37	10,96
20/2/07 12:00	28,00	-	-	1,33	133,22	78,76	78,78	78,77	11,55
20/2/07 12:07	28,00	-	-	1,73	173,17	77,68	77,69	77,69	12,64
20/2/07 12:15	28,01	-	-	2,13	213,43	76,63	76,64	76,64	13,69
20/2/07 12:22	28,02	24,8	51	2,38	238,00	75,98	75,99	75,99	14,34
20/2/07 15:00	28,13	25,1	64	2,38	238,00	75,88	75,88	75,88	14,44
20/2/07 18:41	28,28	25,1	55	2,38	238,00	75,79	75,81	75,80	14,52

VIGA V28d (testemunho) - CP V-ARI									
Dia / Hora	Idade	Temp.	Umid.	Carga		Leitura (mm)		Média	Flecha
	(dias)	(° C)	(%)	(kN)	(kgf)	L1	L2	(mm)	(mm)
20/2/07 16:15	28,18	25,4	60	0,00	0,00	88,78	88,80	88,79	0,00
20/2/07 16:50	28,20	-	-	P. P.	P. P.	88,73	88,76	88,75	0,04
20/2/07 17:38	28,23	25,3	57	0,52	51,66	88,24	88,27	88,26	0,53
20/2/07 17:48	28,24	25,3	57	0,92	91,91	87,71	87,76	87,74	1,05
20/2/07 17:55	28,25	25,3	57	1,31	130,98	86,75	86,73	86,74	2,05
20/2/07 18:02	28,25	-	-	1,71	171,12	84,67	84,71	84,69	4,10
20/2/07 18:09	28,26	-	-	2,11	211,04	82,40	82,43	82,42	6,37
20/2/07 18:15	28,26	25,3	57	2,38	238,00	80,79	80,82	80,81	7,98
20/2/07 18:41	28,28	25,1	55	2,38	238,00	80,26	80,29	80,28	8,51

VIGA V4d (ciclo 4 dias) - CP IV-32RS									
Dia / Hora	Idade (dias)	Temp. (° C)	Umid. (%)	Carga		Leitura (mm)		Média (mm)	Flecha (mm)
				(kN)	(kgf)	L1	L2		
23/5/07 18:50	1,35	20,4	63	0,00	0,00	89,44	89,45	89,45	0,00
23/5/07 20:22	1,41	18,8	61	P.P.	P.P.	89,40	89,41	89,41	0,04
23/5/07 20:55	1,43	18,9	61	0,52	51,85	88,52	88,55	88,54	0,91
23/5/07 21:15	1,45	18,6	61	0,52	51,85	88,49	88,52	88,51	0,94
23/5/07 22:15	1,49	18,3	63	0,52	51,85	88,49	88,47	88,48	0,97
24/5/07 17:00	2,27	17,5	68	0,52	51,85	88,33	88,34	88,34	1,11
25/5/07 16:40	3,26	15,9	72	0,52	51,85	88,29	88,28	88,29	1,16
26/5/07 19:15	4,36	16,8	72	0,52	51,85	88,23	88,24	88,24	1,21
26/5/07 19:25	4,37	-	-	0,72	71,81	88,01	88,03	88,02	1,42
26/5/07 19:35	4,38	16,6	71	0,90	90,12	87,82	87,84	87,83	1,61
26/5/07 21:50	4,47	16,4	70	0,90	90,12	87,77	87,77	87,77	1,68
27/5/07 18:10	5,32	16,4	77	0,90	90,12	87,70	87,72	87,71	1,73
27/5/07 18:25	5,33	-	-	1,00	100,09	87,59	87,58	87,59	1,86
27/5/07 18:30	5,33	-	-	1,10	110,15	87,45	87,45	87,45	1,99
27/5/07 18:35	5,34	-	-	1,20	120,48	87,09	87,11	87,10	2,35
27/5/07 18:40	5,34	17,4	75	1,20	120,48	86,94	86,94	86,94	2,51
28/5/07 19:00	6,35	16,1	61	1,20	120,48	86,34	86,36	86,35	3,10
29/5/07 17:05	7,27	13,4	65	1,20	120,48	86,07	86,06	86,07	3,38
29/5/07 17:35	7,30	14,3	61	1,20	120,48	86,05	86,05	86,05	3,40
30/5/07 14:20	8,16	15,3	67	1,20	120,48	85,86	85,85	85,86	3,59
31/5/07 18:10	9,32	15,6	73	1,20	120,48	85,57	85,60	85,59	3,86
31/5/07 18:22	9,33	-	-	1,42	141,68	85,04	85,02	85,03	4,41
31/5/07 18:25	9,33	-	-	1,42	141,68	84,93	84,90	84,92	4,53
31/5/07 18:30	9,33	-	-	1,65	165,36	83,73	83,76	83,75	5,70
31/5/07 18:50	9,35	-	-	1,65	165,36	83,36	83,37	83,37	6,08
1/6/07 13:25	10,12	16,1	77	1,65	165,36	82,76	82,75	82,76	6,69
1/6/07 13:40	10,13	-	-	1,85	184,55	82,31	82,31	82,31	7,13
1/6/07 13:45	10,14	-	-	2,04	203,91	81,33	81,34	81,34	8,11
1/6/07 13:50	10,14	-	-	2,23	223,44	80,19	80,19	80,19	9,26
1/6/07 14:10	10,15	-	-	2,23	223,44	79,84	79,83	79,84	9,61
2/6/07 19:25	11,37	15,0	73	2,23	223,44	78,76	78,76	78,76	10,69
3/6/07 18:50	12,35	15,0	70	2,23	223,44	78,36	78,35	78,36	11,09
4/6/07 18:00	13,31	16,4	68	2,23	223,44	78,03	78,02	78,03	11,42
5/6/07 17:40	14,30	15,9	71	2,23	223,44	77,74	77,75	77,75	11,70
5/6/07 18:00	14,31	-	-	2,72	272,29	75,97	75,95	75,96	13,49
5/6/07 18:14	14,32	-	-	2,72	272,29	75,77	75,75	75,76	13,69
5/6/07 18:26	14,33	-	-	2,72	272,29	75,64	75,63	75,64	13,81
5/6/07 18:50	14,35	16,9	68	2,72	272,29	75,59	75,60	75,60	13,85
6/6/07 19:20	15,37	16,6	71	2,72	272,29	74,84	74,85	74,85	14,60
6/6/07 19:29	15,37	-	-	2,58	258,42	75,06	75,04	75,05	14,40
6/6/07 19:32	15,38	-	-	2,39	239,19	75,37	75,36	75,37	14,08
6/6/07 19:34	15,38	-	-	2,20	219,83	75,76	75,78	75,77	13,68
6/6/07 19:40	15,38	-	-	1,90	189,77	76,54	76,53	76,54	12,91
6/6/07 19:42	15,38	-	-	1,70	169,96	77,07	77,10	77,09	12,36
6/6/07 19:46	15,39	-	-	1,50	150,03	77,65	77,65	77,65	11,80
6/6/07 19:49	15,39	-	-	1,31	130,99	78,25	78,25	78,25	11,20
6/6/07 19:50	15,39	-	-	1,11	111,46	78,88	78,89	78,89	10,56
6/6/07 19:59	15,40	-	-	1,02	102,00	79,31	79,31	79,31	10,14
6/6/07 20:11	15,40	-	-	1,02	102,00	79,32	79,33	79,33	10,12
7/6/07 12:58	16,10	15,1	76	1,02	102,00	79,51	79,51	79,51	9,93
8/6/07 16:20	17,24	17,0	75	1,02	102,00	79,59	79,56	79,58	9,87
9/6/07 18:20	18,33	17,0	79	1,02	102,00	79,61	79,63	79,62	9,82
10/6/07 17:55	19,31	18,3	100	1,02	102,00	79,64	79,64	79,64	9,80
13/6/07 19:25	22,37	19,1	89	1,02	102,00	79,62	79,64	79,63	9,82
15/6/07 13:40	24,13	18,8	88	1,02	102,00	79,59	79,57	79,58	9,86
16/6/07 16:50	25,26	15,5	74	1,02	102,00	79,39	79,35	79,37	10,08
16/6/07 17:29	25,29	-	-	1,02	102,00	79,30	79,29	79,30	10,15
17/6/07 17:10	26,28	15,4	75	1,02	102,00	79,37	79,38	79,38	10,07
19/6/07 14:55	28,18	16,4	81	1,02	102,00	79,31	79,34	79,33	10,12
19/6/07 15:02	28,19	-	-	1,32	131,63	78,69	78,66	78,68	10,77
19/6/07 15:09	28,19	-	-	1,72	171,51	77,58	77,57	77,58	11,87
19/6/07 15:14	28,20	-	-	2,12	211,94	76,46	76,47	76,47	12,98
19/6/07 15:22	28,20	-	-	2,34	234,00	75,86	75,86	75,86	13,59
19/6/07 18:42	28,34	-	-	2,34	234,00	75,70	75,70	75,70	13,75
19/6/07 22:40	28,51	-	-	2,34	234,00	75,62	75,62	75,62	13,83

VIGA V7d (ciclo 7 dias) - CP IV-32RS									
Dia / Hora	Idade	Temp.	Umidade	Carga		Leitura (mm)		Média	Flecha
	(dias)	(° C)	(%)	(kN)	(kgf)	L1	L2	(mm)	(mm)
26/5/07 19:40	4,38	16,6	71	0,00	0,00	88,26	88,26	88,26	0,00
26/5/07 20:35	4,42	16,4	71	P.P.	P.P.	88,24	88,24	88,24	0,02
26/5/07 21:50	4,47	16,3	70	0,86	86,16	86,95	86,95	86,95	1,31
27/5/07 18:10	5,32	16,4	77	0,86	86,16	86,72	86,72	86,72	1,54
27/5/07 18:40	5,34	17,4	75	0,86	86,16	86,67	86,71	86,69	1,57
28/5/07 19:00	6,35	16,1	61	0,86	86,16	86,54	86,56	86,55	1,71
29/5/07 17:05	7,27	13,4	65	0,86	86,16	86,30	86,30	86,30	1,96
29/5/07 17:15	7,28	-	-	1,07	107,47	85,70	85,71	85,71	2,56
29/5/07 17:20	7,28	-	-	1,27	127,08	85,48	85,48	85,48	2,78
29/5/07 17:35	7,30	14,3	61	1,27	127,08	85,28	85,29	85,29	2,98
30/5/07 14:20	8,16	15,3	67	1,27	127,08	84,66	84,66	84,66	3,60
31/5/07 18:10	9,32	15,6	73	1,27	127,08	84,31	84,30	84,31	3,96
31/5/07 18:50	9,35	-	-	1,27	127,08	84,28	84,29	84,29	3,98
1/6/07 13:25	10,12	16,1	77	1,27	127,08	84,06	84,05	84,06	4,21
1/6/07 14:10	10,15	-	-	1,27	127,08	84,08	84,09	84,09	4,18
2/6/07 19:25	11,37	15,0	73	1,27	127,08	83,73	83,72	83,73	4,54
2/6/07 19:35	11,38	-	-	1,47	146,88	83,14	83,14	83,14	5,12
2/6/07 19:45	11,39	-	-	1,47	146,88	83,02	83,00	83,01	5,25
3/6/07 18:50	12,35	15,0	70	1,47	146,88	82,45	82,45	82,45	5,81
4/6/07 18:00	13,31	16,4	68	1,47	146,88	82,16	82,14	82,15	6,11
5/6/07 17:40	14,30	15,9	71	1,47	146,88	81,88	81,86	81,87	6,39
5/6/07 18:22	14,33	-	-	1,92	191,76	80,19	80,16	80,17	8,09
6/6/07 19:20	15,37	16,6	71	1,92	191,76	79,34	79,36	79,35	8,91
7/6/07 12:58	16,10	15,1	76	1,92	191,76	79,02	79,03	79,03	9,24
8/6/07 16:20	17,24	17,0	75	1,92	191,76	78,83	78,85	78,84	9,42
9/6/07 18:20	18,33	17,0	79	1,92	191,76	78,62	78,63	78,63	9,64
9/6/07 18:30	18,33	-	-	2,14	213,55	78,12	78,12	78,12	10,14
9/6/07 18:33	18,34	-	-	2,34	234	77,32	77,36	77,34	10,92
9/6/07 18:50	18,35	-	-	2,34	234	77,07	77,07	77,07	11,19
10/6/07 17:55	19,31	18,3	96	2,34	234	76,44	76,48	76,46	11,80
11/6/07 18:00	20,31	18,9	86	2,34	234	76,20	76,19	76,20	12,07
12/6/07 17:20	21,28	19,8	95	2,34	234	76,07	76,08	76,08	12,19
12/6/07 17:40	21,30	-	-	2,80	280,20	74,50	74,51	74,51	13,76
12/6/07 18:05	21,32	-	-	2,80	280,20	74,06	74,07	74,07	14,20
13/6/07 19:25	22,37	19,1	89	2,80	280,20	73,37	73,38	73,38	14,89
15/6/07 13:40	24,13	18,8	88	2,80	280,20	73,00	72,99	73,00	15,27
16/6/07 16:50	25,26	15,5	74	2,80	280,20	72,29	72,28	72,29	15,98
16/6/07 16:57	25,27	-	-	2,52	252,37	72,83	72,85	72,84	15,42
16/6/07 17:00	25,27	-	-	2,32	231,92	73,29	73,32	73,31	14,96
16/6/07 17:02	25,27	-	-	2,12	211,96	73,77	73,78	73,78	14,49
16/6/07 17:04	25,27	-	-	1,92	191,58	74,36	74,32	74,34	13,92
16/6/07 17:07	25,28	-	-	1,72	172,34	74,89	74,91	74,90	13,36
16/6/07 17:09	25,28	-	-	1,53	152,75	75,52	75,54	75,53	12,73
16/6/07 17:12	25,28	-	-	1,32	132,16	76,10	76,12	76,11	12,15
16/6/07 17:15	25,28	-	-	1,13	112,55	76,88	76,87	76,88	11,39
16/6/07 17:24	25,29	-	-	1,02	102,00	77,35	77,36	77,36	10,91
16/6/07 17:29	25,29	-	-	1,02	102,00	77,42	77,41	77,42	10,85
17/6/07 17:10	26,28	15,4	75	1,02	102,00	77,76	77,76	77,76	10,50
19/6/07 14:55	28,18	16,4	81	1,02	102,00	77,85	77,83	77,84	10,42
19/6/07 15:31	28,21	-	-	1,32	131,85	77,24	77,23	77,24	11,03
19/6/07 15:37	28,21	-	-	1,70	170,34	75,88	75,88	75,88	12,38
19/6/07 15:43	28,22	-	-	2,11	210,55	74,81	74,81	74,81	13,45
19/6/07 15:53	28,22	-	-	2,34	234,00	74,12	74,13	74,13	14,14
19/6/07 18:42	28,34	-	-	2,34	234,00	73,91	73,91	73,91	14,35
19/6/07 22:25	28,50	-	-	2,34	234,00	73,89	73,90	73,90	14,37
19/6/07 22:40	28,51	-	-	2,34	234,00	73,88	73,89	73,89	14,38

VIGA V28d (testemunho) - CP IV-32RS									
Dia / Hora	Idade (dias)	Temp. (° C)	Umid. (%)	Carga		Leitura (mm)		Média (mm)	Flecha (mm)
				(kN)	(kgf)	L1	L2		
19/6/07 19:45	28,39	17,6	80	0,00	0,00	89,41	89,41	89,41	0,00
19/6/07 20:37	28,42	-	-	P.P.	P.P.	89,40	89,40	89,40	0,01
19/6/07 21:04	28,44	-	-	0,52	51,66	88,99	88,97	88,98	0,43
19/6/07 21:15	28,45	-	-	0,72	71,57	88,74	88,76	88,75	0,66
19/6/07 21:20	28,45	-	-	0,91	91,09	88,55	88,53	88,54	0,87
19/6/07 21:25	28,45	-	-	1,11	111,45	88,24	88,26	88,25	1,16
19/6/07 21:31	28,46	-	-	1,31	130,91	87,66	87,66	87,66	1,75
19/6/07 21:37	28,46	-	-	1,51	150,70	86,94	86,93	86,94	2,47
19/6/07 21:42	28,47	-	-	1,71	171,05	86,08	86,09	86,09	3,32
19/6/07 21:49	28,47	-	-	1,90	189,95	85,00	85,02	85,01	4,40
19/6/07 21:56	28,48	-	-	2,10	210,12	83,72	83,73	83,73	5,69
19/6/07 22:09	28,49	-	-	2,34	234,00	82,31	82,32	82,32	7,10
19/6/07 22:25	28,50	-	-	2,34	234,00	82,06	82,07	82,07	7,35
19/6/07 22:40	28,51	-	-	2,34	234,00	81,86	81,87	81,87	7,54

ANEXO 4: PRÉ-CARREGAMENTO DE LONGA DURAÇÃO – Flechas a
Partir dos 28 Dias de Idade

Flecha a partir dos 28 dias - CP V-ARI															
Idade (dias)	Temp. (°C)	Umid. (%)	Carga (kN)	V4d (ciclo 4 dias)				V7d (ciclo 7 dias)				V28d (testemunho)			
				Leitura (mm)	Média (mm)	Flecha (mm)		Leitura (mm)	Média (mm)	Flecha (mm)		Leitura (mm)	Média (mm)	Flecha (mm)	
				L1	L2			L1	L2			L1	L2		
28	25,1	55	2,38	75,46	75,44	75,45	14,84	75,79	75,81	75,80	14,52	80,26	80,29	80,28	8,51
29	28,8	67	2,38	75,39	75,39	75,39	14,90	75,83	75,85	75,84	14,48	79,38	79,41	79,40	9,40
30	28,0	62	2,38	75,26	75,27	75,27	15,03	75,78	75,79	75,79	14,54	79,04	79,06	79,05	9,74
31	28,1	73	2,38	75,25	75,24	75,25	15,05	75,74	75,79	75,77	14,56	78,84	78,88	78,86	9,93
32	26,4	74	2,38	75,22	75,25	75,24	15,06	75,76	75,80	75,78	14,54	78,73	78,75	78,74	10,05
34	31,5	62	2,38	75,07	75,08	75,08	15,22	75,66	75,70	75,68	14,64	78,40	78,41	78,41	10,39
35	32,4	60	2,38	74,80	74,87	74,84	15,46	75,56	75,57	75,57	14,76	78,03	78,06	78,05	10,75
36	33,3	57	2,38	74,62	74,66	74,64	15,65	75,34	75,36	75,35	14,97	77,74	77,76	77,75	11,04
37	33,4	59	2,38	74,45	74,46	74,46	15,84	75,23	75,27	75,25	15,07	77,44	77,49	77,47	11,33
38	29,5	64	2,38	74,36	74,39	74,38	15,92	75,18	75,21	75,20	15,13	77,30	77,34	77,32	11,47
40	30,4	67	2,38	74,39	74,41	74,40	15,89	75,25	75,26	75,26	15,07	77,34	77,38	77,36	11,43
41	29,8	66	2,38	74,20	74,31	74,26	16,04	75,17	75,21	75,19	15,13	77,16	77,22	77,19	11,60
42	31,9	62	2,38	74,22	74,26	74,24	16,05	75,10	75,12	75,11	15,21	77,09	77,11	77,10	11,69
43	30,1	69	2,38	74,23	74,23	74,23	16,06	75,01	75,01	75,01	15,31	77,07	77,03	77,05	11,74
44	32,5	64	2,38	74,20	74,24	74,22	16,07	74,99	75,08	75,04	15,29	77,05	77,07	77,06	11,73
45	28,9	63	2,38	74,01	74,03	74,02	16,27	74,82	74,95	74,89	15,44	76,79	76,84	76,82	11,98
48	29,5	63	2,38	73,85	73,94	73,90	16,40	74,77	74,83	74,80	15,52	76,51	76,58	76,55	12,25
49	30,9	60	2,38	73,82	73,86	73,84	16,45	74,79	74,80	74,80	15,53	76,53	76,56	76,55	12,25
50	30,6	61	2,38	73,76	73,79	73,78	16,52	74,71	74,75	74,73	15,59	76,43	76,49	76,46	12,33
51	30,9	66	2,38	73,75	73,80	73,78	16,52	74,62	74,75	74,69	15,64	76,48	76,48	76,48	12,31
52	29,1	56	2,38	73,74	73,80	73,77	16,52	74,59	74,75	74,67	15,65	76,38	76,43	76,41	12,39
55	24,9	74	2,38	73,71	73,77	73,74	16,55	74,68	74,72	74,70	15,62	76,34	76,36	76,35	12,44

Flecha a partir dos 28 dias - CP V-ARI - continuação															
Idade (dias)	Temp. (°C)	Umid. (%)	Carga (kN)	V4d (ciclo 4 dias)			V7d (ciclo 7 dias)			V28d (testemunho)					
				Leitura (mm)		Média (mm)	Leitura (mm)		Média (mm)	Leitura (mm)		Média (mm)	Flecha (mm)		
				L1	L2	(mm)	L1	L2	(mm)	L1	L2	(mm)	Flecha (mm)		
57	25,6	76	2,38	73,78	73,80	73,79	16,50	74,74	74,81	74,78	15,55	76,39	76,43	76,41	12,38
59	29,9	70	2,38	73,74	73,75	73,75	16,55	74,66	74,68	74,67	15,65	76,35	76,36	76,36	12,44
62	28,5	71	2,38	73,44	73,47	73,46	16,84	74,54	74,66	74,60	15,72	76,20	76,27	76,24	12,56
64	29,9	71	2,38	73,60	73,60	73,60	16,69	74,58	74,60	74,59	15,73	76,16	76,16	76,16	12,63
65	30,6	68	2,38	73,54	73,56	73,55	16,74	74,41	74,42	74,42	15,91	76,01	76,09	76,05	12,74
69	28,8	70	2,38	73,50	73,48	73,49	16,80	74,35	74,35	74,35	15,97	75,93	76,00	75,97	12,83
71	27,4	62	2,38	73,33	73,37	73,35	16,94	74,30	74,33	74,32	16,01	75,82	75,87	75,85	12,95
72	27,1	61	2,38	73,26	73,31	73,29	17,01	74,23	74,23	74,23	16,09	75,73	75,84	75,79	13,01
76	24,9	58	2,38	73,11	73,13	73,12	17,17	74,06	74,05	74,06	16,27	75,59	75,63	75,61	13,18
78	26,0	67	2,38	73,10	73,12	73,11	17,18	74,06	74,06	74,06	16,26	75,51	75,55	75,53	13,26
80	25,6	59	2,38	73,05	73,02	73,04	17,26	74,01	74,03	74,02	16,30	75,43	75,48	75,46	13,34
83	26,9	64	2,38	73,00	73,02	73,01	17,28	73,94	74,02	73,98	16,34	75,39	75,45	75,42	13,37
85	27,5	69	2,38	73,02	73,05	73,04	17,26	73,97	74,00	73,99	16,34	75,49	75,51	75,50	13,29
87	27,6	67	2,38	72,95	73,03	72,99	17,30	73,99	73,93	73,96	16,36	75,35	75,43	75,39	13,40
90	28,0	68	2,38	72,91	72,95	72,93	17,36	73,90	74,01	73,96	16,37	75,32	75,35	75,34	13,46
92	25,0	72	2,38	72,89	72,92	72,91	17,39	73,90	74,02	73,96	16,36	75,30	75,33	75,32	13,48
93	21,6	69	2,38	72,92	72,93	72,93	17,37	73,90	74,02	73,96	16,36	75,34	75,38	75,36	13,43
94	19,3	71	2,38	72,79	72,89	72,84	17,45	73,86	73,87	73,87	16,46	75,24	75,32	75,28	13,51
99	22,4	78	2,38	72,88	72,90	72,89	17,40	73,86	73,85	73,86	16,47	75,21	75,24	75,23	13,57
104	21,1	65	2,38	72,73	72,78	72,76	17,54	73,77	73,78	73,78	16,55	75,11	75,23	75,17	13,62
106	17,1	64	2,38	72,55	72,54	72,55	17,75	73,58	73,59	73,59	16,74	74,94	75,02	74,98	13,81
108	21,0	63	2,38	72,61	72,67	72,64	17,65	73,66	73,68	73,67	16,65	75,09	75,07	75,08	13,71
111	18,6	78	2,38	72,74	72,75	72,75	17,55	73,73	73,75	73,74	16,58	75,18	75,16	75,17	13,62

Idade (dias)	Temp. (°C)	Umid. (%)	Carga (kN)	Flecha a partir dos 28 dias - CP IV-32RS						V28d (testemunho)					
				V4d (ciclo 4 dias)			V7d (ciclo 7 dias)			V28d (testemunho)					
				Leitura (mm)	Média (mm)	Flecha (mm)	Leitura (mm)	Média (mm)	Flecha (mm)	Leitura (mm)	Média (mm)	Flecha (mm)			
				L1	L2		L1	L2		L1	L2				
28	16,4	81	2,34	75,62	75,62	13,83	73,88	73,89	73,89	14,38	81,86	81,87	81,87	81,87	7,54
29	19,9	85	2,34	75,49	75,49	13,96	73,81	73,83	73,82	14,44	81,10	81,12	81,11	81,11	8,30
31	20,0	89	2,34	75,22	75,23	14,22	73,57	73,57	73,57	14,69	80,65	80,64	80,65	80,65	8,76
33	17,1	69	2,34	74,62	74,63	14,82	72,97	72,98	72,98	15,29	79,84	79,83	79,84	79,84	9,57
36	16,4	75	2,34	74,35	74,36	15,09	72,75	72,74	72,75	15,52	79,35	79,34	79,35	79,35	10,07
38	15,9	76	2,34	74,29	74,29	15,16	72,65	72,67	72,66	15,60	79,32	79,34	79,33	79,33	10,08
40	14,4	75	2,34	74,16	74,16	15,29	72,53	72,54	72,54	15,73	79,05	79,05	79,05	79,05	10,36
41	14,0	75	2,34	74,14	74,15	15,30	72,50	72,48	72,49	15,77	79,05	79,05	79,05	79,05	10,36
43	15,9	80	2,34	74,11	74,11	15,34	72,45	72,46	72,46	15,81	79,02	79,03	79,03	79,03	10,39
48	16,8	86	2,34	73,98	73,99	15,46	72,31	72,32	72,32	15,95	78,76	78,75	78,76	78,76	10,66
50	14,4	70	2,34	73,73	73,74	15,71	71,87	71,86	71,87	16,39	78,53	78,53	78,53	78,53	10,88
51	14,6	70	2,34	73,71	73,71	15,74	71,79	71,78	71,79	16,47	78,42	78,43	78,43	78,43	10,99
52	14,9	73	2,34	73,65	73,62	15,81	71,74	71,74	71,74	16,52	78,37	78,34	78,36	78,36	11,06
55	14,1	73	2,34	73,60	73,58	15,86	71,85	71,86	71,85	16,41	78,27	78,29	78,28	78,28	11,13
56	13,9	76	2,34	73,63	73,61	15,83	71,84	71,87	71,85	16,41	78,28	78,27	78,28	78,28	11,14
57	16,8	76	2,34	73,63	73,63	15,82	71,89	71,86	71,87	16,39	78,26	78,24	78,25	78,25	11,16
62	15,4	72	2,34	73,55	73,53	15,91	71,72	71,73	71,72	16,54	78,15	78,12	78,14	78,14	11,28
65	13,5	67	2,34	73,13	73,14	16,31	71,29	71,28	71,28	16,98	77,60	77,61	77,61	77,61	11,81
69	12,3	71	2,34	72,88	72,90	16,56	71,05	71,04	71,04	17,22	77,36	77,36	77,36	77,36	12,05
71	15,4	78	2,34	72,94	72,94	16,51	71,06	71,04	71,05	17,21	77,38	77,36	77,37	77,37	12,04
73	16,4	84	2,34	73,05	73,03	16,41	71,14	71,12	71,13	17,13	77,42	77,42	77,42	77,42	11,99
77	15,4	70	2,34	72,90	72,87	16,56	70,96	70,99	70,97	17,29	77,28	77,24	77,26	77,26	12,15
81	15,9	67	2,34	72,75	72,72	16,71	70,80	70,79	70,79	17,47	77,09	77,08	77,09	77,09	12,33