

**ANA CECILIA FERREIRA LEITE**

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE  
EDIFICAÇÕES DE CONCRETO DE MÚLTIPLOS  
PAVIMENTOS CONSIDERANDO O EFEITO  
CONSTRUTIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia das Construções

Orientador: Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva

**RECIFE**

**2015**

L533c Leite, Ana Cecília Ferreira

Comportamento estrutural de edificações de concreto de múltiplos pavimentos considerando o efeito construtivo / Ana Cecília Ferreira Leite ; orientador Fernando Artur Nogueira Silva, 2015.

163 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-Reitoria Acadêmica. Coordenação Geral de Pós-Graduação. Mestrado em Engenharia Civil, 2015.

1. Edifícios altos. 2. Concreto armado. 3. Concreto - Expansão e contração. 4. Construção de concreto. I. Título.

CDU 624.012.45

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANA CECILIA FERREIRA LEITE**

**Comportamento Estrutural de Edificações de Concreto de**  
**Múltiplos Pavimentos Considerando o Efeito Construtivo**

**Comissão Examinadora:**

---

**Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva**

**Orientador - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP**

---

**Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira**

**Examinador Interno - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP**

---

**Professor Dr. Afonso Henrique Sobreira de Oliveira**

**Examinador Externo - Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**

Aprovado em 29 de dezembro de 2015

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela sua infinita bondade e poder. Pelas bênçãos derramadas sobre mim, e por mais uma vitória concedida.

Aos meus pais, Maria Lucia Ferreira e Paulo Fernando Alves Leite, principais responsáveis pela minha vida, pelo meu caráter, educação, amizade, orientação, e principalmente, pelo eterno incentivo e confiança.

À minha irmã, Maria Paula Ferreira Leite, pela lealdade e amizade, e ao meu irmão João Pedro Ferreira Leite pela confiança, amizade e pela imensa ajuda prestada no período em que estive ausente do trabalho.

Ao meu noivo, Fillipe Santiago de Oliveira, sempre paciente, generoso e confiante em meus momentos de desânimo e falta de estímulo.

Ao meu orientador Fernando Artur Nogueira Silva, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado, pelo tempo dedicado ao meu crescimento profissional, pelo estímulo ao desenvolvimento desta dissertação e fundamentais ensinamentos que contribuíram de forma incomensurável à conclusão desta pesquisa.

Aos amigos engenheiros João Luíz de Melo Ramos e Fábio Carneiro Lourenço, que sempre se puseram à disposição para ajudar, também pelo auxílio no desenvolvimento desta dissertação, pela força, calma e compreensão em meus momentos de estresse e desânimo.

Aos amigos engenheiros Alexsandro Silva, Aline Monteiro e Ana Paula Lins pelo incentivo e apoio.

Aos amigos engenheiros Hildo Augusto Santiago Filho e Renato G. da Silva Pereira, pelo grande auxílio no início do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu amigo, Túlio Medeiros, pela solidariedade e grande ajuda prestada para o desenvolvimento desta dissertação.

Às minhas avós, Maria Ninfa Ferreira e Maria das Dores da Silva Leite, por toda tranquilidade, fé e sabedoria passadas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de Mestrado.

## Resumo

Nos últimos anos, a indústria da construção civil experimentou um forte crescimento na demanda por edifícios de múltiplos pavimentos de concreto armado. Este comportamento do mercado impulsionou construtores a acelerar todas as etapas do processo de construção, a fim de entregar a edificação em um tempo cada vez mais curto. Como decorrência deste fato, as estruturas são carregadas mais precocemente, ocasião em que as suas propriedades de resistência e deformação ainda não se encontram suficientemente maduras para suportar o carregamento construtivo que a solicita. Com a finalidade de compreender quais consequências são provocadas por esse carregamento prematuro da estrutura e analisar a importância dos efeitos construtivos no projeto de edificações de concreto armado, o trabalho traz o resultado de análises não-lineares realizadas com o Método dos Elementos Finitos adotando uma abordagem usualmente referida como *staged construction* – construção em estágios – aplicada a uma edificação real, situada na Cidade do Recife, Estado de Pernambuco, Brasil. Nestas análises foram levados em consideração os efeitos da retração, fluência e envelhecimento do concreto. Os resultados obtidos demonstram que os deslocamentos verticais nos pilares, decorrentes dos efeitos construtivos, são fortemente alterados quando comparados com os deslocamentos verticais resultantes da análise sem a consideração dos estágios de construção. A não consideração desses efeitos construtivos podem, em alguns casos, conduzir a manifestações patológicas importantes na edificação.

**Palavras-Chave:** *edifícios de múltiplos andares, concreto armado, efeitos construtivos, construção em estágios, deformação lenta, retração.*

## Abstract

The building industry has experienced in recent years a strong growth in demand in general and in the case of reinforced concrete buildings this increase has been more marked. This fact has also contributed to accelerate all stages of the production process of these constructions with more pronounced effects on the methodologies used in the constructive steps that influence directly the structural design of the building. Structures loaded at ever earlier ages, in which the strength and deformation properties of materials are not yet sufficiently mature, it is a variable that needs to be taken into account already in the design phase so that the concrete structure behaves within acceptable level of reliability taking into account design code recommendations for service life. To understand the importance of constructive effects and to assess its magnitude in the execution of reinforced concrete buildings, this paper present result from nonlinear analyses using Finite Element Method adopting an approach commonly referred as staged construction applied to a typical building found in the practice. The effects of creep and shrinkage were considered and the results obtained demonstrate that the strains due to constructive effects can, in certain cases, assume representative values which, if ignored, can lead to important pathologies in the building.

**Keywords:** *reinforced concrete buildings, constructive effects, staged construction, creep, shrinkage.*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE GRÁFICOS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	XIV
CAPITULO 01 .....	1
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE MÚLTIPLOS ANDARES DE CONCRETO DEVIDO AOS EFEITOS CONSTRUTIVOS .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	4
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA.....	5
1.4 OBJETIVOS .....	6
1.4.1 Objetivo Geral.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	7
1.6 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	7
CAPITULO 02 .....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
2.1 O PROCESSO CONSTRUTIVO DE EDIFICAÇÃO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS DE CONCRETO ARMADO .....	9
2.1.1 Processo construtivo de edificações de concreto armado usualmente empregados no Brasil 14	
2.2 OS EFEITOS CONSTRUTIVOS EM EDIFICAÇÕES DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS DE CONCRETO ARMADO .....	17
2.3 AÇÕES PRESENTES NAS ETAPAS DE CONSTRUÇÃO .....	21
2.3.1 Ações horizontais .....	21
2.3.2 Ações verticais.....	21
2.4 MODELOS NUMÉRICOS DISPONÍVEIS PARA A SIMULAÇÃO DOS EFEITOS CONSTRUTIVOS EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO .....	22
2.5 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS PARA CONSIDERAÇÃO DOS EFEITOS CONSTRUTIVOS NO PROJETO DE EDIFICAÇÕES DE CONCRETO .....	25
2.5.1 Norma Americana - ACI 347/14.....	25
2.5.2 Norma Europeia - Eurocode 2 – Parte 1/1 .....	27
2.5.3 Norma Europeia - Eurocode 1 – Parte 1/6 .....	28
2.5.4 A Norma Brasileira de projeto de estruturas de concreto .....	31
2.5.5 A Norma de Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto e a Norma de execução de estrutura de concreto .....	33
2.6 O EFEITO DO TEMPO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ESTRUTURAL .....	34
2.6.1 Retração.....	34
2.6.2 Deformação lenta – Fluência.....	39
2.6.3 Variação da Resistência à Compressão do Concreto Com o Tempo .....	47

CAPITULO 03 .....	51
3 METODOLOGIA .....	51
3.1 DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO ANALISADA.....	53
3.2 A MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTÁGIOS CONSTRUTIVOS NO PROGRAMA UTILIZADO ....	54
3.3 EDIFICAÇÃO ANALISADA NO SAP 2000.....	69
CAPITULO 04 .....	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	72
4.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS NOS TOPOS DOS PILARES.....	73
4.2 MOMENTOS FLETORES NOS PILARES .....	76
4.3 ESFORÇOS CORTANTES NOS PILARES .....	80
4.4 ESFORÇOS NORMAIS NOS PILARES .....	84
4.5 MOMENTOS FLETORES NAS VIGAS .....	85
4.6 ESFORÇOS CORTANTES NAS VIGAS .....	93
4.7 REAÇÕES NOS APOIOS .....	101
CAPITULO 05 .....	103
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA OUTROS TRABALHOS.....	103
5.1 CONCLUSÕES.....	103
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
REFERÊNCIAS .....	106
APÊNDICE A .....	110
APÊNDICE B.....	113
APÊNDICE C.....	141
APÊNDICE D .....	142

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma genérico de produção de um edifício de concreto armado (Fonte: O autor, adaptado de Barros e Melhado, 2006) .....	10
Figura 2 - Faixa de reescoramento .....	12
Figura 3 - Laje reescorada .....	12
Figura 4 - Processo construtivo (Etapas 1 e 2), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias. ....	15
Figura 5 - Processo construtivo (Etapas 1, 2 e 3), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias. ....	15
Figura 6- Processo construtivo (Etapas 1, 2, 3 e 4), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias. ....	15
Figura 7 - Processo construtivo (Etapas 1, 2, 3, 4 e 5), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias.....	15
Figura 8 - Influência das condições de cura sobre a resistência (Concrete Manual, 1981).....	20
Figura 9 - Variação da deformação lenta irreversível (ABNT, NBR 6118, 2014).....	41
Figura 10 - Planta baixa Fôrma - Pavimento tipo.....	54
Figura 11 – Pilar representando uma construção de concreto de $n$ pavimentos.....	55
Figura 12 – Esquema do pórtico plano com três andares .....	64
Figura 13 – Momentos fletores da análise linear sem estágios de construção .....	67
Figura 14 – Momentos fletores da análise não linear sem efeitos do tempo com estágios de construção .....	68
Figura 15 – Momentos fletores da análise não linear com efeitos do tempo após 5 anos.....	68
Figura 16 – Modelo Numérico da Edificação Estudada.....	70
Figura 17 - 30 (trinta) estágios construtivos.....	71
Figura 18 - Planta baixa da edificação – identificação dos elementos analisados .....	72
Figura 20 - Seções da viga V5a.....	85
Figura 21 - Seções da viga V11b.....	88
Figura 22 - Seções da viga V11c.....	91

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Tempo para retirada das fôrmas segundo a ACI 347/14 .....	26
Tabela 2 - Classificação das ações (diferentes das cargas de construção) durante os estágios construtivos (Tabela 2.1 do Eurocode 1 - parte 01/06).....	29
Tabela 3 - Classificação das cargas de construção (Tabela 2.2 do Eurocode 1 - parte 01/06).....	30
Tabela 4 - Adição das cargas ao longo dos estágios.....	52
Tabela 5 - Súmula dos resultados da análise de efeitos construtivos .....	61
Tabela 6 - Deslocamentos verticais (mm) nos pilares da extremidade do pórtico com 3 andares com diferentes parâmetros de análises.....	66
Tabela 7 - Deslocamentos verticais (mm) nos pilares centrais do pórtico com 3 andares com diferentes parâmetros de análises.....	66
Tabela 8 - Parâmetros do concreto adotados na análise .....	70
Tabela 9 - Reações nos apoios para diversas análises .....	102

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação do Coeficiente $\varepsilon_{1s}$ .....	37
Gráfico 2 - Variação do Coeficiente $\varepsilon_{2s}$ .....	37
Gráfico 3 - Variação do Coeficiente $\varepsilon_{2s}$ .....	38
Gráfico 4 - Variação da deformação de retração por secagem $\varepsilon_{sc}$ - (AMARAL, 2011).....	39
Gráfico 5 - Evolução do coeficiente $\beta_1$ .....	43
Gráfico 6 - Evolução do coeficiente $\varphi_a$ com o tempo.....	44
Gráfico 7 - Evolução do coeficiente $\varphi_a$ com o tempo.....	45
Gráfico 8 - Evolução do coeficiente $\varphi_{2c}$ com o tempo .....	45
Gráfico 9 - Variação do Coeficiente $\beta_f(t)$ .....	46
Gráfico 10 - Variação da resistência à compressão do concreto com a idade (dias).....	48
Gráfico 11 - Variação da resistência à compressão do concreto com a idade (dias) e com a temperatura de cura.....	49
Gráfico 12 - Variação do módulo de deformação longitudinal do concreto com a idade, em dias. ....	50
Gráfico 13 – Comprimento real dos lances de pilares em cada andar.....	60
Gráfico 14 – Deslocamento no topo de cada pilar quando adicionado como um estágio e carregado.....	60
Gráfico 15 – Deslocamento total no topo de cada pilar no final do último estágio de construção .....	60
Gráfico 16 – Deslocamentos verticais totais no topo dos pilares: Efeito Construtivo x Análise Linear .....	61
Gráfico 17 – Deslocamentos verticais no topo dos pilares com efeitos do tempo após 01 ano ....	62
Gráfico 18 - Deslocamentos verticais no topo dos pilares com efeitos do tempo após 05 anos ...	63
Gráfico 19 - Deslocamentos verticais no topo dos pilares com efeitos do tempo após 50 anos ...	63
Gráfico 20 - Curva tensão x deformação do concreto .....	71
Gráfico 21 - Deslocamentos verticais nos topos do pilar P2 ao longo dos andares .....	73
Gráfico 22 - Deslocamentos verticais nos topos do pilar P3 ao longo dos andares .....	74
Gráfico 23 - Momento fletor no eixo M3-3 na base do pilar P2 ao longo dos andares.....	77
Gráfico 24 - Momento fletor no eixo M3-3 no topo do pilar P2 ao longo dos andares .....	77
Gráfico 25 - Momento fletor no eixo M2-2 na base do pilar P3 ao longo dos andares.....	78
Gráfico 26 - Momento fletor no eixo M2-2 no topo do pilar P3 ao longo dos andares .....	79
Gráfico 27 - Esforço cortante na direção V2 na base do pilar P2 ao longo dos andares.....	81

Gráfico 28 - Esforço cortante na direção V2 no topo do pilar P2 ao longo dos andares.....	82
Gráfico 29 - Esforço cortante na direção V3 na base do pilar P3 ao longo dos andares.....	83
Gráfico 30 - Esforço cortante na direção V3 no topo do pilar P3 ao longo dos andares.....	83
Gráfico 31 - Momento fletor na seção 0,30m na viga V10b ao longo dos andares .....	86
Gráfico 32 - Momento fletor na seção 4,40m na viga V10b ao longo dos andares .....	86
Gráfico 33 - Momento fletor na seção 8,50m na viga V10b ao longo dos andares .....	87
Gráfico 34 - Momento fletor na seção 0,30m na viga V11b ao longo dos andares .....	89
Gráfico 35 - Momento fletor na seção 2,44m na viga V11b ao longo dos andares .....	89
Gráfico 36 - Momento fletor na seção 4,10m na viga V11b ao longo dos andares .....	90
Gráfico 37 - Momentos na seção 0,30m da viga V11c ao longo dos andares .....	91
Gráfico 38 - Momentos na seção 2,00m da viga V11c ao longo dos andares.....	92
Gráfico 39 - Momentos na seção 4,10m da viga V11c ao longo dos andares.....	92
Gráfico 40 - Esforço cortante na seção 0,30m da viga V10b ao longo dos andares .....	94
Gráfico 41 - Esforço cortante na seção 4,40m da viga V10b ao longo dos andares .....	95
Gráfico 42 - Esforço cortante na seção 8,50m da viga V10b ao longo dos andares .....	95
Gráfico 43 - Esforço cortante na seção 0,30m da viga V11b ao longo dos andares .....	97
Gráfico 44 - Esforço cortante na seção 2,44m da viga V11b ao longo dos andares .....	97
Gráfico 45 - Esforço cortante na seção 4,10m da viga V11b ao longo dos andares .....	98
Gráfico 46 - Esforço cortante na seção 0,30m da viga V11c ao longo dos andares.....	99
Gráfico 47 - Esforço cortante na seção 2,00m da viga V11c ao longo dos andares.....	100
Gráfico 48 - Esforço cortante na seção 4,10m da viga V11c ao longo dos andares.....	100
Gráfico 49 - Deslocamentos verticais totais no topo dos pilares centrais do pórtico de 3 andares .....	141
Gráfico 50 - Deslocamentos verticais totais no topo dos pilares da extremidade do pórtico de 3 andares .....	141
Gráfico 51 - Esforço normal na base do pilar P2 ao longo dos andares.....	142
Gráfico 52 - Esforço normal no topo do pilar P2 ao longo dos andares.....	143
Gráfico 53 - Esforço normal na base do pilar P3 ao longo dos andares.....	143
Gráfico 54 - Esforço normal no topo do pilar P3 ao longo dos andares - seção no topo do pilar	144

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – Standard specification for Portland cement

CEB – Comité Euro-international du béton

cm - centímetro

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbônico

EN – Norma Européia

Eurocode – Código Europeu

FIP – Federation Internationale de la Precontrainte

GPa - Gigapascal

kN - Kilonewton

kN.m - Kilonewton metro

kN/m – Kilonewton por metro

kN/m<sup>2</sup> – Kilonewton por metro quadrado

kN/m<sup>3</sup> - Kilonewton por metro cúbico

m - metro

m<sup>2</sup> - metro quadrado

Mpa - Megapascal

NBR – Norma brasileira

SAP 2000 – Structural Analysis Program

# Capítulo 01

## 1 Introdução

### 1.1 Comportamento de estruturas de múltiplos andares de concreto devido aos efeitos construtivos

As estruturas de concreto armado de múltiplos pavimentos estão presentes em todo o mundo. No Brasil, sua utilização cresce abundantemente desde o início do século XX, quando o concreto começou a ser utilizado como material de construção de edifícios, pontes e viadutos. Com o bom resultado da aplicação do concreto nas edificações, e também com a ajuda de mudanças políticas, econômicas e sociais no País, em meados do século XX seu uso foi ainda mais difundido nas edificações e, a partir de então, estudos sobre comportamento das estruturas, dos materiais e normatizações sobre seu uso vêm sendo conduzidos.

As ações construtivas nas estruturas de múltiplos andares não são muito abordadas no Brasil ainda como objeto de investigação científica e, desta forma, não existem muitas referências bibliográficas que abordem o tema com a relevância devida. O comportamento dessas estruturas, quando se consideram os efeitos de construção, apresenta diferentes características e valores daqueles que se encontram, habitualmente, em livros e nas normas de projeto e execução. O principal problema quando o processo construtivo é incrementado é que os pavimentos concretados são apoiados em outros recém concretados e estes, na maioria das vezes, não atingiram propriedades demasiadamente importantes para a integridade e função principal da estrutura, como sua resistência e módulo de deformação, por exemplo.

A estrutura de concreto armado é projetada usualmente, conforme indica a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto (ABNT NBR 6118/2014), para resistir às ações (permanentes, acidentais, móveis e temporárias) que irão atuar na estrutura ao longo de sua vida útil, correspondente ao término da obra e ocupação da edificação. No entanto, durante as etapas de construção, as ações a que a estrutura é submetida podem ser significativas a ponto de introduzir esforços e deformações não previstos em projeto.

O sistema construtivo de edificações de múltiplos pavimentos em concreto armado usual no país é composto por cimbramento, fôrmas, escoras e reescoras, que são responsáveis por manter a estrutura no lugar até que o concreto atinja suas propriedades do estado endurecido, podendo assim auto portar-se. Em edificações de múltiplos andares, quando o concreto já obtém essa capacidade auto portante, e endurece, esse sistema de cimbramento, escoras e fôrmas é retirado e colocado em andar posterior. As reescoras são mantidas com a finalidade de manter a estrutura erguida até que se atinja as propriedades de resistência e deformação do concreto para a qual foi projetada.

A NBR 6118/2014 contempla os requisitos a serem considerados no projeto de estruturas de concreto. De acordo com a Norma, em seu item 5, as estruturas de concreto, durante sua construção, devem atender aos requisitos mínimos de qualidade em relação a capacidade resistente ou segurança à ruptura e durabilidade. Em seu item 11.4.1.4, determina que enquanto a estrutura não tenha sua segurança garantida pela verificação da obra pronta, as ações variáveis durante a construção devem ser inclusas no projeto e devem ser realizadas as verificações das fases construtivas mais significativas e sua influência no resultado final. Com relação à segurança da obra durante sua construção a Norma indica que as ações variáveis devem ser inclusas no projeto, no entanto não explicita quais são essas ações e como incluí-las no procedimento de cálculo e qual a metodologia de verificação deve ser utilizada.

A norma brasileira de fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto (ABNT NBR 15.696/2009) indica que devem ser tomadas as devidas precauções para evitar recalques prejudiciais provocados no solo ou na base de apoio do escoramento pelas cargas por este transmitidas, utilizando inclusive piso de concreto ou pranchões para correção de irregularidades e melhor distribuição de cargas, assim como cunhas ou hastes reguláveis, para ajustar os níveis.

Em relação aos cuidados na retirada das fôrmas e escoramentos a referida norma estabelece que *“a retirada do escoramento e das fôrmas deve ser efetuada sem choques e obedecendo a um programa elaborado de acordo com o tipo da estrutura. Durante o procedimento de retirada do escoramento, a aplicação de esforços na estrutura deve ser lenta e gradual”* (Item 6.5).

Quanto ao período para a retirada dos elementos, a mesma norma indica que se deve dar atenção especial ao tempo especificado para a retirada dos escoramentos e das fôrmas, de maneira que não se impeça a livre movimentação de juntas de retração ou dilatação.

Ainda sobre retiradas de fôrmas e escoramentos, a Norma estabelece as responsabilidades afirmando que *“para o atendimento dessas condições, o projetista da estrutura deve informar ao responsável pela execução da obra os valores mínimos de resistência à compressão e módulo de elasticidade que devem ser obedecidos concomitantemente para a retirada das fôrmas e do escoramento, tendo o responsável técnico pela obra que garantir que o  $f_{ck}$  e o  $E_c$  especificados no projeto estrutural estejam atendidos na idade da remoção do escoramento”* (Item 6.5).

Além disso, institui que *“o responsável técnico pela obra deve acompanhar o comportamento da estrutura, no que concerne às flechas, comparando-as com a especificação do plano de desforma, e reportando ao projetista da estrutura as eventuais diferenças”* (Item 6.5).

Por fim, estabelece que *“o ciclo de remoção (ou remanejamento) deve ser de no mínimo 14 dias. Quando da utilização de concretos cujas características de resistência e deformação possam ser alcançadas mais rapidamente, a análise e planejamento do sistema de escoras podem ser feitos e o ciclo pode ser reduzido, desde que asseguradas as condições dos itens acima”* (Item 6.5).

Um detido exame da norma brasileira de fôrmas e escoramentos realça as preocupações do documento normativo relacionadas às deformações decorrentes do processo construtivo. São preocupações pertinentes porque as ações durante a construção podem, em determinadas situações, ocasionar deformações indesejáveis e que, dificilmente, são consideradas de maneira precisa em projeto. Embora a norma indique que o responsável técnico da obra informe ao projetista a ocorrência de deformações divergentes das usuais, isto configura uma situação anômala ao qual, ao invés de se considerar os efeitos construtivos só na fase de projeto, vão se adotar medidas apenas na fase de verificação da não conformidade.

Esta situação é agravada quando se considera o crescimento que a indústria da construção experimentou nos últimos anos, fazendo com que construtores acelerassem cada

vez mais o processo construtivo, a fim de concluir a edificação em tempo menor, atingindo a demanda.

Destarte, esse comportamento do mercado induz ao carregamento cada vez mais precoce das estruturas de concreto armado. Logo, torna-se clara a importância do alinhamento entre as equipes de projeto e construção para garantir uma estrutura segura, nos estados limites últimos e de serviço. Além desta diminuição do ciclo de concretagem dos pavimentos de concreto armado, as escoras, reescoras e lajes tendem a ser solicitados com carregamentos de construção além dos previstos em seu projeto.

Por fim, é necessário analisar e investigar as consequências das ações de construção na estrutura, para alinhá-las e estabelecer estratégias para a sua consideração, já na fase de projeto estrutural do empreendimento.

## **1.2 Justificativa**

A indústria da construção civil brasileira utiliza de maneira muito intensa o sistema aporticado com vigas, lajes e pilares de concreto armado na construção de edifícios residenciais de múltiplos andares em concreto armado. Isto se justifica, em parte, pela pouca oferta de áreas urbanas disponíveis para construção, principalmente nas regiões metropolitanas das grandes capitais do país. Esta situação impõe uma solução de verticalização das edificações destinadas a moradia dos habitantes das cidades e o crescimento do número de andares vem sendo incrementado a cada dia, seja pela disponibilidade de concretos de mais elevada resistência e técnicas construtivas mais arrojadas, seja pela demanda espontânea do mercado por novas unidades habitacionais.

Este quadro tem gerado uma repercussão direta no mercado e a consequência mais imediata é a aceleração do processo construtivo deste tipo de edificação. Do ponto de vista do projeto estrutural, este aumento na velocidade de construção significa carregamentos mais precoces que, se não forem adequadamente investigados, podem solicitar as estruturas numa idade na qual as propriedades elásticas do concreto podem não ter sido atingidas.

Adicionalmente, o aumento da altura da edificação, aliado à aceleração do processo construtivo altera de maneira importante a resposta estrutural da edificação em termos de esforços e deslocamentos podendo causar, em algumas situações, respostas estruturais significativamente divergentes daquelas que são obtidas sem a consideração destes aspectos. Neste particular, os efeitos do tempo no concreto estrutural (fluência, retração e envelhecimento) podem gerar alterações no comportamento global da estrutura que precisam ser adequadamente analisados para que as condições de atendimento às demandas dos estados limites de serviço, previstas em normas, possam ser atendidas ao longo de toda a vida útil da edificação.

Na prática de projeto, estes aspectos ou não são incorporados ou, quando o são, simplificações empíricas, de validades desconhecidas, são adotadas. Isto se deve, em grande parte, às dificuldades inerentes à consideração dos efeitos do tempo no concreto estrutural que costuma envolver uma variada gama de parâmetros. Estas dificuldades podem ser superadas, nos dias atuais, com a utilização da modelagem numérica através dos elementos finitos e há no mercado programas que já incorporam esta possibilidade de análise, usualmente referida como *análises de estágios de construção*.

Este trabalho tem como finalidade contribuir no entendimento do comportamento estrutural de edificações de concreto de múltiplos pavimentos, quando consideradas as ações devidas aos estágios de construção. Ao longo do seu desenvolvimento serão discutidos, em detalhes, todos os parâmetros que influenciam as alterações de comportamento observadas quando cotejadas as análises realizadas com e sem a consideração dos estágios de construção.

### **1.3 Problema de Pesquisa**

O dimensionamento das estruturas de múltiplos andares de concreto é usualmente conduzido considerando-se uma análise elástica linear da estrutura. O processo construtivo não é comumente considerado no dimensionamento dessas estruturas. O presente trabalho pretende contribuir para o entendimento da importância dos efeitos construtivos em edificações de múltiplos pavimentos de concreto armado, buscando informações qualitativas e quantitativas para as seguintes questões:

□ Como o processo construtivo interfere na resposta das estruturas de construções de múltiplos pavimentos durante sua construção?

□ Qual a influência dos efeitos do tempo no concreto estrutural – fluência, retração e evolução da resistência à compressão e módulo de deformação – no comportamento de construções de concreto de múltiplos pavimentos durante seu processo construtivo?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral da pesquisa é buscar um entendimento sobre quais os efeitos que as ações decorrentes do processo construtivo têm sobre o comportamento global das edificações de múltiplos andares de concreto.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, a pesquisa se propõe a:

□ Realizar modelagens numéricas computacionais do processo construtivo de edificações de múltiplos pavimentos de concreto adotando o sistema estrutural aporticado;

□ Realizar modelagens numéricas computacionais do processo construtivo de edificações de múltiplos andares de concreto levando-se em consideração os efeitos da deformação lenta, da retração e do envelhecimento do concreto;

□ Analisar o perfil de distribuição dos deslocamentos e dos esforços seccionais ao longo do tempo, considerando valores que atinjam sua vida útil.

## 1.5 Delimitação do trabalho

O trabalho realizado tem aplicação restrita às edificações de múltiplos andares de concreto armado que adotem o sistema aporticado para sua estruturação.

As considerações sobre os efeitos do tempo no concreto estrutural utilizado nas análises numéricas realizadas foram adotadas em consonância com as recomendações da norma brasileira de projeto de estruturas de concretos – a NBR 6118/2104.

As análises não-lineares realizadas com o Método dos Elementos Finitos foram realizadas com a utilização do Programa computacional SAP 2000, versão 14, adotando uma abordagem usualmente referida como *staged construction* – construção em estágios, que se constitui numa estratégia numérica de simulação computacional do fenômeno real da construção em estágios.

Determinou-se para objeto de estudo uma estrutura comumente encontrada na cidade do Recife/PE, um edifício residencial de concreto armado de 25 andares, composto por vigas, pilares e lajes maciças, com  $f_{ck} = 50$  MPa, e demais parâmetros calculados de acordo com a NBR 6118/2014. Para efeito de modelagem, foi admitida a hipótese de suporte totalmente rígido que se aproxima da condição de uma fundação profunda sobre blocos de estacas, que tenham rigidez suficiente para que não haja rotação nos apoios da base.

## 1.6 Estruturação da Dissertação

O Capítulo 1 contempla uma introdução ao tema de estudo com foco na discussão da importância de consideração dos efeitos construtivos já na fase de projeto das estruturas de múltiplos andares de concreto armado.

O capítulo 2 contempla a revisão bibliográfica realizada que se constitui a base conceitual para o desenvolvimento da pesquisa. Nesse capítulo são apresentados o processo construtivo de edificação de múltiplos pavimentos de concreto armado, os materiais e elementos e procedimentos construtivos usualmente empregados. Outras definições, tais como o ciclo de concretagem, os maquinários e as cargas temporárias são também abordadas.

Os efeitos construtivos em edificações de múltiplos pavimentos de concreto são discutidos e as ações presentes nas etapas de construção são apresentadas, segundo a visão de normas nacionais e internacionais. Seção especial do capítulo discute os efeitos do tempo no concreto estrutural com foco na repercussão destes efeitos nas propriedades do concreto estrutural. São adicionalmente abordados alguns modelos numéricos disponíveis para a simulação dos efeitos construtivos nas edificações de concreto. Complementarmente, são apresentadas algumas recomendações normativas, nacionais e internacionais para a consideração dos efeitos construtivos no projeto de edificações de concreto.

No Capítulo 3 é realizada a descrição da edificação analisada. Todas as suas características são expostas e discute-se os detalhes da modelagem da estrutura e os parâmetros considerados. Modelos simplificados ilustrativos dos detalhes da modelagem numérica dos estágios de construção são apresentados como uma estratégia para se entender como o programa de elementos finitos utilizado considera esta abordagem.

No Capítulo 4 é apresentada a discussão dos resultados obtidos das análises numéricas da edificação estudada com e sem a consideração dos estágios de construção.

No Capítulo 5 constam as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

## Capítulo 02

### 2 Revisão Bibliográfica

#### 2.1 O processo construtivo de edificação de múltiplos pavimentos de concreto armado

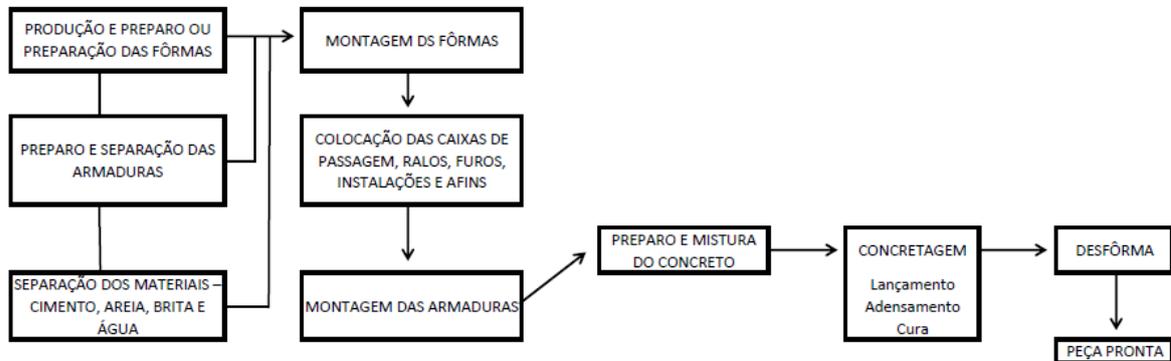
O processo construtivo de uma edificação é o conjunto de medidas tomadas e executadas, numa sequência lógica, para que a edificação seja erguida. As análises de estruturas em edificações de concreto armado são usualmente realizadas considerando que a estrutura, em sua integralidade, já se encontra construída quando as ações que irão agir sobre ela são aplicadas. Este modelo é válido e preciso para ações horizontais, como a ação do vento, e também para ações verticais quando concluída toda edificação. Por outro lado, durante a construção, existem ações que devem também ser analisadas, como por exemplo, o peso próprio, que vai sendo imposto gradativamente, à medida que os pavimentos são construídos, em vários estágios. Nesse caso, é desejável que a análise global seja realizada considerando a sequência de construção do edifício.

A construção de edifícios pode ser classificada por sua concepção estrutural, pela intensidade de seu emprego e também pelos materiais que a compõem.

Como concepção estrutural, considera-se a forma de transmissão dos esforços da estrutura, que podem ser classificadas como reticuladas, planas ou espaciais.

As estruturas reticuladas são aquelas de eixo reto nas quais uma dimensão (o comprimento) é preponderante com relação às dimensões da seção transversal. As estruturas reticuladas são objeto de estudo dessa pesquisa. Já as estruturas planas transmitem seus esforços através de um plano de carregamento, como nos casos de estruturas de alvenaria estrutural e lajes de concreto armado, por exemplo. As estruturas espaciais transmitem seus esforços de formas variadas, dependendo de seu formato e execução.

Para uma obra convencional, onde toda a estrutura é construída *in loco*, segue-se normalmente o esquema de produção apresentado na Figura 1.



**Figura 1 - Fluxograma genérico de produção de um edifício de concreto armado (Fonte: O autor, adaptado de Barros e Melhado, 2006)**

Os pavimentos recém concretados são utilizados como apoio, por meio de elementos construtivos, para a concretagem dos pavimentos subsequentes, até que todos os pavimentos sejam concretados. São considerados aqui como elementos construtivos as fôrmas, escoras e reescoras.

A NBR 15.696/2009 considera que as fôrmas são estruturas provisórias que têm a finalidade de servir de molde para o concreto fresco de tal forma que resista a todas as ações provenientes das cargas variáveis resultantes das pressões do lançamento do concreto fresco, até o momento no qual o concreto atinja seu estado endurecido e tenha capacidade de ser auto portante.

Ainda esta mesma norma classifica os escoramentos como estruturas provisórias com capacidade de resistir e transmitir às bases de apoio da estrutura do escoramento todas as ações provenientes das cargas permanentes e variáveis resultantes do lançamento do concreto fresco sobre as fôrmas horizontais e verticais, até que também o concreto se torne auto portante. Em relação ao reescoramento ou escoramento remanescente, tal norma define que estas são estruturas provisórias auxiliares, instaladas sob uma estrutura de concreto que não

tem capacidade de resistir totalmente às ações provenientes de cargas permanentes e/ou variáveis, transmitindo-as às bases de apoio rígidas ou flexíveis.

As fôrmas são responsáveis pela moldagem da peça, dando forma à estrutura especificada em projeto, podem ser de tábua de madeira serrada, chapa de madeira compensada resinada, chapa de madeira compensada plastificada ou metálica.

Além de propiciar forma à estrutura, a fôrma sustenta o concreto fresco até que ele obtenha resistência suficiente para se sustentar por si só. Tem também as seguintes finalidades:

- Funcionar como suporte para o posicionamento das armaduras, permitindo a colocação dos espaçadores, a fim de garantir o cobrimento da peça;
- Funcionar como suporte para colocação dos elementos das instalações e afins;
- Funcionar como estrutura provisória para a concretagem, devendo resistir às cargas provenientes do peso próprio, peso dos trabalhadores, máquinas e equipamentos presentes na hora da concretagem;
- Limitar a perda de água do concreto, facilitando a cura.

Para isso, é necessário que o material do qual as fôrmas são feitas tenham elevado módulo de elasticidade e resistência, elevada estanqueidade, regularidade geométrica, textura superficial adequada, estabilidade dimensional, baixa aderência ao concreto e não seja excessivamente dura.

Em edificações de múltiplos pavimentos é mais comum a utilização de fôrmas de madeira, devido à facilidade de manuseio e à capacidade de reutilização da mesma peça diminuindo seu custo. Tal aspecto é demasiadamente importante haja vista que muitos estudos comprovam que a fôrma representa entre 20% a 30% do custo da estrutura.

As escoras são pontaletes verticais que sustentam o pavimento a ser concretado no pavimento imediatamente inferior. São destinadas a suportar o peso das fôrmas preenchidas de concreto. As escoras podem ser de madeira ou metálicas e estes dois tipos são comumente

utilizados em estruturas de múltiplos pavimentos. As escoras metálicas são normalmente utilizadas para suporte das fôrmas das lajes concretadas e das vigas, devido à facilidade de manuseio.

Já as escoras de madeira são mais utilizadas nas vigas de bordo, muitas vezes transformadas em uma estrutura que abraça toda a viga, popularmente chamada garfo de madeira.

As reescoras (Figura 2 e Figura 3) têm a mesma função que as escoras, no entanto são destinadas a permanecer apoiando a estrutura até que ela obtenha resistência à compressão aos 28 dias. Devem ser previstas em projeto as faixas de reescoramento da estrutura, atentando para que a sua distribuição seja compatível com os maiores esforços.



**Figura 2 - Faixa de reescoramento**



**Figura 3 - Laje reescorada**

O processo construtivo engloba também outras definições como ciclo de concretagem, quantidade de pessoas trabalhando, maquinário necessário para a construção de cada pavimento. Tais definições irão depender da finalidade do edifício, da produção desejada, do recurso financeiro disponível para o empreendimento, da disponibilidade de materiais, do clima, entre outros fatores.

Deve constar no plano de execução de obra a descrição do método a ser seguido para montar e remover as estruturas auxiliares, devendo-se especificar os requisitos de manuseio, ajuste, contra flechas, desfôrma e retirada, bem como as propriedades que os materiais utilizados precisam possuir.

De acordo com a NBR 15.696/2009, se a fôrma for parte integrante do sistema de cura, como no caso de pilares e laterais de viga, o tempo de remoção deve considerar os requisitos específicos. Ainda a mesma norma indica que o ciclo de remoção ou remanejamento deve ser no mínimo de 14 dias, com exceção apenas de quando é utilizado concreto com características de resistência e deformação alcançadas mais rapidamente. Esse ciclo pode ser diminuído, em conjunto com uma análise e planejamento do sistema de escoras.

As fôrmas, apesar de serem estruturas provisórias, não deixam de ser uma estrutura, e devem ser concebidas como tal. Os esforços atuantes nas estruturas provisórias são o peso próprio das fôrmas, peso dos materiais (concreto e aço), sobrecargas (peso dos trabalhadores, máquinas e equipamentos) e o empuxo devido às vibrações. O que acontece quando o esforço é empregado é que ele atua sobre o painel que constitui o molde (chapa de madeira), a chapa do molde transmite esse esforço a um reticulado de barras, esse reticulado é a estrutura do molde, em seguida transfere o esforço para as escoras, que transmitem a carga para o solo ou para a estrutura já executada.

Assim, em resumo os passos para a produção da estrutura de concreto de uma edificação de concreto armado de múltiplos pavimentos podem ser sumarizados da seguinte maneira:

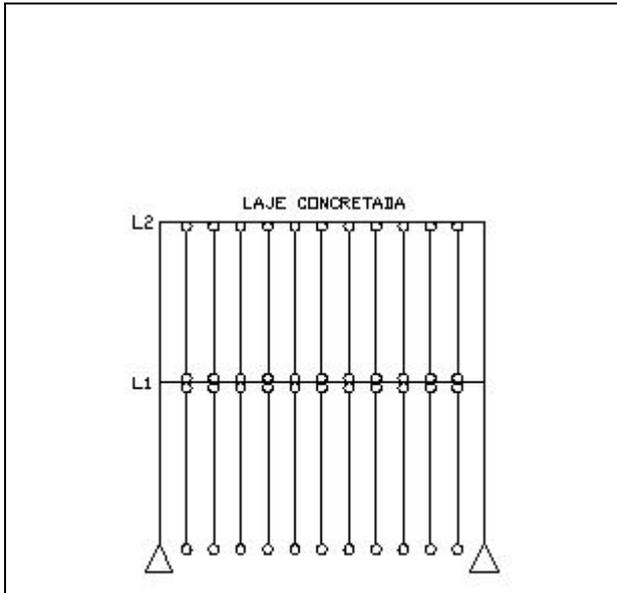
- Recebimento do sistema de fôrmas;
- Montagem das fôrmas e armaduras dos pilares;

- Liberação dos pilares;
- Montagem das fôrmas de vigas e lajes;
- Liberação das fôrmas de vigas e lajes;
- Concretagem dos pilares;
- Montagem da armadura de vigas e lajes;
- Liberação da armadura de vigas e lajes;
- Concretagem de vigas e lajes;
- Desfôrma;
- Reinício do ciclo de execução.

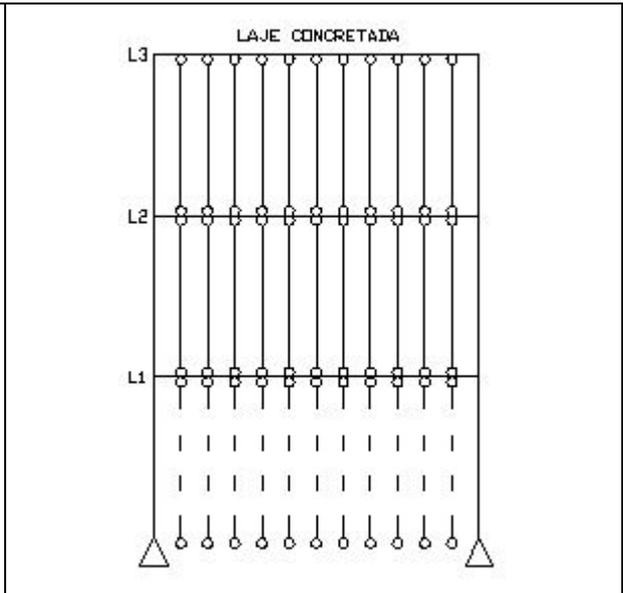
### **2.1.1 Processo construtivo de edificações de concreto armado usualmente empregados no Brasil**

A seguir é apresentado um esquema de como funciona o processo construtivo na prática, seguindo as recomendações da NBR 6118/2014 e NBR 15.696/2009, considerando um ciclo de concretagem de 7 (sete) dias, usual neste tipo de edificação na região.

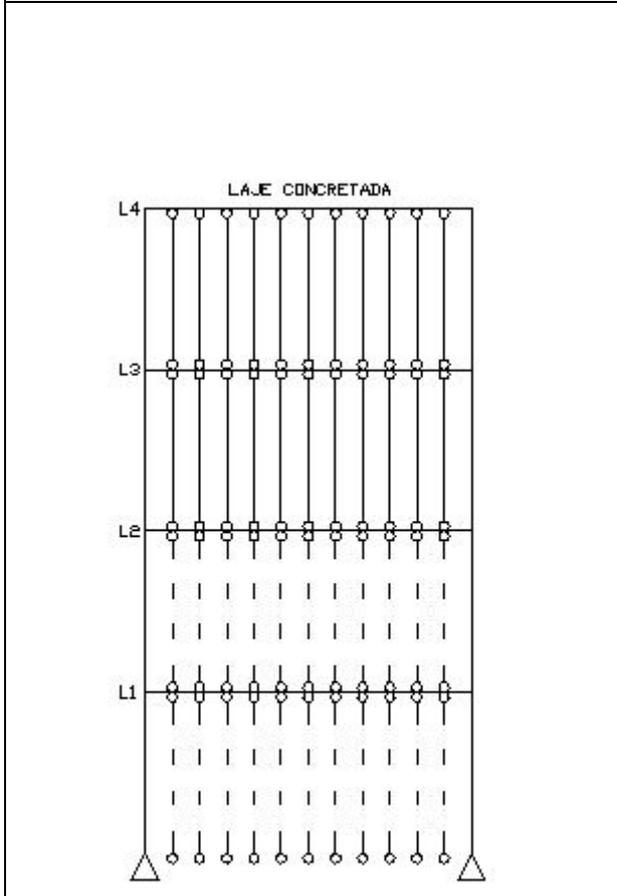
- Instalação de fôrmas e escoras para concretagem da 1ª laje;
- Concretagem da 1ª laje – concluída no 7º dia;
- Instalação de fôrmas e escoras para concretagem da 2ª laje;
- Concretagem da 2ª laje – concluída no 14º dia;
- Remoção das escoras e algumas fôrmas da 1ª laje, mantendo as reescoras;
- Instalação de fôrmas e escoras para concretagem da 3ª laje;
- Concretagem da 3ª laje – concluída no 21º dia;
- Remoção das escoras e algumas fôrmas da 2ª laje, mantendo as reescoras;
- Instalação de fôrmas e escoras para concretagem da 4ª laje;
- Concretagem da 4ª laje – concluída no 28º dia;
- Remoção do nível mais baixo (L1) de reescoras e fôrmas – após 28 dias.



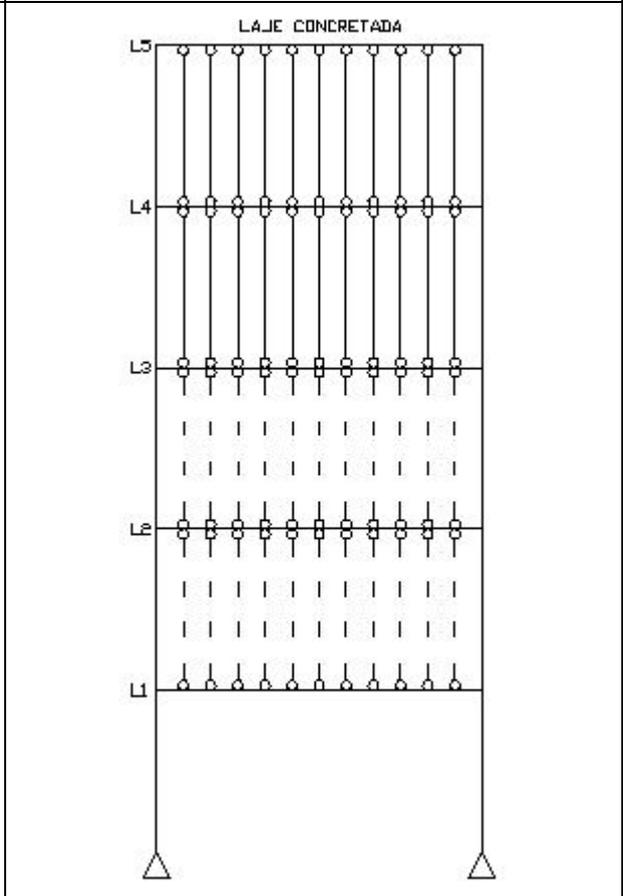
**Figura 4 - Processo construtivo (Etapas 1 e 2), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias.**



**Figura 5 - Processo construtivo (Etapas 1, 2 e 3), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias.**



**Figura 6 - Processo construtivo (Etapas 1, 2, 3 e 4), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias.**



**Figura 7 - Processo construtivo (Etapas 1, 2, 3, 4 e 5), considerando o ciclo de concretagem de 7 (sete) dias.**

Legenda:

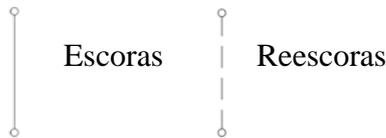
L1 = Laje 1

L3 = Laje 3

L5 = Laje 5

L2 = Laje 2

L4 = Laje 4



Na Figura 4, as duas lajes – L1 e L2 – estão escoradas. Considerando-se o ciclo de concretagem de 7 dias e que a laje L2 foi recém concretada, conclui-se que a Laje L1 foi concretada há 7 dias, devendo permanecer ainda escorada.

Na Figura 5 considerando que a Laje L3 foi recém concretada e o ciclo de concretagem de 7 dias, infere-se que a Laje L1 foi concretada há 14 dias, de tal forma que sua resistência média à compressão ainda não foi atingida, mas a estrutura já tem certa capacidade autoportante, portanto são retiradas boa parte das escoras, sendo mantidas as faixas de reescoramento. Conforme orientação da NBR 15.696/2009, as escoras da laje L1 podem ser retiradas a partir do 14º dia, mantendo apenas as escoras remanescentes ou permanentes. Logo, podemos afirmar que essa laje deve permanecer reescorada por mais 14 dias. As escoras retiradas da laje L1 são então direcionadas para a laje superior a ser construída.

Na Figura 6 observa-se que a laje L1 continua reescorada, pois a laje L4 foi recém concretada, e a laje L1 está com 21 dias que foi concretada. Já as escoras da laje L2, há 14 dias concretada, foram retiradas, sendo mantidas apenas as escoras remanescentes.

Já na Figura 7, as reescoras que estavam apoiando anteriormente a laje L1, foram retiradas completamente – em virtude de a peça já ter atingido sua resistência à compressão aos 28 dias. É válido ressaltar que o controle dos corpos de provas é um fator importante que deve auxiliar na verificação da resistência à compressão aos 28 dias. Tais reescoras que estavam apoiando a laje, tal como suas fôrmas, são reutilizadas no pavimento superior e assim sucessivamente.

## **2.2 Os efeitos construtivos em edificações de múltiplos pavimentos de concreto armado**

A seleção de materiais e dosagens apropriados são passos importantes para produzir um concreto que atenda às especificações de resistência e durabilidade em um elemento estrutural (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O conhecimento das características do concreto fresco ajuda a esclarecer os efeitos sofridos por uma edificação durante sua construção. Neste sentido, o presente capítulo aborda as principais características do concreto fresco e discute estratégias de como evitar que esses efeitos influenciem de maneira desproporcional o efeito que as cargas durante o processo construtivo exercem na edificação durante sua construção.

A trabalhabilidade do concreto, segundo a Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates (ASTM C125) é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. É necessário que o concreto seja suficientemente fluido, mas que mantenha sua resistência e homogeneidade para que preencha completamente toda a fôrma montada de acordo com o projeto, sem deixar nenhum vazio. Caso a trabalhabilidade não seja adequada, as pessoas responsáveis por sua execução terão mais dificuldade em preencher toda fôrma, ocasionando assim os vazios ou, falhas na concretagem ou a própria segregação do concreto. Essas falhas são fortemente prejudiciais à estrutura de concreto, pois facilitam a entrada de agentes agressivos presentes no meio ambiente, podendo antecipar o aparecimento de fissuras por retração do concreto.

Como fatores que influenciam a trabalhabilidade do concreto, pode-se citar o baixo consumo de água na dosagem, o alto consumo de cimento, agregados de tamanhos desproporcionais para a dosagem, o uso de aditivos e adições, dentre outros.

A perda de abatimento é a diminuição de consistência ou fluidez do concreto fresco com o tempo. É um fenômeno normal e necessário porque provoca um enrijecimento gradual, à medida que a água contida na mistura do concreto é consumida pelas reações de hidratação. Essa perda de abatimento, e conseqüente hidratação do concreto, sofrem influência do tempo, da temperatura, do tipo de cimento e dos aditivos e adições presentes no concreto.

Esse enrijecimento prematuro da mistura apresenta basicamente os mesmos problemas ocorridos com a perda de trabalhabilidade. Como uma tentativa de sanar este enrijecimento é possível que os responsáveis pela execução da obra adicionem mais água à mistura, melhorando assim a trabalhabilidade do concreto. No entanto, esta água adicionada, caso não tenha sido calculada na dosagem inicial do concreto, pode concorrer para a perda de resistência do concreto com conseqüente possibilidade de geração de falhas de desempenho da estrutura.

O abatimento é uma importante propriedade, principalmente nos concretos que são confeccionados em centrais dosadoras e em seguida transportados para o local de concretagem, muitas vezes concluindo esse processo ao longo do seu transporte para a obra.

KIRCA et al. (2002) constataram, estudando concretos entre 25 e 35 MPa, uma significativa perda de abatimento com o aumento no tempo da mistura, analisando ainda que a perda do abatimento após um período inicial é maior para concretos com maior consumo de cimento, em função do seu processo de hidratação.

PELISSER (2007) analisou um traço de concreto cuja resistência era 20 MPa, e quantificou a perda de resistência quando houve uma correção de abatimento, através de adição de água. Obteve como resultado uma diminuição de 34% da resistência após 2,5h, e uma redução de 44% da resistência após 4 horas.

A segregação do concreto é a separação dos seus componentes, ainda no estado fresco, tornando o concreto uma mistura heterogênea. Normalmente, a segregação se manifesta quando o concreto é lançado de alturas muito elevadas, ou por excesso ou falta de vibração em locais de difícil acesso durante o adensamento.

A exsudação também é um tipo de segregação que separa a água da argamassa. É de fácil visualização algum tempo depois que o concreto é lançado, pois consiste na sedimentação dos sólidos em suspensão por ação da força da gravidade. Essa exsudação superficial tem um papel importante na fissuração por retração plástica.

As causas da segregação, além dos problemas no momento do lançamento e a falta ou o excesso de vibração, também podem se dar devido à consistência inadequada, com grande

quantidade de agregados graúdos e pouca quantidade de agregados finos. A atenção a esses pontos pode reduzir ou eliminar a segregação.

A resistência à compressão é a propriedade mais importante do concreto. Uma peça estrutural é projetada para atingir sua resistência à compressão característica aos 28 dias. A partir desta data características do concreto são garantidas e o comportamento da estrutura se aproximará cada vez mais daquele previsto em projeto. No entanto, até que o concreto atinja essa resistência aos 28 dias é importante observar que fatores podem influenciar na não obtenção desta resistência, na fase desejada.

A relação entre a resistência e a porosidade do concreto não é de definição simples, como na pasta de cimento endurecida ou na argamassa. Tanto na pasta de cimento quanto na argamassa, a porosidade pode ser relacionada com a resistência como uma relação inversa, quanto menor a porosidade, maior a resistência. Já no concreto, essa relação é analisada por um conjunto de fatores, como as características e proporção dos materiais, condições ambientais e de cura.

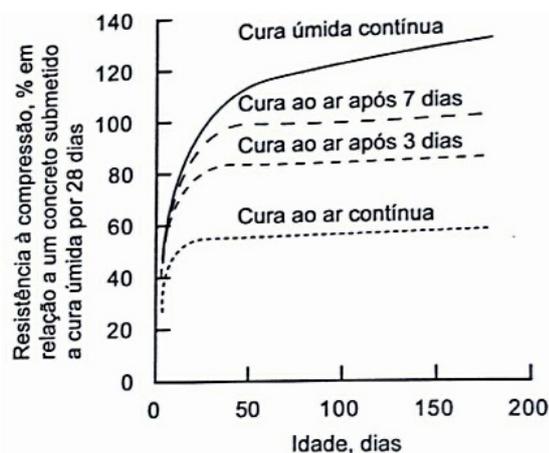
A relação água/cimento, que tem relação com a resistência do concreto, na maioria das vezes determina a porosidade da matriz da pasta de cimento a um determinado grau de hidratação. Ao considerar o ar incorporado ao concreto conclui-se que a perda da resistência não depende apenas da relação água/cimento, mas também do consumo de cimento. Os concretos de alta resistência sofrem uma importante perda de resistência com o aumento de ar incorporado, enquanto os concretos de baixa resistência tendem a sofrer pequena perda de resistência ou em algumas situações, ganho de resistência.

O tipo de cimento também é um fator que influencia diretamente na porosidade e, conseqüentemente, na resistência do concreto. Quanto mais fino o cimento, mais rapidamente será hidratado, ganhando resistência em menos tempo.

A dimensão, forma, textura superficial, mineralogia e granulometria do agregado também afetam a resistência do concreto.

Para garantir que as propriedades projetadas sejam mantidas após a concretagem é necessário proporcionar uma cura adequada, observando também as condições climáticas do ambiente, como a umidade relativa, incidência do sol, temperatura, dentre outras.

A umidade influencia a cura na resistência do concreto, segundo estudo, na ordem de três vezes (Concrete Manual, 1981). A Figura 8 esclarece que a resistência à compressão de um concreto onde se realizou uma cura úmida apresenta valor três vezes maior a de um concreto onde a cura tenha sido realizada exclusivamente ao ar. Além deste fato, uma cura úmida adequada e prolongada retarda o início da retração do concreto. A cura úmida é realizada com aspersão de água ou outros métodos que mantenham a peça molhada e é normalmente indicada que ela se mantenha por, no mínimo, 7 dias, quando considerado um concreto confeccionado com cimento comum.



**Figura 8 - Influência das condições de cura sobre a resistência (Concrete Manual, 1981)**

Assim que determinada peça estrutural de uma edificação é concretada, ela permanece protegida das ações de intempéries, no entanto é necessário que se dê continuidade à execução do restante da edificação, e para isso, é necessário que essa peça recém concretada seja utilizada como apoio para a seguinte. Mesmo que a peça estrutural recém concretada não seja de imediato utilizada como apoio para a seguinte, é fato de que ela irá absorver outras ações, que podem não ter sido previstas em projeto. Tais ações podem ser agravadas em algumas situações, por exemplo: caso o processo construtivo tenha um ciclo muito pequeno ou caso

não sejam seguidas todas as recomendações de projeto ou a execução da estrutura não seja conduzida da forma adequada.

Algumas propriedades como a retração, a fluência e o envelhecimento do concreto devem ser levadas em consideração, na medida em que vão afetar o comportamento do concreto ao longo de sua vida útil.

## **2.3 Ações presentes nas etapas de construção**

### **2.3.1 Ações horizontais**

Ações horizontais são consideradas as ações do vento, o movimento produzido pelo lançamento do concreto e pelo manuseio e os procedimentos de ligar e desligar os equipamentos utilizados na construção. De acordo com o “Guide to formwork for concrete” (ACI 347/2014) o sistema fôrma/escora deve ser projetado para suportar uma ação horizontal de 1,5 KN/m ou 2% do total da ação vertical de peso próprio do pavimento.

### **2.3.2 Ações verticais**

As ações verticais podem ser consideradas como permanentes ou variáveis. As ações verticais permanentes correspondem ao peso próprio dos materiais, sistema de fôrmas e escoras. Já as ações verticais variáveis não são de fácil identificação, pois irão depender do método construtivo a ser executado. São elas: o peso dos trabalhadores, dos equipamentos, do material estocado, e do impacto produzido pelo lançamento do concreto.

Estas ações são impostas às estruturas durante a sua construção, quando o concreto ainda não atingiu suas propriedades de resistência e deformabilidade especificadas em projeto. Não levar em conta essas ações implica comprometimento do histórico real de carregamentos do pavimento, não sendo possível, desta forma, a obtenção de uma análise das

deformações ao longo do tempo. Para realização dessa análise, se faz necessário compreender quais são os efeitos construtivos presentes durante a construção do edifício e quais são as suas características.

## **2.4 Modelos numéricos disponíveis para a simulação dos efeitos construtivos em edificações de concreto**

FORSLIND e ODMA (1937) estudaram o estado limite último relacionado com a deformação excessiva em lajes em duas direções durante a construção de edificações de concreto. Constataram que para se obter uma análise satisfatória sobre as causas das deformações, seria necessário saber as ações submetidas às lajes durante o processo construtivo.

GRUNDY e KABAILA (1963) criaram um método praticamente pioneiro para avaliar a distribuição das ações de construção através dos fatores de carga em cada pavimento. Os autores consideraram como fator de carga a ação atuante no pavimento dividido pelo peso próprio do pavimento. Para a criação desse método, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- Pontaletes infinitamente rígidos em comparação com os pavimentos;
- Pontaletes suficientemente próximos entre si, tornando as ações nos pavimentos uniformemente distribuídas;
- Não consideração das idades do concreto ao longo da construção;
- Fundação considerada como totalmente rígida.

Apesar desse método ser recomendado pelo Guia de fôrmas para concreto (ACI, 2014), algumas reflexões sobre as hipóteses adotadas merecem discussão porque podem alterar os resultados obtidos. Quando se consideram os pontaletes como estruturas rígidas, a consequência é que, enquanto a primeira laje ainda está apoiada pelos pontaletes, todas as

ações das lajes concretadas são transmitidas diretamente para a fundação, através dos próprios pontaletes. Tal consideração não representa adequadamente a realidade, pois os pontaletes são estruturas axialmente deformáveis. Desta forma, parte das ações de um pavimento recém concretado são absorvidas pelos pavimentos inferiores, através do sistema de suporte. Este método ainda despreza a absorção de cargas por parte do pilar, durante e após a concretagem do pavimento. O fato de não considerar as idades do concreto também é um aspecto que precisa ser avaliado com cautela porque as propriedades de resistência e deformabilidade são influenciadas de maneira importante pelo tempo.

A partir de estudo realizado por FORSLIND e ODMA em 1952, NIELSEN apud RODRIGUES JÚNIOR (1996) realizou o primeiro estudo de cálculo das ações nas lajes e escoras durante a construção. A partir do estudo de Nielsen foram realizados mais alguns estudos das possíveis variáveis que influenciam no processo construtivo, como o estudo realizado por STIVAROS e HALVORSEN (1990), onde se verificou a distribuição dos fatores de carga relativos à construção de uma edificação de concreto armado. Posteriormente, FANG et al. (2001) pesquisaram a influência das variáveis ciclo de concretagem, número de níveis escorados e reescorados na distribuição das ações de construção na edificação - composta por lajes, vigas e pilares.

PRADO (1999) cita a importância da consideração da sequência de construção na análise das ações verticais de peso próprio, mencionando alguns autores com pesquisas voltadas para modelagem via método dos elementos finitos considerando as ações de construção em pavimentos. SELVARAJ & SHARMA (1974), CHOI & KIM (1985) e KRIPKA & SORIANO (1992) estudaram os efeitos das deformações axiais entre pilares através de análises sequenciais, e observaram valores consideráveis entre os momentos fletores encontrados.

PRADO (1999), considerando o estudo de CORRÊA & RAMALHO (1993) que concluíram que utilizando processos de construção usuais não há qualquer tipo de problema com a segurança dos pilares durante a execução das obras, analisa apenas os esforços solicitantes e deslocamentos nas vigas e lajes dos pavimentos, através dos programas do sistema LASER, desenvolvidos também por RAMALHO (1990) e CORRÊA (1991). Definem um modelo de análise das etapas de construção que se aproxima ao comportamento

real da estrutura, permitindo também avaliar a confiabilidade do método desenvolvido por GRUNDY e KABAILA (1963).

FREITAS (2004) analisou as situações críticas no projeto de edifícios de concreto armado quando submetidos às ações de construção. Ele realizou uma análise comparativa entre a execução de quatro pavimentos executados da maneira usual e quatro pavimentos executados levando em consideração às ações de construção, considerando a montagem e retirada de fôrmas e escoras. Através do programa computacional STRAP, o autor modelou um pavimento, no sistema laje plana apoiada em vigas e pilares, distribuindo as escoras e em seguida retirando-as, mantendo apenas as escoras permanentes até os 28 dias. Analisando as deformações das duas edificações por ele comparadas, chegou a conclusão que a edificação executada na situação usual de projeto está a favor da segurança, por apresentar deformações menores que a estrutura calculada levando em consideração os efeitos construtivos.

VAFI ET al. (2009) calcularam o deslocamento vertical do pilar e o encurtamento diferencial entre pilares e paredes de concreto usando uma análise não linear dos estágios de construção. Foram estudadas duas estruturas protótipos: uma com 40 andares, e outra com 15 andares, com ciclo de concretagem de 7 (sete) dias e utilizando o método dos elementos finitos para calcular os efeitos da retração e fluência. Quando analisada a estrutura considerando os efeitos construtivos, os resultados encontrados mostraram que para a estrutura de maior altura, a análise estática não linear considerando os estágios de construção apresentam resultados mais realistas e diferentes quando comparado à análise tradicional, onde o fenômeno é desconsiderado. Como uma das conclusões foi apresentada que os deslocamentos sofridos na estrutura irão depender da umidade relativa, da velocidade da construção e da resistência do concreto utilizado. Também como conclusão afirmou o autor que para os casos analisados o encurtamento máximo do pilar ocorreu próximo ao topo do edifício.

## **2.5 Recomendações normativas para consideração dos efeitos construtivos no projeto de edificações de concreto**

A consideração em projeto das ações devidas aos processos construtivos não se constitui uma tarefa de simples implementação. Isto ocorre porque há vários fatores envolvidos nesta consideração e o domínio de sua magnitude e extensão ainda não são consensuais entre pesquisadores do tema.

Por outro lado, a maior parte das pesquisas realizadas indica que estas ações precisam ser analisadas com detalhes e com cautela, tendo em vista que, em determinadas situações, podem impor à estrutura de concreto, em idades precoces, solicitações incompatíveis com a sua capacidade de resistência e deformação que terão repercussão nociva ao longo da vida útil da construção.

A seguir apresenta-se uma condensação das recomendações relativas às ações que solicitam as estruturas devido aos efeitos construtivos em importantes normas que regulam o dimensionamento de estruturas de concreto, em nível nacional e internacional.

### **2.5.1 Norma Americana - ACI 347/14**

O ACI 347 (2014) é a norma americana de que padroniza a execução do projeto de fôrmas em edificações de concreto.

A norma indica como os elementos construtivos devem ser inspecionados a fim de garantir a integridade da peça estrutural. Indica também os procedimentos de segurança para a execução das fôrmas e dos elementos construtivos, as práticas de construção e mão de obra e as tolerâncias permitidas. No que diz respeito aos estágios construtivos de uma edificação, a norma relaciona as seguintes demandas, quando indica a remoção de fôrmas e suportes:

- O valor mínimo de resistência à compressão do concreto deve ser definido pelo engenheiro projetista para a retirada das fôrmas. A resistência à compressão deve ser verificada por meio de ensaios, ou através das amostras do concreto, ou através da

própria peça concretada. As fôrmas e escoras não devem ser retiradas das vigas, pisos e paredes até que os elementos tenham resistência suficiente para suportar seu peso próprio (Item 3.7.2.1);

□ Quando o projetista não especificar a resistência mínima necessária do concreto para a retirada das fôrmas, os seguintes tempos podem ser usados (Tabela 1 e Tabela 2). Os tempos apresentados representam o número total de dias, ou horas, não necessariamente consecutivos, durante o qual a temperatura do ar em torno da peça estrutural seja acima de 50° F (10° C). Se for usado no concreto o cimento de alta resistência inicial, estes períodos podem ser reduzidos. No entanto, caso as temperaturas ambientes permanecem abaixo de 50° F (10° C), ou se forem utilizados aditivos retardadores, estes períodos devem ser maiores. (Item 3.7.2.3);

□ No método comum de análise são consideradas que, enquanto as escoras remanescentes, ou reescoras, estão apoiando um pavimento, elas suportam apenas o peso da nova laje de construção e as cargas ativas. O peso das lajes intermediárias não é incluído, pois é considerado que cada laje já suporta o seu próprio peso após a retirada das escoras e a introdução das reescoras. (Item 3.8.1)

**Tabela 1 - Tempo para retirada das fôrmas (Paredes, colunas, laterais de viga) segundo a ACI 347/14**

<b>Paredes</b>		12h
<b>Colunas</b>		12h
<b>Laterais de vigas</b>		12h
<b>Fôrma das vigas de bandeja</b>	760 mm de largura, ou menos	3 dias
	Maior que 760 mm de largura	4 dias

**Tabela 2 - Tempo para retirada das fôrmas (centro de arco, fundo de viga e lajes) segundo o ACI 347/14**

		<b>Carga ativa da estrutura inferior ao peso próprio da estrutura</b>	<b>Carga ativa da estrutura superior ao peso próprio da estrutura</b>
<b>Centro de arco</b>		14 dias	7 dias
<b>Vigas</b>	Vão livre entre os apoios menor que 3m	7 dias	4 dias
	Vão livre entre os apoios entre 3m e 6m	14 dias	7 dias
	Vão livre entre os apoios maior que 6m	21 dias	14 dias
<b>Lajes em uma direção</b>	Vão livre entre os apoios menor que 3m	4 dias	3 dias
	Vão livre entre os apoios entre 3m e 6m	7 dias	4 dias
	Vão livre entre os apoios maior que 6m	10 dias	7 dias
<b>Lajes em duas direções</b>		O tempo de remoção estão condicionados a colocação de reescoras. Devem ser colocadas logo após a conclusão da retirada das escoras, no mais tardar ao final do dia em que forem retiradas. A capacidade das reescoras e o espaçamento entre elas deve se projetado pelo engenheiro.	

### 2.5.2 Norma Europeia - Eurocode 2 – Parte 1/1

O Eurocode 2 (EN 1992-1-1/2004) é a Norma Europeia de Projeto de estruturas de concreto dos países da zona Euro e sua primeira parte aborda as regras gerais e específicas para construção de edifícios. Algumas seções – 5 e 10 – deste documento abordam as ações durante a construção. No entanto, apesar da citação sobre os cuidados e considerações que devem ser tomadas durante cada fase construtiva, assim como a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) não existe, nesta Norma, definições claras e objetivas em relação ao que se deve adotar para considerar os efeitos citados na fase de elaboração do projeto estrutural. A seguir uma súmula das recomendações constantes neste código.

- O efeito da geometria e o comportamento das propriedades da estrutura em todos os estágios de construção devem ser considerados no projeto. (5.1.1)
- A análise deve tomar em conta:

- o comportamento dos elementos estruturais em todas as fases de construção, considerando a geometria e as propriedades adequadas para cada estágio, e sua interação com outros elementos (por exemplo, ação composta com concreto rodado em obra, outros elementos pré-moldados);
- O comportamento do sistema estrutural influenciado pelo comportamento das ligações entre os elementos, com atenção especial às deformações e força das conexões reais;
- As incertezas que influenciam nos apoios e transmissão de força entre os elementos decorrentes dos desvios na geometria e no posicionamento das peças. (10.5.1);
- Elementos pré-moldados com espessura de pelo menos 40 mm pode ser concebido como elementos compostos, se o cisalhamento na interface for verificado de acordo com 6.2.5. O elemento pré-moldado deve ser verificado em todas as fases de construção, antes e depois da ação imposta” (10.9.3).

### **2.5.3 Norma Europeia - Eurocode 1 – Parte 1/6**

A Eurocode 1 (EN 1991 – 1-6/1991) é a Norma Europeia, que trata em sua Parte 1 das ações durante a execução de edifícios e apresenta princípios gerais para a determinação das ações a serem tomadas durante a execução de edifícios e obras de engenharia civil.

Durante a construção são utilizadas algumas estruturas auxiliares que sustentam a estrutura principal até que ela se torne auto portante. São exemplos destas estruturas o cimbramento, as escoras, os andaimes e as fôrmas. Esta norma além de prescrever as ações a serem tomadas durante as fases de execução, também considera as ações não construtivas quais sejam: as ações transitórias, as ações acidentais e as ações sísmicas.

Estas ações podem incluir tanto as ações que não são cargas de construção quanto as que são cargas de construção. Ambos os tipos de ações são classificados quanto à variação no tempo (permanente, variável ou acidental), origem (diretos, indiretos), variação espacial (fixo, livre) e à natureza (estático e dinâmico), conforme mostram a Tabela 3 e Tabela 4.

**Tabela 3 - Classificação das ações (diferentes das cargas de construção) durante os estágios construtivos (Tabela 2.1 do Eurocode 1 - parte 01/06)**

Cláusulas relacionadas nesta norma	Ação	Classificação				Observações	Fonte
		Variação no tempo	Classificação / origem	Variação espacial	Natureza (estática / dinâmica)		
4.2	Peso próprio	Permanente	Direta	Fixa com tolerância	Estática	Livre durante o transporte / armazenamento / dinâmica caso caia	EN 1991-1-1
4.3	Movimento do solo	Permanente	Indireta	Livre	Estática		EN 1997
4.3	Empuxo	Permanente / variável	Direta	Livre	Estática		EN 1997
4.4	Protensão	Permanente / variável	Direta	Fixa	Estática	Variável de acordo com projeto (ancoragem)	EN 1990, EN 1992 a EN 1999
4.5	Pre deformação	Permanente / variável	Indireta	Livre	Estática		EN 1990
4.6	Temperatura	Variável	Indireta	Livre	Estática		EN 1991-1-5
4.6	Retração / Efeitos de hidratação	Permanente / variável	Indireta	Livre	Estática		EN 1992, EN 1993, EN 1994
4.7	Ações do vento	Permanente / acidental	Direta	Fixa / Livre	Estática / Dinâmica	(*)	EN 1991-1-4
4.8	Carga de neve	Permanente / acidental	Direta	Fixa / Livre	Estática / Dinâmica	(*)	EN 1991-1-3
4.9	Ações devido a água	Permanente / variável / acidental	Direta	Fixa / Livre	Estática / Dinâmica	Permanente / Variável de acordo com especificações do projeto. Dinâmica de correntes de água se relevante	EN 1990
4.10	Cargas de gelo na atmosfera	Variável	Direta	Livre	Estática / Dinâmica	(*)	ISO 12494
4.12	Acidental	Acidental	Direta / Indireta	Livre	Estática / Dinâmica	(*)	EN 1990, EN 1991-1-7
4.13	Sísmica	Variável / acidental	Direta	Livre	Dinâmica	(*)	EN 1990 (4.1), EN 1998

(\*): Os documentos de origem precisam ser examinados com os anexos nacionais em que informações relevantes adicionais podem ser fornecidas.

Tabela 4 - Classificação das cargas de construção (Tabela 2.2 do Eurocode 1 - parte 01/06)

Cláusulas relacionadas nesta norma	Ação (curta descrição)	Classificação				Observações	Fonte
		Variação no tempo	Classificação / origem	Variação espacial	Natureza (estática / dinâmica)		
4.11	Pessoal e ferramentas manuais	Variável	Direta	Livre	Estática		
4.11	Armazenamento de itens móveis	Variável	Direta	Livre	Estática / Dinâmica	Dinâmica caso caia	EN 1991-1-1
4.11	Equipamentos não permanentes	Variável	Direta	Fixa / Livre	Estática / Dinâmica		EN 1991-3
4.11	Máquinas pesadas e equipamentos móveis	Variável	Direta	Livre	Estática / Dinâmica		EN 1991-2, EN 1991-3
4.11	Acúmulo de materiais desperdiçados	Variável	Direta	Livre	Estática / Dinâmica	Pode impor cargas. Ex. também em superfícies verticais	EN 1991-1-1
4.11	Cargas de partes da estrutura em estados temporários	Variável	Direta	Livre	Estática	Efeitos dinâmicos são excluídos	EN 1991-1-1

As cargas de construção -  $Q_c$  - podem ser representadas em situações adequadas de projeto (pela EN 1990), ou como uma única ação variável, ou como diferentes tipos de cargas de construção agrupados.

Um único ou um agrupamento de cargas de construção deve ser estimado para agir em simultâneo com as cargas que não são de construção.

O agrupamento das cargas de construção pode ser considerado, então, como:

- $Q_{ca}$  para pessoas e ferramentas manuais.
- $Q_{cb}$  para o armazenamento de itens móveis, como materiais de construção, elementos pré-moldados e equipamentos.
- $Q_{cc}$  para estruturas não permanentes, como os andaimes, fôrmas, escoras, e o manuseio e transporte dessas estruturas.
- $Q_{cd}$  para máquinas e equipamentos pesados móveis, como guias, elevadores, veículos, empilhadeiras, instalações elétricas e tomadas temporárias.
- $Q_{ce}$  para acumulação temporária de resíduos ou materiais
- $Q_{cf}$  para as cargas temporárias de parte da estrutura, antes das ações finais do projeto.

Quando as cargas de construção são classificadas como fixas, devem-se definir tolerâncias de eventuais desvios a partir da posição teórica. Já quando as cargas de construção são classificadas como livres, devem-se definir limites de área para até onde elas devem ser movidas ou posicionadas.

Para modelar  $Q_{ca}$ , deve-se considerá-la como uma carga uniformemente distribuída e aplicá-la a fim de obter os efeitos mais desfavoráveis.

Recomenda-se para  $Q_{ca,k} = 1,0 \text{ kN/m}^2$ .

O  $Q_{cb}$  é utilizado para o caso de pontes, e recomenda-se  $Q_{cb,k} = 0,2 \text{ KN/m}^2$ , e uma carga concentrada  $F_{cb,k} = 100 \text{ kN}$ .

$Q_{cc}$  é estimado com o valor característico de no mínimo  $Q_{cc,k} = 0,5 \text{ kN/m}^2$ .

Quando não definido em projeto, deve-se buscar os valores para  $Q_{cd}$  em EN 1991-2 para as ações devidas à veículos, e em EN 1991-3 para as ações devidas à guindastes.

As cargas  $Q_{ce}$  levam em consideração possíveis efeitos de massa nos elementos horizontais, inclinados e verticais. Elas podem variar significativamente e ao longo de períodos curtos de tempo, dependendo do tipo de materiais armazenado, condições climáticas, entre outros.

Por fim, as cargas  $Q_{cf}$  são definidas de acordo com o plano e sequência de execução, incluindo as consequências dessa sequência.

#### **2.5.4 A Norma Brasileira de projeto de estruturas de concreto**

A NBR 6118/2014 contempla as recomendações a serem adotadas no projeto de estruturas de concreto armado e protendido. Não há neste documento uma indicação específica para consideração dos carregamentos decorrentes do processo construtivo. Sobre estas ações, há informações discretas em algumas seções, sumarizadas a seguir, que são igualmente imprecisas no que diz respeito ao dimensionamento levando-se em consideração as fases de construção.

- *As estruturas de concreto devem atender aos requisitos mínimos de qualidade classificados em 5.1.2, durante sua construção e serviço, e aos requisitos adicionais estabelecidos em conjunto entre o autor do projeto estrutural e o contratante (5.1.1);*
  
- *As estruturas em que todas as fases construtivas não tenham sua segurança garantida pela verificação da obra pronta devem ter incluídas no projeto as verificações das fases construtivas mais significativas e sua influência na fase final. A verificação de cada uma dessas fases deve ser feita considerando a parte da estrutura já executada e as estruturas provisórias auxiliares com seus respectivos pesos próprios. Além disso, devem ser consideradas as cargas acidentais de execução (11.4.1.4);*
  
- *A verificação dos valores-limites estabelecidos na Tabela 13.3 para a deformação da estrutura, mais propriamente rotações e deslocamentos em elementos estruturais lineares, analisados isoladamente e submetidos à combinação de ações conforme a Seção 11, deve ser realizada através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, que levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo. A deformação real da estrutura depende também do processo construtivo, assim como das propriedades dos materiais (principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração) no momento de sua efetiva solicitação. Em face da grande variabilidade dos parâmetros citados, existe uma grande variabilidade das deformações reais. Não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas pelos processos analíticos prescritos (17.3.2).*

A NBR 6120 (ABNT, 2010) é a norma brasileira que indica as cargas para o cálculo de edificações. As cargas são então classificadas como permanente e acidental. As cargas permanentes são constituídas pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos

construtivos fixos e instalações permanentes. Já as cargas acidentais são aquelas que podem atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso, como pessoas, móveis e veículos. A referida norma é omissa no que se refere às cargas de construção.

### **2.5.5 A Norma de Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto e a Norma de execução de estrutura de concreto**

As NBR 15.696 (ABNT, 2009) e a norma de execução de estrutura de concreto (ABNT NBR 14.931/2004) também são resumidas em relação às definições quanto às ações construtivas.

*“Se a fôrma for parte integrante do sistema de cura, como no caso de pilares e laterais de viga, o tempo de remoção deve considerar os requisitos específicos.”* (NBR 15.696,2009)

Ainda, há indicação na NBR 15.696/2009 de que o ciclo de remoção deve ser no mínimo de 14 dias. E que esse prazo só pode ser reduzido quando da utilização de concretos confeccionados com cimento CP-V- ARI, em conjunto com uma análise e planejamento do sistema de escoras.

Tal informação é imprecisa, haja vista que a resistência média à compressão do concreto é alcançada no 28º dia, ou seja, entende-se que para garantir o desempenho para qual foi projetada, o ciclo de remoção deveria ser de no mínimo 28 dias, quando a peça tiver obtido a resistência desejada.

Enquanto que a NBR 14.931/2004, cita que a remoção do escoramento deve ser feita após o atingimento das propriedades mecânicas e elásticas do concreto, especificadas pelo projetista.

Não obstante as preocupações e indicações das normas estudadas relativas ao tema, não existe para efeito de projeto, dados objetivos a serem considerados para a avaliação dos efeitos construtivos.

## **2.6 O efeito do tempo nas propriedades do concreto estrutural**

O concreto é um material que possui algumas características particulares quando comparado com outros materiais de construção. Os primeiros aspectos a serem considerados são a sua heterogeneidade e anisotropia que fazem com que sua resposta estrutural não dependa exclusivamente de um único componente individual (gel de cimento, produtos cristalinos do processo de hidratação, água, porções de cimento não hidratado e agregados graúdos e miúdos), mas também das interações entre estes componentes e da orientação do esforço aplicado em relação aos eixos do material. Outro aspecto importante se relaciona com o fato de que suas propriedades de deformação e resistência são dependentes do tempo e sofrem forte influência da temperatura e umidade relativa, sendo, portanto, afetado por sua interação com o meio ambiente.

A retração e a fluência no concreto são comumente definidas a partir de expressões que permitem a estimativa da deformação de retração e do coeficiente de fluência. As variáveis envolvidas nestas expressões são muito dependentes dos aspectos acima mencionados. Em situações usuais de projeto, a consideração dos efeitos do tempo nas propriedades do concreto é conduzida mediante recurso a procedimentos e hipóteses simplificadoras que, em algumas situações, podem não representar de maneira suficientemente precisa o fenômeno estudado.

O presente capítulo apresenta uma revisão sobre os efeitos do tempo no concreto estrutural com o foco naqueles que serão utilizados ao longo das análises numéricas dos efeitos construtivos em edificações de concreto armado. São eles: a retração, a fluência e o crescimento da sua resistência à compressão.

### **2.6.1 Retração**

A retração pode ser definida como a deformação volumétrica que o concreto experimenta quando não se encontra submetido a carregamento ou restrições de deformação.

A retração característica de qualquer material estrutural é representada por sua retração livre obtida através da medida de deformações lineares em corpos de prova de controle sob condições ambientais de umidade e temperatura constantes.

Quando se estuda a retração no concreto é usual dividi-las em várias componentes: retração capilar, retração química ou autógena e retração por secagem (NEVILLE, 2015).

A água nos poros capilares se encontra sob pressão devido à tensão superficial, e esta pressão gera uma força atrativa entre as paredes capilares ou entre duas partículas separadas pelo líquido que preenchem os poros capilares. Quando o concreto começa a secar, a fase água se desintegra e a água resultante fica presa nos espaços estreitos entre partículas vizinhas. Na sequência, vazios são formados entre partículas e a água nos poros fica sob pressão capilar, causando, desta forma, a retração capilar.

Em contato com a água, o cimento desenvolve reações de hidratação que fazem com que o material sofra uma mudança de volume e uma diminuição do volume bruto – os produtos gerados no processo de hidratação têm volumes menores do que aqueles materiais que originaram a reação (cimento e água). As alterações de volume geradas pela hidratação e outras reações químicas são usualmente referidas como retração química. A retração química é fortemente dependente do grau de hidratação e pode ser acelerada pela elevação da temperatura.

A retração por secagem é definida como a contração do concreto endurecido devido à perda de água capilar. Sua ocorrência gera uma redução de volume do elemento de concreto que, se estiver impedido de se movimentar devido a esta perda de água, pode produzir tensões de tração capazes de fissurar o elemento em idades precoces.

A deformação específica devida à retração do concreto pode ser calculada, para fins de projeto, adotando-se as recomendações do Anexo da Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Concreto (ABNT, NBR 6118, 2014).

Na definição dos procedimentos de cálculo para estimativas das deformações devidas à retração em elementos de concreto, a norma adota a hipótese de que seu valor é dependente

da umidade relativa do ambiente, da consistência do concreto na ocasião do lançamento, da espessura fictícia da peça, do tempo e da temperatura.

A deformação no concreto, desenvolvida pela retração livre entre o instante inicial  $t_0$  e o instante final  $t$ , é dada pela equação a seguir.

$$\varepsilon_{sc}(t, t_0) = \varepsilon_{sc\infty}[\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\varepsilon_{sc\infty} = \varepsilon_{1s}\varepsilon_{2s}$  é o valor final da retração;

$\varepsilon_{1s} = \varepsilon$  é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto;

$\varepsilon_{2s} = \varepsilon$  é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça, obtido a partir da expressão a seguir;

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33+2h_{fic}}{20,8+3h_{fic}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

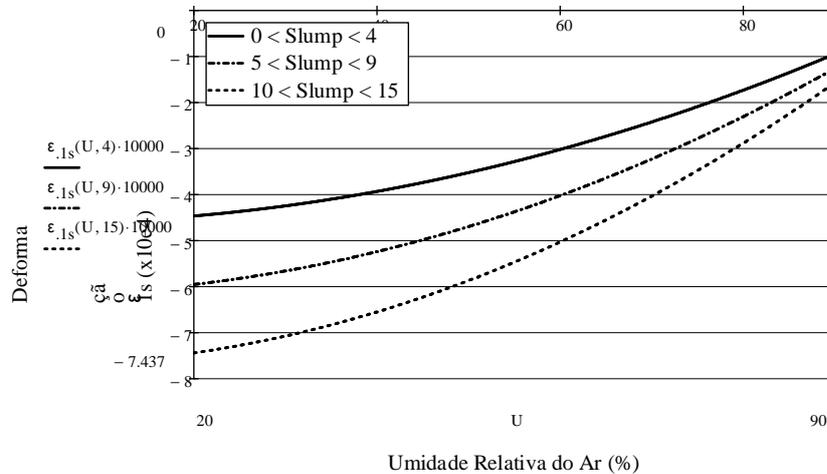
$h_{fic}$  é a espessura fictícia da peça em centímetros;

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

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

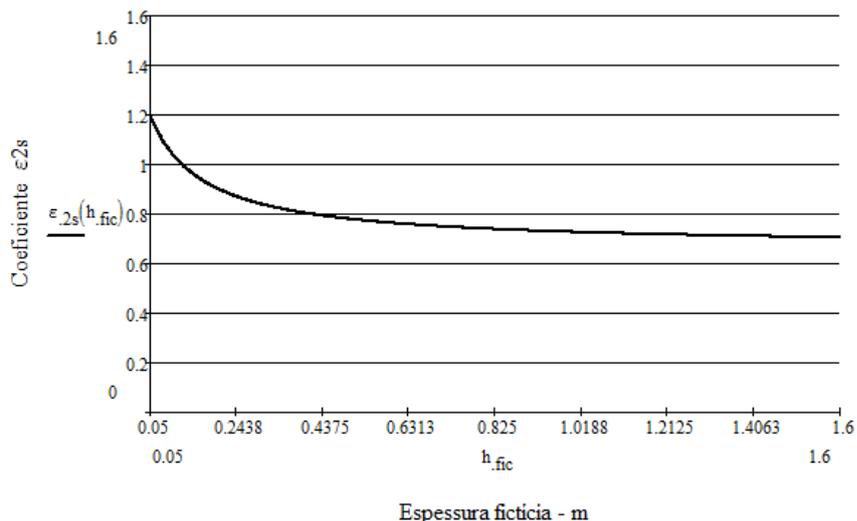
$t_0$  é a idade fictícia, em dias, do concreto no instante em que o efeito da retração na peça começa a ser considerado.

O Gráfico 1 a seguir mostra a influência da umidade relativa do ambiente e do abatimento nos valores de  $\varepsilon_{1s}$ . Observando-se este gráfico pode-se perceber que o valor do coeficiente  $\varepsilon_{1s}$  aumenta seu valor, em módulo, quando se aumenta o abatimento e, para um dado abatimento, diminui de maneira expressiva com o aumento da umidade relativa.



**Gráfico 1 - Variação do Coeficiente  $\varepsilon_{1s}$**

O Gráfico 2 a seguir mostra a influência da umidade relativa do ambiente e do abatimento nos valores do coeficiente  $\varepsilon_{2s}$ . Pode-se observar do exame deste gráfico um decréscimo no valor do coeficiente quando se aumenta a espessura fictícia da peça. Isto ocorre de maneira mais pronunciada até um valor da espessura fictícia de aproximadamente 0,8 m e daí em diante o decréscimo no valor do coeficiente é menos pronunciado.



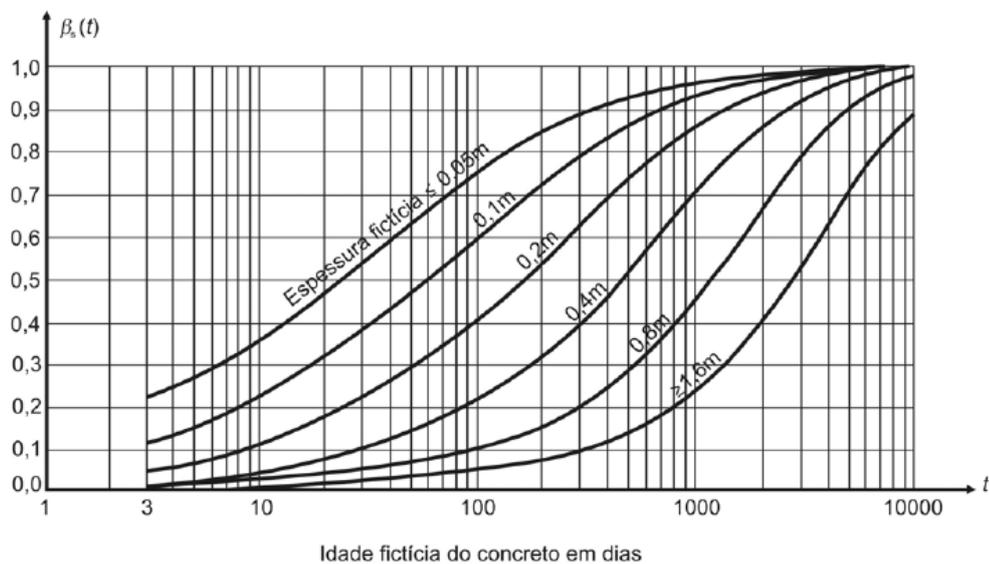
**Gráfico 2 - Variação do Coeficiente  $\varepsilon_{2s}$**

O coeficiente  $\beta_s$  depende do tempo  $t$  e também da espessura fictícia e pode ser determinado a partir das expressões a seguir ou no ábaco representado no Gráfico 3.

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

Onde:

$$\begin{aligned} A &= 40; B = 116 h_{fic}^3 \\ B &= 116h_{fic}^3 - 282h_{fic}^2 + 220h_{fic} - 4.8 \\ C &= 2,5h_{fic}^3 - 8.8h_{fic}^2 + 40.7 \\ D &= -75h_{fic}^3 + 585h_{fic}^2 + 496h_{fic} - 6.8 \\ E &= -169h_{fic}^4 + 88h_{fic}^3 + 584h_{fic}^2 - 39h_{fic} + 0.8 \end{aligned}$$



**Gráfico 3 - Variação do Coeficiente  $\epsilon_{2s}$**

Amaral (AMARAL, 2011) mostrou que os valores de  $\epsilon_{sc}$  podem aumentar em até 8 vezes com a diminuição da umidade relativa do ar de 90% para 50%, em até 1,7 com o aumento do abatimento de 0 até 15 cm, em até 1,8 vezes com a diminuição da altura da peça de 15 para 5 cm e em até 1,4 vezes com o aumento da temperatura de 15 para 35°C. Conforme se observa dos resultados obtidos pelo pesquisador, a variação da umidade relativa do ambiente tem mais influência na alteração no valor de  $\epsilon_{sc}$  do que os outros fatores intervenientes no fenômeno da retração. O Gráfico 4 a seguir ilustra os resultados obtidos pelo pesquisador.

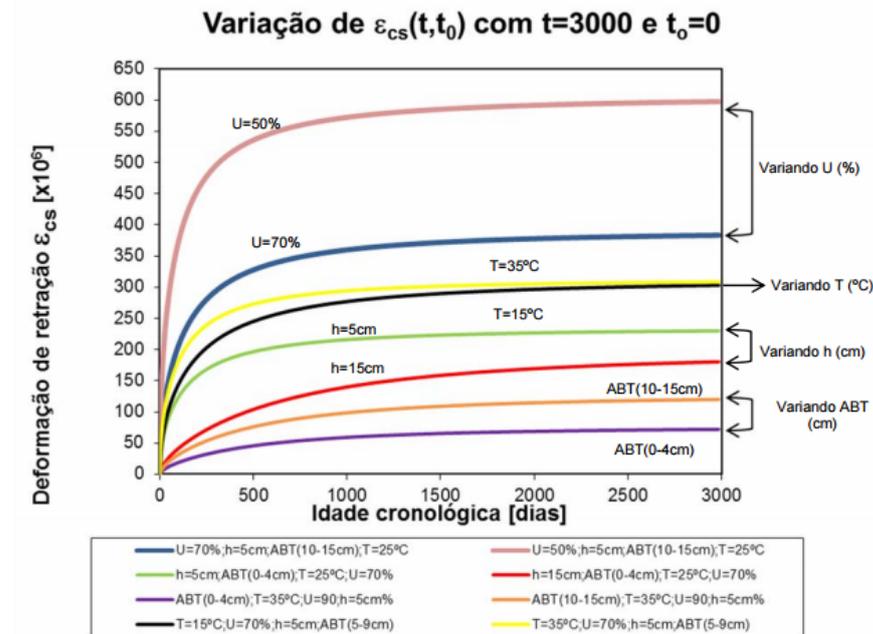


Gráfico 4 - Variação da deformação de retração por secagem  $\varepsilon_{sc}$  - (AMARAL, 2011)

## 2.6.2 Deformação lenta – Fluência

Quando o concreto é submetido a cargas de longa duração ele continua a se deformar com o passar do tempo, mesmo que a tensão a ele aplicada se mantenha constante. Este fenômeno é comumente referido como fluência ou deformação lenta do concreto.

A deformação de fluência é uma medida da diferença de deformação entre um corpo de prova carregado e outro não carregado que foi submetido à mesma história de condições ambientais.

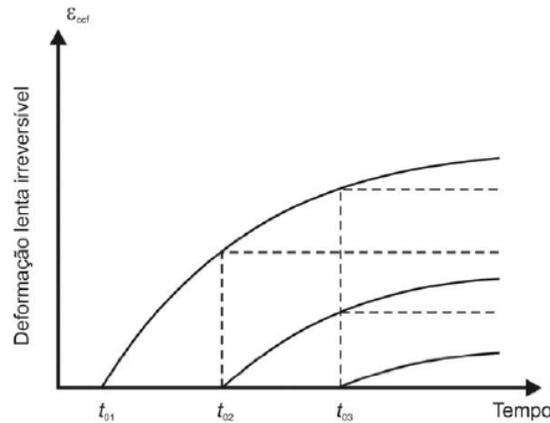
A fluência característica de um material de construção é usualmente definida pelo coeficiente de fluência que representa a relação entre a deformação de fluência e a deformação elástica. No concreto, quando a fluência ocorre sem movimentação de água para o meio ambiente, convencionou-se chamá-la de fluência básica e seu valor não é afetado pelo tamanho do elemento de concreto (NEVILLE, 2015). No entanto, a fluência que ocorre simultaneamente com a secagem, conhecida como *drying creep*, tem a mesma relação de dependência do tamanho do elemento que é observada no fenômeno da retração.

A norma brasileira de projeto de estruturas de concreto (ABNT, NBR 6118, 2014) define que a deformação por fluência no concreto é composta por duas parcelas: uma parcela

de fluência rápida e uma parcela de fluência lenta. A deformação rápida de fluência ocorre nas primeiras 24 horas após a aplicação da carga que a originou e é irreversível. Já a fluência lenta se subdivide em uma deformação lenta irreversível e uma deformação lenta reversível.

Para fins de projeto, a norma admite, para o cálculo dos efeitos da fluência e quando as tensões atuantes no concreto são as de serviço, as seguintes hipóteses simplificadoras:

- As deformações por fluência variam linearmente com a tensão aplicada;
- Para acréscimos de tensão aplicadas em instantes distintos, os respectivos efeitos de fluência se superpõem;
- A Deformação rápida produz deformações constantes ao longo do tempo; os valores dos coeficientes de fluência rápida são função da relação entre a resistência do concreto no momento da aplicação da carga e a sua resistência final;
- O coeficiente de deformação lenta reversível depende apenas da duração do carregamento; o seu valor final e o seu desenvolvimento ao longo do tempo são independentes da idade do concreto no momento da aplicação da carga;
- O coeficiente de deformação lenta irreversível depende dos seguintes fatores:
  - ✓ Umidade relativa do ambiente;
  - ✓ Consistência do concreto no lançamento;
  - ✓ Espessura fictícia da peça;
  - ✓ Idade fictícia do concreto no instante de aplicação da carga;
  - ✓ Idade fictícia do concreto no instante considerado.
- Para o mesmo concreto, as curvas de deformação lenta irreversível em função do tempo, correspondentes às diferentes idades do concreto no momento do carregamento, são obtidas, umas em relação às outras, por deslocamento paralelo ao eixo das deformações, conforme a Figura 9 a seguir.



**Figura 9 - Variação da deformação lenta irreversível (ABNT, NBR 6118, 2014)**

Ainda de acordo com a norma brasileira de projetos de estruturas de concreto, no instante  $t$  a deformação devida à fluência pode ser calculada a partir da equação a seguir:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} \varphi(t, t_0) \quad \text{Equação 4}$$

Com  $E_{c28}$  representando o módulo de elasticidade do concreto na idade de 28 dias.

O coeficiente de fluência, válido também para tração, é dado pela expressão que se segue:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{a\infty} \beta_a \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

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

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

$\varphi_a$  é o coeficiente de fluência rápida, calculado mediante recurso às seguintes expressões:

$$\varphi_a = 0,8 \left[ 1 - \frac{fc(to)}{fc(t\infty)} \right] \text{ para concreto até 50 MPa};$$

$$\varphi_a = 1,4 \left[ 1 - \frac{fc(to)}{fc(t\infty)} \right] \text{ para concreto acima de 50 MPa};$$

Onde

$\beta_1 = \frac{fc(to)}{fc(t\infty)} = e^{s \left[ 1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right]}$  é o coeficiente que considera o crescimento da resistência com o tempo e  $s$  é variável que depende do tipo de cimento utilizado;

$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c}$  é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível – para concretos acima de 50 MPa esta expressão deve ser multiplicada por 0,45;

$\varphi_{1c}$  é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e do abatimento do concreto no momento do seu lançamento;

$\varphi_{2c}$  é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça obtido a partir da expressão a seguir;

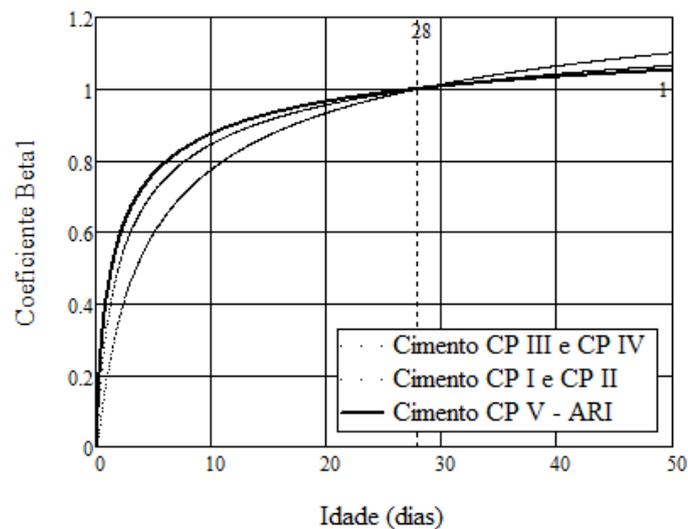
$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}}$$

$\beta_f(t)$  ou  $\beta_f(t_0)$  é o coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto;

$\varphi_{d\infty}$  é o valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4;

$\beta_a(t)$  é o coeficiente relativo à deformação lenta reversível função do tempo decorrido após o carregamento;

O Gráfico 5 a seguir mostra a evolução do coeficiente  $\beta_1$  com o tempo, onde se pode observar que para idades inferiores a 28 os Cimentos CPIII e CPIV apresentam uma evolução da resistência à compressão menor do que os outros tipos de cimento, situação que se inverte após os 28 dias.



**Gráfico 5 - Evolução do coeficiente  $\beta_1$**

O valor do coeficiente  $\beta_1$  influencia, por sua vez, o coeficiente  $\varphi_a$ . O Gráfico 6 a seguir apresenta uma visualização sobre esta contribuição, de onde se pode observar que o cimento que apresenta maior evolução das resistências antes dos 28 dias – CP V – ARI – exerce menor efeito no coeficiente de fluência rápida, o que é uma observação consistente. Também é possível observar no Gráfico 6 que a influência do tipo de cimento vai diminuindo com o incremento do tempo e, para um valor da ordem de 3.000 dias, sua participação passa a ser praticamente idênticas.

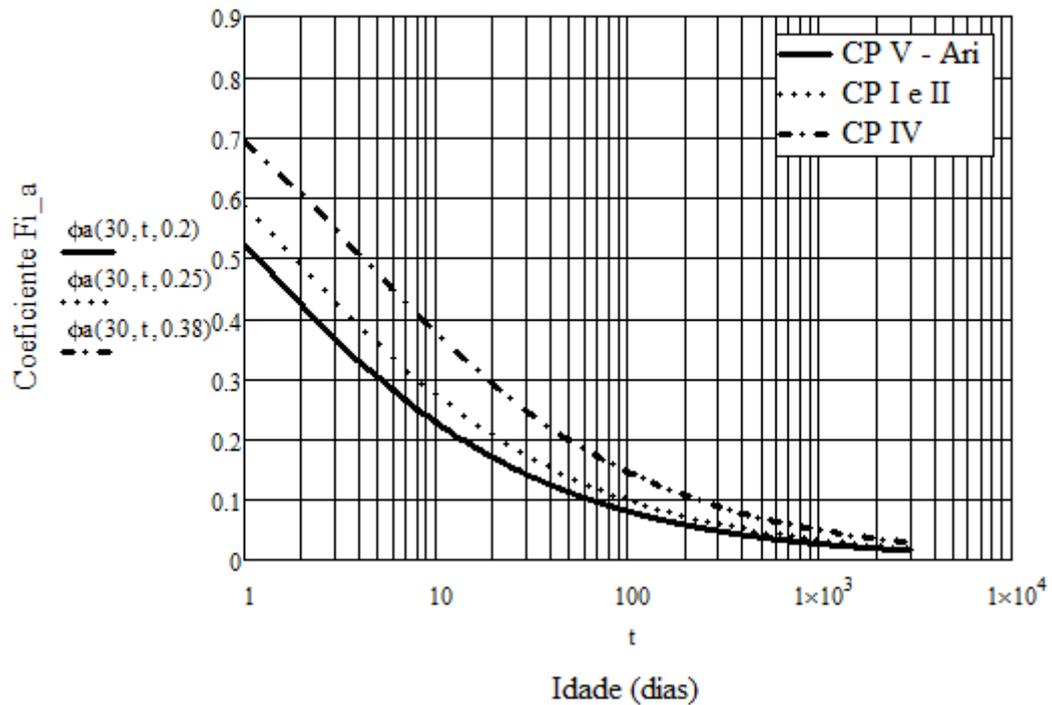


Gráfico 6 - Evolução do coeficiente  $\phi_a$  com o tempo

O coeficiente de deformação lenta irreversível ( $\varphi_{f\infty}$ ) é função de dois outros coeficientes que, por sua vez, são dependentes da umidade relativa e abatimento do concreto no momento do lançamento ( $\varphi_{1c}$ ) e da espessura fictícia da peça em contato com o ar ( $\varphi_{2c}$ ).

O Gráfico 7 a seguir apresenta a variação do coeficiente  $\varphi_{1c}$  com a umidade e com o abatimento do concreto. Neste gráfico é possível observar que, para um determinado valor da umidade relativa do ar, o valor do coeficiente  $\varphi_{1c}$  aumenta com o incremento do abatimento. Adicionalmente, para um mesmo valor do abatimento, o coeficiente  $\varphi_{1c}$  diminui linearmente com a umidade relativa do ar.

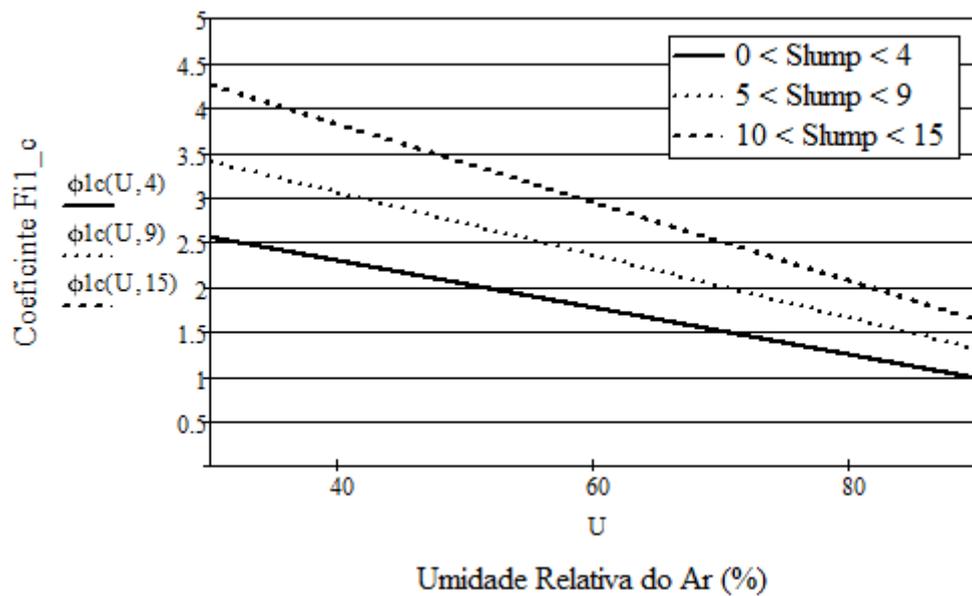


Gráfico 7 - Evolução do coeficiente  $\varphi_a$  com o tempo

O Gráfico 8 exibe a variação do coeficiente  $\varphi_{2c}$  com a espessura fictícia da peça que se acha exposta ao ambiente. Pode-se observar que os valores de  $\varphi_{2c}$  diminuem com o aumento da espessura fictícia que, por sua vez, aumenta com o incremento da altura do elemento e da umidade. Desta forma, o valor de  $\varphi_{2c}$  diminui com o aumento da altura do elemento e da umidade relativa do ambiente.

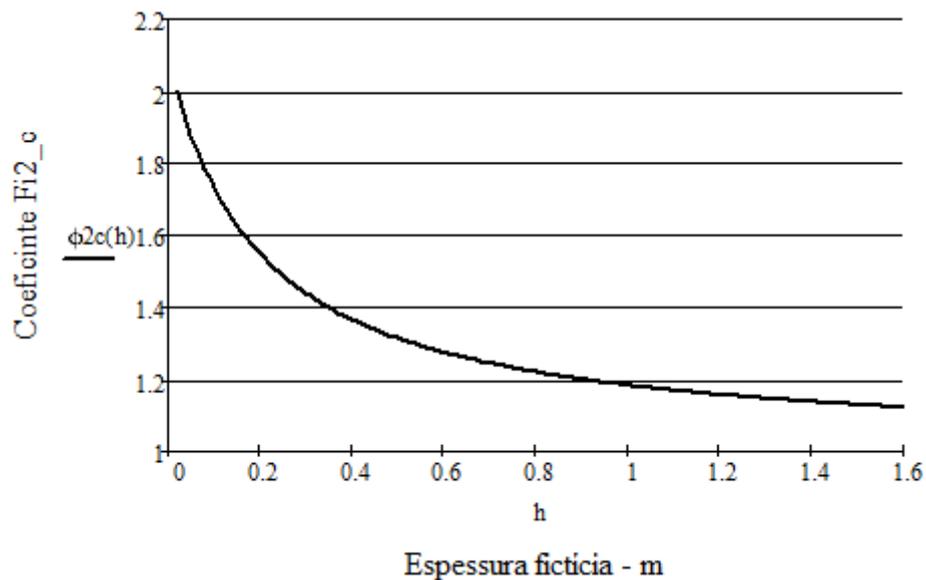


Gráfico 8 - Evolução do coeficiente  $\varphi_{2c}$  com o tempo

O coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto –  $\beta_f(t)$  ou  $\beta_f(t_0)$  – é dado pela expressão que se segue ou calculada a partir do ábaco representado no Gráfico 9.

$$\beta_s = \frac{t^2 + At + B}{t^2 + Ct + D} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

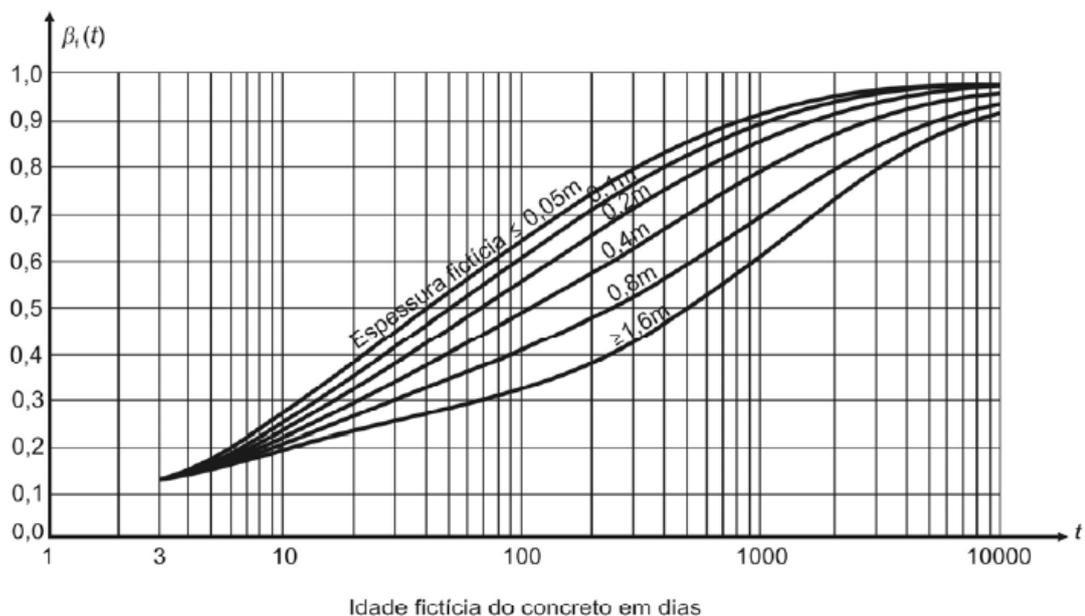
$$A = 42h^3 - 350h^2 + 588h + 113 ; B = 768h^3 - 3060h^2 + 3234h - 23$$

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4.8$$

$$C = -200h^3 + 13h^2 + 1090h + 183$$

$$D = 7579h^3 - 31916h^2 + 35343h + 193$$

Onde h é a espessura fictícia, expressa em metros.



**Gráfico 9 - Variação do Coeficiente  $\beta_f(t)$**

### 2.6.3 Variação da Resistência à Compressão do Concreto Com o Tempo

A resistência à compressão, bem como outras propriedades do concreto, como a resistência a tração e o módulo de deformação longitudinal, sofrem uma variação com o tempo em virtude das reações químicas de hidratação do cimento. Esta variação da resistência à compressão dura toda a vida útil da estrutura, mas é maior nos primeiros dias após a concretagem, como pode ser verificado no Gráfico 10 abaixo.

A resistência à compressão no tempo,  $t$  dias, é medida pela expressão indicada pelo CEB – FIP 90 (CEB, 1990), considerando que a temperatura de cura do concreto seja de 20°C.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$f_{cm}$  é a resistência média aos 28 dias.

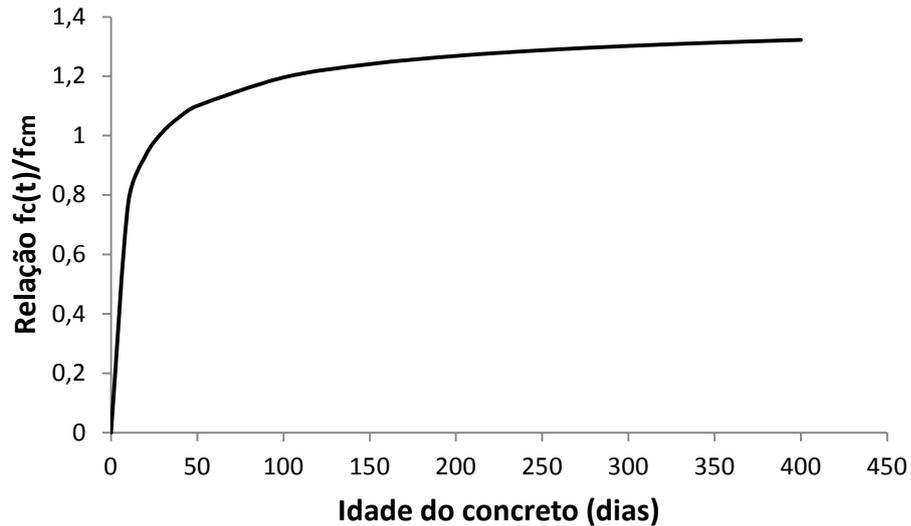
$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{Equação 8}$$

Onde  $s$  é um coeficiente dependente do tipo de cimento, e tem os seguintes valores:

$s = 0,20$  para cimento de alta resistência inicial CP V-ARI;

$s = 0,25$  para cimento CP I e CP II;

$s = 0,38$  para cimento de alto forno CP III e cimento pozolânico CP IV.



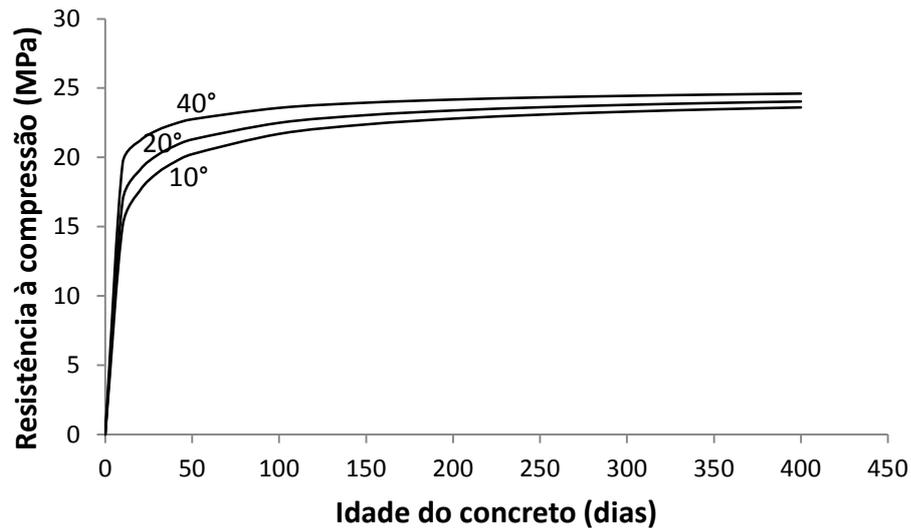
**Gráfico 10 - Variação da resistência à compressão do concreto com a idade (dias)**

Para estudar e compreender melhor o envelhecimento do concreto é necessário ainda não só levar em consideração o tempo, em dias, mas também a temperatura de cura. Podem existir concretos com a mesma idade, em dias, mas que por terem sido curados a temperaturas diferentes, possuam maturidades diferentes, deste modo resistências diferentes. Para a consideração da temperatura na cura do concreto, o CEB – FIP 90 (CEB, 1990) indica a seguinte expressão.

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13,65 - \frac{4000}{273 + T_i} \right] \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$\Delta t_i$  é o número de dias em que a temperatura de cura foi igual a  $T_i$ °C.



**Gráfico 11 - Variação da resistência à compressão do concreto com a idade (dias) e com a temperatura de cura**

Observa-se no Gráfico 11 que quanto maior a temperatura de cura, maior a resistência à compressão, principalmente nos primeiros dias.

Ainda de acordo com o CEB – FIP 90 (CEB, 1990) o módulo de deformação longitudinal do concreto pode ser definido pela seguinte expressão.

$$E_c(t) = [\beta_{cc}(t)]^{1/2} E_c \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$$E_c = 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ MPa} : \text{módulo de deformação longitudinal aos 28 dias}$$

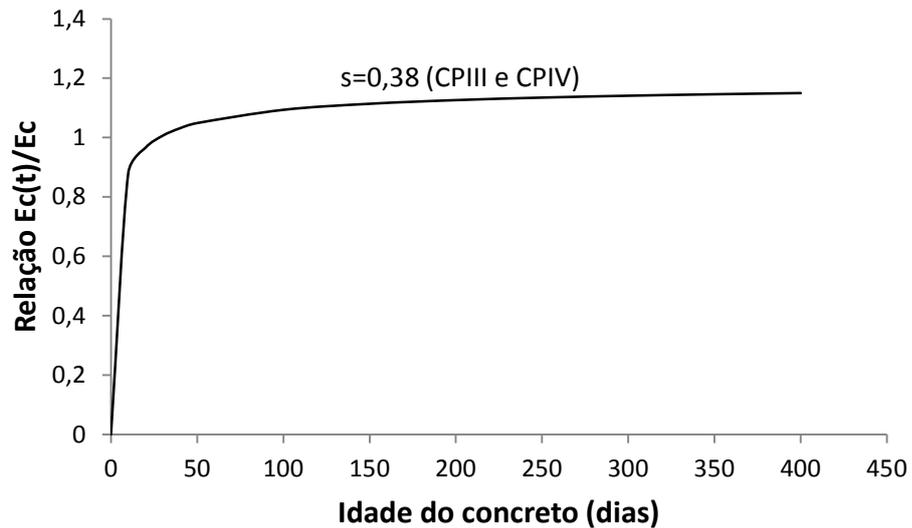


Gráfico 12 - Variação do módulo de deformação longitudinal do concreto com a idade, em dias.

É possível observar no Gráfico 12 que há uma super estimativa no módulo de deformação nas primeiras idades e subestimativa nas idades avançadas.

Tais expressões apresentadas anteriormente devem ser consideradas como função de estimativa da evolução das propriedades de concreto. Para se verificar os valores reais dessa evolução devem ser realizados ensaios em várias idades.

## Capítulo 03

### 3 Metodologia

A metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa consistiu na eleição de uma planta baixa de arquitetura que fosse representativa da estrutura de concreto armado de uma edificação residencial de múltiplos pavimentos.

Esta edificação foi analisada numericamente utilizando o método dos elementos finitos com e sem a consideração dos estágios construtivos

No estudo em questão, foram modelados elementos estruturais de concreto armado, com  $f_{ck}$  50 MPa, ciclo de concretagem de 14 dias e somente as ações verticais estáticas foram consideradas. As ações permanentes foram constituídas pelo peso próprio das lajes, vigas e pilares, peso de paredes aplicadas sobre as vigas e peso do revestimento do contra piso aplicadas sobre as lajes.

A análise incremental, ou estágios de construção, leva em consideração a sequência temporal dos estágios da construção. No objeto de estudo foi considerado uma edificação com 25 andares (25 estágios).

Foi levado em conta que cada estágio de construção dura 14 dias, não havendo após esse ciclo de concretagem qualquer tipo de estrutura auxiliar (fôrmas ou escoramentos) no andar concluído.

Para a análise incremental foi introduzido o peso próprio da estrutura a cada estágio, o peso das paredes sobre as vigas, sendo as paredes construídas após 28 dias da execução do pavimento, o peso do revestimento do piso, aplicado sobre as lajes, após 42 dias da execução do pavimento, e o peso dos trabalhadores, aplicado também sobre as lajes, durante a construção das paredes e do revestimento do piso a cada pavimento. Após o ciclo de construção das paredes e revestimento o peso decorrente dos trabalhadores foi retirado.

A análise convencional considera a carga aplicada de uma só vez, consistindo do peso próprio da estrutura, do peso das paredes e do peso do contra piso. Já o esquema descrito acima, referente às análises incrementais, com efeitos do tempo, encontra-se descrito na Tabela 5 a seguir.

**Tabela 5 – Cargas aplicadas ao longo dos estágios e construção**

ESTÁGIO	DURAÇÃO DO ESTÁGIO (DIAS)	IDADE DA ADIÇÃO DAS CARGAS (DIAS)	CARGAS				
			PESO PRÓPRIO	PAREDES	REVESTIMENTO (PISO)	TRABALHADORES	
			ANDAR DA ADIÇÃO DO PESO PRÓPRIO	ANDAR DA ADIÇÃO DA PAREDE	ANDAR DA ADIÇÃO DO CONTRAPISO	ANDAR DA ADIÇÃO DE TRABALHADORES	ANDAR DA RETIRADA DE TRABALHADORES
1	14	14	1	-	-	-	-
2	14	28	2	-	-	-	-
3	14	42	3	1	-	1	-
4	14	56	4	2	1	2	-
5	14	70	5	3	2	3	1
6	14	84	6	4	3	4	2
7	14	98	7	5	4	5	3
8	14	112	8	6	5	6	4
9	14	126	9	7	6	7	5
10	14	140	10	8	7	8	6
11	14	154	11	9	8	9	7
12	14	168	12	10	9	10	8
13	14	182	13	11	10	11	9
14	14	196	14	12	11	12	10
15	14	210	15	13	12	13	11
16	14	224	16	14	13	14	12
17	14	238	17	15	14	15	13
18	14	252	18	16	15	16	14
19	14	266	19	17	16	17	15
20	14	280	20	18	17	18	16
21	14	294	21	19	18	19	17
22	14	308	22	20	19	20	18
23	14	322	23	21	20	21	19
24	14	336	24	22	21	22	20
25	14	350	25	23	22	23	21
26	14	364	26	24	23	24	22
27	14	378	27	25	24	25	23
28	14	392	28		25		24
29	VARIÁVEL	406	29				25

Na coluna 01 são descritos todos os estágios de construção, que são as etapas construtivas. A coluna 02 contém a duração de construção de cada estágio. A coluna 03 indica a idade, em dias, que as cargas são adicionadas àquele estágio. A coluna 04 indica o andar em que o seu peso próprio é adicionado para determinado estágio, vinculado à duração de construção e a uma idade de carregamento. A coluna 05 indica o andar em que as cargas das paredes são adicionadas para determinado estágio, vinculado à duração de construção e a uma idade de carregamento. A coluna 06 indica o andar em que a carga do revestimento do piso é adicionada para determinado estágio, vinculado à duração de construção e a uma idade de carregamento. A coluna 07 indica o andar em que é adicionado o peso dos trabalhadores para determinado estágio, vinculado à duração de construção e a uma idade de carregamento. E por fim, a coluna 08 indica o andar em que é retirado o peso dos trabalhadores para determinado estágio, vinculado à duração de construção e a uma idade de carregamento.

Não foram considerados a deformabilidade dos apoios da fundação em nenhuma das análises.

### **3.1 Descrição da Edificação Analisada**

A estrutura estudada se constitui uma edificação multifamiliar de concreto armado, composta por 25 (vinte e cinco) pavimentos tipo. A planta baixa da edificação encontra-se representada na Figura 10 a seguir.

A fundação dessa edificação foi admitida como um suporte totalmente rígido, com os pilares engastados, sendo desprezado qualquer movimento da ação solo (recalques). A resistência característica à compressão do concreto foi de 50 MPa. Foram consideradas lajes maciças de concreto com 15 cm de espessura.

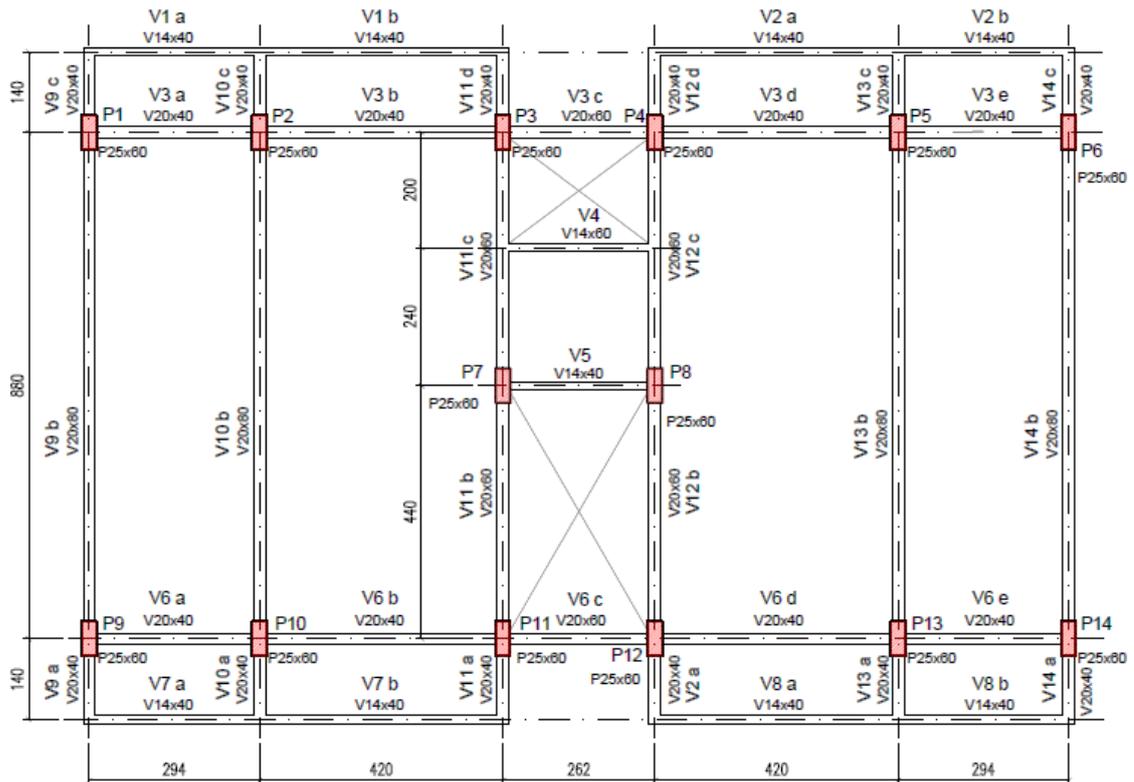


Figura 10 - Planta baixa Fôrma - Pavimento tipo

### 3.2 A Modelagem Numérica de Estágios Construtivos no Programa Utilizado

A análise dos efeitos construtivos é um tipo de modelagem estática que pode ser utilizada tanto para análises estruturais em serviço, quanto no estado limite último de projeto. Esta análise permite a definição de uma sequência de estágios de construção nos quais os sistemas estruturais e casos de carga podem ser adicionados ou removidos e o comportamento estrutural dependente do tempo (fluência, retração e envelhecimento – mudança no módulo de elasticidade com a idade) é considerado de maneira explícita. As não linearidades físicas e geométricas podem ser aplicadas aos estágios de construção que, por sua vez, podem fazer parte de uma sequência de casos de carga estáticos não lineares ou *time-history*, casos de carga que possibilitam a análise dinâmica da estrutura.

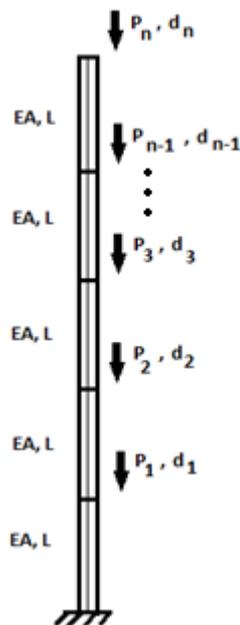
A modelagem dos efeitos construtivos, usualmente referida como *Staged Construction Modelling*, se constitui numa poderosa ferramenta para simular computacionalmente o processo de construção de determinada estrutura.

A seguir será explicitado, de maneira objetiva e direta mediante apresentação de um modelo de aplicação simplificado, como o programa de elementos finitos utilizado realiza a modelagem de estágios de construção. Sua apresentação tem importância não só para o entendimento dos pressupostos adotados pelo software como também para formar uma base conceitual para o entendimento do comportamento estrutural de modelos mais complexos.

Por questões de simplicidade de apresentação, na exposição que se segue não serão considerados os efeitos do tempo.

Para fins de detalhamento das hipóteses que são utilizadas pelo Programa, considere a Figura 11 a seguir, que se propõe a representar a construção de uma edificação de  $n$  pavimentos, submetida ao processo de construção usualmente empregado em edificações de concreto armado de múltiplos pavimentos.

Nesta Figura,  $EA$  representa a rigidez longitudinal do pilar e  $L$  a altura de cada lance do pilar que, para os objetivos propostos, assume a posição de um pavimento da edificação.



**Figura 11 – Pilar representando uma construção de concreto de  $n$  pavimentos**

Considere, ainda, que ao longo do processo de construção estejamos mais interessados em garantir que cada piso do pavimento (laje) se localize na sua correta elevação do que assegurar que cada lance do pilar tenha comprimento exatamente igual a  $L$ .

A rigidez axial de cada lance do pilar é igual a  $EA/L$  e será considerado, adicionalmente, que cada lance (andar) a ser construído representará um estágio de construção e, após sua execução, uma força concentrada  $\mathbf{P}$  seja aplicada no seu topo ( $P_1 = P_2 = P_3 = P_{n-1} = P_n = \mathbf{P}$ ). Conforme se observa na Figura 11, cada nó localizado no topo do lance do pilar apresentará um deslocamento vertical  $d_i$ .

A ideia primordial da modelagem numérica de estágios de construção é posicionar os novos nós que não estão “*tocando*” a estrutura antiga na exata posição do modelo não tensionado inicial. Isto significa que em cada estágio construtivo se está mais interessado na posição onde a estrutura nova irá ser “*adicionada*” do que no exato comprimento dos elementos, conforme já referido anteriormente.

Levando em consideração as premissas expostas, pode-se escrever a Equação 11, a seguir.

$$L_k = L + d(k - 1)$$

Equação 11

Onde

$L_k$  é o comprimento real do lance de um pilar não tensionado quando adicionado ao estágio  $k$ ;

$L$  é o comprimento inicial de cada lance de pilar;

$k$  é o índice do estágio para o qual se está calculando o comprimento real do lance do pilar;

$d$  é o deslocamento vertical de cada lance de pilar.

O deslocamento no topo de cada pilar quando este mesmo pilar é adicionado como um estágio e imediatamente solicitado pela força  $P$  no topo é calculado mediante recurso à Teoria da Mecânica das Estruturas através da Equação 12 a seguir.

$$d_k = \frac{P}{EA} \sum_{i=1}^k L_i \quad \text{Equação 12}$$

Onde

$d_k$  é o deslocamento vertical no pilar quando o estágio e a carga são adicionados;

$P$  é a carga aplicada em cada andar;

$EA$  é a rigidez longitudinal do pilar;

$L_i$  é calculado a partir da Equação 11.

Para se calcular o deslocamento vertical total em cada nó, faz-se necessário determinar quanto cada nó se deslocou verticalmente, quando ele é adicionado como um estágio e quando outros estágios acima dele são igualmente adicionados. Isto porque, por exemplo, o primeiro pilar se movimentará para baixo cada vez que um estágio for adicionado e, naturalmente também, quando a carga do primeiro estágio for aplicada.

O valor do deslocamento vertical de cada nó, quando outros estágios são adicionados pode ser obtido a partir da Equação 13.

$$dst_{s,j} = ds \frac{\sum_{i=1}^j L_i}{\sum_{i=1}^s L_i} \quad \text{Equação 13}$$

Onde

$dst_{s,j}$  é o deslocamento vertical do pilar  $j$  quando o estágio  $s$  é adicionado;

$ds$  é calculado conforme Equação 12;

$L_i$  é calculado a partir da Equação 11.

O deslocamento vertical total para um dado pilar  $j$  quando o estágio  $n$  é adicionado pode ser obtido a partir da Equação 14 a seguir.

$$td_{j,n} = d_j + \sum_{i=j+1}^n dst_{j,i} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$td_{j,n}$  é o deslocamento total do pilar  $j$  quando o estágio  $n$  é adicionado;

$d_j$  é calculado pela Equação 12;

$dst_{j,i}$  é calculado pela Equação 13.

A formulação descrita acima se acha codificada na rotina elaborada no Mathcad constante do Apêndice A.

Antes de apresentar e detalhar a modelagem da edificação estudada, que é uma estrutura mais complexa, serão apresentadas primeiramente duas estruturas simples, com a finalidade de expor de maneira simples e objetiva como o programa de elementos finitos utilizado modela o efeito construtivo.

No exemplo apresentado a seguir não foram levados em consideração os efeitos da retração, fissuração e envelhecimento do material nem o efeito de peso próprio, mas apenas a sequência construtiva de um andar por vez com a respectiva carga concentrada aplicada.

Para efeito de análise, foi utilizada a geometria contemplada na Figura 11, representando uma edificação de 20 (vinte) andares com os dados a seguir elencados, onde cada andar representa um estágio de construção.

- Comprimento dos lances de pilares:  $L = 2,8 \text{ m}$ ;
- Carga concentrada aplicada no topo dos lances dos pilares:  $P = 150 \text{ KN}$ ;
- Área da seção transversal dos pilares ( $0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$ ):  $A = 0,16 \text{ m}^2$ ;
- Módulo de elasticidade longitudinal do concreto do pilar:  $E = 37 \times 10^6 \text{ KN/m}^2$ ;
- Número de Estágios de Construção:  $n_{\text{stage}} = 20$ .
- Resistência à compressão do concreto:  $50 \text{ Mpa}$
- Duração do estágio (ciclo de concretagem): 28 dias

O resultado da análise deste modelo simples permite uma interessante visualização da influência dos efeitos construtivos no comportamento global da estrutura.

O Gráfico 13, o Gráfico 14 e o Gráfico 15 a seguir exibem, respectivamente, o comprimento de cada lance de pilar, o deslocamento vertical do topo de cada pilar no momento em que este pilar é adicionado como um estágio de construção com sua respectiva carga e o deslocamento total do topo de cada pilar quando adicionado o último estágio de construção.

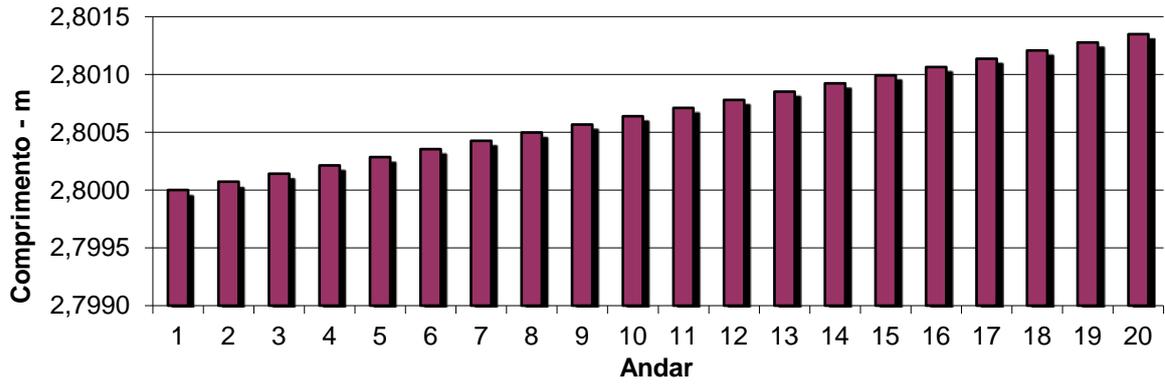


Gráfico 13 – Comprimento real dos lances de pilares em cada andar

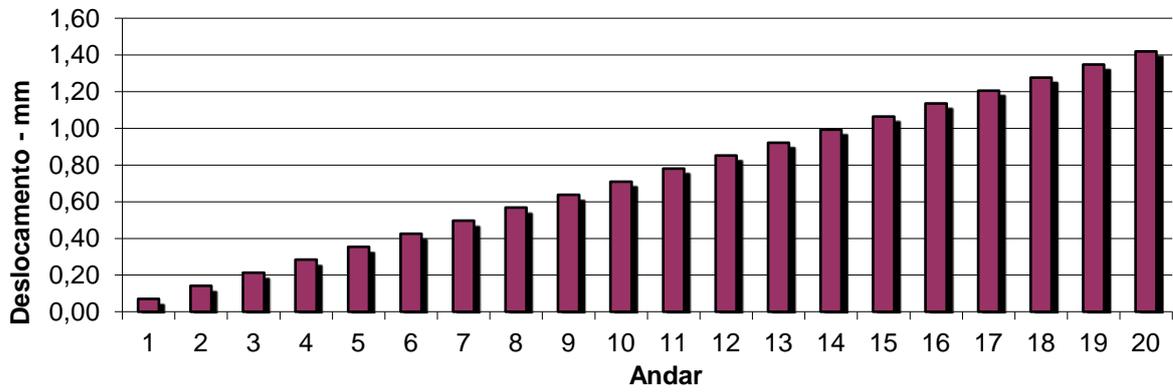


Gráfico 14 – Deslocamento no topo de cada pilar quando adicionado como um estágio e carregado

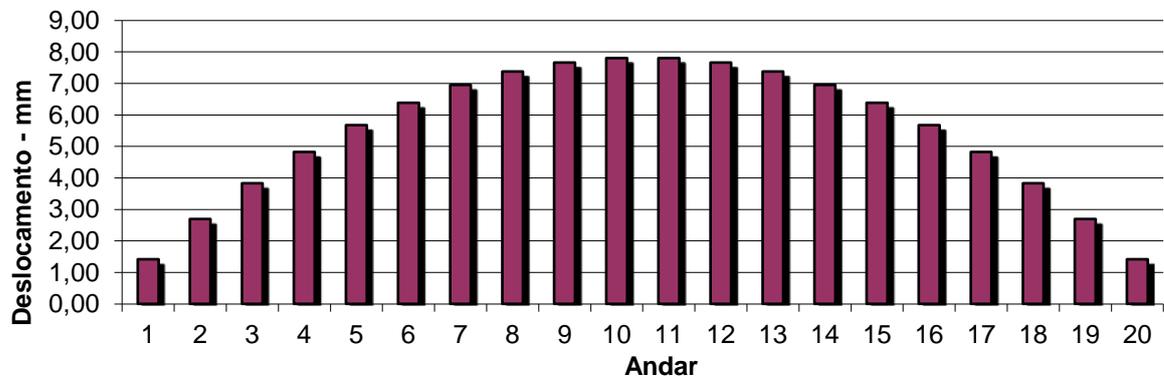
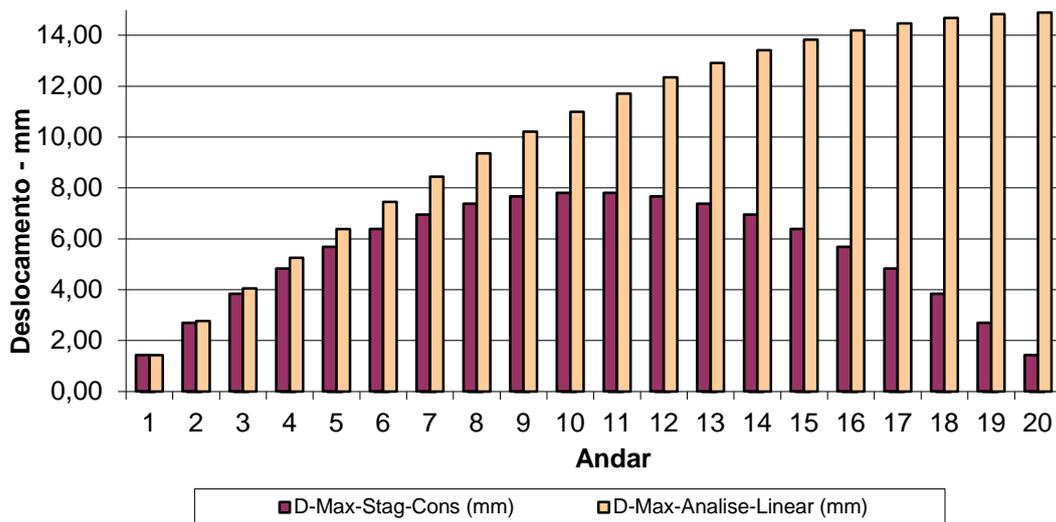


Gráfico 15 – Deslocamento total no topo de cada pilar no final do último estágio de construção



**Gráfico 16 – Deslocamentos verticais totais no topo dos pilares: Efeito Construtivo x Análise Linear**

A Tabela 6 a seguir condensa os resultados destes gráficos com uma coluna adicional exibindo os deslocamentos obtidos a partir da análise elástica linear usual do mesmo modelo.

**Tabela 6 - Símula dos resultados da análise de efeitos construtivos**

Andar	L_stage (m)	D_stage (mm)	D-Max-Stag-Cons (mm)	D-Max-Analise-Linear (mm)
1	2,8000	0,0709	1,4190	1,4190
2	2,8001	0,1419	2,6960	2,7670
3	2,8001	0,2128	3,8310	4,0440
4	2,8002	0,2838	4,8240	5,2500
5	2,8003	0,3547	5,6760	6,3850
6	2,8004	0,4257	6,3850	7,4490
7	2,8004	0,4966	6,9530	8,4430
8	2,8005	0,5676	7,3780	9,3650
9	2,8006	0,6385	7,6620	10,2160
10	2,8006	0,7095	7,8040	10,9970
11	2,8007	0,7804	7,8040	11,7060
12	2,8008	0,8514	7,6620	12,3450
13	2,8009	0,9223	7,3780	12,9120
14	2,8009	0,9932	6,9530	13,4090
15	2,8010	1,0642	6,3850	13,8340
16	2,8011	1,1351	5,6760	14,1890
17	2,8011	1,2061	4,8240	14,4730
18	2,8012	1,2770	3,8310	14,6860
19	2,8013	1,3480	2,6960	14,8280
20	2,8013	1,4189	1,4190	14,8990

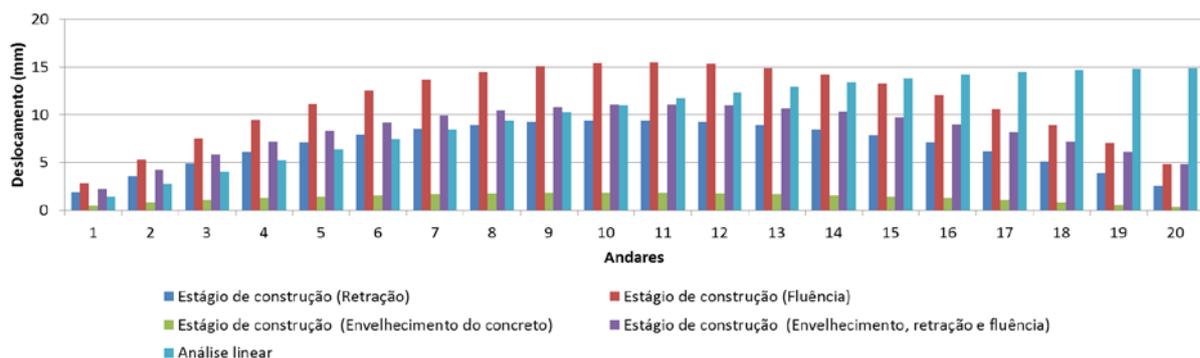
O exame destes gráficos permite extrair as seguintes observações:

- O comprimento de cada lance de pilar, à exceção do primeiro, é aumentado para que a estrutura deformada seja posicionada no ponto exato de intersecção com o lance imediatamente inferior;
- A diferença entre o comprimento de dois estágios consecutivos representa o encurtamento sofrido sob a ação do carregamento aplicado à medida que se vai acrescentando;
- Na análise sem consideração dos estágios de construção há acúmulo de todos os deslocamentos nos andares superiores. Os deslocamentos verticais variam crescentemente ao longo dos andares da estrutura, sendo o maior deslocamento encontrado no topo da estrutura.

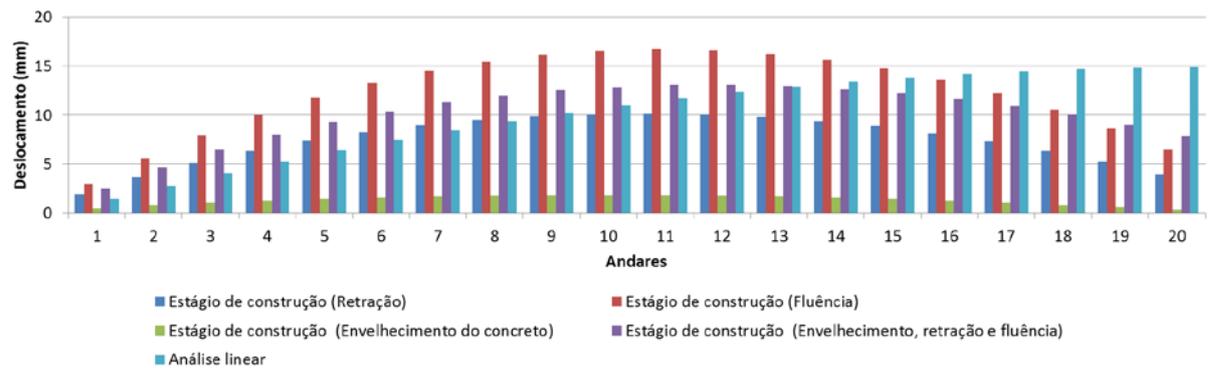
Em seguida, para um melhor entendimento de como os efeitos do tempo influenciam o comportamento estrutural, o mesmo exemplo foi analisado incluindo os efeitos de retração, da fluência e do envelhecimento do material, após os períodos de tempo de 1, 5 e 50 anos após a conclusão do último estágio de construção.

As propriedades do concreto dependentes do tempo foram adotadas conforme indicação do CEB – FIP 90 (CEB, 1990) e são a seguir expostas.

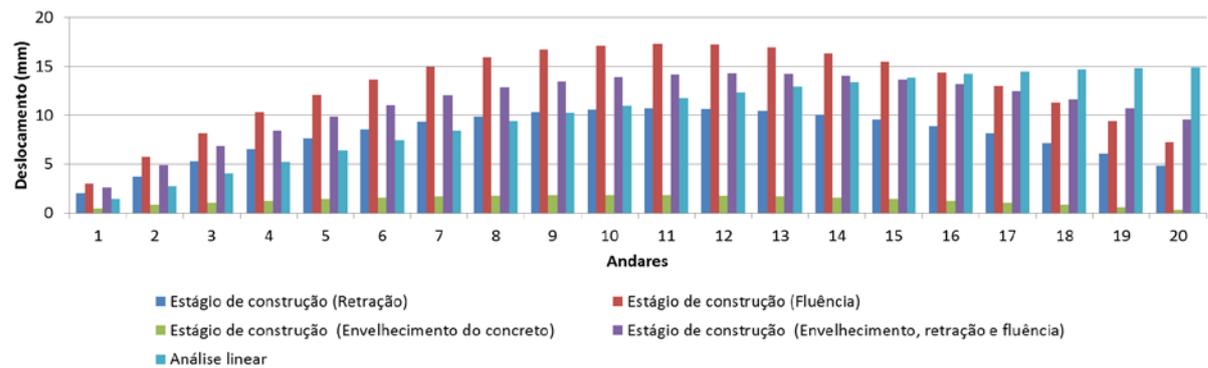
O Gráfico 17, o Gráfico 18 e o Gráfico 19 a seguir exibem, respectivamente, o deslocamento vertical em milímetros ao longo da estrutura, após 01 ano, 05 anos e 50 anos.



**Gráfico 17 – Deslocamentos verticais no topo dos pilares com efeitos do tempo após 01 ano**



**Gráfico 18 - Deslocamentos verticais no topo dos pilares com efeitos do tempo após 05 anos**



**Gráfico 19 - Deslocamentos verticais no topo dos pilares com efeitos do tempo após 50 anos**

Os gráficos apresentam resultados que mostram que, para esse exemplo isolado, a fluência é o fator mais determinante seguido da retração. O envelhecimento do concreto mostrou pouca influência nos valores dos encurtamentos encontrados.

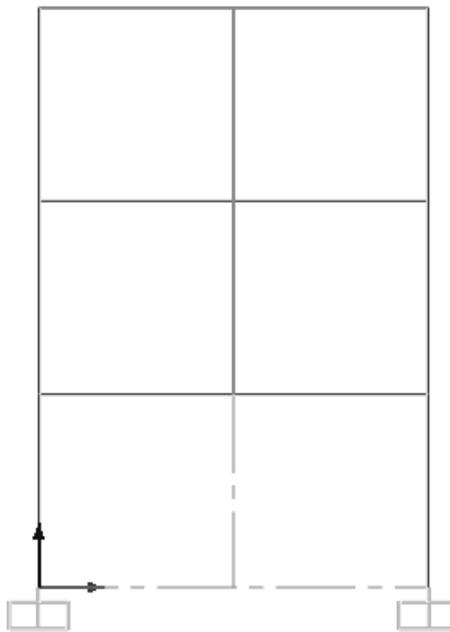
Tome-se, por exemplo, o andar 15, após 5 anos de terminado o último estágio. Quando se considera apenas a fluência, o encurtamento no topo do andar foi de 14,75 mm. Quando considerado apenas a retração este valor foi de 8,86 mm. Quando considerado o envelhecimento do concreto isoladamente, o deslocamento encontrado foi de 1,415 mm.

É possível observar que os deslocamentos nos andares 01 ao 15º quando considerado os efeitos do tempo são bastante superiores aos deslocamentos calculados pela análise linear, enquanto nos andares 16 a 20 a análise sem consideração dos estágios de construção acumulou os deslocamentos verticais dos andares inferiores.

A análise sem a consideração dos estágios de construção apresenta deslocamentos lineares crescentes ao longo dos andares, pois acumulam nos andares superiores os deslocamentos dos andares inferiores.

Esse efeito certamente leva a valores incoerentes de momentos fletores em vigas e lajes ligadas aos pilares (PRADO, 2002).

A seguir, a fim de analisar isoladamente as análises linear (sem efeitos do tempo), não linear sem efeitos do tempo e não linear com efeito do tempo após 5 anos, tanto o comportamento dos deslocamentos verticais como também o comportamento dos momentos fletores, foi analisado um segundo exemplo, desta vez utilizando a geometria contemplada na Figura 12. Trata-se de um pórtico plano composto por vigas e pilares, representando uma estrutura de 3 (três) andares. No caso da análise não linear com efeito do tempo após 5 anos foram levados em consideração os efeitos da retração, fissuração e envelhecimento do material e nos três casos foi considerado apenas o peso próprio da estrutura, não sendo considerada carga aplicada ou sobrecargas.



**Figura 12 – Esquema do pórtico plano com três andares**

Os dados considerados na análise acham-se expostos a seguir:

- Comprimento dos lances de pilares:  $L = 3,0$  m;
- Comprimento do lance de viga do 1º teto:  $L = 6,0$  m;

- Comprimento dos lances de viga do 2º ao 5º teto:  $L = 3,0 \text{ m}$ ;
- Peso próprio do concreto armado:  $25 \text{ KN/m}^3$ ;
- Área da seção transversal dos pilares ( $0,2 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ ):  $A = 0,10 \text{ m}^2$ ;
- Área da seção transversal da viga do 1º teto ( $0,14 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$ ):  $A = 0,084 \text{ m}^2$ ;
- Área da seção transversal da viga do 2º ao 5º teto ( $0,14 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ ):  $A = 0,042 \text{ m}^2$ ;
- Módulo de elasticidade longitudinal do concreto do pilar:  $E = 37 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ;
- Número de Estágios de Construção:  $n_{\text{stage}} = 3$ .
- Resistência à compressão do concreto:  $50 \text{ Mpa}$
- Duração do estágio (ciclo de concretagem):  $28 \text{ dias}$

Os deslocamentos verticais a cada lance de pilar são analisados a seguir, conforme a Tabela 7 e Tabela 8. Exibem-se os deslocamentos obtidos a partir da análise elástica linear usual e os deslocamentos obtidos a partir da análise não linear sem efeito do tempo, com efeitos do tempo combinados, e com efeitos do tempo sem retração. Os gráficos gerados a partir dos resultados apresentados nestas tabelas encontram-se no Apêndice C.

A escolha de analisar também os deslocamentos encontrados com efeitos do tempo sem a retração se deve aos resultados encontrados na análise não linear com todos os efeitos do tempo combinados.

Entende-se que os valores dos deslocamentos devidos à retração são excessivamente elevados e devem ser examinados com cautela porque a formulação do elemento de viga utilizado na modelagem numérica não considera a existência de armadura no seu interior. Desta forma, o efeito favorável da armadura que emprestaria algum impedimento às

deformações devidas à retração não está sendo considerado e, sendo assim, entende-se como razoável a sua desconsideração.

**Tabela 7 - Deslocamentos verticais (mm) nos pilares da extremidade do pórtico para diferentes parâmetros de análises**

<b>Andar</b>	<b>D-Max-Stag-Cons (mm)</b>	<b>D-Max-Analise-Linear (mm)</b>	<b>D-Max-Analise-Linear - com efeito do tempo - após 5 anos (mm)</b>	<b>D-Max-Analise-Linear - com efeito do tempo - após 5 anos - sem retração (mm)</b>
1	0,0032	0,0032	0,0631	0,0074
2	0,0037	0,0046	0,1117	0,0093
3	0,0025	0,0052	0,1426	0,0076

**Tabela 8 - Deslocamentos verticais (mm) nos pilares centrais do pórtico para diferentes parâmetros de análises**

<b>Andar</b>	<b>D-Max-Stag-Cons (mm)</b>	<b>D-Max-Analise-Linear (mm)</b>	<b>D-Max-Analise-Linear - com efeito do tempo - após 5 anos (mm)</b>	<b>D-Max-Analise-Linear - com efeito do tempo - após 5 anos - sem retração (mm)</b>
1	0,0506	0,042	0,1816	0,1077
2	0,0349	0,0429	0,1992	0,0835
3	0,0171	0,0432	0,2	0,0542

De acordo com a Tabela 7 nota-se que os valores de deslocamento vertical nos pilares da extremidade encontrados na análise linear são um pouco maiores que os valores encontrados na análise não linear sem efeito do tempo, e bem abaixo dos valores encontrados pelas análises não lineares com efeito do tempo.

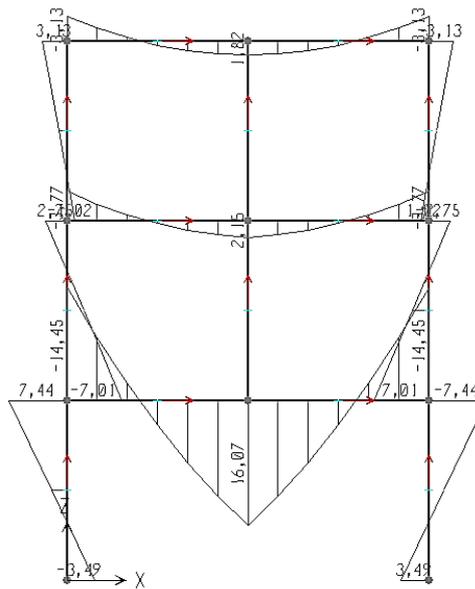
A Tabela 8, que contém os valores de deslocamento dos pilares centrais, apresentam valores de deslocamento superiores aos pilares da extremidade.

Tal fato é devido aos pilares centrais nascerem a partir do 1º teto. Desta forma, todas as cargas recebidas neles são encaminhadas para os pilares das extremidades do 1º andar

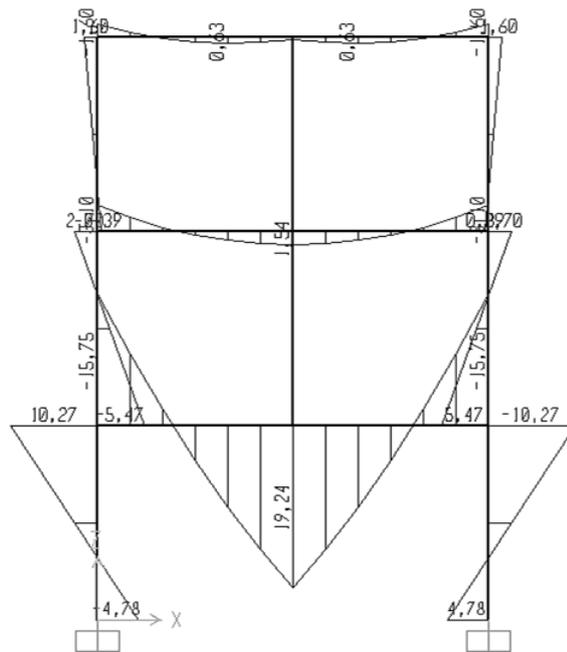
através das vigas. No entanto, seguem o mesmo comportamento que os pilares da extremidade, sendo os valores encontrados na análise linear um pouco maiores que os valores encontrados na análise não linear sem efeito do tempo, e bem abaixo dos valores encontrados pelas análises não lineares com efeito do tempo.

O efeito da retração está aumentando consideravelmente os deslocamentos verticais nos topos dos pilares do pórtico estudado. Sabe-se que a fluência tem relação direta com a deformação imediata, já a retração só depende dos materiais, não dependendo de carga aplicada. Logo, conclui-se que os valores de deformação gerados pela fluência devem ser analisados com cautela neste caso, pois são majorados devido ao pequeno número de andares. Foi considerado apenas o peso próprio da estrutura para analisar o exemplo, com isso os elementos estruturais são pouco solicitados.

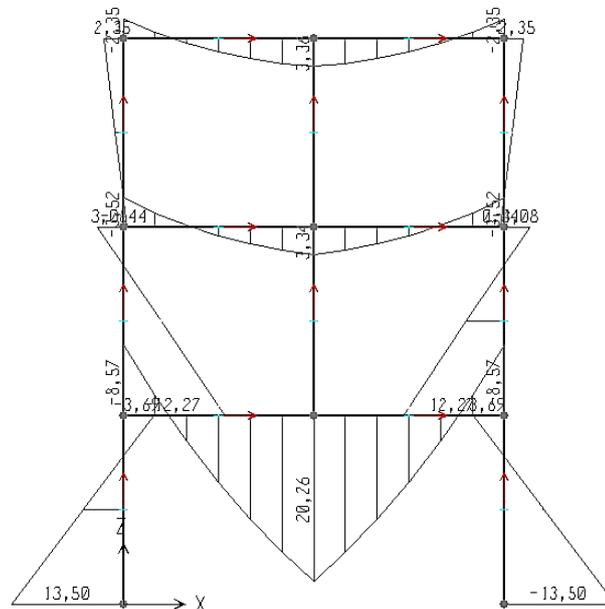
Ainda para o mesmo exemplo foram analisados os momentos fletores obtidos na análise elástica linear usual, os momentos obtidos na análise não linear sem consideração dos efeitos do tempo e os momentos obtidos na análise não linear considerando todos os efeitos do tempo após um período de 5 anos da construção do último estágio.



**Figura 13 – Momentos fletores da análise linear sem estágios de construção**



**Figura 14 – Momentos fletores da análise não linear sem efeitos do tempo com estágios de construção**



**Figura 15 – Momentos fletores da análise não linear com efeitos do tempo após 5 anos**

A análise dos momentos fletores nas vigas permite as seguintes observações:

- Os momentos obtidos a partir da análise linear (Figura 13) apresentaram os menores valores no 1º andar em relação aos outros dois casos, no entanto apresentou valores superiores nos 2º e 3º andares em relação à análise não linear sem efeitos do tempo (Figura 14).

- Os momentos obtidos a partir da análise não linear com efeitos do tempo após 5 anos (Figura 15) apresentaram os maiores resultados. É possível observar também nessa análise que a consideração do tempo após a estrutura estar concluída influencia diretamente nos valores dos momentos ao longo do pórtico, pois quando não é considerado o tempo, a disposição dos momentos é feita de modo que o primeiro pavimento apresenta momentos muito altos, o segundo pavimento momentos significativamente menores que o primeiro pavimento, e o terceiro pavimento momentos bem menores que o do pavimento inferior a ele.
- Quando o efeito do tempo é considerado, os momentos fletores na estrutura são redistribuídos. O primeiro pavimento aumenta percentualmente seu momento apenas 5,30%, já o segundo e terceiro pavimentos apresentam aumentos percentuais de mais de 100% cada.
- Quando comparado os momentos fletores encontrados no primeiro pavimento da análise não linear com efeitos do tempo após 5 anos e a análise linear sem estágios de construção obtém-se um percentual de diferença de aproximadamente 26%.

A análise dos momentos fletores nos pilares permite as seguintes observações:

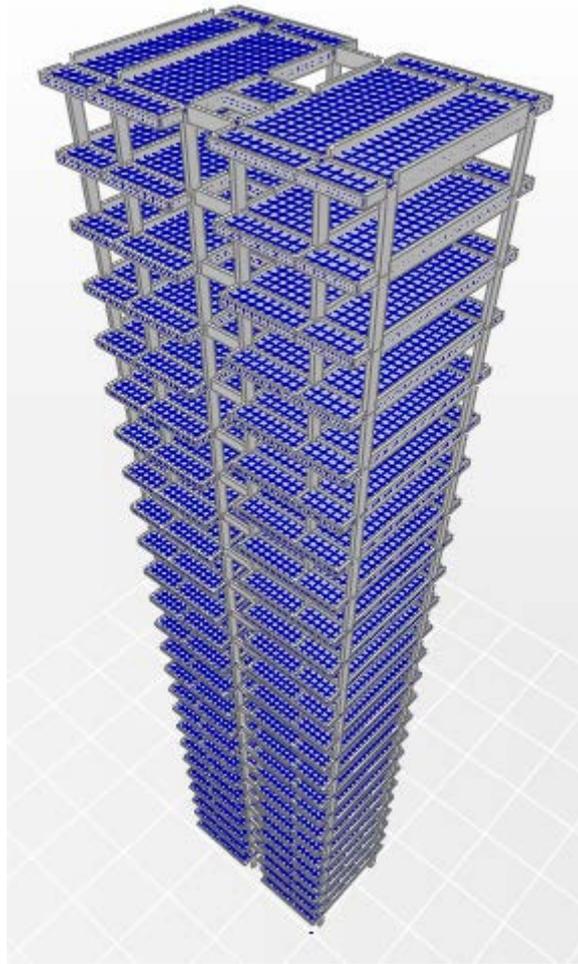
- Os momentos nos pilares do primeiro pavimento, quando passa o tempo de 5 anos os valores são invertidos, ou seja onde existiam momentos negativos passam a ser positivos e vice versa. Tal fato se deve ao engastamento do pilar com a fundação, além do efeito da retração. Estes dois fatores concorrem para gerar uma perturbação nos esforços seccionais nesta seção e devem ser analisados com cautela porque podem não representar o comportamento real da estrutura.

O exame dos exemplos analisados permite concluir que o comportamento global do edifício muda de maneira substancial quando os efeitos do tempo são considerados.

### **3.3 Edificação analisada no SAP 2000**

A modelagem da estrutura foi realizada no programa SAP 2000, versão 14. Os elementos estruturais são compostos por elementos de barras, os pilares colocados em seu centro de gravidade, e as lajes discretizadas com elementos de placa. A resistência à

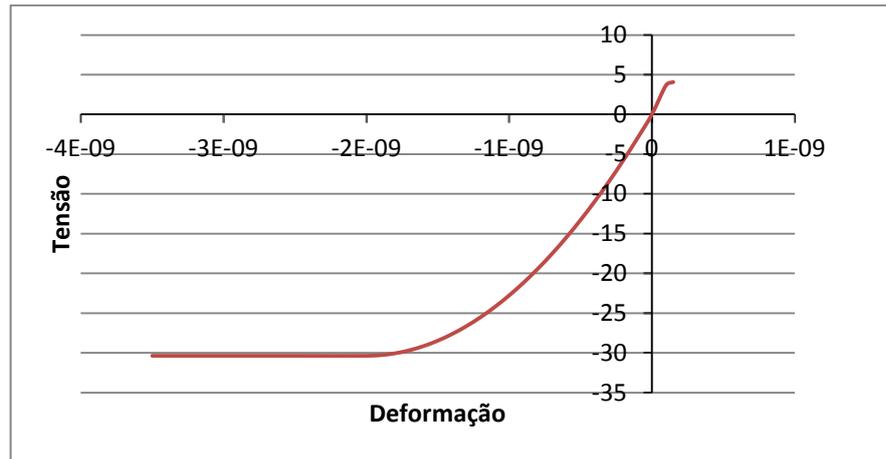
compressão do concreto considerada foi 50 Mpa e os demais parâmetros (Tabela 9). A curva tensão x deformação (Gráfico 20) foi adotada conforme recomendações da NBR 6118/2014. A Figura 16 a seguir mostra uma vista do modelo resultante.



**Figura 16 – Modelo Numérico da Edificação Estudada**

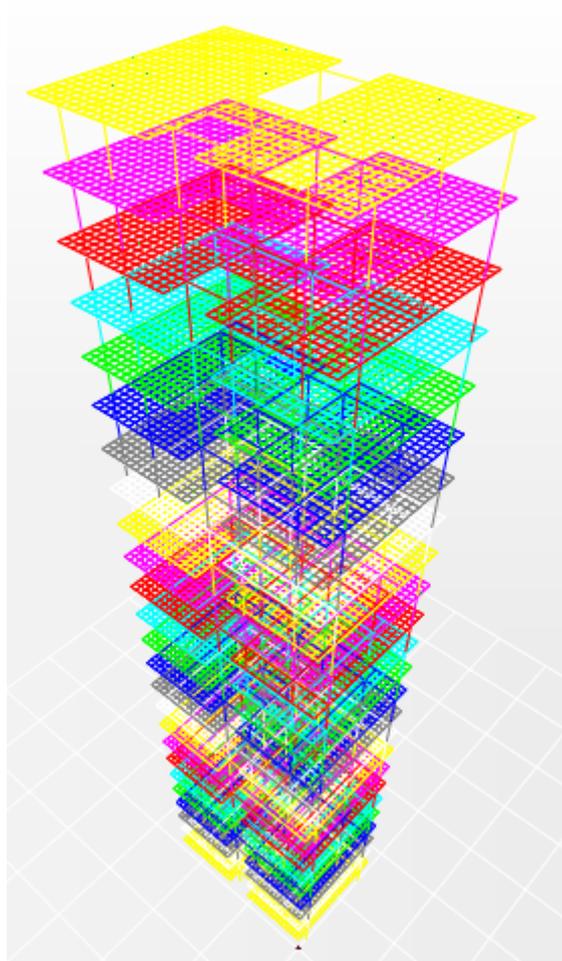
**Tabela 9 - Parâmetros do concreto adotados nas análises**

Concreto $f_{ck}$	50 Mpa
Ecs	37 GPa
Coefficiente do tipo de cimento	0,25
Umidade relativa do ar	75%
Espessura nominal	0,250m
Coefficiente de retração ( $\beta_{sc}$ )	5
Idade do início da retração	0 dias



**Gráfico 20 - Curva tensão x deformação do concreto**

Foram realizadas quatro análises diferentes para o estudo de caso: a análise linear sem estágios construtivos, a análise não linear sem os efeitos do tempo e as análises não lineares com efeitos do tempo após 1, 5, 10 e 50 anos após a conclusão do último estágio de construção. O esquema dos estágios construtivos é apresentado a seguir, na Figura 17.



**Figura 17 - 25 (vinte e cinco) estágios construtivos**

## Capítulo 04

### 4 Resultados e Discussões

Foram analisados na edificação estudada os deslocamentos verticais no topo dos pilares ao longo dos andares, os momentos fletores, esforços cortantes nas vigas e esforços normais nos pilares ao longo dos andares. Para estas análises, foram selecionadas três vigas e dois pilares da edificação, destacados na Figura 18 a seguir.

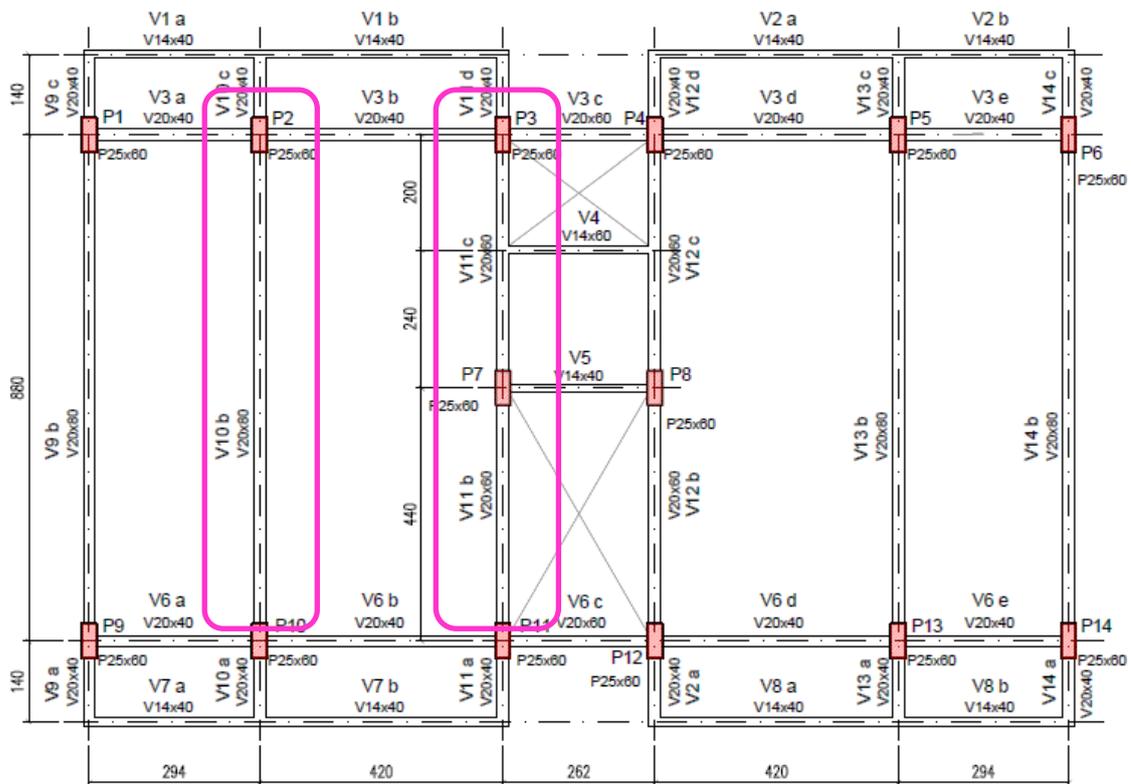


Figura 18 - Planta baixa da edificação – identificação dos elementos analisados

No trecho selecionado na Figura 18 encontram-se os elementos que foram analisados. São eles: os pilares P2 e P3 e os trechos das vigas V10b, V11b e V11c. Tais elementos foram escolhidos a fim de representar o comportamento de toda a estrutura. Os pilares P2 e P3 são

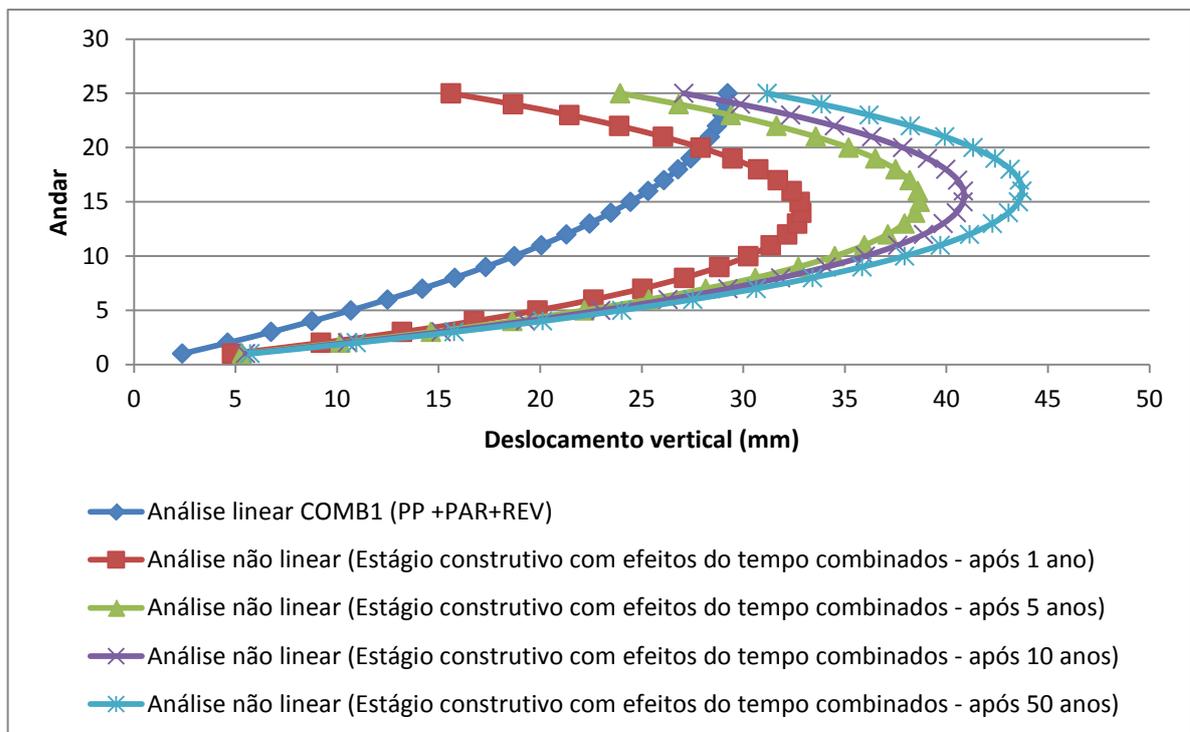
semelhantes aos pilares P5 e P4 respectivamente, assim como as vigas V10b, V11b e V11c são semelhantes às vigas V13b, V12b e V12c.

#### 4.1 Deslocamentos verticais nos topos dos pilares

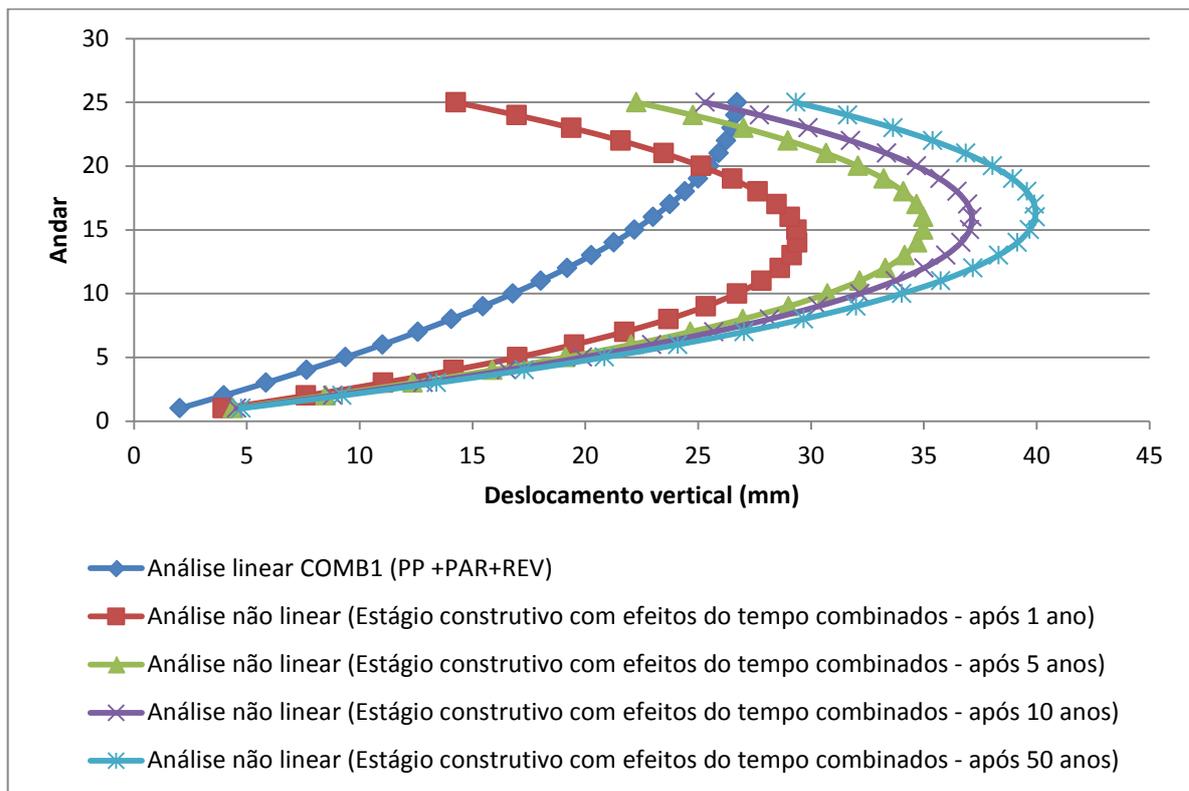
Nos topos dos três pilares ao longo de toda a estrutura são apresentados a seguir os deslocamentos verticais obtidos para os vários tipos de análises realizadas.

- Linear (COMB1 – Peso próprio, paredes, revestimento do contra piso);
- Não linear – estágios construtivos com efeitos do tempo após 1, 5, 10 e 50 anos.

O Gráfico 21 e o Gráfico 22 apresentam os resultados dos deslocamentos verticais das análises acima mencionadas para os pilares P2 e P3 respectivamente.



**Gráfico 21 - Deslocamentos verticais nos topos do pilar P2 ao longo dos andares**



**Gráfico 22 - Deslocamentos verticais nos topos do pilar P3 ao longo dos andares**

As tabelas relacionadas aos gráficos expostos constam no Apêndice B.

No pilar P2 pela análise linear, usualmente utilizada no dimensionamento, observa-se que os deslocamentos variam de forma crescente, sendo de 2,369 mm no 1º andar, indo até 29,231 mm no 25º andar.

Todas as análises não lineares apresentam a mesma característica em relação à variação dos deslocamentos, que são valores crescentes até certo andar da edificação e em seguida o decréscimo até o seu topo.

Na análise não linear após 01 (um) ano, os deslocamentos variam crescentemente do 1º ao 14º andar de 4,824 mm a 32,862 mm, e em seguida decrescem até o 25º andar, chegando a 15,595 mm. Nesta análise os deslocamentos do 1º ao 19º andar são superiores aos deslocamentos gerados na análise linear, e do 20º ao 25º andar são inferiores. Na análise com efeitos construtivos após 05 (cinco) anos os deslocamentos até o 23º andar são superiores aos deslocamentos gerados na análise linear, e os andares acima são inferiores. Já na análise com efeitos construtivos após 10 (dez) anos os deslocamentos até o 24º andar são superiores aos

gerados na análise linear, e após 50 (cinquenta) anos todos os deslocamentos são superiores à análise linear.

O comportamento dos deslocamentos acima descritos gera uma curiosidade natural decorrente do comportamento desses encurtamentos, pois os resultados obtidos mostram que o dimensionamento sem levar em consideração os efeitos do tempo, decorrente do processo construtivo, pode ocasionar situação não condizente com o comportamento real da estrutura. Logo, é possível concluir através dos gráficos que na análise linear os andares superiores acumulam os deslocamentos ocorridos nos andares inferiores.

Analisando isoladamente a situação mais desfavorável de deslocamento, que seria a análise da estrutura com efeitos construtivos considerando os efeitos do tempo (retração, fluência e envelhecimento do concreto) após 50 anos de construído, no 1º andar (5,712 mm) em relação a este mesmo andar na análise linear sem efeitos do tempo (2,369 mm) encontra-se um percentual de diferença entre esses deslocamentos de aproximadamente 141%.

No pilar P3 pela análise linear, os deslocamentos variam também de forma crescente de 2,021 mm no 1º andar, indo até 26,721 mm no 25º andar.

Todas as análises não lineares, igualmente ao pilar P2, apresentam a mesma característica em relação à variação dos deslocamentos verticais, que são valores crescentes até certo andar da edificação e em seguida o decréscimo das delas.

Na análise não linear após 01 (um) ano, os deslocamentos variam crescentemente do 1º ao 14º andar de 3,938 mm a 29,385 mm, e em seguida decrescem até o 30º andar, chegando a 14,26 mm. Nesta análise os deslocamentos do 1º ao 19º andar são superiores aos deslocamentos gerados na análise linear, e do 20º ao 25º andar são inferiores. Na análise com efeitos construtivos após 05 (cinco) anos os deslocamentos até o 23º andar são superiores aos deslocamentos gerados na análise linear, e os andares acima são inferiores. Já na análise com efeitos construtivos após 10 (dez) anos os deslocamentos até o 24º andar são superiores aos gerados na análise linear, e após 50 (cinquenta) anos todos os deslocamentos são superiores à análise linear. O comportamento dos deslocamentos é similar ao pilar P2, analisando anteriormente.

Analisando isoladamente a pior situação de deslocamento vertical deste pilar, que seria a análise da estrutura com efeitos construtivos considerando os efeitos do tempo (retração, fluência e envelhecimento do concreto) após 50 anos de construído, também no 1º andar (4,745 mm) em relação a este mesmo andar na análise linear sem efeitos do tempo (2,021 mm) encontra-se um percentual de diferença entre esses deslocamentos de aproximadamente 134%.

## 4.2 Momentos fletores nos pilares

Para os mesmos pilares P2 e P3 foram analisados os momentos fletores na base e no topo do pilar ao longo da estrutura para as análises:

- Linear (COMB1);
- Não linear – estágios construtivos com efeitos do tempo combinados (envelhecimento do concreto, fluência e retração) após 5 anos;
- Não linear – estágios construtivos com efeitos do tempo sem a retração após 5 anos.

Os momentos fletores nos pilares serão apresentados no eixo de maior inércia, onde existem os maiores momentos. Para o pilar P2 o eixo de maior inércia é denominado no SAP M3-3. Já para o pilar P3, o eixo de maior inércia é denominado no SAP M2-2.

As tabelas cujos valores estão representados nos gráficos a seguir constam no Apêndice B.

Os momentos fletores ao longo dos andares nos pilares P2 e P3 nas duas seções analisadas de cada pilar são apresentados a seguir no Gráfico 23, Gráfico 24, Gráfico 25 e Gráfico 26.

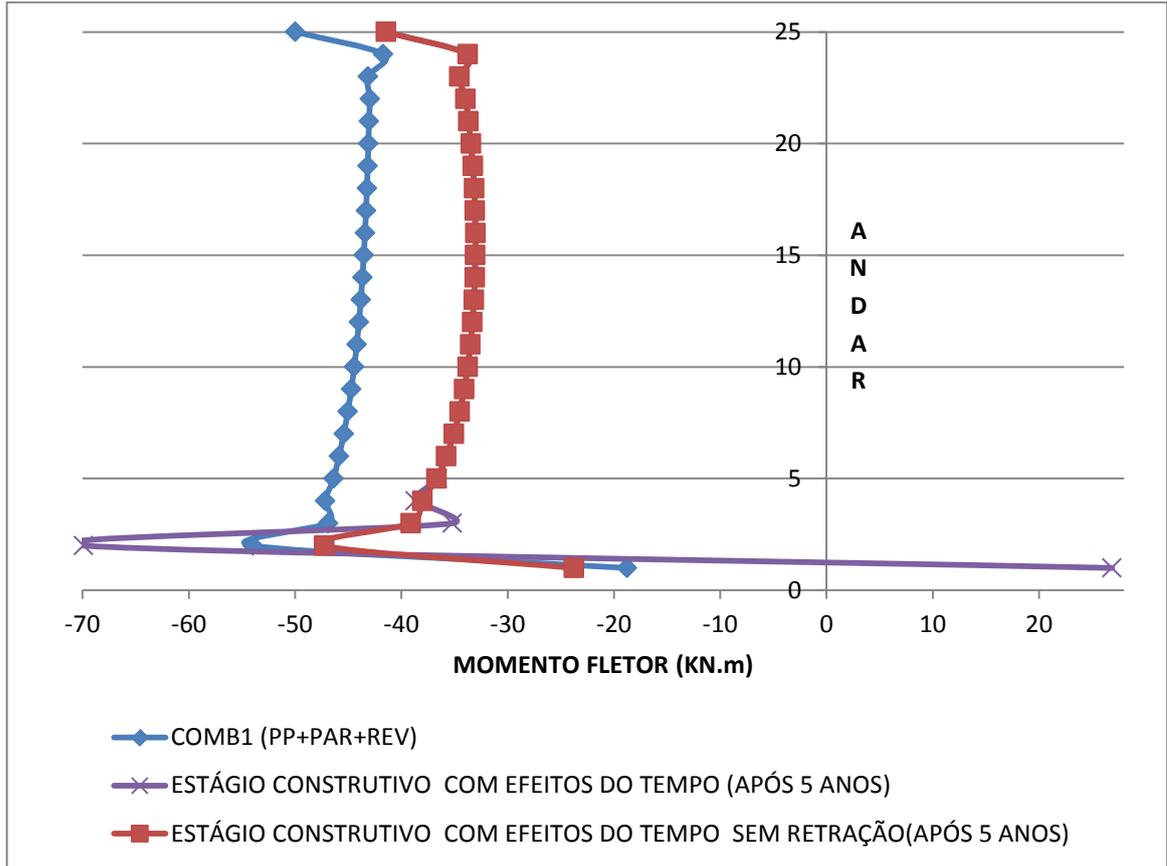


Gráfico 23 - Momento fletor no eixo M3-3 na base do pilar P2 ao longo dos andares

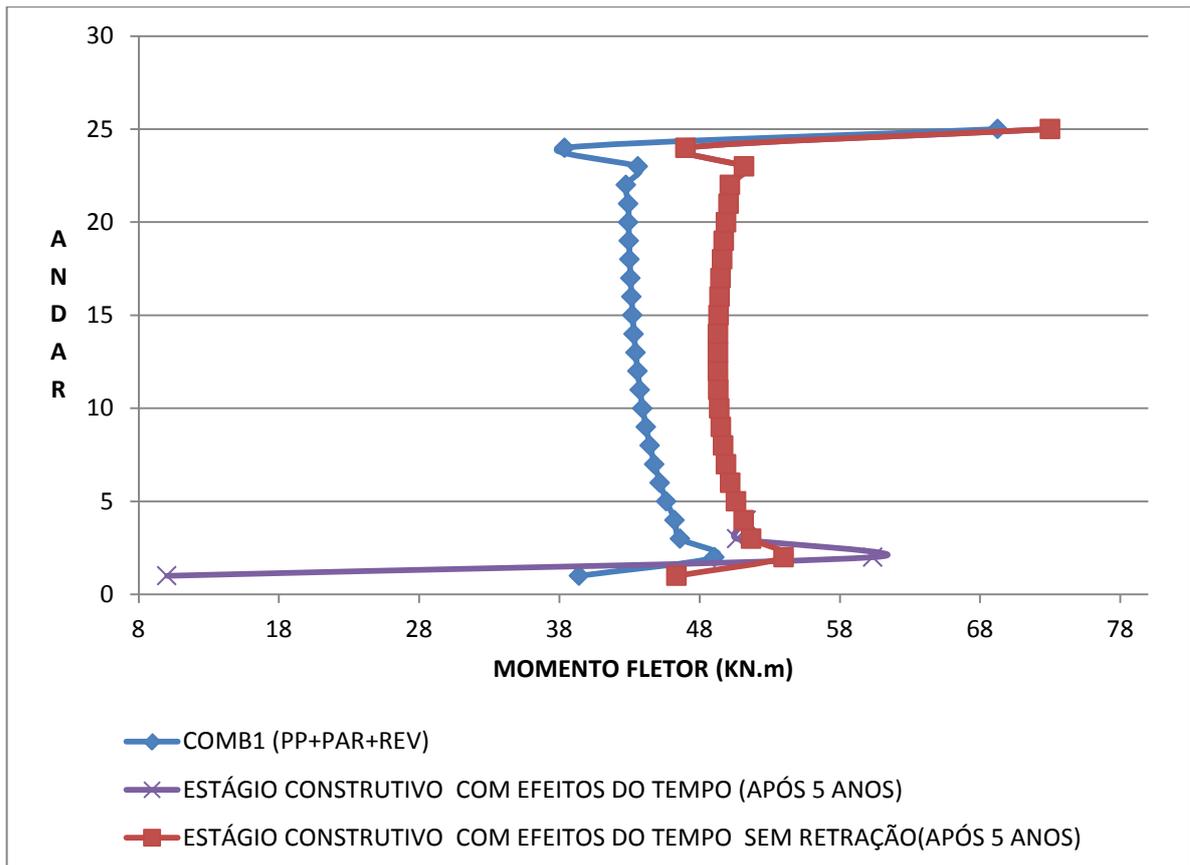


Gráfico 24 - Momento fletor no eixo M3-3 no topo do pilar P2 ao longo dos andares

Através do Gráfico 23 e Gráfico 24 exibidos acima é possível identificar uma diferença entre os esforços obtidos na análise linear, e os obtidos nas análises não lineares. Isto é, há uma redistribuição dos esforços ao longo dos andares quando considerado o processo construtivo com os efeitos do tempo.

Na seção à base do pilar P2, os momentos fletores apresentam semelhança no comportamento do perfil de distribuição ao longo dos andares para as diferentes análises. Os momentos fletores encontrados na análise linear sem efeitos do tempo são maiores percentualmente em média 27% que os momentos encontrados na análise com estágios construtivos e efeitos do tempo.

Na seção ao topo do pilar P2, também se observa uma semelhança no comportamento do perfil de distribuição ao longo dos andares para as diferentes análises. Os momentos fletores encontrados na análise linear sem efeitos do tempo são menores percentualmente em média 14% que os momentos encontrados na análise com estágios construtivos e efeitos do tempo.

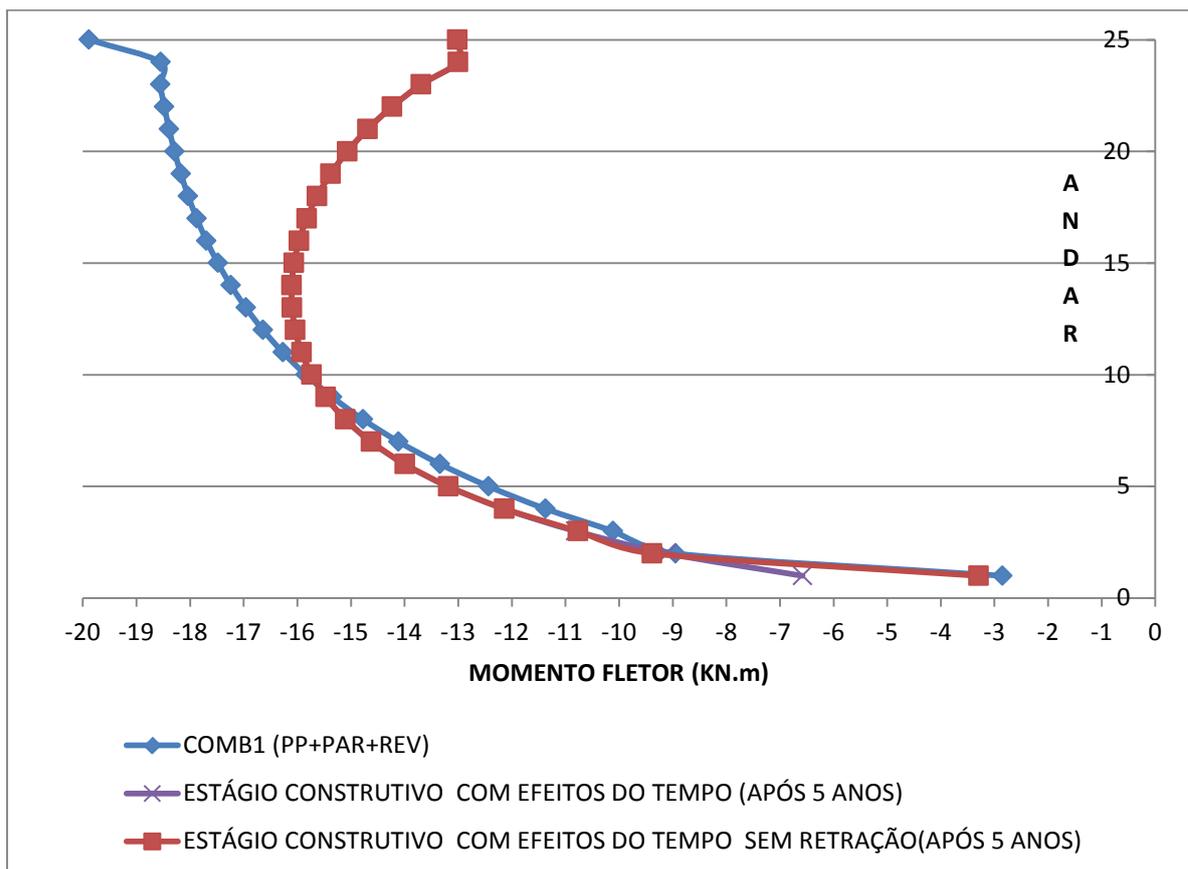


Gráfico 25 - Momento fletor no eixo M2-2 na base do pilar P3 ao longo dos andares

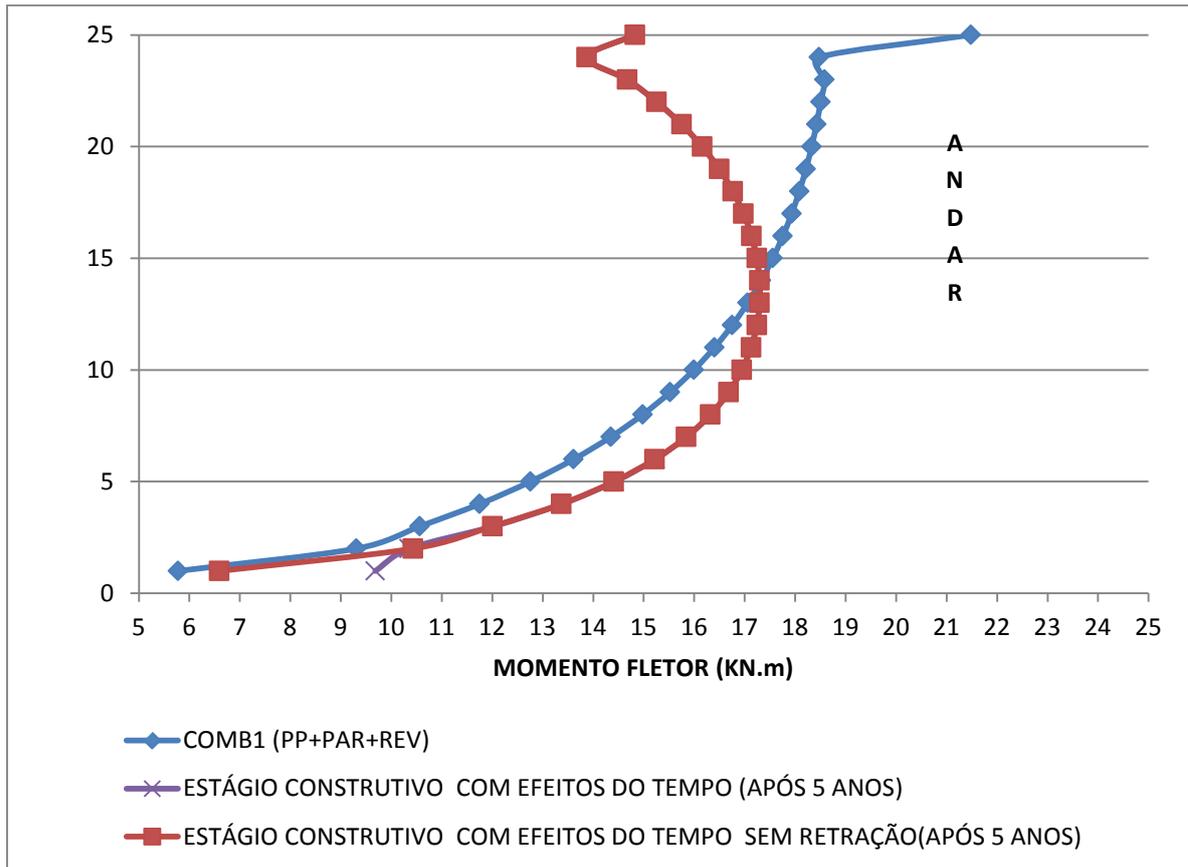


Gráfico 26 - Momento fletor no eixo M2-2 no topo do pilar P3 ao longo dos andares

O Gráfico 25 e o Gráfico 26 representam o comportamento dos momentos fletores ao longo dos andares do pilar P3, nas seções na base do pilar e no topo do pilar. Através dos gráficos exibidos acima é possível identificar uma diferença entre os esforços obtidos na análise linear, e os obtidos nas análises não lineares. Isto é, há uma redistribuição dos esforços ao longo dos andares quando considerado o processo construtivo com os efeitos do tempo.

Na seção à base do pilar P3, os momentos fletores da análise não linear são maiores que na análise linear até o 9º andar, sendo o percentual de diferença mais crítico entre essas análises no 1º andar, de 15%. A partir do 10º andar esse comportamento é invertido, e a análise linear apresenta valores maiores do que a não linear, chegando a uma diferença percentual de 52% no último pavimento (25º andar).

Na seção ao topo do pilar P3, os momentos fletores da análise não linear são maiores que os encontrados na análise linear até o 14º, com o percentual de diferença mais crítico entre as análises de 14% no 1º andar. Do 15º ao 25º andar a análise não linear apresenta

momentos fletores menores que na análise linear, com o maior percentual de diferença entre essas análises no 25º andar, de 45%.

De forma geral, observa-se que no pilar P2 enquanto à seção na base do pilar a análise linear sem estágios construtivos tem maiores momentos fletores ao longo da estrutura, no topo do pilar a análise com estágios construtivos e tempo é que apresenta momentos fletores maiores. Já no pilar P3 enquanto na seção à base do pilar a análise com estágios construtivos e efeitos do tempo são maiores nos primeiros andares e nos andares superiores são menores que os momentos da análise linear sem estágios construtivos.

Nos dois pilares analisados, P2 e P3, é possível observar tanto no gráfico da base quanto no gráfico do topo do pilar, na análise que leva em consideração todos os efeitos do tempo combinados (retração, fluência e envelhecimento do concreto), um comportamento estranho nos primeiros andares, e que a partir do 3º andar os valores das análises são bem próximos ao da análise com estágios construtivos e com tempo exceto a retração. A partir desta análise, conclui-se que a consideração do efeito da retração é o que está causando esse comportamento nos primeiros andares, e provavelmente se dá devido ao engastamento dos pilares da base com a fundação. Desta forma as citações acima foram baseadas nos resultados das análises sem o efeito da retração comparadas à análise linear.

### **4.3 Esforços cortantes nos pilares**

A seguir serão apresentados para os mesmos pilares P2 e P3 o esforço cortante na base e no topo do pilar ao longo da estrutura para as análises:

- Linear (COMB1);
- Não linear – estágios construtivos com efeitos do tempo combinados (envelhecimento do concreto, fluência e retração) após 5 anos;
- Não linear – estágios construtivos com efeitos do tempo sem a retração após 5 anos.

Os esforços cortantes nos pilares serão apresentados na direção de maior inércia, onde existem os maiores esforços. Para o pilar P2 a direção de maior inércia é denominada no SAP V2. Já para o pilar P3, a direção de maior inércia é denominada no SAP V3.

As tabelas cujos valores estão representados no gráfico a seguir constam no Apêndice B.

Os esforços cortantes ao longo dos andares nos pilares P2 e P3 nas duas seções analisadas de cada pilar são apresentados a seguir no Gráfico 27, Gráfico 28, Gráfico 29 e Gráfico 30.

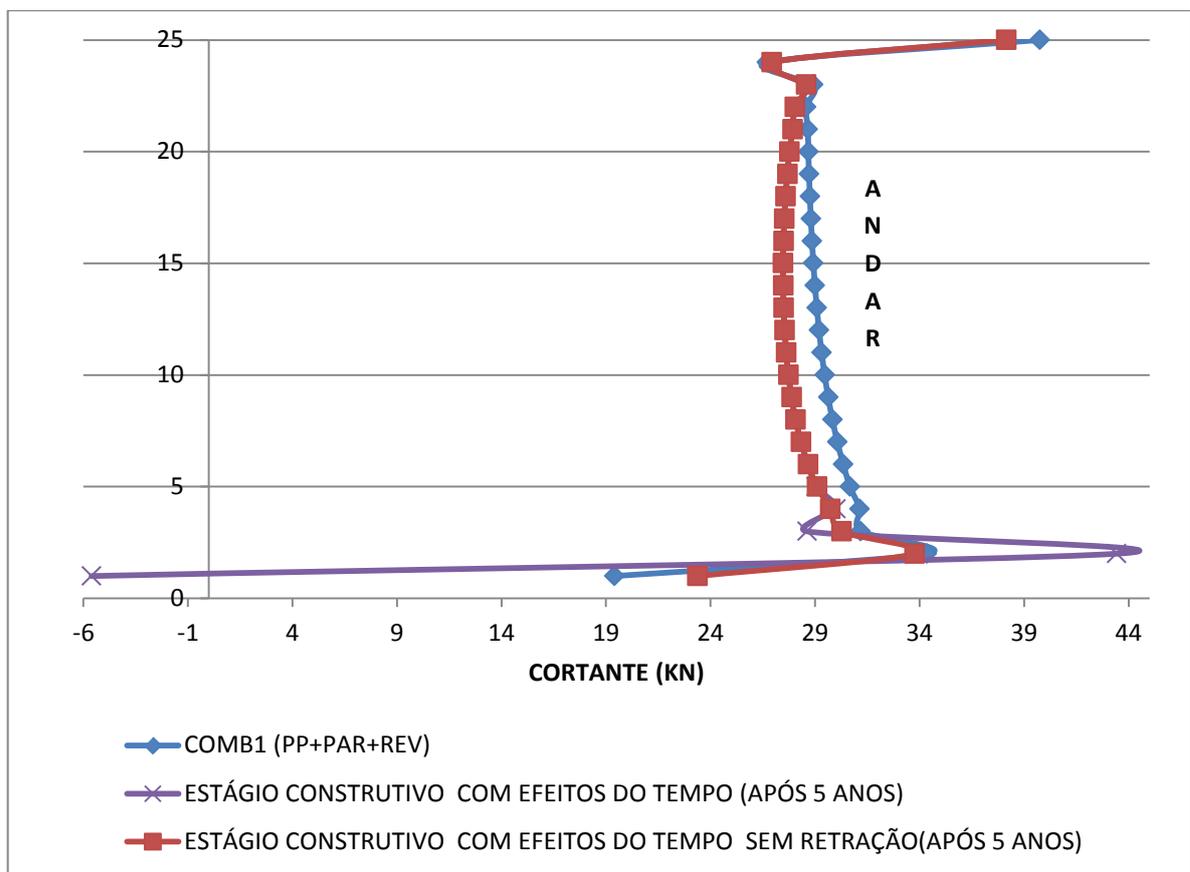


Gráfico 27 - Esforço cortante na direção V2 na base do pilar P2 ao longo dos andares

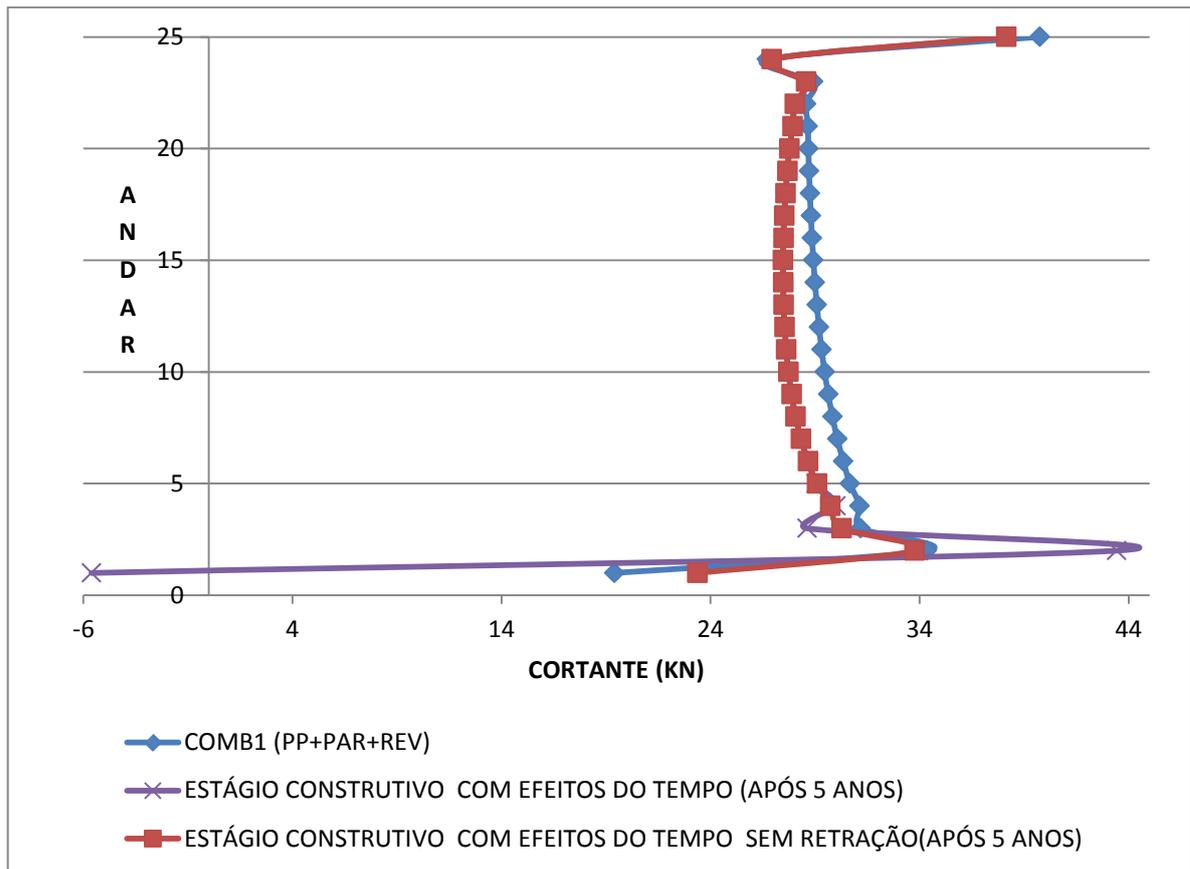
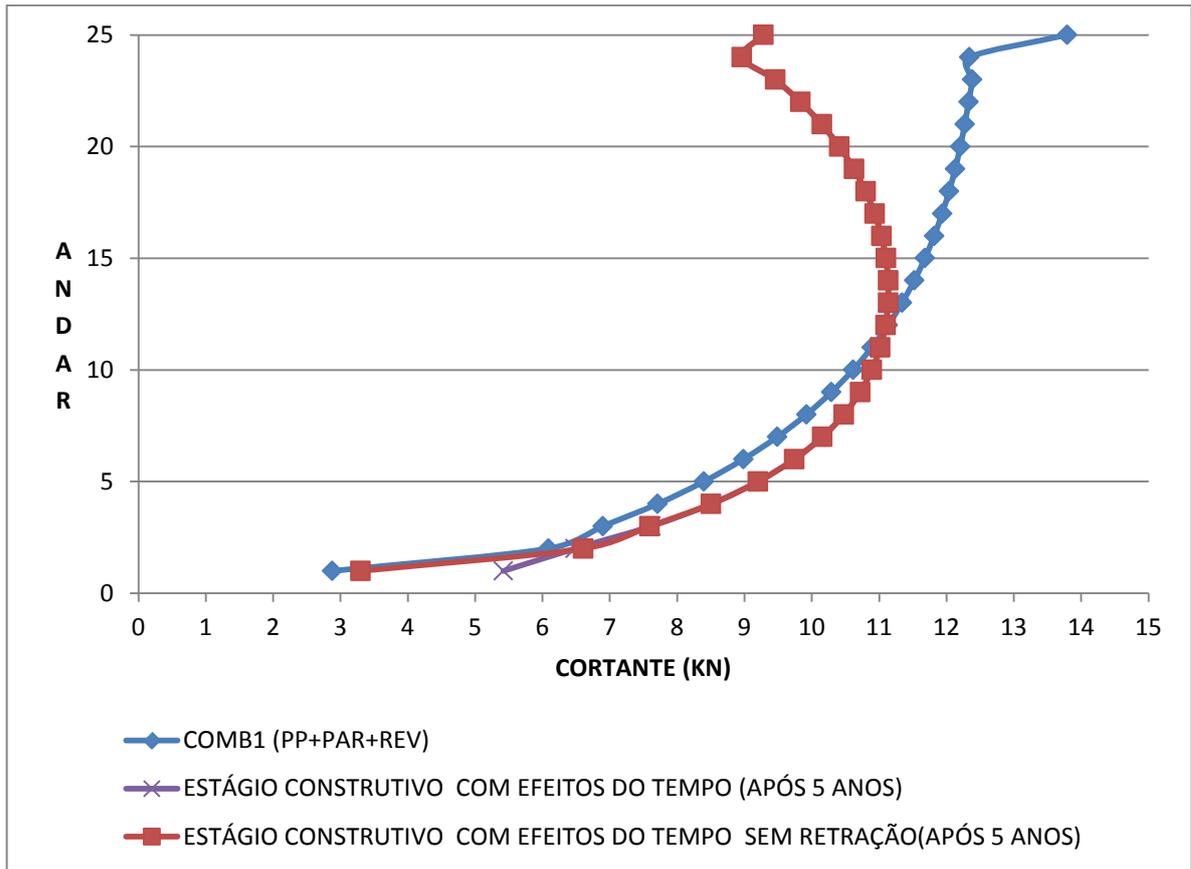


Gráfico 28 - Esforço cortante na direção V2 no topo do pilar P2 ao longo dos andares

O esforço cortante das seções na base e no topo do pilar P2 têm os mesmos valores. O perfil de distribuição dos esforços ao longo dos andares da edificação apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, no 1º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo são maiores que os esforços na análise linear, aproximadamente 20%;
- Os esforços cortantes, do 2º ao 25º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo são menores que os esforços na análise linear, uma média de 4,5%;
- Todos os esforços são positivos, exceto o esforço do 1º andar da análise dos estágios construtivos com todos os efeitos do tempo, devido à perturbação gerada pela retração nas análises.

Devido ao comportamento estranho que a análise dos estágios construtivos com todos os efeitos do tempo apresenta nos primeiros andares, para as observações acima foram levados em consideração a análise linear e a análise com estágios construtivos e com efeitos do tempo exceto retração.



O esforço cortante das seções na base e no topo do pilar P2 também têm os mesmos valores. O perfil de distribuição dos esforços ao longo dos andares da edificação apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, do 1º e 11º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores que os esforços na análise linear, em média 7%;
- Os esforços cortantes, do 12º ao 25º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores que os esforços na análise linear, em média 16%;

#### **4.4 Esforços normais nos pilares**

O esforço normal nas seções dos pilares foi analisado também para os mesmos pilares P2 e P3. Foi verificado que os esforços normais nos dois pilares, tanto nas seções da base quanto nas seções do topo variam decrescentemente ao longo dos andares da edificação. As curvas desses esforços são muito semelhantes entre a análise linear sem efeitos do tempo, e a análise não linear com efeitos do tempo após 5 anos. A diferença média percentual entre as análises de cada pilar é de 9% para o pilar P2; e 3,70% para o pilar P3. Os gráficos e tabelas geradas a partir dessas análises estão no Apêndice D.

Conclui-se então sobre os esforços normais dos pilares que existe apenas uma pequena redistribuição deles quando comparado às análises lineares com as análises com efeitos construtivos. No pilar P2 os esforços normais gerados pela análise com estágios construtivos com consideração do tempo são maiores que os esforços obtidos pela análise linear. Já o pilar P3 os esforços normais gerados pela análise linear são maiores que os esforços obtidos pela análise com estágios construtivos com consideração do tempo.

## 4.5 Momentos fletores nas vigas

Ainda no mesmo trecho selecionado na Figura 18, foram extraídos das vigas V10b, V11b e V11c os momentos em três seções diferentes ao longo dos andares, para análise comparativa entre vários tipos de análises:

- Linear (COMB1);
- Não linear, estágios construtivos com todos os efeitos do tempo combinados após 5 anos;
- Não linear, estágios construtivos com efeitos do tempo sem a retração após 5 anos.

Os momentos fletores de maior inércia dos elementos horizontais no SAP ficam no eixo M3-3.

A escolha de analisar os esforços, considerando os efeitos do tempo combinados e os efeitos do tempo sem a retração, é devido ao comportamento da retração no programa escolhido. Os efeitos da retração devem ser analisados com cautela, pois a versão escolhida do programa não contempla elemento finito que incorpore a presença de armadura na sua formulação.

A viga V10b (Figura 19) tem comprimento de 8,80m e as seções analisadas foram 0,30m; 4,40m e 8,50m, conforme Gráfico 31, Gráfico 32 e Gráfico 33. As tabelas cujos valores geraram os gráficos estão presentes no Apêndice B.



**Figura 19 - Seções da viga V5a**

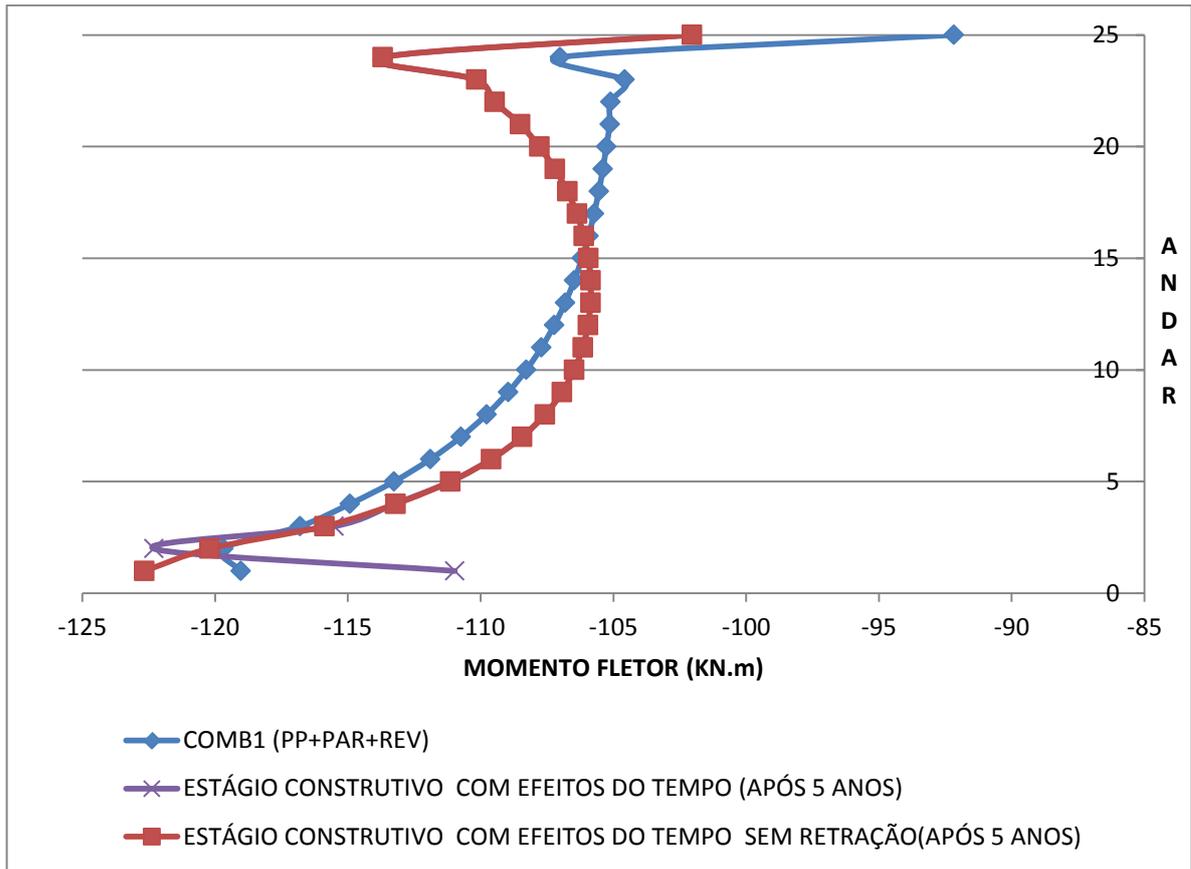


Gráfico 31 - Momento fletor na seção 0,30m na viga V10b ao longo dos andares

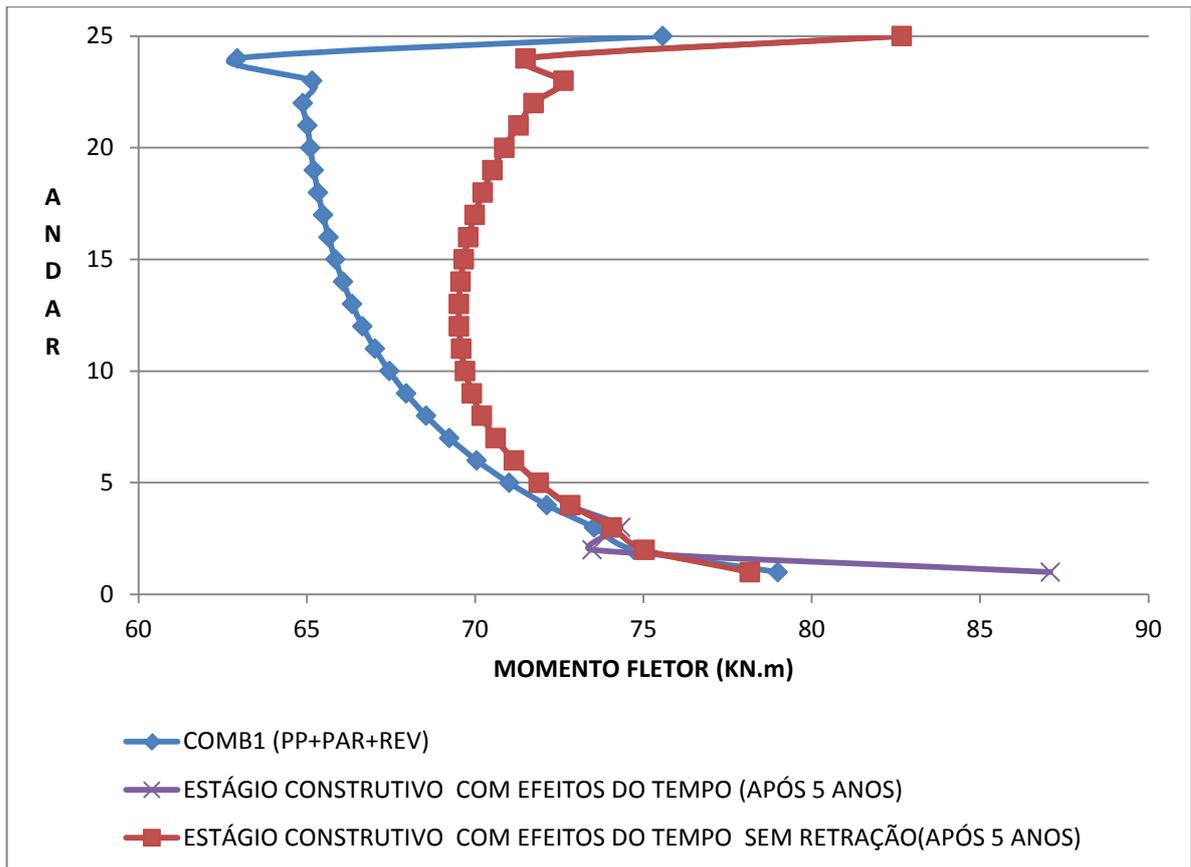
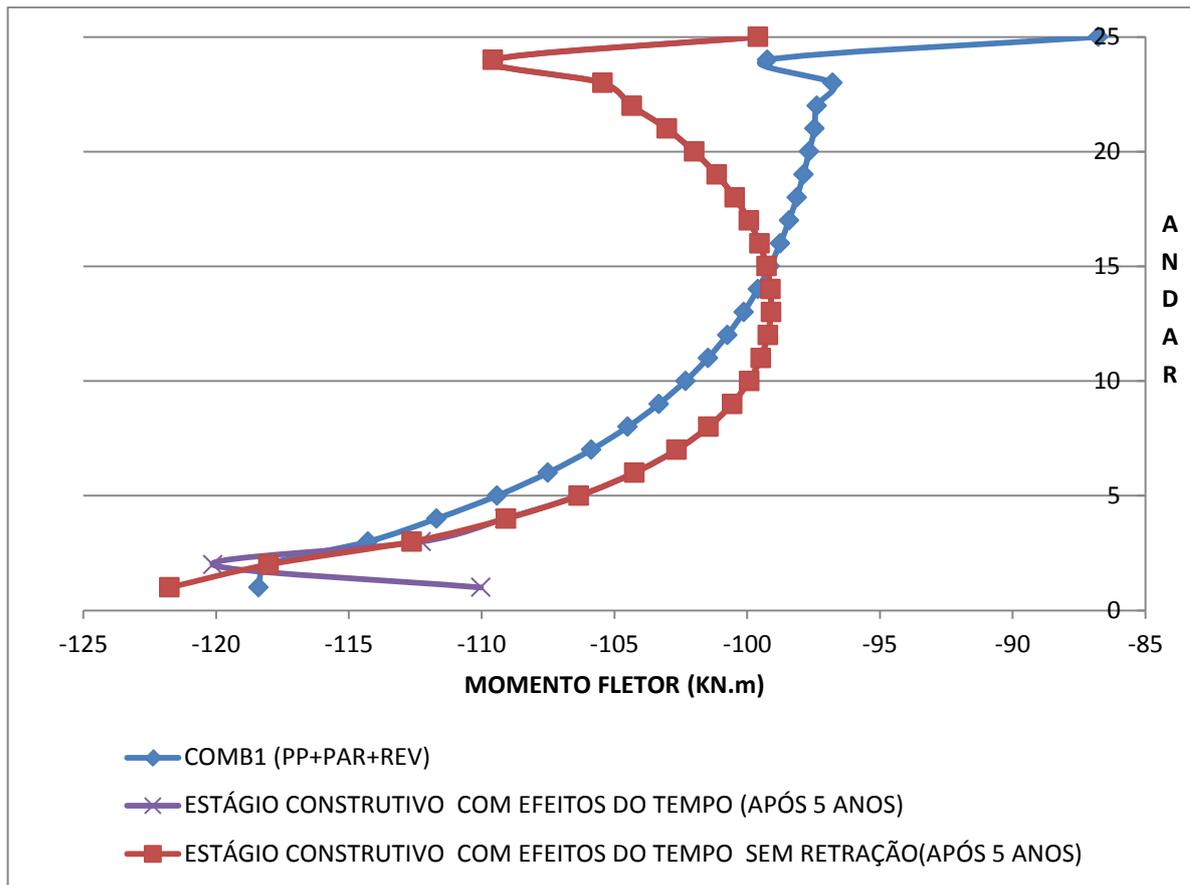


Gráfico 32 - Momento fletor na seção 4,40m na viga V10b ao longo dos andares



**Gráfico 33 - Momento fletor na seção 8,50m na viga V10b ao longo dos andares**

Através dos gráficos exibidos acima é possível identificar uma diferença entre os esforços obtidos na análise linear, e os obtidos nas análises não lineares. Isto é, há uma redistribuição dos esforços ao longo dos andares quando considerado o processo construtivo com os efeitos do tempo.

Na seção 0,30m desta viga, os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, aumentam uma média de 1,74%, no 1º e 2º andares, quando comparados à análise linear. Do 3º ao 15º andar os momentos diminuem uma média de 1,42%, e do 16º ao 25º andar os momentos da análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, voltam a aumentar novamente em relação à análise linear, em uma média de 13%.

Na seção 4,40m desta viga, os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, são em todos os andares maiores que os momentos gerados pela análise linear. Essa diferença dos momentos entre as análise é de 5,50%.

Por fim, na seção 8,50m da viga, os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, aumentam uma média de 1,42%, no 1º e 2º andares, quando comparados à análise linear. Do 3º ao 14º andar os momentos diminuem uma média de 2,18%, e do 15º ao 25º andar os momentos da análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, voltam a aumentar novamente em relação à análise linear, em uma média de 5,42%.

O comportamento do perfil de distribuição dos momentos fletores ao longo da estrutura é semelhante nas seções das extremidades da viga.

A viga V11b (Figura 20) tem comprimento de 4,40m e as seções analisadas foram 0,30m; 2,44m e 4,10m, conforme Gráfico 34, Gráfico 35 e Gráfico 36. As tabelas cujos valores geraram os gráficos estão presentes no Apêndice B.



**Figura 20 - Seções da viga V11b**

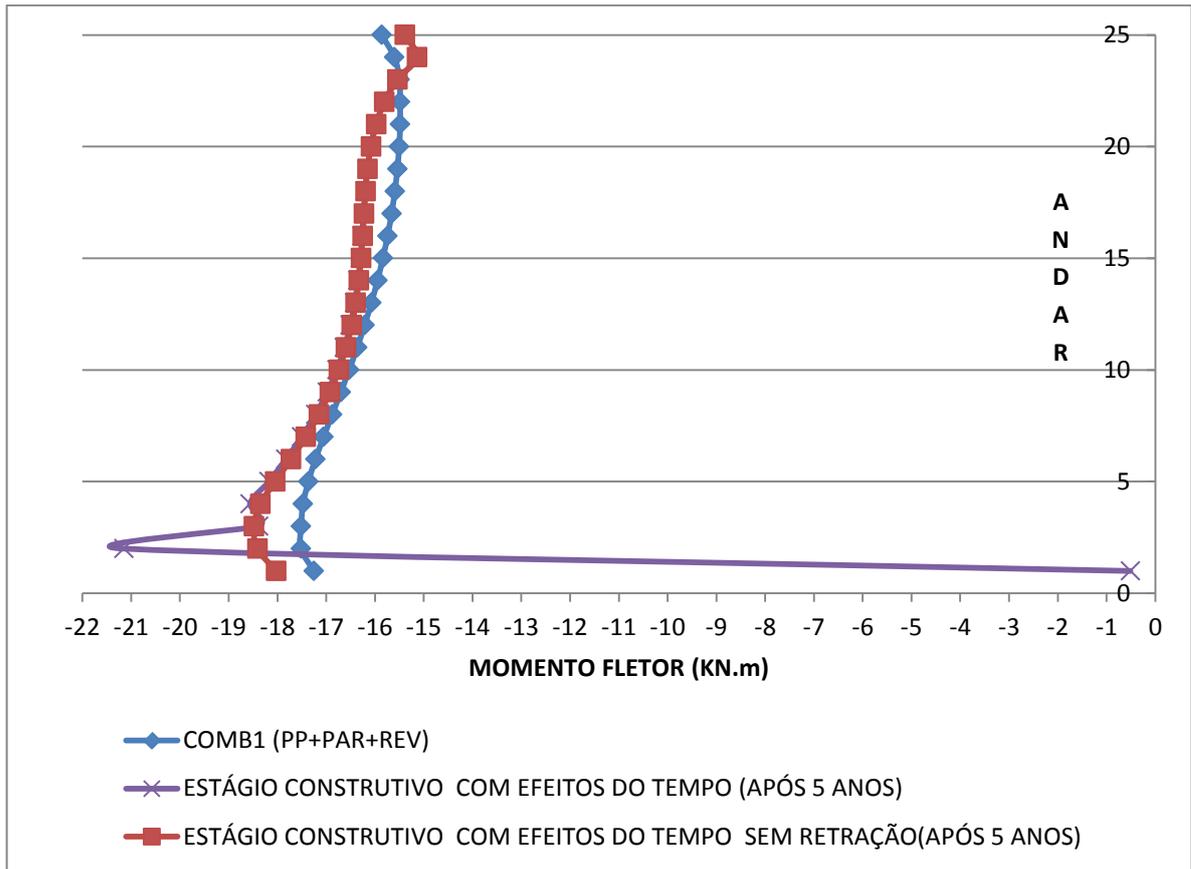


Gráfico 34 - Momento fletor na seção 0,30m na viga V11b ao longo dos andares

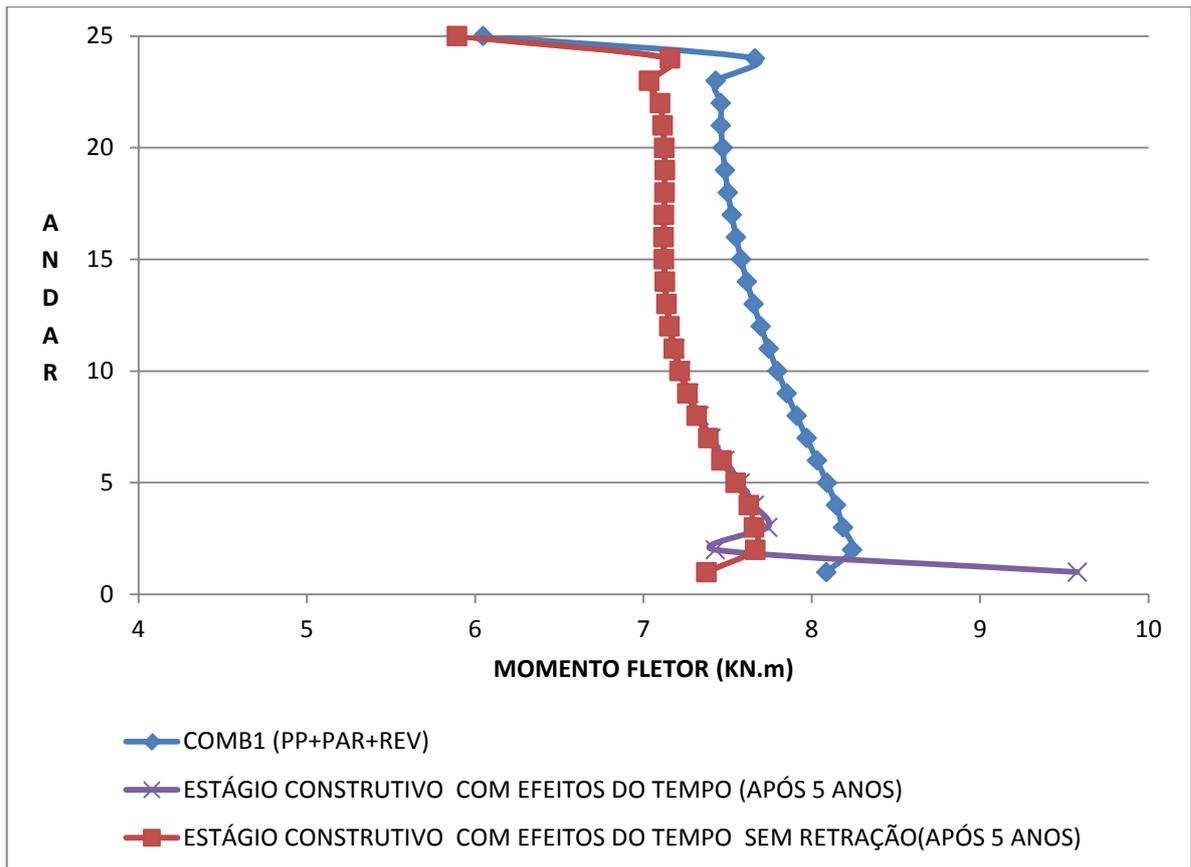
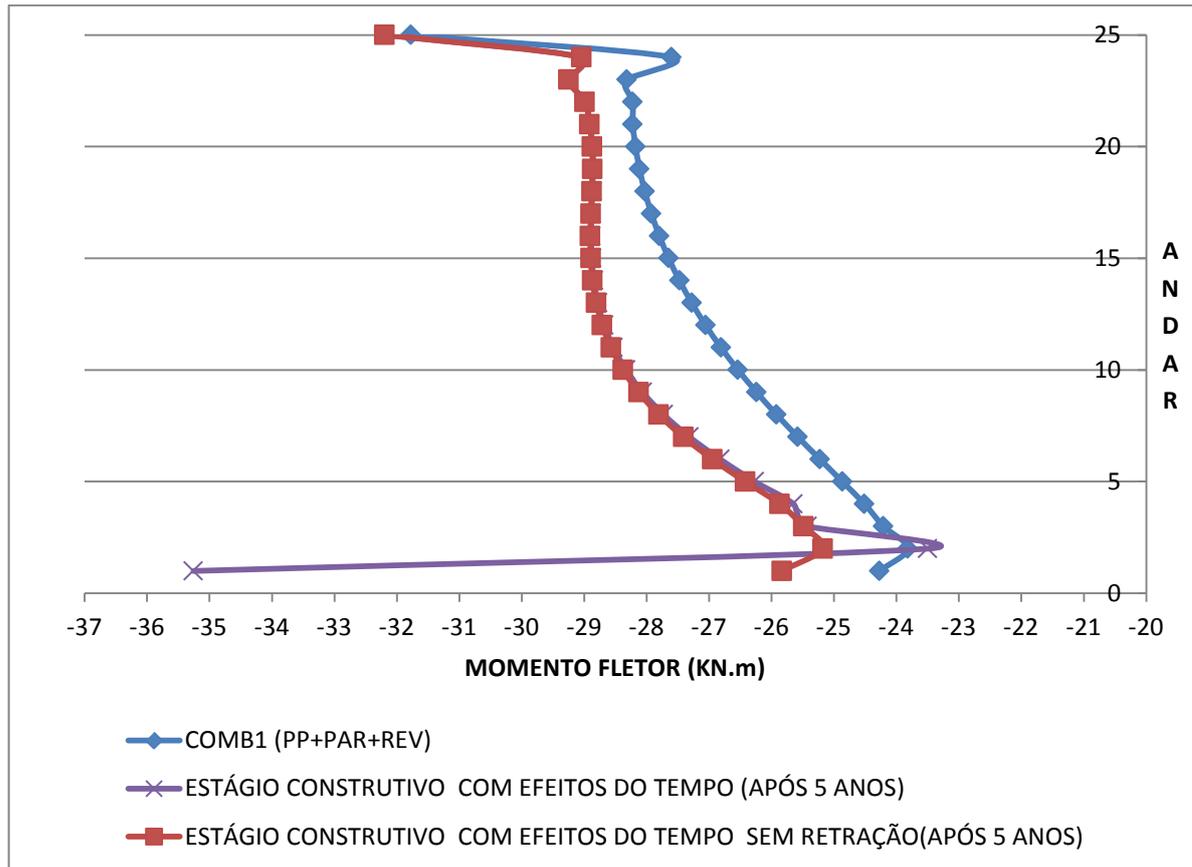


Gráfico 35 - Momento fletor na seção 2,44m na viga V11b ao longo dos andares



**Gráfico 36 - Momento fletor na seção 4,10m na viga V11b ao longo dos andares**

Na seção 0,30m desta viga, os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, são maiores que os momentos gerados pela análise linear em média 2,93% do 1º ao 23º andares. Já nos andares 24 e 25 os momentos fletores na análise dos estágios construtivos são menores que os momentos da análise linear nestes mesmos andares, em média 3,08%.

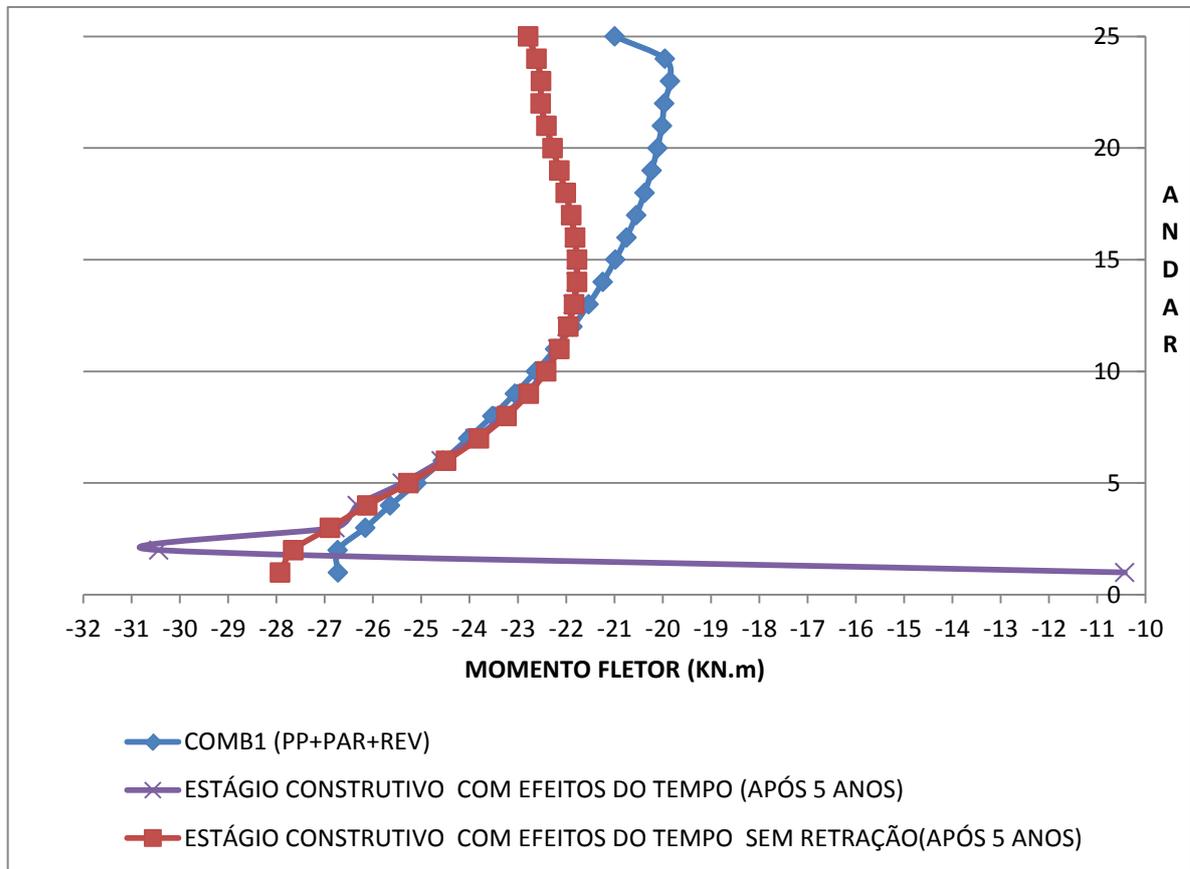
Na seção 2,44m desta viga, em todos os andares os momentos fletores na análise linear são maiores que os momentos da análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, em média 6,64%.

Por fim, na seção 4,10m da viga, em todos os andares os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, são maiores que os momentos da análise linear, em média 4,93%.

A viga V11c (Figura 21) tem comprimento de 4,40m e as seções analisadas foram 0,30m; 2,0m e 4,10m, conforme Gráfico 37, Gráfico 38 e Gráfico 39. As tabelas cujos valores geraram os gráficos estão presentes no Apêndice B.



**Figura 21 - Seções da viga V11c**



**Gráfico 37 – Momentos na seção 0,30m da viga V11c ao longo dos andares**

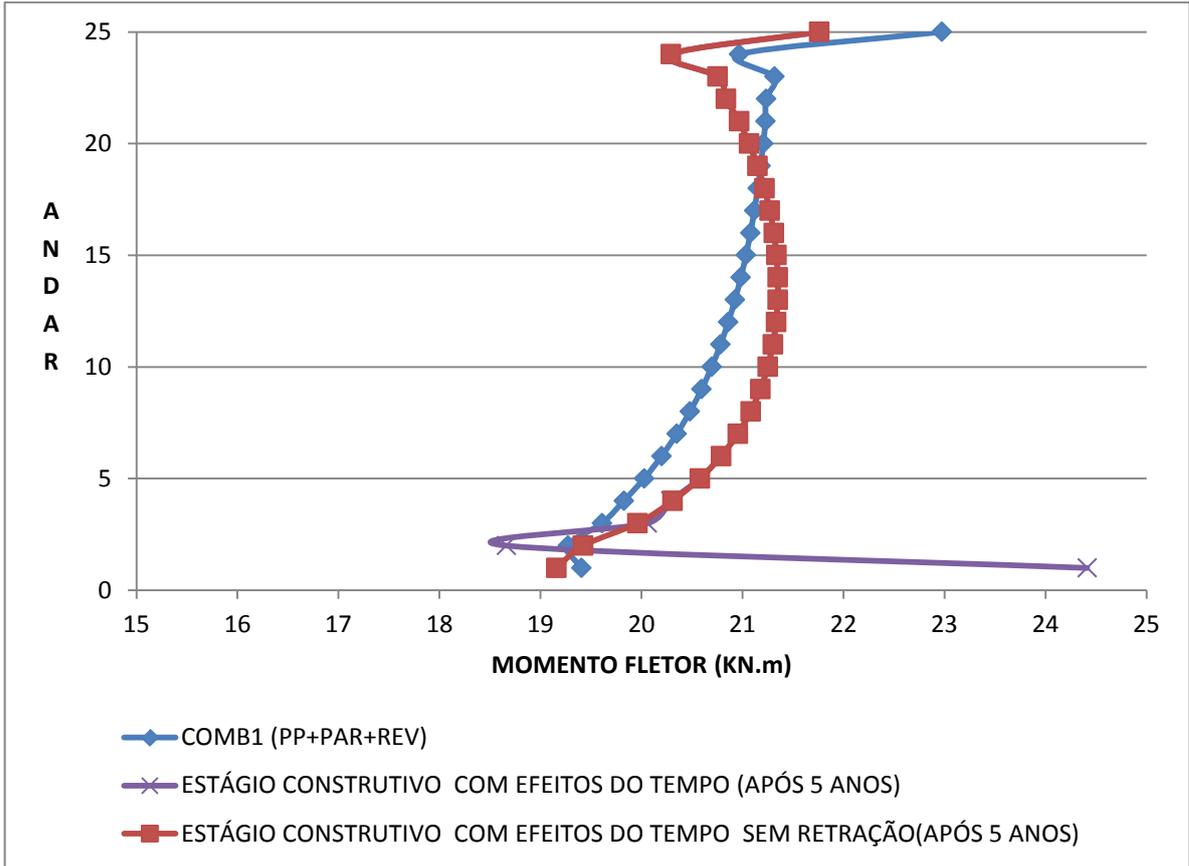


Gráfico 38 - Momentos na seção 2,00m da viga V11c ao longo dos andares

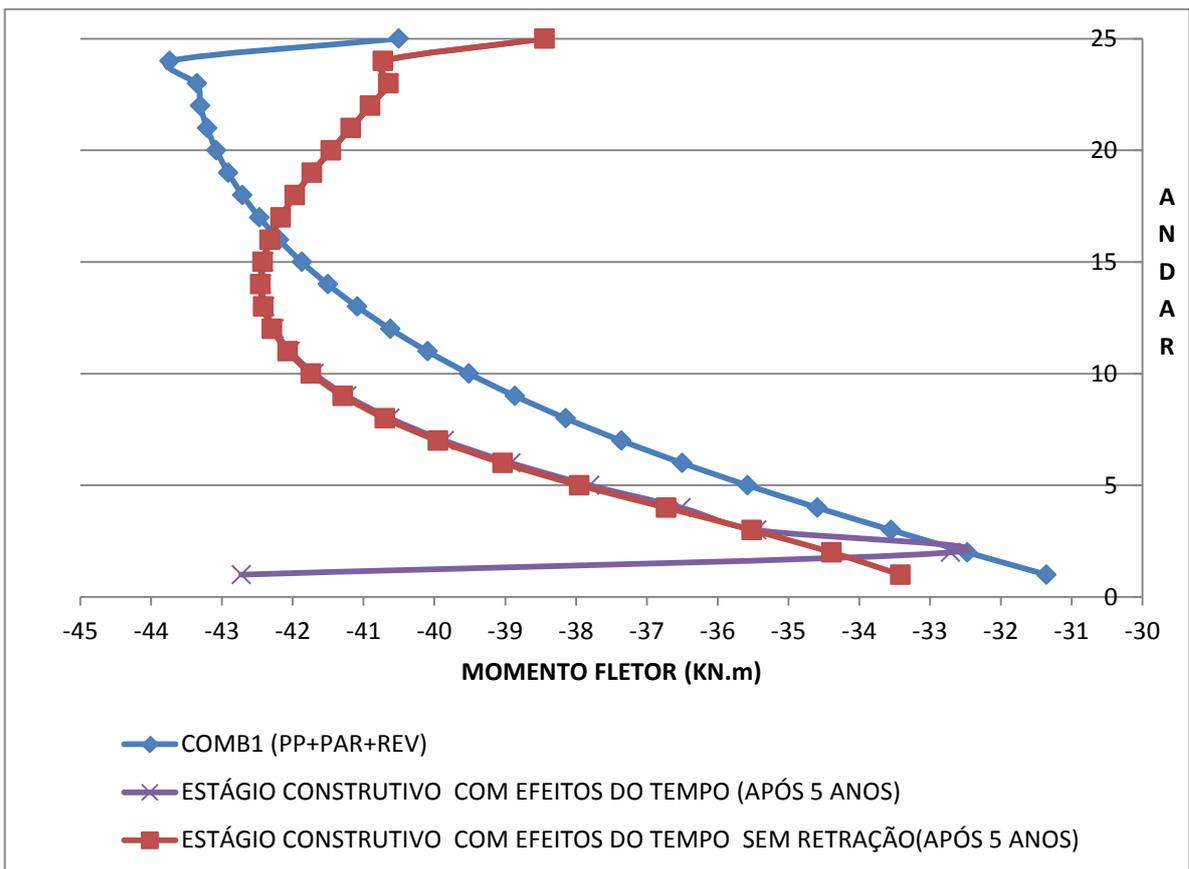


Gráfico 39 - Momentos na seção 4,10m da viga V11c ao longo dos andares

Igualmente às duas vigas analisadas anteriormente, através dos gráficos das seções da viga V11c é possível identificar uma diferença entre os esforços obtidos na análise linear, e os obtidos nas análises não lineares. Comprovando que existe uma redistribuição dos esforços ao longo dos andares quando considerado o processo construtivo com os efeitos do tempo.

Na seção 0,30m desta viga, os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, são maiores que os momentos na análise linear uma média de 2,65%, do 1º ao 5º andar. Do 6º ao 11º andar os maiores momentos são resultantes da análise linear. E novamente do 12º ao 25º andar os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, são maiores que os momentos na análise linear uma média de 7,72%.

Na seção 2,00m desta viga, os momentos fletores na análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, são maiores que os momentos na análise linear uma média de 2,01%, até o 18º andar. Do 19º ao 25º andar os maiores momentos são resultantes da análise linear. A diferença percentual entre os momentos obtidos pela análise linear e os momentos obtidos pela análise com estágios construtivos com efeitos do tempo, sem a retração, nesses andares é de 2,22%.

□ Por fim, na seção 4,10m da viga, os momentos fletores, do 1º e 16º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores que os esforços na análise linear, em média 5%. Então do 17º ao 25º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores que os esforços na análise linear, em média 5%.

## 4.6 Esforços cortantes nas vigas

A seguir serão apresentados para as mesmas vigas V10b, V11b e V11c o esforço cortante em três seções ao longo delas e ao longo da estrutura para as análises:

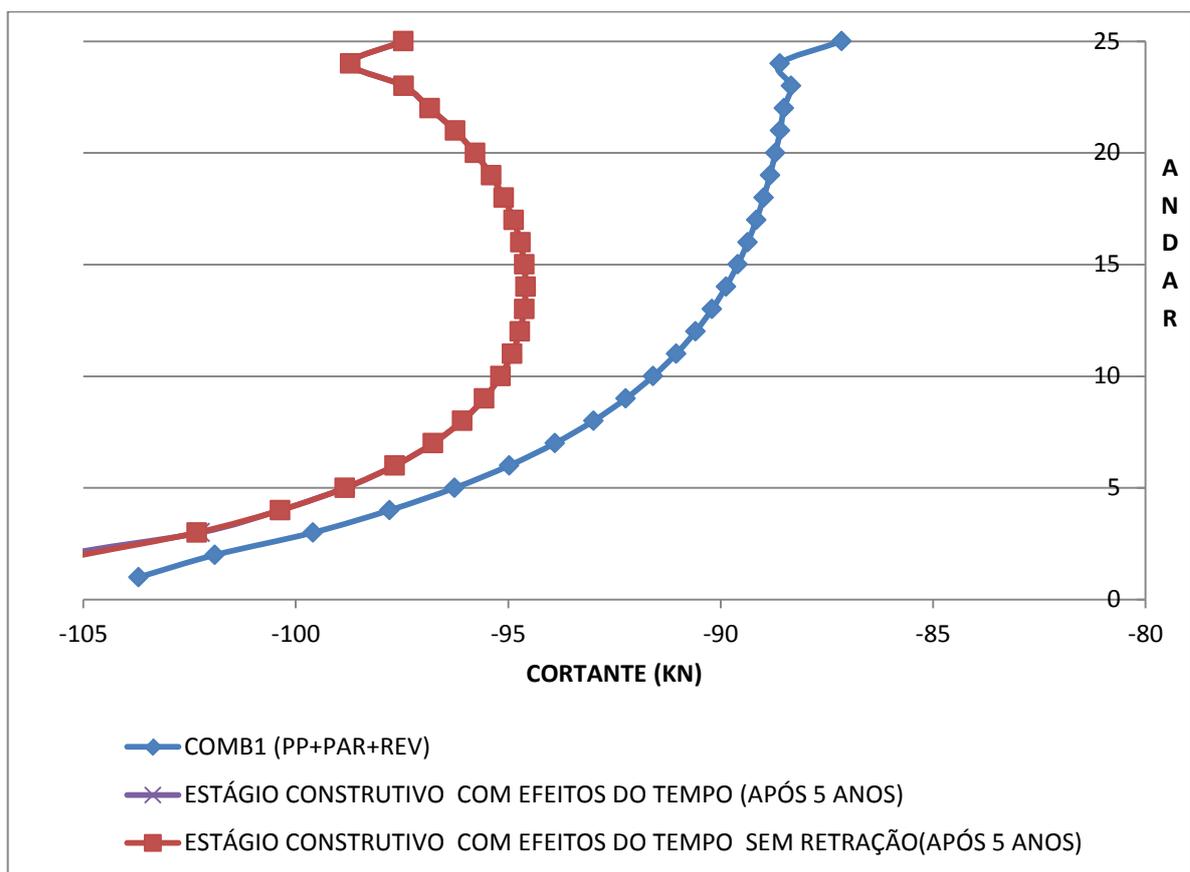
□ Linear (COMB1);

□ Não linear – estágios construtivos com efeitos do tempo combinados (envelhecimento do concreto, fluência e retração) após 5 anos;

□ Não linear – estágios construtivos com efeitos do tempo sem a retração após 5 anos.

Os esforços cortantes de maior inércia dos elementos horizontais no SAP ficam na direção V2.

Os esforços cortantes ao longo dos andares nas vigas V10b, V11b e V11c nas três seções analisadas de cada pilar são apresentados a seguir no Gráfico 40, Gráfico 41, Gráfico 42, Gráfico 43, Gráfico 44, Gráfico 45, Gráfico 46, Gráfico 47 e Gráfico 48.



**Gráfico 40 - Esforço cortante na seção 0,30m da viga V10b ao longo dos andares**

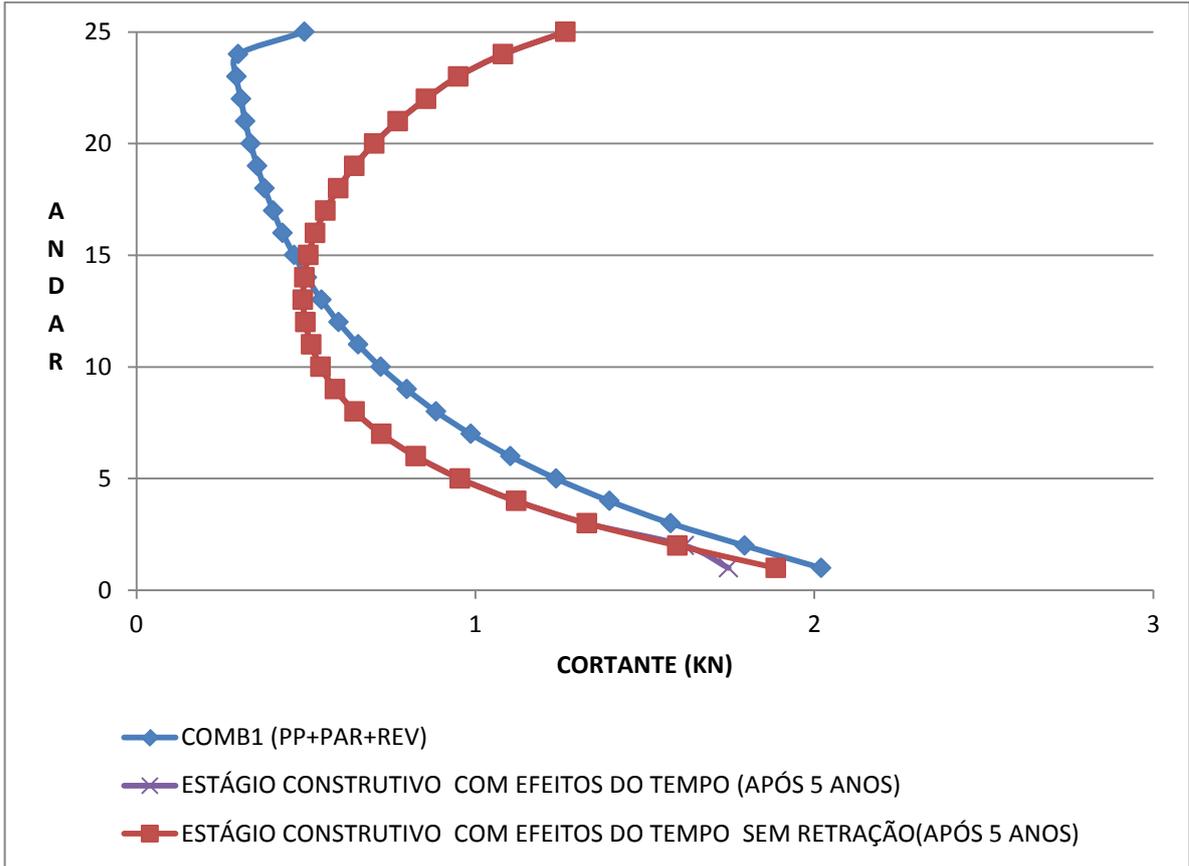


Gráfico 41 - Esforço cortante na seção 4,40m da viga V10b ao longo dos andares

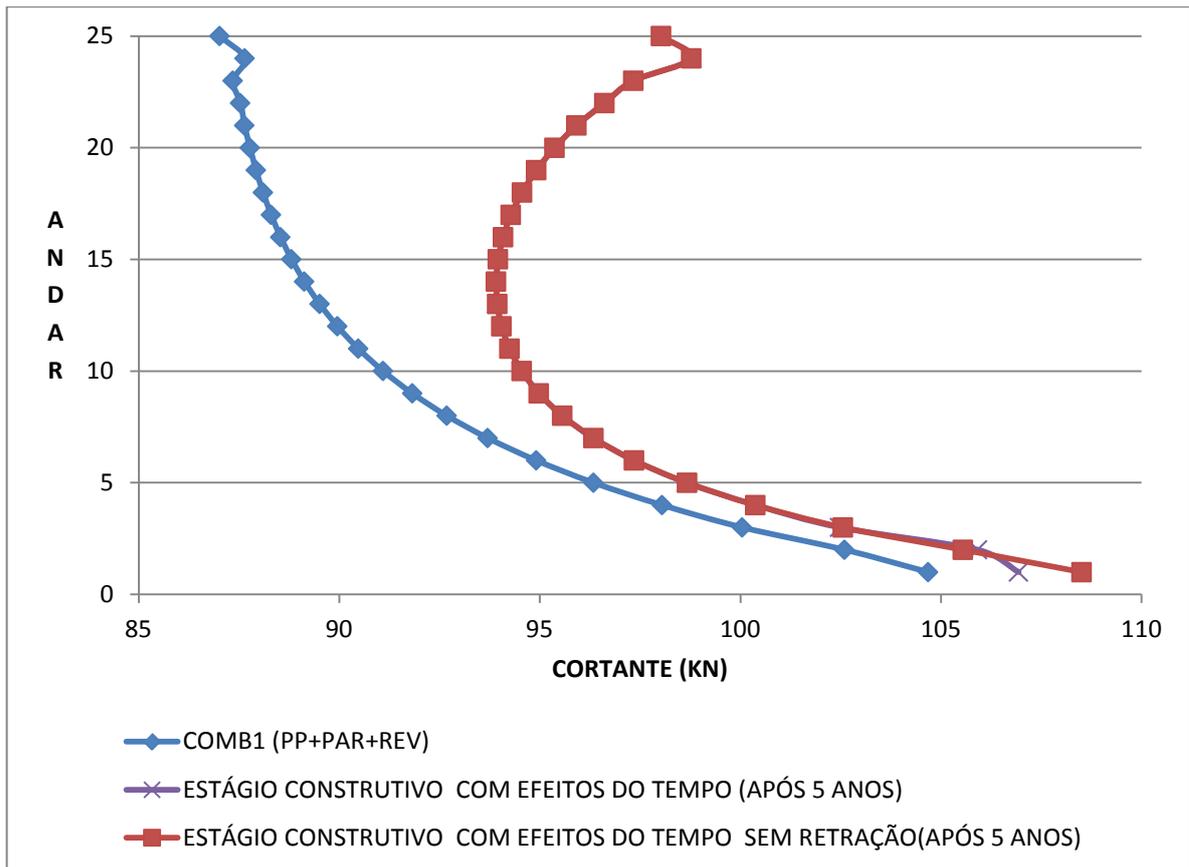


Gráfico 42 - Esforço cortante na seção 8,50m da viga V10b ao longo dos andares

O esforço cortante da seção 0,30m da viga V10b apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, em todos os andares da edificação, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 5,70%, que os esforços na análise linear;

O esforço cortante da seção 4,40m da viga V10b apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, do 1° ao 14° andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores em média 23,44%, que os esforços na análise linear;
- Os esforços cortantes, do 15° ao 25° andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 115%, que os esforços na análise linear;

O esforço cortante da seção 8,50m da viga V10b apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, em todos os andares da edificação, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 5,92%, que os esforços na análise linear;

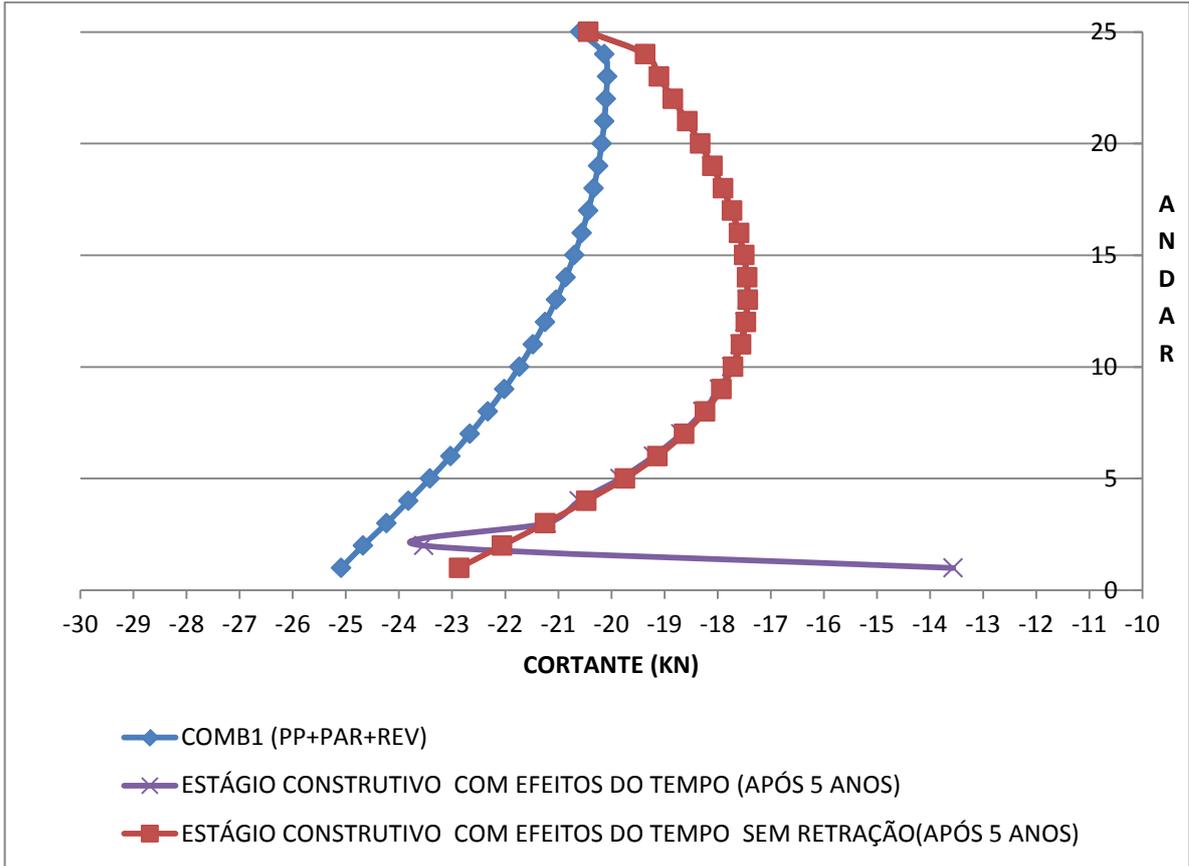


Gráfico 43 - Esforço cortante na seção 0,30m da viga V11b ao longo dos andares

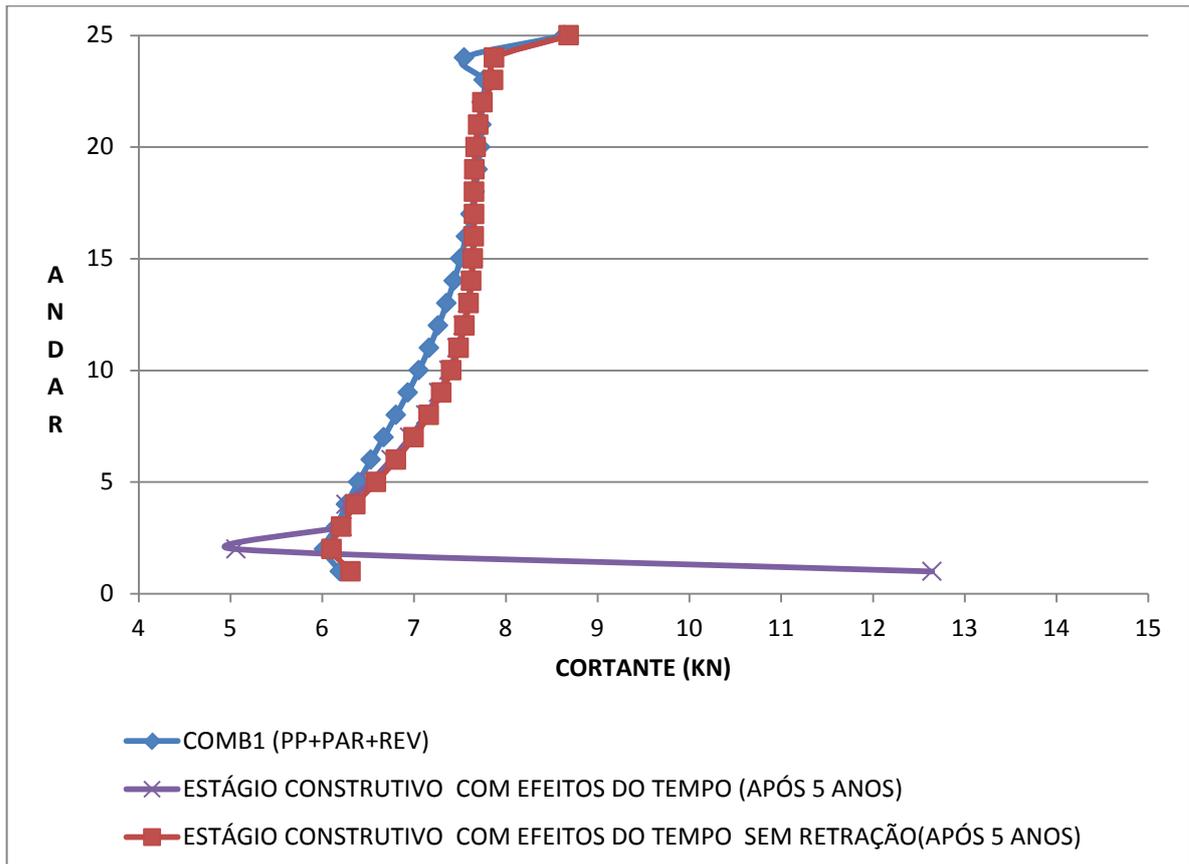
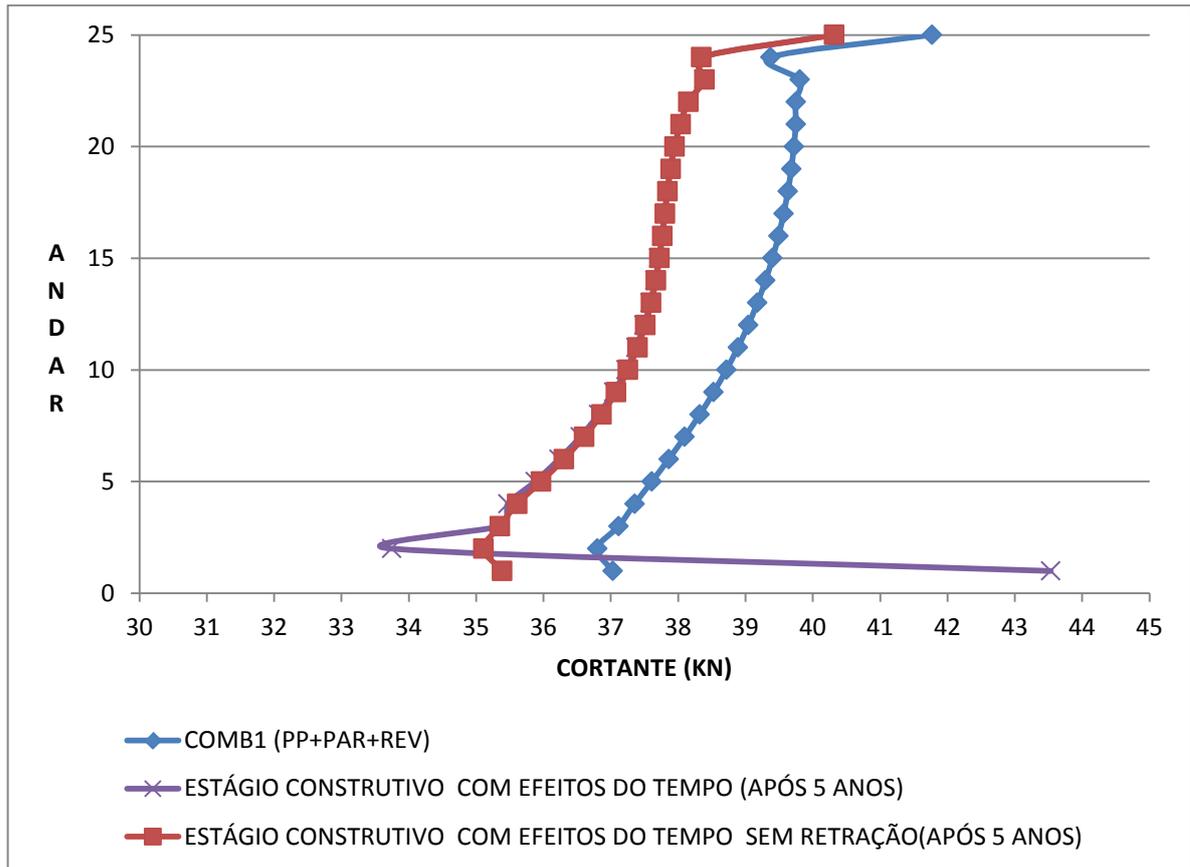


Gráfico 44 - Esforço cortante na seção 2,44m da viga V11b ao longo dos andares



**Gráfico 45 - Esforço cortante na seção 4,10m da viga V11b ao longo dos andares**

O esforço cortante da seção 0,30m da viga V11b apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, em todos os andares da edificação, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores em média 15%, que os esforços na análise linear;

O esforço cortante da seção 2,44m da viga V11b apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, do 1º ao 17º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 3%, que os esforços na análise linear;
- Os esforços cortantes, do 18º ao 21º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores em média 0,40%, que os esforços na análise linear;
- Os esforços cortantes, do 22º ao 25º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 1,57%, que os esforços na análise linear;

O esforço cortante da seção 4,10m da viga V11b apresenta o seguinte aspecto:

□ Os esforços cortantes, de todos os andares, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores em média 4,28%, que os esforços na análise linear.

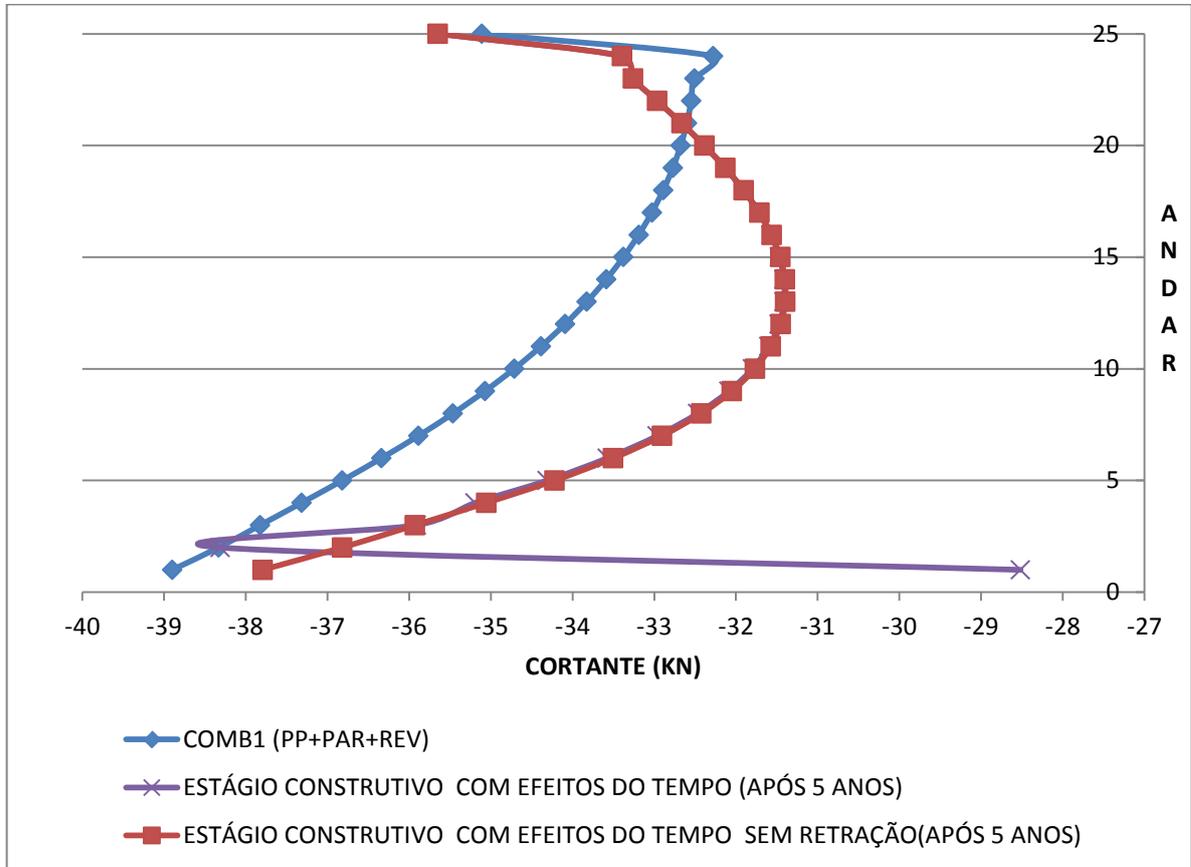


Gráfico 46 - Esforço cortante na seção 0,30m da viga V11c ao longo dos andares

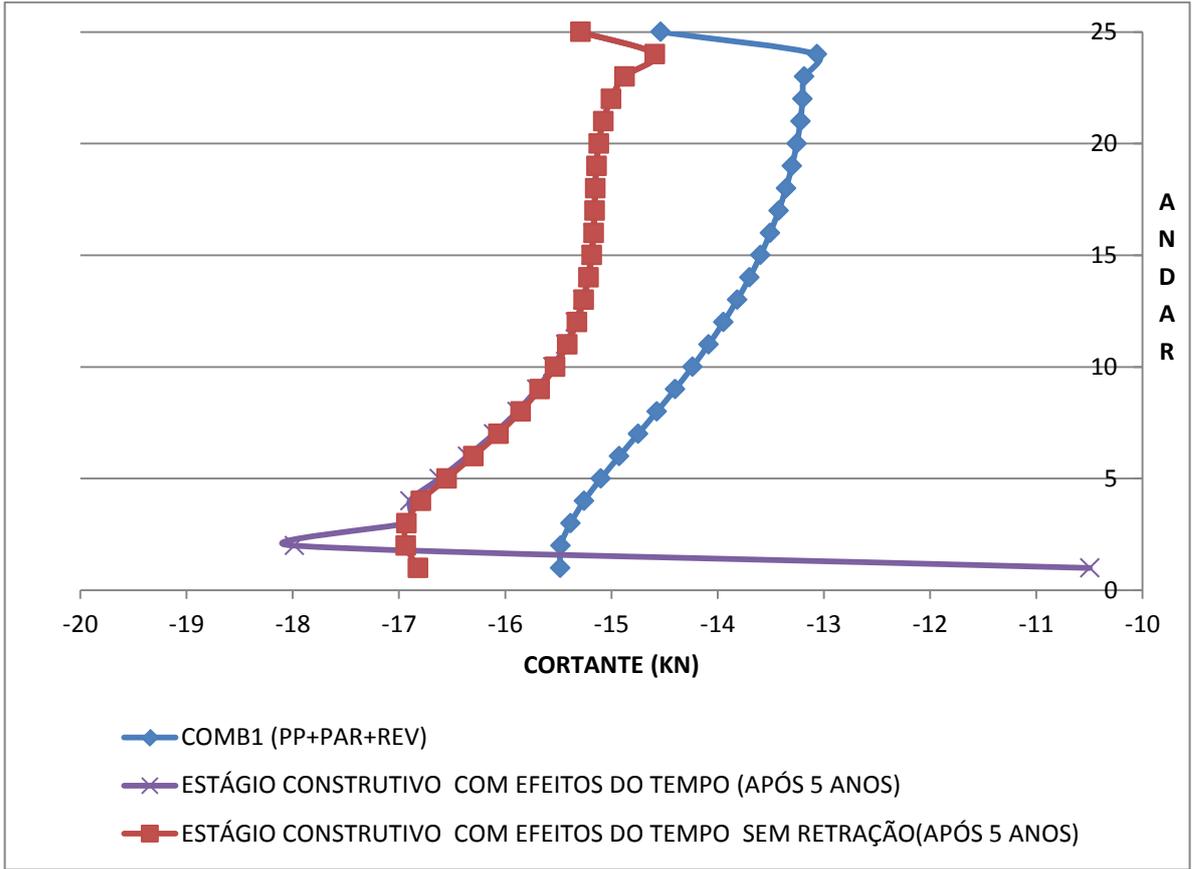


Gráfico 47 - Esforço cortante na seção 2,00m da viga V11c ao longo dos andares

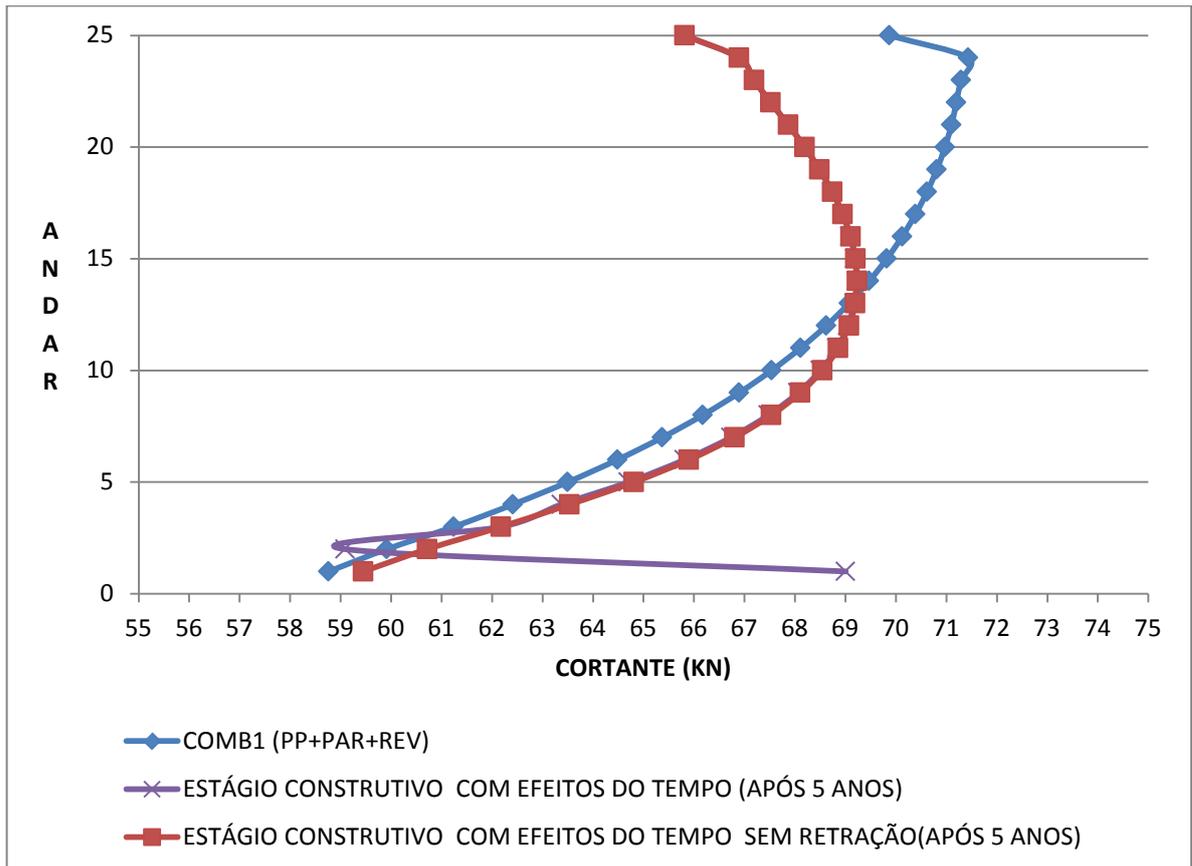


Gráfico 48 - Esforço cortante na seção 4,10m da viga V11c ao longo dos andares

O esforço cortante da seção 0,30m da viga V11c apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, do 1º ao 20º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores em média 6,27%, que os esforços na análise linear;
- Os esforços cortantes, do 21º ao 25º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 1,75%, que os esforços na análise linear;

O esforço cortante da seção 2,00m da viga V11c apresentam os seguintes aspectos:

- Os esforços cortantes, de todos os andares, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 10,77%, que os esforços na análise linear.

O esforço cortante da seção 4,10m da viga V11c apresenta o seguinte aspecto:

- Os esforços cortantes, do 1º ao 13º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são maiores em média 1,50%, que os esforços na análise linear;
- Os esforços cortantes, do 14º ao 25º andar, na análise dos efeitos construtivos com o tempo, sem retração, são menores em média 3,69%, que os esforços na análise linear;

## 4.7 Reações nos apoios

Por fim, foram verificadas também as reações nos apoios para as diversas análises: linear (COMB1), não linear com efeitos do tempo após 1, 5, 10 e 50 anos e não linear com efeitos do tempo exceto a retração após 5 anos. Na Tabela 10 é possível contemplar que apesar do somatório de todas as reações nos apoios da edificação ser iguais ou muito próximos, as reações individuais em cada apoio de pilar variam para cada tipo de análise estudada. Os momentos e forças são redistribuídos à medida que são adicionados os efeitos construtivos e com o passar dos anos.

**Tabela 10 - Reações nos apoios para diversas análises**

P1	3853,021	3796,286	3804,218	3810,82	3806,2988	3808,0985
P2	4388,018	4498,511	4478,519	4473,762	4472,5728	4466,381
P3	3744,831	3699,116	3706,082	3710,768	3707,9489	3709,6605
P4	3744,831	3699,116	3706,082	3710,768	3707,9489	3709,6605
P5	4388,018	4498,511	4478,519	4473,762	4472,5728	4466,381
P6	3853,021	3796,286	3804,218	3810,82	3806,2988	3808,0985
P7	3659,605	3643,498	3653,671	3640,691	3657,662	3663,0081
P8	3659,605	3643,498	3653,671	3640,691	3657,662	3663,0081
P9	3805,16	3756,824	3762,908	3769,529	3764,4342	3765,6323
P10	4337,37	4456,57	4434,569	4429,78	4427,996	4421,1164
P11	3591,96	3529,111	3539,944	3544,619	3542,9954	3546,0034
P12	3591,96	3529,111	3539,944	3544,619	3542,9954	3546,0034
P13	4337,37	4456,57	4434,569	4429,78	4427,996	4421,1164
P14	3805,16	3756,824	3762,908	3769,529	3764,4342	3765,6323
<b>TOTAL</b>	<b>54759,93</b>	<b>54759,832</b>	<b>54759,822</b>	<b>54759,938</b>	<b>54759,816</b>	<b>54759,8</b>
	Análise linear (COMB1)	1 ano	5 anos	5 anos Sem retração	10 anos	50 anos
KN						

## Capitulo 05

# 5 Conclusões e recomendações para outros trabalhos

### 5.1 Conclusões

Resultados obtidos a partir das análises entre o processo construtivo e a situação usual de projeto, conclui-se que o processo construtivo representa de maneira mais adequada o comportamento da estrutura ao longo do tempo.

A consideração que uma estrutura é construída gradativamente, ou seja, a consideração do processo construtivo constitui-se em uma maior aproximação da realidade.

Todas as hipóteses verificadas ao longo do trabalho expuseram que a consideração dos efeitos construtivos, ponderando também os efeitos do tempo apresenta um maior deslocamento vertical da estrutura, e conseqüente redistribuição ao longo dos andares dos momentos fletores, esforços cortantes e normais, visto que o deslocamento influencia diretamente nos esforços.

Os resultados deste trabalho evidenciam que ao levar em consideração as cargas do peso próprio, das paredes, de revestimento e de trabalhadores são incrementadas sobre a estrutura durante o desenvolvimento da construção, têm-se valores de esforços e deslocamentos diferentes dos resultados obtidos quando considerado as mesmas ações aplicadas de uma só vez na estrutura inteira com todos os pavimentos.

Estes resultados, para o estudo de caso em questão, apresentaram valores percentuais de diferença entre as análises linear e não linear com efeitos do tempo consideráveis. Chegando ao máximo, para os elementos analisados, para o caso onde os valores da análise com estágios construtivos são maiores que a análise linear, em torno de 141% para os

deslocamentos verticais, 22% para os momentos fletores nos pilares, 20% para os esforços cortantes nos pilares, 14% para os momentos fletores nas vigas e 155% para os esforços cortantes nas vigas.

Obviamente tais resultados não podem ser considerados válidos para qualquer tipo de caso, pois vários fatores e características da estrutura influenciam nesses resultados, como a geometria da edificação, resistência do concreto, ciclo de concretagem, cura, dentre outros.

No entanto o trabalho estabelece uma visão geral de uma estrutura com características facilmente encontradas em outras edificações reais, e adverte os profissionais de cálculo quanto ao modo de análise das estruturas.

O trabalho tem intenção de se aproximar ao máximo da realidade que ocorrem em obras deste tipo, e sabe-se que em muitos casos, as estruturas são carregadas prematuramente, logo é de suma importância considerar que esses carregamentos prematuros provocam grandes deslocamentos, podendo ser ainda maiores que os deslocamentos exemplificados neste trabalho.

Destarte deixa registrada a importância da realização de modelagens numéricas computacionais, considerando o processo construtivo de edificações de múltiplos andares de concreto, levando-se em consideração também os efeitos da deformação lenta, fluência e retração do concreto.

## **5.2 Recomendações para trabalhos futuros**

A seguir recomendação de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir da pesquisa realizada.

- Cálculo das armaduras nas peças estruturais, que irá combater os efeitos da retração.
  
- Ponderação do efeito engaste dos pilares com a fundação para obtenção resultados mais próximos da realidade, em relação aos momentos obtidos nos primeiros andares da edificação.

Considerar a deformabilidade dos apoios da fundação.

Considerar pilares com diferentes momentos de inércia.

## Referências

A VAFAI, M. GHABDIAN, H. E. ESTEKANCHI AND C. S. DESAI. Calculation of creep and shrinkage in tall concrete buildings using nonlinear staged construction analysis. Asian Journal of Civil Engineering (Building and housing) vol. 10, n° 4 (2009). Pages 409-426.

ACI 318M/2011. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.

ACI COMMITTEE 347. Guide to Formwork for Concrete, ACI 347-14. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

AMARAL, J. C. D. Tensões originadas pela retração em elementos de concreto com deformação restringida considerando-se o efeito da fluência, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, 2011.

ARAÚJO, JOSÉ MILTON DE. Curso de Concreto Armado / José Milton de Araújo. Rio Grande: Dunas, 2010, v.1, 3.ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931 - Execução de Estruturas de Concreto – Procedimentos: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15696/2009: Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120/2000: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASTM C125-15a, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org).

BARROS, M. M. S. B; MELHADO, S. B. Recomendações para a produção de estruturas de concreto armado em edifícios. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de construção civil. 2006.

CHOI, C.K; KIM, E. (1985). Multistory frames under sequential gravity loads. *Journal of Structural Engineering* – ASCE, v.111, N° 11, Nov., pp. 2373-2384.

CONCRETE MANUAL. 8 ed. U.S. Bureau of Reclamation, 1981.

CONCRETO, Microestrutura, Propriedades e Materiais. P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. N. P. Hasparyk. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

CORRÊA, M.R.S. (1991). Aperfeiçoamento de modelagens usualmente empregadas no projeto de sistemas estruturais de edifícios. São Carlos (SP). Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CORRÊA, M.R.S; Ramalho, M.A. (1993). Considerações sobre a evolução dos esforços solicitantes nas estruturas de concreto armado. Seminário de dosagem e controle dos concretos estruturais. ENCOL S/A, Jul-Set, pp 22-50.

EUROCODE — Basis of structural design. EN 1990:2002

EUROCODE 1 - Actions on structures Part 1-6: General actions. Actions during execution. EN 1991-1-6/2005.

EUROCODE 2 - Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1/2004.

FANG DONGPING, GENG CHUANDONG, ZHU HONGYI. Floor load distribution in reinforced concrete buildings during construction. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(2): 149-156.

FANG DONGPING, XI HAIFENG. WANG XIAOMING, ZHANG CHUANMIN. Influences of Shrinkage, Creep, and temperature on the Load Distributions in Reinforced

Concrete Buildings During Construction. TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY. ISSN 1007-0214 13/16 pp756-764. Volume 14, Number 6, December 2009.

FANG DONGPING, ZHU HONGYI, GENG CHUANDONG, et al. On-site measurement of load distribution in reinforced concrete building during construction. ACI Structural Journal, 2001, 98(2):157-163.

FERREIRA, CARLOS. Understanding Staged construction In Buildings using SAP2000. 2008.

FREITAS, A. A. (2004). Situações críticas no projeto de edifícios de concreto armado submetidos às ações de construção. São Carlos, 2004. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

GRUNDY P, KABAILA A. Constructions loads on slabs with shored formwork in multistory building. ACI Journal, 1963, 60(12): 1729-1738.

KALINTZIS, CASSIANA A. A. Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho. 2000. 146p São Paulo, 2000. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KATAOKA, L.T. (2010). Análise da deformabilidade por fluência e retração e sua utilização na monitoração de pilares de concreto. São Paulo (SP). Tese (Doutorado) – Engenharia de estruturas – Escola Politécnica de São Paulo.

KIRCA, Ö.; TURANLI, L.; ERDOĞAN, T. Effects of retempering on consistency and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing. Cement & Concrete Research 32, 441-445, 2002.

KRIPKA, M.; SORIANO, H.L. (1992). Sistema para análise incremental construtiva de edificações. XIII CILAMCE, Porto Alegre-RS, pp. 381-390.

LIU XILA, CHEN W. F., BROWMAN M. D. Shore-slab interaction in concrete building. Journal of Construction Engineering and Management, 1986, 112(3): 227-244.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. Tradução de Salvador E. Giamrusso, São Paulo: PINI, 2015.

NIELSEN K. Load on reinforced concrete floor slabs and their deformation during construction. Stockholm, Sweden: Swedish Cement and Concrete Research Institute, Royal Institute of Technology, 1952.

PRADO, J. F. M. A. (1999). 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. Estruturas de Edifícios em Concreto Armado submetidas a ações de construção. Cadernos de Engenharia de Estruturas (USP), São Carlos - Brasil, n.19, p. 51-80, 2002.

RAMALHO, M.A. (1990). Sistema para análises de estruturas considerando interação com o meio elástico. São Carlos (SP). Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

RODRIGUES JÚNIOR, S.J. (1996). Ações de construção em lajes de concreto armado. Rio de Janeiro (RJ). Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica – PUC/RJ.

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

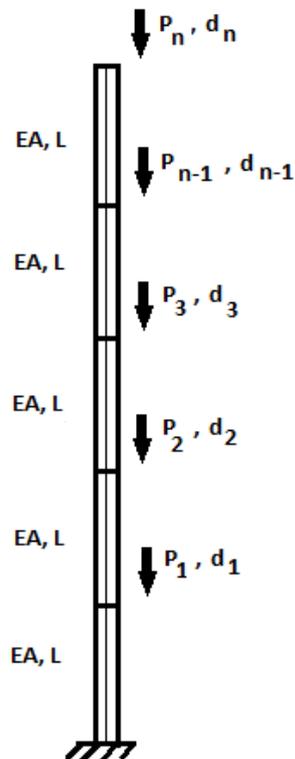
STIVAROS, P. C.; HALVORSEN, G.T. (1990). Shoring/Reshoring operations for multistory buildings. ACI Structural Journal, v. 87, n. 5, p. 589-596, Setembro – Outubro.

TEIXEIRA, R. B.; PELISSER, F. Análise da perda de resistência à compressão do concreto com adição de água para correção da perda de abatimento ao longo do tempo. Revista de Iniciação Científica da UNESC, Vol. 5, No 1, 2007.

ZAPATA M. A., BAZANT Z. P. Creep deflections in slab buildings and forces in shores during construction. ACI Journal, 1986, 83(5): 719-726.

# Apêndice A

## Staged Construction Modeling



### Dados de entrada:

Obs.: Os campos sombreados em amarelo, correspondem as variáveis utilizadas no programa.

$$n_{\text{stage}} := 20$$

$n_{\text{stage}}$  => N° de Pavimentos

$$L := 2.8\text{m}$$

$L$  => Comprimento do lance do pilar

$$P := 500\text{kN}$$

$P$  => Carga do pilar

$$E := \left( 32 \cdot 10^6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$$

$E$  => Módulo de Elasticidade

$$A := 0.16\text{m}^2$$

$A$  => Área

Programa para análise do efeito construtivo:

```

Stage_Const :=
  L0 ← 0
  d0 ← 0
  L1 ← L
  for i ∈ 1..nstage
    Li ← L1 + d0
    sumi ← Li + L0
    di ←  $\frac{(P \cdot \text{sum}_i)}{E \cdot A}$ 
    d0 ← di
    L0 ← Li + L0
  for j ∈ 1..nstage
    vaj,1 ← Lj
    vaj,2 ← dj
    vaj,3 ← sumj
  for l ∈ 1..nstage
    for m ∈ 1..nstage
      dstl,m ←  $\begin{cases} va_{l,2} \cdot \frac{va_{m,3}}{va_{l,3}} & \text{if } m \leq l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 
    dst
  for o ∈ 1..nstage
    sol ← 0
    for p ∈ 1..nstage
      so ← dstp,o
      sol ← sol + so
    td1,o ← sol
    td
  for q ∈ 1..nstage
    vaq,3 ← td1,q
  va

```

**Resultados :****Coluna 1** - Comprimento do pilar Li após o estágio de construção i ser acrescentado(L).**Coluna 2** - Deslocamento na vertical do pilar ( ' d ' ).**Coluna 3** - Deslocamento máximo do estágio de construção (D\_Max-Stag-Const).

	1	2	3
1	2.8	0.0002734375	0.00546875
2	2.8002734375	0.00054690170288086	0.01039113235473633
3	2.8005469017028806	0.00082039261125028	0.01476706700250506
4	2.80082039261125	0.00109391022771622	0.01859647387117581
5	2.801093910227716	0.0013674545548869	0.02187927287819038
6	2.8013674545548866	0.00164102559537077	0.02461538393056162
7	2.8016410255953708	0.00191462335177657	0.02680472692487202
8	2.8019146233517764	0.00218824782671327	0.0284472217472725
9	2.802188247826713	0.0024618990227901	0.02954278827348116
Stage_Const - 10	2.80246189902279	0.00273557694261654	0.03009134636878195
11	2.8027355769426165	0.00300928158880234	0.03009281588802343
12	2.8030092815888024	0.0032830129639575	0.0295471166756175
13	2.8032830129639574	0.00355677107069226	0.02845416856553809
14	2.803556771070692	0.00383055591161713	0.02681389138131994
15	2.803830555911617	0.00410436748934288	0.02462620493605727
16	2.8041043674893427	0.00437820580648051	0.02189102903240255
17	2.80437820580648	0.0046520708656413	0.01860828346256519
18	2.8046520708656413	0.00492596266943677	0.01477788800831031
19	2.8049259626694365	0.00519988122047871	0.01039976244095742
20	2.8051998812204784	0.00547382652137915	0.00547382652137915

## Apêndice B

□ Tabela de deslocamentos verticais (mm) nos topos do pilar P2 ao longo dos andares (Gráfico 21)

Andar	Análise linear COMB1 (PP +PAR+REV)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 1 ano)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 5 anos)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 10 anos)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 50 anos)
1	2,369	4,824	5,321	5,495	5,712
2	4,615	9,2	10,172	10,513	10,94
3	6,745	13,195	14,626	15,129	15,759
4	8,763	16,748	18,623	19,283	20,111
5	10,674	19,871	22,175	22,987	24,008
6	12,482	22,622	25,342	26,303	27,513
7	14,188	25,022	28,145	29,25	30,644
8	15,797	27,084	30,598	31,844	33,418
9	17,309	28,821	32,713	34,096	35,847
10	18,727	30,241	34,499	36,016	37,939
11	20,052	31,35	35,964	37,61	39,703
12	21,284	32,155	37,111	38,884	41,142
13	22,426	32,657	37,946	39,842	42,262
14	23,477	32,862	38,47	40,487	43,065
15	24,439	32,77	38,687	40,82	43,554
16	25,312	32,383	38,597	40,844	43,729
17	26,097	31,702	38,202	40,559	43,593
18	26,793	30,728	37,501	39,966	43,145
19	27,402	29,46	36,495	39,064	42,386
20	27,924	27,898	35,183	37,852	41,313
21	28,358	26,04	33,562	36,33	39,926
22	28,706	23,884	31,631	34,493	38,223
23	28,967	21,427	29,387	32,341	36,2
24	29,142	18,666	26,825	29,867	33,853
25	29,231	15,595	23,94	27,068	31,178

□ Tabela de deslocamentos verticais (mm) nos topos do pilar P3 ao longo dos andares (Gráfico 22)

Andar	Análise linear COMB1 (PP +PAR+REV)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 1 ano)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 5 anos)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 10 anos)	Análise não linear (Estágio construtivo com efeitos do tempo combinados - após 50 anos)
1	2,021	3,938	4,385	4,544	4,745
2	3,97	7,61	8,496	8,811	9,209
3	5,845	11,035	12,348	12,816	13,407
4	7,644	14,159	15,889	16,506	17,288
5	9,365	16,976	19,112	19,876	20,844
6	11,009	19,501	22,033	22,939	24,09
7	12,573	21,735	24,653	25,699	27,03
8	14,057	23,681	26,974	28,157	29,664
9	15,461	25,339	28,997	30,313	31,994
10	16,783	26,712	30,725	32,171	34,021
11	18,024	27,802	32,158	33,732	35,749
12	19,184	28,609	33,299	34,997	37,177
13	20,261	29,136	34,148	35,968	38,308
14	21,256	29,385	34,709	36,647	39,144
15	22,169	29,357	34,981	37,034	39,685
16	22,998	29,053	34,968	37,133	39,935
17	23,745	28,477	34,67	36,944	39,893
18	24,409	27,628	34,089	36,469	39,563
19	24,989	26,51	33,226	35,71	38,945
20	25,486	25,124	32,085	34,669	38,042
21	25,9	23,473	30,666	33,347	36,855
22	26,231	21,558	28,971	31,746	35,388
23	26,478	19,382	27,004	29,87	33,641
24	26,641	16,948	24,767	27,721	31,618
25	26,721	14,26	22,262	25,301	29,322

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) no eixo M3-3 na base do pilar P2 ao longo dos andares (Gráfico 23)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-18,7724	26,8557	-23,7684
2	-53,987	-69,9113	-47,2679
3	-46,8997	-35,2176	-39,105
4	-47,1611	-38,6767	-38,0255
5	-46,3777	-36,5919	-36,6933
6	-45,8753	-35,8061	-35,7846
7	-45,4225	-35,0723	-35,0719
8	-45,0414	-34,5267	-34,5236
9	-44,7158	-34,0992	-34,097
10	-44,4379	-33,768	-33,766
11	-44,1999	-33,5132	-33,5115
12	-43,9959	-33,3215	-33,3201
13	-43,8204	-33,1837	-33,1824
14	-43,6692	-33,0934	-33,0923
15	-43,5385	-33,0469	-33,0459
16	-43,4253	-33,0422	-33,0413
17	-43,3271	-33,079	-33,0782
18	-43,2415	-33,1598	-33,1591
19	-43,167	-33,286	-33,2853
20	-43,1007	-33,4598	-33,4592
21	-43,0494	-33,6968	-33,6961
22	-42,9615	-33,9553	-33,9547
23	-43,1425	-34,5326	-34,5321
24	-41,7161	-33,7591	-33,7586
25	-49,9794	-41,4514	-41,4508

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) no eixo M3-3 no topo do pilar P2 ao longo dos andares (Gráfico 24)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	39,4109	10,0258	46,3663
2	49,0703	60,3508	54,0072
3	46,6234	50,6446	51,6913
4	46,235	51,3411	51,1611
5	45,6382	50,5782	50,6024
6	45,1789	50,2144	50,206
7	44,7852	49,9076	49,9054
8	44,4549	49,6889	49,6862
9	44,1765	49,5323	49,5302
10	43,9422	49,4257	49,4239
11	43,7449	49,3589	49,3573
12	43,5789	49,3244	49,323
13	43,4395	49,317	49,3158
14	43,3224	49,3334	49,3323
15	43,2244	49,3715	49,3706
16	43,1426	49,4305	49,4296
17	43,0746	49,5105	49,5097
18	43,0182	49,6144	49,6137
19	42,9727	49,7405	49,7398
20	42,9314	49,8874	49,8867
21	42,9243	50,0887	50,0881
22	42,7602	50,1694	50,1688
23	43,6003	51,1755	51,175
24	38,3806	47,0055	47,005
25	69,2613	73,0056	73,0047

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) no eixo M2-2 na base do pilar P3 ao longo dos andares (Gráfico 25)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-2,8504	-6,5782	-3,292
2	-8,9482	-9,0941	-9,3841
3	-10,1116	-10,8051	-10,7642
4	-11,3732	-12,1467	-12,1355
5	-12,4312	-13,1914	-13,1798
6	-13,3355	-14,0014	-13,9935
7	-14,11	-14,6283	-14,6225
8	-14,7749	-15,1077	-15,1038
9	-15,3472	-15,4691	-15,4665
10	-15,8411	-15,7347	-15,7332
11	-16,2682	-15,9209	-15,9202
12	-16,6382	-16,0397	-16,0396
13	-16,9594	-16,0994	-16,0998
14	-17,2384	-16,1054	-16,1063
15	-17,4809	-16,061	-16,0621
16	-17,6918	-15,9674	-15,9687
17	-17,8749	-15,824	-15,8255
18	-18,0338	-15,629	-15,6306
19	-18,1713	-15,3786	-15,3802
20	-18,2899	-15,0674	-15,0691
21	-18,3916	-14,6884	-14,6901
22	-18,4788	-14,2328	-14,2346
23	-18,5554	-13,6901	-13,6919
24	-18,546	-13,0036	-13,0053
25	-19,8839	-13,0114	-13,0132

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) no eixo M2-2 no topo do pilar P3 ao longo dos andares (Gráfico 26)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	5,7775	9,682	6,5946
2	9,3083	10,3537	10,428
3	10,5666	12,025	12,0021
4	11,751	13,3825	13,3703
5	12,7541	14,4205	14,4102
6	13,6118	15,2267	15,2195
7	14,347	15,8496	15,8444
8	14,9788	16,3254	16,3219
9	15,523	16,6834	16,6812
10	15,993	16,9453	16,9441
11	16,3998	17,1274	17,127
12	16,7524	17,2413	17,2414
13	17,0585	17,2949	17,2955
14	17,3245	17,2934	17,2944
15	17,5558	17,2397	17,2409
16	17,7569	17,1345	17,1359
17	17,9314	16,9771	16,9787
18	18,0827	16,7651	16,7667
19	18,2136	16,4938	16,4955
20	18,3262	16,1575	16,1593
21	18,4227	15,7481	15,7499
22	18,5053	15,256	15,2578
23	18,5817	14,6711	14,6729
24	18,4713	13,8728	13,8746
25	21,484	14,8232	14,8251

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na direção V2 na base do pilar P2 ao longo dos andares (Gráfico 27)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	19,394	-5,61	23,378
2	34,352	43,421	33,758
3	31,174	28,621	30,265
4	31,132	30,006	29,729
5	30,672	29,057	29,099
6	30,351	28,674	28,664
7	30,069	28,327	28,326
8	29,832	28,072	28,07
9	29,631	27,877	27,876
10	29,46	27,731	27,73
11	29,315	27,624	27,623
12	29,192	27,549	27,548
13	29,087	27,5	27,499
14	28,997	27,476	27,475
15	28,921	27,473	27,472
16	28,856	27,491	27,49
17	28,801	27,53	27,529
18	28,753	27,591	27,591
19	28,713	27,676	27,675
20	28,677	27,782	27,782
21	28,658	27,928	27,928
22	28,574	28,042	28,041
23	28,914	28,569	28,569
24	26,699	26,922	26,921
25	39,747	38,152	38,152

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na direção V2 no topo do pilar P2 ao longo dos andares (Gráfico 28)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	19,394	-5,61	23,378
2	34,352	43,421	33,758
3	31,174	28,621	30,265
4	31,132	30,006	29,729
5	30,672	29,057	29,099
6	30,351	28,674	28,664
7	30,069	28,327	28,326
8	29,832	28,072	28,07
9	29,631	27,877	27,876
10	29,46	27,731	27,73
11	29,315	27,624	27,623
12	29,192	27,549	27,548
13	29,087	27,5	27,499
14	28,997	27,476	27,475
15	28,921	27,473	27,472
16	28,856	27,491	27,49
17	28,801	27,53	27,529
18	28,753	27,591	27,591
19	28,713	27,676	27,675
20	28,677	27,782	27,782
21	28,658	27,928	27,928
22	28,574	28,042	28,041
23	28,914	28,569	28,569
24	26,699	26,922	26,921
25	39,747	38,152	38,152

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na direção V3 na base do pilar P3 ao longo dos andares (Gráfico 29)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	2,876	5,42	3,296
2	6,086	6,483	6,604
3	6,893	7,61	7,589
4	7,708	8,51	8,502
5	8,395	9,204	9,197
6	8,982	9,743	9,738
7	9,486	10,159	10,156
8	9,918	10,478	10,475
9	10,29	10,717	10,716
10	10,611	10,893	10,892
11	10,889	11,016	11,016
12	11,13	11,094	11,094
13	11,339	11,131	11,132
14	11,521	11,133	11,134
15	11,679	11,1	11,101
16	11,816	11,034	11,035
17	11,935	10,934	10,935
18	12,039	10,798	10,799
19	12,128	10,624	10,625
20	12,205	10,408	10,409
21	12,271	10,146	10,147
22	12,328	9,83	9,831
23	12,379	9,454	9,455
24	12,339	8,959	8,96
25	13,789	9,278	9,279

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na direção V3 no topo do pilar P3 ao longo dos andares (Gráfico 30)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	2,876	5,42	3,296
2	6,086	6,483	6,604
3	6,893	7,61	7,589
4	7,708	8,51	8,502
5	8,395	9,204	9,197
6	8,982	9,743	9,738
7	9,486	10,159	10,156
8	9,918	10,478	10,475
9	10,29	10,717	10,716
10	10,611	10,893	10,892
11	10,889	11,016	11,016
12	11,13	11,094	11,094
13	11,339	11,131	11,132
14	11,521	11,133	11,134
15	11,679	11,1	11,101
16	11,816	11,034	11,035
17	11,935	10,934	10,935
18	12,039	10,798	10,799
19	12,128	10,624	10,625
20	12,205	10,408	10,409
21	12,271	10,146	10,147
22	12,328	9,83	9,831
23	12,379	9,454	9,455
24	12,339	8,959	8,96
25	13,789	9,278	9,279

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 0,30m da viga V10b ao longo dos andares (Gráfico 31)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-119,0366	-110,9703	-122,6722
2	-119,6905	-122,3116	-120,2074
3	-116,801	-115,5208	-115,8896
4	-114,926	-113,2494	-113,2013
5	-113,2688	-111,1309	-111,1491
6	-111,8955	-109,6027	-109,6077
7	-110,7427	-108,4403	-108,4457
8	-109,7763	-107,5733	-107,5772
9	-108,9652	-106,9332	-106,9362
10	-108,2836	-106,4719	-106,4741
11	-107,7103	-106,1545	-106,1559
12	-107,2274	-105,9562	-105,9572
13	-106,8202	-105,8606	-105,8612
14	-106,4762	-105,8576	-105,8579
15	-106,1852	-105,9422	-105,9423
16	-105,9384	-106,1137	-106,1136
17	-105,7285	-106,3753	-106,375
18	-105,5496	-106,7371	-106,7367
19	-105,3959	-107,2032	-107,2027
20	-105,2656	-107,7935	-107,7929
21	-105,1385	-108,5108	-108,5102
22	-105,1085	-109,471	-109,4704
23	-104,5795	-110,1625	-110,1618
24	-107,0067	-113,6916	-113,6909
25	-92,1805	-102,0494	-102,0488

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 4,40m da viga V10b ao longo dos andares (Gráfico 32)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	78,986	87,0828	78,1626
2	74,71824	73,4737	75,0318
3	73,52749	74,3235	74,0623
4	72,12869	72,78	72,8206
5	71,00721	71,8936	71,8849
6	70,04616	71,1553	71,155
7	69,23203	70,6043	70,6029
8	68,53987	70,1955	70,1944
9	67,95094	69,9029	69,9018
10	67,44917	69,704	69,7029
11	67,02113	69,5817	69,5807
12	66,65554	69,5235	69,5225
13	66,34291	69,5207	69,5198
14	66,07527	69,5677	69,5668
15	65,84591	69,6614	69,6605
16	65,64915	69,8008	69,8
17	65,48022	69,9871	69,9863
18	65,335	70,2255	70,2247
19	65,21034	70,5154	70,5146
20	65,10123	70,8635	70,8627
21	65,01768	71,2896	71,2889
22	64,87994	71,7319	71,7311
23	65,16316	72,6213	72,6206
24	62,93163	71,4987	71,498
25	75,56344	82,6715	82,6707

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 8,50m da viga V10b ao longo dos andares (Gráfico 33)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-118,4018	-110,0254	-121,7606
2	-118,0282	-120,1238	-118,0283
3	-114,28578	-112,2666	-112,6318
4	-111,69829	-109,1334	-109,0838
5	-109,419	-106,3273	-106,344
6	-107,50388	-104,2505	-104,2545
7	-105,87797	-102,657	-102,6615
8	-104,49827	-101,4574	-101,4606
9	-103,32562	-100,5674	-100,5698
10	-102,3277	-99,9261	-99,9278
11	-101,47731	-99,4883	-99,4894
12	-100,75164	-99,2216	-99,2223
13	-100,13153	-99,1038	-99,1041
14	-99,60085	-99,1205	-99,1206
15	-99,14601	-99,2643	-99,2641
16	-98,75554	-99,5331	-99,5328
17	-98,41969	-99,9301	-99,9296
18	-98,13025	-100,4664	-100,4658
19	-97,87967	-101,1479	-101,1472
20	-97,66461	-101,9979	-101,9972
21	-97,463	-103,0228	-103,022
22	-97,3723	-104,3482	-104,3473
23	-96,78792	-105,4545	-105,4537
24	-99,24513	-109,5834	-109,5825
25	-86,77901	-99,5984	-99,5977

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 0,30m da viga V11b ao longo dos andares (Gráfico 34)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-17,2552	-0,5114	-18,0292
2	-17,5215	-21,1447	-18,4113
3	-17,5155	-18,3832	-18,4826
4	-17,4761	-18,564	-18,3531
5	-17,3662	-18,1745	-18,0457
6	-17,2212	-17,8293	-17,7225
7	-17,0547	-17,5024	-17,4185
8	-16,8788	-17,2172	-17,1506
9	-16,7019	-16,9775	-16,9246
10	-16,5298	-16,7819	-16,7398
11	-16,3664	-16,6266	-16,5929
12	-16,2143	-16,5062	-16,4793
13	-16,0751	-16,4154	-16,3938
14	-15,9497	-16,3486	-16,3311
15	-15,8386	-16,3002	-16,286
16	-15,742	-16,2642	-16,2526
17	-15,6601	-16,2339	-16,2244
18	-15,5931	-16,2017	-16,1938
19	-15,5411	-16,1572	-16,1506
20	-15,5051	-16,0886	-16,0829
21	-15,4837	-15,9778	-15,9729
22	-15,4882	-15,8126	-15,8082
23	-15,4951	-15,5464	-15,5425
24	-15,6025	-15,1439	-15,1401
25	-15,863	-15,3873	-15,3846

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 2,44m da viga V11b ao longo dos andares (Gráfico 35)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	8,0858	9,5767	7,3741
2	8,2386	7,4264	7,6642
3	8,1858	7,7385	7,6571
4	8,1444	7,6576	7,6267
5	8,0899	7,5754	7,5468
6	8,0309	7,4853	7,4633
7	7,97	7,4027	7,3851
8	7,9097	7,3307	7,3168
9	7,8513	7,271	7,26
10	7,796	7,2233	7,2145
11	7,7444	7,1866	7,1796
12	7,6969	7,1596	7,154
13	7,6537	7,1411	7,1366
14	7,6148	7,1296	7,126
15	7,5802	7,1238	7,1209
16	7,5499	7,1223	7,1199
17	7,5237	7,1236	7,1216
18	7,5017	7,1261	7,1245
19	7,4838	7,1274	7,126
20	7,4701	7,1251	7,1239
21	7,4599	7,1151	7,1141
22	7,4592	7,0986	7,0977
23	7,4291	7,0345	7,0337
24	7,6619	7,1583	7,1575
25	6,0465	5,8926	5,8917

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 4,10m da viga V11b ao longo dos andares (Gráfico 36)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-24,2719	-35,2559	-25,8347
2	-23,8183	-23,4977	-25,1792
3	-24,2077	-25,4238	-25,4876
4	-24,512	-25,6505	-25,8694
5	-24,8662	-26,2706	-26,4203
6	-25,2246	-26,8242	-26,9457
7	-25,5788	-27,3165	-27,4121
8	-25,9189	-27,7304	-27,8062
9	-26,2393	-28,0667	-28,1269
10	-26,5366	-28,3316	-28,3795
11	-26,8091	-28,5335	-28,5716
12	-27,0559	-28,6811	-28,7116
13	-27,2774	-28,783	-28,8074
14	-27,4741	-28,8468	-28,8665
15	-27,6468	-28,8799	-28,8958
16	-27,7964	-28,8895	-28,9025
17	-27,9238	-28,8832	-28,8939
18	-28,0296	-28,8705	-28,8794
19	-28,1145	-28,8604	-28,8678
20	-28,1777	-28,8659	-28,8723
21	-28,2233	-28,9081	-28,9136
22	-28,225	-28,9856	-28,9904
23	-28,3167	-29,2464	-29,2508
24	-27,5991	-29,0367	-29,0408
25	-31,7766	-32,1923	-32,1959

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 0,30m da viga V11c ao longo dos andares (Gráfico 37)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-26,7243	-10,4275	-27,9263
2	-26,7319	-30,4361	-27,6535
3	-26,1582	-26,7859	-26,893
4	-25,645	-26,3294	-26,1186
5	-25,0956	-25,3907	-25,2631
6	-24,554	-24,5892	-24,4833
7	-24,0288	-23,8871	-23,8041
8	-23,5294	-23,3004	-23,2347
9	-23,061	-22,8251	-22,773
10	-22,6267	-22,453	-22,4117
11	-22,2276	-22,174	-22,141
12	-21,864	-21,9773	-21,951
13	-21,5353	-21,853	-21,8319
14	-21,2404	-21,7919	-21,775
15	-20,978	-21,7855	-21,7719
16	-20,7467	-21,826	-21,8149
17	-20,5452	-21,9052	-21,8961
18	-20,3722	-22,015	-22,0076
19	-20,2267	-22,1448	-22,1386
20	-20,1088	-22,2836	-22,2784
21	-20,0144	-22,4126	-22,4081
22	-19,9646	-22,5314	-22,5274
23	-19,8494	-22,5208	-22,5172
24	-19,9559	-22,615	-22,6116
25	-20,9965	-22,7921	-22,7897

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 2,00m da viga V11c ao longo dos andares (Gráfico 38)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	19,4045	24,4121	19,158
2	19,2702	18,6636	19,4229
3	19,6084	20,0578	19,96
4	19,8247	20,2899	20,3063
5	20,0258	20,5766	20,5768
6	20,1983	20,7861	20,7881
7	20,3489	20,952	20,9534
8	20,4801	21,0798	21,0811
9	20,5945	21,1772	21,1782
10	20,6944	21,2492	21,2501
11	20,7817	21,2999	21,3007
12	20,858	21,3322	21,3329
13	20,9248	21,3481	21,3487
14	20,9831	21,3492	21,3498
15	21,0341	21,3363	21,3368
16	21,0786	21,3099	21,3103
17	21,1173	21,2699	21,2704
18	21,1508	21,2166	21,2171
19	21,1798	21,1485	21,1489
20	21,2044	21,0644	21,0648
21	21,2275	20,9657	20,9661
22	21,2336	20,8361	20,8364
23	21,3167	20,7542	20,7546
24	20,9664	20,2916	20,292
25	22,9731	21,7591	21,7592

□ Tabela dos momentos fletores (KN.m) na seção 4,10m da viga V11c ao longo dos andares (Gráfico 39)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-31,3551	-42,7287	-33,4173
2	-32,4754	-32,7106	-34,3904
3	-33,5499	-35,4475	-35,5167
4	-34,5894	-36,5136	-36,7282
5	-35,5779	-37,8057	-37,9543
6	-36,5027	-38,9162	-39,0364
7	-37,3591	-39,8571	-39,9518
8	-38,1455	-40,6256	-40,7006
9	-38,8624	-41,234	-41,2936
10	-39,512	-41,6987	-41,7461
11	-40,0975	-42,0366	-42,0745
12	-40,6224	-42,2637	-42,294
13	-41,0908	-42,3937	-42,4181
14	-41,5064	-42,4389	-42,4586
15	-41,8731	-42,4094	-42,4254
16	-42,1943	-42,3145	-42,3276
17	-42,4731	-42,1626	-42,1734
18	-42,7121	-41,963	-41,9721
19	-42,9135	-41,7238	-41,7314
20	-43,079	-41,457	-41,4635
21	-43,2097	-41,177	-41,1826
22	-43,3076	-40,9034	-40,9085
23	-43,3558	-40,6461	-40,6507
24	-43,7405	-40,7213	-40,7256
25	-40,5044	-38,4432	-38,4468

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 0,30m da viga V10b ao longo dos andares (Gráfico 40)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-103,706	-106,093	-107,673
2	-101,905	-105,409	-105,035
3	-99,601	-102,246	-102,33
4	-97,797	-100,374	-100,37
5	-96,263	-98,838	-98,847
6	-94,98	-97,669	-97,674
7	-93,901	-96,768	-96,772
8	-92,995	-96,081	-96,085
9	-92,232	-95,564	-95,566
10	-91,59	-95,181	-95,183
11	-91,048	-94,908	-94,91
12	-90,59	-94,727	-94,728
13	-90,203	-94,623	-94,624
14	-89,875	-94,589	-94,59
15	-89,597	-94,621	-94,621
16	-89,361	-94,715	-94,715
17	-89,159	-94,874	-94,874
18	-88,987	-95,103	-95,103
19	-88,838	-95,402	-95,402
20	-88,71	-95,783	-95,783
21	-88,596	-96,253	-96,253
22	-88,51	-96,845	-96,845
23	-88,344	-97,461	-97,461
24	-88,609	-98,719	-98,718
25	-87,155	-97,47	-97,47

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 4,40m da viga V10b ao longo dos andares (Gráfico 41)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	2,02	1,747	1,886
2	1,794	1,617	1,596
3	1,576	1,327	1,329
4	1,395	1,121	1,12
5	1,238	0,955	0,954
6	1,103	0,824	0,824
7	0,986	0,722	0,722
8	0,884	0,644	0,644
9	0,797	0,586	0,586
10	0,72	0,544	0,543
11	0,654	0,515	0,515
12	0,596	0,498	0,498
13	0,546	0,492	0,491
14	0,503	0,495	0,495
15	0,465	0,507	0,507
16	0,431	0,527	0,527
17	0,403	0,557	0,557
18	0,378	0,595	0,595
19	0,356	0,643	0,643
20	0,337	0,701	0,701
21	0,321	0,771	0,771
22	0,308	0,854	0,854
23	0,295	0,949	0,949
24	0,3	1,082	1,081
25	0,495	1,265	1,265

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 8,50m da viga V10b ao longo dos andares (Gráfico 42)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	104,683	106,936	108,507
2	102,598	105,918	105,551
3	100,051	102,478	102,559
4	98,05	100,38	100,376
5	96,344	98,663	98,672
6	94,912	97,349	97,354
7	93,703	96,334	96,338
8	92,684	95,56	95,563
9	91,823	94,977	94,979
10	91,095	94,548	94,55
11	90,478	94,245	94,246
12	89,955	94,047	94,048
13	89,512	93,939	93,94
14	89,134	93,913	93,914
15	88,812	93,962	93,963
16	88,538	94,085	94,085
17	88,303	94,282	94,281
18	88,1	94,559	94,559
19	87,926	94,917	94,917
20	87,775	95,368	95,368
21	87,64	95,921	95,92
22	87,538	96,612	96,611
23	87,353	97,334	97,333
24	87,648	98,78	98,78
25	87,019	98,026	98,025

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 0,30m da viga V11b ao longo dos andares (Gráfico 43)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-25,091	-13,563	-22,869
2	-24,677	-23,532	-22,06
3	-24,235	-21,224	-21,246
4	-23,823	-20,607	-20,473
5	-23,416	-19,834	-19,747
6	-23,029	-19,205	-19,134
7	-22,666	-18,689	-18,633
8	-22,329	-18,28	-18,235
9	-22,019	-17,967	-17,931
10	-21,736	-17,737	-17,708
11	-21,48	-17,579	-17,556
12	-21,249	-17,485	-17,466
13	-21,043	-17,445	-17,43
14	-20,86	-17,455	-17,443
15	-20,699	-17,51	-17,5
16	-20,558	-17,605	-17,597
17	-20,437	-17,738	-17,731
18	-20,334	-17,906	-17,9
19	-20,25	-18,104	-18,099
20	-20,183	-18,33	-18,325
21	-20,132	-18,577	-18,573
22	-20,104	-18,844	-18,841
23	-20,081	-19,108	-19,105
24	-20,133	-19,365	-19,362
25	-20,587	-20,437	-20,434

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 2,44m da viga V11b ao longo dos andares (Gráfico 44)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	6,193	12,645	6,309
2	6,024	5,062	6,102
3	6,154	6,219	6,21
4	6,262	6,261	6,363
5	6,394	6,521	6,587
6	6,531	6,75	6,803
7	6,67	6,955	6,997
8	6,805	7,129	7,162
9	6,933	7,271	7,298
10	7,053	7,384	7,406
11	7,164	7,472	7,489
12	7,264	7,538	7,551
13	7,355	7,585	7,596
14	7,435	7,617	7,626
15	7,506	7,636	7,643
16	7,567	7,646	7,652
17	7,619	7,651	7,655
18	7,662	7,653	7,657
19	7,696	7,657	7,661
20	7,721	7,67	7,673
21	7,738	7,699	7,702
22	7,739	7,747	7,749
23	7,763	7,862	7,864
24	7,548	7,873	7,874
25	8,641	8,685	8,687

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 4,10m da viga V11b ao longo dos andares (Gráfico 45)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	37,027	43,534	35,387
2	36,8	33,748	35,11
3	37,116	35,361	35,35
4	37,352	35,471	35,608
5	37,609	35,875	35,963
6	37,858	36,229	36,301
7	38,096	36,546	36,603
8	38,32	36,817	36,862
9	38,526	37,043	37,078
10	38,715	37,227	37,255
11	38,886	37,375	37,397
12	39,039	37,492	37,51
13	39,176	37,585	37,599
14	39,296	37,657	37,668
15	39,4	37,713	37,722
16	39,49	37,759	37,766
17	39,566	37,798	37,804
18	39,63	37,838	37,843
19	39,68	37,884	37,888
20	39,718	37,944	37,948
21	39,746	38,032	38,035
22	39,746	38,147	38,15
23	39,805	38,386	38,389
24	39,369	38,341	38,343
25	41,767	40,315	40,317

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 0,30m da viga V11c ao longo dos andares (Gráfico 46)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-38,9	-28,516	-37,795
2	-38,332	-38,312	-36,819
3	-37,824	-35,911	-35,93
4	-37,318	-35,192	-35,057
5	-36,819	-34,31	-34,222
6	-36,34	-33,576	-33,504
7	-35,887	-32,963	-32,906
8	-35,464	-32,469	-32,424
9	-35,073	-32,085	-32,049
10	-34,715	-31,797	-31,769
11	-34,388	-31,596	-31,573
12	-34,092	-31,47	-31,451
13	-33,826	-31,411	-31,396
14	-33,588	-31,412	-31,4
15	-33,377	-31,467	-31,457
16	-33,191	-31,571	-31,563
17	-33,029	-31,72	-31,713
18	-32,89	-31,909	-31,904
19	-32,772	-32,134	-32,129
20	-32,676	-32,39	-32,386
21	-32,6	-32,669	-32,665
22	-32,548	-32,966	-32,963
23	-32,508	-33,263	-33,26
24	-32,281	-33,396	-33,393
25	-35,11	-35,653	-35,651

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 2,00m da viga V11c ao longo dos andares (Gráfico 47)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-15,482	-10,496	-16,82
2	-15,478	-17,986	-16,935
3	-15,385	-16,929	-16,931
4	-15,257	-16,898	-16,795
5	-15,099	-16,62	-16,552
6	-14,926	-16,356	-16,301
7	-14,748	-16,108	-16,065
8	-14,572	-15,889	-15,855
9	-14,4	-15,704	-15,677
10	-14,238	-15,552	-15,531
11	-14,085	-15,431	-15,414
12	-13,945	-15,339	-15,325
13	-13,816	-15,27	-15,26
14	-13,7	-15,222	-15,214
15	-13,596	-15,191	-15,184
16	-13,505	-15,172	-15,167
17	-13,425	-15,162	-15,157
18	-13,356	-15,154	-15,151
19	-13,3	-15,143	-15,14
20	-13,254	-15,121	-15,119
21	-13,22	-15,079	-15,077
22	-13,2	-15,005	-15,003
23	-13,185	-14,879	-14,877
24	-13,065	-14,593	-14,591
25	-14,536	-15,292	-15,291

□ Tabela dos esforços cortantes (KN) na seção 4,10m da viga V11c ao longo dos andares (Gráfico 48)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	58,763	69,006	59,447
2	59,914	59,09	60,715
3	61,237	62,183	62,178
4	62,413	63,372	63,535
5	63,498	64,701	64,808
6	64,482	65,81	65,897
7	65,373	66,732	66,801
8	66,174	67,476	67,531
9	66,894	68,062	68,105
10	67,537	68,507	68,542
11	68,11	68,831	68,859
12	68,62	69,049	69,071
13	69,071	69,174	69,192
14	69,469	69,217	69,232
15	69,819	69,188	69,2
16	70,124	69,094	69,104
17	70,389	68,94	68,948
18	70,617	68,735	68,742
19	70,81	68,482	68,488
20	70,971	68,188	68,193
21	71,101	67,864	67,869
22	71,196	67,515	67,519
23	71,289	67,188	67,191
24	71,432	66,888	66,892
25	69,868	65,815	65,818

## Apêndice C

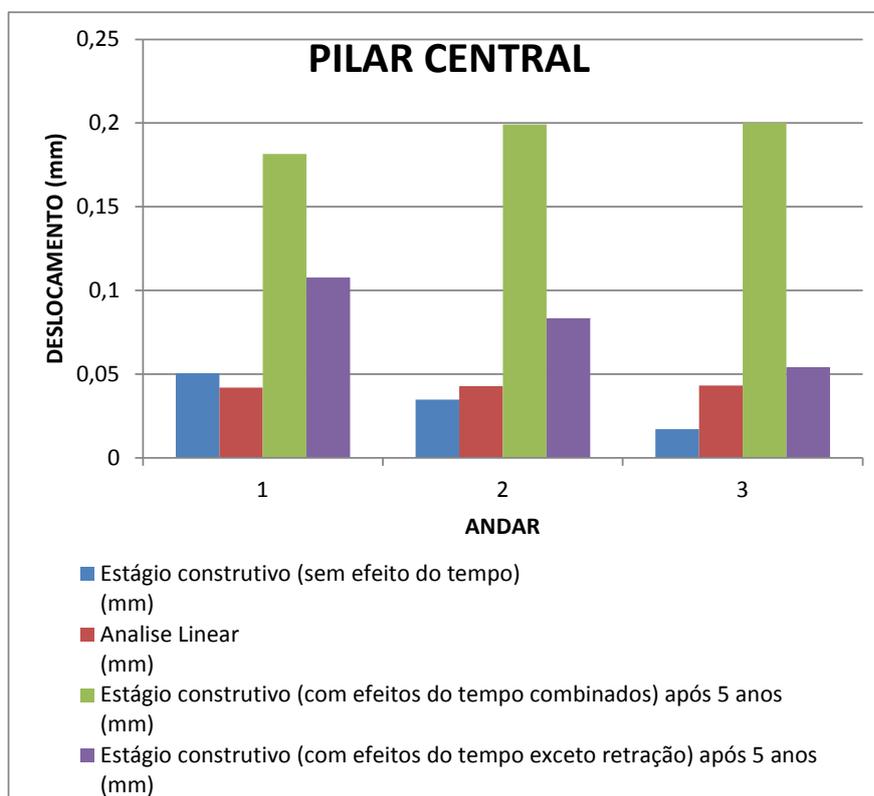


Gráfico 49 - Deslocamentos verticais totais no topo dos pilares centrais do pórtico de 3 andares

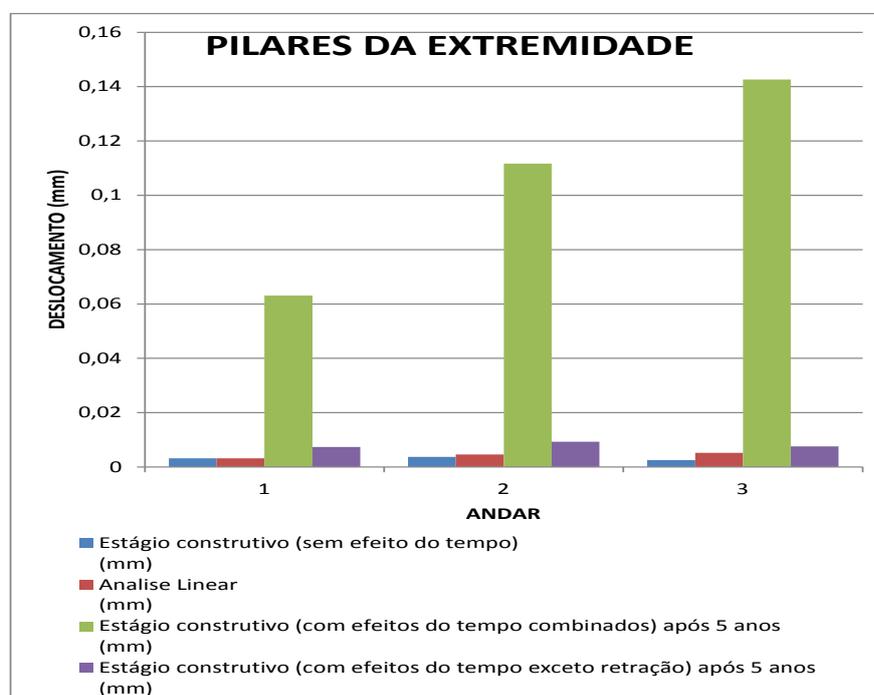


Gráfico 50 - Deslocamentos verticais totais no topo dos pilares da extremidade do pórtico de 3 andares

## Apêndice D

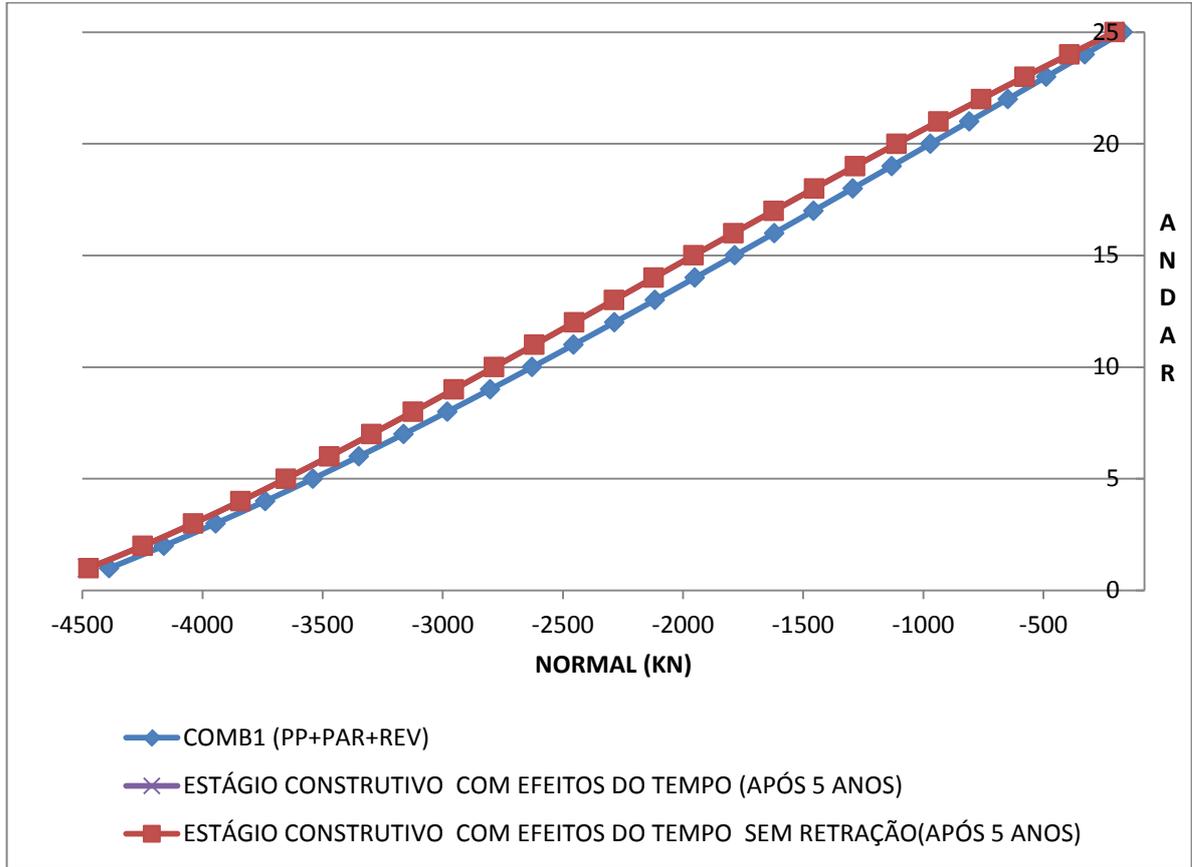


Gráfico 51 - Esforço normal na base do pilar P2 ao longo dos andares

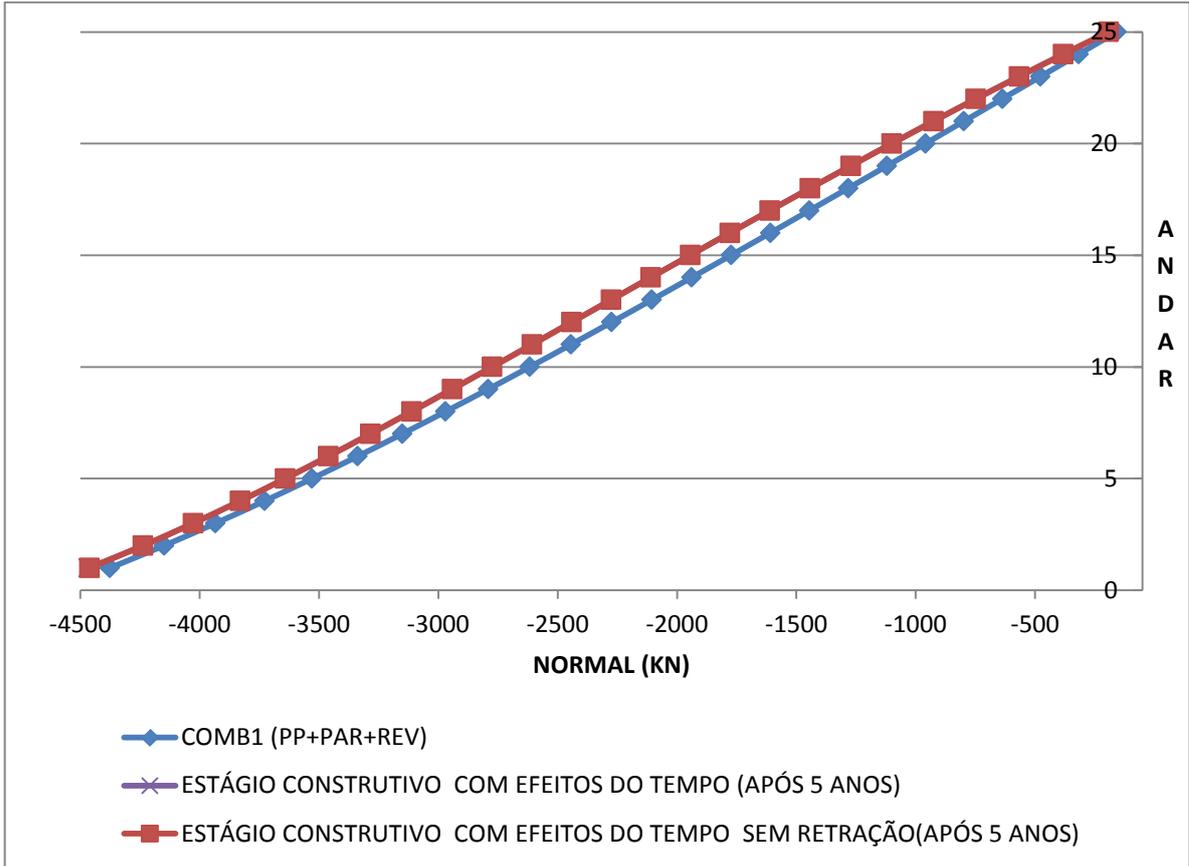


Gráfico 52 - Esforço normal no topo do pilar P2 ao longo dos andares

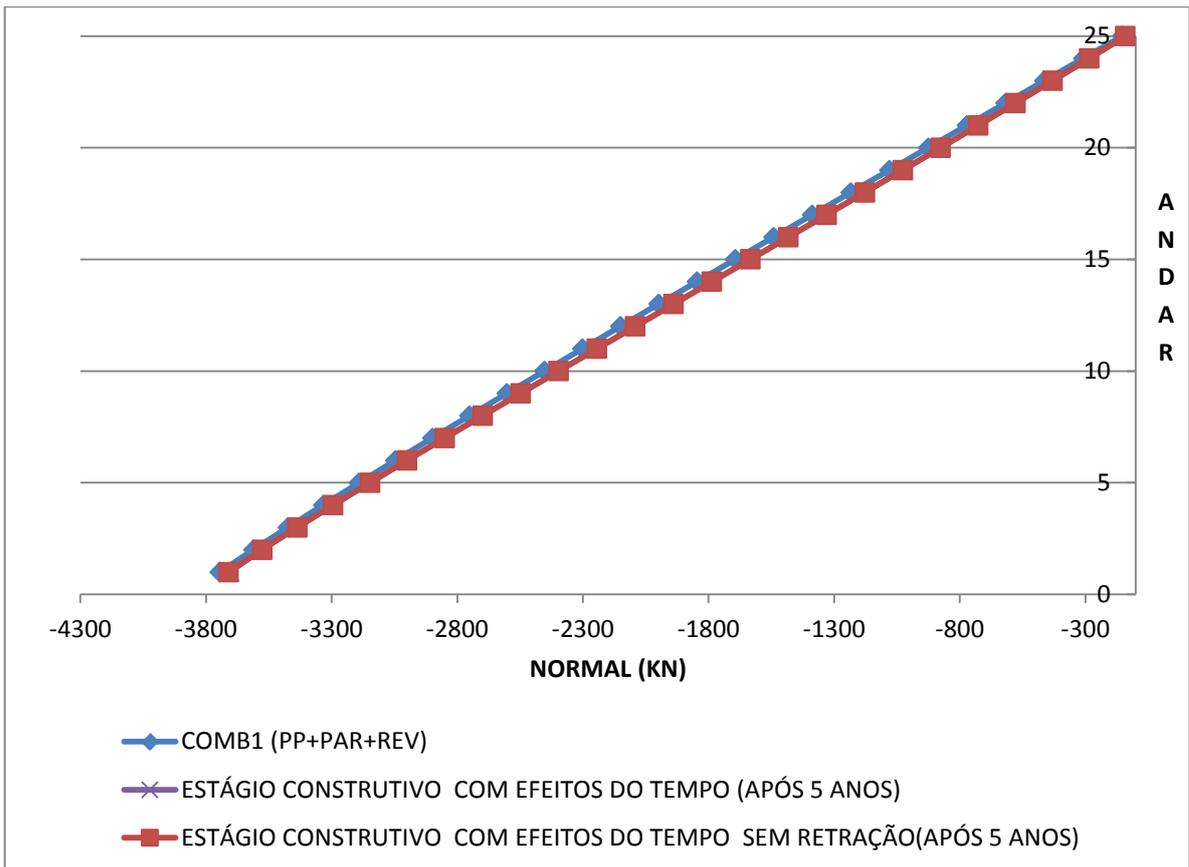


Gráfico 53 - Esforço normal na base do pilar P3 ao longo dos andares

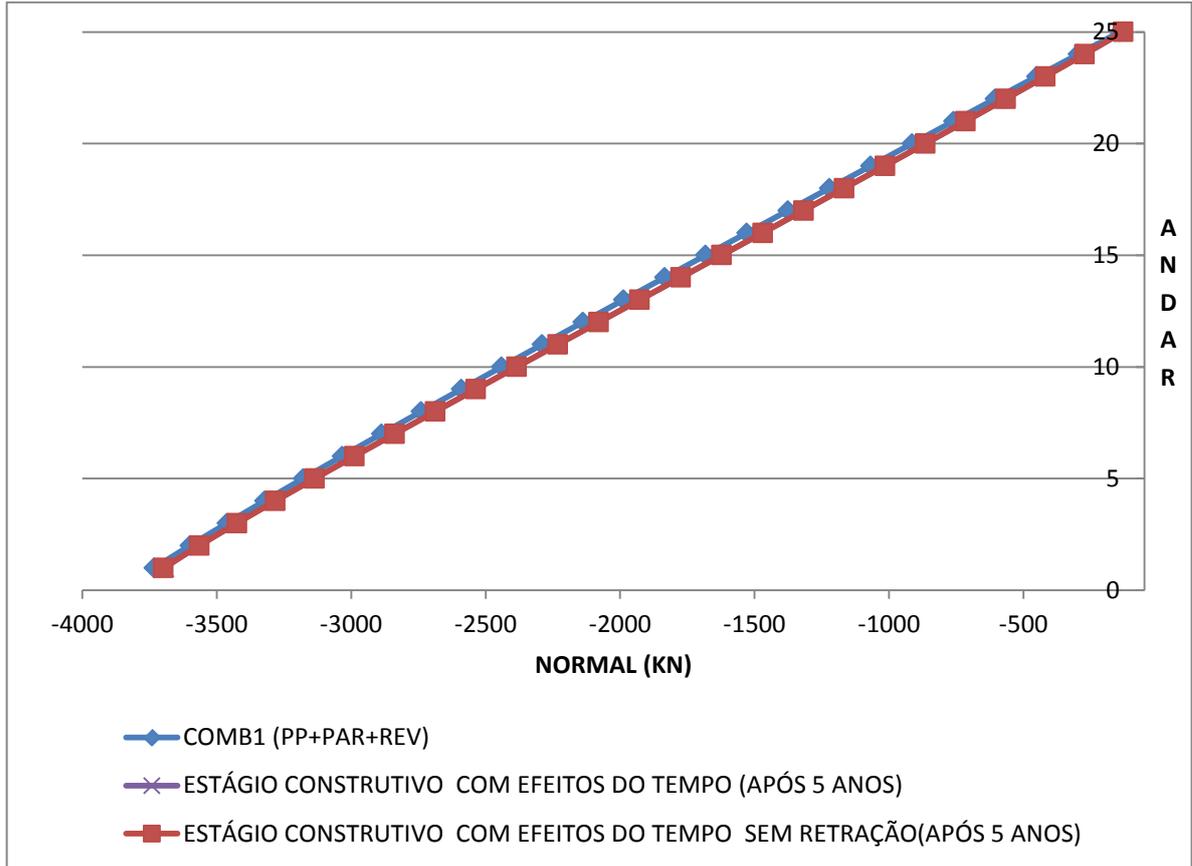


Gráfico 54 - Esforço normal no topo do pilar P3 ao longo dos andares - seção no topo do pilar

□ Tabela dos esforços normais (KN) na base do pilar P2 ao longo dos andares (Gráfico 51)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-4388,018	-4478,519	-4473,762
2	-4160,816	-4247,717	-4248,95
3	-3945,475	-4038,864	-4039,517
4	-3739,476	-3841,599	-3842,143
5	-3541,278	-3653,587	-3654,022
6	-3349,569	-3472,373	-3472,722
7	-3163,26	-3296,22	-3296,499
8	-2981,445	-3123,778	-3124,002
9	-2803,375	-2954,009	-2954,188
10	-2628,425	-2786,108	-2786,251
11	-2456,079	-2619,45	-2619,564
12	-2285,907	-2453,539	-2453,63
13	-2117,552	-2287,968	-2288,042
14	-1950,719	-2122,392	-2122,451
15	-1785,162	-1956,5	-1956,547
16	-1620,679	-1789,996	-1790,034
17	-1457,103	-1622,584	-1622,614
18	-1294,297	-1453,956	-1453,979
19	-1132,149	-1283,757	-1283,775
20	-970,569	-1111,602	-1111,617
21	-809,485	-937,04	-937,051
22	-648,841	-759,54	-759,547
23	-488,608	-578,477	-578,482
24	-328,651	-393,053	-393,056
25	-170,14	-202,98	-202,981

□ Tabela dos esforços normais (KN) no topo do pilar P2 ao longo dos andares (Gráfico 52)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-4376,768	-4467,269	-4462,512
2	-4149,566	-4236,467	-4237,7
3	-3934,225	-4027,614	-4028,267
4	-3728,226	-3830,349	-3830,893
5	-3530,028	-3642,337	-3642,772
6	-3338,319	-3461,123	-3461,472
7	-3152,01	-3284,97	-3285,249
8	-2970,195	-3112,528	-3112,752
9	-2792,125	-2942,759	-2942,938
10	-2617,175	-2774,858	-2775,001
11	-2444,829	-2608,2	-2608,314
12	-2274,657	-2442,289	-2442,38
13	-2106,302	-2276,718	-2276,792
14	-1939,469	-2111,142	-2111,201
15	-1773,912	-1945,25	-1945,297
16	-1609,429	-1778,746	-1778,784
17	-1445,853	-1611,334	-1611,364
18	-1283,047	-1442,706	-1442,729
19	-1120,899	-1272,507	-1272,525
20	-959,319	-1100,352	-1100,367
21	-798,235	-925,79	-925,801
22	-637,591	-748,29	-748,297
23	-477,358	-567,227	-567,232
24	-317,401	-381,803	-381,806
25	-158,89	-191,73	-191,731

□ Tabela dos esforços normais (KN) na base do pilar P3 ao longo dos andares (Gráfico 53)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-3744,831	-3706,082	-3710,768
2	-3611,274	-3578,466	-3576,458
3	-3473,794	-3437,674	-3437,03
4	-3333,397	-3294,404	-3293,785
5	-3190,565	-3148,133	-3147,674
6	-3045,737	-2999,927	-2999,574
7	-2899,263	-2850,292	-2850,024
8	-2751,429	-2699,625	-2699,424
9	-2602,465	-2548,22	-2548,07
10	-2452,564	-2396,297	-2396,186
11	-2301,879	-2244,024	-2243,945
12	-2150,539	-2091,539	-2091,483
13	-1998,647	-1938,952	-1938,915
14	-1846,291	-1786,365	-1786,341
15	-1693,541	-1633,87	-1633,855
16	-1540,456	-1481,559	-1481,551
17	-1387,085	-1329,53	-1329,528
18	-1233,467	-1177,891	-1177,891
19	-1079,635	-1026,758	-1026,76
20	-925,616	-876,272	-876,276
21	-771,431	-726,6	-726,604
22	-617,098	-577,94	-577,944
23	-462,618	-430,528	-430,531
24	-308,056	-284,697	-284,7
25	-153,126	-140,631	-140,632

□ Tabela dos esforços normais (KN) no topo do pilar P3 ao longo dos andares (Gráfico 54)

Andar	COMB1 (PP+PAR+REV)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO (APÓS 5 ANOS)	ESTÁGIO CONSTRUTIVO COM EFEITOS DO TEMPO SEM RETRAÇÃO(APÓS 5 ANOS)
1	-3733,581	-3694,832	-3699,518
2	-3600,024	-3567,216	-3565,208
3	-3462,544	-3426,424	-3425,78
4	-3322,147	-3283,154	-3282,535
5	-3179,315	-3136,883	-3136,424
6	-3034,487	-2988,677	-2988,324
7	-2888,013	-2839,042	-2838,774
8	-2740,179	-2688,375	-2688,174
9	-2591,215	-2536,97	-2536,82
10	-2441,314	-2385,047	-2384,936
11	-2290,629	-2232,774	-2232,695
12	-2139,289	-2080,289	-2080,233
13	-1987,397	-1927,702	-1927,665
14	-1835,041	-1775,115	-1775,091
15	-1682,291	-1622,62	-1622,605
16	-1529,206	-1470,309	-1470,301
17	-1375,835	-1318,28	-1318,278
18	-1222,217	-1166,641	-1166,641
19	-1068,385	-1015,508	-1015,51
20	-914,366	-865,022	-865,026
21	-760,181	-715,35	-715,354
22	-605,848	-566,69	-566,694
23	-451,368	-419,278	-419,281
24	-296,806	-273,447	-273,45
25	-141,876	-129,381	-129,382