

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

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO
CONSTRUTIVO DA ESTRUTURA DE EDIFÍCIOS EM
CONCRETO ARMADO**

Bárbara Chagas Rachinhas

Porto Alegre
2020

BÁRBARA CHAGAS RACHINHAS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO
CONSTRUTIVO DA ESTRUTURA DE EDIFÍCIOS EM
CONCRETO ARMADO**

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

Porto Alegre
2020

BÁRBARA CHAGAS RACHINHAS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO
CONSTRUTIVO DA ESTRUTURA DE EDIFÍCIOS EM
CONCRETO ARMADO**

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

Porto Alegre, 30 de março de 2020

Prof. Américo Campos Filho
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo
Orientador

Profª. Paula Manica Lazzari
Drª. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Co-orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
Ph.D. pela Pennsylvania State University

Profª. Denise Bernaud Maghous (UFRGS)
Drª. pela École Nationale des Ponts et Chaussées

Prof. Mauro de Vasconcellos Real (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família e a todos aqueles
que acreditam no poder da ciência e da educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha mãe Sabrina e minha vó Vanilda, por me ensinarem a acreditar nos meus sonhos e lutar pelos meus ideais. Vocês são mulheres extraordinárias, das quais eu me orgulho diariamente.

Agradeço ao meu avô Alcides, por todo zelo e amor durante esses anos. A maior herança que um homem pode deixar é o caráter que ensina aos seus.

Agradeço ao meu irmão João Vitor, pelo apoio e carinho. Tenho muito orgulho da pessoa que te tornastes.

Agradeço ao meu pai de coração João Vicente, por sempre estar me incentivando e acreditando em mim. Sou grata por ter te encontrado.

Agradeço a minha amiga Bárbara Sánchez, que desde o primeiro dia no mestrado tem me acompanhado nesta caminhada. Sou imensamente grata por ter te encontrado e com certeza a tua companhia fez com que eu enfrentasse situações extremamente pesadas com mais leveza.

Agradeço a amiga Manoelly Rocha, aos carinhos diários neste momento tão conturbado. Também não posso deixar de agradecer pelos bolos (combustível de mestranda).

Agradeço ao meu companheiro Anderson Beauvalet, por me apoiar e me incentivar nestes momentos difíceis.

Agradeço aos amigos de longa data, obrigada por me apoiarem e me incentivarem, mesmo que distante. Obrigada por não me cobrarem atitudes que no momento eu não era capaz de fornecer. Desculpem a ausência, vocês são importantes demais para mim.

Agradeço aos colegas e amigos Eduardo Titello, Matheus Benincá e Maílson Scherer os quais sempre estiveram à disposição para sanar minhas dúvidas. Vocês são excelentes professores, saibam disso.

Agradeço especialmente ao colega e amigo Felipe Quevedo, pois com toda certeza seu apoio e incentivo foi fundamental para a execução deste trabalho. O que eu aprendi com o Felipe vai além da Engenharia. Foram muitos degraus construídos na minha escada da educação.

Agradeço aos colegas do laboratório CEMACOM, os quais me ajudaram em diversos momentos, me proporcionando um ambiente de trabalho mais acolhedor.

Agradeço ao Professor Américo Campos Filho, pelos ensinamentos passados durante a execução deste trabalho, todo empenho, disponibilidade e preocupação para que tudo saísse da melhor maneira.

Agradeço a Professora Paula Lazzari, pela ajuda e disponibilidade de sempre. Foi extremamente enriquecedor realizar o estágio docente sob sua supervisão.

Agradeço aos engenheiros Carlos Engelmann, Marcelo Ilha (Estádio3) e Alexandre Almeida (Wikihaus) por me fornecerem as informações necessárias para a execução deste trabalho.

Agradeço ao engenheiro Alio Kimura por disponibilizar o *software* TQS, o qual foi de grande valia para a execução e validação do presente trabalho.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao PPGEC, pela oportunidade de cursar a pós-graduação. Que nós, brasileiros, possamos sempre contar com o ensino gratuito e de qualidade das universidades federais. A ciência brasileira resiste diariamente, aos ataques sofridos pelo desgoverno atual (ELE NÃO).

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade de realizar o mestrado com bolsa, sem a qual, não seria possível a minha dedicação integral nesse período de dois anos.

“Eu levanto a minha voz, não para que eu possa gritar,
mas para que aqueles sem voz possam ser ouvidos...
não é possível prosperar quando metade das pessoas
ficam para trás.”

Malala Yousafzai

RESUMO

RACHINHAS, B.C. **Simulação computacional do processo construtivo da estrutura de edifícios em concreto armado.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

No que concerne projeto estrutural de edifícios, entende-se que as condições estruturais durante a construção não necessitam de grande preocupação, pois usualmente, as situações mais severas ocorrem na ocupação após a construção. Entretanto, podem existir situações críticas durante a construção, em termos de segurança e estabilidade estrutural. Geralmente, é realizada uma análise global da estrutura, onde são aplicadas, de forma simultânea, todas as cargas de projeto em um modelo estrutural completo, no qual todos os elementos estruturais surgem de uma só vez, situação que não corresponde à realidade construtiva. O que de fato ocorre, é que o peso da estrutura e de outros elementos construtivos passa a atuar à medida que o edifício é construído, pavimento por pavimento. Para simular esta situação, é proposta a análise incremental/faseada, na qual é possível obter as deformações e esforços em cada um dos estágios construtivos e considerar os efeitos acumulativos de um estágio para o outro. A análise faseada se difere da análise global basicamente pela consideração da sequência construtiva, a inserção dos efeitos diferidos/reológicos próprios do comportamento do material concreto (retração e fluência), aplicação de cargas de forma sequencial, a consideração da evolução do módulo de elasticidade e da resistência conforme a idade do concreto e a inclusão dos efeitos de fissuração. Para realizar a comparação entre as análises global e faseada, propôs-se um modelo numérico de um edifício de cinco pavimentos, fazendo uso do Método dos Elementos Finitos, através da plataforma ANSYS, versão 19.2. Neste *software* utilizou-se a ferramenta de customização UPF (*User Programmable Features*) para realizar a introdução de um novo modelo constitutivo para o concreto, possibilitando a representação do seu comportamento não-linear. Foram realizadas as extrações dos resultados referentes aos esforços e os deslocamentos, efetivando a comparação entre os resultados obtidos pelas análises global e faseada. Os resultados obtidos apresentaram variações significativas entre ambas análises.

Palavras-chave: *Estruturas de Edifícios, Análise Global, Análise Faseada.*

ABSTRACT

RACHINHAS, B.C. **Simulação computacional do processo construtivo da estrutura de edifícios em concreto armado.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Regarding the structural design to be buildings, it is usually understood that there is no reason for concerns about the structural conditions during construction the most severe situations occur in occupation after construction. However, critical situations during construction may happen regard structural safety and stability. Generally, a global analysis of the structure is carried out, when all the design loads are applied simultaneously in a complete structural model, and all the structural elements appear at once, situation that does not correspond to the constructive reality. What happens is that the weight of the structure and other construction elements starts to act as the building is constructed, floor by floor. To simulate this situation, an incremental analysis is proposed in which it is possible to obtain the deformations and forces in each of the construction stages and to consider the cumulative effects from one stage to the other. The phased analysis differs from the global analysis basically by considering the constructive sequence, the insertion of the rheological effects specific to the behavior of the concrete material (shrinkage and creep), application of loads sequentially, consideration of the evolution of the elasticity modulus and the strength as the concrete ages, and the inclusion of cracking effects. To perform the comparison between the global and incremental analyzes, a numerical model of a five-floor building was proposed, using the Finite Element Method, in the ANSYS software, version 19.2. In this software, the customization tool UPF (User Programmable Features) was used to introduce a new constitutive model for concrete, enabling the representation of its non-linear behavior. Extractions of results to forces and the displacements were carried out, making comparison between results obtained by the global and phased analyzes. Results obtained showed significant variations between both analyzes.

Key-words: *Building Structures, Global Analysis, Incremental Analysis.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 MOTIVAÇÃO E QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	16
2.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES DO TRABALHO	17
2.4 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 CONTEXTO GERAL: EDIFÍCIOS	20
3.2 CARGAS ATUANTES EM EDIFÍCIOS.....	21
3.3 NÃO-LINEARIDADE FÍSICA E GEOMÉTRICA.....	23
3.4 INFLUÊNCIA DAS LAJES NO COMPORTAMENTO DO PÓRTICO	25
3.5 EFEITO DE ENCURTAMENTO AXIAL DOS PILARES	26
3.6 LIGAÇÕES VIGA-PILAR.....	27
3.7 ANÁLISE ESTRUTURAL GLOBAL E ANÁLISE ESTRUTURAL FASEADA	30
3.8 CONCRETO ARMADO	33
3.8.1 Efeitos Diferidos.....	34
3.8.1.1 Retração.....	36
3.8.1.2 Fluência	37
3.8.2 Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson	40
3.9 PESQUISAS ANTERIORES	43

4	MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS	45
4.1	CONCRETO	45
4.1.1	Comportamento Diferido	45
4.1.1.1	Formulação para fluência e retração do CEB-FIP MC90	45
4.1.1.1.1	<i>Fluência</i>	47
4.1.1.1.2	<i>Retração</i>	52
4.1.1.2	Teoria da Solidificação para a fluência do concreto	54
4.1.1.3	Modelo Reológico para o fator de fluência dependente da idade do carregamento	57
4.1.2	Concreto Tracionado: Modelo para fissuração	61
4.1.2.1	Critério de ruptura de Ottosen	62
4.1.2.2	Critério de Fissuração	65
4.1.2.3	Colaboração do concreto entre fissuras (<i>Tension stiffening</i>)	66
4.1.2.4	Modelo para a transferência das tensões de corte	68
4.2	AÇO	69
5	ANÁLISE NUMÉRICA.....	70
5.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	70
5.2	<i>SOFTWARE ANSYS</i>	73
5.2.1	Elementos finitos utilizados	74
5.2.1.1	<i>Beam189</i>	74
5.2.1.2	<i>Shell281</i>	78
5.2.1.3	<i>Reinf264</i>	80
5.2.2	<i>Usermat</i>	82
5.2.3	<i>Birth and Death</i>	85

6 VALIDAÇÕES DOS MODELOS	89
6.1 TESTES UNIAXIAIS	89
6.1.1 Concreto Comprimido - Comportamento Viscoelástico	89
6.1.2 Concreto Tracionado - Fissuração	94
6.2 COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS	96
6.2.1 Campos Filho (1987)	96
6.2.2 Stevens (1972)	99
7 OBJETO DE ESTUDO: EDIFÍCIO DE CINCO PAVIMENTOS	102
7.1 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA	102
7.2 CONSIDERAÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO CONSTRUTIVO	105
7.3 MODELO NUMÉRICO DA ESTRUTURA	109
7.4 ANÁLISE DA ESTRUTURA	111
7.4.1 Pilares	113
7.4.2 Vigas	119
7.4.3 Lajes	125
7.4.4 Pórtico	129
8 CONCLUSÕES	133
8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	134
REFERÊNCIAS	135
APÊNDICE A	142
APÊNDICE B	161
APÊNDICE C	169

APÊNDICE D	227
-------------------------	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Organograma das etapas do projeto de pesquisa.....	19
Figura 3.1: Deformada típica de um sistema em pórtico.....	21
Figura 3.2: Efeitos de 2ª ordem.....	24
Figura 3.3: Influência das ligações semirrígidas no comportamento global.....	29
Figura 3.4: Construção da Ponte Octávio Frias de Oliveira, em São Paulo/Brasil.....	31
Figura 3.5: Burj Khalifa, Dubai/Emirados Árabes Unidos.....	33
Figura 3.6: Componente reversível e irreversível da deformação por retração.....	37
Figura 3.7: a) Estado de tensões constante; b) deformação por fluência produzida.....	38
Figura 3.8: a) Componente reversível e irreversível da deformação por fluência; b) Estado de tensões constantes entre τ_0 e τ_1	39
Figura 3.9: Deformação por fluência produzida em concreto de diferentes idades.....	40
Figura 4.1: Modelo do concreto.....	54
Figura 4.2: Modelo de Maxwell generalizado.....	57
Figura 4.3: Modelo de Kelvin generalizado.....	58
Figura 4.4: Curva tensão-deformação para o concreto tracionado.....	66
Figura 4.5: Modelo para o aço: (a) elastoplástico perfeito; (b) elastoplástico com endurecimento linear.....	69
Figura 5.1: Ilustração do processo iterativo de Newton-Raphson para um sistema com um grau de liberdade.....	73
Figura 5.2: Elemento beam189.....	75
Figura 5.3: Coordenadas do elemento finito linear beam189.....	76
Figura 5.4: Pontos de integração e discretização da seção para o elemento beam189....	77
Figura 5.5: Elemento shell281.....	78
Figura 5.6: Elemento reinf264 associado ao elemento base beam189.....	81
Figura 5.7: Elemento reinf264 associado ao elemento base shell281.....	81
Figura 5.8: Representação do elemento reinf264 associado a um elemento beam189...	82

Figura 5.9: Representação do elemento reinf264 associado a um elemento shell281....	82
Figura 5.10: Tempos adotados na programação da Usermat viscoelástica.....	84
Figura 5.11: Pórtico plano elaborado pela autora, utilizando elemento beam189.....	86
Figura 5.12: Discretização empregada no software ANSYS.....	86
Figura 5.13: Demonstração da ferramenta de ativação/desativação do ANSYS, exibindo o deslocamento vertical. Ativa-se o componente dos pilares primeiro pavimento, (a), a viga do primeiro pavimento (b), os pilares do segundo pavimento (c) e, por fim, a viga do segundo pavimento.....	88
Figura 6.1: Modelo de validação uniaxial do concreto sob compressão para o elemento beam189.....	90
Figura 6.2: Modelo de validação uniaxial do concreto sob compressão para o elemento shell281.....	91
Figura 6.3: Diagrama visual do bloco sob compressão.....	91
Figura 6.4: Teste com carga constante de 5 MPa aplicada aos 10 dias, para o beam189....	92
Figura 6.5: Teste com carga variável de 5 MPa aplicada aos 10, 50 e 75 dias, para o beam189.....	92
Figura 6.6: Teste com carga constante de 5 MPa aplicada aos 10 dias, para o shell281.	93
Figura 6.7 – Teste com carga variável de 5 MPa aplicada aos 10, 50 e 75 dias, para o shell281.....	93
Figura 6.8: Diagrama visual do bloco sob tração.....	95
Figura 6.9: Diagrama tensão versus deformação do concreto sob tração, para os elementos beam189 e shell281.....	95
Figura 6.10: Vista lateral e seção das vigas V7 e V8.....	96
Figura 6.11: Modelagem no ANSYS da viga V7 e V8.....	96
Figura 6.12: Deslocamento no centro do vão para as vigas V7 e V8.....	98
Figura 6.13: Vista lateral e seção da viga K.....	99
Figura 6.14: Modelagem da viga K no ANSYS.....	100
Figura 6.15: Deslocamento no centro do vão para a viga K.....	101
Figura 7.1: Planta baixa do edifício.....	102
Figura 7.2: Nomenclatura utilizada para pilares, vigas e lajes.....	103

Figura 7.3: Etapas construtivas adotadas – 1 ao 9.....	106
Figura 7.4: Etapas construtivas adotadas – 10 a 14.....	107
Figura 7.5: Estrutura tridimensional via TQS.....	110
Figura 7.6: Estrutura tridimensional via ANSYS.....	111
Figura 7.7: Pórticos analisados e eixo global.....	112
Figura 7.8: Eixo local dos elementos.....	113
Figura 7.9: Esforço normal (kN) nos pilares do pórtico 1, para análise (a) e global (b) faseada	114
Figura 7.10: Esforço normal (kN) nos pilares do pórtico 2, para análise (a) e global (b) faseada.....	115
Figura 7.11: Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nos pilares do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada.....	117
Figura 7.12: Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nos pilares do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.....	118
Figura 7.13: Esforço cortante (kN) nas vigas do pórtico 1, para análise (a) e global (b) faseada.....	120
Figura 7.14: Esforço cortante (kN) nas vigas do pórtico 2, para análise (a) e global (b) faseada.....	121
Figura 7.15: Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nas vigas do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada	123
Figura 7.16: Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nas vigas do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada	124
Figura 7.17: Deslocamento vertical (cm) para a laje do primeiro pavimento, para análise (a) global e (b) faseada	126
Figura 7.18: Deslocamento vertical (cm) para a laje de cobertura, para análise (a) global e (b) faseada	127
Figura 7.19: Estado de fissuração para a laje do primeiro pavimento, para análise faseada.....	128
Figura 7.20: Estado de fissuração para a laje de cobertura, para análise faseada.....	129
Figura 7.21 – Deformada do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada.....	130
Figura 7.22 – Deformada do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas para concretos de resistência normal.....	42
Tabela 5.1: Propriedades do concreto aos 28 dias.....	87
Tabela 6.1: Dados para o teste do concreto.....	90
Tabela 6.2: Dados para o teste do concreto.....	94
Tabela 6.3: Propriedades dos materiais empregados.....	97
Tabela 6.4: Deslocamento no centro do vão das vigas V7 e V8.....	98
Tabela 6.5: Comparação percentual de diferença entre os resultados encontrados numericamente e experimentalmente, para o deslocamento no centro do vão das vigas V7 e V8, aos 70 dias.....	99
Tabela 6.6: Propriedades dos materiais empregados.....	100
Tabela 6.7: Comparação percentual entre resultados de deslocamento no centro do vão da viga K.....	101
Tabela 7.1: Cargas.....	103
Tabela 7.2: Parâmetros geométricos dos elementos estruturais.....	104
Tabela 7.3: Propriedades dos materiais.....	104
Tabela 7.4: Análises realizadas e suas características.....	112
Tabela 7.5: Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao esforço normal nos pilares.....	116
Tabela 7.6: Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao momento fletor (no plano do pórtico) nos pilares.....	119
Tabela 7.7: Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação aos esforços cortante nas vigas.....	122
Tabela 7.8: Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação aos momentos fletores (no plano do pórtico) nas vigas.....	125
Tabela 7.9: Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao deslocamento vertical no centro das lajes.....	127
Tabela 7.10 – Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao deslocamento total nos pórticos.....	131

LISTA DE SIGLAS

- ACI - *American Concrete Institute*
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANSYS – *Analysis Systems Incorporated*
- APDL – *ANSYS Parametric Design Language*
- CA – Concreto Armado
- CEMACOM – Centro de Mecânica Aplicada Computacional
- CTBUH – *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*
- ELS – Estado Limite de Serviço
- ELU – Estado Limite Último
- ETABS - *Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems*
- fib - Fédération Internationale du Béton*
- fip – Fédération Internationale de la Précontrainte*
- FORTTRAN – *Formula Translation System*
- MC – *Model Code*
- MEF – Método dos Elementos Finitos
- MPA – Mega Pascal
- NBR – Norma Brasileira
- PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
- PRFC - Fibras de carbono envolvidas em matriz epoxídica
- RILEM - *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*
- SAP2000 - *Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung*
- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- UPF – *User Programmable Features*
- TQS – Tecnologia e Qualidade em Sistemas

LISTA DE SÍMBOLOS

I – LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A_c – Área da seção transversal da peça de concreto

E – Módulo de elasticidade

E_{16} – Módulo de elasticidade do concreto aos 16 dias

E_{28} – Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias

E_c – Módulo de elasticidade inicial do concreto

$E_c(t)$ - Módulo de elasticidade tangente do concreto em t

$E_c(t_0)$ - Módulo de elasticidade tangente do concreto em t_0

E_{ci} – Módulo de elasticidade do concreto, aos 28 dias de idade

$E_{ci}(t)$ – Módulo de elasticidade do concreto, para (t) diferente de 28 dias de idade

$E_{ci}(T)$ - Módulo de elasticidade tangente do concreto na idade de 28 dias (MPa)

considerando a temperatura média $T(^{\circ}C)$

$E_{ci}(t_0)$ – Módulo tangente de elasticidade do concreto, no tempo de carregamento t_0

E_{cs} – Módulo de elasticidade secante

E_{c0} – Módulo de elasticidade de referência

E_{c1} – Módulo secante, desde a origem até o pico de tensão de compressão

E_s – Módulo de elasticidade do aço

E_{μ} – Módulo elástico da μ – ésima unidade da cadeia de Kelvin

E_0 - Módulo de elasticidade do concreto referente aos agregados e partículas microscópicas da pasta de cimento

FV – Fator de Validação

$F[\sigma(t)]$ – Função adimensional que introduz a não linearidade frente as tensões

G_0 – Módulo de elasticidade transversal do concreto correspondente ao plano fissurado

G_c – Módulo de elasticidade transversal do concreto

I_1 – Primeiro invariante do tensor de tensões

$J(t, t_0)$ – Função da fluência que representa a deformação na idade t

J_2 – Segundo invariante do tensor desviador de tensões

J_3 – Terceiro invariante do tensor desviador de tensões

K_g – Matriz de rigidez geométrica

L – Sétimo nó do elemento *beam189*

L_i – Laje “i”

L_p - Quantidade de pontos a ser determinada

P – Carga

P_i – Pavimento “i”

$P\Delta$ – Método para consideração da não-linearidade geométrica

RH – Umidade relativa do meio ambiente

RH_0 – Umidade relativa de referência

S – Parâmetro que depende do tipo de cimento utilizado

T - Temperatura

T_0 – Temperatura de referência

$T(\Delta t_i)$ – Temperatura predominante durante o período Δt_i

V_i – Viga “i”

$\{F\}$ – Vetor de forças nodais

$\{F\}_e$ – Vetor de forças externas

$[K]$ – Matriz de rigidez

$[K]_i$ – Matriz de rigidez da respectiva iteração

$[K]_{i-1}$ – Matriz de rigidez da iteração “ $i - 1$ ”

$[K]_0$ – Matriz de rigidez da última iteração da etapa anterior

$\{R\}_i$ – Vetor de esforços internos da respectiva iteração

$\{R\}_{i-1}$ – Vetor de esforços internos da iteração “ $i - 1$ ”

II – LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

f_c – Resistência à compressão do concreto

f_{c16} – Resistência à compressão do concreto aos 16 dias

f_{cd} – Resistência de cálculo à compressão do concreto

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto

f_{cm} – Resistência média à compressão do concreto

f_{cm0} – Resistência média de referência

f_{ctm} – Resistência uniaxial em tração

$f_{ct,m}$ – Resistência média à tração do concreto

f_{c2m} – Resistência biaxial à compressão

f_t – Resistência à tração do concreto

f_{t16} – Resistência à tração do concreto aos 16 dias

f_u – Tensão última do aço

f_y – Tensão de escoamento do aço

g – Carga permanente

h – Espessura fictícia da peça de concreto

hf_l – Espessura fictícia da laje

hf_p – Espessura fictícia do pilar

hf_v – Espessura fictícia da viga

$h(t)$ – Fração de cimento hidratado

h_0 – Espessura fictícia de referência
 m – Número de passos por década
 n_{dec} – Número de pontos por década do ajuste
 q – Carga acidental
 q_1, q_2, q_3 e q_4 - Na Teoria da Solidificação, parâmetros de ajuste que dependem do material
 s – Coordenada local no elemento *beam189*
 t – Idade do concreto
 t_i – Tempo de análise no qual o concreto passa a existir
 t_{inf} – Tempo final para ajuste da cadeia
 t_0 – Idade do concreto no instante em que a tensão foi aplicada
 $t_{0,adj}$ – Idade do concreto no instante em que o carregamento é aplicado ajustado com o efeito da temperatura
 t_{0p} – Idade do concreto no início do carregamento para pilares
 $t_{0,T}$ – Idade do concreto no instante de aplicação da carga, corrigido com o efeito da temperatura
 t_{0vl} – Idade do concreto no início do carregamento para vigas e lajes
 t_{mat} – Tempo de existência do material
 t_{max} – Idade máxima do concreto na análise
 t_s – Idade do concreto no início da retração, equivalente a idade do concreto no final da cura
 $t_{1,T}$ – Idade de referência
 u – Perímetro da peça de concreto exposto ao meio ambiente
 u, v, w – Deslocamentos na direção dos eixos locais x, y e z, respectivamente
 $\{u\}$ – Vetor de deslocamentos nodais
 $\{u\}_i$ – Vetor de deslocamento da respectiva iteração
 $\{u\}_0$ – Vetor de deslocamento da última iteração da etapa anterior

III – LETRAS GREGAS

α, β, c_1 e c_2 – Parâmetros do material relacionados ao Critério de Ottosen

α_c – Coeficiente que depende do tipo de cimento

α_E – Coeficiente considerável em função do tipo de agregado

$\alpha_{sT}(T)$ – Fator que leva em consideração a espessura fictícia corrigido com a temperatura

a_{TS} – Parâmetro que define a inclinação do ramo descendente no diagrama de tração

$\beta(f_{cm})$ – Coeficiente que depende da resistência média à compressão do concreto

$\beta(t_{0,adj})$ – Coeficiente que depende da idade do concreto no instante de aplicação da carga

$\beta_c(t-t_0)$ – Coeficiente que depende da idade do carregamento $(t-t_0)$

$\beta_{cc}(t)$ – Coeficiente de ajuste em função da idade do concreto e do tipo de cimento

$\beta_E(t)$ – Coeficiente que leva em consideração o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo

β_H – Coeficiente que depende da umidade relativa do ambiente

$\beta_{RH,T}$ – Fator que depende da umidade relativa do ambiente ajustado com a temperatura

β_{sc} – Parâmetro que depende do tipo de cimento utilizado

$\beta_{s,RH}, \beta_{RH}$ – Fatores que dependem da resistência média à compressão do concreto

$\beta_s(t-t_s)$ - Fator dependente da idade da retração $(t-t_s)$

β_{sT} – Fator que considera a temperatura

γ_z – Parâmetro de instabilidade, indicado pela NBR 6118:2014

γ_μ – Deformação da μ – ésima unidade da cadeia de Kelvin

$\dot{\gamma}(t-t_0)$ - Taxa de microdeformação viscoelástica

Δ – Deslocamento

Δt_i – Número de dias onde a temperatura T prevalece

- $\{\Delta u\}_i$ – Vetor de incremento de deslocamentos nodais
- \mathcal{E} – Deformação total
- ε_c – Deformação do concreto em compressão
- $\varepsilon_c(t)$ – Deformação total
- $\varepsilon_{c,lim}$ – Deformação limite do concreto em compressão
- $\varepsilon_{cc}(t)$ – Deformação por fluência, resultante para um tempo $t > t_0$
- $\varepsilon_{ci}(t_0)$ – Deformação instantânea elástica e linear, devido a aplicação do carregamento no tempo t_0
- ε_{cr} – Deformação por fluência
- $\varepsilon_{cr,f}$ – Deformação elástica retardada
- $\varepsilon_{cr,fb}(t)$ – Deformação básica
- $\varepsilon_{cr,fd}$ – Deformação por secagem
- $\varepsilon_{cr,fi}(t)$ – Deformação rápida inicial
- $\varepsilon_{cn}(t)$ – Deformação independente da tensão
- $\varepsilon_{cs}(t)$ – Deformação por retração
- ε_{cs0} – Fator de retração que depende da idade do concreto e independe da idade da retração
- ε_{cTU} – Limite de deformação de tração
- $\varepsilon_{cT}(t)$ – Deformação térmica
- $\varepsilon_{c\sigma}(t)$ – Deformação dependente da tensão
- ε_{c1} – Deformação correspondente à máxima tensão em compressão
- $\varepsilon_{c,lim}$ – Deformação limite do concreto em compressão
- ε_e – Deformação Instantânea
- ε_f – Parcela viscosa (fluidez) da deformação por fluência

$\varepsilon_s(f_{cm})$ – Fator que depende da resistência média à compressão do concreto

$\varepsilon_{sh}(t)$ – Deformação por retração

$\varepsilon_{sh,e}(t)$ – Deformação por retração endógena

$\varepsilon_{sh,d}(t)$ – Deformação por retração por secagem

ε_v – Parcela viscoelástica da deformação por fluência

ε_t – Deformação nominal de tração na zona fissurada

ε_{tf} – Deformação de tração fictícia perpendicular à fissura

ε_T – Deformação por temperatura

ε_{uc} – Deformação última à compressão

ε_{ut} – Deformação última à tração

ε_0 – Deformação que independe da tensão (retração, térmica e por fissuração)

$\eta(t)$ – Viscosidade macroscópica aparente

η_0 – Viscosidade efetiva do cimento hidratado

η_μ – Viscosidade da μ –ésima unidade da cadeia de Kelvin

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ – Rotações em torno dos eixos locais x, y e z, respectivamente

θ' – Ângulo de similaridade do concreto

λ – Função no plano desviador, dependente de θ'

λ_t – Meridiano de tração

λ_c – Meridiano de compressão

ν – Coeficiente de Poisson

$\nu(t)$ – Fração de volume de concreto solidificado

σ – Tensão constante atuante no concreto

σ_c – Tensão principal de compressão

$\sigma_c(t_0)$ – tensão de compressão constante

σ_{c0} – Tensão aplicada no instante de tempo t_0

σ_t – Tensão no concreto tracionado

σ_{TOT} - Tensão total

σ_{ref} – Tensão interpolada correspondente à deformação ε_{ref}

σ_{com} e τ_{com} – Estado de ruptura sobre o meridiano de compressão

σ_1 - Tensão principal de tração

σ_{11} ; σ_{22} - Tensões principais

τ_d – Instante de tempo

τ_0 – Instante de tempo inicial

τ_1 – Instante de tempo posterior

τ_N – Tempo de retardamento à fluência da N –ésima unidade da cadeia.

τ_μ – Tempo de retardamento à fluência da μ –ésima unidade da cadeia.

$\phi(t, t_0)$ – Coeficiente de fluência

ϕ_{RH} – Coeficiente dependente da exposição da peça a umidade do ambiente

$\phi_{RH,T}$ – Coeficiente que depende da exposição da peça a umidade do ambiente corrigido com a temperatura

ϕ_T – Coeficiente que leva em consideração a temperatura

ϕ_0 – Coeficiente que depende da idade do concreto t_0 no instante em que a tensão foi aplicada

$\psi(t-t_0)$ – Coeficiente de fluência dependente da idade do carregamento

$\{\Psi\}_0$ – Incremento do carregamento externo

$\{\Psi\}_i$ – Vetor de forças residuais da respectiva iteração

$\{\Psi\}_{i-1}$ – Vetor de forças residuais da iteração “ $i - 1$ ”

κ – Número plástico

1 INTRODUÇÃO

Normalmente, as estruturas de concreto armado possuem ao término da obra, uma estrutura monolítica, como se fosse feita de uma só vez. Desta forma, torna-se razoável pensar que é preciso analisar somente a situação final da estrutura, quando esta estiver totalmente pronta e todos os carregamentos estiverem atuando. No caso de edifícios, entende-se que as condições estruturais durante a construção não necessitam de grande preocupação, pois, geralmente, as situações mais severas ocorrem na ocupação após a construção. Entretanto, podem existir situações críticas no decorrer do processo construtivo, em termos de segurança e estabilidade estrutural (HA; LEE, 2013).

Em sua grande maioria, os escritórios e programas de cálculo profissionais realizam o dimensionamento e detalhamento de edifícios já na sua condição final estrutural. Este tipo de análise é denominado de global, onde são aplicadas, de forma simultânea, todas as cargas de projeto em um modelo completo da estrutura, no qual todos os elementos estruturais são considerados de uma só vez, situação que não corresponde com a realidade construtiva.

O que de fato ocorre, é que o peso da estrutura e de outros elementos construtivos passa a atuar à medida que o edifício é construído, pavimento por pavimento. A consideração do sistema evolutivo da construção da edificação torna-se necessária para realizar uma análise estrutural mais próxima da realidade, assim como a contemplação das datas em que as diversas ações começam a atuar, os valores reais da resistência, do módulo de elasticidade e das características geométricas da estrutura até o momento.

Para simular esta situação, é proposta a análise faseada (*staged construction analysis*), na qual é possível obter os deslocamentos e forças em cada um dos estágios construtivos, e considerar os efeitos acumulativos destes, de um estágio para o outro. Este tipo de análise é comumente efetuado em projeto de estruturas de pontes. Isto se deve ao fato de que a estabilidade estrutural durante a construção é tão importante quanto da estrutura acabada (GRABOW, 2004 apud. HA; LEE, 2013), fazendo-se necessário a análise da estrutura para diversas fases da construção e para a situação final de obra concluída.

A análise faseada se difere da análise global da estrutura basicamente pelos seguintes aspectos: a consideração da sequência construtiva, contemplação dos efeitos reológicos

próprios do comportamento do material concreto, a evolução do módulo de elasticidade e da resistência (conforme a idade do concreto) e a fissuração que ocorre nas idades iniciais do concreto. A resistência do concreto varia ao longo do tempo, fato que interfere em todo procedimento construtivo. As especificações normativas e hipóteses de cálculo são feitas de forma que se deve considerar o valor pleno da resistência do concreto, dado aos 28 dias de idade (resistência característica), o mesmo ocorre com o módulo de elasticidade do concreto.

De forma resumida, o ideal seria:

- a) considerar a estrutura sendo construída de maneira evolutiva (pavimento por pavimento). Resolver, a cada tempo, a estrutura com o número de pavimentos existentes e o carregamento correspondente, o qual atua até o final da construção;
- b) durante o processo construtivo, considerar a análise da atuação e retirada dos escoramentos, levando em conta os valores adequados de resistência e deformação do concreto, que geralmente, possuem idade inferior aos 28 dias;
- c) considerar carregamentos incrementais, tanto para as ações permanentes quanto para as ações variáveis, de forma a avaliar de maneira mais precisa o estado da deformação da estrutura.

Atualmente, para que se possa levar em consideração esses efeitos e ações, é necessário a modelagem de diversos modelos de estrutura e cargas diferentes. Isto explica o porquê deste tipo de análise não ser comumente realizada em edifícios, principalmente em estruturas de pequeno e médio porte.

A grande discussão proposta nesta dissertação é verificar se existem diferenças significativas entre a realização da análise estrutural global e da análise estrutural faseada, no que concerne esforços e deslocamentos da estrutura. Para realizar a comparação entre as análises global e faseada, propôs-se um estudo sobre um edifício de cinco pavimentos, modelado por Rachinhas (2018). O modelo numérico é realizado fazendo uso do Método dos Elementos Finitos, através da plataforma ANSYS, versão 19.2, com licença disponível no laboratório CEMACOM (Centro de Mecânica Aplicada Computacional) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Neste *software*, utilizou-se a ferramenta de customização UPF (*User Programmable Features*) a fim de realizar a introdução de um novo modelo constitutivo para o concreto, possibilitando a representação do seu comportamento não-linear.

No presente trabalho, é adotado para o concreto o modelo constitutivo viscoelástico para análise do comportamento diferido e para carregamentos instantâneos é considerada a fissuração. O concreto possui comportamento diferente à tração e à compressão. Quando submetido à tração, o concreto se comporta como material elástico linear até a fissuração e, após considera-se a colaboração do concreto entre as fissuras, sujeito à compressão o material se comporta de forma elástica, devido a delimitações do modelo. O modelo viscoelástico adotado foi originalmente programado por Quevedo (2017). São realizados testes e exemplos de validação da rotina viscoelástica com fissuração.

Em relação à organização do trabalho, no **primeiro capítulo** é abordado um aspecto introdutório do tema de estudo, de maneira geral a contextualizar o leitor. No **segundo capítulo**, apresentaram-se as diretrizes da pesquisa vigente, versando sobre a motivação, os objetivos, as estratégias de pesquisa e delimitações do trabalho.

O **terceiro capítulo** contém uma detalhada fundamentação teórica, fornecendo uma revisão bibliográfica sobre o tema abordado, um contexto geral sobre edifícios, as cargas atuantes sobre estes, a questão das não-linearidades física e geométrica, a influência das lajes no comportamento do pórtico, o fenômeno de encurtamento axial dos pilares, as ligações viga-pilar, os conceitos sobre análise global e faseada, e uma abordagem sobre os aspectos gerais do concreto. Após, no **quarto capítulo**, são descritos os modelos constitutivos do material concreto e do aço.

Em sequência, no **quinto capítulo**, é abordado o conceito de análise numérica, o método dos elementos finitos e as particularidades do *software* ANSYS. O **sexto capítulo** trata dos testes e validações dos modelos constitutivos e ferramentas que foram utilizados. O **sétimo capítulo** disserta sobre o objeto de estudo, trazendo uma apresentação da estrutura, como foi realizada a consideração das etapas construtivas e o modelo numérico, juntamente com a análise da estrutura. Finalmente, o **oitavo capítulo** versa sobre as conclusões e considerações finais, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

O presente trabalho objetiva dar continuidade a diversos estudos, os quais vem sendo realizados no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Estes estudos tratam tanto da análise de estruturas de concreto armado quanto da utilização do *software* ANSYS, com a ferramenta de customização a partir de rotinas de cálculo externas, como por exemplo a tese de Lazzari (2016) e as dissertações de

Quevedo (2017), Barbosa (2017), Schmitz (2017), Jensen (2019), Medeiros (2019) e Araújo (2019).

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Neste capítulo, são abordados itens que explanam a pesquisa em um contexto geral, como os motivos para a sua realização, os objetivos definidos e qual estratégia de pesquisa foi adotada.

2.1 MOTIVAÇÃO E QUESTÃO DE PESQUISA

Atualmente, há um constante crescimento da construção de edifícios altos, devido à falta de área construtiva no meio urbano, sendo necessário investir nesta solução para que se possam satisfazer as necessidades de ocupação. Geralmente, é realizada uma análise global da estrutura de edifícios, a qual efetua a aplicação simultânea de todas as cargas de projeto em um dado modelo estrutural completo. Entretanto, o que ocorre de fato, é a construção por fases da estrutura e a aplicação sequencial de cargas, o que é abordado pela análise faseada.

Tanto a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), quanto as normas internacionais, não definem qualquer procedimento para a determinação da distribuição das ações de construção nas estruturas de edifícios em concreto armado com múltiplos pavimentos. O ACI – *Formwork for concrete* (1989) apenas recomenda o método descrito por Grundy e Kabaila (1963) para avaliar a distribuição das ações de construção (PRADO; CORRÊA, 2002).

Devido ao esforço normal ao qual estão sujeitos, os pilares tendem a sofrer deformação axial (encurtamento), efeito que se torna mais evidente quando se realiza a análise incremental de estruturas ao invés de uma análise global. Outro fator que influi na deformação axial dos pilares é a área de contribuição destes, visto que, a princípio os pilares que estão na “periferia” da planta comumente suportam menos carga do que os que estão no “interior” da planta (RACHINHAS, 2018).

Os encurtamentos axiais diferentes entre os pilares de um pavimento, geram como consequência, a imposição de deslocamentos verticais diferenciais aos elementos estruturais horizontais do pavimento (vigas e/ou lajes, por exemplo), os quais podem vir a originar esforços significativos. De acordo com Rachinhas (2018), caso existam elementos horizontais muito rígidos, pode ocorrer uma redistribuição de esforços com transferência de carga para pilares que deslocam menos. Outro fator que contribui para majoração da deformação axial dos pilares é a inserção dos efeitos reológicos do material concreto.

As deformações elásticas em um elemento estrutural são calculadas considerando a carga aplicada, a seção, o vão e o módulo de elasticidade do material. A inclusão dos efeitos diferidos na análise fará com que estas deformações aumentem com o passar do tempo, dependendo de outras variáveis, como dimensões e forma da seção dos elementos, razão de armadura, umidade relativa, consistência do concreto, duração de aplicação da carga e idade do concreto no início do carregamento (FINTEL, 1986 apud. HA; LEE, 2013).

Devido às deformações e diferenças de esforços entre as análises, tornam-se crescentes nas estruturas os efeitos de segunda ordem, os quais não devem ser desprezados. Perante os diversos fatores que contribuem para a existência de diferenças entre as análises global e faseada, poderão existir distinções nas armaduras calculadas e detalhadas para os elementos estruturais, fato que majora a importância do estudo que se pretende realizar, tanto no aspecto econômico quanto no que se refere a segurança estrutural. A questão de pesquisa a ser respondida neste trabalho é: quais são as diferenças no que concerne esforços e deformações entre os resultados obtidos para a análise estrutural de um edifício de vários pavimentos, utilizando a análise global e a análise faseada?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O **objetivo principal** desta pesquisa consiste em constatar, analisar e quantificar as diferenças em termos de esforços e deformações, entre a análise global de estruturas de edifícios (efetuada com modelo completo da estrutura) e a análise faseada (realizada em etapas, utilizando os modelos parciais da estrutura), de um edifício de vários pavimentos. Visando atingir o objetivo principal, é necessário alcançar alguns **objetivos secundários**, os quais são:

- a) adaptar o modelo viscoelástico para o concreto, desenvolvido por Quevedo (2017) e inserir o regime elastoplástico referente a introdução da fissuração;
- b) validar o modelo mecânico utilizado, através de testes e comparações com modelos experimentais;
- c) inserir o modelo de estudo no *software* TQS, a fim de extrair as armaduras que serão necessárias nos pilares, vigas e lajes;

- d) programar o modelo numérico do objeto de análise, no *software* ANSYS, via elaboração de *script*.

2.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os edifícios geralmente estão sujeitos a ações dinâmicas, mas, neste trabalho serão analisadas apenas situações com **ações estáticas**. Em relação ao objeto de estudo desta dissertação, o **edifício de cinco pavimentos**, foi estudado por Rachinhas (2018).

No que diz respeito à **sequência construtiva** adotada, esta foi fornecida por um engenheiro local, a partir da realidade regional de construção. A sequência segue o cronograma de uma **construção padrão**, com pilares, vigas e laje maciça em concreto armado. O cronograma de obra nem sempre é seguido à risca, devido ao surgimento de imprevistos. Nesta dissertação manteve-se a **velocidade de construção constante**.

Quanto ao uso de escoras, optou-se por realizar somente as etapas de inserção e retirada, não foi programada a etapa de **alívio de escoras**, devido a uma simplificação do modelo. Relacionado a uma limitação do elemento *Beam189*, nesta dissertação não é realizada a **inserção dos estribos** nas vigas e pilares, sendo assim, utilizou-se somente o aço CA-50. No que concerne aos **nós de pórtico**, como uma delimitação, estes foram modelados de maneira rígida.

O modelo viscoelástico representa os fenômenos de fluência e retração, e é determinado pelas formulações do CEB-FIP MC90. Por simplificação, **a temperatura e a umidade são consideradas constantes** ao longo das análises, portanto, não se considera a sensibilidade da fluência e da retração frente à variação destes parâmetros.

Utiliza-se para o **concreto em compressão** o modelo elástico linear, pois as cargas atuantes em edifícios geralmente encontram-se no estado limite de serviço (ELS). Considera-se o modelo de viscoelasticidade para o concreto, a partir da programação desenvolvida por Quevedo (2017). Esta programação está de acordo com as formulações apresentadas pelo Comité Euro-International du Béton (1993) o qual é compatível com as formulações expostas na teoria da solidificação de Bazant e Prasannan (1989a, 1989b), conforme Quevedo (2017). De acordo com o CEB-FIP MC90 para utilizar a formulação de viscoelasticidade de maneira correta, o limite de tensão é de 40% da resistência média à compressão f_{cm} . Caso as tensões

internas estejam acima da validade do formulário do CEB-FIP MC90, os resultados podem vir a subestimar a não-linearidade entre a deformação diferida no tempo e a tensão.

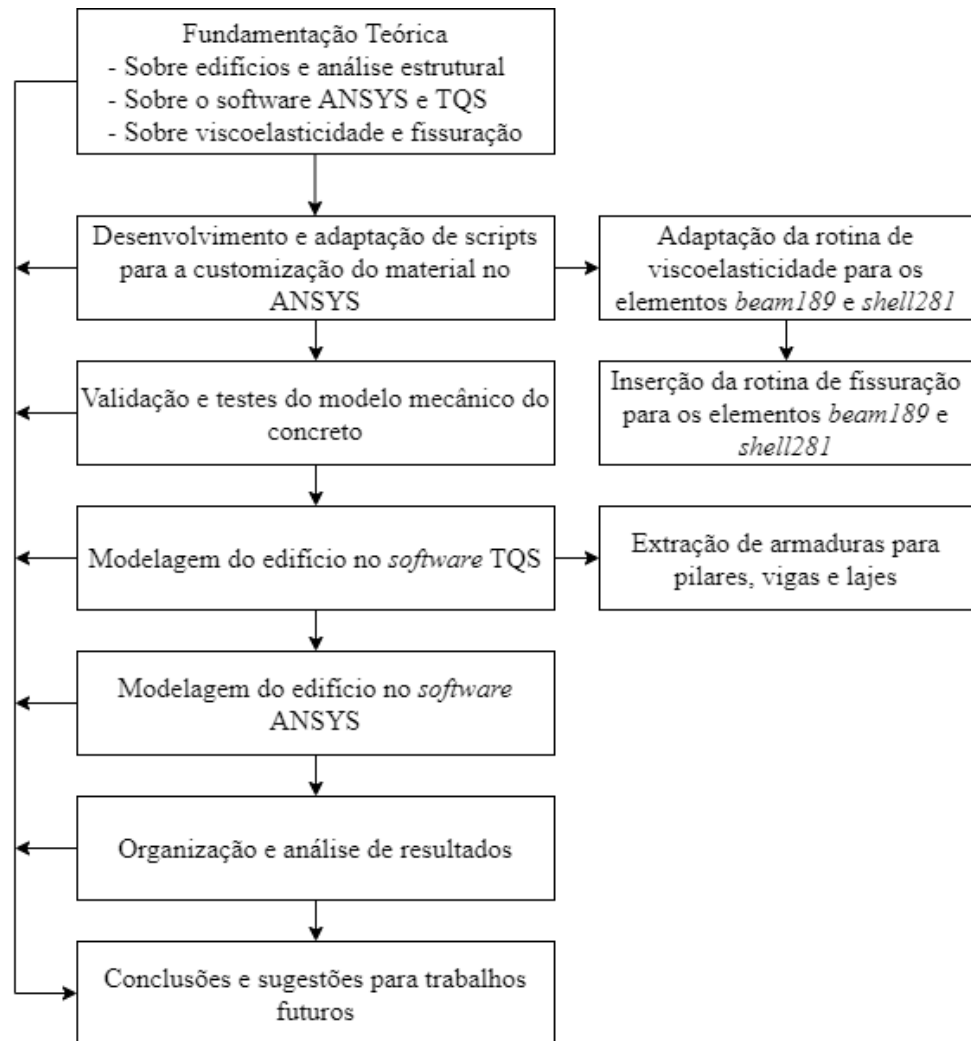
2.4 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A presente pesquisa se desenvolveu através das seguintes etapas:

- a) extensa fundamentação teórica sobre: edifícios e análise estrutural, *softwares* ANSYS e TQS, modelo mecânico dos materiais (viscoelasticidade e fissuração). Esta etapa foi desenvolvida durante todo o processo da dissertação;
- b) compreensão do *software* ANSYS (suas respectivas ferramentas) e do Método dos Elementos Finitos na análise de estruturas de concreto, associado a sub-rotinas externas na representação de modelos constitutivos através da ferramenta UPF, em específico a sub-rotina *Usermat*;
- c) estudo e elaboração de *scripts* para introdução do modelo mecânico dos materiais: Adaptação da programação da viscoelasticidade de Quevedo (2017) para os elementos *Beam189* e *Shell281*, e inserção da fissuração na rotina;
- d) realização de testes e validações do modelo mecânico da estrutura;
- e) entendimento e modelagem do edifício de cinco pavimentos no *software* TQS: Extração das armaduras utilizadas em pilares, vigas e lajes;
- f) modelagem do edifício de cinco pavimentos no *software* ANSYS: Organização e análise dos resultados;
- g) conclusões sobre as análises e sugestões para trabalhos futuros.

A Figura 2.1 ilustra o organograma com a relação das etapas durante a confecção do trabalho.

Figura 2.1 – Organograma das etapas do projeto de pesquisa.



3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo versa sobre a fundamentação teórica que embasou esta dissertação. Serão abordados diversos tópicos, como um contexto geral sobre edifícios e as cargas atuantes neste tipo de estrutura, as não-linearidades física e geométrica, a influência das lajes no comportamento do pórtico, o efeito de encurtamento axial nos pilares e as ligações viga-pilar. Discorre-se sobre o concreto armado, as características e diferenças da análise estrutural global e faseada. Por fim, apresenta-se um apanhado de estudos anteriores, os quais compõem a revisão bibliográfica.

3.1 CONTEXTO GERAL: EDIFÍCIOS

O advento da construção de edifícios se tornou possível devido à invenção de diversas tecnologias que trouxeram mudanças significativas nos materiais de construção, que passaram de madeira e alvenaria, a estruturas de aço com vedação leve. Anteriormente a esta evolução, os edifícios eram demasiadamente limitados em relação à sua altura, devido à espessura e ao peso das paredes de alvenaria (HALLEBRAND; JAKOBSSON, 2016).

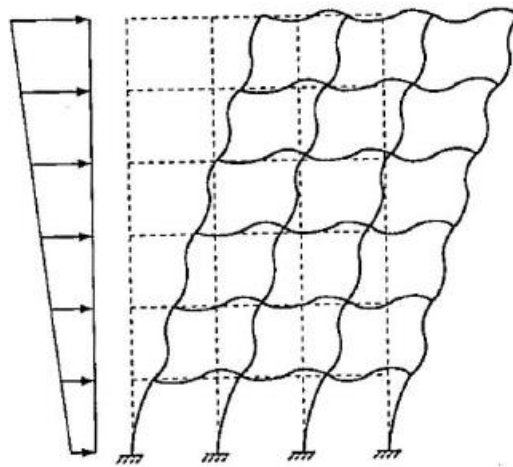
A opção pela construção de edifícios está claramente associada à falta de espaço que se verifica nas grandes cidades, surgindo como forma de satisfazer os requisitos de ocupação do terreno. No que concerne à altura, não há um conceito estabelecido para definir edifícios altos. A classificação da altura de um edifício está associada ao meio no qual ele se encontra, a arquitetura regional e os métodos de dimensionamento e construção (REIS, 2014).

Segundo Pereira (2011), as edificações de grande altura são relativamente novas cronologicamente na construção civil. Assim, por consequência, as reais diferenças entre as formas de análise estrutural e a sua influência no desempenho e na vida útil das edificações, são ainda temas pouco explorados. De acordo com Reis (2014), os edifícios possuem uma tipologia complexa e não há uma solução estrutural padrão para este tipo de construção, a cada dia são elaboradas novas soluções construtivas, as quais se baseiam em sistemas híbridos.

Taranath (2010), diz que cada sistema estrutural tem sua altura econômica, a partir da qual se faz necessário utilizar outro tipo de sistema, por conseguinte, a escolha deste é dependente

da altura total da edificação. Os sistemas estruturais mais utilizados são: o sistema de pórtico, parede/núcleo simples, núcleo associado a pórtico, sistema de treliças e sistema tubular. Neste trabalho de dissertação, o modelo utilizado para o estudo possui sistema estrutural de pórtico. Este sistema estrutural é clássico e inclui apenas elementos horizontais e verticais, apresentando uma deformada conforme ilustrado na Figura 3.1. De acordo com o CTBUH (1995), o sistema estrutural em pórtico é uma solução para edifícios de até 20-30 pavimentos.

Figura 3.1- Deformada típica de um sistema em pórtico.



(fonte: Adaptado de CTBUH, 1995 apud. REIS, 2014)

3.2 CARGAS ATUANTES EM EDIFÍCIOS

A estrutura de um edifício deve ser projetada de modo que se verifique segurança, relativa aos efeitos que resultam da combinação das diversas ações que a solicitam. Essa segurança deve ser verificada em relação aos Estados Limites Últimos (ELU), de cuja ocorrência pode resultar prejuízos severos para o edifício, e aos Estados Limites de Serviço (ELS), que apesar de sua ocorrência não resultar prejuízos graves para a construção é de extrema importância.

A transmissão das cargas verticais em um edifício ocorre por meio dos elementos estruturais. Estes, transmitem as cargas das lajes para as vigas, e das vigas para os pilares, paredes resistentes, núcleos de elevador/escadas, os quais, por sua vez, conduzem estas ações para as fundações.

As ações que solicitam a estrutura podem ser classificadas de diversas maneiras, e de acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), em relação a sua recorrência e ao tempo no qual elas assumem valores significativos. As ações podem ser classificadas como: permanentes, variáveis e excepcionais.

As ações permanentes correspondem às cargas que assumem valores praticamente constantes (ou aquelas que aumentam o seu valor com o tempo, tendendo a um valor limite constante) durante toda a vida da construção, sendo divididas em diretas e indiretas. As ações permanentes diretas compreendem o peso próprio da estrutura, por exemplo. Já nas ações permanentes indiretas, podem-se citar os efeitos diferidos do concreto e as imperfeições geométricas.

As ações variáveis são aquelas cujos valores possuem variações significativas ao longo da vida da estrutura e são divididas em: diretas e indiretas. Compreendem as ações variáveis diretas, as cargas acidentais previstas para o uso da construção, sendo elas pela ação do vento e da água. Nas ações variáveis indiretas, estão as variações uniformes/não uniformes de temperatura e as ações dinâmicas. Por último, as ações excepcionais, cujos efeitos são extremamente difíceis de ser controlados, tais como explosões, choques, incêndios ou qualquer outro sinistro.

Conforme a NBR 6120:2019 (ABNT, 2019), as cargas decorrentes do uso da edificação são definidas como cargas distribuídas por metro quadrado, nos pisos dos edifícios, conforme o tipo de uso previsto. Os valores destas ações possuem uma variação significativa ao longo da vida útil das estruturas.

Cabe destacar como ação variável indireta, por exemplo, um gradiente de temperatura entre as superfícies externas e internas da construção, o qual pode vir a provocar alguma variação de deformação nos materiais, que por sua vez, pode gerar o surgimento de tensões e fissuras, as quais são considerados importantes agentes aceleradores da degradação dos materiais. A redução progressiva da rigidez dos elementos estruturais pode acarretar um encurtamento vertical dos pilares, fenômeno dependente do nível de tensão, arranjo/dimensionamento das armaduras e múltiplas propriedades inerentes do material constituinte (KWAK; KIM, 2006).

3.3 NÃO-LINEARIDADE FÍSICA E GEOMÉTRICA

Conforme Santos (2016), a consideração da não-linearidade física e geométrica é de extrema importância na análise da estabilidade global das estruturas. A inserção destes efeitos, podem vir a gerar maiores deslocamentos, apresentando um comportamento de maior criticidade na edificação, agravando a situação de estabilidade global desta.

O concreto armado, devido a sua composição heterogênea, apresenta comportamento não-linear físico. Desta maneira, tanto sob tração quanto sob compressão, a relação tensão-deformação do concreto armado é não-linear, principalmente devido à sua baixa resistência à esforços de tração, que leva a fissuração dos elementos estruturais submetidos à momentos fletores (KIMURA, 2007). A não-linearidade física é um dos fatores mais complexos de serem representados em um modelo de análise estrutural, e seus efeitos podem ser considerados de maneira aproximada, conforme indicação da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), utilizando o método da rigidez equivalente e diagramas momento.

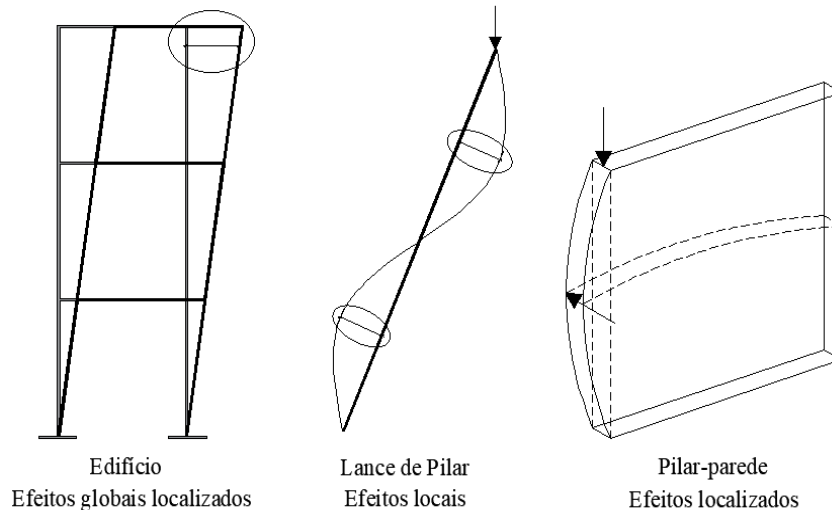
Neste trabalho, para realizar a representação do comportamento do concreto armado, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos para discretização da estrutura, empregando-se o uso de modelos constitutivos. Estes modelos são abordados com maior profundidade no Capítulo 4.

No que concerne a não-linearidade geométrica, cabe contextualizar os efeitos de primeira ordem, os quais são existentes nas estruturas, considerando a posição indeformada destas (SANTOS, 2016). As estruturas de concreto armado, ao sofrer deformações devido às cargas atuantes, mudam a sua configuração geométrica inicial. Quando esta alteração é pequena, pode-se desprezá-la, mas, se os deslocamentos e a conseqüente alteração da configuração inicial forem consideráveis, esta afeta de forma significativa as tensões e o equilíbrio da estrutura. Deve-se, então, considerar o equilíbrio da estrutura em relação à sua configuração deformada, levando-se em conta, a não-linearidade geométrica na formulação das equações de equilíbrio estrutural (JUNGES, 2016). Os efeitos adicionais oriundos da consideração da posição deformada da estrutura, são chamados de efeitos de 2ª ordem.

A estabilidade global de uma estrutura, está diretamente associada com a capacidade desta em absorver os efeitos de 2ª ordem. De acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), os

efeitos de 2ª ordem podem ser classificados em: globais, locais e localizados, conforme Figura 3.2.

Figura 3.2- Efeitos de 2ª ordem.



(fonte: Baseado em KIMURA, 2007 apud. SANTOS, 2016)

Os efeitos locais estão associados a uma parte isolada da estrutura, já os efeitos localizados referem-se a uma região específica de um elemento na qual se concentram tensões. No que concerne os efeitos globais, estes estão relacionados ao edifício como um todo, isto é, ao conjunto completo formado pelos pilares, vigas e lajes. A consideração da não-linearidade geométrica, de maneira simplificada, na análise global de pórticos de edifícios pode ser realizada por diferentes métodos. Alguns métodos são mais conhecidos, como o método da matriz de rigidez geométrica e o método $P-\Delta$, os quais podem ser vistos na NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).

De acordo com a norma supracitada, existem nas estruturas três tipos de instabilidade, sendo no presente trabalho abordada a última opção:

- nas estruturas sem imperfeições geométricas iniciais, pode haver perda de estabilidade por bifurcação do equilíbrio (flambagem);
- em situações particulares (estruturas abatidas), pode haver perda de estabilidade sem bifurcação do equilíbrio por passagem brusca de uma configuração para outra reversa da anterior (ponto-limite com reversão);

- c) em estruturas de material de comportamento não-linear, com imperfeições geométricas iniciais, não há perda de estabilidade por bifurcação do equilíbrio, podendo, no entanto, haver perda de estabilidade quando, ao crescer a intensidade do carregamento, o aumento da capacidade resistente da estrutura passa a ser menor do que o aumento da sollicitação (ponto-limite sem reversão).

3.4 INFLUÊNCIA DAS LAJES NO COMPORTAMENTO DO PÓRTICO

Quando um edifício usual em concreto armado é submetido a ações horizontais, como o vento, este se desloca lateralmente. As cargas laterais que atuam na fachada do edifício são transmitidas para as lajes, que atuam como diafragmas, redistribuindo as cargas para os pilares e para os pilares-parede (quando houver), os quais possuem alta rigidez ao cisalhamento (BRISOT, 2001).

Os pavimentos de um edifício, são formados basicamente por planos de lajes apoiados em vigas e pilares, que se deslocarão em conjunto. Caso a rigidez horizontal no plano de lajes seja alta, cada pavimento irá se deslocar como um bloco rígido horizontalmente. Com este comportamento, na análise de pavimentos de edifícios, pode-se admitir a hipótese de que o plano de lajes forma um diafragma rígido (JUNGES, 2016).

Ainda de acordo com Junges (2016), quando se considera o plano de lajes como diafragma rígido, a distribuição de cargas laterais é feita proporcionalmente à rigidez dos pilares. As lajes do tipo maciça são usualmente consideradas como diafragma rígido. Saffarini e Qudaimat (1992) e, posteriormente, Ju e Lin (1999), realizaram estudos em relação à modelagem das lajes por diafragma rígido ou por modelo flexível. Estes, concluíram que para edifícios sem pilares-parede a hipótese simplificadora de diafragma rígido é aceitável, porém, para edifícios com pilares-parede a diferença entre ambos modelos, se torna significativa.

No que concerne a modelagem das lajes, esta destina-se tanto à sua própria análise quanto para a análise da transmissão das cargas verticais nelas atuantes, para o pórtico. A modelagem destes elementos pode ser baseada em diferentes hipóteses e modelos teóricos. Uma opção é a utilização do Método dos Elementos Finitos, no qual é realizada a modelagem dos planos de laje com elementos finitos planos (casca, placas ou a associação de ambos) ou elementos sólidos.

A contribuição das lajes na rigidez das vigas, o comportamento conjunto existente entre laje e viga, faz com que a viga e as partes da laje ao longo da lateral da viga, estejam submetidas às mesmas deformações longitudinais de flexão, o que ocorre devido à ligação resistente à força cortante. Devido a este comportamento conjunto, as faixas de laje em torno da viga contribuem na rigidez à flexão da viga. Esta largura colaborante varia ao longo do comprimento da viga, sendo menor em apoios externos, apoios intermediários, e em regiões de cargas concentradas (LEONHARDT, 1982).

3.5 EFEITO DE ENCURTAMENTO AXIAL DOS PILARES

Ao decorrer do período construtivo de um edifício, pode haver um encurtamento axial da estrutura, chegando a apresentar centenas de milímetros de encurtamento nos níveis mais altos da edificação (BAKER, 2007 apud HA; LEE, 2013). Algumas ações que solicitam as estruturas, geram deformações que provocam encurtamentos axiais diferenciais entre os pilares em concreto armado de uma edificação. Estas deformações axiais não ocorrem instantaneamente, e possuem tendência a causar desvios verticais e horizontais na geometria do edifício. Estas imperfeições geométricas podem vir a gerar consequências em termos de esforços nos elementos estruturais, afetando assim, a segurança estrutural (KWAK; KIM, 2006).

Os pilares em concreto armado são amplamente empregados, devido a facilidade de conexão entre os elementos estruturais, e por apresentar os mesmos efeitos diferidos que os núcleos de rigidez, que geralmente são construídos em concreto armado. Dentre as vantagens de se utilizar este tipo de pilar, estão o menor custo, a boa resistência à compressão, a robustez, a estabilidade contra agentes agressivos e o elevado peso próprio, que pode ser vantajoso por conferir uma maior estabilidade estrutural ou desvantajoso por ter uma maior carga vertical. Nas desvantagens, estão a falta de resistência à tração, o custo associado ao uso de fôrmas, os efeitos diferidos próprios do material constituinte e um maior tempo de construção, devido à cura do concreto (REIS, 2014).

Na estrutura de um edifício, os pilares externos e internos possuem diferentes áreas de contribuição, a chamada área de influência. Em geral, um pilar externo é carregado com aproximadamente metade da carga aplicada a um pilar interno, sendo esta uma das principais causas do efeito de encurtamento axial diferente entre os pilares. Em relação à seção

transversal, mesmo havendo cargas diferentes nos pilares externos e internos, é usual adotar seções muito semelhantes, pois os pilares externos são mais solicitados por momentos de tombamento, gerados por ações horizontais, como por exemplo, ventos e sismos (DAS; PRASEEDA, 2016).

Os pilares possuindo seções transversais semelhantes, as deformações axiais serão superiores nos pilares mais carregados. Desta forma, existindo elementos horizontais de grande rigidez, como por exemplo uma viga de grande inércia, pode ocorrer uma redistribuição dos esforços, com transferência de carga para os pilares com encurtamento axial menor. O efeito das ações que causam o encurtamento axial, depende do comportamento dos elementos verticais e da rigidez dos elementos horizontais.

Por volta dos anos 70, nos Estados Unidos, o efeito de encurtamento axial dos pilares, passou a ser incluído no estudo de análise estrutural faseada, para edifícios de grande altura. Este efeito, pode ocorrer durante as fases de construção e após a conclusão da mesma (HA; LEE, 2013). De acordo com Pereira (2011), o encurtamento axial decorre com os anos, a uma taxa de evolução decrescente.

A consideração da análise incremental em edifícios, gera uma relevante contribuição na deformação axial dos pilares, a qual pode vir a apresentar diferenças significativas quando comparada com a deformação axial avaliada pela análise global (REIS, 2014). Parte destas diferenças surge devido à ampliação das deformações axiais, resultante da inserção dos efeitos diferidos do concreto na análise faseada (DAS; PRASEEDA, 2016).

Quando se considera um carregamento global, assume-se que os elementos verticais sofrem uma deformação axial em toda a sua altura, o que corresponde a totalidade da carga instalada (REIS, 2014). Segundo Kim e Shin (2011), o fenômeno de encurtamento axial pode ser estimado para os pilares, considerando a amarração destes em estruturas rígidas. O movimento axial ou lateral da estrutura de um edifício, pode provocar problemas em elementos estruturais que são essenciais para a estabilidade e resistência da construção.

3.6 LIGAÇÕES VIGA-PILAR

Conforme a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), a análise estrutural deve ser feita a partir de um modelo adequado ao objetivo da análise. Desta forma, quando se realiza a análise da

estabilidade global da edificação, deve ser conhecida a influência da rigidez dos nós de um pórtico no seu comportamento global, sendo necessária a adoção de um modelo adequado que considere esta influência. A efetiva compreensão da influência da rigidez das ligações viga-pilar no comportamento estrutural, poderá contribuir para o desenvolvimento de projetos estruturais mais próximos à realidade do comportamento das edificações, a favor da segurança estrutural.

Para assegurar a estabilidade global de um edifício, é necessário dispor de rigidez adequada dos elementos estruturais, os quais vão resistir às ações horizontais e verticais impostas na estrutura. A rigidez das ligações viga-pilar em estruturas de concreto armado, deve ser considerada na etapa de análise estrutural, avaliando sua influência no comportamento estrutural (SANTOS, 2016).

As ligações viga-pilar, também chamadas de nós de pórtico, são regiões de comportamento estrutural muito complexo, onde ocorrem concentrações de tensões tanto normais como tangenciais. Muitas variáveis influenciam na capacidade resistente do nó, como o detalhamento das armaduras, a geometria dos elementos conectados, a intensidade das solicitações e a resistência dos materiais concreto e aço (ALVA, 2004).

Conforme Santos (2016), o conhecimento do comportamento estrutural das ligações viga-pilar é fundamental, para que, frente aos esforços solicitantes, seja realizado um dimensionamento adequado. A rigidez das ligações possui influência na capacidade de transmissão de momentos fletores das mesmas. Conceitualmente, a classificação das ligações quanto à rigidez à flexão é dada por:

- a) articuladas: são as ligações que não transmitem momentos fletores;
- b) rígidas: são as ligações que transmitem momentos fletores;
- c) semirrígidas: são as ligações que transmitem parcialmente momentos fletores.

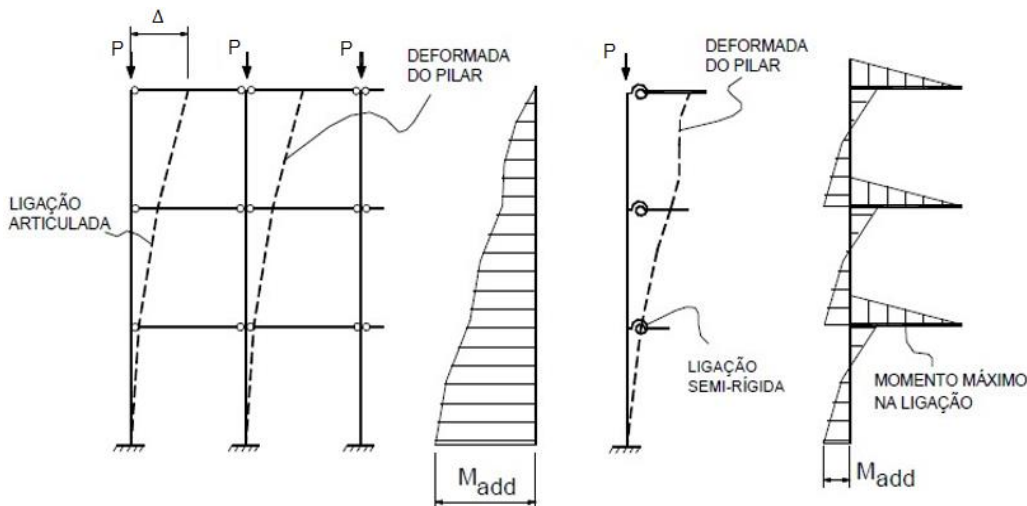
As estruturas de concreto moldado *in loco*, possuem, geralmente, ligações mais rígidas que as ligações de concreto pré-moldado, devido a existência de continuidade entre os elementos estruturais, fato que confere monolitismo à estrutura. No entanto, ensaios experimentais em nós de pórtico em concreto armado moldado *in loco*, evidenciam a existência de rotações relativas entre vigas e pilares, causadas pelo deslizamento das armaduras longitudinais das

vigas no interior dos nós de pórtico e pela fissuração do concreto. Estas rotações relativas provocam uma redução de rigidez no nó, de acordo com os trabalhos de Ferreira (1999) e Alva (2004).

Ocorre então, um engastamento parcial na ligação, o que, conseqüentemente, origina uma redistribuição de esforços e deformações nos elementos pertencentes à ligação viga-pilar. Isto posto, a consideração de ligações rígidas para concreto armado moldado *in loco*, acaba por superestimar a rigidez das ligações e, como consequência, subestimar os deslocamentos horizontais da estrutura, causando além dos impactos locais, alterações no comportamento global da edificação, devido à modificação estrutural frente às ações horizontais.

Pode-se concluir, então, que o comportamento real de ligações viga-pilar monolíticas em concreto armado não é perfeitamente rígido, mas sim, transmite parcialmente os momentos fletores. A Figura 3.3 ilustra a influência das ligações semirrígidas no comportamento global da estrutura.

Figura 3.3 - Influência das ligações semirrígidas no comportamento global.



(fonte: FERREIRA, 1999)

Os principais programas de cálculo estrutural disponíveis no mercado, disponibilizam como recurso a modificação da rigidez das ligações viga-pilar, por meio de um fator de engastamento parcial. Esta alteração na rigidez da ligação é considerada na análise estrutural do pórtico espacial, impactando na estabilidade global da estrutura, e no dimensionamento dos elementos estruturais. O programa TQS considera nos pórticos espaciais, a presença de

molhas nas extremidades das vigas, realizando a simulação da ligação viga-pilar de maneira mais real. Nesta dissertação, apesar de considerar os efeitos da fissuração, como uma delimitação do estudo, foi adotada conexão rígida entre vigas e pilares.

3.7 ANÁLISE ESTRUTURAL GLOBAL E ANÁLISE ESTRUTURAL FASEADA

A análise estrutural é uma etapa primordial no projeto estrutural de uma edificação em concreto armado. Ela consiste em obter o comportamento da estrutura perante as ações atuantes, determinando as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos na estrutura, realizando-se verificações aos Estados Limites Últimos (ELU) e aos de Serviço (ELS) na estrutura.

O modelo estrutural utilizado para realizar a análise estrutural deve representar a geometria dos elementos estruturais, os carregamentos atuantes, as condições de contorno, as características e respostas dos materiais. Com os resultados obtidos na análise estrutural, é possível realizar o dimensionamento da estrutura, de forma que seja viável executar o detalhamento do projeto estrutural. Se o modelo estrutural utilizado na análise não for adequado, podem-se obter respostas que não condizem com a realidade da edificação em serviço, colocando em risco a segurança estrutural (SANTOS, 2016).

A análise global da estrutura completa, também nomeada de análise geral, é comumente utilizada na análise de edifícios. Nesta, considera-se um modelo da estrutura completa, como se todos os elementos estruturais fossem construídos de maneira simultânea. Neste caso, o peso próprio de um pavimento qualquer origina esforços tanto nos elementos dos pavimentos inferiores, quanto nos elementos dos pavimentos superiores (que de fato ainda não estão construídos quando esta carga começa a atuar).

A análise considerando as fases construtivas é geralmente empregada no caso de estruturas de pontes, sobretudo quando se adota o método construtivo dos balanços sucessivos. Neste caso, existe uma diferença notória entre o sistema estrutural durante a construção, e o sistema estrutural quando a obra é de fato concluída, de modo que a verificação da sua segurança e estabilidade durante o período construtivo é tão relevante quanto após a conclusão (HA; LEE,

2013). Na Figura 3.4 está ilustrada a Ponte Octávio Frias de Oliveira, em São Paulo, a qual utilizou o método dos balanços sucessivos.

Figura 3.4 – Construção da Ponte Octávio Frias de Oliveira, em São Paulo/Brasil.



(fonte: <https://tempestivo.files.wordpress.com/2008/11/ponte20de40be1.jpg>)

Segundo Pranay, Sreevalli e Kumar (2015) a análise estrutural, considerando os estágios construtivos, também pode ser denominada como, faseada, incremental, sequencial ou segmentada. Nos anos 70, a análise faseada foi desenvolvida para edifícios de grande altura e focada principalmente na análise de encurtamento axial de pilares (FINTEL, 1986 apud. HA; LEE, 2013). Em edifícios usuais, não é comum realizar a análise estrutural considerando as fases da construção.

Os efeitos da adoção da análise faseada são escassamente investigados, por este ser um tema pouco explorado. No entanto, sabe-se que este fenômeno se torna mais relevante com o aumento de altura do edifício, e que possíveis diferenças de deslocamentos verticais, em virtude da construção por fases, podem vir a gerar efeitos nos esforços finais da estrutura, os quais devem ser levados em conta no dimensionamento dos elementos estruturais. Pode haver também, influência nos efeitos de 2ª ordem, os quais adquirem maior importância à medida que a altura da estrutura aumenta (REIS, 2014). Conforme Prado (1999) as ações presentes durante as etapas construtivas de uma edificação em concreto armado são significativamente

influenciadas pelos processos construtivos, podendo ultrapassar as capacidades resistentes definidas pelo projeto estrutural na data em que ocorrem.

São grandes influenciadores nos resultados advindos da análise faseada: os efeitos diferidos, a resistência do concreto, vão e seção dos membros estruturais e o tempo de construção, ou seja, o ciclo construtivo de cada pavimento. Freitas (2004) afirma que o conhecimento das propriedades do concreto jovem, das ações ocorridas durante a construção e das deformações impostas por essas ações são relevantes para a verificação dos estados limites último e de serviço de uma estrutura.

A consideração das fases da construção permite que haja a definição de etapas nas quais é possível adicionar e/ou remover partes da estrutura, aplicar cargas sequencialmente e considerar os efeitos dependentes do tempo (PRANAY; SREEVALLI; KUMAR, 2015). O processo de consideração do faseamento construtivo é de suma importância, posto que, a não contemplação deste processo em estruturas em concreto armado pode levar a resultados incompatíveis com o real comportamento da estrutura (KWAK; KIM, 2006).

Entende-se que um edifício é construído pavimento a pavimento, sendo assim, a estabilidade da estrutura varia a cada estágio da construção. Na análise faseada, considera-se que o peso próprio da estrutura é aplicado progressivamente, como de fato ocorre, sendo as cargas aplicadas a modelos que, em cada fase da construção, são parciais, não tendo ainda todos os elementos estruturais do edifício completo.

A aplicação progressiva do peso próprio é efetuada estipulando que o peso próprio de um pavimento atue sobre a estrutura até então construída, sem que haja pavimentos superiores construídos (estrutura completa), diferentemente da análise global (HA; LEE, 2013). Sintetizando, parte da carga é aplicada sequencialmente durante a construção e parte da carga é aplicada após a conclusão da estrutura (PRANAY; SREEVALLI; KUMAR, 2015).

Segundo Delgado (2004) apud. Reis (2014), as principais diferenças do efeito da construção faseada nos esforços finais da estrutura, são advindas de que quando um pavimento é construído, não existem os pavimentos acima dele, o que implica que este pavimento em questão deforma sem que haja a interferência dos pavimentos superiores. Já os pavimentos inferiores interferem na deformada dos pavimentos a construir, no que concerne a deformação axial e a rotação das bases dos pilares. A deformação axial diferencial entre

pilares, não é um aspecto desprezável e pode gerar grandes alterações nos esforços, nos diversos elementos do pavimento em questão (FINTEL,1986 apud. HA; LEE, 2013).

Na análise faseada pode-se observar a formação de fissuras prematuras em elementos estruturais. Estas podem acarretar maiores deformações ao longo do tempo, juntamente com uma deterioração mais rápida da estrutura. As ações de construção normalmente solicitam o concreto antes que este tenha atingido as características de resistência e deformabilidade previstas aos 28 dias, usadas normalmente no desenvolvimento do projeto estrutural.

Atualmente, existem *softwares* que simulam o efeito do faseamento construtivo (SAP2000, MIDAS, ETABS), mas tal análise é complexa, requerendo mais tempo e recursos computacionais do que a análise global da estrutura, realizada com carregamento imediato (REIS, 2014). Um exemplo de edifício que utilizou a análise estrutural considerando as fases da construção, foi o Burj Khalifa, visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Burj Khalifa, Dubai/Emirados Árabes Unidos.



(fonte: <https://www.burjkhalifa.ae/en/>)

3.8 CONCRETO ARMADO

No que concerne à sua composição, o concreto é formado essencialmente a partir da mistura de agregados, cimento e água. Sua resistência final é influenciada, dentre outros fatores, pela

relação água-cimento empregada, os tipos de agregados e o grau de adensamento. Define-se o concreto como um pseudo sólido que apresenta o comportamento combinado de três tipos reológicos básicos: elástico, plástico e viscoso (MONTROYA, 2000).

Ao se aplicar uma tensão no concreto este sofre uma deformação instantânea. É observado experimentalmente que, mesmo com a tensão constante, conforme avança o tempo, as deformações continuam evoluindo, caracterizando assim o seu comportamento viscoso. Ao se retirar a carga parte da deformação é recuperada instantaneamente e outra parte é recuperada lentamente, restando ainda uma deformação residual (irreversível). Além disso, é observado também que mesmo com a ausência de carga, o concreto tende a diminuir de volume e ganhar resistência. As principais propriedades mecânicas do concreto são afetadas por fenômenos de natureza aleatória, os quais podem ser atribuídos à falta de homogeneidade da mistura, ao comportamento da micro-estrutura, à variabilidade dos materiais que o constituem e pelas condições de cura (FUSCO, 2008).

O concreto apresenta uma relação entre tensão-deformação extremamente não-linear, devido aos efeitos de fissuração e plastificação, quando submetido a solicitações externas. Em relação ao aço, este possui um comportamento elastoplástico, visto que, pode ser considerado o encruamento, logo, também é não linear.

No presente trabalho será utilizado o modelo proposto pelo Comité Euro-International du Béton (1993): CEB-FIP Model Code 1990, conforme Capítulo 4. Tal modelo se encaixa na teoria da solidificação de Bažant e Prasannan (1989a, 1989b), de acordo com Quevedo (2017). A formulação do CEB-FIP MC90 separa o fator do coeficiente de fluência que depende do envelhecimento (idade do concreto) do fator de fluência que depende do tempo de aplicação da carga (idade da carga), assim como na formulação de Bažant e Prasannan (1989a, 1989b). Esta separação não ocorre na formulação atual feita pela Fédération International du Béton (2010), por este fato não se utiliza esta metodologia, visto que, será empregado como base a programação desenvolvida por Quevedo (2017).

3.8.1 Efeitos Diferidos

A resposta de um elemento de concreto submetido a um carregamento qualquer possui duas parcelas: uma imediata e outra que se dá em função do tempo. Uma vez que um elemento esteja submetido a um carregamento prolongado, a resposta em função do tempo se dará com

uma deformação gradual, causada pela fluência e pela retração. Essas deformações ocasionam aumento das flechas e curvaturas, perdas de protensão e redistribuição de tensões (SOUZA, 2014). De acordo com o RILEM *Technical Committes* (1998), podem alcançar de 2 a 3 vezes o valor da deformação instantânea.

Segundo Putziski e Vargas (2011), conforme a natureza viscoelástica plástica do concreto, este sofre deformações lentas significativas. Assim, evidencia-se a importância do estudo das deformações ocorridas ao longo do tempo em estruturas de concreto armado, para se avaliar o impacto do carregamento precoce da estrutura nas deformações finais.

Descoberto por Hatt (1907), os fenômenos diferidos do concreto ainda não são compreendidos totalmente (BAŽANT, 2001). Os efeitos diferidos têm início durante a construção e evoluem ao longo do tempo, durante a vida da estrutura. Enquanto as deformações elásticas iniciais do concreto são simplesmente calculadas com base na carga aplicada e no módulo de elasticidade do material, as deformações relativas à fluência e à retração dependem de outras variáveis, como as dimensões e formas dos elementos estruturais, a umidade relativa do ambiente, a duração de aplicação da carga e a idade do concreto no início do carregamento (HA; LEE, 2013). As deformações do concreto podem ser classificadas como deformações dependentes do carregamento (fluência) e independentes do carregamento (retração).

Embora existam ótimos modelos teóricos para o cálculo da deformação por fluência e retração, alguns pesquisadores defendem que deveriam ser realizados testes nos concretos utilizados na construção. Isto se dá, pelo fato de que o banco de dados laboratorial para os modelos teóricos está relativamente desatualizado, em termos de desenvolvimento tecnológico da indústria de concreto. Por exemplo, o concreto de alta resistência tem propriedades de retração e fluência bastante diferentes do concreto de resistência normal. Outro fator, é que os modelos teóricos foram desenvolvidos a partir de dados coletados principalmente em pontes, não em edifícios. O efeito de fluência e retração para vigas de pontes é medido pelo aumento da deflexão, enquanto em edifícios é medido em relação ao encurtamento axial do pilar em concreto, que está em compressão. O comportamento da estrutura quando submetida à flexão é diferente quando submetida à compressão, sendo assim, os dados coletados sobre os efeitos reológicos tendem a divergir (HA; LEE, 2013).

3.8.1.1 Retração

A retração é considerada uma deformação reológica medida em um elemento exposto à temperatura constante e sem restrições de deslocamentos (SOUZA, 2014). A deformação por retração é independente do estado de tensões aplicado ao concreto. A pasta de cimento hidratada atua como a principal causa de deformações relativas à umidade no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

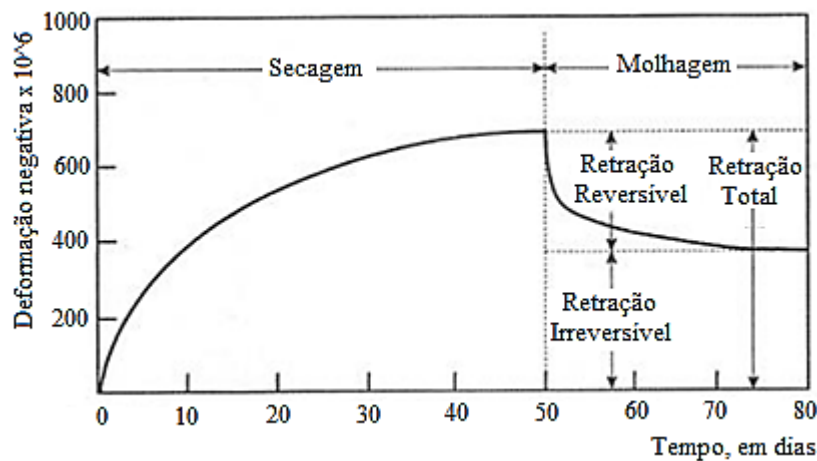
A deformação por retração pode ser dividida em quatro componentes: plástica, química, térmica e por secagem (ou higrométrica). Quando a mistura do concreto ainda se encontra viscosa, ocorre a retração plástica, e posteriormente, as retrações química, térmica e por secagem (GILBERT; RANZI, 2011).

A retração térmica se dá nas primeiras horas, após a hidratação do concreto, durante a dissipação do calor provocado pela reação exotérmica na pasta de cimento. Já a retração química, ocorre nos primeiros dias posteriores a concretagem, devido às reações químicas na pasta de cimento, influenciada pelo grau de hidratação da mistura. Tanto a retração térmica quanto a retração química, não estão associadas ao processo de perda de água da pasta de cimento. A soma de ambos os efeitos é chamada como deformação por retração endógena, $\epsilon_{sh,e}(t)$ (SOUZA, 2014). Os principais fatores que afetam este tipo de retração são: a relação entre o volume e a área de superfície do elemento, o teor de umidade, a relação água/cimento, e as condições ambientais ao entorno. O valor da retração endógena tende a aumentar e se tornar significativo, à medida que a resistência do concreto aumenta (FINTEL; IYENGAR, 1987 apud. BAST, 2003).

Segundo Souza (2014), a diminuição do volume de um elemento de concreto, devido à perda de parte da água adsorvida pela pasta de cimento, que é transferida para o ambiente externo como consequência da umidade diferencial relativa, é denominada de retração por secagem, $\epsilon_{sh,d}(t)$. Este fenômeno ocorre durante o processo de envelhecimento do concreto e são fatores que contribuem: a taxa de aumento na resistência e rigidez da mistura do concreto; a relação volume e área de superfície do elemento; a umidade relativa e o gradiente de umidade (FINTEL; IYENGAR, 1987 apud. BAST, 2003). A deformação por retração, $\epsilon_{sh}(t)$, é normalmente considerada como a soma das parcelas de deformação por retração por secagem, $\epsilon_{sh,d}(t)$, e por retração endógena, $\epsilon_{sh,e}(t)$.

Conforme Mehta e Monteiro (2008), a deformação por retração possui uma parcela reversível e outra irreversível. Por meios de ciclos de molhagem e secagem, as deformações por retração podem ser parcialmente revertidas. Após a molhagem do concreto, pode haver uma restituição gradual de parte das deformações impostas ao elemento. Este fato permite concluir que a retração por secagem é a parcela reversível da deformação por retração, sendo as demais parcelas irreversíveis. A Figura 3.6 ilustra ambas as parcelas de deformação por retração.

Figura 3.6 – Componente reversível e irreversível da deformação por retração.



(fonte: Baseado em MEHTA; MONTEIRO, 2008)

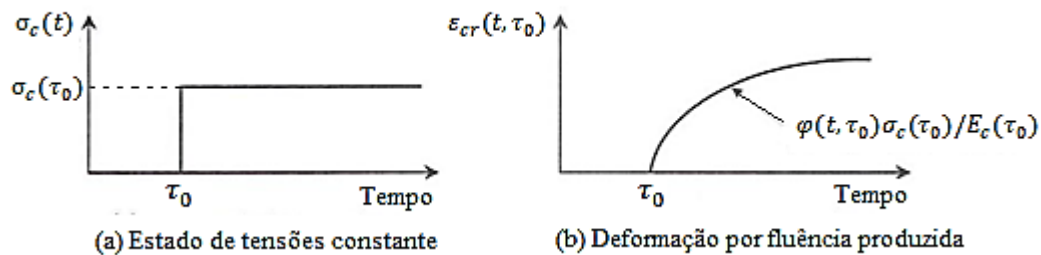
A magnitude dos efeitos de deformação por retração cresce com os seguintes aspectos: o aumento da temperatura ambiente; o crescimento do fator água/cimento; a elevação da temperatura ambiente; aumento da superfície de contato entre a peça de concreto e o ambiente externo. A diminuição da deformação por retração, ocorre com os seguintes aspectos: a elevação da resistência característica do concreto; o aumento do tamanho e do módulo de elasticidade do agregado (SOUZA, 2014).

3.8.1.2 Fluência

O fenômeno onde ocorre o aumento gradual da deformação de um elemento de concreto, quando este é submetido a um estado de tensões constantes ao longo do tempo, é chamado de fluência. Segundo Fintel e Iyengar (1987) apud. Bast (2003), os efeitos da fluência podem vir a ocorrer por 40 anos ou mais.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a taxa de crescimento da deformação por fluência é alta nos períodos imediatamente seguintes à aplicação do carregamento, diminuindo com o passar do tempo, até estabilizar em um valor máximo limite, conforme demonstra Figura 3.7.

Figura 3.7 – a) Estado de tensões constante; b) deformação por fluência produzida.



(fonte: Baseado em GILBERT; RANZI, 2011)

Em um elemento carregado, quando não há perda de água deste para o ambiente externo, diz-se que o corpo está em equilíbrio hídrico com o ambiente, e a deformação gradual proveniente do carregamento recebe o nome de fluência básica. Quando o elemento ainda perde água para o ambiente externo, a deformação adicional que ocorre é chamada de fluência por secagem (SOUZA, 2014).

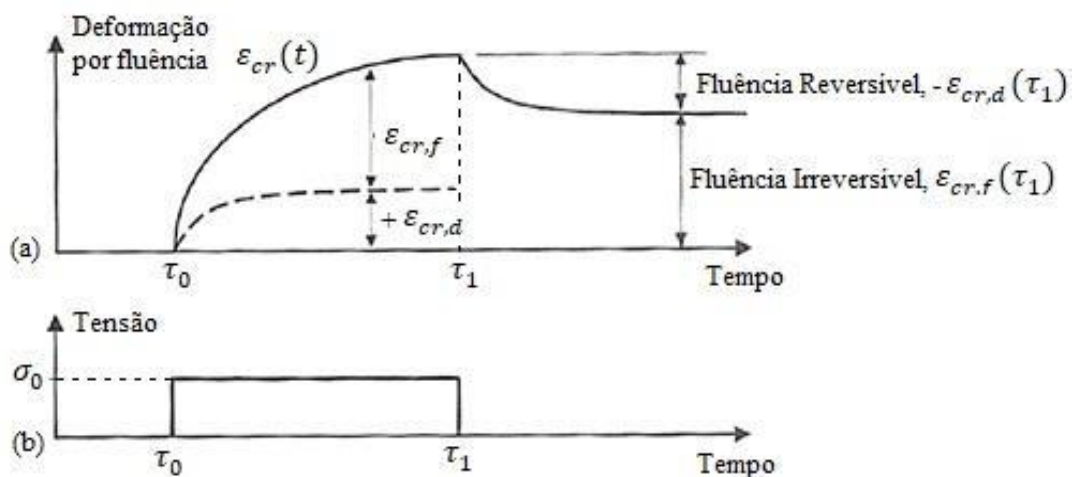
A deformação de fluência pode ser dividida em: reversível (deformação rápida inicial, deformação básica e deformação por secagem) e irreversível (deformação elástica retardada). É importante salientar que o conceito de reversível e irreversível não pode ser tomado como fixo, deve se conhecer o histórico do estado de tensões ao qual está submetido o elemento de concreto.

A primeira componente desse fenômeno é chamada de deformação rápida inicial, $\varepsilon_{cr,fi}(t)$, e ocorre durante as primeiras 24 horas após a aplicação do carregamento, no instante τ_0 . A parcela de deformação rápida inicial é inversamente proporcional à idade do concreto, no instante da aplicação da carga, ou seja, quanto mais jovem o concreto, maior será a deformação rápida inicial. A segunda parcela é referente à deformação adicional que ocorre até o descarregamento do elemento, no instante τ_1 , ou quando não há variação no estado de tensões do elemento, com tempo tendendo ao infinito. Caso a umidade ambiental seja igual ou superior à umidade de saturação da pasta de cimento do elemento, tem-se a deformação

básica, $\epsilon_{cr,fb}(t)$. Quando a umidade ambiente é inferior à umidade da pasta de cimento e há perda de água do concreto para o meio externo, tem-se a deformação por secagem, $\epsilon_{cr,fd}(t)$ (GILBERT; RANZI, 2011).

Por último, a terceira parcela, recebe o nome de deformação elástica retardada $\epsilon_{cr,f}(t)$, e ocorre após o descarregamento do elemento, no instante τ_1 . Essa componente ocorre em função da restituição da deformação elástica do agregado presente no concreto (GILBERT; RANZI, 2011). A Figura 3.8 demonstra a deformação de fluência e suas respectivas componentes.

Figura 3.8 – a) Componente reversível e irreversível da deformação por fluência; b) Estado de tensões constantes entre τ_0 e τ_1 .



(fonte: Baseado em GILBERT; RANZI, 2011)

Segundo Gilbert e Ranzi (2011), a deformação básica, $\epsilon_{cr,fb}(t)$, é influenciada pelos seguintes fatores: composição da mistura de concreto; o tipo, tamanho e quantidade de agregado; resistência característica; idade do concreto no momento de aplicação da carga. No que concerne à deformação por secagem, esta sofre a influência de tais aspectos: propriedades da mistura, como por exemplo, o fator água-cimento; geometria da peça de concreto, tamanho e formato do elemento.

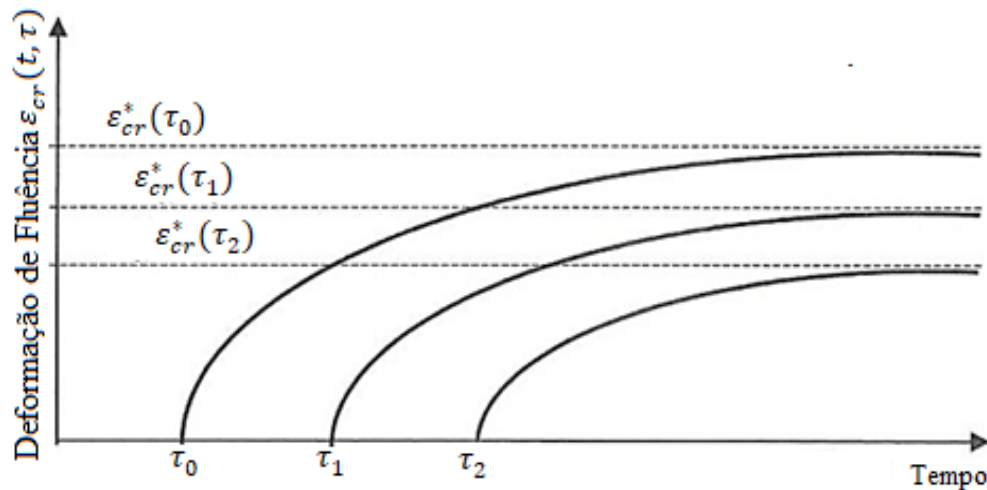
A fluência é um mecanismo complexo, e entre as inúmeras possíveis causas deste fenômeno, estão: a perda da água adsorvida pela pasta de cimento e a deformação do agregado. A perda da água adsorvida pela pasta de cimento se dá devido à tensão de confinamento provocada

pela carga aplicada, a qual faz com que parte da água presente na mistura seja expulsa por meio dos poros capilares do concreto. Já a deformação do agregado, ocorre devido à carga imposta à peça de concreto, que é transferida gradualmente da pasta de cimento para o agregado e à medida que o agregado é carregado, este se deforma elasticamente (SOUZA, 2014).

As deformações por fluência tendem a diminuir com o aumento de certos fatores, são estes: resistência característica do concreto; tamanho e resistência do agregado; umidade relativa do ambiente externo. As mesmas deformações tendem a serem maiores com o aumento dos seguintes aspectos: temperatura ambiente; razão superfície ou área por volume do elemento. A Figura 3.9 e a Equação (4.1), demonstram que quanto maior for a idade do concreto, quando submetido ao carregamento, menor será a relevância da deformação por fluência do elemento em questão.

$$\varepsilon_{cr}(t_i) > \varepsilon_{cr}(t_j) \rightarrow t_i < t_j \quad (4.1)$$

Figura 3.9 – Deformação por fluência produzida em concreto de diferentes idades.



(fonte: Baseado em GILBERT; RANZI, 2011)

3.8.2 Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

O módulo de elasticidade ou módulo de deformação, é uma grandeza mecânica que mede a rigidez de um material sólido e pode ser definido a partir das relações entre tensões e deformações, de acordo com os diagramas tensão-deformação. Em relação ao concreto, este

é um material que apresenta um comportamento não-linear, quando submetido a tensões de compressão ou de tração, devido à sua natureza viscoelástica de pseudo sólido. Diferentemente dos materiais homogêneos, este material não segue a lei de Hooke e nem sempre apresenta proporcionalidade entre tensão e deformação específica resultante (PACHECO, 2014).

Segundo a *fib* (2012) e o CEB-FIP MC90 (1993), são dadas as seguintes nomenclaturas para os diferentes módulos de elasticidade do material concreto:

- a) E_c – Módulo de elasticidade inicial do concreto;
- b) $E_{ci}(t_0)$ – Módulo tangente de elasticidade do concreto, no tempo de carregamento t_0 ;
- c) E_{ci} – Módulo de elasticidade do concreto, aos 28 dias de idade;
- d) $E_{ci}(t)$ – Módulo de elasticidade do concreto, para (t) diferente de 28 dias de idade;
- e) E_{c1} – Módulo secante, desde a origem até o pico de tensão de compressão;

O módulo de elasticidade inicial é tomado como o módulo tangente à origem no diagrama tensão-deformação do concreto, para uma idade de 28 dias, sendo este obtido através da Expressão (4.2).

$$E_{ci} = E_{c0} \alpha_E \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad (4.2)$$

Onde:

E_{c0} : 21500 MPa - Módulo de elasticidade de referência;

α_E - Coeficiente considerável em função do tipo de agregado;

f_{cm} - Resistência média à compressão do concreto (MPa), estimada por $f_{ck} + \Delta f$, onde

Δf : 8 MPa e f_{ck} a resistência característica à compressão do concreto (MPa).

As deformações elásticas do concreto dependem em grande parte de sua composição, especialmente do tipo de agregados. Na Tabela 3.1 listadas as propriedades mecânicas para os concretos de resistência normal.

Tabela 3.1- Propriedades mecânicas para concretos de resistência normal.

Classe do Concreto	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
E_{ci} [GPa]	27,1	28,8	30,3	32,0	33,6	35,0	36,3	37,5	38,6
E_{c1} [GPa]	11,1	12,2	13,3	14,9	16,5	18,2	20,0	21,6	23,2
ε_{c1} [‰]	-1,9	-2,0	-2,1	-2,2	-2,3	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6
$\varepsilon_{c,lim}$ [‰]	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,4
k	2,4	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,7

(fonte: Baseado na tabela 5.1-8, Model Code 2010 *fib*, 2012)

Onde:

ε_{c1} - Deformação correspondente à máxima tensão em compressão;

$\varepsilon_{c,lim}$ - Deformação limite do concreto em compressão;

k - Número plástico.

De acordo com Pacheco (2014), um dos fatores que mais influenciam o módulo de elasticidade no concreto é a relação água/cimento. O módulo de elasticidade do concreto diminui ao longo do tempo, por efeito da fluência, podendo chegar a um terço do seu valor característico. Este fato fará com que os deslocamentos relativos entre os pilares tripliquem em relação ao seu valor inicial, gerando assim efeitos nas vigas, visto que, o momento gerado em uma viga, por um determinado deslocamento, está relacionado com o módulo de elasticidade do concreto. Não ocorre a inclusão de momentos adicionais relevantes nas vigas, posto que, havendo um maior deslocamento nos pilares, há também uma menor rigidez nas vigas, ainda pelos efeitos da fluência (REIS, 2014).

Em relação ao coeficiente de Poisson do concreto (ν), este pode variar entre 0,14 e 0,26, podendo ser definido o valor de 0,20 com suficiente precisão na representação do comportamento mecânico do concreto (*fib*, 2012).

3.9 PESQUISAS ANTERIORES

É importante destacar algumas produções relevantes para a pesquisa desenvolvida neste trabalho. Em relação ao desenvolvimento da modelagem de pórticos utilizando elementos de barra, Marí (1984) apud. Junges (2016), desenvolveu um modelo para análise de pórticos tridimensionais de concreto armado e protendido, baseando-se no modelo bidimensional de Kang (1977) apud. Junges (2016) e no modelo de Chan (1982) apud. Junges (2016). Dundar e Kara (2006), desenvolveram um modelo de pórtico tridimensional de edifício em concreto armado, onde a simulação de diafragma rígido foi adicionada ao modelo. Bernardi (2010) apresentou um modelo para análise global de edifícios altos em concreto armado com presença de paredes estruturais. Junges (2016), desenvolveu e implementou um modelo computacional para análise de pórticos espaciais e pórticos de edifícios em concreto armado, considerando as não-linearidades físicas e geométricas.

No que concerne à consideração das fases construtivas na análise estrutural, Choi e Kim (1984) desenvolveram um modelo para análise de pórticos de múltiplos pavimentos, considerando o efeito construtivo, no qual adota-se linearidade física e geométrica. Kripka (1990) estudou a importância da consideração da sequência de carregamento e construção, bem como as formas de melhor simular esta análise, utilizando pórticos planos de edifícios. Subsequentemente, Saffarini e Qudaimat (1992), utilizaram a análise incremental para realizar o estudo numérico de trinta e sete edifícios submetidos a carga lateral, a fim de investigar o comportamento da rigidez do pavimento. Prado (1999), apresentou um procedimento de análise estrutural que leva em conta a sequência natural de construção, e propõe um método para distribuição das ações de construção entre o sistema de escoramento e os pavimentos interligados, além de uma metodologia para verificação dos estados limites.

Kim e Shin (2011), desenvolveram um método de análise estrutural de edifícios, utilizando sequências de construção acumuladas (*lumped construction*), de modo a reduzir o tempo computacional das análises. Tal método foi utilizado com a finalidade de estudar o encurtamento axial dos pilares de edifícios altos. Pereira (2011), realizou um estudo de caso objetivando a análise do comportamento estático e dinâmico de um edifício. A análise estrutural foi realizada utilizando dois *softwares* comerciais: CYPECAD e *Robot Structural Analysis Professional*, os quais contemplam o efeito construtivo. Ha e Lee (2013), desenvolveram um programa de análise estrutural que define o encurtamento axial em cada

pavimento e na totalidade da altura do edifício, através das análises global e faseada. Reis (2014), elaborou uma proposta simplificada de alteração axial da rigidez dos pilares, capaz de simular as fases construtivas. Para validação desta simplificação, modelou edifícios utilizando o programa comercial SAP2000. Das e Praseeda (2016) analisaram a estabilidade em cada estágio da construção, realizando uma comparação entre análise global e análise incremental, utilizando o *software* comercial ETABS v15.

Em relação ao uso do *software* ANSYS, utilizando a ferramenta de customização UPF para a representação do comportamento não-linear do concreto, foram desenvolvidos diversos trabalhos. Lazzari (2016) realizou a simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas, utilizando o elemento tridimensional *solid186* com armadura incorporada *Reinf264*. Fazendo uso dos elementos *plane182* e *plane183*, próprios para problemas em estado plano de deformações e axissimetria, Quevedo (2017) realizou simulações numéricas do comportamento a longo prazo em túneis revestidos com concreto. Schmitz (2017), realizou um estudo sobre estrutura mista aço-concreto, analisando uma ponte composta por vigas de alma cheia, utilizando o elemento de casca *Shell181*, o elemento quadrático tridimensional *Solid186*, o elemento de reforço *Reinf264*, o elemento unidimensional *Beam189*, os elementos de contato *Conta173* e *Targe170*, e o elemento de mola *Combin39*. Barbosa (2017), analisou a confiabilidade no projeto de pilares em concreto armado, utilizando o elemento finito de barra *Beam189*. Jensen (2019), realizou um estudo sobre modelagem tridimensional em elementos finitos de túneis superficiais revestidos em concreto armado, utilizando os elementos *Solid185* e *Solid186*. Araújo (2019), desenvolveu a simulação pelo método dos elementos finitos de peças em concreto têxtil, fazendo uso dos elementos *Solid186* e *Shell281*. Por fim, Medeiros (2019) efetuou a simulação numérica do comportamento de peças fletidas reforçadas com PRFC, utilizando os elementos finitos *Shell281*, *Solid186*, *Reinf264*, *Conta174* e *Targe170*.

4 MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

Para realizar a análise de um modelo estrutural, é essencial conhecer as equações constitutivas dos materiais que o compõem, as quais definem a relação entre a tensão aplicada no material e sua correspondente deformação, ou seja, seu modelo mecânico ou modelo constitutivo. Os modelos podem ser simples ou refinados, baseados na Teoria da Elasticidade, Plasticidade ou Mecânica da Fratura. Neste capítulo, são abordados os modelos mecânicos utilizados na representação numérica do concreto e do aço.

4.1 CONCRETO

O comportamento do concreto foi representado por meio de fórmulas programadas, em linguagem FORTRAN 77. Esta sub-rotina foi compilada e inserida na rotina do ANSYS, através da ferramenta UPF (*Usermat*). Cabe salientar que somente alguns elementos suportam o uso desta ferramenta, abrangendo os elementos que serão utilizados neste estudo (*Shell281* e *Beam189*). No Capítulo 5, a sub-rotina *Usermat* e a ferramenta UPF serão abordadas com maiores detalhes.

No presente trabalho, o comportamento do concreto é traduzido por um modelo viscoelástico, que realiza a verificação e consideração dos efeitos da fissuração para os pontos tracionados. Utilizou-se como base os trabalhos e sub-rotinas elaborados por Quevedo (2017) e Jensen (2019).

4.1.1 Comportamento Diferido

4.1.1.1 Formulação para fluência e retração do CEB-FIP MC90

Segundo o Comité Euro-International du Béton (1993), o modelo apresentado no código CEB-FIP MC90 para fluência e retração pressupõe um comportamento médio e válido para estruturas de resistência característica entre 12 MPa e 80 MPa, que estejam sujeitas a uma tensão de compressão média menor do que 40% da resistência média do concreto e expostas a uma umidade relativa acima de 40%, com a média de temperatura entre 5°C e 30°C.

Desta forma, se faz necessário uma verificação da tensão de compressão média, implementada no modelo de Quevedo (2017, et al. 2018). O autor define um fator de validação conforme a Equação (5.1).

$$FV = \sigma_c / (40\% f_{cm}) \quad (5.1)$$

Onde:

FV – Fator de Validação;

σ_c – Tensão principal de compressão;

Se $FV \geq 1$ as tensões internas estarão acima da validade do formulário do CEB-FIP MC90, subestimando a não linearidade entre a deformação diferida no tempo e a tensão. Caso $FV \leq 1$, as tensões internas estarão dentro da validade do formulário em questão, indicando que a deformação por fluência decorrente do histórico de tensões em diferentes instantes de tempo pode ser simplificada considerando o princípio da superposição dos efeitos (QUEVEDO, 2017).

De acordo com o Comité Euro-International du Béton (1993), a deformação total na idade t de uma peça de concreto uniaxialmente carregada, a partir da idade t_0 , com uma tensão constante $\sigma_c(t_0)$, é expressa pela seguinte Equação (5.2):

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) = \varepsilon_{c\sigma}(t) + \varepsilon_{cn}(t) \quad (5.2)$$

Sendo:

t - Idade do concreto (dias);

t_0 - Idade do concreto no instante em que a tensão foi aplicada (dias);

$\varepsilon_c(t)$ - Deformação total;

$\varepsilon_{ci}(t_0)$ - Deformação instantânea elástica e linear, devido a aplicação do carregamento no tempo t_0 ;

$\varepsilon_{cc}(t)$ - Deformação por fluência, resultante para um tempo $t > t_0$;

$\varepsilon_{cs}(t)$ - Deformação por retração;

$\varepsilon_{cT}(t)$ - Deformação térmica;

$\varepsilon_{c\sigma}(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t)$ - Deformação dependente da tensão;

$\varepsilon_{cn}(t) = \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t)$ - Deformação independente da tensão.

A deformação inicial elástica e linear devido a aplicação do carregamento na idade t_0 é dada pela Expressão (5.3):

$$\varepsilon_{ci}(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \quad (5.3)$$

Onde:

$\sigma_c(t_0)$ - Tensão constante aplicada em t_0 (MPa);

$E_c(t_0)$ - Módulo de elasticidade tangente do concreto em t_0 (MPa).

4.1.1.1.1 Fluência

Conforme o Comité Euro-International du Béton (1993), a deformação por fluência para uma tensão constante aplicada em t_0 é dada por (5.4):

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \phi(t, t_0) \quad (5.4)$$

Sendo:

$\phi(t, t_0)$ - Coeficiente de fluência;

A deformação dependente da tensão pode ser expressa conforme a soma das Expressões (5.3) e (5.4):

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \sigma_c(t_0) J(t, t_0) \quad (5.5)$$

Sendo $J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}}$ a função da fluência que representa a deformação na idade

t , causada por uma tensão unitária constante atuante no intervalo de tempo $(t - t_0)$.

Utilizando o princípio da superposição de efeitos (como a função de fluência não depende da tensão) a deformação por fluência para cargas aplicadas em diferentes idades do concreto pode ser expressa como (5.6):

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) J(t, t_0) + \int_{t_0}^t J(t, \tau) \frac{\partial \sigma_c(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (5.6)$$

Onde $\int_{t_0}^t J(t, \tau) \frac{\partial \sigma_c(\tau)}{\partial \tau} d\tau$ é a deformação dependente da tensão, devido a um histórico de

tensão qualquer ao longo do tempo. Ainda de acordo com o Comité Euro-International du Béton (1993), o módulo de elasticidade do concreto pode ser obtido através das seguintes Expressões (5.7) a (5.11):

$$E_{ci} = E_{c0} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{1/3} \quad (5.7)$$

$$E_{ci}(T) = E_{ci} (1,06 - 0,003T / T_0) \quad (5.8)$$

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0,5} \quad (5.9)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right]} \quad (5.10)$$

$$E_c(t) = \beta_E(t) E_{ci}(T) \quad (5.11)$$

Sendo:

E_{c0} : 21500MPa - Módulo de elasticidade de referência;

f_{cm0} : 10 MPa - Resistência média de referência;

$E_{ci}(T)$ - Módulo de elasticidade tangente do concreto na idade de 28 dias (MPa) considerando a temperatura média $T(^{\circ}C)$;

T_0 : $1^{\circ}C$ - Temperatura de referência;

$\beta_E(t)$ - Coeficiente que leva em consideração o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo;

$\beta_{cc}(t)$ - Coeficiente de ajuste em função da idade do concreto e do tipo de cimento;

S - Parâmetro que depende do tipo de cimento utilizado, sendo: 0,2 para cimento de endurecimento rápido e alta resistência inicial, 0,25 para cimento de endurecimento rápido e normal e 0,38 para cimento de endurecimento lento;

$E_c(t)$ - Módulo de elasticidade tangente na idade t (MPa).

O coeficiente de fluência é dado pela seguinte Equação (5.12):

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (5.12)$$

Onde:

ϕ_0 - Coeficiente que depende da idade do concreto t_0 no instante em que a tensão foi aplicada;

$\beta_c(t - t_0)$ - Coeficiente que depende da idade do carregamento $(t - t_0)$.

A decomposição do coeficiente de fluência em dois fatores ϕ_0 (depende exclusivamente da idade do concreto) e β_c (depende somente da idade da carga), vista na Equação (5.12), é

favorável a adaptação ao modelo proposto por Bažant e Prasanna (1989a, 1989b), visto que este modelo faz a mesma decomposição. O fator ϕ_0 pode ser calculado de acordo com as seguintes fórmulas (5.13) a (5.21):

$$h = \frac{2A_c}{u} \quad (5.13)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH / RH_0}{0,46(h / h_0)^{1/3}} \quad (5.14)$$

$$\phi_T = \exp \left[0,015 \left(\frac{T}{T_0} - 20 \right) \right] \quad (5.15)$$

$$\phi_{RH,T} = \phi_T + (\phi_{RH} - 1)\phi_T^{1,2} \quad (5.16)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{\left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0,5}} \quad (5.17)$$

$$t_{0,T} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[13,65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (5.18)$$

$$t_{0,adj} = t_{0,T} \left[\frac{9}{2 + (t_{0,T} / t_{1,T})^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha_c} \geq 0,5 \text{ dias} \quad (5.19)$$

$$\beta(t_{0,adj}) = \frac{1}{0,1 + (t_{0,adj} / t_1)^{0,5}} \quad (5.20)$$

$$\phi_0 = \phi_{RH,T} \beta(f_{cm}) \beta(t_{0,adj}) \quad (5.21)$$

Onde:

h - Espessura fictícia da peça de concreto (cm);

A_c - Área da seção transversal da peça de concreto (cm²);

u - Perímetro da peça de concreto exposto ao meio ambiente (cm);

ϕ_{RH} - Coeficiente dependente da exposição da peça a umidade do ambiente;

RH - Umidade relativa do meio ambiente (%);

RH_0 : 100% - Umidade relativa de referência;

h_0 : 10cm - Espessura fictícia de referência;

ϕ_T - Coeficiente que leva em consideração a temperatura;

$\phi_{RH,T}$ - Coeficiente que depende da exposição da peça a umidade do ambiente corrigido com a temperatura;

$\beta(f_{cm})$ - Coeficiente que depende da resistência média à compressão do concreto;

$t_{0,T}$ - Idade do concreto no instante de aplicação da carga, corrigido com o efeito da temperatura (dias);

Δt_i - Número de dias onde a temperatura T ($^{\circ}C$) prevalece;

$T(\Delta t_i)$ - Temperatura ($^{\circ}C$) predominante durante o período Δt_i ;

$t_{0,adj}$ - Idade do concreto no instante em que o carregamento é aplicado ajustado com o efeito da temperatura (dias);

$t_{1,T} = t_1$: 1 dia - Idade de referência;

α_c - Coeficiente que depende do tipo de cimento, sendo: -1 para endurecimento lento, 0 para endurecimento rápido normal e 1 para endurecimento rápido de alta resistência;

$\beta(t_{0,adj})$ - Coeficiente que depende da idade do concreto no instante de aplicação da carga.

O fator $\beta_c(t-t_0)$ visto na Expressão (5.12) pode ser calculado seguindo as Expressões (5.22) e (5.23) a seguir:

$$\beta_H = 150 \left[1 + \left(1,2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (5.22)$$

$$\beta_c(t-t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right]^{0,3} \quad (5.23)$$

Sendo:

β_H - Coeficiente que depende da umidade relativa do ambiente.

4.1.1.1.2 Retração

O Comité Euro-International du Béton (1993) fornece a seguinte relação (5.24) para a deformação por retração:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \beta_s(t-t_s) \quad (5.24)$$

Onde:

t_s - Idade do concreto no início da retração, equivalente a idade do concreto no final da cura (dias);

ε_{cs0} - Fator de retração que depende da idade do concreto e independe da idade da retração;

$\beta_s(t-t_s)$ - Fator dependente da idade da retração $(t-t_s)$.

O fator ε_{cs0} é obtido pelas seguintes equações (5.25) a (5.30):

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[160 + 10\beta_{sc} \left(9 - f_{cm} / f_{cm0} \right) \right] 10^{-6} \quad (5.25)$$

$$\beta_{s,RH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (5.26)$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1,55\beta_{s,RH} & \text{para } 40\% \leq RH \leq 99\% \\ 0,25 & \text{para } RH \leq 99\% \end{cases} \quad (5.27)$$

$$\beta_{sT} = 1 + \left(\frac{8}{103 - 100RH / RH_0} \right) \left(\frac{T / T_0 - 20}{40} \right) \quad (5.28)$$

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \beta_{sT} \quad (5.29)$$

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH,T} \quad (5.30)$$

Sendo:

β_{sc} - Parâmetro que depende do tipo de cimento utilizado. Sendo: 8 para cimento de endurecimento rápido e alta resistência inicial; 5 para cimento de endurecimento rápido e normal, e 4 para cimento de endurecimento lento;

$\varepsilon_s(f_{cm})$ - Fator que depende da resistência média à compressão do concreto;

$\beta_{s,RH}, \beta_{RH}$ - Fatores que dependem da resistência média à compressão do concreto;

β_{sT} - Fator que considera a temperatura;

$\beta_{RH,T}$ - Fator que depende da umidade relativa do ambiente ajustado com a temperatura;

T - Temperatura ($^{\circ}C$);

T_0 : $1^{\circ}C$ - Temperatura de referência.

O fator $\beta_s(t-t_s)$ que independe da idade do concreto no final da cura é dado por (5.31) e (5.32):

$$\alpha_{sT}(T) = 350 \left(\frac{h}{h_0} \right)^2 \exp[-0,06(T/T_0 - 20)] \quad (5.31)$$

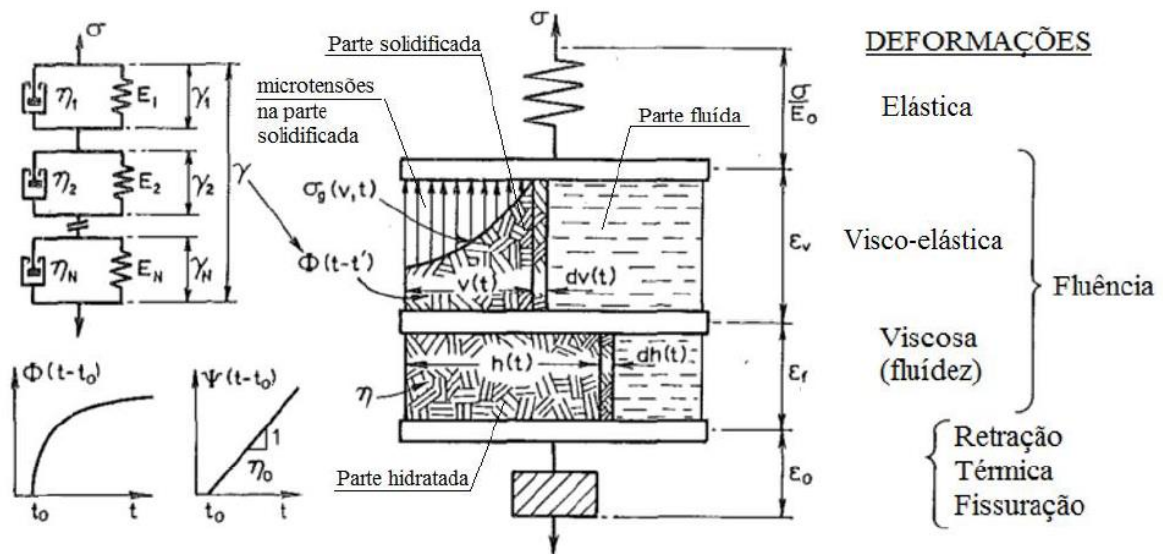
$$\beta_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{\alpha_{sT}(T) + (t-t_s)/t_1} \right]^{0,5} \tag{5.32}$$

Onde $\alpha_{sT}(T)$ é o fator que leva em consideração a espessura fictícia corrigida com a temperatura. Neste trabalho será considerada a hipótese de que a temperatura é constante ao longo da análise, desta forma não será considerada a deformação referente a variação de temperatura $\varepsilon_{cT}(t)$, vista na Expressão (5.2).

4.1.1.2 Teoria da Solidificação para a fluência do concreto

No que concerne fluência, a idade do concreto no momento de aplicação da tensão (envelhecimento do concreto), influencia nas deformações diferidas no tempo. Bažant e Prasannan (1989a, 1989b), propuseram um modelo físico que contempla o envelhecimento como um fator separado da idade da carga, relacionado com o volume de concreto solidificado $v(t)$ ao longo do tempo. Segundo este modelo físico, a fluência é separada em duas parcelas: viscoelástica e viscosa. A parcela viscoelástica é majoritariamente responsável pela forma de fluência em pequenas idades de carregamento e a parcela viscosa pela forma de fluência no longo prazo. Na Figura 4.1 tem-se esquematizado o modelo completo para o concreto.

Figura 4.1 – Modelo do concreto.



(fonte: Baseado em BAŽANT; PRASANNAN, 1989^a apud. QUEVEDO, 2017)

Segundo o modelo apresentado na Figura 4.1, a deformação total do concreto é dada pela seguinte Expressão (5.33):

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \varepsilon_v + \varepsilon_f + \varepsilon_0 \quad (5.33)$$

Onde:

σ - Tensão constante atuante no concreto;

E_0 - Módulo de elasticidade do concreto referente aos agregados e partículas microscópicas da pasta de cimento;

t - Idade do concreto;

ε_v - Parcela viscoelástica da deformação por fluência;

ε_f - Parcela viscosa (fluidez) da deformação por fluência;

ε_0 - Deformação que independe da tensão (retração, térmica e por fissuração).

O módulo de elasticidade independente do tempo é justificado por representar agregados e partículas microscópicas, cujas propriedades não sofrem alterações com o tempo.

A deformação por fluência é dividida em duas parcelas, ε_v e ε_f , para que se possa tratar a forma da curva de fluência em relação a idade do carregamento. Para idades de carregamento pequenas, a função tem forma de potência, e para idade de carregamento longas a fluência assume, em sua grande parte, forma logarítmica (BAŽANT; PRASANNAN, 1989^a).

Conforme Quevedo (2017), a parcela viscoelástica ε_v relaciona-se com a fração de volume de concreto já solidificado $v(t)$ e com o coeficiente $\phi(t-t_0)$. Já a parcela viscosa ε_f associa-se a fração de cimento hidratado $h(t)$ e ao coeficiente $\psi(t-t_0)$. Ambos coeficientes são dependentes da idade do carregamento.

Observa-se que na Figura 4.1, a função $\phi(t-t_0)$ está sendo representada por um modelo reológico de Kelvin-Generalizado, o qual possui ótima aproximação para o comportamento da fluência ao longo do tempo. De acordo com Bažant e Prasannan (1989^a) as leis que regem as parcelas de deformações por fluência vistas na Equação (5.33), são:

$$\dot{\varepsilon}_v(t) = \frac{F[\sigma(t)]}{\nu(t)} \dot{\gamma}(t-t_0) \quad (5.34)$$

$$\dot{\varepsilon}_f(t) = \frac{F[\sigma(t)]}{\eta(t)} \sigma(t) \quad (5.35)$$

Sendo:

$F[\sigma(t)]$ - Função adimensional que introduz a não linearidade frente as tensões;

$\nu(t)$ - Fração de volume de concreto solidificado;

$\dot{\gamma}(t-t_0) = \int_0^t \dot{\phi}(\tau-t_0) d\sigma(t_0)$ - Taxa de microdeformação viscoelástica;

$\eta(t) = \eta_0 h(t)$ - Viscosidade macroscópica aparente, não é constante e depende da idade do concreto t , sendo η_0 a viscosidade efetiva do cimento hidratado e $h(t)$ a concentração de cimento hidratado. Somando-se (5.34) e (5.35), aplicando uma tensão unitária constante em uma idade t_0 , tem-se a seguinte função de fluência:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + \frac{\gamma(t-t_0)}{\nu(t)} + \frac{1}{\eta(t)} \quad (5.36)$$

Bažant e Prasannan (1989a, 1989b) apresentam formas matemáticas para $F[\sigma(t)]$, $\nu(t)$, $\phi(t-t_0)$ e $\eta(t)$, com parâmetros de ajustes que dependem do material, q_1 , q_2 , q_3 e q_4 . Estes parâmetros atuam em função da relação água/cimento, agregado/areia e resistência média aos 28 dias. Realizando a comparação entre as expressões (5.36) e (5.5) nota-se que não há a parcela $1/\eta(t)$ na formulação do CEB-FIP MC90, pois o comportamento da função de

fluência para pequenas e grandes idades de carregamento está incluída em seu coeficiente de fluência $\phi(t, t_0)$. Desta forma, comparando as Expressões (5.5), (5.12) e (5.36) pode-se realizar a seguinte equivalência:

$$E_0 = E_c(t_0) \quad (5.37)$$

$$\gamma(t-t_0) = \beta_c(t-t_0) \quad (5.38)$$

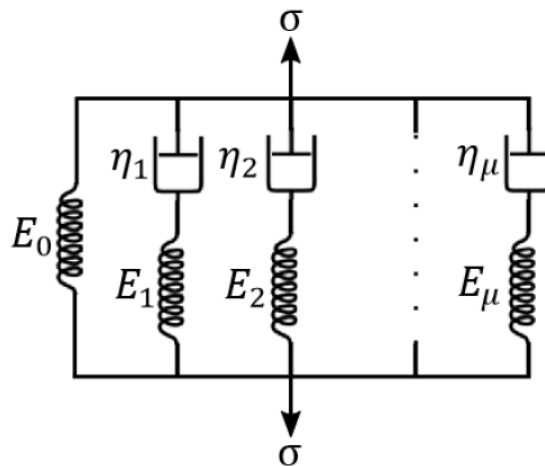
$$\frac{1}{\nu(t)} = \frac{\phi_0}{E_{ci}} \quad (5.39)$$

$$\frac{1}{\eta(t)} = 0 \quad (5.40)$$

4.1.1.3 Modelo Reológico para o fator de fluência dependente da idade do carregamento

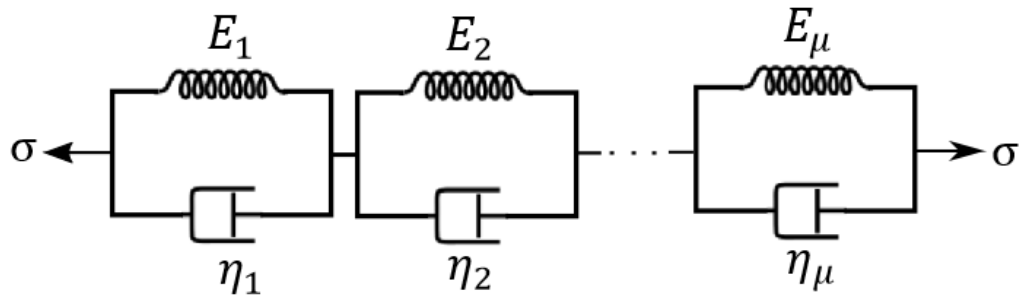
Segundo Dias (2013), é necessário converter a lei da fluência, expressa por forma integral, em uma lei em termos de taxa. Para tal, utiliza-se um modelo reológico composto por molas e amortecedores combinados, o qual apresenta uma aproximação satisfatória. Os modelos reológicos mais utilizados para o concreto são as cadeiras de Maxwell e Kelvin, conforme Figura 4.2 e 4.3.

Figura 4.2 – Modelo de Maxwell generalizado.



(fonte: QUEVEDO, 2017)

Figura 4.3 – Modelo de Kelvin generalizado.



(fonte: QUEVEDO, 2017)

Conforme Bažant e Prasannan (1989b) a cadeia de Maxwell é preferida entre a cadeia de Kelvin, visto que esta última adicionava uma ordem a mais na equação diferencial a ser resolvida. Mas, na teoria da solidificação, apenas o fator que independe do envelhecimento do concreto é ajustado, tornando assim os parâmetros constantes e a cadeia de Kelvin atrativa. No modelo reológico de Kelvin-Generalizado, cada elemento da cadeia está submetido a uma mesma tensão, sendo a Equação diferencial de cada elemento dada por (5.41):

$$E_{\mu}\dot{\gamma}_{\mu} + \eta_{\mu}\dot{\gamma}_{\mu} = \sigma_{TOT} \quad (5.41)$$

Em que:

σ_{TOT} - Tensão total;

E_{μ} - Módulo elástico da μ – ésima unidade da cadeia de Kelvin;

η_{μ} - Viscosidade da μ – ésima unidade da cadeia de Kelvin;

γ_{μ} - Deformação da μ – ésima unidade da cadeia de Kelvin.

A deformação total da cadeia de Kelvin γ é dada pela soma da deformação de cada elemento, conforme Equação (5.42):

$$\gamma = \sum_{\mu=1}^N \gamma_{\mu} \quad (5.42)$$

Aplicando uma tensão constante e unitária em tempo t_0 na Equação (5.42), obtém-se a seguinte Expressão (5.43):

$$\gamma(t-t_0) = \sum_{\mu=1}^N \frac{1}{E_{\mu}} \left(1 - e^{-(t-t_0)/\tau_{\mu}}\right) \quad (5.43)$$

Onde:

$\tau_{\mu} = \frac{\eta_{\mu}}{E_{\mu}}$ - Tempo de retardamento à fluência da μ –ésima unidade da cadeia.

Essa Equação é também conhecida como série de Dirichlet e através de um método de mínimos quadrados pode aproximar as curvas de fluência. A determinação dos tempos de retardamento a partir de testes de fluência leva a um sistema mal condicionado. A fim de melhorar o condicionamento do sistema, Bažant e Prasannan (1989b) propõem a escolha dos tempos de retardação conforme (5.44):

$$\tau_{\mu} = \tau_1 10^{\mu-1}, \text{ sendo } \mu=1,2, \dots, N \quad (5.44)$$

As escolhas dos tempos de retardamento devem satisfazer o período de interesse (BAŽANT; PRASANNAN, 1989b). Nesta dissertação se adotará os mesmos valores utilizados por Dias (2013) e Quevedo (2017):

$$\tau_1 = 0,01t_0 \text{ e } \tau_N = 0,5t_{\max} \quad (5.45)$$

Sendo:

t_{\max} - Idade máxima do concreto na análise.

De acordo com Dias (2013), a quantidade N de unidades de Kelvin pode ser determinada sendo a máxima possível até que se tenha um τ_{μ} superior ou igual a τ_N , mas não mais do que 6 unidades de Kelvin. De posse dos tempos de retardamento e da quantidade de unidades de Kelvin definidos, as constantes $1/E_{\mu}$ podem ser obtidas através do método dos mínimos

quadrados, realizando a discretização da função $\gamma(t_k - t_0)$ com $k = 1, \dots, L$ pontos. A aplicação desse método nesse problema consiste em resolver $[A]\{X\} = [B]$, sendo:

$$A(i, j) = \sum_{k=1}^L \left[1 - e^{-(t_k - t_0)/\tau_i} \right] \left[1 - e^{-(t_k - t_0)/\tau_j} \right] \quad (5.46)$$

$$B(i) = \sum_{k=1}^L \gamma(t_k - t_0) \left[1 - e^{-(t_k - t_0)/\tau_i} \right] \quad (5.47)$$

$$X(j) = 1 / E_j \quad (5.48)$$

Sendo:

$\gamma(t_k - t_0) = \beta_c(t_k - t_0)$, onde t_0 é o instante no qual o primeiro carregamento é aplicado.

Para a resolução deste sistema utilizou-se o método de eliminação de Gauss, conforme Chapra e Canale (2008). Antes de resolver o sistema é necessário determinar os pontos que serão utilizados para esse ajuste. Sendo o comportamento da função mais acentuada nas primeiras idades de carregamentos, opta-se por manter os passos de tempo constantes em escala logarítmica, pois desta forma, os pontos para o ajuste podem ser obtidos através da seguinte fórmula de recorrência (DIAS, 2013):

$$t_{k+1} - t_0 = 10^{1/m}(t_k - t_0), \quad k = 1, \dots, L_p \quad (5.49)$$

Onde:

m - Número de passos por década, em torno de 10 para que haja boa precisão;

L_p - Quantidade de pontos a ser determinada, sendo o número de pontos necessário para o tempo em estudo, até que $t_{k+1} - t_0 > t_{\max} - t_0$.

Ainda conforme Dias (2013), o primeiro passo faz-se:

$$t_1 - t_0 = 0,1t_0 \quad (5.50)$$

Após ajustados os parâmetros da cadeia de Kelvin, é necessário introduzi-los no algoritmo incremental que resolve a solução numérica, de acordo com Quevedo (2017). A Equação (5.41) é resolvida considerando a tensão σ como linearmente variável em cada passo de tempo, conforme desenvolvido por Bažant e Prasannan (1989^a, 1989b). Pode-se obter maior informações sobre esse algoritmo em Quevedo (2017).

4.1.2 Concreto Tracionado: Modelo para fissuração

No presente trabalho, o modelo de fissuração empregado foi sugerido por Hinton (1988) e aprimorado por Martinelli (2003). Hinton (1988) proporcionou um modelo que representasse a fissuração, de forma que durante este processo a malha de elementos finitos não sofresse quaisquer alteração, sendo a fissuração representada pelas alterações das propriedades do material, devido ao dano.

Para avaliar a ocorrência da formação de fissuras no concreto, deve-se verificar se o nível de tensão dos pontos de integração dos elementos atingiu a superfície de ruptura. Para tal, utilizou-se a superfície de ruptura de Ottosen (1977). Em relação ao estado do material, inicialmente é isotrópico e após a formação da primeira fissura passa a ser ortotrópico. Quando há fissuração no concreto despreza-se o efeito de Poisson.

Admite-se que a fissura tenha se formado em um plano ortogonal à tensão principal de tração (σ_1) e que os eixos locais coincidam com as direções principais. A partir da resolução de um problema de autovetores, a direção da fissura é calculada. A direção da fissura é sempre perpendicular à direção da tensão principal, sendo reduzidos os módulos de elasticidade longitudinal e transversal nessa direção.

Neste modelo, permite-se a ocorrência de dois planos de fissuras em cada ponto de integração, ou seja, para carregamentos posteriores, uma segunda fissura pode vir a ocorrer em um ponto já fissurado. Para estes casos, utiliza-se o procedimento da fissura fixa, no qual a direção do primeiro conjunto de fissuras permanece fixa e a tensão de tração é avaliada perpendicularmente ao plano de fissuração já existente. Caso a tensão exceda a resistência do concreto à tração, um novo plano de fissuras é formado, perpendicular ao plano já existente, e todas as componentes de tensão são zeradas.

O concreto tracionado possui comportamento frágil, as fissuras são formadas e a perda de sua resistência depende da contribuição do concreto entre fissuras na rigidez total da estrutura. O modelo proposto para descrever este comportamento, considera o material como elástico-linear até a ruptura, e a partir deste, utiliza-se o modelo de fissuras distribuídas. Este modelo caracteriza-se por três leis: o critério de fissuração, a regra para a colaboração do concreto entre fissuras (*tension stiffening*) e o modelo para a transferência das tensões de corte.

Nesta dissertação, implementou-se a rotina de fissuração para dois elementos, de barra (*Beam189*) e de casca (*Shell281*). Visto isso, devido as diferenças usuais entre os elementos (vistas com maior profundidade no capítulo 5), existem algumas distinções entre os modelos implementados.

4.1.2.1 Critério de ruptura de Ottosen

Este critério de ruptura trata-se de um modelo de quatro parâmetros. Quando submetido à estados multiaxiais de tensões, a superfície de ruptura para o concreto é governada pela seguinte Equação (5.51):

$$\alpha \frac{J_2}{f_{cm}^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cm}} + \beta \frac{I_1}{f_{cm}} - 1 = 0 \quad (5.51)$$

Sendo os parâmetros declarados pelas seguintes Equações (5.52) a (5.56):

$$\lambda = c_1 \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \arccos (c_2 \cos 3\theta') \right] \quad (5.52)$$

$$\cos 3\theta' = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (5.53)$$

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (5.54)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right] + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 \quad (5.55)$$

$$J_3 = \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{ki} = \begin{vmatrix} S_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_{zz} \end{vmatrix} \quad (5.56)$$

Onde:

α, β, c_1 e c_2 - Parâmetros do material;

λ - Função no plano desviador, dependente de θ' ;

θ' - Ângulo de similaridade do concreto;

I_1 - Primeiro invariante do tensor de tensões;

J_2 - Segundo invariante do tensor desviador de tensões;

J_3 - Terceiro invariante do tensor desviador de tensões.

Os parâmetros para ajuste da superfície (α, β, c_1 e c_2) dependem de propriedades do concreto advindas de ensaios. São estas propriedades:

f_{ctm} - Resistência uniaxial em tração;

f_{c2m} - Resistência biaxial à compressão;

σ_{com} e τ_{com} - Estado de ruptura sobre o meridiano de compressão ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$).

O Código Modelo *fib* 2010 (2012) fornece equações para aproximar o valor dessas propriedades supracitadas, a partir da resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}). Os valores são obtidos em MPa, conforme as equações (5.57) a (5.62):

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ para } f_{ck} \leq 50MPa \quad (5.57)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot f_{ck}) \text{ para } f_{ck} > 50MPa \quad (5.58)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (5.59)$$

$$f_{c2m} = \left(1,2 - \frac{f_{cm}}{1000}\right) \cdot f_{cm} \quad (5.60)$$

$$\sigma_{com} = -240MPa \quad (5.61)$$

$$\tau_{com} = \left[185 - 180 \frac{f_{cm}}{100} + 260 \left(\frac{f_{cm}}{100}\right)^2 - 84 \left(\frac{f_{cm}}{100}\right)^3\right] \quad (5.62)$$

Calcula-se então, utilizando as Equações (5.63) a (5.65), os parâmetros α e β :

$$\alpha = \frac{h \cdot \beta - \sqrt{2}}{y} \quad (5.63)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{2} - \frac{3y}{k \cdot f_{2c}}}{h - \frac{9y}{f_{2c} - k}} \quad (5.64)$$

$$k = \frac{f_{ctm}}{f_{cm}}; f_{2c} = \frac{f_{c2m}}{f_{cm}}; x = \frac{\sigma_{com}}{f_{cm}}; y = \frac{\tau_{com}}{f_{cm}}; h = \frac{\sqrt{2}x + y}{\frac{y}{\sqrt{2}} - \frac{1}{3}} \quad (5.65)$$

São definidas as funções dos meridianos de tração (λ_t) e compressão (λ_c), de acordo com as equações (5.66) e (5.67). Estes, são utilizados para o cálculo das constantes C_1 e C_2 , visto nas equações (5.68) a (5.71).

$$\lambda_t = \left(2\sqrt{3} - \frac{f_{2c} \cdot h}{\sqrt{3} \cdot y}\right) \cdot \beta + \frac{\sqrt{3}}{f_{2c}} + \frac{\sqrt{2} \cdot f_{2c}}{\sqrt{3} \cdot y} \quad (5.66)$$

$$\lambda_c = \left(1 - \frac{h}{3y}\right) \cdot \sqrt{3} \cdot \beta + \sqrt{3} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot y} \quad (5.67)$$

$$c_1 = (2 \cos \theta - 1) \cdot \lambda_t + 4(1 - \cos \theta) \cdot \lambda_c, \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_t} \leq \frac{1}{2} \quad (5.68)$$

$$c_1 = \frac{\lambda_c}{\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\arccos(c_2)\right)}, \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_r} \geq \frac{1}{2} \quad (5.69)$$

$$c_2 = 1, \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_r} \leq \frac{1}{2} \quad (5.70)$$

$$c_2 = \cos\left\{3 \cdot \arctan\left[\frac{2 \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_r} - 1}{\sqrt{3}}\right]\right\}, \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_r} \geq \frac{1}{2} \quad (5.71)$$

Obtém-se a tensão principal (σ_1) pela Equação (5.72):

$$\sigma_1 = \frac{2\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \operatorname{sen}\left(\theta' + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} \quad (5.72)$$

4.1.2.2 Critério de Fissuração

Segundo Lazzari (2016), no modelo de fissuras distribuídas necessita-se, apenas, que se atualize a relação tensão-deformação, realizando a modificação das propriedades do material para considerar o dano por fissuração. O nível de tensão dos pontos de integração pode alcançar a superfície de ruptura tanto por fissuração quanto por esmagamento do concreto. Para realizar esta distinção adotou-se o critério proposto pelo boletim nº 156 do CEB (1983), no qual:

- a) se $\sigma_1 \geq \frac{f_{ct,m}}{2}$, o ponto de integração fissurou;
- b) se $\sigma_1 < \frac{f_{ct,m}}{2}$, o ponto de integração esmagou.

Sendo a tensão principal (σ_1) calculada pela Equação (5.72) e $f_{ct,m}$ a resistência média à tração do concreto.

4.1.2.3 Colaboração do concreto entre fissuras (*Tension stiffening*)

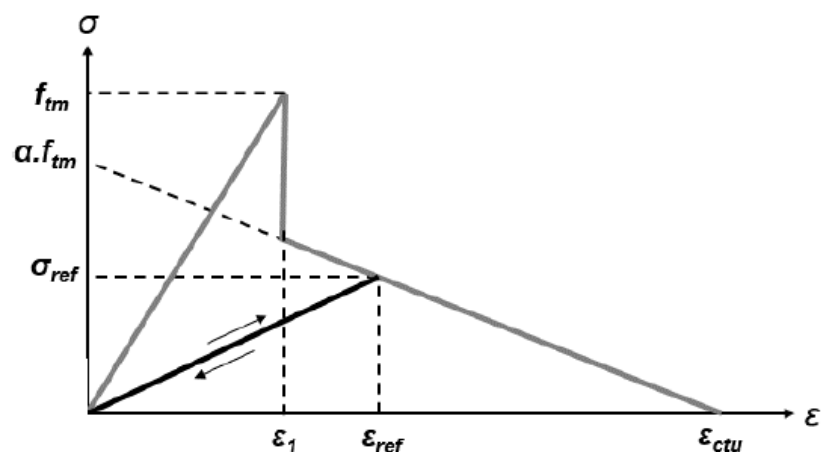
De acordo com Hinton (1988), os primeiros estudos de análise numérica em concreto estrutural assumiam que o concreto era um material elástico-frágil, quando submetido à tração. Assim sendo, quando ocorria uma fissura, a tensão normal ao plano de fissuração era considerada zero. Mas, quando ocorre a fissuração, o concreto entre fissuras continua suportando um certo nível de tensão.

Os efeitos da aderência entre o concreto e as barras de aço são responsáveis pela transmissão do esforço entre o aço e o concreto fissurado. Estes efeitos são dependentes de fatores como a resistência do concreto e características das barras de armadura (como o diâmetro e conformação superficial) e contribuem de forma significativa para a rigidez total das estruturas. Tal fenômeno é conhecido como “efeito de enrijecimento à tração” ou “*tension stiffening*”.

Na presente dissertação, adotou-se a opção sugerida por Hinton (1988), que sugere a modificação da curva tensão-deformação do concreto. Introduce-se um ramo descendente na curva tensão-deformação, que representa a degradação da aderência, a qual gera perdas de resistência à tração no regime pós-fissuração. O concreto é representado então como um material com comportamento linear com amolecimento em tração.

A relação constitutiva utilizada foi aprimorada por Martinelli (2003), conforme Figura 4.4 e Equação (5.73).

Figura 4.4 – Curva tensão-deformação para o concreto tracionado.



(fonte: HINTON, 1988 apud. LAZZARI, 2016)

$$\sigma_c = \alpha \cdot E_{ci} \cdot \varepsilon_t \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cTU}} \right) = \alpha \cdot \sigma_t \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cTU}} \right) \quad (5.73)$$

Onde:

α_{TS} - Parâmetro que define a inclinação do ramo linear descendente, varia de 0,6 a 0,8.

Adotou-se o valor de 0,7;

ε_t - Deformação nominal de tração na zona fissurada;

ε_c - Deformação no concreto;

σ_t - Tensão de tração na região fissurada;

ε_{cTU} - Limite de deformação de tração, que define o fim do trecho de amolecimento, varia entre 0,001 e 0,003. Adotou-se o valor de 0,003.

Eventualmente, algum ponto previamente fissurado pode vir a fechar total ou parcialmente, devido a redistribuição de tensões em outros pontos de integração ou carregamentos posteriores. Desta forma, caso a deformação atual ε seja pequena quando comparada com a deformação máxima de tração ε_{ref} (obtida através da fissura pelo ponto de integração em questão) a tensão normal à fissura (σ) é calculada conforme Equação (5.74). A trajetória de descarga pode ser visualizada na Figura 4.4. Caso haja a reabertura da fissura, esta segue a mesma trajetória até ε_{ref} ser excedida, após isto, a trajetória é definida pela Equação (5.73).

$$\sigma = \frac{\sigma_{ref}}{\varepsilon_{ref}} \varepsilon \quad (5.74)$$

Sendo:

σ_{ref} - Tensão interpolada correspondente à deformação ε_{ref} .

4.1.2.4 Modelo para a transferência das tensões de corte

Normalmente, as fissuras que surgem no concreto sob tração formam-se de maneira perpendicular à direção da tensão principal de tração σ_1 . Devido a alteração no carregamento ou por não-linearidades na estrutura, as direções principais acabam se modificando, causando o surgimento de tensões de corte no plano da fissura. O valor desta tensão depende das condições locais da fissura em questão.

Quando ocorre o aumento da abertura de fissura no concreto, existem dois mecanismos principais de transferência de esforços verticais, os quais diminuem a capacidade de transferência de corte (*shear transfer*). São estes mecanismos:

- a) engrenamento dos agregados (dependente do tipo e da granulometria dos agregados);
- b) efeito de pino da armadura “*dowell effect*” (dependente do diâmetro das barras, taxa de armadura e inclinação das barras em relação ao plano da fissura).

Para a inclusão de ambos efeitos, utilizou-se uma aproximação adotada por Hinton (1988), a qual consiste em adotar um valor reduzido para o módulo de elasticidade transversal do concreto correspondente ao plano fissurado (G_0), através de um fator β_g . Este fator varia entre 0 e 1, e é obtido pela Equação (5.75). O valor atualizado para o módulo de elasticidade transversal (G_c) é dado pela Equação (5.77).

$$\beta_g = 1 - \left(\frac{\varepsilon_{ff}}{0,005} \right)^{0,3} \quad (5.75)$$

$$G_0 = \frac{E_c}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5.76)$$

$$G_c = \beta_g \cdot G_0 \quad (5.77)$$

Onde:

ε_{ff} - Deformação de tração fictícia perpendicular à fissura.

4.2 AÇO

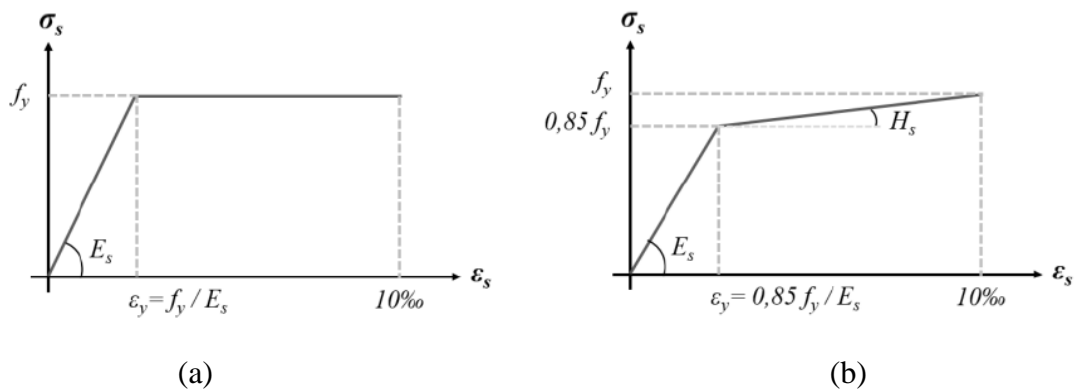
Em estruturas de concreto armado, as barras de aço resistem apenas à esforços axiais, podendo ser o seu comportamento descrito por um modelo uniaxial. Este comportamento é representado através de um diagrama tensão-deformação bilinear, como um material elastoplástico, o qual apresenta comportamento idêntico em tração e compressão.

Dependendo do processo de fabricação, as barras podem seguir dois comportamentos:

- aços com patamar de escoamento bem definido: adota-se um modelo elastoplástico perfeito;
- aços encruados a frio: utiliza-se um comportamento elastoplástico com endurecimento linear a partir de 0,85 da tensão de escoamento.

Tais comportamentos podem ser vistos na Figura 4.5. No presente trabalho utilizou-se o modelo elastoplástico perfeito para o aço.

Figura 4.5 – Modelo para o aço: (a) elastoplástico perfeito; (b) elastoplástico com endurecimento linear.



(fonte: LAZZARI, 2016)

5 ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica, desenvolvida neste trabalho, foi realizada no *software* ANSYS, no modo *Mechanical APDL*. A calibração dos modelos deve ser feita a partir de resultados experimentais ou modelos analíticos. Cabe ressaltar que podem ocorrer erros nos processos experimentais da mesma maneira que podem existir erros numéricos. Este capítulo apresenta de forma detalhada os tipos de elementos e critérios utilizados no modelo e na análise não-linear.

5.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Bathe (1996), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico eficiente para solução de problemas. Este método, consiste na divisão de um meio contínuo em elementos de dimensões finitas, denominados elementos finitos, que são ligados entre si por pontos nodais contidos no contorno, transformando assim o sistema contínuo em um sistema discreto, formado por uma malha de elementos. Desta maneira, o meio contínuo que contém infinitos pontos e, portanto, infinitas incógnitas a determinar, reduz-se a um número finito de incógnitas correspondente ao número de pontos vezes o número de incógnitas em cada ponto nodal da malha de elementos finitos.

Utilizando-se o modelo de deslocamentos, a partir das equações de cada elemento, obtém-se o sistema de equações de equilíbrio da estrutura, modelada por uma malha de elementos, da mesma forma que em análise matricial ($[K]\{u\} = \{F\}$). De posse do vetor de deslocamentos nodais ($\{u\}$), são calculados os deslocamentos em pontos genéricos dos elementos finitos, através de polinômios interpoladores, obtendo-se o vetor de deslocamentos dos elementos. Com este vetor, torna-se possível obter as tensões e deformações no interior dos elementos, através da aplicação do Princípio dos Trabalhos Virtuais (BATHE, 1996).

A análise utilizando o método dos elementos finitos, permite a consideração do comportamento não-linear dos materiais. O concreto, devido à sua natureza heterogênea, entre outros fatores, apresenta uma resposta em termos de relação tensão-deformação altamente não-linear, quando submetido a um carregamento externo. Desta forma, a aplicação do MEF para análise de estruturas de concreto, resulta em um sistema de equações

não-lineares, fazendo-se necessário utilizar um método numérico para solução. Um dos métodos numéricos mais eficientes, é o Método de Newton-Raphson. Este, apresenta convergência bastante eficaz e sua formulação consiste em um processo iterativo e incremental – aplica-se em cada etapa um incremento de carga, sendo calculado o respectivo incremento de deslocamento de maneira iterativa, até que seja atingida a convergência dos deslocamentos. Verificada esta convergência, um novo incremento de carga é feito, repetindo-se o processo iterativo até que não seja mais possível equilibrar as forças aplicadas com os esforços internos no material, não havendo convergência, e caracterizando assim a ruptura estrutural. No presente trabalho, nas análises realizadas, foi utilizado este método, já implementado no *software* ANSYS.

Conforme apresentado por Cook et. al (1989), as Equações (6.1) e (6.2) representam a formulação do método numérico Newton-Raphson. Para uma determinada iteração “i”, calcula-se:

$$[K]_{i-1} \{\Delta u\}_i = \{\Psi\}_{i-1} \quad (6.1)$$

$$\{\Psi\}_{i-1} = \{F\}_e - \{R\}_{i-1} \quad (6.2)$$

Onde:

$[K]_{i-1}$ - Matriz de rigidez da iteração “i-1”;

$\{\Delta u\}_i$ - Vetor de incremento de deslocamentos;

$\{\Psi\}_{i-1}$ - Vetor de forças residuais da iteração “i-1”;

$\{F\}_e$ - Vetor de forças externas;

$\{R\}_{i-1}$ - Vetor de esforços internos da iteração “i-1”.

Ao final do processo iterativo, calcula-se o vetor de deslocamentos, para a respectiva iteração ($\{u\}_i$) através da Equação (6.3).

$$\{u\}_i = \{u\}_{i-1} + \{\Delta u\}_i \quad (6.3)$$

De posse dos deslocamentos, pode-se calcular as deformações, tensões, o vetor de esforços internos ($\{R\}_i$) e a nova matriz de rigidez ($[K]_i$). O novo vetor de forças residuais ($\{\Psi\}_i$) é determinado a partir do vetor de esforços internos de acordo com a Equação (6.4).

$$\{\Psi\}_i = \{F\}_e - \{R\}_i \quad (6.4)$$

A solução do processo tem por finalidade reduzir o vetor de forças residuais, e, conseqüentemente, o vetor $\{\Delta u\}$ a um valor muito próximo de zero, conforme uma determinada tolerância. Na primeira iteração de cada etapa, adota-se:

$[K]_0$ - Matriz de rigidez da última iteração da etapa anterior;

$\{\Psi\}_0 = \{\Delta F\}_e$ - Incremento do carregamento externo;

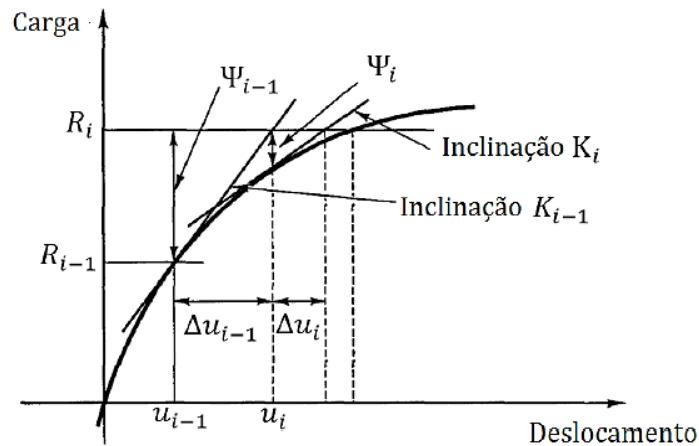
$\{u\}_0$ - Vetor de deslocamento da última iteração da etapa anterior.

Desta forma, o vetor de forças externas ($\{F\}_e$) é dado pela Equação (6.5):

$$\{F\}_e = \{F\}_{e-1} + \{\Delta F\}_e \quad (6.5)$$

A matriz de rigidez é atualizada a cada iteração, o que caracteriza o Método de Newton-Raphson puro, também chamado de padrão. Esta variação do método demanda maior esforço computacional, porém conduz a uma convergência bastante rápida. Como alternativa, existe o Método de Newton-Raphson modificado, no qual a matriz de rigidez é mantida constante, para todas as etapas, ou seja, utiliza-se a matriz de rigidez elástica. Esta situação também está implementada no *software* ANSYS, porém aumenta significativamente o número de iterações necessárias para que se atinja o equilíbrio. Nas análises realizadas no presente estudo, foi empregado o Método de Newton-Raphson puro, o qual para um caso genérico de um grau de liberdade, está ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Ilustração do processo iterativo de Newton-Raphson para um sistema com um grau de liberdade.



(fonte: Baseado em BATHE, 1996)

5.2 SOFTWARE ANSYS

Com origem na década de 1970, o *software* ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*), representa uma plataforma de cálculo para simulação numérica que faz uso do método dos elementos finitos. Em relação aos *softwares* comerciais de elementos finitos, o ANSYS vem sendo amplamente utilizado no meio acadêmico e de pesquisa, dado seu vasto número de recursos, boa documentação, disponibilidade de licença estudantil e, em especial, pela forma que o usuário pode intervir durante as análises. Para análises estruturais, o programa apresenta duas interfaces, o sistema *workbench* e o sistema APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), o qual possibilita um maior controle do usuário sobre a simulação numérica.

O programa ANSYS, versão 19.2, foi utilizado no presente trabalho, via sistema APDL, para a criação dos modelos numéricos. Simplificadamente, uma análise estrutural através deste *software* é dividida em três etapas – *Preprocessor* (pré-processamento), *Solution* (solução) e *Postprocessor* (pós-processamento). Na primeira etapa, é definida a geometria da estrutura, através de sua modelagem e discretização, a escolha dos elementos finitos a serem utilizados, a definição das constantes envolvidas no problema e dos materiais constituintes da estrutura. Na segunda etapa, é definido o carregamento atuante na estrutura, as condições de contorno e o tipo de análise a ser realizada. Por último, na etapa de pós-processamento, são apresentados os resultados obtidos através da análise.

Em relação aos critérios de convergência, adotaram-se dois critérios. O primeiro, é em relação ao número máximo de iterações em cada sub-passo de carga, com a finalidade de atingir o equilíbrio. Esse número é limitado de forma que, caso seja excedido o limite estabelecido é considerado que a análise não converge. O segundo critério de convergência está relacionado com o resíduo, pois este define a tolerância aceitável em relação a medidas de força (força, momento e pressão hidrostática) e deslocamento (deslocamento, rotação, variação de volume) a partir do comando *CNVTOL*. O valor de tolerância padrão do programa para o critério em força é 0,005.

5.2.1 Elementos finitos utilizados

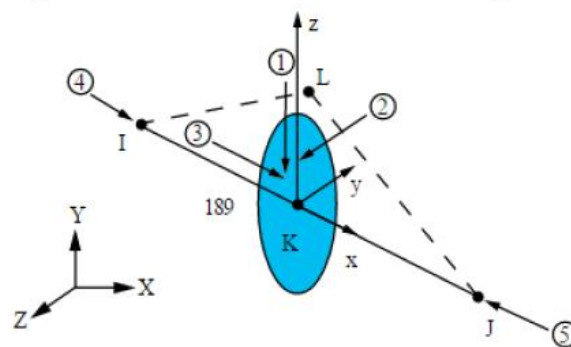
O *software* ANSYS disponibiliza uma ampla gama de elementos, e sua biblioteca interna orienta os usuários, com informações pertinentes a cada elemento. Para cada um de seus elementos, o ANSYS apresenta opções chave, denominado *KEYOPTS*. As *KEYOPTS* são opções que permitem caracterizar o comportamento do elemento e apresentam valores padrões aplicados, os quais devem ser revistos dependendo da análise a ser realizada. Os comandos *SECTYPE* e *SECDATA* são utilizados para definir as propriedades gerais da seção transversal, como o tipo de seção a ser adotada, dimensões, refinamento da malha (relativa à seção transversal). No presente trabalho utilizou-se três tipos de elementos especificados nos próximos itens.

5.2.1.1 *Beam189*

O elemento *Beam189*, se adequa para análise linear ou não-linear de estruturas reticuladas, como pilares e vigas esbeltas ou moderadamente esbeltas envolvendo diversos modelos constitutivos de materiais (modelos elásticos, plásticos, de fluência e permite que seja inserido o comportamento pelo usuário, através da sub-rotina *Usermat*). De acordo com a biblioteca do ANSYS (2019), esse elemento é baseado na teoria de vigas de Timoshenko. Esta teoria, trabalha com deformação por corte de primeira ordem, ou seja, considera-se as deformações devido ao esforço cortante, sendo essas deformações constantes ao longo de toda seção transversal, o que implica na premissa de que seções planas permanecem planas após a deformação. A consideração dessa premissa viabiliza as análises de grandes deformações.

O *Beam189* trata-se de um elemento unidimensional, contido em um espaço tridimensional e possui três nós ao longo de seu comprimento, apresenta formulação quadrática, com seis graus de liberdade por nó (três graus de liberdade relativos a translações e três graus de liberdade relativos a rotações em torno dos eixos locais x , y e z), podendo existir um sétimo grau de liberdade relacionado ao empenamento, o qual não foi considerado no presente trabalho. A geometria, os nós e o sistema de coordenadas local para o elemento mencionado, constam ilustrados na Figura 5.2 (ANSYS, 2019)

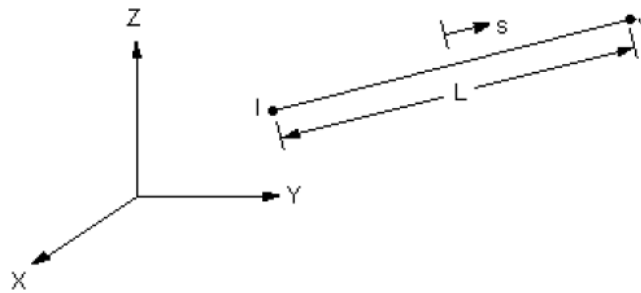
Figura 5.2 - Elemento *Beam189*.



(fonte: ANSYS, 2019)

Na Figura 5.2, exibe-se o nó L, sendo este um nó adicional, que pode ser considerado ou não pelo usuário. Este, permite orientar a posição da seção transversal em relação ao eixo do elemento, atribuindo desta forma a rigidez correta para a análise. Os números circunscritos correspondem às direções de referência para a aplicação de cargas sobre o elemento. As Equações (6.6) a (6.12) correspondem às funções de interpolação para deslocamentos, rotações e variações de temperatura no elemento, onde “ s ” é a coordenada local conforme indicado na Figura 5.3. A Equação (6.12) representa a variável utilizada para caracterizar um gradiente de temperatura, parâmetro que não foi empregado no presente trabalho (ANSYS, 2019).

Figura 5.3 – Coordenadas do elemento finito linear *Beam189*.



(fonte: ANSYS, 2019)

$$u = \frac{1}{2} [u_i(-s + s^2) + u_j(s + s^2)] + u_k(1 - s^2) \quad (6.6)$$

$$v = \frac{1}{2} [v_i(-s + s^2) + v_j(s + s^2)] + v_k(1 - s^2) \quad (6.7)$$

$$w = \frac{1}{2} [w_i(-s + s^2) + w_j(s + s^2)] + w_k(1 - s^2) \quad (6.8)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2} [\theta_{xi}(-s + s^2) + \theta_{xj}(s + s^2)] + \theta_{xk}(1 - s^2) \quad (6.9)$$

$$\theta_y = \frac{1}{2} [\theta_{yi}(-s + s^2) + \theta_{yj}(s + s^2)] + \theta_{yk}(1 - s^2) \quad (6.10)$$

$$\theta_z = \frac{1}{2} [\theta_{zi}(-s + s^2) + \theta_{zj}(s + s^2)] + \theta_{zk}(1 - s^2) \quad (6.11)$$

$$T = \frac{1}{2} [T_i(-s + s^2) + T_j(s + s^2)] + T_k(1 - s^2) \quad (6.12)$$

Sendo:

u, w, v - Deslocamentos na direção dos eixos locais x, y e z , respectivamente;

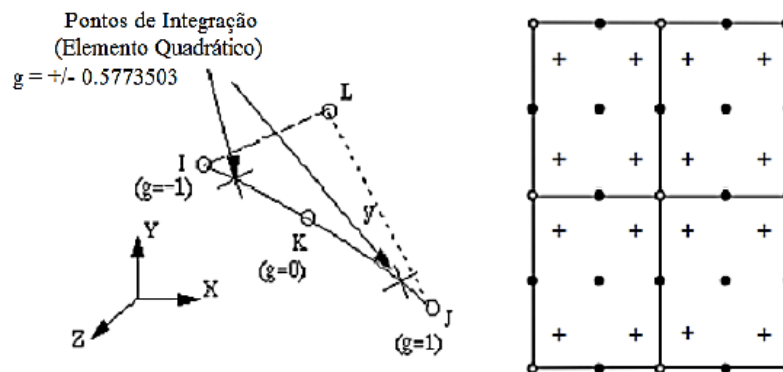
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ - Rotações em torno dos eixos locais x, y e z , respectivamente;

s - Coordenada local.

O referido *software* fornece opções de seção transversal padrão, mas é possível que o usuário defina seções diferentes. Caso seja utilizada alguma seção transversal padrão, o *software* calcula as propriedades da seção por integração, realizando a divisão da seção em um número padrão de células, sendo cada uma destas com nove nós e quatro pontos de integração. O usuário pode definir o número de divisões da seção transversal, podendo inclusive ser especificado mais de um material para a seção transversal do elemento.

O elemento *Beam189* possui dois pontos de integração ao longo do seu comprimento, nos quais se avaliam tensões e deformações na seção transversal, e quatro pontos de integração por célula, de acordo com a Figura 5.4. O padrão “*default*” da malha relativa à seção transversal, são duas células referentes à base e duas células referentes à altura. Entretanto, quanto mais refinada a discretização da seção transversal, maior o número de pontos de integração e, por consequência, uma maior precisão na solução.

Figura 5.4 - Pontos de integração e discretização da seção para o elemento *Beam189*.



(fonte: ANSYS, 2013 apud. SCHERER, 2018)

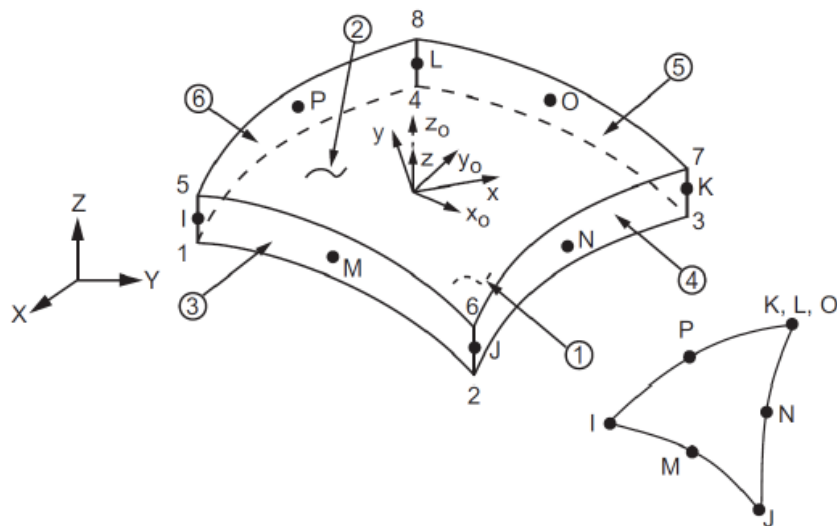
Apresentada por Ibrahimbegovic (1995), a formulação do *Beam189* trata os efeitos oriundos da flexão de forma desacoplada em relação ao cisalhamento. Isto posto, o comportamento axial do modelo é prescrito pelos modelos constitutivos associados ao concreto, enquanto os efeitos das tensões de corte são avaliados através de um modelo elástico linear, apresentados no Capítulo 4.

5.2.1.2 *Shell281*

O elemento finito *Shell281* é adequado para realizar análise de estruturas por camadas, casca compósitas finas até moderadamente espessas, admitindo comportamentos lineares, não-lineares e grandes deformações. Tal elemento possui funções de interpolação quadráticas e baseia-se na teoria de Mindlin-Reissner, na qual tem-se a deformação de corte de primeira ordem, onde as seções planas normais permanecem planas com relação à superfície média, mas não necessariamente durante e após a flexão. Esta rotação da seção origina a deformação de cisalhamento transversal constante na direção da espessura.

De acordo com a Figura 5.5, o elemento em questão possui oito nós e seis graus de liberdade por nó (três graus de liberdade relativos a translações e três graus de liberdade relativos a rotações em torno dos eixos locais x , y e z), assim como o *Beam189*, o que os torna compatíveis. O sexto grau de liberdade é a rotação no plano da casca (*drilling*) e está associado com uma rigidez fictícia a fim de prevenir singularidades numéricas da matriz de rigidez. Para calcular esta rigidez fictícia o elemento *Shell281* utiliza o método da penalidade, o qual relaciona os graus de liberdade da rotação com a translação (ambos no plano da casca).

Figura 5.5 – Elemento *Shell281*.



(fonte: ANSYS, 2019)

As funções de interpolação do elemento *Shell281* são dadas pelas Equações (6.13) a (6.18):

$$u = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} u_i(1-s)(1-t)(-s-t-1) + u_j(1+s)(1-t)(s-t-1) + \\ u_k(1+s)(1+t)(s+t-1) + u_l(1-s)(1+t)(-s+t-1) + \\ + \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} u_m(1-s^2)(1-t) + u_n(1+s)(1-t^2) + \\ u_o(1-s^2)(1+t) + u_p(1-s)(1-t^2) \end{array} \right] \end{array} \right] \quad (6.13)$$

$$v = \frac{1}{4} [v_i(1-s)... \text{análogo a (6.13)}] \quad (6.14)$$

$$w = \frac{1}{4} [w_i(1-s)... \text{análogo a (6.13)}] \quad (6.15)$$

$$\theta_x = \frac{1}{4} [\theta_i(1-s)... \text{análogo a (6.13)}] \quad (6.16)$$

$$\theta_y = \frac{1}{4} [\theta_y(1-s)... \text{análogo a (6.13)}] \quad (6.17)$$

$$\theta_z = \frac{1}{4} [\theta_z(1-s)... \text{análogo a (6.13)}] \quad (6.18)$$

Conforme Bathe (1996), para elementos finitos quadriláteros de oito nós, como o *Shell281*, é recomendado a ordem de integração 3x3, mas este elemento trabalha com integração reduzida de 2x2 no plano. Segundo Sun (2006), o esquema de integração reduzida evitaria o problema do travamento de corte (*shear locking*), mas poderia causar a singularidade conhecida como modo espúrio (*hourglass effect*).

O elemento *Shell281* permite até 255 camadas, cujas respectivas propriedades mecânicas e geométricas podem ser fornecidas via comandos específicos. As tensões são calculadas para o centro de cada camada do elemento, podendo ser extrapoladas para o topo e/ou base de cada camada. São permitidas diversas formas de seção transversal, sendo necessário atribuir dados de espessura, material, ângulo de referência ao sistema de coordenadas do elemento e número de pontos de integração ao longo da espessura (o padrão são três, nesta dissertação utilizou-se cinco).

5.2.1.3 *Reinf264*

Segundo Darwin (1991), no que concerne uma análise de estruturas de concreto armado, por meio do método dos elementos finitos, a inserção da armadura pode ocorrer através de três modelos:

- a) distribuído: considera-se a armadura uniformemente distribuída no elemento de concreto, com aderência perfeita entre o aço e o concreto;
- b) discreto: a armadura é representada por elementos unidimensionais, como barras de treliça plana, conectadas à malha de elementos finitos de concreto através de seus nós de extremidade. Para que haja compatibilidade total de deslocamentos, o elemento finito usado para o concreto deve ser linear, pois o campo de deslocamento do elemento tipo treliça é linear;
- c) incorporado: a armadura é introduzida como uma linha de material mais rígido no interior do elemento de concreto, que resiste apenas a esforços axiais e considera-se aderência perfeita entre o aço e o concreto. Os deslocamentos da armadura coincidem com os deslocamentos do elemento de concreto que o envolve, resultando em um único campo de deslocamentos.

No presente trabalho, optou-se por utilizar a armadura em um modelo incorporado, pois se tem a possibilidade de as barras de aço assumirem posições arbitrárias dentro do elemento de concreto, facilitando sua utilização. Também não há a necessidade de um maior refinamento da malha para introdução da armadura e admite-se a aderência perfeita entre o aço e o concreto.

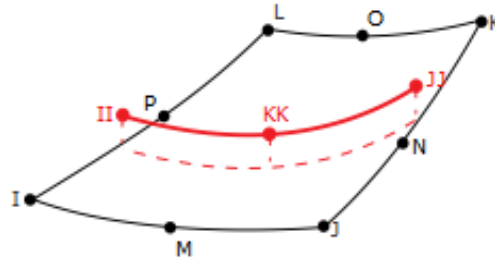
No *software* ANSYS, o elemento finito compatível com os elementos *Beam189* e *Shell281* que representa armadura incorporada é o *Reinf264*. O elemento *Reinf264* é utilizado para a representação das armaduras dos elementos estruturais e necessita da existência de um elemento de base, podendo ser este, elementos de viga (*beam*), sólidos (*solid*) e de casca (*Shell*). As configurações relativas as coordenadas nodais, os graus de liberdade e as conectividades do elemento *Reinf264*, são idênticas as do elemento base. A Figura 5.6 exhibe o sistema de coordenadas local do elemento *Reinf264* e a sua geometria quando associado ao elemento de base *Beam189* e a Figura 5.7 quando associado ao elemento *Shell281*.

Figura 5.6 – Elemento *Reinf264* associado ao elemento base *Beam189*.



(fonte: ANSYS, 2019)

Figura 5.7 – Elemento *Reinf264* associado ao elemento base *Shell281*.



(fonte: ANSYS, 2019)

A formulação do *Reinf264* permite a representação de fibras de reforços atuantes em direções arbitrárias, resistindo exclusivamente a esforços axiais, de tração ou compressão. Estas fibras são associadas ao elemento base, inseridas através de posições relativas na seção transversal. Esse elemento é aplicável em análises de problemas envolvendo elasticidade, plasticidade, fluência e grandes deformações (ANSYS, 2019). Nas Figuras 5.8 e 5.9 tem-se a representação do elemento *Reinf264* inserido em elementos *Beam189* e *Shell281*, respectivamente.

Figura 5.8 – Representação do elemento *Reinf264* associado a um elemento *Beam189*.

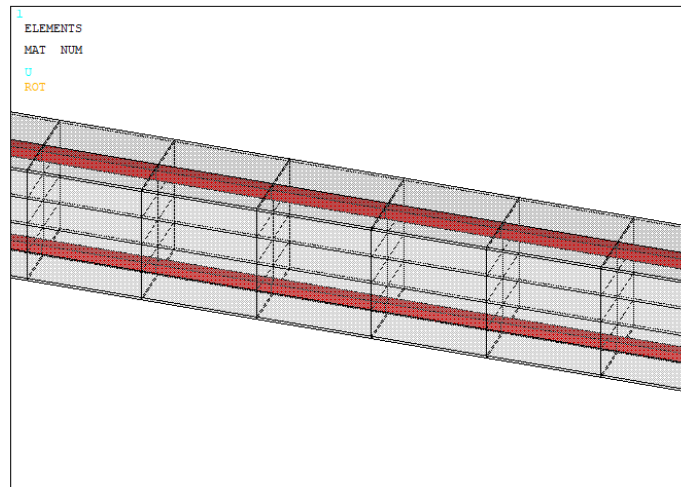
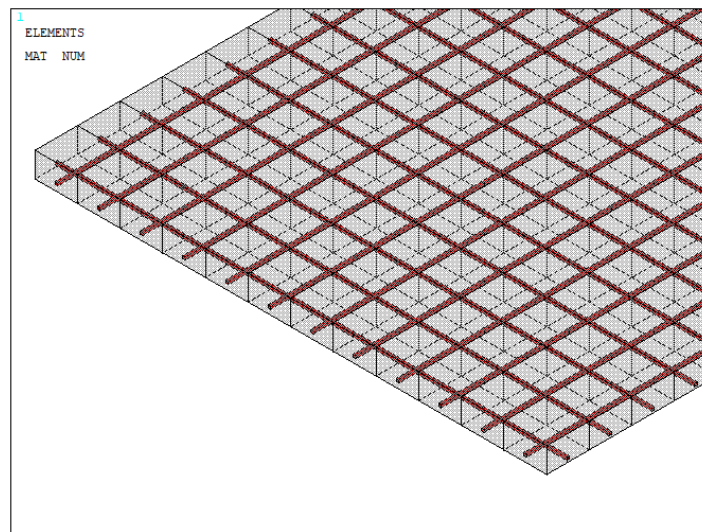


Figura 5.9 – Representação do elemento *Reinf264* associado a um elemento *Shell281*.



5.2.2 Usermat

O ANSYS fornece acesso a ferramenta UPF (*User Programmable Features*), a qual se trata de um instrumento que compreende: a criação de um novo elemento; modificação e monitoração de elementos existentes; customização do comportamento do material, de elementos de contato e carregamentos. Estas adaptações/implementações são programadas pelo usuário em linguagem FORTRAN 77 (*Formula Translation System*). Essa sub-rotina deve ser compilada e associada ao sistema principal, de modo que seja possível realizar análises através do ANSYS utilizando os modelos programados. A utilização deste recurso

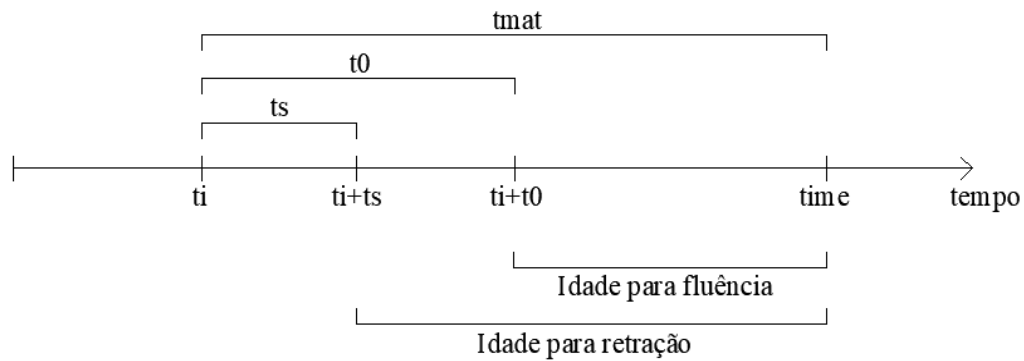
exige conhecimento em programação e em elementos finitos, sendo de suma importância realizar validações com testes.

Neste trabalho foi utilizado o recurso de customização referente ao comportamento do material, para o concreto. Segundo Quevedo (2017), durante a solução, a *Usermat* é “chamada” para cada ponto de integração de cada elemento. Com o incremento de deformação total, vindo do método de Newton-Raphson, a sub-rotina atualiza as tensões que entram no cálculo do resíduo (equilíbrio de forças externas e forças internas) durante as iterações de equilíbrio. Satisfeito o equilíbrio, atualizam-se as tensões, deformações e variáveis de estado, indo para o próximo incremento de tempo ou carga (chamado de sub-passo). Quando se realiza o último sub-passo ou não se obtém a convergência, segue o processo citado acima. Cabe ressaltar que a *Usermat* opera com tensões e deformações, e o processo iterativo de Newton-Raphson trabalha com forças e deslocamentos. A conversão destas variáveis, própria do método dos elementos finitos, é feita internamente pelo programa principal.

A *Usermat* possui internamente um conjunto de quatro sub-rotinas, que estão associadas ao tipo de elemento utilizado na análise, podendo ser para elemento sólido (*Usermat3D*), elemento de estado plano (*Usermatps*), elementos de viga (*Usermatbm*) ou elementos de treliça (*Usermat1D*). A sub-rotina principal *Usermat* verifica o tipo de elemento adotado na análise, e redireciona o processo de solução para a sub-rotina relacionada ao elemento, atualizando as tensões de acordo com o modelo constitutivo (ANSYS, 2019).

No presente trabalho, para a implementação do modelo constitutivo para o concreto, utiliza-se as sub-rotinas *Usermatbm* (*Beam189*) e *Usermatps* (*Shell281*). As rotinas que regem o comportamento viscoelástico, programadas por Quevedo (2017) para elementos tridimensionais, foram adaptadas aos elementos utilizados neste trabalho. É de suma importância esclarecer os tempos que são adotados nesta programação, conforme ilustra Figura 5.10.

Figura 5.10 – Tempos adotados na programação da *Usermat* viscoelástica.



Sendo:

t_i - Tempo de análise no qual o concreto passa a existir;

t_s - Idade do concreto ao final da cura;

t_0 - Idade do concreto no instante que começa a atuação da carga;

t_{mat} - Tempo de existência do material.

Junto ao comportamento viscoelástico introduziu-se a rotina de fissuração, reprogramada, baseada nas rotinas de Lazzari (2017). No Apêndice A encontra-se a *usermat* utilizada nesta dissertação.

No que concerne as rotinas de fissuração, foram eliminados os blocos de variáveis *COMMON*. Não é aconselhável guardar o valor das variáveis em um bloco *COMMON* (exceto as variáveis que mantêm os seus valores constantes ao longo da análise), pois esse tipo de declaração traz problemas junto à paralelização do ANSYS, visto que, vários processos paralelos podem acessar e sobrescrever esse espaço na memória simultaneamente. O uso das variáveis de estado, torna-se vantajoso, pois, estas são atualizadas apenas no final do processo iterativo, evitando que qualquer resíduo numérico ou variável intermediária do processo de solução seja armazenada de forma indevida.

Para que a ferramenta UPF esteja disponível para uso, quando se realiza a instalação do *software* ANSYS, deve ser ativada a opção de instalação dos arquivos de customização,

ANSYS *Customization Files*. Para maiores informações sobre o processo de instalação, compilação e utilização da *Usermat*, consultar Quevedo (2017).

5.2.3 *Birth and Death*

Esse recurso fornecido pelo *software* ANSYS, é de extrema utilidade para realizar a análise de escavações (mineração, túneis), construção em estágios (pontes, edifícios), montagem sequencial (computação), entre outras aplicações. No presente trabalho, este será de suma importância para que seja realizado a análise faseada, a qual os elementos surgem conforme a sequência construtiva.

A ferramenta *Birth and Death* permite ativar/desativar um elemento para uma etapa de carga específica na análise. Quando se realiza a desativação de um ou vários elementos (*Death*), estes não são removidos, mas as suas respectivas rigidezes são multiplicadas por um fator de redução relevante, tornando os estes elementos inativos. Sendo um elemento desativado, as propriedades deste, como massa, amortecimento, calor específico, tensão e outros efeitos são consideradas inoperantes pelo programa.

De forma semelhante, quando os elementos são ativados (*Alive*), o programa não adiciona estes elementos ao modelo, estes são simplesmente reativados, juntamente com suas propriedades com os valores originais que foram previamente definidos. O comando em questão, reativa os elementos sem que haja histórico de deformação ou semelhante, visto que, geralmente, os elementos reativados são isentos de tensão. No caso de análises térmicas, é possível calcular para elementos recém ativados as deformações térmicas com base na temperatura atual ou na temperatura de referência.

A fim de conhecer e testar tal ferramenta, modelou-se um pórtico plano, sem a utilização de armaduras e com o modelo constitutivo para o concreto no regime elástico, com as características exibidas na Figura 5.11. A discretização transversal foi adotada de quatro células na base por seis células na altura, já a discretização longitudinal pode ser vista na Figura 5.12. Foram utilizadas as propriedades do concreto, conforme Tabela 5.1.

Figura 5.11 – Pórtico plano elaborado pela autora, utilizando elemento *Beam189*.

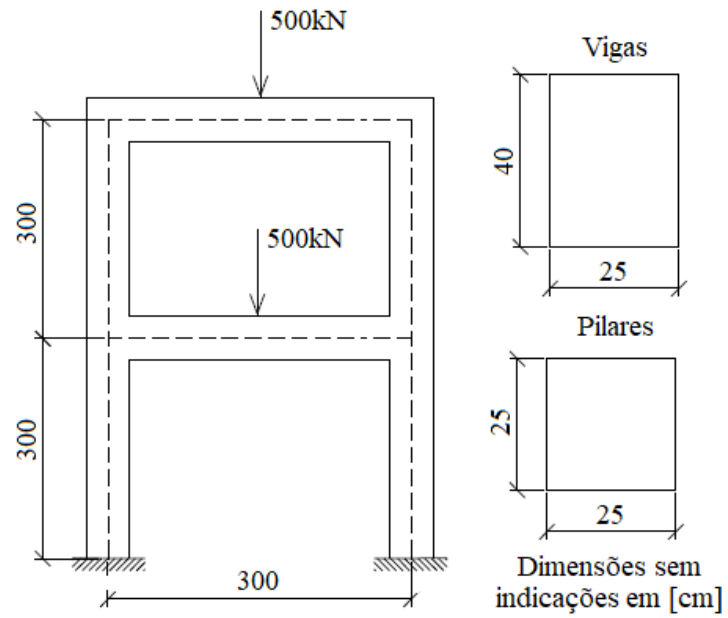


Figura 5.12 – Discretização empregada no *software ANSYS*.

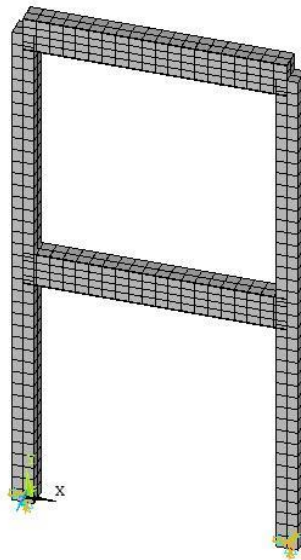
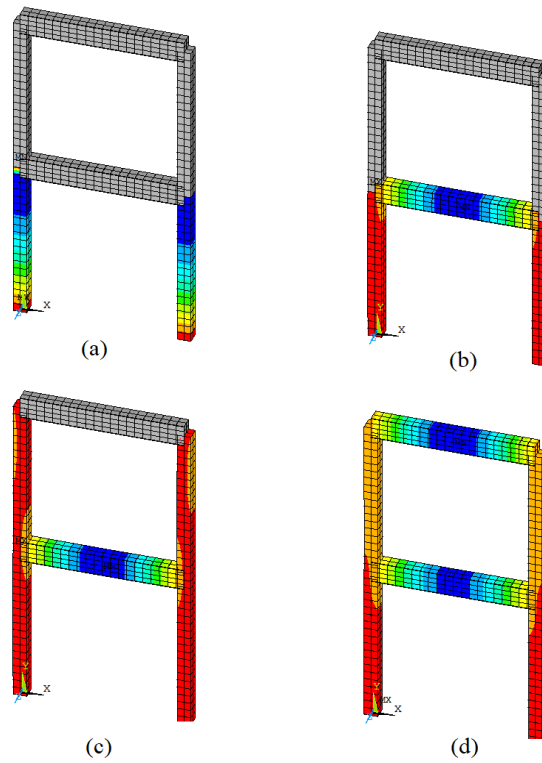


Tabela 5.1 – Propriedades do concreto aos 28 dias.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Resistência média a compressão do concreto	f_{cm}	MPa	33,60
Resistência à tração do concreto	f_{ct}	MPa	2,90
Módulo de Elasticidade	E_c	MPa	32200
Coefficiente de Poisson	ν	adm.	0,20

Fazendo uso do recurso de ativação e desativação, definiu-se grupos de elementos, chamados de componentes. Foram estabelecidos quatro componentes: os pilares do primeiro pavimento, a viga do primeiro pavimento, os pilares do segundo pavimento e a viga do segundo pavimento. Primeiramente, todos componentes são desativados, e posteriormente, foram designados tempos de ativação para cada componente, de forma a simular a construção de um pórtico. Realizou-se a resolução do modelo, e na parte de pós-processamento é possível acessar a um histórico da estrutura, pelo comando *RESULTS VIEWER*. Neste, escolheu-se demonstrar os deslocamentos verticais da estrutura, conforme demonstra Figura 5.13. Os elementos em cinza correspondem a elementos de componentes que ainda não foram ativados, conforme a etapa em questão. Neste caso, como realizou-se uma análise elástica, não houve diferenças em termos de deslocamentos na estrutura.

Figura 5.13 – Demonstração da ferramenta de ativação/desativação do ANSYS, exibindo o deslocamento vertical. Ativa-se o componente dos pilares primeiro pavimento (a), a viga do primeiro pavimento (b), os pilares do segundo pavimento (c) e, por fim, a viga do segundo pavimento.



6 VALIDAÇÕES DOS MODELOS

A fim de verificar a eficiência dos modelos numéricos implementados no presente trabalho, neste capítulo serão demonstradas as validações e testes realizados.

6.1 TESTES UNIAXIAIS

6.1.1 Concreto Comprimido - Comportamento Viscoelástico

Quevedo (2017) realizou dois testes utilizando o elemento finito *solid185*, um elemento tridimensional com oito nós. O primeiro teste consiste em aplicar uma carga de compressão constante de 5 MPa e o segundo teste compreende a aplicação de três patamares incrementados de 5 MPa de compressão, sendo estes patamares aos 10, 50 e 75 dias.

Na presente dissertação tais testes foram reproduzidos sob as mesmas condições, utilizando os elementos finitos *Beam189* e *Shell281*. O objetivo dos testes é verificar se o princípio da superposição dos efeitos está sendo considerado de maneira correta para a fluência, visto que estes são elementos finitos diferentes do utilizado por Quevedo (2017). Para tal, compara-se o resultado analítico obtido pela formulação do CEB-FIP MC90 com o resultado do modelo implementado no ANSYS. Na Tabela 6.1 encontram-se os dados utilizados para a modelagem dos testes.

Tabela 6.1 – Dados para o teste do concreto

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Resistência característica à compressão do concreto	f_{ck}	MPa	40
Coefficiente que depende do tipo de cimento	s	adm.	0,25
Coefficiente de Poisson	ν	adm.	0,20
Umidade relativa do ambiente	RH	%	70
Espessura fictícia	h_f	cm	0,17
Idade do concreto no final da cura	t_s	dias	7
Coefficiente que depende do tipo de cimento	β_{sc}	adm.	5
Temperatura	temp	°C	20
Coefficiente que depende do tipo de cimento	α	adm.	1

Em relação ao *Beam189*, utilizou-se um elemento com comprimento unitário e com seção de $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Engasta-se o bloco em uma das extremidades e aplica-se a carga na extremidade oposta, conforme ilustra Figura 6.1. No que concerne ao *Shell281*, procede-se de modo similar, modela-se um elemento com uma área de $1 \times 1 \text{ cm}^2$, adotando espessura unitária. Tal área recebeu as condições de contorno e carga indicadas na Figura 6.2.

Figura 6.1 – Modelo de validação uniaxial do concreto sob compressão para o elemento *Beam189*.

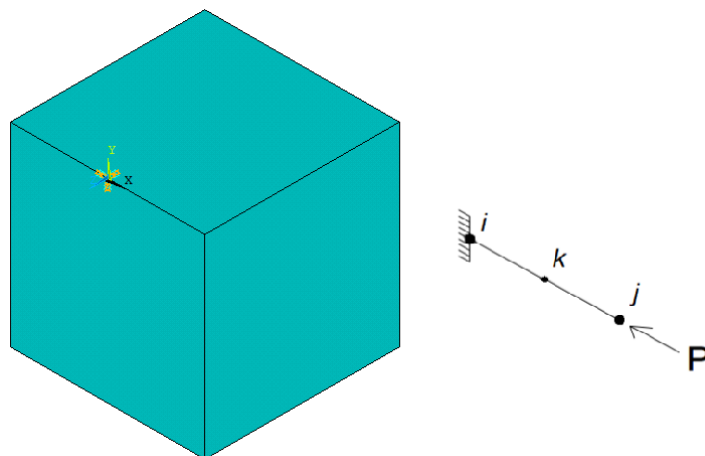
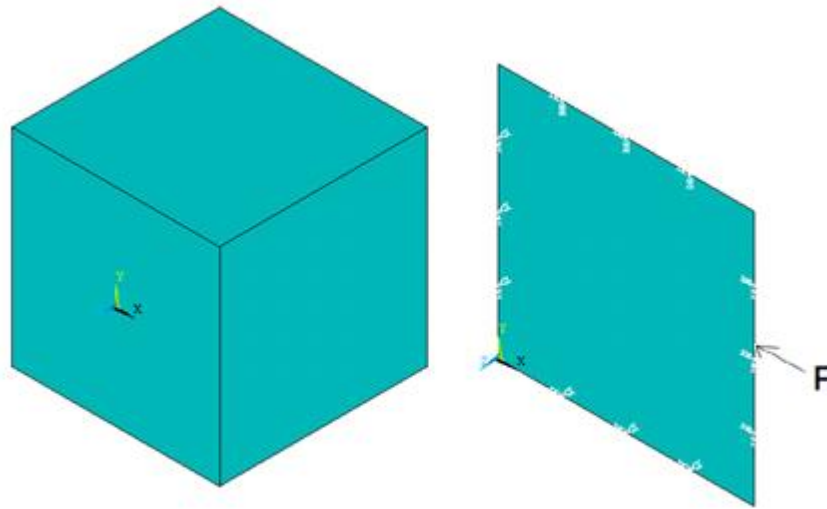


Figura 6.2 – Modelo de validação uniaxial do concreto sob compressão para o elemento *Shell281*.



Na Figura 6.3 encontra-se o diagrama visual do bloco em compressão, extraído do ANSYS, tanto para o elemento *Beam189*, quanto para o *Shell281*. Os resultados encontrados para ambos testes e elementos encontram-se nas Figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7.

Figura 6.3 – Diagrama visual do bloco sob compressão.

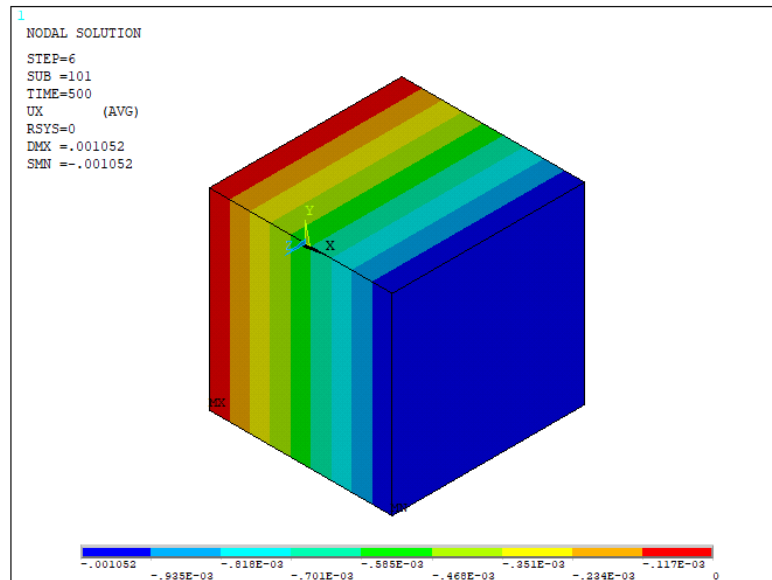


Figura 6.4 – Teste com carga constante de 5 MPa aplicada aos 10 dias, para o *Beam189*.

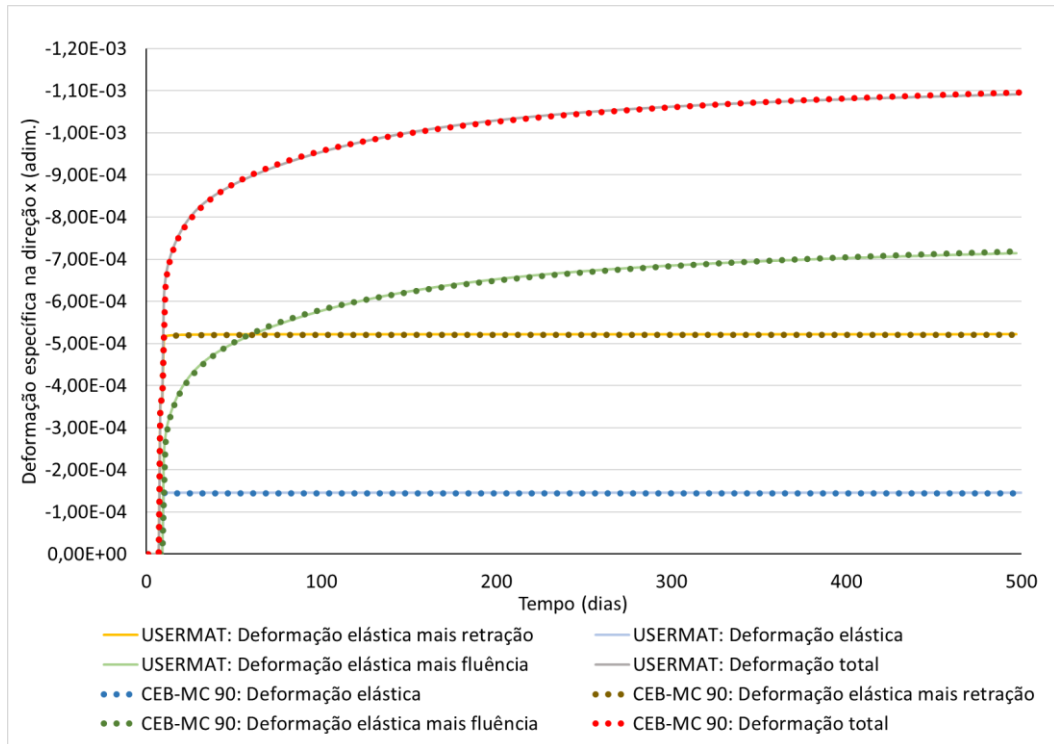


Figura 6.5 – Teste com carga variável de 5 MPa aplicada aos 10, 50 e 75 dias, para o *Beam189*.

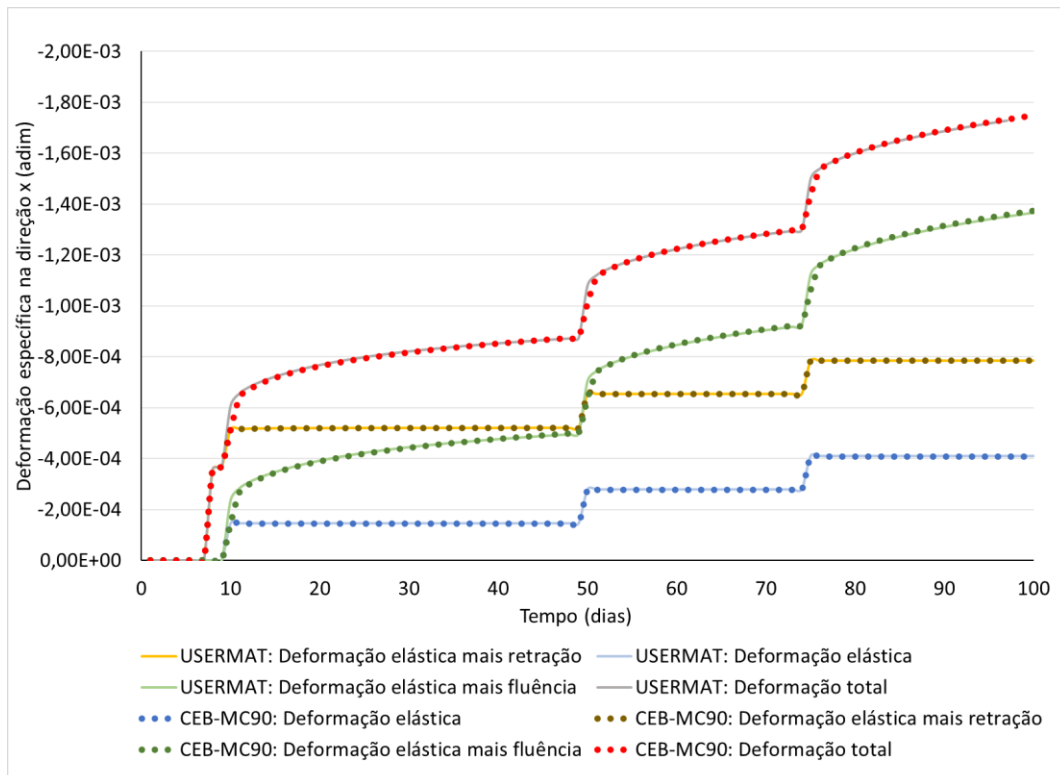


Figura 6.6 – Teste com carga constante de 5 MPa aplicada aos 10 dias, para o *Shell281*.

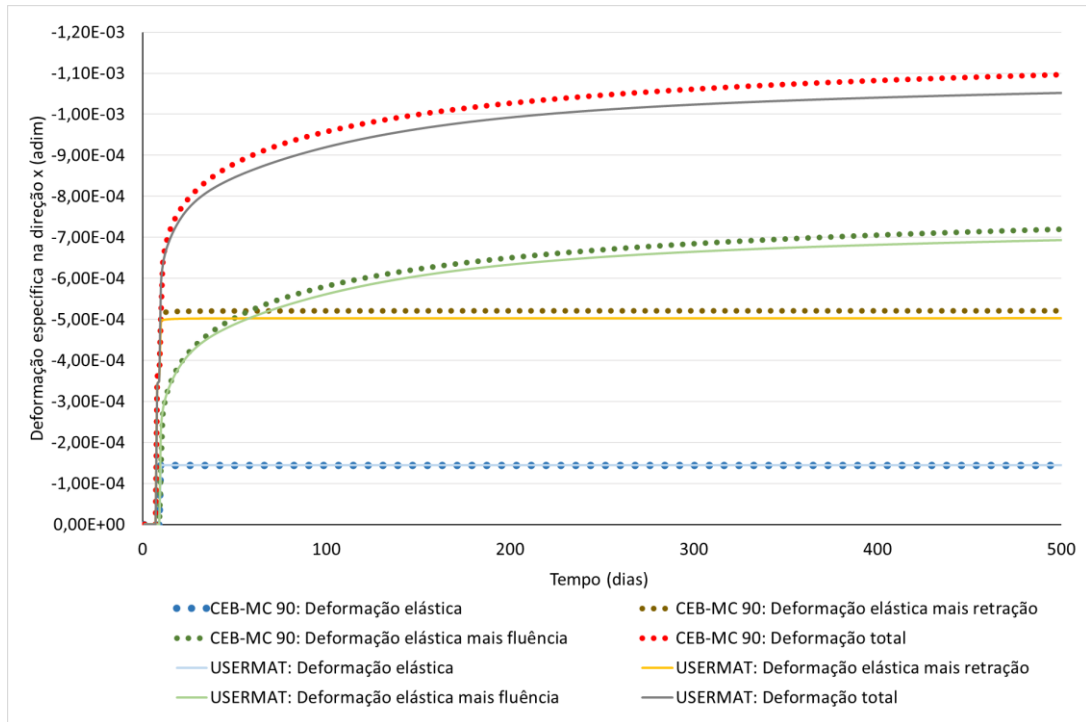
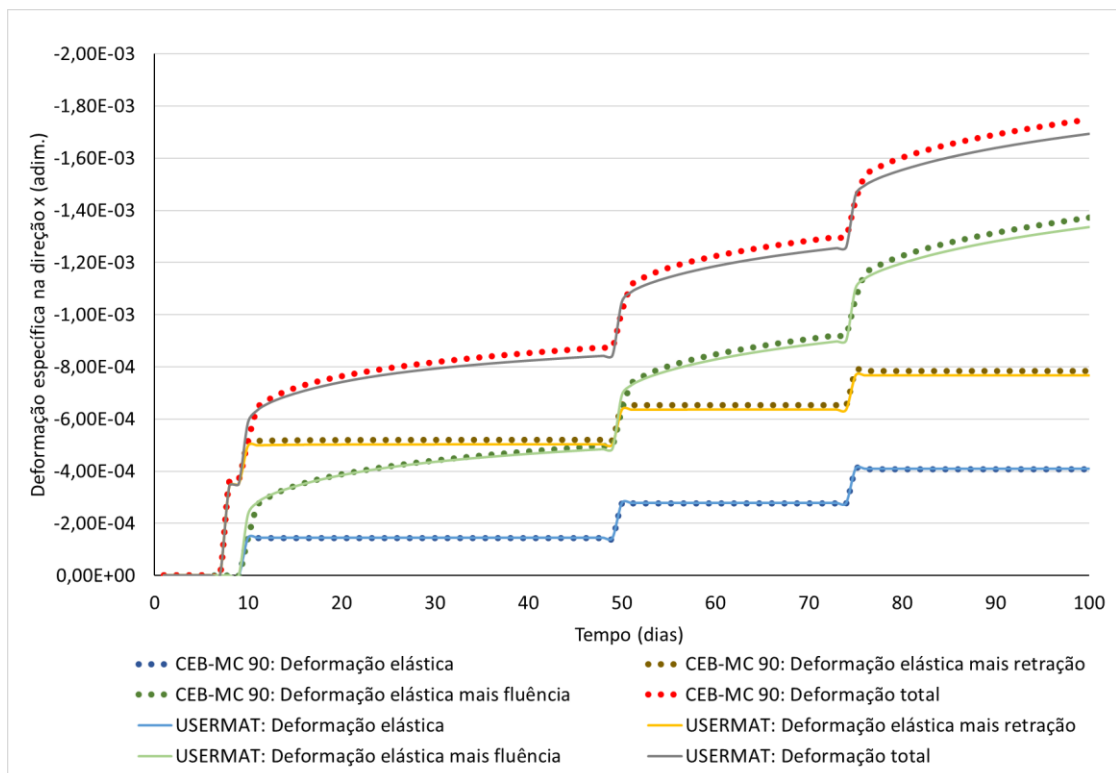


Figura 6.7 – Teste com carga variável de 5 MPa aplicada aos 10, 50 e 75 dias, para o *Shell281*.



Analisando as Figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 nota-se que a formulação do CEB-FIP MC90 consegue ser reproduzida pela teoria adaptada da solidificação de Bažant e Prasannan (1989a, 1989b), para elementos *Beam189* e *Shell281*. Observa-se, que em comparação com o elemento *Beam189*, o *Shell281* apresenta resultados com pequena defasagem, quando comparado ao CEB-FIP MC 90. Foi realizado testes com o aumento do número de pontos de integração, porém não houve alterações significativas.

6.1.2 Concreto Tracionado - Fissuração

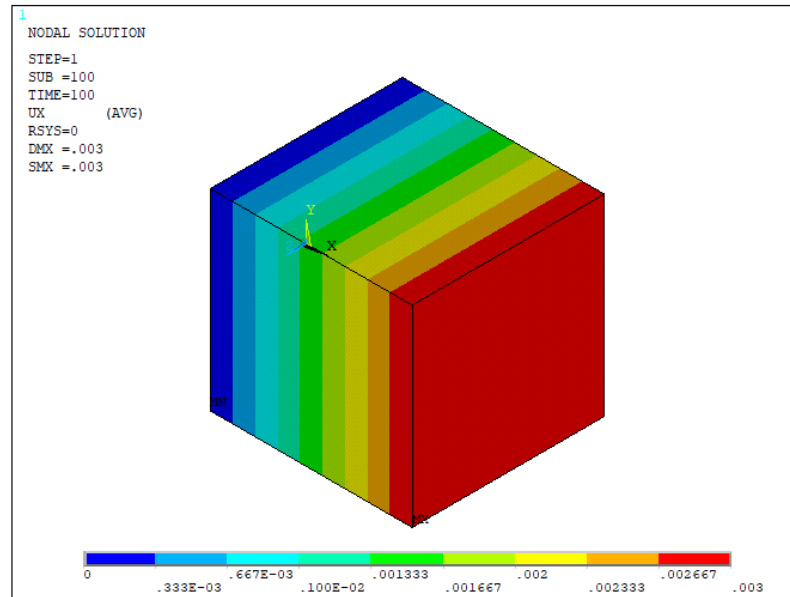
O objetivo destes testes é verificar, se sob tração o concreto segue o comportamento do *Tension Stiffening*, utilizando os elementos *Beam189* e *Shell281*. Cabe ressaltar que segundo Martinelli (2003), este comportamento é empregado para representar a resistência do concreto entre fissuras, justificada pelos mecanismos de aderência entre o aço e o concreto. Desta forma, a aplicabilidade deste modelo e seus parâmetros não seria válida para a análise de peças de concreto simples sob tração. Assim sendo, os testes apresentados nesta seção são realizados apenas para fins de validação do algoritmo programado. A Tabela 6.2 apresenta os dados das propriedades utilizadas.

Tabela 6.2 – Dados para o teste do concreto.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Resistência característica à compressão do concreto	f_{ck}	MPa	40
Resistência característica à tração do concreto	f_{ct}	MPa	3,50
Deformação última de tração no concreto	ε_{ctu}	%	0,30
Coefficiente de Poisson	ν	adim.	0,20

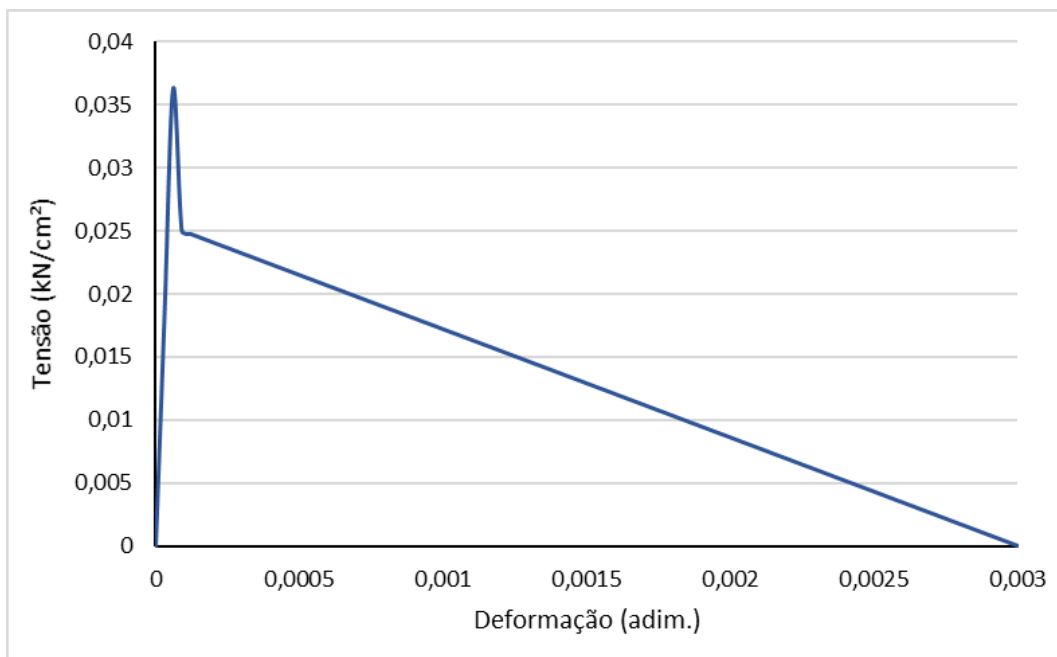
A modelagem das peças se deu de forma similar ao detalhado no item 6.1.1, ressaltando apenas que se aplicou um deslocamento positivo nas peças (tração). O diagrama visual do bloco em tração, extraído do ANSYS, tanto para o elemento *Beam189* quanto para o *Shell281*, consta na Figura 6.8.

Figura 6.8 – Diagrama visual do bloco sob tração.



Devido ao fato do elemento *Shell281* possuir duas tensões principais (σ_{11} e σ_{22}), pode ocorrer a abertura da fissura em duas direções. Desta forma, o teste em questão foi realizado aplicando deslocamento nas direções x e y. A Figura 6.9 ilustra-se o diagrama tensão *versus* deformação, obtido para ambos elementos.

Figura 6.9 – Diagrama tensão *versus* deformação do concreto sob tração, para os elementos *Beam189* e *Shell281*.



6.2 COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS

Neste item são realizadas comparações entre os resultados obtidos via modelo numérico com resultados experimentais apresentados por diferentes pesquisadores, no que concerne o comportamento viscoelástico com fissuração de vigas em concreto armado.

6.2.1 Campos Filho (1987)

Referenciadas Campos Filho (1987), oito vigas idênticas de concreto armada simplesmente apoiadas, foram submetidas a um carregamento de longa duração e uniformemente distribuído. Nesta dissertação serão analisadas somente as vigas idênticas V7 e V8. Estas, possuem vão teórico de 3,72 m e são submetidas à um carregamento de 2,36 kN/m, além do peso próprio. A geometria, discretização e disposição das armaduras estão ilustradas nas Figuras 6.10 e 6.11. As propriedades dos materiais utilizados encontram-se na Tabela 6.3.

Figura 6.10 – Vista lateral e seção das vigas V7 e V8.

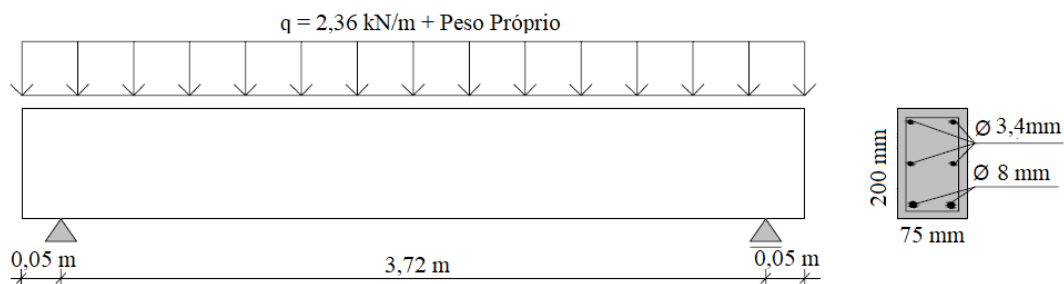


Figura 6.11 – Modelagem no ANSYS da viga V7 e V8.

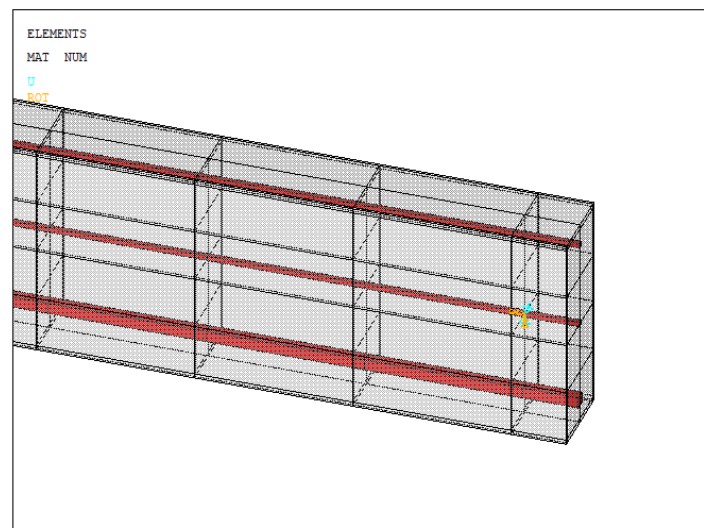


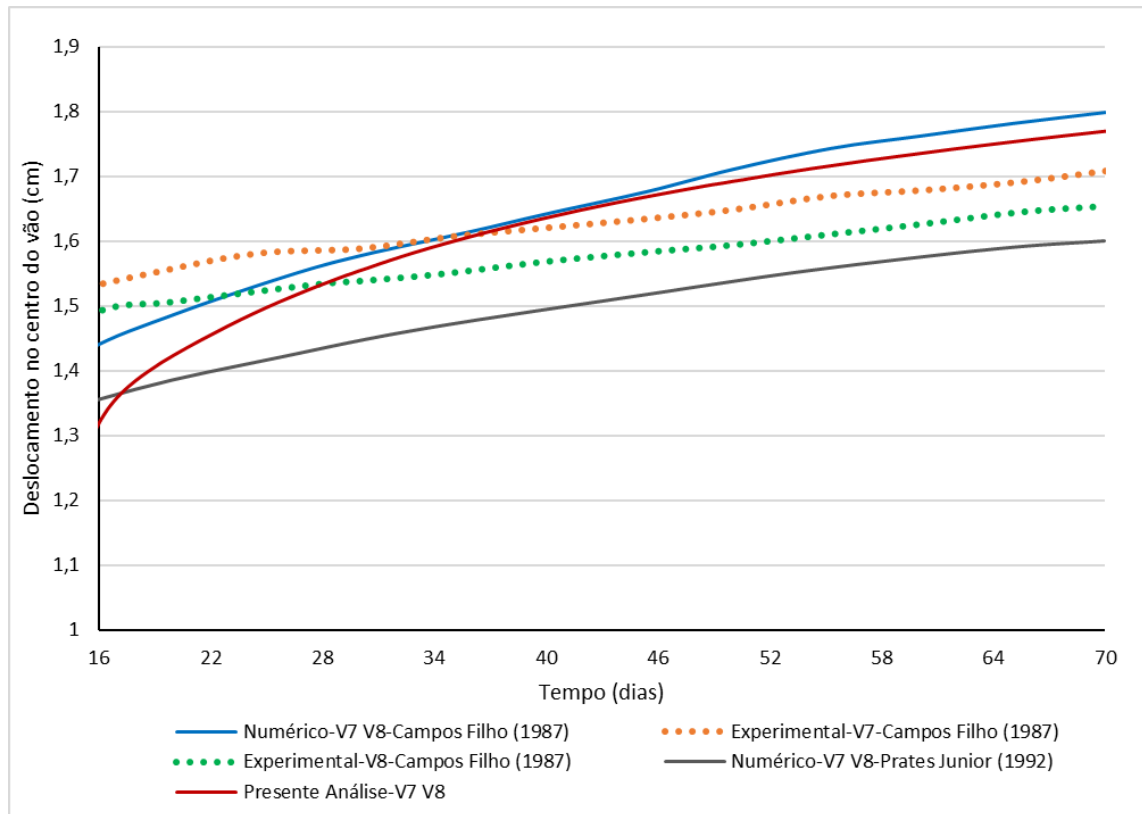
Tabela 6.3 – Propriedades dos materiais empregados.

Material	Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Aço de Reforço	Módulo de Elasticidade	E	MPa	210000
CA 50A	Tensão de escoamento	f_y	MPa	500
ϕ 8mm	Tensão última	f_u	MPa	550
Aço de Reforço	Módulo de Elasticidade	E	MPa	210000
CA 60B	Tensão de Escoamento	f_y	MPa	600
ϕ 3.4mm	Tensão última	f_u	MPa	660
Concreto	Resistência à compressão	f_{c16}	MPa	19,5
	Resistência à tração	f_{t16}	MPa	2,20
	Módulo de elasticidade	E_{16}	MPa	26500
	Coefficiente de Poisson	ν	adim.	0,20
	Deformação última à compressão	ϵ_{uc}	%	0,45
	Deformação última à tração	ϵ_{ut}	%	0,30
	Parâmetro do TS	α_{TS}	adim.	0,60

A viga foi carregada aos 16 dias após sua concretagem, com umidade relativa do ar de 75% e temperatura constante de 20°C. Os efeitos de retração foram considerados a partir do sétimo dia após a concretagem (final da cura). Devido a uma simplificação do elemento *Beam189*, nesta análise não foram inseridos os estribos de diâmetro 3,4 mm, espaçados a cada 10 cm. Considerou-se o tipo de cimento com endurecimento normal.

No gráfico exibido na Figura 6.12, encontram-se os resultados obtidos pelo modelo proposto, para o deslocamento no centro do vão até os 70 dias. Neste gráfico apresentam-se também os resultados obtidos numérica e experimentalmente por Campos Filho (1987) e numericamente por Prates Júnior (1992).

Figura 6.12 – Deslocamento no centro do vão para as vigas V7 e V8.



O resultado de deslocamento no centro do vão atingido pelo modelo proposto foi bastante próximo aos resultados obtidos experimentalmente. Na Tabela 6.4 encontra-se os valores de deslocamento no centro do vão das vigas V7 e V8. Já na Tabela 6.5 apresenta-se a comparação percentual entre os resultados encontrados experimentalmente e numericamente.

Tabela 6.4 – Deslocamento no centro do vão das vigas V7 e V8.

Análise	Deslocamento no centro do vão, t = 70 dias (cm)
Presente análise – V7 V8	1,77
Experimental V7 – Campos Filho (1987)	1,71
Experimental V8 – Campos Filho (1987)	1,65
Numérico – V7 V8 – Campos Filho (1987)	1,79
Numérico – V7 V8 – Prates Júnior (1992)	1,60

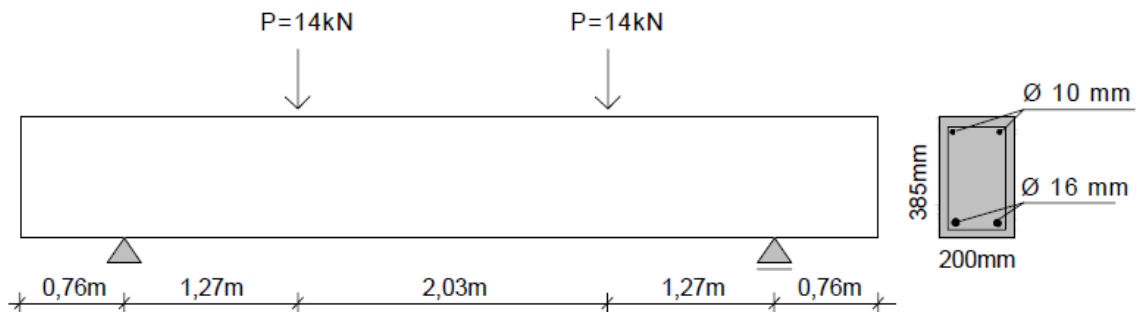
Tabela 6.5 – Comparação percentual de diferença entre os resultados encontrados numericamente e experimentalmente, para o deslocamento no centro do vão das vigas V7 e V8, aos 70 dias.

Análise – Experimental V7	Comparação Percentual de diferença (%)
Numérico – Presente análise	3,50
Numérico – Campos Filho (1987)	4,68
Numérico – Prates Júnior (1992)	6,43
Análise – Experimental V8	Comparação Percentual de diferença (%)
Numérico – Presente análise	7,27
Numérico – Campos Filho (1987)	8,48
Numérico – Prates Júnior (1992)	3,03

6.2.2 Stevens (1972)

Stevens (1972) testou experimentalmente em laboratório e sob condições climáticas ambiente uma série de vigas. No presente estudo será analisada a viga K, a qual foi submetida a duas cargas pontuais de longa duração de 14 kN, aplicadas no centro da largura da viga. O cobrimento utilizado é de 2,5 cm e os estribos de bitola 10 mm não foram considerados. O detalhamento da viga é demonstrado na Figura 6.13, assim como sua modelagem no ANSYS, na Figura 6.14. As propriedades dos materiais utilizados constam na Tabela 6.6.

Figura 6.13 – Vista lateral e seção da viga K.



(fonte: DIAS, 2013)

Figura 6.14 – Modelagem da viga K no ANSYS.

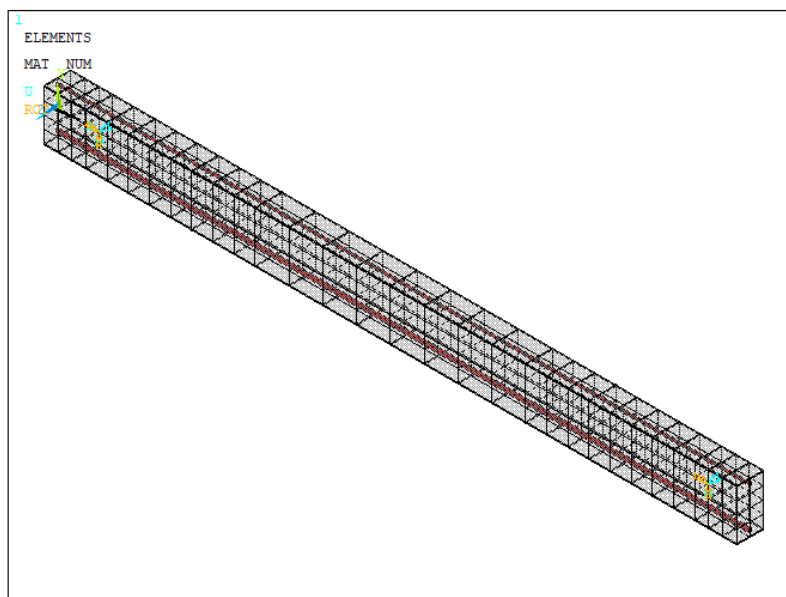


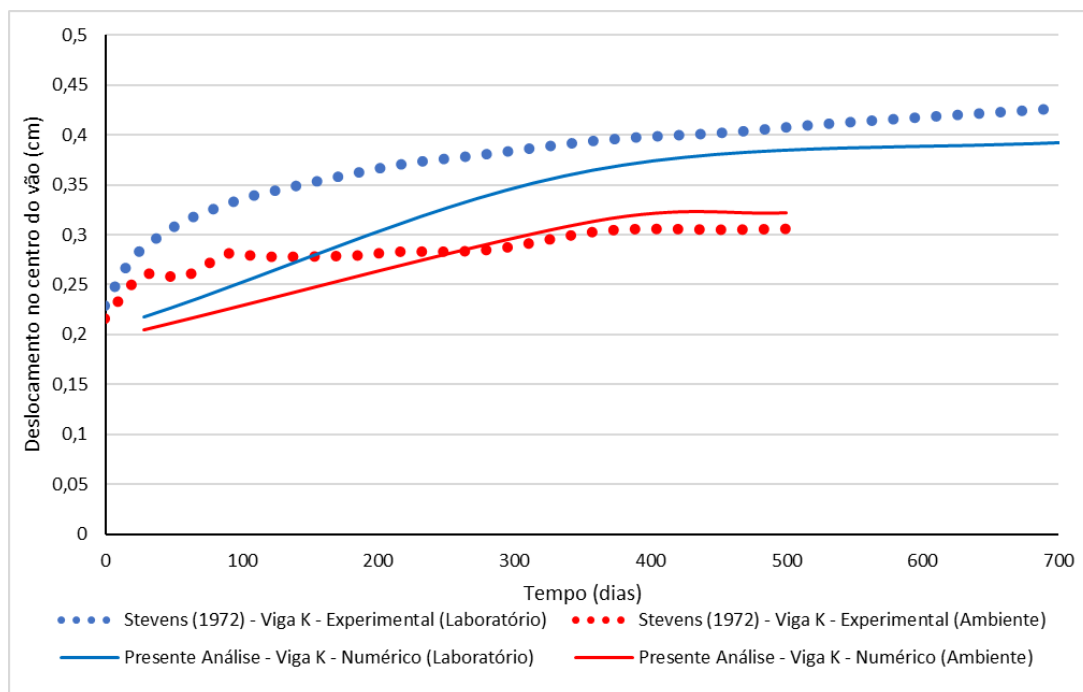
Tabela 6.6 – Propriedades dos materiais empregados.

Material	Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Aço de Reforço	Módulo de Elasticidade	E	MPa	210000
	Tensão de escoamento	f_y	MPa	550
Concreto	Resistência à compressão	f_c	MPa	36,70
	Resistência à tração	f_t	MPa	3,67
	Módulo de elasticidade	E	MPa	33160
	Coefficiente de Poisson	ν	adim.	0,20
	Deformação última à compressão	ϵ_{uc}	%	0,45
	Deformação última à tração	ϵ_{ut}	%	0,30
	Parâmetro do TS	α_{TS}	adim.	0,50

A viga foi carregada aos 28 dias e a umidade relativa do ar foi arbitrada de 65% para testes realizados no laboratório e de 83% para os testes realizados em clima ambiente. Em ambos os casos a temperatura foi considerada constante, 19°C. O início da retração foi reputado aos 7 dias pós concretagem. O tempo final de análise para os testes realizados em laboratório foi de 700 dias, enquanto para os testes realizados em condições ambiente foi em torno de 500

dias. Na Figura 6.15 encontram-se os resultados obtidos para o deslocamento no centro do vão.

Figura 6.15 – Deslocamento no centro do vão para a viga K.



Os resultados obtidos foram consideravelmente próximos aos medidos experimentalmente. Foi realizada a variação do parâmetro α_{TS} do *Tension Stiffening*, com valores que iam em um gradiente de 0,5 a 0,8, mas não foram encontradas alterações significativas. Efetuaram-se, também, testes sobre a malha implementada na viga, adotando-se a malha melhor relação resultado x custo computacional. Na Tabela 6.7 encontra-se a diferença percentual entre os resultados obtidos.

Tabela 6.7 – Comparação percentual entre resultados de deslocamento no centro do vão da viga K.

Análise	Deslocamento no centro do vão, em t = 700 dias (cm)	Comparação Percentual de diferença (%)
Laboratório - Stevens (1972)	0,429	7,93
Laboratório - Presente	0,395	
Análise	Deslocamento no centro do vão, em t = 500 dias (cm)	Comparação Percentual de diferença (%)
Ambiente - Stevens (1972)	0,306	3,77
Ambiente - Presente	0,317	

7 OBJETO DE ESTUDO: EDIFÍCIO DE CINCO PAVIMENTOS

Neste capítulo serão apresentadas análises referentes a uma estrutura de um edifício de cinco pavimentos, o qual foi dimensionado no trabalho de Rachinhas (2018), a partir de normas e recomendações técnicas. Serão abordados diversos tópicos como a modelagem da estrutura, como foi realizada a consideração das etapas do processo construtivo e por fim, a análise estrutural e resultados obtidos.

7.1 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA

Neste item realiza-se uma breve apresentação da estrutura e informações detalhadas sobre o dimensionamento podem ser encontrados em Rachinhas (2018). No Apêndice B é disponibilizado o desenho das armaduras modeladas para pilares, vigas e lajes, advindas do *software* TQS. A Figura 7.1 mostra a planta baixa do referido edifício e a nomenclatura adotada, segundo o TQS, para os pilares, vigas e lajes, encontra-se na Figura 7.2.

Figura 7.1 – Planta baixa do edifício.

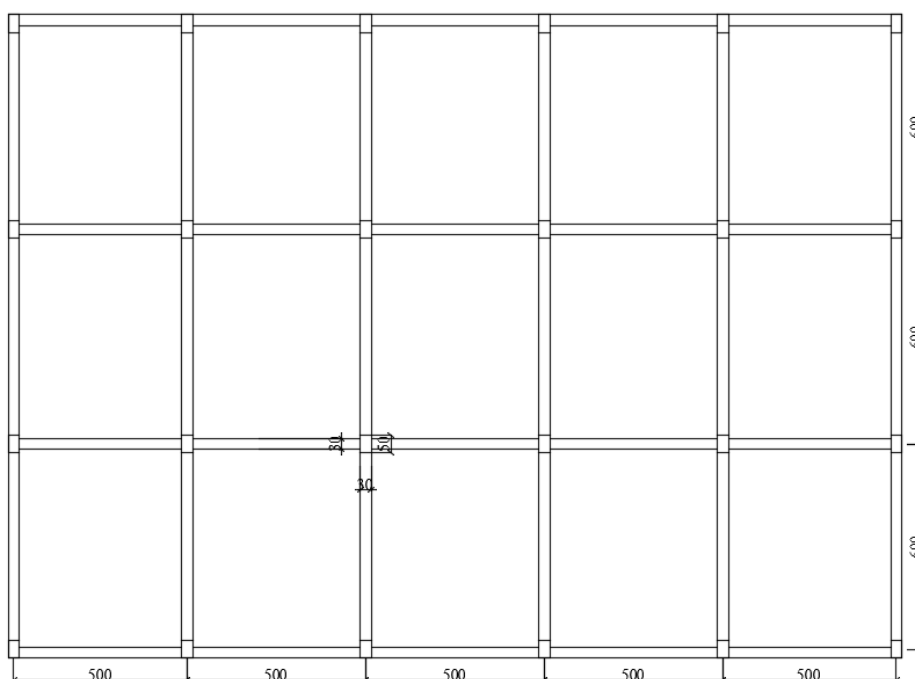


Figura 7.2 – Nomenclatura utilizada para pilares, vigas e lajes.

	V11	V12	V13	V14	V15	
V53	P1 L1 V63 V21	P2 L2 V73 V22	P3 L3 V83 V23	P4 L4 V93 V24	P5 L5 V103 V25	P6
V52	P7 L6 V62 V31	P8 L7 V72 V32	P9 L8 V82 V33	P10 L9 V92 V34	P11 L10 V102 V35	P12
V51	P13 L11 V61 P19 V41	P14 L12 V71 P20 V42	P15 L13 V81 P21 V43	P16 L14 V91 P22 V44	P17 L15 V101 P23 V45	P18 P24

Na Tabela 7.1 constam as cargas permanentes e acidentais que foram aplicadas ao modelo, obtidas de acordo com a NBR 6120:2019 (ABNT, 2019). Já a Tabela 7.2 exibe as informações sobre as seções arbitradas e a espessura das lajes. Por fim, a Tabela 7.3 apresenta os parâmetros utilizados em relação aos materiais concreto e aço.

Tabela 7.1 – Cargas.

Cargas Permanentes		
Carga	Unidade	Valor
Peso próprio do pilar	kN	11,250
Peso próprio da viga	kN/m	3,80
Peso próprio da laje	kN/m ²	2,25
Peso próprio da alvenaria interna	kN/m	5,40
Peso próprio da alvenaria externa	kN/m	6,50
Peso próprio do revestimento	kN/m	2,00
Cargas Acidentais		
Carga	Unidade	Valor
Escritórios/Residência	kN/m ²	2,00
Serviço (durante a construção)	kN/m ²	1,00

Tabela 7.2 – Parâmetros geométricos dos elementos estruturais.

Elemento	Seção/Espessura	Unidade
Viga	30x50	cm ²
Pilar	30x50	cm ²
Laje	9	cm

Tabela 7.3 – Propriedades dos materiais.

Material	Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Aço	Módulo de Elasticidade	E	MPa	210000
	Tensão de escoamento	f_y	MPa	550
	Coefficiente de Poisson	ν	adim.	0,30
Concreto	Resistência característica do concreto	f_{ck}	MPa	25
	Classe de agressividade ambiental	-	adim.	II
	Módulo de elasticidade aos 28 dias	E_{28}	MPa	28000
	Coefficiente de Poisson	ν	adim.	0,20
	Coefficiente que depende do tipo de concreto	s	adim.	0,20
	Umidade relativa do ambiente	RH	%	70
	Espessura fictícia para pilar	hf_p	cm	23,1
	Espessura fictícia para viga	hf_v	cm	26,8
	Espessura fictícia para laje	hf_l	cm	18,0
	Idade do concreto no final da cura	t_s	dia	3
	Coefficiente que depende do tipo de cimento	β_{sc}	adim.	5
	Temperatura	T	°C	20
	Coefficiente que depende do tipo de cimento	α	adim.	1
	Idade do concreto no início do carregamento para pilares	t_{0p}	dia	1
	Idade do concreto no início do carregamento para vigas e lajes	t_{0vl}	dia	31
	Tempo final para ajuste da cadeia	t_{inf}	dia	3000
	Número de pontos por década do ajuste	n_{dec}	un.	10
	Deformação última à compressão	ϵ_{uc}	%	0,45
	Deformação última à tração	ϵ_{ut}	%	0,30
	Parâmetro do <i>Tension Stiffening</i>	a_{TS}	adim.	0,70

7.2 CONSIDERAÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO CONSTRUTIVO

A análise estrutural de edifícios em concreto armado é realizada, usualmente, considerando a estrutura em sua situação final, com o carregamento aplicado em sua totalidade em uma determinada data e o concreto com seus valores característicos. Mas, para realizar uma análise estrutural mais próxima da realidade, necessita-se considerar as fases da construção do edifício, as datas em que as diversas ações começam a atuar, os valores reais de resistência e do módulo de elasticidade do concreto, e as características geométricas atualizadas da estrutura.

A consideração do processo construtivo pode vir a influenciar as ações atuantes na estrutura, podendo ultrapassar a capacidade resistente definida no projeto estrutural. A definição de quais ações atuam nos pavimentos durante a construção estabelece a história de carregamentos dos elementos estruturais. O modelo apresentado considera a evolução das propriedades de resistência e deformabilidade do concreto. Caso haja fissuração prematura os pavimentos terão maiores deformações ao longo do tempo.

Para a definição das etapas construtivas que foram implementadas neste trabalho, entrevistou-se um engenheiro civil com experiência na área de construção, o qual forneceu os dados necessários para a elaboração de um cronograma de obra. Tal cronograma pode ser visto no Apêndice D.

Os pavimentos recém concretados são suportados por pavimentos previamente concretados, através de um sistema de fôrmas, escoras e reescoras. Em relação ao procedimento de escoramento, segundo relato do engenheiro, é comum utilizar o sistema construtivo racionalizado, o qual realiza a retirada parcial das escoras. Porém, como uma simplificação do modelo, foi adotado o sistema tradicional, com retirada total de escoras.

A simulação do processo construtivo foi estabelecida no *software* ANSYS a partir do comando de ativação e desativação (*birth and death*). Para tal, foram criados diversos componentes (grupos de elementos), para os pilares, vigas e lajes de cada pavimento. Apesar de todos os elementos estruturais serem em concreto armado, tais elementos possuem diferentes idades, portanto na análise são considerados como diferentes materiais. As Figuras 7.3 e 7.4 demonstram as etapas construtivas adotadas nesta dissertação.

Figura 7.3 – Etapas construtivas adotadas – 1 ao 9.

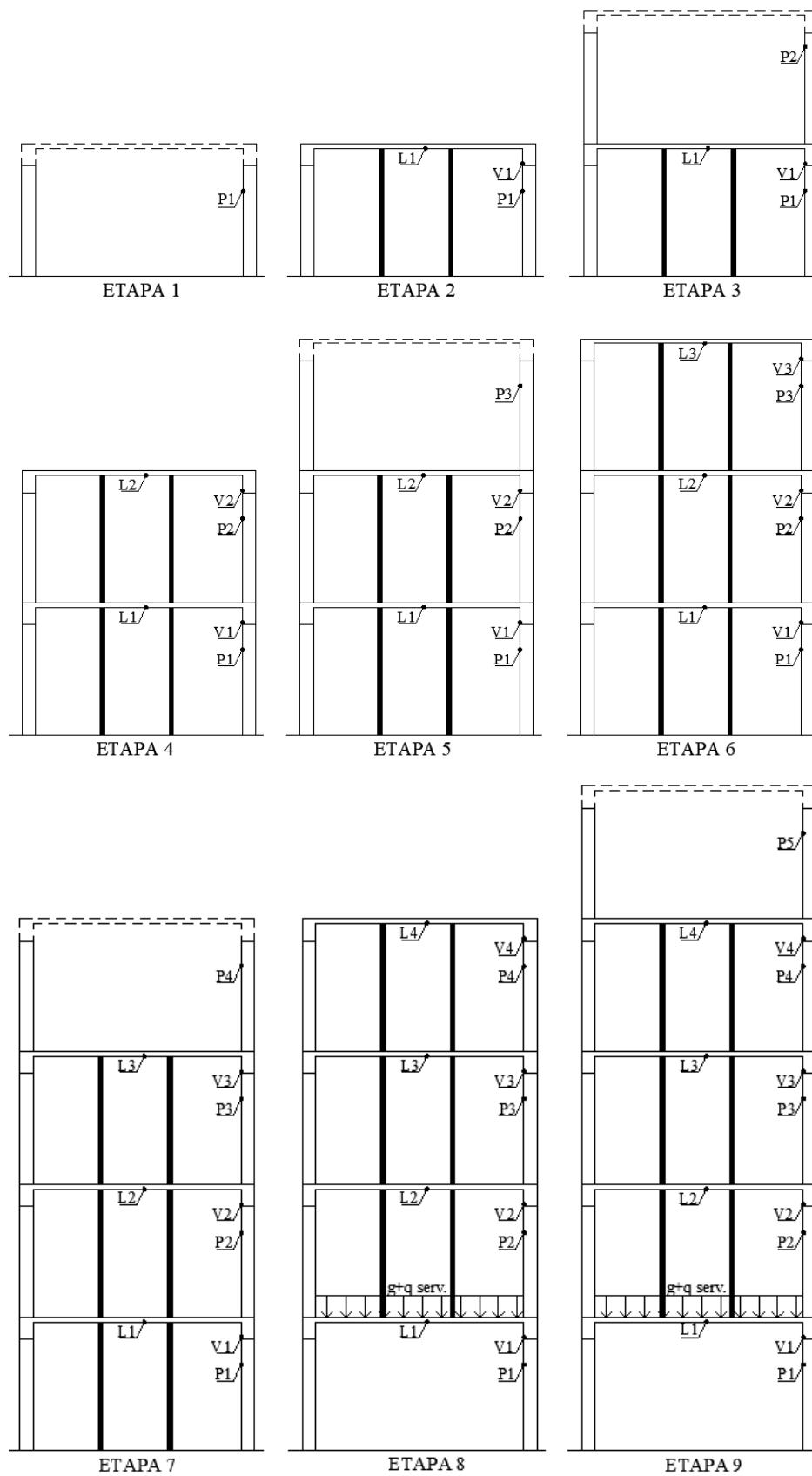
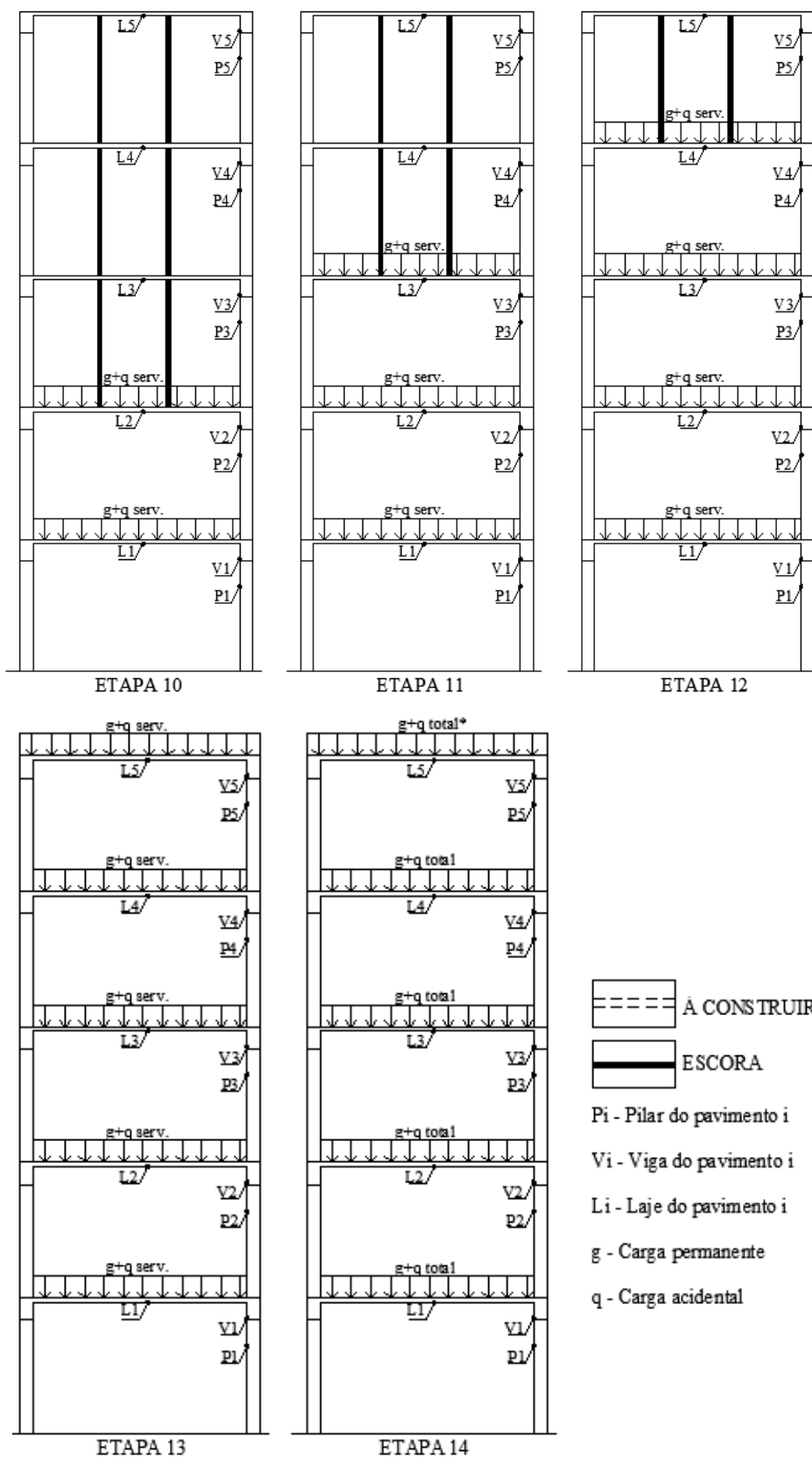


Figura 7.4 – Etapas construtivas adotadas – 10 a 14.



Conforme as Figuras 7.3 e 7.4, tem-se estabelecido as seguintes etapas:

- a) etapa 1: Realiza-se a concretagem dos pilares do primeiro pavimento. Na análise computacional, sempre que há a concretagem de elementos há a ativação (*birth*) do seu respectivo componente. Posteriormente, é feita a aplicação do peso próprio dos pilares deste pavimento;
- b) etapa 2: É feito o escoramento do primeiro pavimento e após o tempo de cura do concreto dos pilares (3 dias) são concretadas as lajes e vigas;
- c) etapa 3: Concretagem dos pilares do segundo pavimento, seguido da aplicação do peso próprio;
- d) etapa 4: Escoramento e concretagem das vigas e lajes do segundo pavimento;
- e) etapa 5: Concretagem dos pilares do terceiro pavimento, aplicação do peso próprio dos referidos e início da alvenaria interna e externa do primeiro pavimento;
- f) etapa 6: Escoramento e concretagem das vigas e lajes do terceiro pavimento;
- g) etapa 7: Concretagem dos pilares do quarto pavimento, aplicação do peso próprio dos pilares e início da alvenaria interna e externa do segundo pavimento;
- h) etapa 8: Retirada das escoras do primeiro pavimento. Realiza-se a aplicação do peso próprio e das cargas permanentes e acidental (somente de serviço) nas lajes e vigas do primeiro pavimento. Escoramento e concretagem das vigas e lajes do quarto pavimento;
- i) etapa 9: Concretagem dos pilares do quinto pavimento, aplicação do peso próprio dos pilares e início da alvenaria interna e externa do terceiro pavimento;
- j) etapa 10: Retirada das escoras do segundo pavimento. Realiza-se a aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do segundo pavimento. Escoramento e concretagem das vigas e lajes do quinto pavimento;
- k) etapa 11: Início da alvenaria interna e externa do quarto pavimento. Retirada das escoras do terceiro pavimento. Realiza-se a aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do terceiro pavimento;

- l) etapa 12: Retirada das escoras do quarto pavimento. Realiza-se a aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do quarto pavimento; Início da alvenaria interna e externa do quinto pavimento;
- m) etapa 13: Retirada das escoras do quinto pavimento. Realiza-se a aplicação das cargas estabelecidas nas lajes e vigas do quinto pavimento;
- n) etapa 14: Aplicação da carga accidental de uso em todas as lajes. Tal carga é complementar a carga de serviço.

Cabe ressaltar que haveria uma “etapa 0” computacionalmente, a qual consistiria em uma desativação (*death*) de todos os elementos estruturais previamente modelados do edifício. O tempo final da construção, correspondente a etapa 14, é aos 85 dias. É nesta etapa final que são extraídos todos os resultados utilizados nas comparações. Por fim, salienta-se que nas cargas adicionadas à cobertura da estrutura, não consta as cargas referentes às alvenarias e revestimentos.

7.3 MODELO NUMÉRICO DA ESTRUTURA

A modelagem da estrutura confeccionada no ANSYS contou com o elemento *Beam189* para a representação de pilares e vigas. Para a modelagem das lajes utilizou-se o elemento *Shell281*. Em ambos os elementos, o elemento *Reinf264* realizou a representação da armadura incorporada discreta. No elemento *Shell281* optou-se por uma camada com cinco pontos de integração.

Em relação à discretização, foi utilizada uma malha de 10x10 elementos para cada laje. Para os pilares e vigas foram utilizados 10 elementos em sua maior dimensão (altura e comprimento, respectivamente) e para a seção adotou-se 4 divisões na base e 6 divisões na altura. Tal discretização foi adotada para o *Beam189* a partir da análise do estudo de discretização realizado por Scherer (2018).

Inicialmente, realizou-se a inserção do modelo numérico no programa TQS, a fim de obter as armaduras necessárias para os elementos estruturais. Utilizou-se o modelo IV no TQS, o qual considera a estrutura como um pórtico espacial mais os modelos dos pavimentos (vigas contínuas ou grelhas). O pórtico é composto apenas por barras que simulam as vigas e pilares

da estrutura com o efeito de diafragma rígido das lajes devidamente incorporado. Somente os efeitos gerados pelas ações verticais são calculados nas lajes. Há integração entre os modelos, pórtico espacial e grelhas, pois os esforços resultantes das barras de lajes sobre as vigas são transferidos como cargas para o pórtico espacial.

A rigidez efetiva na ligação viga-pilar é automaticamente incorporada ao modelo por meio de molas posicionadas nos extremos das barras. Os efeitos de não linearidade física são considerados por meio das relações momento curvatura, obtidas de acordo com a geometria da estrutura. Já a não linearidade geométrica é considerada por meio de um processo iterativo, o qual busca a posição final de equilíbrio da estrutura por completo. De maneira aproximada, são considerados os efeitos gerados por fluência com a inserção do coeficiente de fluência φ .

O TQS considera o módulo de elasticidade secante E_{cs} majorado de 10%. O peso específico do concreto utilizado no cálculo do peso próprio dos elementos estruturais é de 25 kN/m³, valor que corresponde ao aplicado no modelo realizado no ANSYS. Em relação à carga aplicada, no modelo do TQS foram aplicadas as cargas permanentes iguais às aplicadas no modelo do ANSYS, havendo a diferença que o TQS realiza a inclusão dos efeitos dinâmicos relacionados à carga de vento. Na Figura 7.5 consta a imagem do modelo tridimensional extraído do TQS e na Figura 7.6 o modelo tridimensional obtido no ANSYS.

Figura 7.5 – Estrutura tridimensional via TQS.

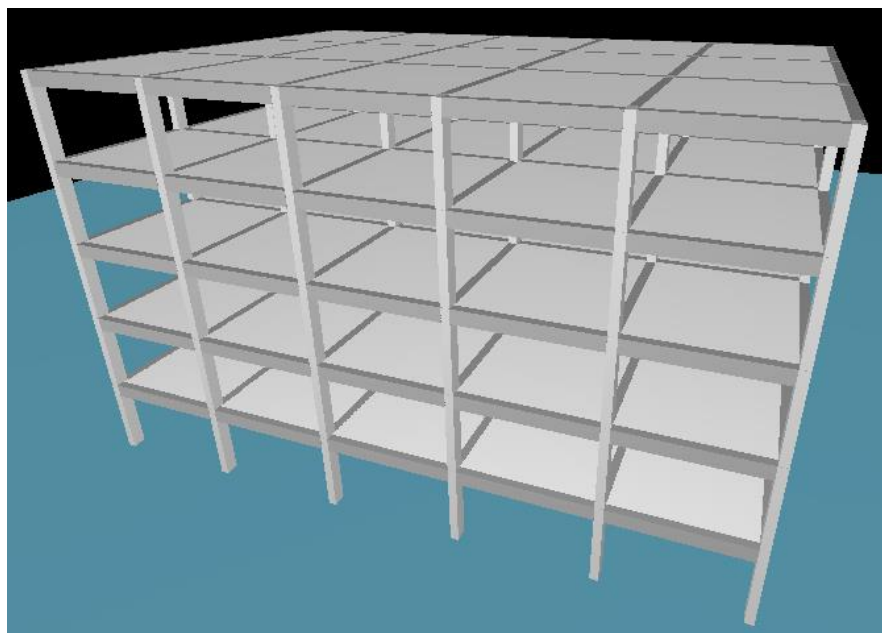
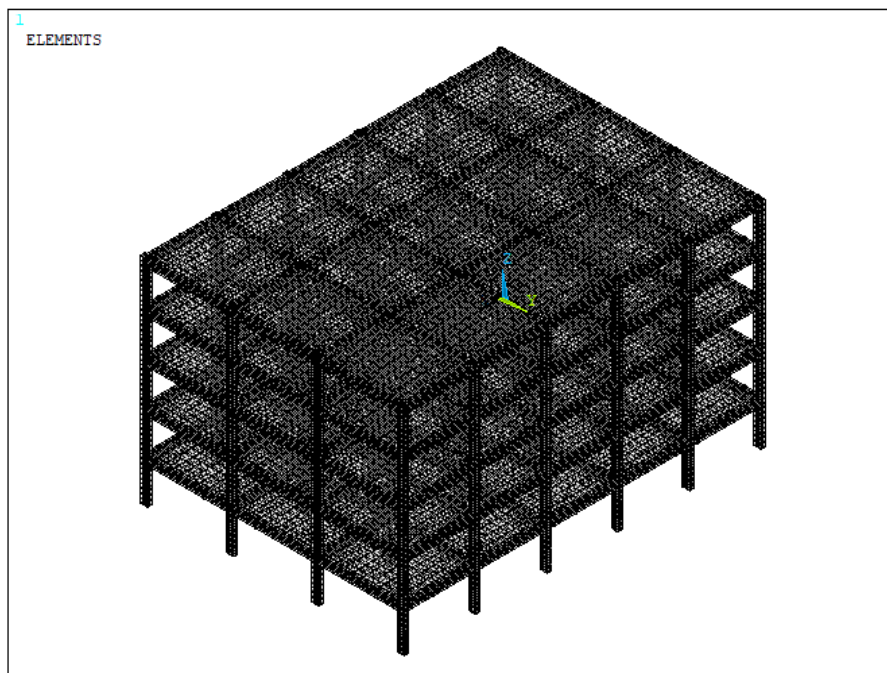


Figura 7.6 – Estrutura tridimensional via ANSYS.



Foram obtidas as armaduras no TQS e algumas simplificações sucederam-se. Não foram inseridos os estribos nas vigas e pilares, devido a uma limitação do elemento *Beam189*. Desta forma, foi utilizado somente o aço CA-50, visto que o aço CA-60 referia-se a estribos. O *script* do edifício de cinco pavimentos utilizado no ANSYS encontra-se no Apêndice C.

7.4 ANÁLISE DA ESTRUTURA

No presente trabalho foram realizadas duas análises estruturais. A primeira, análise global, é realizada com o modelo completo estrutural, com a aplicação de todas as cargas de projeto de maneira simultânea. Nesta análise o material concreto possui comportamento elástico.

A segunda análise conta com a inserção das fases da construção, a aplicação sequencial de cargas, a consideração do modelo de viscoelasticidade para o concreto com inserção de fissuração. Em ambas as análises é realizada a inserção das armaduras. De forma simplificada, a Tabela 7.4 retrata as condições impostas nas análises efetuadas.

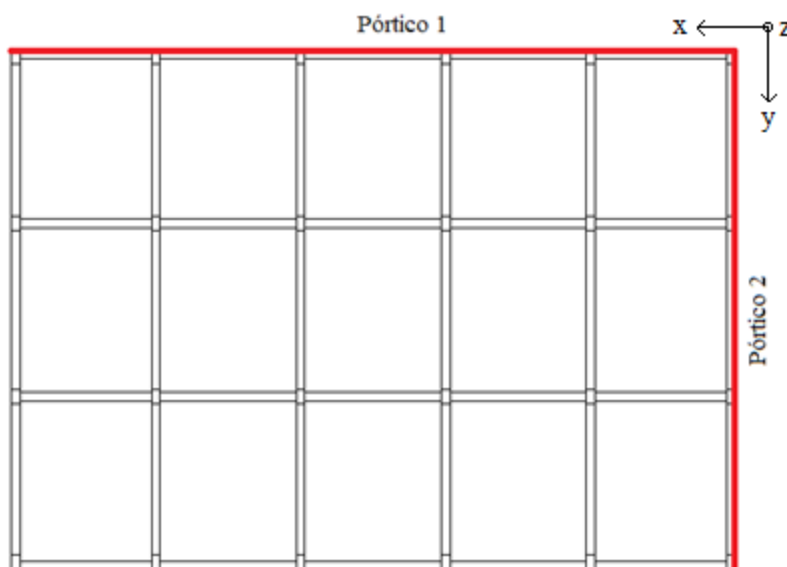
Tabela 7.4 – Análises realizadas e suas características.

Análise	Modelo estrutural	Aplicação das cargas	Modelo do material concreto	Fissuração
Global (AG)	Completo	Simultânea	Elástico	Não considera
Faseada (AF)	Sequencial	Sequencial	Viscoelástico	Considera

Serão analisados dois pórticos da estrutura, conforme Figura 7.7. Destes, serão extraídos os seguintes resultados para os elementos estruturais:

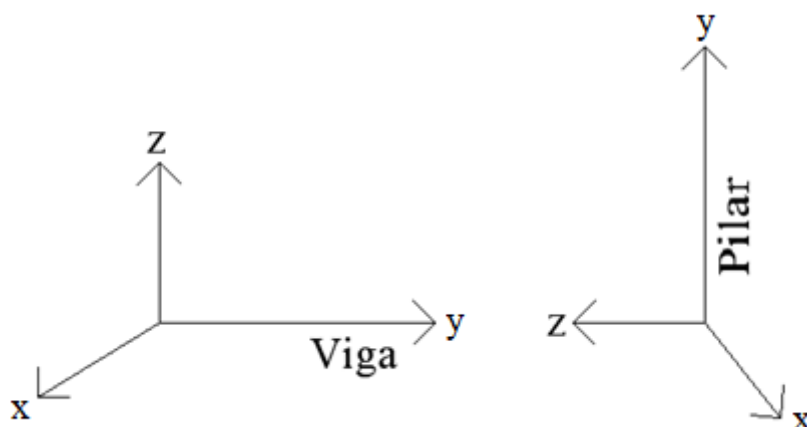
- pilares: Esforço normal e momento fletor (no plano do pórtico);
- vigas: Esforço cortante e momento fletor (no plano do pórtico);
- lajes e pórticos: deslocamento total e fissuração.

Figura 7.7 – Pórticos analisados e eixo global.



Os resultados apresentados nos próximos itens, foram extraídos diretamente do ANSYS, o qual considera o eixo local dos elementos para a extração de dados, conforme Figura 7.8.

Figura 7.8 – Eixo local dos elementos.



7.4.1 Pilares

São apresentados para os pilares os diagramas de esforço normal, nas Figuras 7.9 e 7.10. A Tabela 7.5 ilustra as maiores diferenças percentuais apresentadas entre as análises realizadas, em relação ao esforço normal.

Figura 7.9 – Esforço normal (kN) nos pilares do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada.

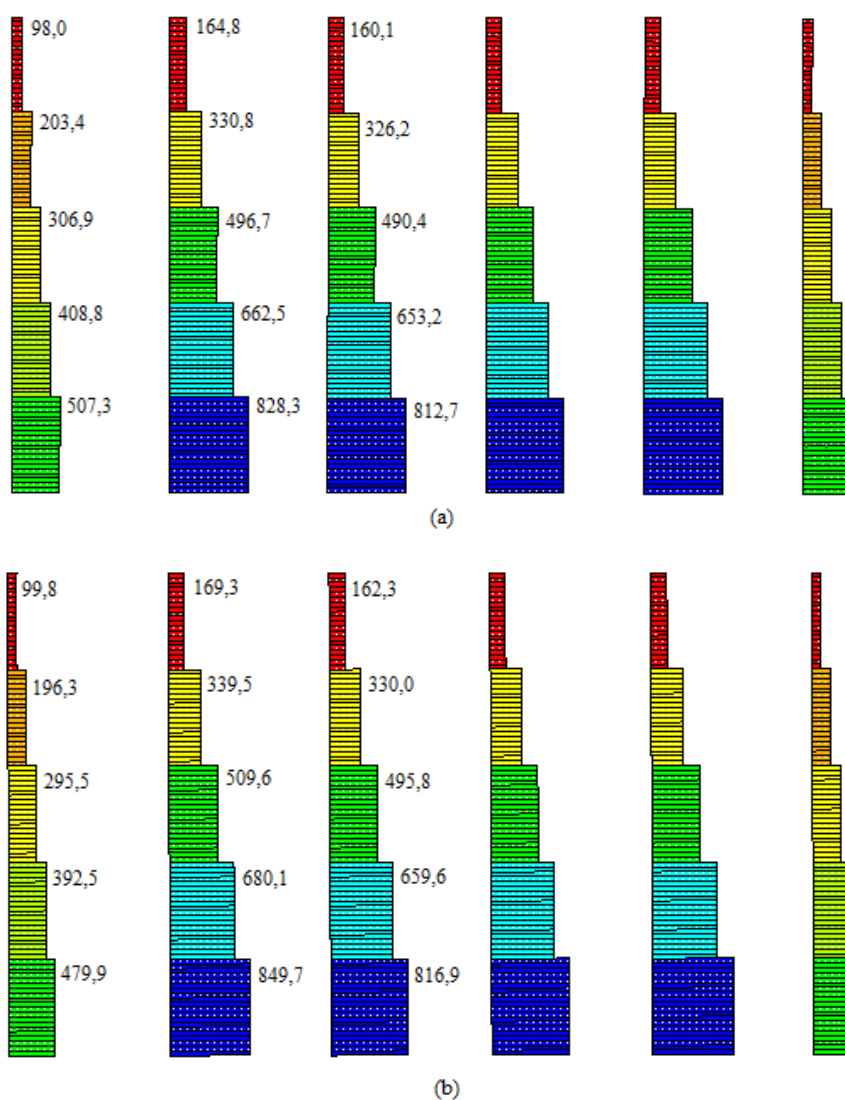


Figura 7.10 – Esforço normal (kN) nos pilares do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

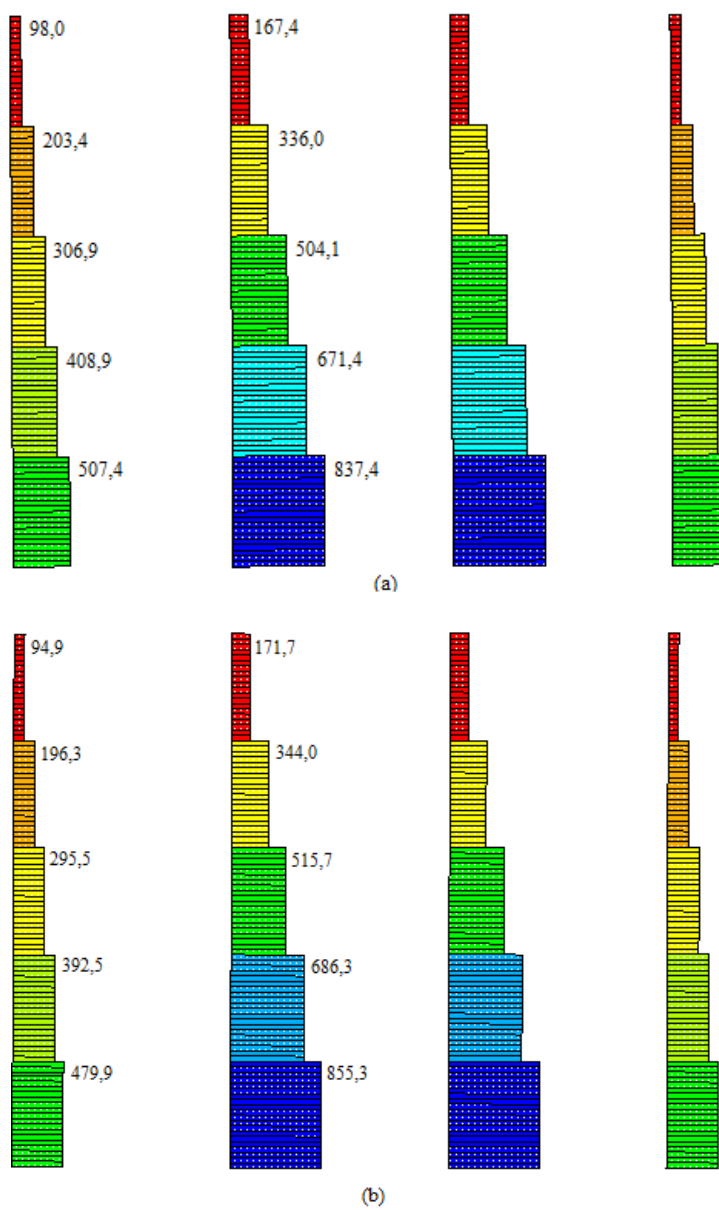


Tabela 7.5 – Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao esforço normal nos pilares

Pórtico 1	Diferença de resultado entre as análises, para pilares externos (%)	Diferença de resultado entre as análises, para pilares internos (%)
AG – AF	5,4	2,6
Pórtico 2	Diferença de resultado entre as análises, para pilares externos (%)	Diferença de resultado entre as análises, para pilares internos (%)
AG – AF	5,4	2,1

Os pórticos analisados apresentaram comportamento similar. O pórtico 1, apresenta na análise faseada um aumento de valores dos esforços nos pavimentos superiores e uma diminuição destes valores nos pavimentos inferiores nos lances de pilares externos, quando comparados com os resultados advindos da análise convencional. Já os lances internos de pilares demonstram em sua totalidade, valores de esforços superiores na análise faseada.

No pórtico 2, os lances de pilares externos, apresentam integralmente na análise faseada, valores de esforços inferiores aos valores obtidos na análise convencional. Nos lances internos, os esforços exibem valores superiores aos esforços colhidos na análise global.

Observa-se que as maiores diferenças de resultados (tanto aumento quanto diminuição), ocorrem no pavimento térreo, para os dois pórticos analisados. Desta forma, constata-se que a análise faseada em comparação com a análise global (convencional), apresenta uma redistribuição de esforços na estrutura.

Nas Figuras 7.11 e 7.12 constam os diagramas de momento fletor (no plano do pórtico) e na Tabela 7.6 apresenta-se o percentual das diferenças de resultados encontrados entre as análises efetuadas.

Figura 7.11 – Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nos pilares do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada.

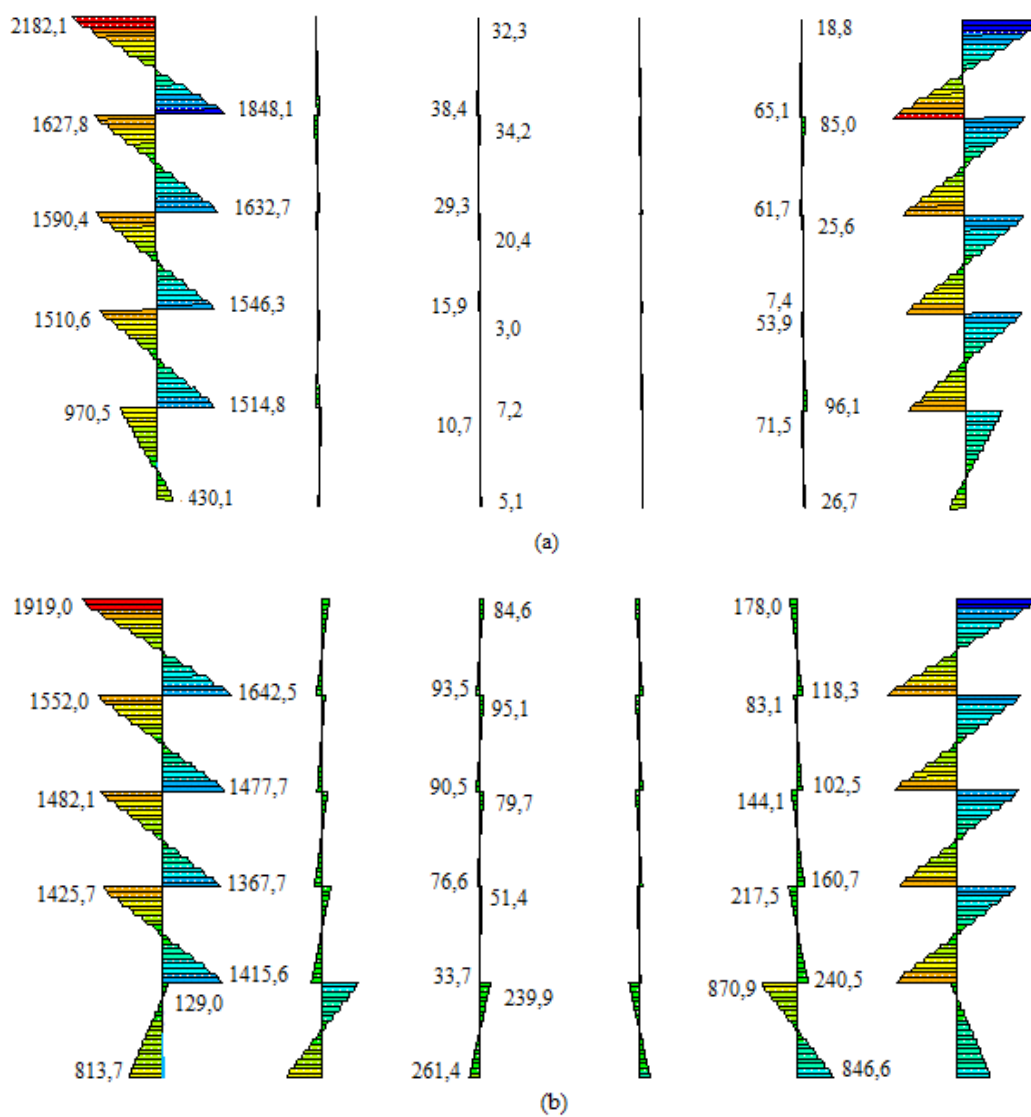


Figura 7.12 – Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nos pilares do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

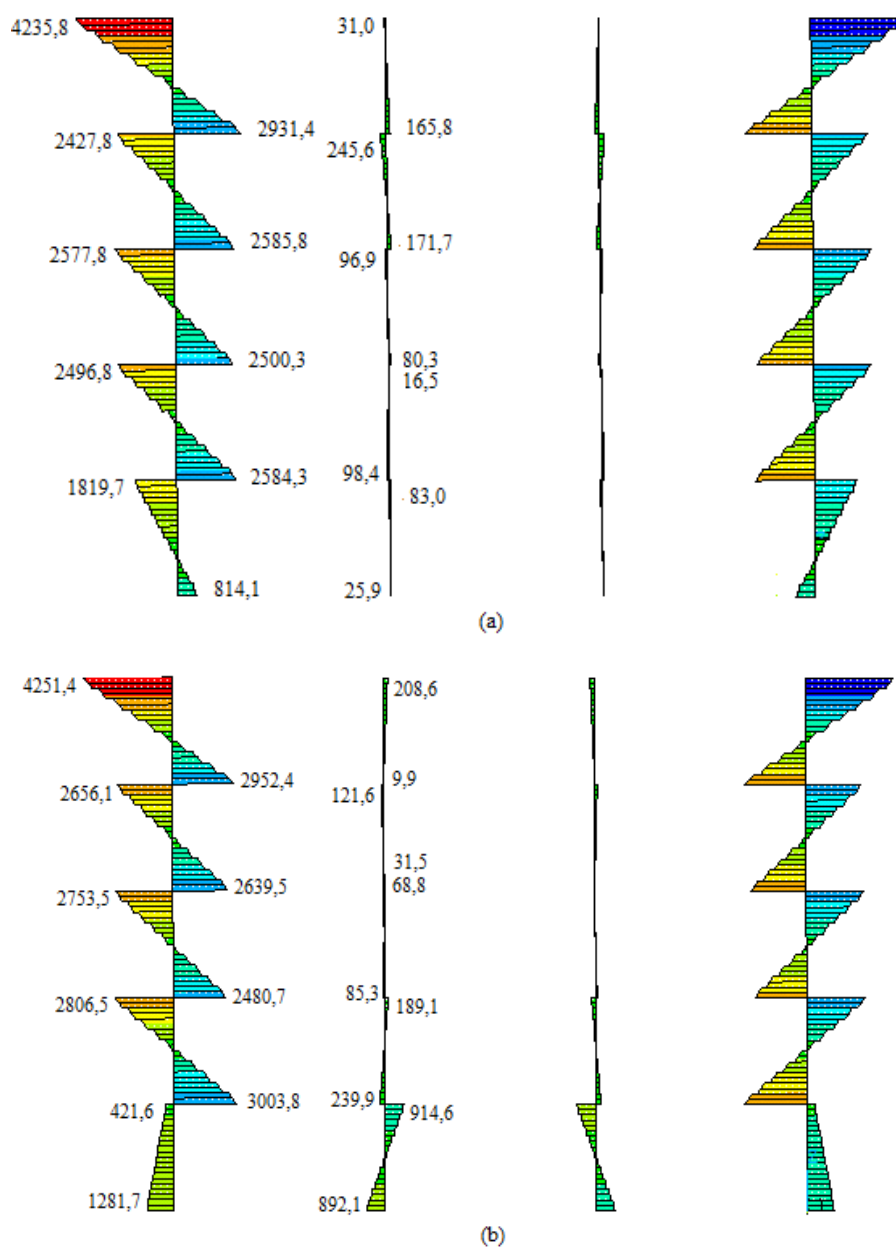


Tabela 7.6 – Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao momento fletor (no plano do pórtico) nos pilares

Pórtico 1	Diferença de resultado entre as análises, para pilares externos (%)	Diferença de resultado entre as análises, para pilares internos (%)
AG – AF	12	16
Pórtico 2	Diferença de resultado entre as análises, para pilares externos (%)	Diferença de resultado entre as análises, para pilares internos (%)
AG – AF	16	Maior que 100%

No que se refere aos momentos fletores nos pilares, constata-se grandes diferenças entre os resultados obtidos através das análises realizadas. Em relação ao pórtico 1, comparando os resultados advindos da análise faseada com a análise global, observa-se que nos lances de pilares externos ocorre majoritariamente a diminuição dos resultados. No pavimento térreo constata-se a inversão e o aumento dos momentos. Nos lances de pilares internos, ocorrem acréscimos ao valor dos esforços. Nos lances de pilares localizados no centro da estrutura, há a inversão dos momentos no pavimento térreo e nos outros lances de pilares internos essa inversão ocorre no pavimento de cobertura.

Já no pórtico 2, nos lances de pilares externos, ocorre o aumento dos resultados colhidos, em comparação com análise convencional, havendo a inversão de esforços no pavimento térreo. Nos lances de pilares internos, os resultados apresentados na análise faseada são substancialmente maiores do que os resultados colhidos na análise global e ocorre a inversão dos momentos no pavimento de cobertura. A inversão de esforços não foi contabilizada para o cálculo da porcentagem de diferenças entre as análises.

7.4.2 Vigas

Foram extraídos para as vigas os resultados referentes ao esforço cortante e ao momento fletor no plano do pórtico. As Figuras 7.13 e 7.14 ilustram os diagramas de esforço cortante para ambos os pórticos analisados. A Tabela 7.7 demonstra as maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, para o esforço cortante nas vigas.

Figura 7.13 – Esforço cortante (kN) nas vigas do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada.

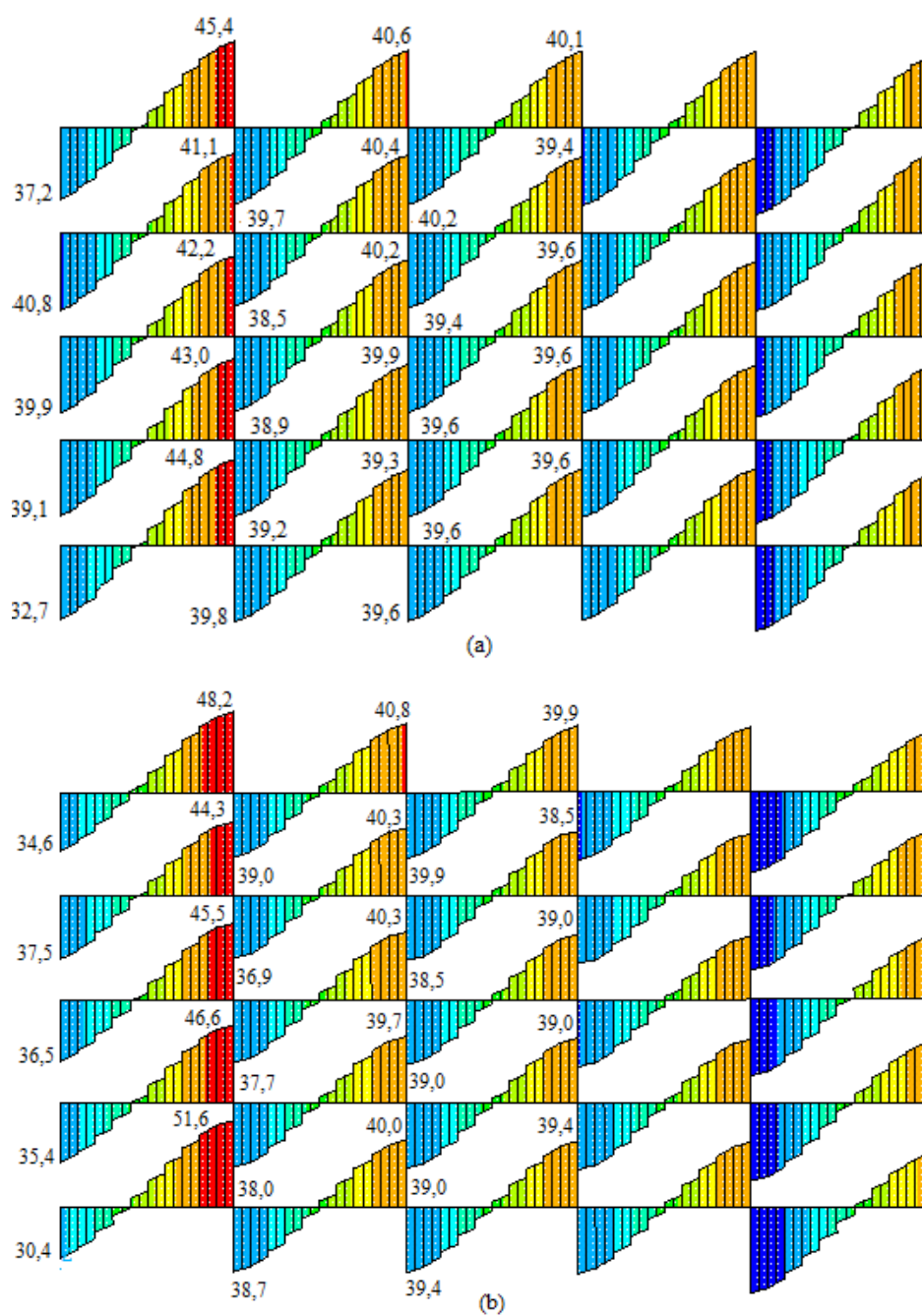


Figura 7.14 – Esforço cortante (kN) nas vigas do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

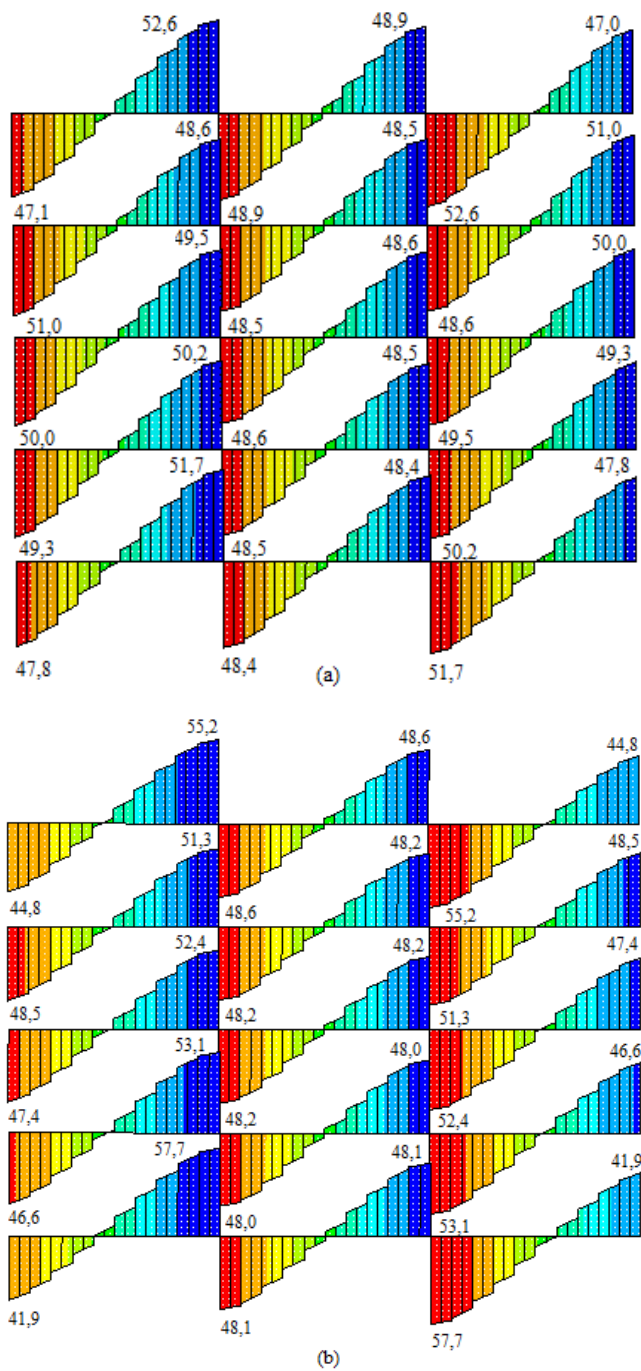


Tabela 7.7 – Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação aos esforços cortante nas vigas

Pórtico 1	Diferença de resultado entre as análises, para tramo interno (%)	Diferença de resultado entre as análises, para tramo externo (%)
AG – AF	15,2	9,5
Pórtico 2	Diferença de resultado entre as análises, para tramo interno (%)	Diferença de resultado entre as análises, para tramo externo (%)
AG – AF	11,6	12,3

Realizando a análise do esforço cortante nas vigas, em ambos os pórticos, nota-se que as maiores diferenças entre os resultados se encontram nas vigas externas. Efetuando o estudo destas vigas, com ênfase no tramo externo, os resultados obtidos pela análise faseada são menores do que os resultados colhidos pela análise convencional. Focando nos tramos internos, grande parte dos resultados advindos da análise faseada são maiores quando comparados com os resultados provenientes da análise global.

As Figuras 7.15 e 7.16 ilustram o diagrama dos momentos fletores (no plano do pórtico) para ambos os pórticos. Na Tabela 7.8 tem-se as maiores diferenças percentuais entre os resultados obtidos para momento fletor nas vigas.

Figura 7.15 – Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nas vigas do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada.

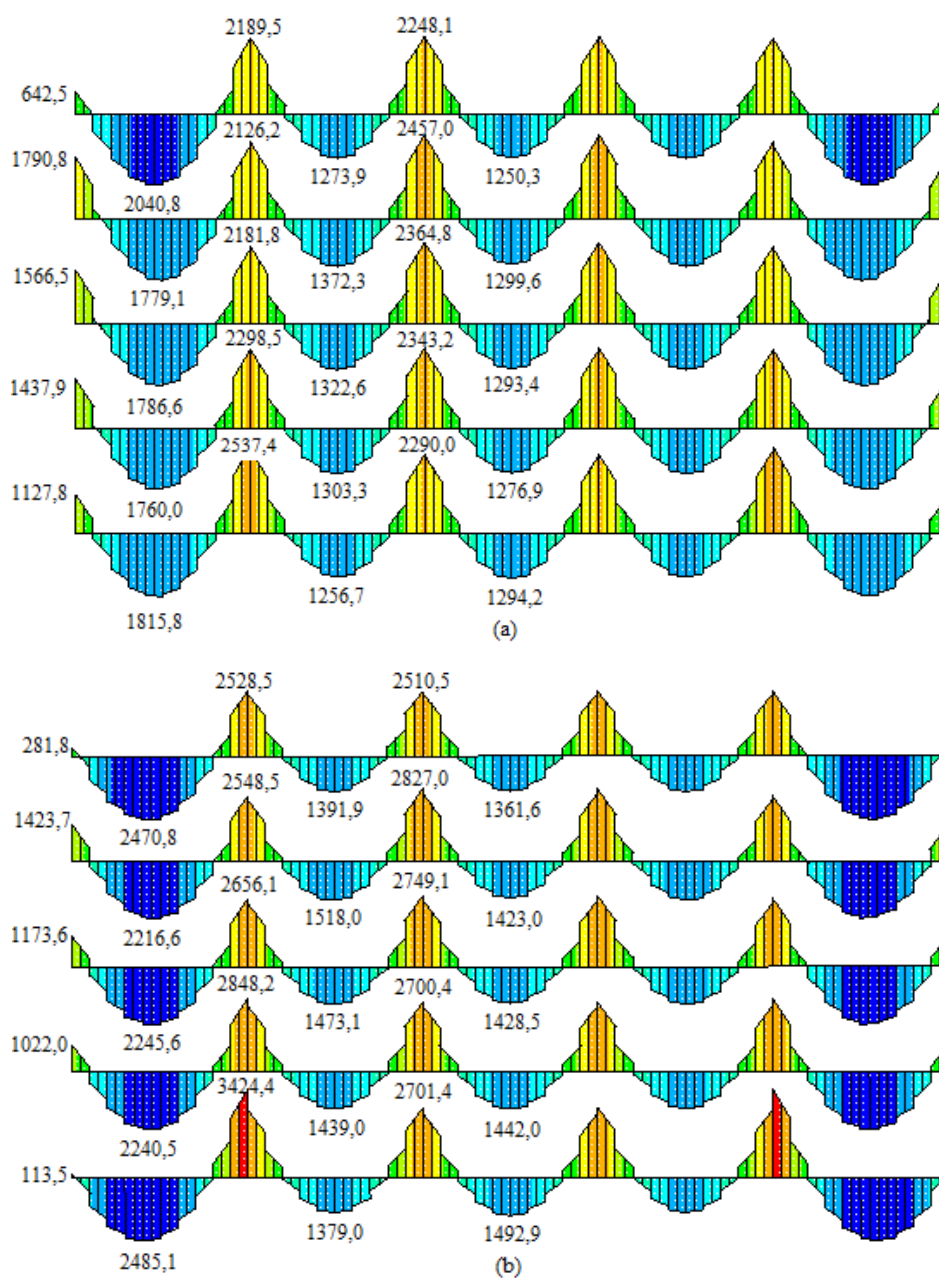


Figura 7.16 – Momento fletor (no plano do pórtico, em kN.cm) nas vigas do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

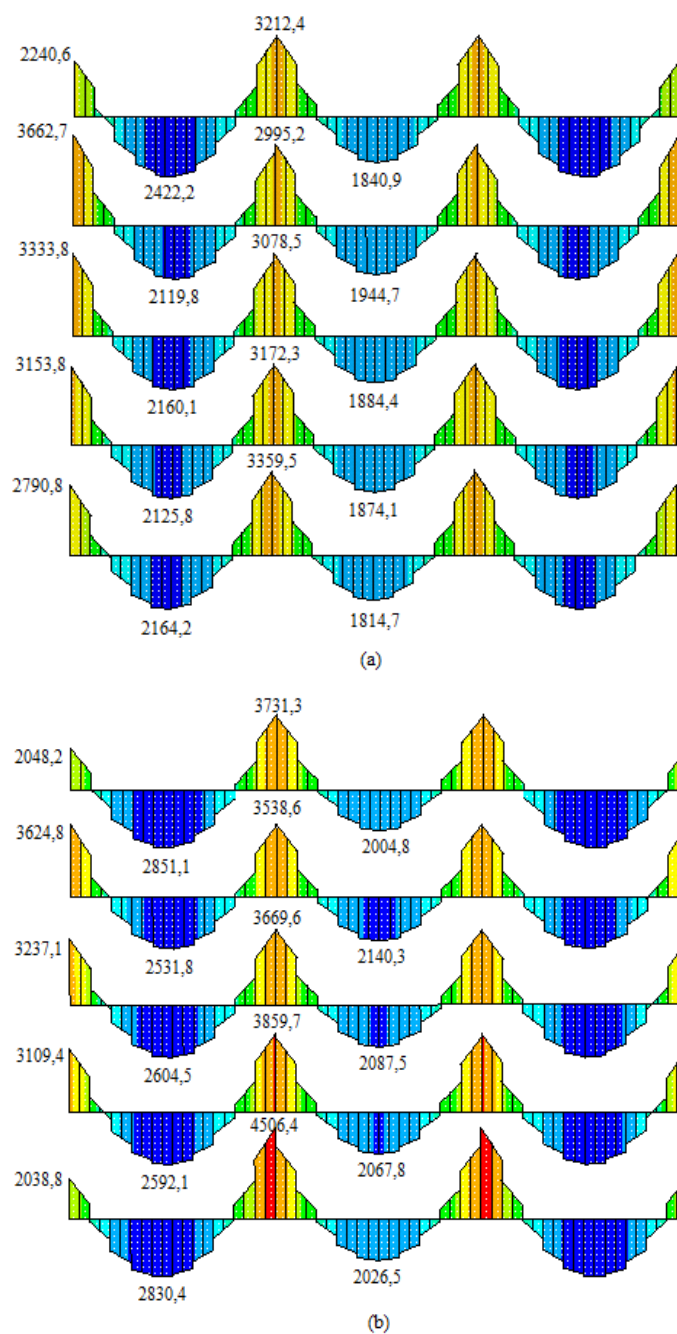


Tabela 7.8 – Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação aos momentos fletores (no plano do pórtico) nas vigas

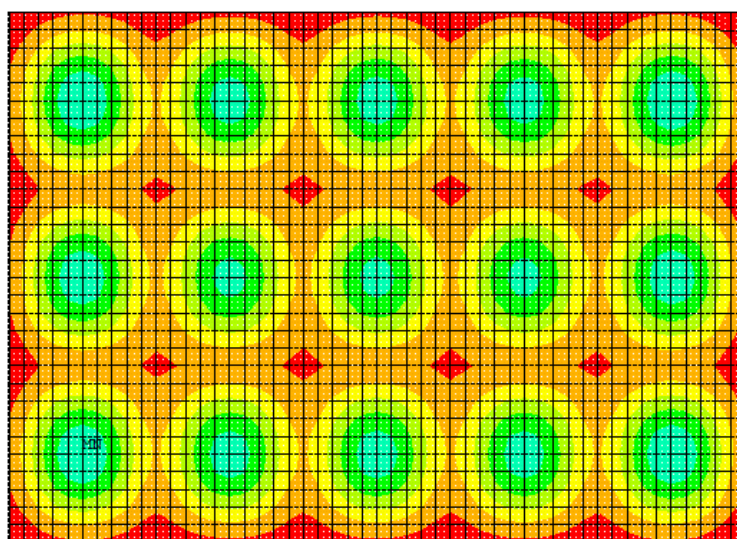
	Diferença de resultado entre as análises, para tramo int. (%)	Diferença de resultado entre as análises, para tramo ext. (%)	Diferença de resultado entre as análises, a meio vão (%)
Pórtico 1			
AG – AF	15,4	90	37
Pórtico 2			
AG – AF	34	27	31

Ambos os pórticos analisados apresentaram o mesmo comportamento. As maiores diferenças entre os resultados advindos das análises foram constatadas nas vigas do pavimento térreo. Quando comparados os resultados obtidos pela análise faseada com os resultados extraídos pela análise global, houve redução somente no tramo externo das vigas externas. Nos tramos internos das vigas e a meio vão, foram obtidos resultados maiores advindos da análise faseada.

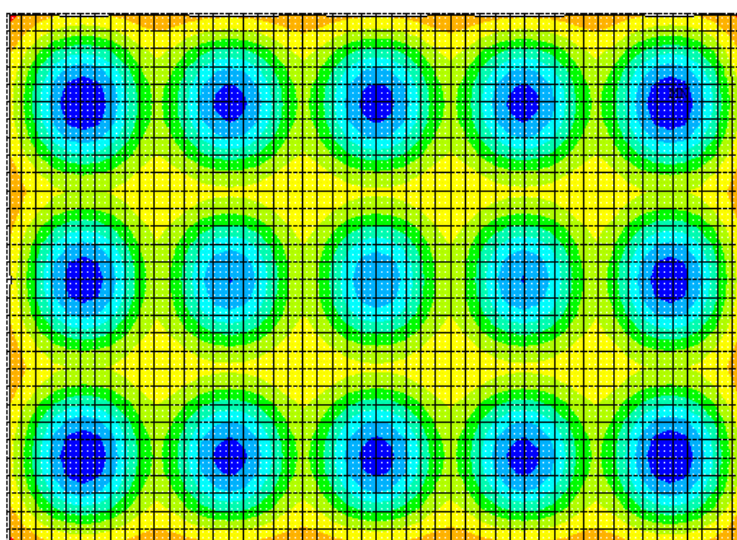
7.4.3 Lajes

Para as lajes foram extraídos o deslocamento vertical e o estado de fissuração, para L1 (laje do primeiro pavimento) e L5 (laje de cobertura). Nas Figuras 7.17 e 7.18 constam os deslocamentos verticais para as lajes mencionadas. A Tabela 7.9 aponta as maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, no que concerne o deslocamento vertical no centro das lajes estudadas.

Figura 7.17 – Deslocamento vertical (cm) para a laje do primeiro pavimento, para análise (a) global e (b) faseada.



(a)



(b)

Figura 7.18 – Deslocamento vertical (cm) para a laje de cobertura, para análise (a) global e (b) faseada.

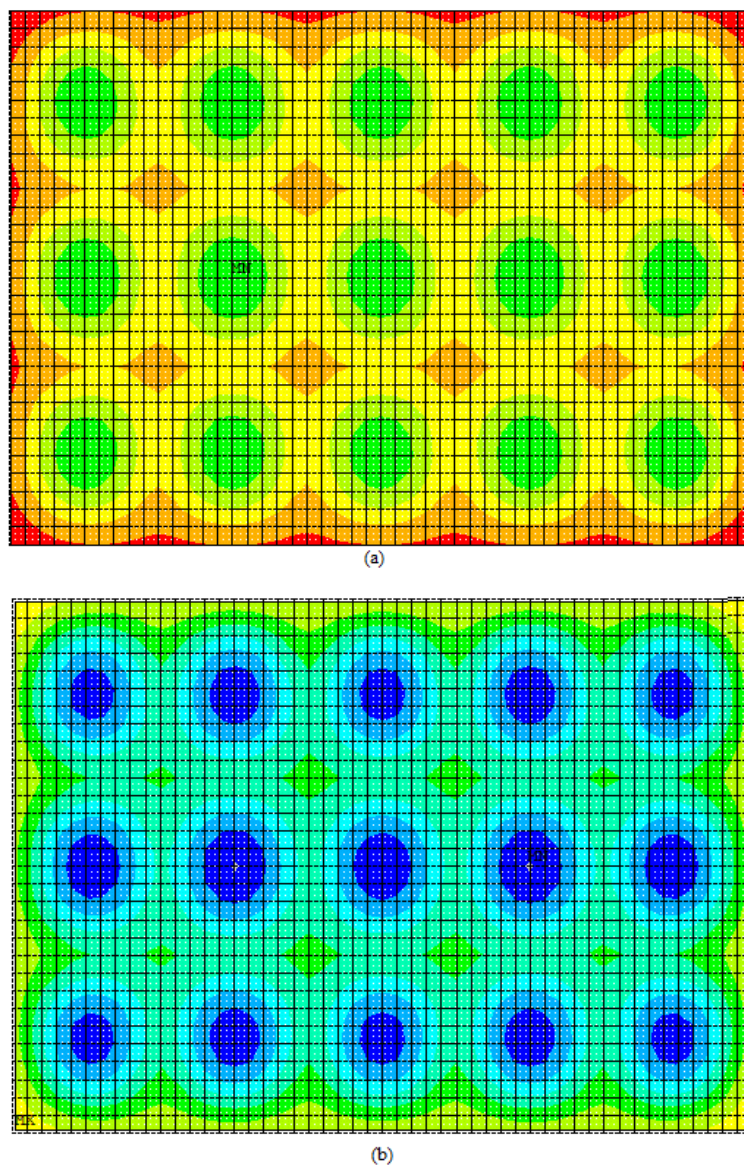


Tabela 7.9 – Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao deslocamento vertical no centro das lajes

L1	Diferença de resultado entre as análises, para o centro das lajes (%)
AG – AF	21
L5	Diferença de resultado entre as análises, para o centro das lajes (%)
AG – AF	41

Constata-se que a distribuição dos deslocamentos verticais nas lajes muda completamente na análise faseada. Esta observação condiz com o comportamento notado por Ha (2013), que evidencia a mudança da condição estrutural não apenas no pavimento no momento da carga, mas na estrutura em geral, com aumento de deslocamentos. No que concerne o deslocamento vertical no centro das lajes, para ambas lajes estudadas, os deslocamentos foram maiores através da análise faseada.

Nas Figuras 7.19 e 7.20 apresenta-se o estado de fissuração das lajes do primeiro pavimento e de cobertura. Nestes gráficos de estado de fissuração, a cor azul (0 na escala na gráfica) indica que os pontos de integração do elemento ainda não estão fissurados. Quando a cor é vermelha (1 na escala gráfica) indica que algum ponto de integração do elemento em questão fissurou. Não foi constatada fissuração na segunda direção para as lajes.

Figura 7.19 – Estado de fissuração para a laje do primeiro pavimento, para análise faseada.

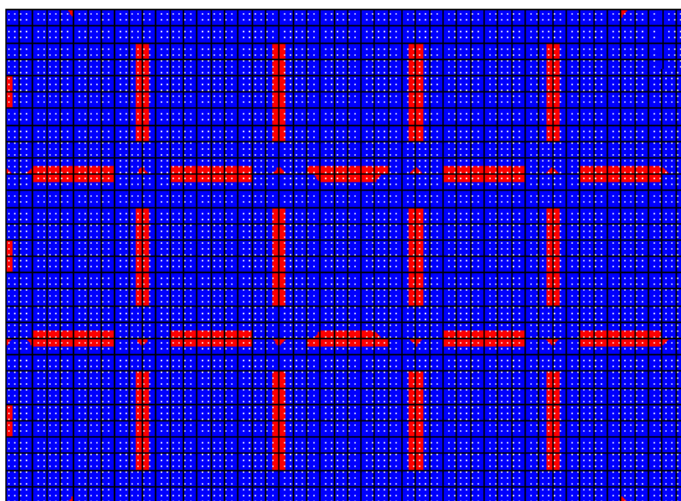
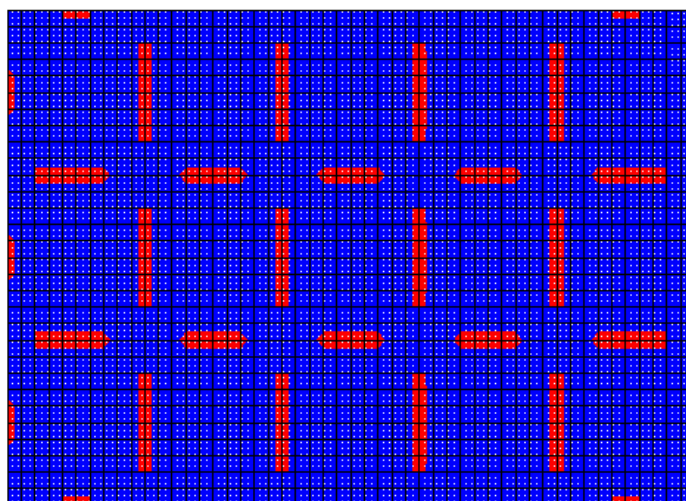


Figura 7.20 – Estado de fissuração para a laje de cobertura, para análise faseada.

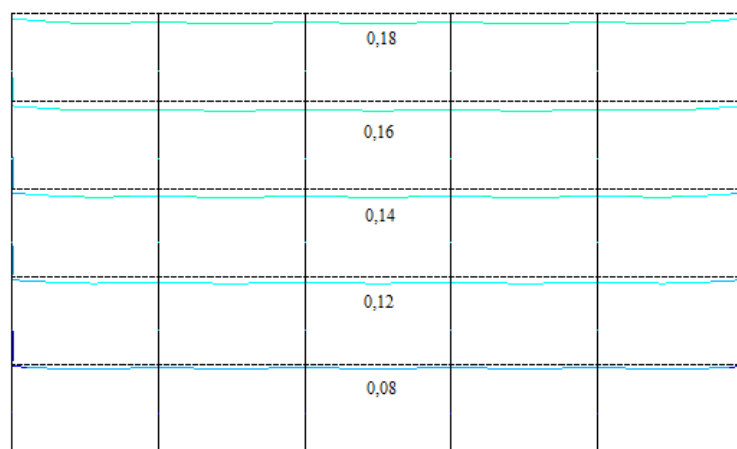


Ressalta-se que na análise global não é considerado o efeito de fissuração. Desta forma nota-se a importância de considerar a análise faseada, pois há fissuração nas lajes.

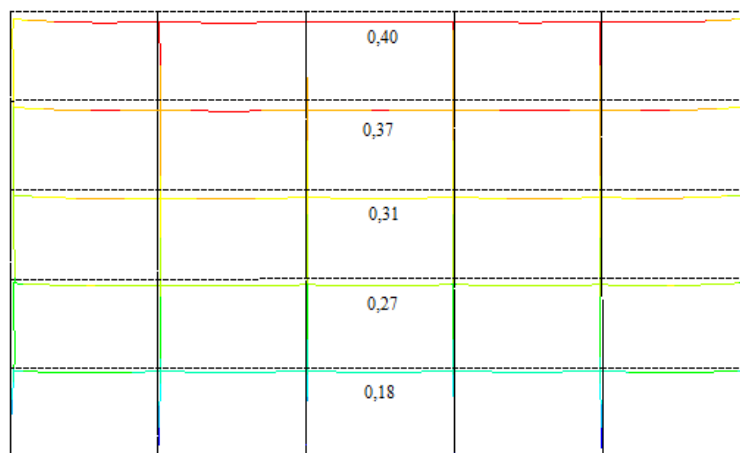
7.4.4 Pórtico

As Figuras 7.21 e 7.22 indicam a deformada para os pórticos, para ambas análises realizadas. Na Tabela 7.10 estão apontadas as diferenças percentuais entre as análises realizadas, no que concerne o deslocamento total nos pórticos.

Figura 7.21 – Deformada do pórtico 1, para análise (a) global e (b) faseada.



(a)



(b)

Figura 7.22 – Deformada do pórtico 2, para análise (a) global e (b) faseada.

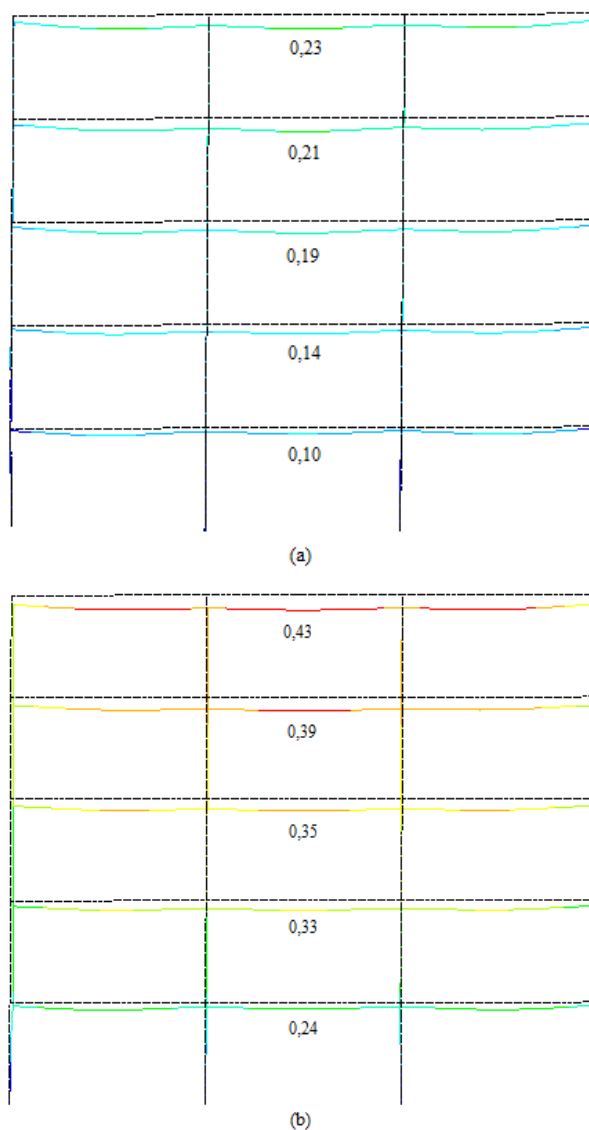


Tabela 7.10 – Maiores diferenças percentuais entre as análises realizadas, em relação ao deslocamento total nos pórticos

Pórtico 1	Diferença de resultado entre as análises, para o vão central do pórtico (%)
AG – AF	122
Pórtico 2	Diferença de resultado entre as análises, para o vão central do pórtico (%)
AG – AF	87

No que diz respeito ao deslocamento total, em ambos os pórticos a análise faseada apresentou valores significativamente maiores do que os valores obtidos pela análise convencional. Isto

se deve ao fato de que a análise faseada considera os efeitos diferidos do concreto que aliados com a consideração das etapas construtivas (as quais são incrementadas ao longo do tempo) exibe efeito significativo. As maiores diferenças percentuais entre os resultados foram encontradas na laje de cobertura, no vão central do edifício.

Observou-se também, que na análise faseada ocorre um deslocamento horizontal da estrutura, o que não se sucede na análise global. Não foram encontrados pontos de fissuração nos pórticos analisados, o que pode estar relacionado com o tipo de elemento e sua natureza uniaxial, utilizado para representar as vigas e pilares.

8 CONCLUSÕES

Neste último capítulo constam algumas considerações finais sobre os resultados obtidos e sugestões que possam ser seguidas para os futuros trabalhos.

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A consideração das fases construtivas, da aplicação sequencial de cargas e da inserção dos efeitos diferidos do concreto, explica diversos fenômenos observados na análise faseada. A contemplação da retração causa um efeito de encolhimento/contração na estrutura, conforme pode-se observar nas figuras referentes ao deslocamento das lajes e pórticos. Este efeito aliado à ação da fluência, a qual amplifica o encurtamento axial dos pilares, acaba por gerar a inversão de alguns momentos fletores nos pilares.

De forma geral, investigando os resultados obtidos, nota-se que executando a análise faseada há uma redistribuição dos esforços na estrutura, o que é esperado de acordo com Das (2016). Também segundo Das (2016), e Kwak e Kim (2006), espera-se que os momentos fletores e o deslocamento dos membros estruturais sejam maiores quando obtidos pela análise faseada, o que de fato se observa na presente análise.

Examinando os resultados obtidos, nota-se que por vezes a análise global apresenta valores superiores do que os valores calculados com a análise faseada, ocorrendo uma situação de superdimensionamento dos elementos, fato que tem relevância no aspecto econômico da obra. Também há a ocorrência dos valores obtidos com a análise global serem menores do que os valores obtidos com a análise faseada, o que mostra uma situação de subdimensionamento dos elementos, fato que afeta a segurança estrutural.

Em relação ao deslocamento nos pórticos, observa-se que as diferenças entre as análises aumentam proporcionalmente ao aumento da altura do edifício. O maior encurtamento diferencial encontrado, ocorreu no pavimento de cobertura, o que foi encontrado também por Vafai (2009). É visto que em todas as análises os pilares internos possuem um maior deslocamento axial, visto que, sua área de contribuição é maior.

É evidente em todos os diagramas de esforços, que estes possuem simetria, o que está de acordo com o esperado. Os esforços obtidos via análise global pelo ANSYS obtiveram valores extremamente próximos dos esforços obtidos via TQS. Quando se realiza a análise faseada considerando os efeitos de viscoelasticidade e fissuração o tempo de processamento do modelo triplica quando comparado com o tempo de processamento do modelo global.

Os resultados mostram que em edifícios de concreto, uma análise estrutural que considere os efeitos diferidos e as etapas da construção geram resultados e comportamentos mais realistas e significativamente diferentes quando comparados com a análise convencional. Por fim, este trabalho de dissertação cumpre seus objetivos iniciais, os quais eram demonstrar as possíveis diferenças de esforços e deslocamentos entre as análises global e faseada.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em relação ao trabalho desenvolvido, considera-se que há muitos aspectos que devem ser mais explorados, desenvolvidos e aperfeiçoados. Como sugestões para trabalhos futuros na linha dessa dissertação pode-se citar os seguintes itens:

- a) aperfeiçoamento do cronograma de obra, de forma a conter informações mais detalhadas;
- b) consideração do processo de reescoramento, o qual foi suprimido desta dissertação;
- c) simulação computacional das escoras, utilizando o elemento *link180*;
- d) adaptação da teoria da solidificação de Bazant e Prasannan (1989^a, 1989b) à formulações de códigos mais recentes para a fluência e retração do concreto, onde não há a separação entre os fatores que dependem da idade do concreto e da idade da carga;
- e) avaliação dos esforços que atuam na estrutura durante a construção e não somente na situação final desta;
- f) consideração da semirrigidez dos nós de pórtico no *software* ANSYS, através da inserção dos elementos de mola *combin39*;
- g) avaliação mais detalhada sobre a inserção do efeito de retração nos elementos estruturais de concreto;

REFERÊNCIAS

ACI Formwork for concrete (1989). Detroit. 464 p. (ACI SP-4).

ALVA, G. M. S. **Estudo teórico-experimental do comportamento de nós de pórtico de concreto armado submetidos a ações cíclicas**. 2004. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ALVA, G. M. S.; FERREIRA, M. A.; EL DEBS, A. L. H. C. **Engastamento Parcial de Ligações Viga-Pilar em Estruturas de Concreto Armado**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 2, p.356-379, dez. 2009.

ALVA, G. M. S. **Estudo teórico-experimental do comportamento de nós de pórtico de concreto armado submetidos a ações cíclicas**. 2004. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide**. Release 19.2, 2019.

ARAÚJO, Marcelo Ferreira de Souza Bezerra. **Simulação pelo método dos elementos finitos de peças em concreto têxtil**. 2019. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estrutura de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 61 p.

BARBOSA, P. R. de O. **Análise probabilística de pilares de concreto armado através do método dos elementos finitos**. 2017. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BAST, W. D. et al. **Measured Shortening and Its Effects in a Chicago High-rise Building**. In: Forensic Engineering Congress, 3., 2003, San Diego. **Proceedings...** San Diego: Forensic Engineering Congress, 2003. p. 564 - 576.

BATHE, K. **Finite Element Procedures**. 2. ed. Watertown: Prentice Hall, Pearson Education, 1996. 1065 p.

BAŽANT, Z. P. **Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future**. Nuclear Engineering And Design, [s.l.], v. 203, n. 1, p.27-38, jan. 2001. Elsevier BV.

BAŽANT, Z. P.; PRASANNAN, S. **Solidification Theory for Concrete Creep. I: Formulation**. Journal Of Engineering Mechanics, [s.l.], v. 115, n. 8, p.1691-1703, ago. 1989^a. American Society of Civil Engineers (ASCE).

BAŽANT, Z. P.; PRASANNAN, S. **Solidification Theory for Concrete Creep. II: Verification and Application.** Journal Of Engineering Mechanics, [s.l.], v. 115, n. 8, p.1704-1725, ago. 1989b. American Society of Civil Engineers (ASCE).

BERNARDI, D. F. **Um modelo computacional para a análise global tridimensional da estrutura de edifícios altos de concreto armado com a presença de paredes estruturais.** 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BRISOT, G. **Modelagem de lajes na análise tridimensional de edifícios de alvenaria estrutural.** 2001. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CAMPOS FILHO, A. **Análise teórico-experimental de elementos de concreto armado para obtenção de modelo matemático.** 1987. 309 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-graduação de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado Segundo a NBR 6118:2014.** 4. ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2014. 424 p. (978-85-7600-356-4).

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia.** 5ª ed, São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

CHOI, C.; KIM, E. **Multistory Frames Under Sequential Gravity Loads.** Journal Of Structural Engineering (asce). Reston, p. 2373-2384. set. 1984.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP: Model Code 1990.** 1 ed. Lausanne: Thomas Telford, 1993. 461 p.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **Concrete under multiaxial states of stress – constitutive equations for practical design.** State-of-the-art report, Bulletin d'Information No 156, 1983.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M.E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis.** 3.ed. Ed. Jonh Wiley & Sons, Inc., 1989.

DARWIN, D. **Reinforced Concrete.** In: ISENBERG, J. (Ed.). Finite element analysis of reinforced concrete. New York, ASCE, June 2-5, 1991.p.203-232.

DAS, G. G.; PRASEEDA, K. I. **Comparison of Conventional and Construction Stage Analysis of a RCC Building.** Ijste - International Journal Of Science Technology & Engineering, Ahmedabad, v. 3, p.50-57, set. 2016. Mensal.

DIAS, M. M. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos: efeitos de longa duração.** 2013. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Estruturas, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DIAS, M. M. et al. **Time dependent finite element analysis of steel-concrete composite beams considering partial interaction.** Computers And Concrete, [s.l.], v. 15, n. 4, p.687-707, 25 abr. 2015. Techno-Press.

DUNDAR, C.; KARA, I. F. **Three dimensional analysis of reinforced concrete frames with cracked beam and column elements.** Engineering Structures. Reston, p. 2262-2273. dez. 2006.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **MODEL CODE 2010: Model Code 2010.** 1 ed. Lausanne: International Federation For Structural Concrete, 2012. 357 p.

FERREIRA, M. de A. **Deformabilidade de Ligações Viga-Pilar de Concreto Pré-Moldado.** 1999. 253 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

GILBERT, R. I.; RANZI, G. **Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures.** New York: Spon Press, 2011. 447 p. (978-0-415-49384-0).

GRUNDY, P.; KABAILA, A. **Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings.** ACI Structural Journal, v.60, n. 12, p. 1729-1738, 1963.

HA, T.; LEE, S. **Advanced Construction Stage Analysis of High-rise Building Considering Creep and Shrinkage of Concrete.** In: Advances in structural engineering and mechanics, 13., 2013, Jeju. Proceedings... Jeju: Techno-press, 2013. p. 2139 - 2147.

HALLEBRAND, E.; JAKOBSSON, W. **Structural Design of High-Rise Buildings.** 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Structural Mechanics, Department Of Construction Sciences, Lund University, Lunda, 2016.

HARSHA, B Sri; VIKRANTH, J. **Study and Comparison of Construction Sequence Analysis with Regular Analysis by using ETABS.** International Journal Of Research Sciences And Advanced Engineering, Chhattisgarh, v. 2, n. 8, p.218-227, dez. 2014.

HINTON, E. **Numerical methods and software for dynamic analysis of plates and shells.** Swansea: Pineridge Press, 1988.

IBRAHIMBEGOVIC, A. **On finite element implementation of geometrically nonlinear Reissner's beam theory: three-dimensional curved beam elements.** Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering, Amsterdã, v. 122, n. [1], p.11-26, jul. 1993.

IMAI, A. P.; CONTER, L. J.; DEMETERKO, R. H. **Análise de efeitos de segunda ordem em estruturas de edifícios.** 2011. 112 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2011.

JENSEN, B. M. **Modelagem Tridimensional em Elementos Finitos de Túneis Superficiais Revestidos em Concreto Armado.** 2019. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

JU, H; LIN, M. C. **Comparison of building analyses assuming rigid or flexible floors.** Journal Of Structural Engineering (ASCE). Reston, p. 25-31. jan. 1999.

JUNGES, E. **Modelo de elementos finitos para análise não linear física e geométrica de pórticos tridimensional de concreto armado.** 2016. 302 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

KIM, H. S.; SHIN, S. H. **Column Shortening Analysis with Lumped Construction Sequences.** In: Eats Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 12., 2011, Hong Kong. Proceedings.... Amsterdã: Elsevier, 2011. p. 1791 - 1798.

KIMURA, A. **Informática Aplicada em Estruturas de Concreto Armado: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais.** São Paulo: Pini, 2007.

KRIPKA, M. **Análise Incremental Construtiva de Edificações.** 1990. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

KWAK, H.; KIM, J. **Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences.** Building And Environment, [s.l.], v. 41, n. 10, p.1423-1434, out. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.013>.

LAZZARI, P. M. **Simulação Numérica das Etapas Construtivas de Pontes Estaiadas Através do Método dos Elementos Finitos.** 2016. 301 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LEONHARDT, F.; MONNING, E. **Construções de concreto** Vol. 1. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1982.

MARTINELLI, M. **Modelagem de situações de punção em lajes de concreto armado através do método dos elementos finitos.** 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MEDEIROS, M. V. de. **Simulação numérica do comportamento de peças fletidas reforçadas com PRFC.** 2019. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado.** 2011. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A. G.; CABRÉ, F. M. **Hormigón Armado.** 14. ed. Espanha: Gustavo Gili, 2000. 444 p.

NAHUM, K. A. R.; OLIVEIRA, D. R. C. **Monitoramento de pilares em edifícios altos de concreto armado**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 3, n. 2, p.179-194, jun. 2010. Trimestral.

OLIVEIRA, D. M. de. **Estudo dos processos aproximados utilizados para a consideração das não-linearidades física e geométrica na análise global das estruturas de concreto armado**. 2007. 327 f. Tese (Doutorado)

OLIVEIRA, M. E. F. de. **Desenvolvimento de algoritmo e programa de análise de estruturas em concreto armado levando em consideração as etapas construtivas e a variação das características do concreto com o tempo**. 2019. 333 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

OTTOSEN, N. S. A Failure Criterion for Concrete. **Journal Of The Engineering Mechanics Division**, [s.l.], v. 4, n. 103, p.527-535, ago. 1977.

PEREIRA, R. **Edifícios altos – Problemas associados e análise estrutural de um caso prático**. 2011. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2011.

PRADO, J. F. M. de A. **Estruturas de Edifícios em Concreto Armado Submetidas a ações de construção**. 1999. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

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

PRANAY, R.; SREEVALLI, I. Y.; KUMAR, E. T. S. **Study and Comparison of Construction Sequence Analysis with Conventional Lumped Analysis Using ETABS**. Civil Engineering Systems And Sustainable Innovations, Nova Déli, p.220-228, 2015.

RACHINHAS, B. C. **Análise de Estruturas de Edifícios Considerando o Faseamento Construtivo**. 2018. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

REAL, M. V. **Análise Probabilística de Estruturas de Concreto Armado, Sob Estado Plano de Tensão, Através do Método dos Elementos Finitos**. 2000. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

REIS, J. P. L. A. G. **Estudo de Diferentes Soluções Estruturais de Edifícios Altos**. 2014. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2014.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. **Measurement of time-dependent strains of concrete**. Materials And Structures, [s.l.], v. 31, n. 8, p.507-512, out. 1998. Springer Science and Business Media LLC.

PACHECO, J. et al. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 56., 2014, Natal. Anais.... São Paulo: Ibracon, 2014. p. 1 - 14.

PINTO, R. da S. **Análise não-linear das estruturas de contraventamento de edifícios em concreto armado**. 2002. 204 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil - Estruturas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PRATES JÚNIOR, N. P. **Um modelo elasto-viscoplástico para análise de peças de concreto estrutural, submetidas a estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos**. 1992. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

QUEVEDO, F. P. da M. **Comportamento a longo prazo de túneis profundos revestidos com concreto: Modelo em elementos finitos**. 2017. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

QUEVEDO, F. P. da M. et al. **Customization of a software of finite elements to analysis of concrete structures: long-term effects**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [s.l.], v. 11, n. 4, p.696-718, ago. 2018. FapUNIFESP (SciELO).

SAFFARINI, H. S.; QUDAIMAT, M. M. **In-Plane Floor Deformations in RC Structures**. Journal Of Structural Engineering (ASCE). Reston, p. 3089-3102. nov. 1992.

SANTOS, J. B. **Análise da Influência da Rigidez das Ligações Viga-Pilar no Comportamento Estrutural de Edifícios de Múltiplos Pavimentos em Concreto Armado**. 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SBAROUNIS, J.A. (1984). **Multistory flat plate buildings: construction loads and immediate deflections**. Concrete International, v.6, n. 2, p. 70-77, Feb.

SCHERER, M. **Avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado pelo método dos elementos finitos**. 2018. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SCHMITZ, R. J. **Estrutura mista aço-concreto: análise de ponte composta por vigas de alma cheia**. 2017. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SOUZA, M. L. M. de. **Estudo da fluência e retração na análise de um tabuleiro em vigas múltiplas de uma ponte rodoviária**. 2014. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

STRAMANDINOLI, R. S. B. **Modelos de elementos finitos para análise não linear física e geométrica de vigas e pórticos planos de concreto armado.** 2007. 238 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

TARANATH, B. S. **Reinforced Concrete Design of Tall Buildings.** Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2010. 1024 p.

VAFAI, A. et al. **Calculation of creep and shrinkage in tall concrete buildings using nonlinear staged construction analysis.** Asian Journal Of Civil Engineering (building And Housing), Tehran, v. 10, n. 4, p.409-426, jan. 2009.

APÊNDICE A

Neste apêndice é apresentada a subrotina *Usermatps* visto que esta é mais complexa (possui mais componentes) do que a *Usermatbm* também utilizada neste trabalho. As sub-rotinas referentes à viscoelasticidade podem ser encontradas no trabalho de Quevedo (2017).

```
*deck,usermatps    USERDISTRIB  parallel                                gal
  subroutine usermatps(
    &                matId, elemId,kDomIntPt, kLayer, kSectPt,
    &                ldstep,isubst,keycut,
    &                nDirect,nShear,ncomp,nStatev,nProp,
    &                Time,dTime,Temp,dTemp,
    &                stress,ustatev,dsdePl,sedEl,sedPl,epseq,
    &                Strain,dStrain, epsPl, prop, coords,
    &                var0, defGrad_t, defGrad,
    &                tsstif, epsZZ,
    &                var1, var2, var3, var4, var5,
    &                var6, var7, var8)
C*****
C    *** primary function ***
C
C        user defined material constitutive model
C
C    Attention:
C        User must define material constitutive law properly
C        according to the stress state such as 3D, plane strain
C        and axisymmetry, plane stress and beam.
C
C        a 3D material constitutive model can use for
C        plane strain and axisymmetry cases.
C
C        When using shell elements, a plane stress algorithm
C        must be use.
C
C                                gal July, 1999
C
C    The following demonstrates a USERMAT subroutine for
C    a plasticity model of plane stress state (such as PLANE182,
C    PLANE183 or SHELL181). The plasticity model is the same
C    as ANSYS TB, BISO.
C
C    See "ANSYS user material subroutine USERMAT" for detailed
C    description of how to write a USERMAT routine.
C
C*****
C    input arguments
C    =====
C    matId    (int,sc,i)          material #
C    elemId   (int,sc,i)          element #
C    kDomIntPt (int,sc,i)         "k"th domain integration point
C    kLayer   (int,sc,i)         "k"th layer
C    kSectPt  (int,sc,i)         "k"th Section point
C    ldstep   (int,sc,i)         load step number
C    isubst   (int,sc,i)         substep number
C    nDirect  (int,sc,in)        # of direct components
C    nShear   (int,sc,in)        # of shear components
C    ncomp    (int,sc,in)        nDirect + nShear
C    nStatev  (int,sc,l)        Number of state variables
C    nProp    (int,sc,l)        Number of material ocnstants
C
C    Temp     (dp,sc,in)         temperature at beginning of
```

```

c                                     time increment
c   dTemp      (dp,sc,in)             temperature increment
c   Time       (dp,sc,in)             time at beginning of increment (t)
c   dTime      (dp,sc,in)             current time increment (dt)
c
c   Strain     (dp,ar(ncomp),i)       Strain at beginning of time increment
c   dStrain    (dp,ar(ncomp),i)       Strain increment
c   prop       (dp,ar(nprop),i)       Material constants defined by TB,USER
c   coords     (dp,ar(3),i)           current coordinates
c   defGrad_t  (dp,ar(3,3),i)         Deformation gradient at time t
c   defGrad    (dp,ar(3,3),i)         Deformation gradient at time t+dt
c
c   input output arguments
c   =====
c   stress     (dp,ar(nTesn),io)       stress
c   ustatev    (dp,ar(nStatev),io)     user state variables
c   ustatev(1) - ustatev(1+ncomp)     - equivalent plastic strain
c   ustatev(2) - ustatev(1+ncomp)     - plastic strain vector
c   ustatev(nStatev)                  - von-Mises stress
c   sedEl      (dp,sc,io)              elastic work
c   sedPl      (dp,sc,io)              plastic work
c   epseq      (dp,sc,io)              equivalent plastic strain
c   tsstif     (dp,ar(2),io)           transverse shear stiffness
c   tsstif(1) - Gxz
c   tsstif(2) - Gyz
c   tsstif(1) is also used to calculate hourglass
c   stiffness, this value must be defined when low
c   order element, such as 181, 182, 185 with uniform
c   integration is used.
c   var?       (dp,sc,io)             not used, they are reserved arguments
c   for further development
c
c   output arguments
c   =====
c   keycut     (int,sc,io)             loading bisect/cut control
c   0 - no bisect/cut
c   1 - bisect/cut
c   (factor will be determined by ANSYS solution
control)
c   dsdePl     (dp,ar(ncomp,ncomp),io) material jacobian matrix
c   epsZZ      (dp,sc,o)               strain epsZZ for plane stress,
c   define it when accounting for thickness change
c   in shell and plane stress states
c
c   *****
c
c   ncomp      6   for 3D (nshear=3)
c   ncomp      4   for plane strain or axisymmetric (nShear = 1)
c   ncomp      3   for plane stress (nShear = 1)
c   ncomp      3   for 3d beam (nShear = 2)
c   ncomp      1   for 1D (nShear = 0)
c
c   stresss and strains, plastic strain vectors
c   11, 22, 33, 12, 23, 13   for 3D
c   11, 22, 33, 12           for plane strain or axisymmetry
c   11, 22, 12               for plane stress
c   11, 13, 12               for 3d beam
c   11                        for 1D
c
c   material jacobian matrix
c   3D
c   dsdePl     | 1111  1122  1133  1112  1123  1113 |
c   dsdePl     | 2211  2222  2233  2212  2223  2213 |
c   dsdePl     | 3311  3322  3333  3312  3323  3313 |
c   dsdePl     | 1211  1222  1233  1212  1223  1213 |
c   dsdePl     | 2311  2322  2333  2312  2323  2313 |
c   dsdePl     | 1311  1322  1333  1312  1323  1313 |
c   plane strain or axisymmetric (11, 22, 33, 12)

```

```

c      dsdePl | 1111 1122 1133 1112 |
c      dsdePl | 2211 2222 2233 2212 |
c      dsdePl | 3311 3322 3333 3312 |
c      dsdePl | 1211 1222 1233 1212 |
c      plane stress (11, 22, 12)
c      dsdePl | 1111 1122 1112 |
c      dsdePl | 2211 2222 2212 |
c      dsdePl | 1211 1222 1212 |
c      3d beam (11, 13, 12)
c      dsdePl | 1111 1113 1112 |
c      dsdePl | 1311 1313 1312 |
c      dsdePl | 1211 1213 1212 |
c      1d
c      dsdePl | 1111 |
c
c *****
c #include "impcom.inc"
c
c      INTEGER
c      &      matId, elemId,
c      &      kDomIntPt, kLayer, kSectPt,
c      &      ldstep, isubst, keycut,
c      &      nDirect, nShear, ncomp, nStatev, nProp
c      DOUBLE PRECISION
c      &      Time, dTime, Temp, dTemp,
c      &      sedEl, sedPl, epeq, epsZZ
c      DOUBLE PRECISION
c      &      stress (ncomp ), ustatev (nStatev),
c      &      dsdePl (ncomp,ncomp), sigi(ncomp),
c      &      Strain (ncomp ), dStrain (ncomp ),
c      &      epsPl (ncomp ), prop (nProp ),
c      &      coords (3),
c      &      defGrad (3,3), defGrad_t(3,3),
c      &      tsstif (2)
c
c ***** User defined part *****
c -- parameters
c
c      INTEGER      mcomp
c      DOUBLE PRECISION HALF, THIRD, ONE, TWO, SMALL, ONEHALF,
c      &      ZERO, TWOTHIRD, ONEDM02, ONEDM05, sqTiny
c      PARAMETER    (ZERO      = 0.d0,
c      &      HALF      = 0.5d0,
c      &      THIRD     = 1.d0/3.d0,
c      &      ONE      = 1.d0,
c      &      TWO      = 2.d0,
c      &      SMALL    = 1.d-08,
c      &      sqTiny   = 1.d-20,
c      &      ONEDM02  = 1.d-02,
c      &      ONEDM05  = 1.d-05,
c      &      ONEHALF  = 1.5d0,
c      &      TWOTHIRD = 2.0d0/3.0d0,
c      &      mcomp    = 3
c      &      )
c
c --- local variables
c
c      sigElp (dp,ar(6 ),1)      trial stress
c      dsdeEl (dp,ar(6,6),1)    elastic moduli
c      sigDev (dp,ar(6 ),1)    deviatoric stress tensor
c      dfds (dp,ar(6 ),1)      derivative of the yield function
c      JM (dp,ar(6,6),1)       2D matrix for a 4 order tensor
c      pEl (dp,sc ,1)          hydrostatic pressure stress
c      qEl (dp,sc ,1)          von-Mises stress
c      pleq_t (dp,sc ,1)       equivalent plastic strain at beginnig of time
c      increment
c      pleq (dp,sc ,1)         equivalent plastic strain at end of time increment
c      dpleq (dp,sc ,1)       incremental equivalent plastic strain
c      sigy_t (dp,sc ,1)      yield stress at beginnig of time increments

```



```

c      sigy      (dp,sc      ,1)      yield stress at end of time increment
c      young     (dp,sc      ,1)      Young's modulus
c      posn      (dp,sc      ,1)      Poiss's ratio
c      sigy0     (dp,sc      ,1)      initial yield stress
c      dsigdep   (dp,sc      ,1)      plastic slop
c      twoG      (dp,sc      ,1)      two time of shear moduli
c      threeG    (dp,sc      ,1)      three time of shear moduli
c
c --- temporary variables for solution purpose
c      i, j
c      three0v2qEl, one0v3G, qEl0v3G, con1, con2, fratio
c
EXTERNAL      vzero, vmove, get_ElmData
DOUBLE PRECISION sigElp(mcomp), dsdeEl(mcomp,mcomp), G(mcomp),
& sigDev(mcomp), JM      (mcomp,mcomp), dfds(mcomp)
DOUBLE PRECISION var0, var1, var2, var3, var4, var5, var6,
& var7, var8
INTEGER      i, j, k
DOUBLE PRECISION pEl,      qEl,      pleq_t, sigy_t , sigy,
& dpleq, pleq,
& young, posn, sigy0, dsigdep,
& elast1,elast2,
& twoG, threeG, one0v3G, qEl0v3G, three0v2qEl,
& fratio, con1,      con2, dperr(3)

!*****!
! INICIA EDIÇÃO DA USERMAT !
!*****!
!
!VARIÁVEIS LOCAIS - NECESSÁRIAS PARA CÁLCULO DE FLUÊNCIA E RETRAÇÃO DO
!DO CONCRETO
!
! Variaveis de entrada do usuario TADATA: relacionadas aos dados do concreto
!
! fck [kN/cm²] resistencia caracteristica do concreto
! s [adm] coef. que depende do tipo de concreto
! ti [dias] tempo da analise apartir da qual o concreto iniciou
! rh [%] umidade relativa do ambiente
! hf [cm] espessura ficticia
! ts [dias] idade do concreto no inicio da secagem
! t0 [dias] idade do concreto no inicio do carregamento
! tinf [dias] tempo final da análise
! betasc [adm] coeficiente que depende do tipo de cimento
! alpha [adm] efeito do tipo de cimento durante a cura
! ndec [pontos por decada] No. de pontos para discretização
! epsuct [adm] deformação última de tração em geral [2/1000 a 3/1000]
! alphafct [adm] fator do modelo de Tension Stiffening (TS) do concreto em      geral
[0.5 a 0.8]
! ligafluencia 0 - desliga a fluência, 1 - liga fluência
! ligaretracao 0 - desliga a retração, 1 - liga a retração
! ligafissura 0 - desliga a fissuracao, 1 - liga a fissuracao
! ktime [dias] identificacao do dia na saida de dados
! kelemid [un] identificacao do elemento na saida de dados
! kkDomIntPt [un] identificacao do ponto de integracao na saida de dados
!
! Variaveis calculadas no interior da USERMAT
!
! tmat [dias] idade do material durante a análise (time-ti)
! fcm28 [kN/cm²] resistência média do concreto aos 28 dias
! sigalim_CEB90 [kN/cm²] limite de tensão para validade da viscoelasticidade do
concreto
! Ec28 [kN/cm²] módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias
! mkelvin [un] no. máximo de elementos de Kelvin
! ndt [un] No. de pontos para calcular os parâmetros da cadeia de Kelvin
! nkelvin [un] No. de camadas da cadeia de Kelvin (DIAS,2013: N da eq3.3, p44)
! tau [cm²/(kN*dia)] tempos de retardação dos elementos da cadeia de Kelvin
! Emu [kN/cm²] módulos de elasticidade dos elementos da cadeia de Kelvin
! tmeio [dias] idade do material somada meio incremento de tempo (tmat+dtime/2)

```

```

! tmatadj [dias] idade do material durante a análise corrigida com a temperatura
! fi0 [adm] coeficiente de fluência que depende do tempo t0
! V [adm] volume solidificado
! dsdeElinv [cm²/kN] matriz de rigidez inversa
! epsloncf1 [adm] primeira parcela deform. fluência de uma unidade de Kelvin
! epsloncf2 [adm] segunda parcela deform. por fluência de uma unidade de Kelvin
! epsloncf3 [adm] deformação por fluência da unidade i
! deltax [adm] parametro do modelo do Bazant & Prasannan
! lbd [adm] parametro do modelo do Bazant & Prasannan
! stressp(3) [kN/cm²] vetor com as tensoes principais
! saida 0 - nao faz saida de dados, 1 - faz saida de dados
!
! theta [rad] ângulo de rotação das direções principais
! epsct [adm] deformação no pico do modelo Tension Stiffening (TS) do concreto
! betag [adm] coeficiente de correção das tensões cisalhantes
!
! Outras variaveis
!
! iott, wrinqr variaveis que guardam o numero da output window do Ansys
!
! Variaveis de estado
!
! ustatev(1)   primeirarodada   ! 9999 - indica primeira rodada
! ustatev(2)   fcm28
! ustatev(3)   Ec28
! ustatev(4)   nkelvin
! ustatev(5)   t0
! ustatev(6)   tmat
! ustatev(7)   ustatev(411)
! ustatev(8)   ustatev(511)
! ustatev(9)   ustatev(512)
! ustatev(11..) Emu
! ustatev(21..) tau
! ustatev(31..) epsloncsant
! ustatev(41..) epsloncs
! ustatev(51..) deploncs
! ustatev(101..) epsloncfantmu
!   (111..) epsloncfantmu
!   (121..) epsloncfantmu
!   (130..) epsloncfantmu
!   (140..) epsloncfantmu
!   (150..) epsloncfantmu
!   (160..) epsloncfantmu
! ustatev(201..) epsloncfmu
!   (211..) epsloncfmu
!   (221..) epsloncfmu
!   (230..) epsloncfmu
!   (240..) epsloncfmu
!   (250..) epsloncfmu
!   (260..) epsloncfmu
! ustatev(301..) deploncf
! ustatev(411) identifica se fissurou na direção principal 1, 1 se fissurou - para
usermatbm
! ustatev(450) 1 se houve mudança de regime elástico para regime elástico com
amolecimento - para usermatbm
! ustatev(511) identifica se fissurou na direção principal 1, 1 se fissurou - para
usermatps
! ustatev(512) guarda o valor de tensão máxima obtida no ponto de gauss na direção
principal 1 - para usermatps
! ustatev(513) guarda o valor de tdeformação máxima obtida no ponto de gauss na direção
principal 1 - para usermatps
! ustatev(521) identifica se fissurou na direção principal 2, 1 se fissurou - para
usermatps
! ustatev(522) guarda o valor de tensão máxima obtida no ponto de gauss na direção
principal 2 - para usermatps
! ustatev(523) guarda o valor de deformação máxima obtida no ponto de gauss na direção
principal 2 - para usermatps
!
DOUBLE PRECISION fck,s,ti,rh,hf,ts,t0,tinf,betasc,alpha

```

```

DOUBLE PRECISION epsuct,alphafct
INTEGER ndec
INTEGER ligafluencia,ligaretracao,ligafissura
INTEGER kelemId,kkDomIntPt
DOUBLE PRECISION ktime
DOUBLE PRECISION tmat, fcm28, Ec28
INTEGER mkelvin,ndt,nkelvin
PARAMETER (mkelvin=7)
DOUBLE PRECISION tau(mkelvin),EMU(mkelvin),tmeio,tmatadj,fi0,V,
& dsdeElinv(mcomp,mcomp),epsloncf1(mcomp),
& epsloncf2(mcomp),epsloncf3(mcomp),
& deltay(mkelvin),lbd(mkelvin)
EXTERNAL wrinqr
INTEGER iott,wrinqr
DOUBLE PRECISION wr_output
INTEGER saida
DOUBLE PRECISION stressp(3)
DOUBLE PRECISION TEf
DOUBLE PRECISION epsct, theta, betag
DOUBLE PRECISION fcmt,fckt,fct
DOUBLE PRECISION CEB90_fcm
DOUBLE PRECISION CEB90_Ec
DOUBLE PRECISION CEB90_epsloncs
DOUBLE PRECISION CEB90_tadj
DOUBLE PRECISION CEB90_tT
DOUBLE PRECISION CEB90_fi0
!
DOUBLE PRECISION strainp(3),vect(6),ev(3,3),depsz
INTEGER v0(3)
INTEGER nrot
!*****!
! PASS01) Entrada de dados do script !
!*****!
ligafluencia = prop(1)
ligaretracao = prop(2)
ligafissura = prop(3)
ti = prop(4)
ts = prop(5)
t0 = prop(6)
tinf = prop(7)
fck = prop(8)
posn = prop(9)
s = prop(10)
rh = prop(11)
hf = prop(12)
betasc = prop(13)
alpha = prop(14)
ndec = prop(15)
epsuct = prop(16)
alphafct = prop(17)
ktime = prop(18)
kelemid = prop(19)
kkDomIntPt = prop(20)
iott = wrinqr(WR_OUTPUT)
!
!*****!
! PASS02) Preparando arquivo de saida com os valores do vetor ustatev !
!*****!
saida = 0
if (kelemId.EQ.elemId.
& AND.kkDomIntPt.EQ.kDomIntPt.
& AND.ktime.EQ.time) THEN
    saida = 1
endif
!
if (saida.EQ.1) then
    open(1,file='ustatev.txt',access='sequential',
& form="Formatted",status="unknown",

```

```

& position="append")
  write(1,*)'-----'
  write(1,*)'SAIDA DE DADOS DO VETOR USTATEV'
  write(1,*)'-----'
  write(1,*)'ID: time,elemId,kDomIntPt:'
  write(1,*) time,elemId,kDomIntPt
  write(1,*)'ldstep,isubst'
  write(1,*) ldstep,isubst
endif
!
!
!*****!
! PASSO3) Obtendo parametros do modelo de Kelvin !
!*****!
!
! Calcula os parâmetros do modelo de Kelvin apenas uma vez por ponto de integração
if (ustatev(1).NE.9999) then
  !
  ! Calculos iniciais
  fcm28 = CEB90_fcm(fck,28.0d0,20.0d0,s)
  Ec28 = CEB90_Ec(fck,s,28.0d0,20.0d0)
  !
  ! Calculando numero de elementos de Kelvin e o numero de pontos do ajuste
  call KELPAR(t0,tinf,ndec,nkelvin,ndt)
  !
  ! Calculando os tempos de retardação e módulos do ajuste
  call KELVIN_betactt0(nkelvin,t0,tinf,ndec,ndt,
& tau,Emu,temp,rh,hf)
  !
  ! Guardando os parâmetros
  ustatev(2) = fcm28
  ustatev(3) = Ec28
  ustatev(4) = nkelvin
  ustatev(5) = t0
  !
  do i=1,nkelvin
    ustatev(10+i)=Emu(i)
    ustatev(20+i)=tau(i)
  enddo
  ! Definindo variavel que indica o fim da primeira rodada
  ustatev(1) = 9999
  !
else
  ! Recupera os parâmetros
  fcm28 = ustatev(2)
  Ec28 = ustatev(3)
  nkelvin = ustatev(4)
  t0 = ustatev(5)
  do i=1,nkelvin
    Emu(i) = ustatev(10+i)
    tau(i) = ustatev(20+i)
  enddo
endif
!
!*****!
! PASSO4) Calculo da idade do material !
!*****!
!
if (time.GT.ti) then
  tmat = time-ti
else
  tmat = 0.0d0
endif
ustatev(6) = tmat
!
!*****!
! PASSO4.1) se o ponto de gauss estiver fissurado desliga a fluência e !
! retração e zera o Poisson !
!*****!

```

```

!
!
if (ligafissura.EQ.1) then
  if (ustatev(511).eq.1.or.ustatev(521).eq.1) then
    ligafluencia = 0
    ligaretracao = 0
    posn = 0.d0
  endif
endif
!
!*****!
! PASSO5) Calculo do incremento de deformacao por retracao !
!*****!
!
if (time.GE.ti) then
  ! Calcula o coeficiente de retração para o próximo passo de tempo (tmat+dtime)
  do i=1,ndirect
    ustatev(40+i) =
& CEB90_epsloncs(tmat+dtime,ts, fcm28,betasc,rh,hf,temp)
  enddo
  !
  ! Calcula o incremento de deformação por retração (apenas nas três direções
principais)
  do i=1,ndirect
    ustatev(50+i) =
& ustatev(40+i)-ustatev(30+i)
  enddo
endif
!
!*****!
! PASSO6) Calculo do incremento de deformacao por fluencia !
!*****!
!
! Calcula apenas quando a idade da peça atinge a idade em que entra em carga
if (tmat.GT.t0) then
  !
  ! Guardando deformação por fluência do ultimo passo que convergiu
  do i=1,nkelvin
    do j=1,ncomp
      ustatev(100+(i-1)*10+j) = ustatev(200+(i-1)*10+j)
    enddo
  enddo
  !
  ! Calculando o fator do envelhecimento (com a idade da peça em carga (tmat-t0))
  tmatadj = CEB90_tadj(tmat-t0,alpha,temp,tmat)
  tmeio = tmatadj+dtime/2.0d0
  fi0 = CEB90_fi0(tmeio,rh,hf,fcm28,temp)
  V = Ec28/fi0
  !
  ! Inicializando o incremento de deformação por fluência
  do i =1,ncomp
    ustatev(300+i) = 0.0d0
  enddo
  !
  ! Calculo do incremento de deformação por fluência
  do i=1,nkelvin
    !
    ! Calculo da Matriz Dmu
    deltay(i) = dtime/tau(i)
    lbd(i) = (1.0d0-dexp(-deltay(i)))/deltay(i)
    young = (Emu(i)*V)/(lbd(i))
    call MatrizDsh(young,posn,dsdeE1)
    call matinv(3,dsdeE1,dsdeE1inv)
    !
    ! Calculo da primeira parcela da deformação por fluência de uma unidade
    epsloncf1=0.0d0
    do j=1,ncomp

```

```

        do k=1,ncomp
            epsloncf1(j) = epsloncf1(j)+
& dsdeElinv(j,k)*ustatev(400+k)
            enddo
        enddo
        !
        ! Calculo da segunda parcela da deformação por fluência de uma unidade
        do j =1,ncomp
            epsloncf2(j) =
& ustatev(100+(i-1)*10+j)*dexp(-deltay(i))
            enddo
        !
        ! Calculo da deformação por fluência da unidade i
        do j=1,ncomp
            ustatev(200+(i-1)*10+j) =
& epsloncf1(j)+epsloncf2(j)
            enddo
        !
        ! Calculo do incremento de deformação por fluência de todas unidades
        do j =1,ncomp
            ustatev(300+j) =
& ustatev(300+j)+
& ustatev(200+(i-1)*10+j)*(1-dexp(-deltay(i)))
            enddo
        !
        enddo
        !
    Endif
    !
    !*****!
    ! PASS07) Calculo do incremento de deformacao elastica !
    !*****!
    !
    ! calculo do deltax
    deltax = 0.0d0
    do i = 1,nkelvin
        deltax(i) = dtime/tau(i)
    enddo
    !
    ! calculo do lbd
    lbd = 0.0d0
    do i = 1,nkelvin
        lbd(i) = (1.0d0-dexp(-deltax(i)))/deltax(i)
    enddo
    !
    if (ligafluencia.EQ.1) then
        ! calculo do v
        tmatadj = CEB90_tadj(tmat-t0,alpha,temp,tmat)
        tmeio = tmatadj+dtime/2.0d0
        fi0 = CEB90_fi0(tmeio,rh,hf,fc28,temp)
        V = Ec28/fi0
        !
        ! calculo do modulo de Young corrigido
        young = 0.0d0
        do i=1,nkelvin
            young = young + (1.0d0-lbd(i))/(Emu(i)*V)*ligafluencia
        enddo
        young = young + 1.0d0/CEB90_Ec(fck,s,tmeio,temp)
        young = 1.0d0/young
    else
        ! calculo do modulo de Young corrigido
        tmatadj = CEB90_tadj(tmat,alpha,temp,tmat)
        young = CEB90_Ec(fck,s,tmatadj,temp)!21.5E3/10*(fck+0.8)**(1D0/3D0)!
    end if
    !
    ! Calculando a matriz de rigidez elástica

    call MatrizDsh(young,posn,dsdeE1)
    !

```

```

! Descontando o incremento de deformação por fluência e retração do incremento de
deformação
c total (Equação 5.60)
do i=1,ncomp
  dstrain(i) = dstrain(i)
  & -ustatev(300+i)*ligafluencia
  & -ustatev(50+i)*ligaretracao
end do
!
!*****!
! PASS08) Calculo do incremento de tensão !
!*****!
!
sigElp = 0.0d0
do i=1,ncomp
  do j=1,ncomp
    sigElp(i) = sigElp(i)+dsdeEl(i,j)*(dstrain(j))
  end do
end do
!
!*****!
! PASS09) Atualizando a tensão e verificando a fissuração !
!*****!
!
stress = stress + sigElp
!
! Caso a opção liga fissura esteja ativa
if (ligafissura.EQ.1) then
  !
  ! Calculo do fct atualizado com o dia
  fcmt = CEB90_fcm(fck,tmatadj,temp,s)! 3.3D0!
  fckt= fcmt - 0.8d0
  fct = 1.4d0*(0.10d0)*(fckt)**(2.0d0/3.0d0) !Formulação CEB-FIP90
  !
  ! Calculo das tensões principais e direções principais
  vect = 0.d0
  ev = 0.d0
  vect(1) = stress(1); vect(2) = stress(2); vect(4) = stress(3)
  call jacobi(vect,3,3,stressp,ev,nrot)
  call eigprt(stressp,ev,3,3)
  !
  if (ustatev(511).EQ.0.0d0.AND.ustatev(521).EQ.0.0d0) then !Ponto está neutro
    !
    call conc_Tef_Ottosen(stress,fcmt,fct,TEf)
    !
    !Se a tensão principal de compressão normalizada por fcm, for maior que a
tensão principal de tração normalizada por fct, considera-se o concreto como comprimido.
    !
    if((((stressp(1)/fct) .GT. dabs(stressp(2)/fcmt)).AND.
  & ((TEf.GE.fcmt).AND.(stressp(1).GE.fct/2.d0))) then
      ! O ponto está tracionado, trabalha-se elasticamente.A tensão efetiva TEF já
é elástica, basta verificar a fissuração. Para isto, verifica-se se o concreto atingiu a
superfície de ruptura por tração, passando a ser um material ortotrópico, tendo o poisson
nulo.
      !
      !Determina se a fissuração ocorreu em UMA ou DUAS direções
      if((dabs(stressp(1)/stressp(2)).LT.1.10d0).AND.
  & (stressp(2)/fct.GT.0.98d0)) then
          !Rompido em duas direções
          ustatev(511) = 1.0d0
          ustatev(521) = 1.0d0
        else
          ustatev(511) = 1.0d0
        endif
        ustatev(8) = ustatev(511)
        ustatev(9) = ustatev(521)
      endif
    endif
  endif
end if

```

```

!
!Será aplicado o TS dependendo se o ponto fissurou em uma ou duas direções
if (ustatev(511).eq.1.0d0) then
  stress = stress - sigElp
  !Ponto está fissurado em UMA ou DUAS direções
  vect = 0.d0
  ev = 0.d0
  vect(1) = stress(1); vect(2) = stress(2);
  vect(4) = stress(3)
  call jacobi(vect,3,3,stressp,ev,nrot)
  call eigsrt(stressp,ev,3,3)
  !
  epsZZ = -posn/young*(stress(1) + stress(2))
  depszZ = -posn/young*(sigElp(1) + sigElp(2))
  !
  call EPT_rotacao(stress,ev,1.0d0,0.0d0)
  call EPT_rotacao(strain,ev,2.0d0,epszz)
  call EPT_rotacao(dstrain,ev,2.0d0,depszZ)
  !
  if (ustatev(521).eq.0.0d0) then
    if ((stress(2)+dsdeEl(2,2)*dstrain(2)).GT.
& (0.99d0*fct).AND.(dabs(stress(1)/stress(2)).LT.1.10d0)) then
      ustatev(521) = 1.0d0
    endif
  endif
  !
  !Calcula deformação onde ocorre a fissura
  epsct = fct/young
  !
  call EPT_TensionStiffening(stress(1),strain(1),
&                               dstrain(1),young,epsuct,alphafct,
&                               epsct,fct,
&                               ustatev(512),ustatev(513))

  if (ustatev(521).eq.1.0d0) then
    call EPT_TensionStiffening(stress(2),strain(2),
&                               dstrain(2),young,epsuct,alphafct,
&                               epsct,fct,
&                               ustatev(522),ustatev(523))
  endif
  !
  if (ustatev(511).GE.1.0d0.AND.ustatev(521).GE.1.0d0) then
    betag= MAX(dstrain(1) + strain(1),
&             dstrain(2) + strain(2))
  else
    betag= (dstrain(1) + strain(1))
  endif
  if(betag.LT.0.d0) betag = 0.01d0
  ! Calcula de fato BetaG
  betag = 1.d0 - (betag/0.005d0)**0.3d0
  !IEstabele limites
  if(betag .LT. 0.000001d0) betag = 0.000001d0
  if(betag .GT. 1.0d0) betag = 1.0d0
  !
  call EPT_rotacaoinv(stress,ev,1.0d0)
  call EPT_rotacaoinv(strain,ev,2.0d0)
  call EPT_rotacaoinv(dstrain,ev,2.0d0)
  !
  dsdePl(3,3) = betag*dsdeEl(3,3)
endif
endif
!
!*****!
!PASS010) Atualizando a matriz Jacobiana !
!*****!
!
do i=1,ncomp
  do j=1,ncomp
    dsdePl(j,i) = dsdeEl(j,i)
  
```



```

        end do
    end do
    tsstif(1) = dsdePl(3,3)
    tsstif(2) = dsdePl(3,3)
    !
    !*****!
    ! PASSO11) Guardando a tensão incremento de tensão e deformação retração !
    !*****!
    !
    do i=1,ncomp
        ustatev(400+i) = sigElp(i)
    enddo
    !
    do i=1,ncomp
        ustatev(30+i) = ustatev(40+i)
    enddo
    !
    !*****!
    ! PASSO12) Escrevendo o vetor ustatev na saída de dados !
    !*****!
    if (saida.EQ.1) then
        do i=1,nStatev
            write(1,*)i, ustatev(i)
        enddo
        close(1,STATUS='KEEP')
    endif
    !
    return
End
!
!*****!
! SUBRTORINAS REFERENTES A FISSURAÇÃO !
!*****!
!
Subroutine BM_TensionStiffening(stress,dstrain,
&                                epsuct,alphafct,
&                                epsct,fct,pico)
!*****!
! ** Função: BM_TensionStiffening **!
! ** **!
! ** Objetivo: atualizar as tensões, matriz constitutiva e regime de **!
! ** fissuração do ponto de Gauss **!
! ** **!
! ** Situação: (13-02-2020) **!
! ** **!
!*****!
DOUBLE PRECISION stress      ! tensão
DOUBLE PRECISION dstrain     ! incremento de deformação
DOUBLE PRECISION epsuct      ! deformação última de tração em geral [2/1000 a 3/1000]
DOUBLE PRECISION alphafct    ! fator do modelo de Tension Stiffening
DOUBLE PRECISION epsct      ! deformação a partir da qual ocorre a fissuração
DOUBLE PRECISION fct         ! resistencia caracteristica a tração do concreto
DOUBLE PRECISION pico        ! ponto que marca a mudança de regime elástico para elástico
com amolecimento
DOUBLE PRECISION sigmact1    ! tensão no pico, quando começa o regime de amolecimento
DOUBLE PRECISION dsdeEl     ! inclinação do padrão de amolecimento
!
sigmact1 = 0.0d0
if(pico.EQ.0.0d0)then
    sigmact1 = alphafct*fct*(1.0d0-epsct/epsuct) !fórmula do tension para deformação
de pico
    stress = stress-(fct-sigmact1)!queda
    pico = 1.0d0
else
    sigmact1 = alphafct*fct*(1.0d0-epsct/epsuct)
    dsdeEl=-(alphafct*fct/epsuct) !inclinação (fica cada vez mais negativa, segundo o
avanço do fct)
    stress = stress+dsdeEl*dstrain

```

```

end if
  if(stress.LE.0.0d0)then
    stress = 0.01d0*fct
  endif
  if(stress.GE.sigmac1)then
    stress = sigmac1
  endif
!
end subroutine BM_TensionStiffening
!
Subroutine EPT_TensionStiffening(stress, strain, dstrain,
&                                young, epsuct, alphafct,
&                                epsct, fct,
&                                stressmax, strainmax)
!*****!
! ** Função: EPT_TensionStiffening **!
! ** **!
! ** Objetivo: atualizar as tensões, matriz constitutiva e regime de **!
! ** fissuração do ponto de Gauss **!
! ** **!
! ** Situação: (11-02-2020) **!
! ** **!
!*****!
DOUBLE PRECISION stress      ! tensão
DOUBLE PRECISION strain      ! deformação
DOUBLE PRECISION dstrain     ! incremento de deformação
DOUBLE PRECISION young       ! componente da matriz constitutiva
DOUBLE PRECISION epsuct      ! deformação última de tração em geral [2/1000 a 3/1000]
DOUBLE PRECISION alphafct    ! fator do modelo de Tension Stiffening
DOUBLE PRECISION epsct      ! deformação a partir da qual ocorre a fissuração
DOUBLE PRECISION fct         ! resistencia caracteristica a tração do concreto
DOUBLE PRECISION stressmax, strainmax
DOUBLE PRECISION strain_trial, Etan, Etan2
!
strain_trial = strain + dstrain
!
IF(strainmax.GE.epsuct)THEN
  stress = 0.01d0*fct
ELSEIF(strain_trial.GE.epsuct)THEN
  stress = 0.01d0*fct
ELSEIF(strain_trial.LE.0.0d0)THEN
ELSEIF(strain_trial.GE.strainmax)THEN
  Etan = -alphafct*fct/epsuct
  Etan2 = -2.0d0*young
  stress = MAX(stressmax+Etan2*(strain_trial-strainmax),
&              alphafct*fct*(1.0d0-strain_trial/epsuct))
  IF(stress.LE.0.0d0)stress = 0.01d0*fct
ELSEIF(strain_trial.LT.strainmax)THEN
  Etan = stressmax/strainmax
  stress = stress + Etan*dstrain
ENDIF
!
end subroutine EPT_TensionStiffening
!
! SUBROUTINE conc_TEf_Ottosen(stress, fcm, fct, TEf)
!*****!
! ** Função: conc_TEf_Ottosen **!
! ** **!
! ** Objetivo: Encontra a tensão efetiva pelo critério de plastificação **!
! ** de Ottosen **!
! ** **!
! ** Situação: (11-02-2020) **!
! ** **!
!*****!
C
C      Parametros:
C      TEf          (dp,  sc,  out) - Tensão efetiva pela superfície
C      stress
C      fct

```

```

c      fcm
c      DOUBLE PRECISION  TEf,fct, fcm, stress(3)
c
c      Variáveis internas:
c      Pi                (dp, sc)    - 3,14
c      C1, C2, lambda    (dp, sc)    - Variáveis da sup. dependentes das tensões
c      c3theta          (dp, sc)    - Cosseno de 3theta
c      Invars           (dp, 4x1)    - Resultado da rotina EPT_Invars -> I1, J2, J3, theta
c      DOUBLE PRECISION Pi, C1, C2, lambda, c3theta, Invars(4)
c
c      Bagunça para armazenar localmente vars dos vetores
c      I1, J2, J3       (dp, sc)    - Armazena invariantes nas var locais
c      alphaOtt, betaOtt, lambdaCOtt, lambdaTOtt (dp, sc) - Props de Ottosen
c      DOUBLE PRECISION alphaOtt, betaOtt, lambdaCOtt,
&      lambdaTOtt, I1, J2, J3, theta
c
c      call EPT_Invars(stress, Invars)
c
c      Constantes locais
c      Pi = 4.d0*DATAN(1.d0)
c
c      Copia Invariantes para variáveis locais para facilitar entendimento
c      I1 = Invars(1)
c      J2 = Invars(2)
c      J3 = Invars(3)
c      theta = Invars(4)
c      c3theta = DCOS(3*theta)
c
c      Importa props de Ottosen
c      CALL conc_parOttosen(fcm, fct, alphaOtt, betaOtt, lambdaCOtt,
&      lambdaTOtt)
c
c      Determina C1 e C2
c      IF(lambdaCOtt/lambdaTOtt .LE. 0.5d0) THEN
c          C1 = (2.d0*DCOS(theta)-1.d0)*lambdaTOtt
c          C1 = C1 + 4.d0*lambdaCOtt*(1.d0-DCOS(theta))
c          C2 = 1.d0
c      ELSE
c          C2 = 2.d0*lambdaCOtt/lambdaTOtt - 1.d0
c          C2 = 3.d0*DATAN(C2/DSQRT(3.d0))
c          C1 = lambdaCOtt/DCOS(Pi/3.d0-1.d0/3.d0*C2)
c          C2 = DCOS(C2)
c      END IF
c
c      Determina lambda
c      lambda = C1*DCOS(DACOS(C2*c3theta)/3.d0)
c
c      Tensão efetiva
c      TEf = lambda*DSQRT(J2)+betaOtt*I1
c      TEf = TEf**2.d0 + 4.d0*alphaOtt*J2
c      TEf = DSQRT(TEf) + lambda*DSQRT(J2) + betaOtt*I1
c      TEf = TEf/2.d0
c
c      END SUBROUTINE conc_TEf_Ottosen
c      !
c      ! SUBROUTINE EPT_Invars(stress, Invars)
c      ! *****
c      ! ** Função: EPT_Invars **
c      ! ** **
c      ! ** Objetivo: Encontra os invariantes de tensão e o ângulo theta **
c      ! ** de Ottosen **
c      ! ** **
c      ! ** Situação: (11-02-2020) **
c      ! ** **
c      ! *****
c
c      Parametros:
c      stress      (dp, 3x1, in) - Estado de tensões
c      Invars      (dp, 4x1, out) - Alguns invariantes (uteis) + ang.theta

```

```

c      Sendo #1=I1, #2=J2, #3=J3, #4=theta
DOUBLE PRECISION stress(3), Invars(4), p

c      Primeiro invariante de tensões principais I1
Invars(1) = stress(1) + stress(2)

c      Segundo invariante de tensoes desviadoras J2
Invars(2) = (stress(1) - stress(2))**2.d0
Invars(2) = Invars(2) + ( stress(2))**2.d0
Invars(2) = Invars(2) + (-stress(1))**2.d0
Invars(2) = 1.d0/6.d0*Invars(2)
Invars(2) = Invars(2) + (stress(3))**2.d0

c      Terceiro Invariante de Tensões desviadoras J3
p = Invars(1)/3.d0
Invars(3) = (stress(1)-p)*(stress(2)-p)*(-p)
Invars(3) = Invars(3) + p*(stress(3))**2.d0

c      Não é invariante, mas é útil
c      cos(3theta)
IF(Invars(2) .NE. 0.d0) THEN
    Invars(4) = 1.5d0*DSQRT(3.d0)*Invars(3)/(Invars(2)**1.5d0)
    IF(Invars(4) .LT. -1.d0) Invars(4) = -1.d0
    IF(Invars(4) .GT. 1.d0) Invars(4) = 1.d0
c      theta = 1/3*acos(cos(3theta))
    Invars(4) = 1.d0/3.d0*DACOS(Invars(4))
ELSE
    Invars(4) = 0.d0
END IF

END SUBROUTINE EPT_Invars
!
! SUBROUTINE conc_parOttosen(fcm, fct, alphaOtt, betaOtt,
&      lambdaCOtt,lambdaTOtt)
!*****
!** Função: conc_parOttosen **
!** **
!** Objetivo: Determina os parametros da superfície de Ottosen conforme **
!**          MC2010 da fib em função das props do concreto **
!** **
!** Situação: (11-02-2020) **
!** **
!*****
c      Parametros da superfície de Ottosen
c
c      Parametros:
c      fcm          (dp, sc, in) - resistencia média a compressão
c      fct          (dp, sc, in) - resistencia média a tração
c      #1=alphaOtt, #2=betaOtt, #3=lambdaCOtt, #4=lambdaTOtt
DOUBLE PRECISION fcm, fct,alphaOtt,betaOtt, lambdaCOtt,
&      lambdaTOtt

c      Variáveis internas:
c      pelo MC2010:
c      f2c, fc2cm, Scom, Tcom, hOtt, kOtt, xOtt,
c      yOtt
DOUBLE PRECISION f2c, fc2cm, Scom, Tcom, hOtt, kOtt, xOtt,
&      yOtt

c      Conforme MC2010
Scom = -24.0D0
Tcom = (18.5D0 - 18.D0*fcm/10.D0 + 26.D0*(fcm/10.D0)**2.D0
&      - 8.4D0*(fcm/10.D0)**3.D0)

fc2cm = (1.2D0-fcm/100.D0)*fcm
f2c = fc2cm/fcm

kOtt = fct/fcm

```

```

xOtt = Scom/fcm
yOtt = Tcom/fcm

hOtt = -(DSQRT(2.0D0)*xOtt + yOtt)/(yOtt/(DSQRT(2.0D0))
& - 1.0D0/3.0D0)

betaOtt = (DSQRT(2.0D0) - (3.0D0*yOtt/(kOtt*f2c)))/
& (hOtt - 9.0D0*yOtt/(f2c-kOtt))

alphaOtt = (hOtt*betaOtt - DSQRT(2.0D0))/yOtt

lambdaCOtt = (1.0D0 - hOtt/(3.0D0*yOtt))*DSQRT(3.0D0)*betaOtt+
& DSQRT(3.0D0) + DSQRT(2.0D0)/(DSQRT(3.0D0)*yOtt)

lambdaTOtt = (2.0D0*DSQRT(3.0D0)
& - f2c*hOtt/(DSQRT(3.0D0)*yOtt))*betaOtt
& + DSQRT(3.0D0)/f2c +
& DSQRT(2.0D0)*f2c/(DSQRT(3.0D0)*yOtt)

END SUBROUTINE conc_parOttosen
!
! subroutine jacobi(vect,n,np,d,v,nrot)
!*****
!** Subrotina: jacobi **!
!** **!
!** Objetivo: encontra os autovalores e autovetores de uma matriz Anxn **!
!** simétrica Anxn através do método de Jacobi **!
!** **!
!** Referencia: PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T.; FLANNERY **!
!** B.P. Numerical Recipes in Fortran 77. 2ed. V1. 1997. **!
!** **!
!** Situação: (08-01-2017) OK **!
!** **!
!*****
!
INTEGER n ! tamanho da matriz
INTEGER np ! tamanho do array que armazena a matriz
INTEGER nrot ! numero de rotações
INTEGER nmax ! tamanho máximo da matriz
PARAMETER (nmax = 500) ! define tamanho máximo 500
DOUBLE PRECISION vect(6) ! vetor com as componentes de tensao
DOUBLE PRECISION a(np,np) ! matriz
DOUBLE PRECISION d(np) ! vetor contendo os autovalores da
matriz a
DOUBLE PRECISION v(np,np) ! matriz contendo os autovetores da
matriz a
INTEGER i,ip,iq,j ! contadores
DOUBLE PRECISION c,g,h,s,sm,t,tau,theta,tresh ! auxiliares
DOUBLE PRECISION b(nmax),z(nmax) ! vetores auxiliares
!
! montando a matriz
a(1,1) = vect(1)
a(2,2) = vect(2)
a(3,3) = vect(3)
a(1,2) = vect(4)
a(1,3) = vect(5)
a(2,3) = vect(6)
a(2,1) = a(1,2)
a(3,1) = a(1,3)
a(3,2) = a(2,3)
!
! Inicializando para a matriz identidade
do ip=1,n
do iq=1,n
v(ip,iq)=0d0
enddo
v(ip,ip)=1
enddo

```

```

!
! Inicializando b e d para a diagonal de a
do ip=1,n
  b(ip)=a(ip,ip)
  d(ip)=b(ip)
  z(ip)=0d0
enddo
!
nrot=0
!
do i=1,50
  !
  ! Soma dos elementos fora da diagonal
  sm=0
  do ip=1,n-1
    do iq=ip+1,n
      sm=sm+abs(a(ip,iq))
    enddo
  enddo
  !
  if (sm.eq.0d0) then
    return
  endif
  !
  if (i.LT.4) then
    tresh = 0.2*sm/n**2
  else
    tresh=0d0
  endif
  !
  do ip=1,n-1
    do iq=ip+1,n
      g=100d0*abs(a(ip,iq))
      !
      ! Após quatro varreduras, pula a rotação se o elemento fora da diagonal é
      pequeno
      if((i.GT.4).AND.(abs(d(ip))+g.EQ.abs(d(ip))
      & .AND.(abs(d(iq))+g.EQ.abs(d(iq)))) then
        a(ip,iq)=0d0
      else if(abs(a(ip,iq)).GT.tresh) then
        h=d(iq)-d(ip)
        if (abs(h)+g.eq.abs(h)) then
          t=a(ip,iq)/h
        else
          theta=0.5*h/a(ip,iq)
          t=1d0/(abs(theta)+sqrt(1d0+theta**2))
          if (theta.LT.0d0) t=-t
        endif
        c=1d0/sqrt(1+t**2)
        s=t*c
        tau=s/(1d0+c)
        h=t*a(ip,iq)
        z(ip)=z(ip)-h
        z(iq)=z(iq)+h
        d(ip)=d(ip)-h
        d(iq)=d(iq)+h
        a(ip,iq)=0d0
        do j=1,ip-1
          g=a(j,ip)
          h=a(j,iq)
          a(j,ip)=g-s*(h+g*tau)
          a(j,iq)=h+s*(g-h*tau)
        enddo
        do j=ip+1,iq-1
          g=a(ip,j)
          h=a(j,iq)
          a(ip,j)=g-s*(h+g*tau)
          a(j,iq)=h+s*(g-h*tau)
        enddo
      endif
    enddo
  enddo
enddo

```

```

do j=iq+1,n
  g=a(ip,j)
  h=a(iq,j)
  a(ip,j)=g-s*(h+g*tau)
  a(iq,j)=h+s*(g-h*tau)
enddo
do j=1,n
  g=v(j,ip)
  h=v(j,iq)
  v(j,ip)=g-s*(h+g*tau)
  v(j,iq)=h+s*(g-h*tau)
enddo
nrot=nrot+1
endif
enddo
do ip=1,n
  b(ip)=b(ip)+z(ip)
  d(ip)=b(ip)
  z(ip)=theta
enddo
enddo
!pause
return
!
end subroutine jacobi
!
! subroutine EPT_rotacao(vect,R,c,epszz)
!*****
!** Subrotina: EPT_rotacao **
!** **
!** Objetivo: realiza a rotaçao de um tensor em um outro sistema dado **
!** **
!** **
!** Situaçao: (11-02-2020) OK **
!** **
!*****
DOUBLE PRECISION vect(3) ! vetor com as tensoes/deformaçoes ser rotacionado
DOUBLE PRECISION R(3,3) ! matriz de rotaçao
DOUBLE PRECISION a(3,3) ! tensor das tensoes
DOUBLE PRECISION c ! constante da notaçao de Voight, se for deformaçao c =
2.0d0, se for tensao c = 1.0d0
DOUBLE PRECISION epszz ! se for tensao epszz = 0
!
! montando a matriz
a = 0.d0
a(1,1) = vect(1)
a(2,2) = vect(2)
a(1,2) = vect(3)*1.0d0/c
a(2,1) = a(1,2)
a(3,3) = epszz
!
! fazendo a rotaçao
a = matmul((transpose(R)),matmul(a,R))
!
! retornando a notaçao de voigt
vect(1) = a(1,1)
vect(2) = a(2,2)
vect(3) = a(3,3)
!
end subroutine EPT_rotacao
!
! subroutine EPT_rotacaoinv(vect,R,c)
!*****
!** Subrotina: EPT_rotacaoinv **
!** **
!** Objetivo: realiza a rotaçao de um tensor em um outro sistema dado **
!** **
!*****

```

```

! **                                     **!
! ** Situação: (11-02-2020) OK          **!
! **                                     **!
! ****                                     ****!
DOUBLE PRECISION vect(3)      ! vetor com as tensões retornadas pela rotação
DOUBLE PRECISION R(3,3),Rt(3,3),Rtinv(3,3),Rinv(3,3)    ! matrizes de rotação
DOUBLE PRECISION a(3,3)      ! tensor das tensões
DOUBLE PRECISION c           ! constante da notação de Voight, se for deformação c =
2.0d0, se for tensão c = 1.0d0
DOUBLE PRECISION deta       ! determinante da inversão
!
! montando a matriz
a = 0.d0
a(1,1) = vect(1)
a(2,2) = vect(2)
a(3,3) = vect(3)
!
Rt = transpose(R)
call matinv_kramer(Rt,Rtinv,deta)
call matinv_kramer(R,Rinv,deta)
!
! fazendo a rotação
a = matmul(Rtinv,matmul(a,Rinv))
!
! retornando a notação de voigt
vect(1) = a(1,1)
vect(2) = a(2,2)
vect(3) = a(1,2)*c
!
end subroutine EPT_rotacaoinv
!
! subroutine matinv_kramer(a,ainv,deta)
! ****                                     ****!
! ** Subrotina: matinv_kramer             **!
! **                                     **!
! ** Objetivo: inverte uma matriz pela técnica de Kramer          **!
! ** http://pi.math.cornell.edu/~andreim/Lec17.pdf **!
! **                                     **!
! ** Situação: (01-02-2020) OK          **!
! **                                     **!
! ****                                     ****!
DOUBLE PRECISION a(3,3)
DOUBLE PRECISION ainv(3,3)
DOUBLE PRECISION deta

ainv(1,1) = a(2,2)*a(3,3)-a(2,3)*a(3,2)
ainv(1,2) = -(a(2,1)*a(3,3)-a(2,3)*a(3,1))
ainv(1,3) = a(2,1)*a(3,2)-a(2,2)*a(3,1)

deta= 0.0d0
do i=1,3
    deta = deta + a(1,i)*ainv(1,i)
enddo

ainv(2,1) = -(a(1,2)*a(3,3)-a(1,3)*a(3,2))
ainv(2,2) = a(1,1)*a(3,3)-a(1,3)*a(3,1)
ainv(2,3) = -(a(1,1)*a(3,2)-a(1,2)*a(3,1))

ainv(3,1) = a(1,2)*a(2,3)-a(1,3)*a(2,2)
ainv(3,2) = -(a(1,1)*a(2,3)-a(1,3)*a(2,1))
ainv(3,3) = a(1,1)*a(2,2)-a(1,2)*a(2,1)

ainv = 1/(deta)*transpose(ainv)

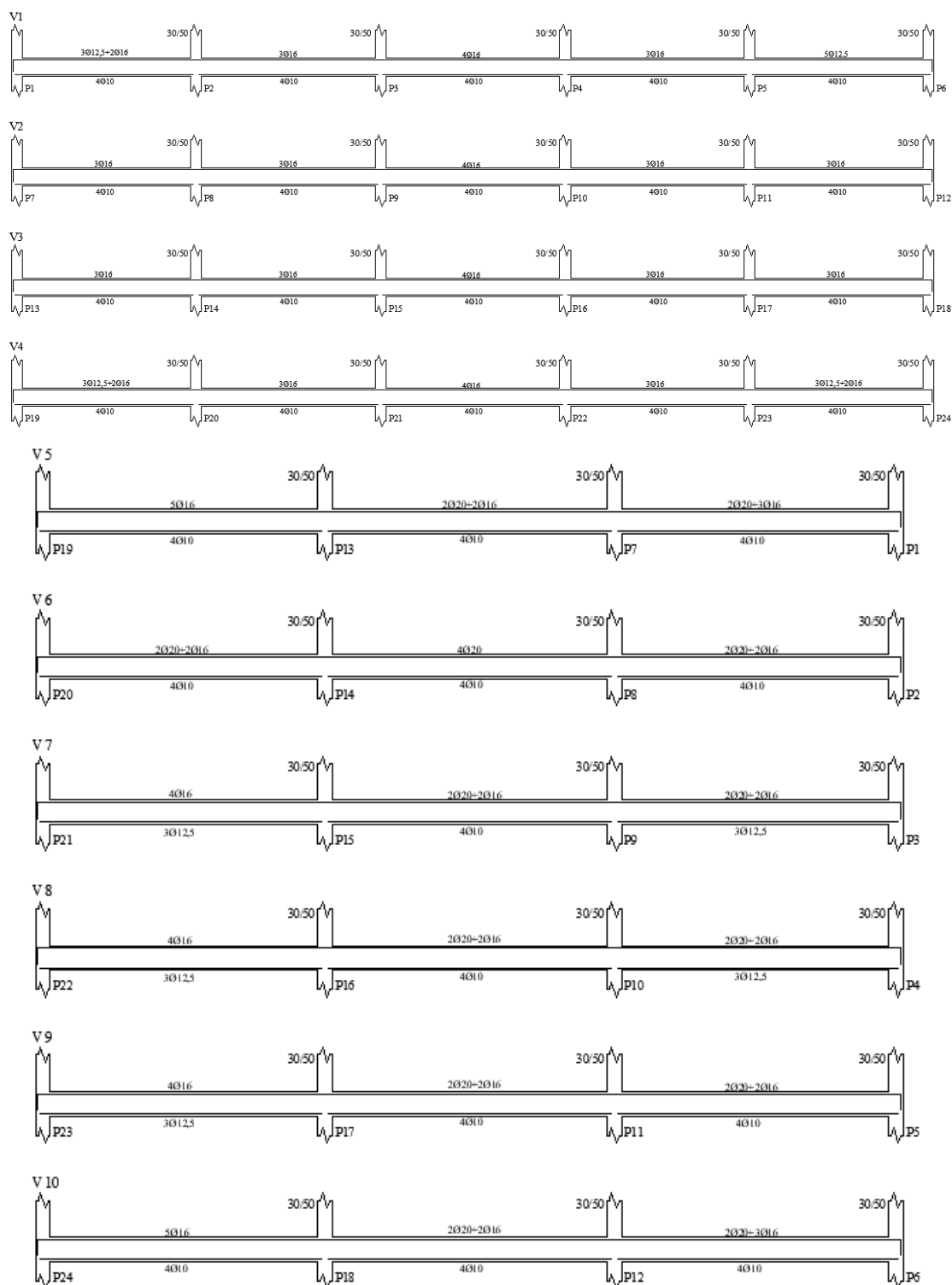
end subroutine matinv_kramer

```

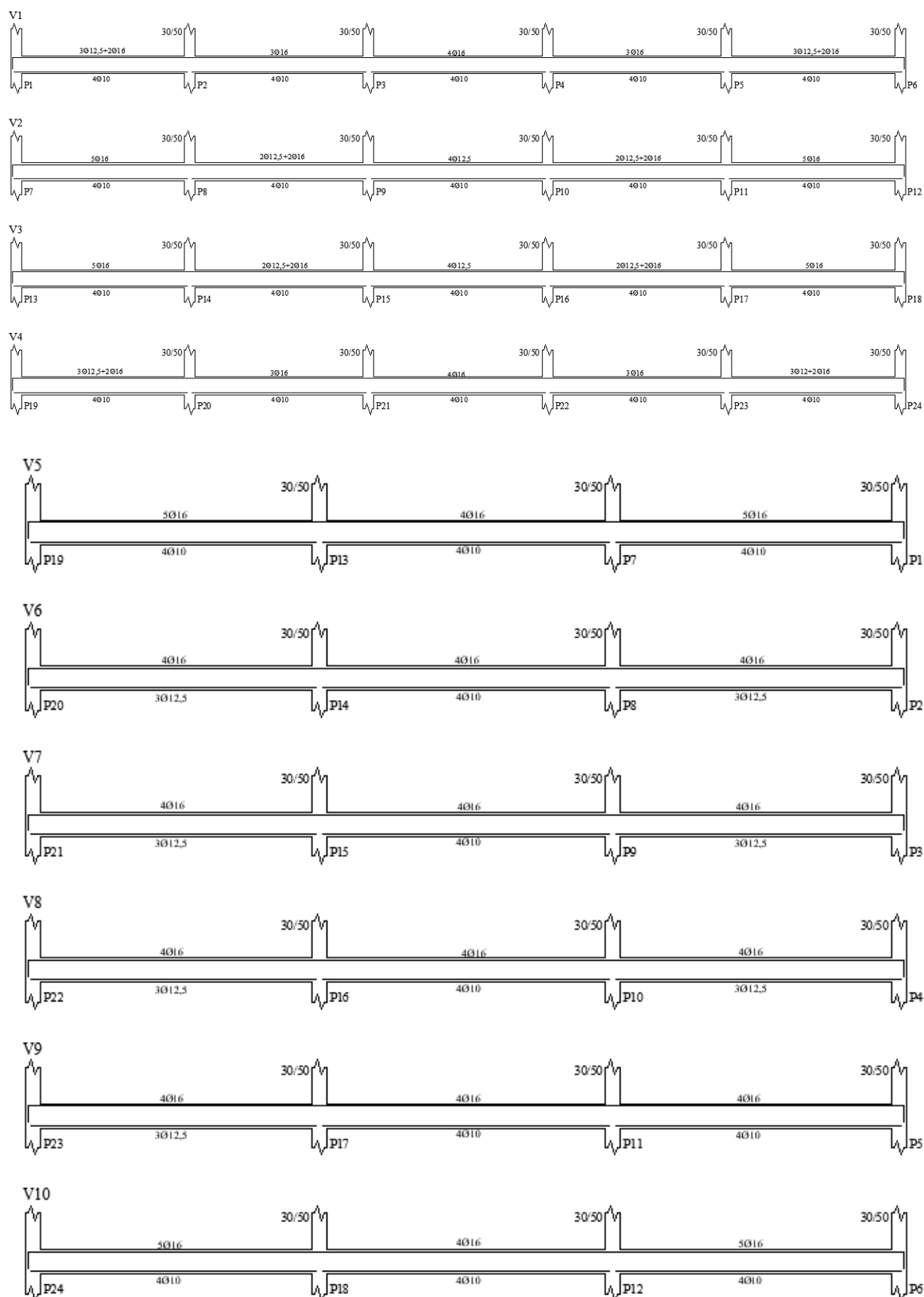

APÊNDICE B

Neste apêndice constam as armaduras extraídas via TQS e inseridas no pórtico modelado.

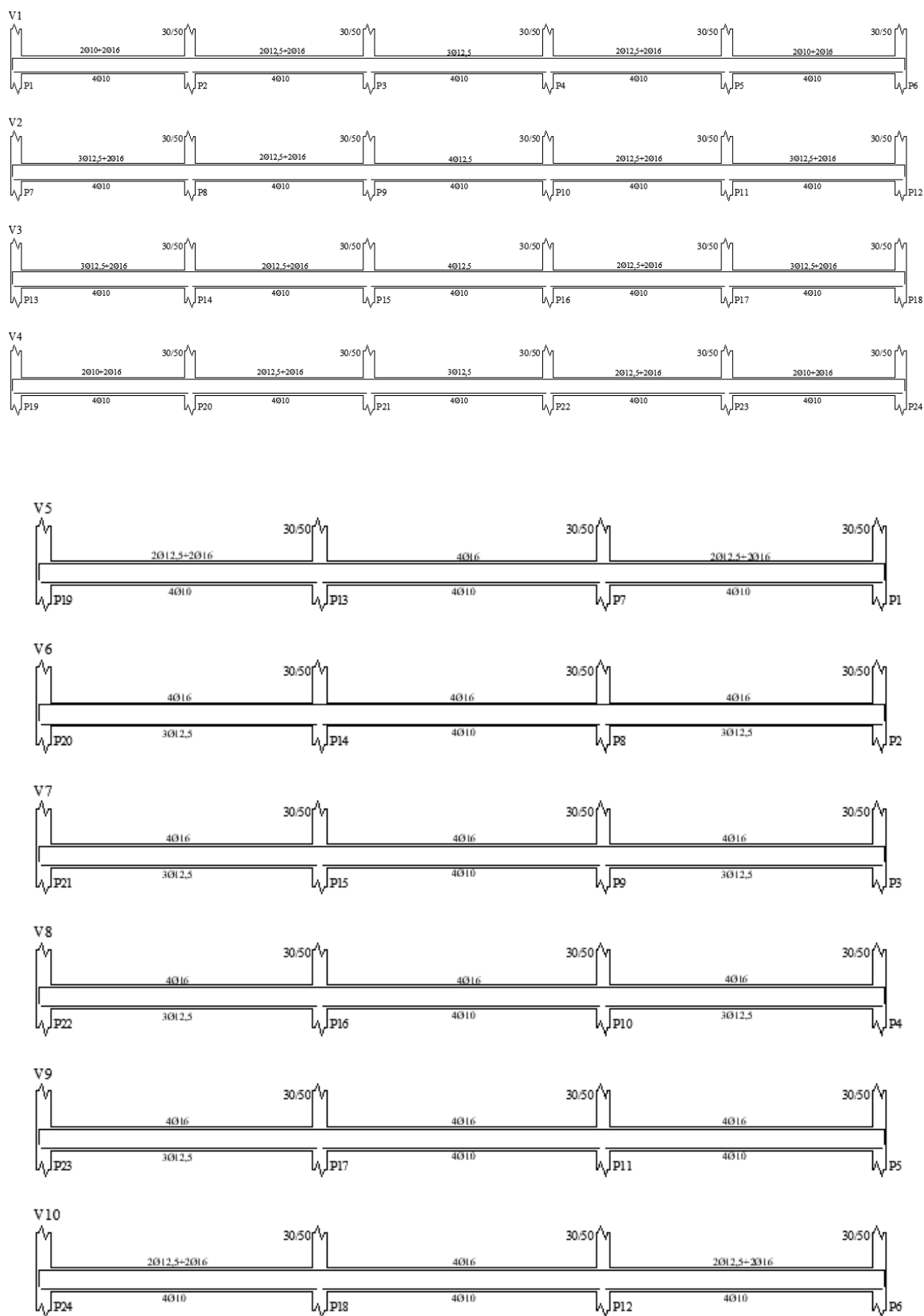
VIGAS DO PRIMEIRO PAVIMENTO



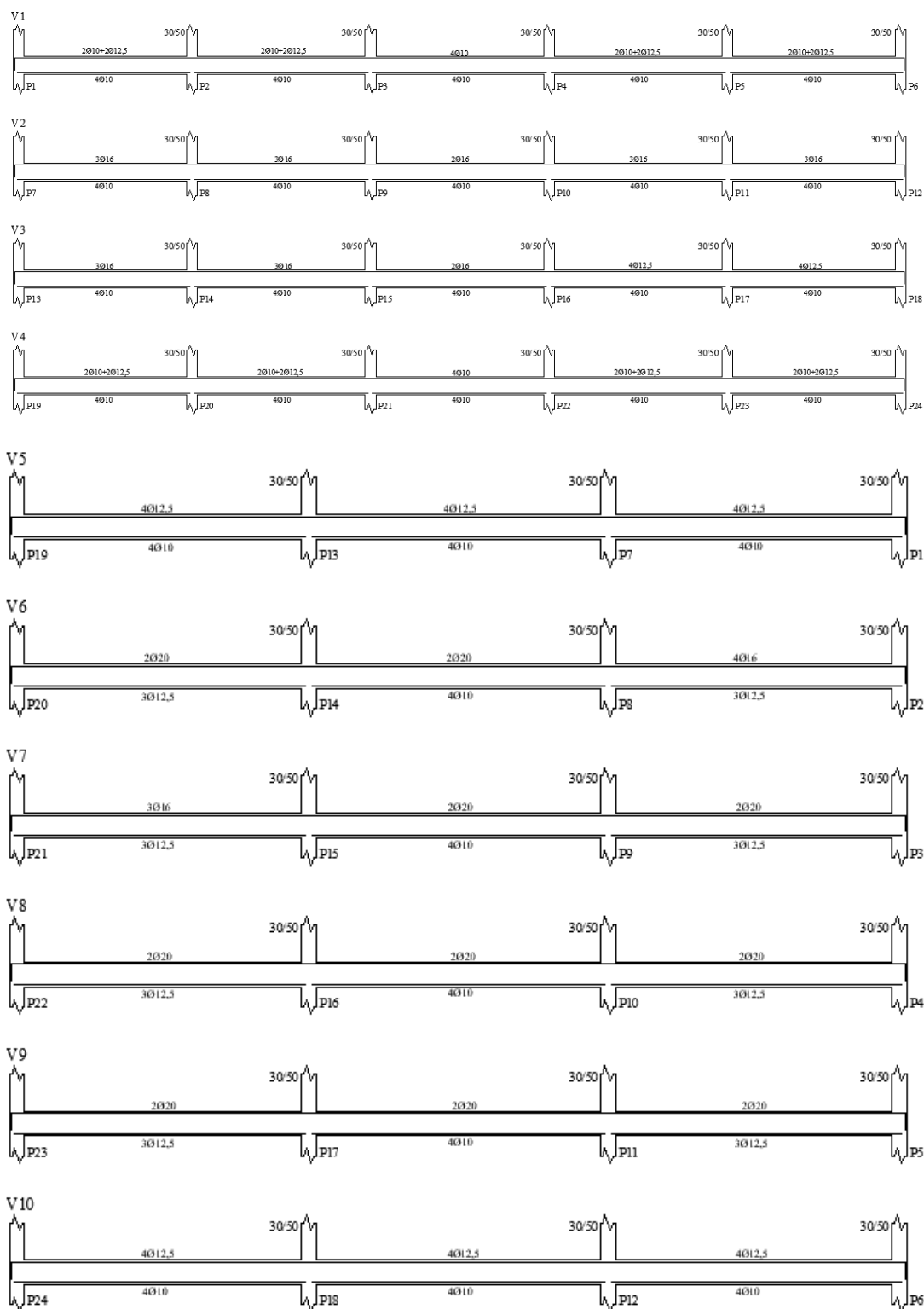
SEGUNDO PAVIMENTO



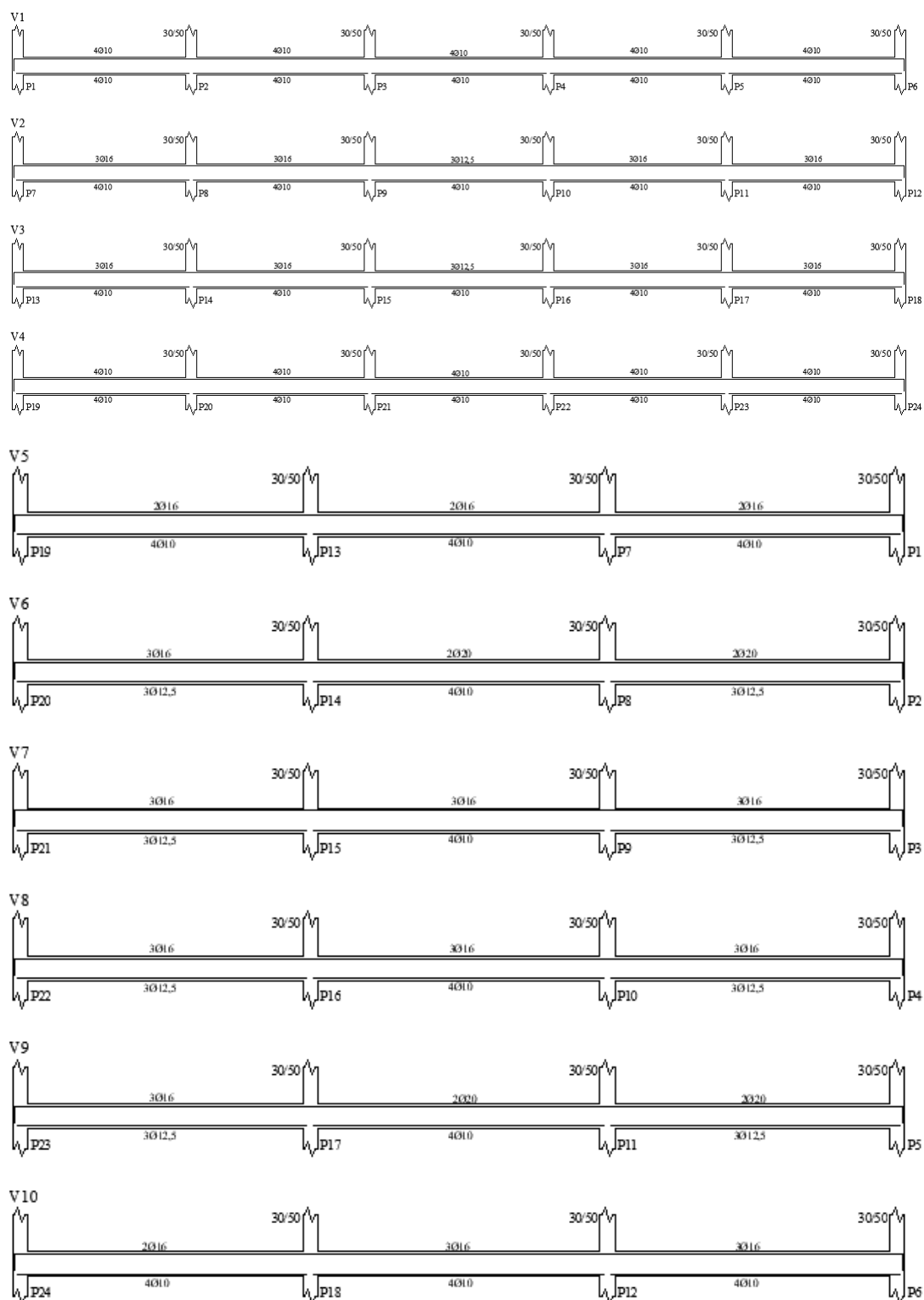
TERCEIRO PAVIMENTO



QUARTO PAVIMENTO



QUINTO PAVIMENTO



TODOS OS PAVIMENTOS - ARMADURA NEGATIVA PRINCIPAL-LAJE

$\frac{2806,3}{100}$	$\frac{5306,3}{300}$	$\frac{5306,3}{300}$	$\frac{5306,3}{300}$	$\frac{4706,3}{300}$	$\frac{2806,3}{100}$
$\frac{3106,3}{100}$	$\frac{4106,3}{300}$	$\frac{4606,3}{300}$	$\frac{4606,3}{300}$	$\frac{4106,3}{300}$	$\frac{3106,3}{100}$
$\frac{3106,3}{100}$	$\frac{4806,3}{300}$	$\frac{4506,3}{300}$	$\frac{4506,3}{300}$	$\frac{5306,3}{300}$	$\frac{2806,3}{100}$

TODOS OS PAVIMENTOS - ARMADURA POSITIVA PRINCIPAL- LAJE

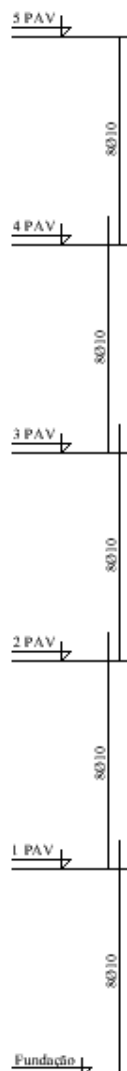
$\frac{4506,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3706,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3706,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3706,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{4506,3}{\rightarrow 525}$
$\frac{3806,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3806,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3806,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3806,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3806,3}{\rightarrow 525}$
$\frac{4506,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3706,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3706,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{3706,3}{\rightarrow 525}$	$\frac{4506,3}{\rightarrow 525}$

TODOS OS PAVIMENTOS - ARMADURA NEGATIVA SECUNDÁRIA - LAJE

3206,3 100	3108 300	3308 300	3206,3 100
3206,3 100	3108 300	4406,3 300	3206,3 100
3206,3 100	4306,3 300	4606,3 300	3206,3 100
3206,3 100	4306,3 300	4606,3 300	3206,3 100
3106,3 100	3808 300	3708 300	3106,3 100

TODOS OS PAVIMENTOS - ARMADURA POSITIVA SECUNDARIA - LAJE

3106,3 625	↓	3106,3 625	↓	3106,3 625	↓
3206,3 625	↓	3206,3 625	↓	3206,3 625	↓
3206,3 625	↓	3206,3 625	↓	3206,3 625	↓
3206,3 625	↓	3206,3 625	↓	3206,3 625	↓
3106,3 625	↓	3106,3 625	↓	3106,3 625	↓

TODOS OS PILARES
LANÇE 1 - 5

APÊNDICE C

Neste Apêndice encontra-se o *script* do edifício modelado.

```

!*****!
!EDIFÍCIO DE 5 PAVIMENTOS - ANÁLISE GLOBAL
!PROGRAMADOR: BÁRBARA CHAGAS
!UNIDADES: kN,cm,dias
!ÚLTIMA REVISÃO: 06/03/2020 - EM ANDAMENTO
!*****!
!
!-----!
!***_                1. DEFINIÇÕES INICIAIS                _***!
!-----!
!
FINISH                ! Termina qualquer processo aberto anteriormente
/CLEAR,NOSTART        ! Limpa o modelo
!
/UDOC,1,DATE,0,       !Tira do display a data e o logo do ANSYS
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15
/SHRINK,0.0
/ESHAPE,1.0
! KEYW,PR_SET,1        !Configura o tipo de análise
KEYW,PR_STRUC,1
/GO
!
/VIEW,1,1,1,1        !Organiza a visualização
/ANG,1
/REP,FAST
/ANG,1,-120,ZS,1
/REP,FAST
!
!-----!
!***_                2. PARÂMETROS DE ENTRADA                _***!
!-----!
!
!-----!
!***_                2.1 DIMENSÕES                _***!
!-----!
!-----!
!***_                2.1.1 PILARES                _***!
!-----!
!
hp = 300 ! [cm] - Comprimento dos pilares
bp = 30  ! [cm] - Base dos pilares
lp = 50  ! [cm] - Altura dos pilares
!
!-----!
!***_                2.1.2 VIGAS                _***!
!-----!
!
lxv = 500 ! [cm] - Comprimento das vigas em x
lyv = 600 ! [cm] - Comprimento das vigas em y
bv = 30   ! [cm] - Base das vigas
hv = 50   ! [cm] - Altura das vigas
!
!-----!
!***_                2.1.3 LAJES                _***!
!-----!

```

```

!
lx1 = 500      ! [cm] - Comprimento das lajes em x
ly1 = 600      ! [cm] - Comprimento das lajes em y
hl  = 9        ! [cm] - Espessura das lajes
!
!-----!
!****_                2.1.4 ESTRUTURA                _****!
!-----!
!
npav = 5      ! [un] - Número de pavimentos
analise = 2   ! Tipo de análise,1- análise global 2- análise faseada
!
!-----!
!****_                2.2 ARMADURAS                _****!
!-----!
!-----!
!****_                2.2.1 DADOS GERAIS                _****!
!-----!
!
coblp = 2.0    ! [cm] cobrimento da armadura positiva das lajes
cobln = 1.5    ! [cm] cobrimento da armadura negativa das lajes
cobv  = 3.0    ! [cm] cobrimento da armadura das vigas*
cobp  = 3.0    ! [cm] cobrimento da armadura dos pilares*
!*Valor de cobrimento + diâmetro de estribo
!
!-----!
!****_                2.2.2 PILARES                _****!
!-----!
!
Pa = 6.28     ! [cm2] Para todos os pavimentos e todos os lances
!
!-----!
!****_                2.2.3 VIGAS                _****!
!-----!
!-----!
!****_                2.2.3.1 PAVIMENTO 1                _****!
!-----!
!V1
P1V11an = 7.70    ! [cm2] Pav. i, viga i, tramo i, armadura negativa
P1V12an = 6.03
P1V13an = 8.04
P1V14an = P1V11an
P1V15an = 6.14
P1V11ap = 3.14    ! [cm2] Pav. i, viga i, tramo i, armadura positiva
P1V12ap = P1V11ap
P1V13ap = P1V11ap
P1V14ap = P1V11ap
P1V15ap = P1V11ap
!
!V2
P1V21an = 6.03    ! [cm2] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V22an = P1V21an
P1V23an = 8.04
P1V24an = P1V21an
P1V25an = P1V21an
P1V21ap = 3.14    ! [cm2] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V22ap = P1V21ap
P1V23ap = P1V21ap
P1V24ap = P1V21ap
P1V25ap = P1V21ap
!
!V3
P1V31an = 6.03    ! [cm2] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V32an = P1V31an
P1V33an = 8.04
P1V34an = P1V31an
P1V35an = P1V31an
P1V31ap = 3.14    ! [cm2] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva

```

```

P1V32ap = P1V31ap
P1V33ap = P1V31ap
P1V34ap = P1V31ap
P1V35ap = P1V31ap
!
!V4
P1V41an = 7.70 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V42an = 6.03
P1V43an = 8.04
P1V44an = P1V42an
P1V45an = P1V41an
P1V41ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V42ap = P1V41ap
P1V43ap = P1V41ap
P1V44ap = P1V41ap
P1V45ap = P1V41ap
!
!V5
P1V51an = 10.05 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V52an = 10.30
P1V53an = 12.32
P1V51ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V52ap = P1V51ap
P1V53ap = P1V51ap
!
!V6
P1V61an = 10.30 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V62an = 12.57
P1V63an = P1V61an
P1V61ap = 3.68 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V62ap = 3.14
P1V63ap = P1V61ap
!
!V7
P1V71an = 8.04 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V72an = 10.30
P1V73an = P1V71an
P1V71ap = 3.68 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V72ap = 3.14
P1V73ap = P1V72ap
!
!V8
P1V81an = 8.04 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V82an = 10.30
P1V83an = P1V82an
P1V81ap = 3.68 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V82ap = 3.14
P1V83ap = P1V81ap
!
!V9
P1V91an = 8.04 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V92an = 10.30
P1V93an = P1V92an
P1V91ap = 3.68 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V92ap = 3.14
P1V93ap = P1V92ap
!
!V10
P1V101an = 10.05 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P1V102an = 10.30
P1V103an = 12.32
P1V101ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P1V102ap = P1V101ap
P1V103ap = P1V101ap
!
!-----!
!****_ 2.2.3.2 PAVIMENTO 2 _****!
!-----!

```

```

!
!V1
P2V11an = 7.70 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V12an = 6.03
P2V13an = 8.04
P2V14an = P2V11an
P2V15an = P2V11an
P2V11ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V12ap = P2V11ap
P2V13ap = P2V11ap
P2V14ap = P2V11ap
P2V15ap = P2V11ap
!
!V2
P2V21an = 10.05 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V22an = 6.48
P2V23an = 4.91
P2V24an = P2V22an
P2V25an = P2V21an
P2V21ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V22ap = P2V21ap
P2V23ap = P2V21ap
P2V24ap = P2V21ap
P2V25ap = P2V21ap
!
!V3
P2V31an = P2V21an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V32an = P2V22an
P2V33an = P2V23an
P2V34an = P2V22an
P2V35an = P2V21an
P2V31ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V32ap = P2V31ap
P2V33ap = P2V31ap
P2V34ap = P2V31ap
P2V35ap = P2V31ap
!
!V4
P2V41an = P2V11an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V42an = P2V12an
P2V43an = P2V13an
P2V44an = P2V12an
P2V45an = P2V11an
P2V41ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V42ap = P2V41ap
P2V43ap = P2V41ap
P2V44ap = P2V41ap
P2V45ap = P2V41ap
!
!V5
P2V51an = P2V21an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V52an = P2V13an
P2V53an = P2V21an
P2V51ap = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V52ap = P2V51ap
P2V53ap = P2V51ap
!
!V6
P2V61an = P2V13an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V62an = P2V13an
P2V63an = P2V13an
P2V61ap = 3.68 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V62ap = P2V11ap
P2V63ap = P2V61ap
!
!V7
P2V71an = P2V13an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V72an = P2V13an
P2V73an = P2V13an

```

```

P2V71ap = P2V61ap      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V72ap = P2V11ap
P2V73ap = P2V61ap
!
!V8
P2V81an = P2V13an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V82an = P2V13an
P2V83an = P2V13an
P2V81ap = P2V61ap     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V82ap = P2V11ap
P2V83ap = P2V61ap
!
!V9
P2V91an = P2V13an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V92an = P2V13an
P2V93an = P2V13an
P2V91ap = P2V61ap     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V92ap = P2V11ap
P2V93ap = P2V61ap
!
!V10
P2V101an = P2V21an    ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P2V102an = P2V13an
P2V103an = P2V21an
P2V101ap = 3.14       ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P2V102ap = P2V101ap
P2V103ap = P2V101ap
!
!-----!
!****_                2.2.3.3 PAVIMENTO 3                _****!
!-----!
!
!V1
P3V11an = 5.59        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V12an = 6.48
P3V13an = 3.68
P3V14an = P3V12an
P3V15an = P3V11an
P3V11ap = 3.14        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V12ap = P3V11ap
P3V13ap = P3V11ap
P3V14ap = P3V11ap
P3V15ap = P3V11ap
!
!V2
P3V21an = 7.70        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V22an = 4.91
P3V23an = P3V22an
P3V24an = P3V12an
P3V25an = P3V21an
P3V21ap = 3.14        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V22ap = P3V21ap
P3V23ap = P3V21ap
P3V24ap = P3V21ap
P3V25ap = P3V21ap
!
!V3
P3V31an = P3V21an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V32an = P3V12an
P3V33an = P3V22an
P3V34an = P3V12an
P3V35an = P3V21an
P3V31ap = 3.14        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V32ap = P3V31ap
P3V33ap = P3V31ap
P3V34ap = P3V31ap
P3V35ap = P3V31ap
!

```

```

!V4
P3V41an = P3V11an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V42an = P3V12an
P3V43an = P3V13an
P3V44an = P3V12an
P3V45an = P3V11an
P3V41ap = 3.14        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V42ap = P3V41ap
P3V43ap = P3V13an
P3V44ap = P3V41ap
P3V45ap = P3V13an
!
!V5
P3V51an = P3V12an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V52an = 8.04
P3V53an = P3V12an
P3V51ap = 3.14        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V52ap = P3V51ap
P3V53ap = P3V51ap
!
!V6
P3V61an = P3V52an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V62an = P3V52an
P3V63an = P3V52an
P3V61ap = P3V13an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V62ap = P3V11ap
P3V63ap = P3V13an
!
!V7
P3V71an = P3V52an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V72an = P3V52an
P3V73an = P3V52an
P3V71ap = P3V13an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V72ap = P3V11ap
P3V73ap = P3V13an
!
!V8
P3V81an = P3V52an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V82an = P3V52an
P3V83an = P3V52an
P3V81ap = P3V13an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V82ap = P3V11ap
P3V83ap = P3V13an
!
!V9
P3V91an = P3V52an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V92an = P3V52an
P3V93an = P3V52an
P3V91ap = P3V13an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V92ap = P3V11ap
P3V93ap = P3V13an
!
!V10
P3V101an = P3V12an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P3V102an = P3V52an
P3V103an = P3V12an
P3V101ap = 3.14        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P3V102ap = P3V101ap
P3V103ap = P3V101ap
!
!-----!
!****_                2.2.3.4 PAVIMENTO 4                _****!
!-----!
!
!V1
P4V11an = 4.03         ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P4V12an = P4V11an
P4V13an = 3.14
P4V14an = P4V11an

```

P4V15an = P4V11an
 P4V11ap = P4V13an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V12ap = P4V13an
 P4V13ap = P4V13an
 P4V14ap = P4V13an
 P4V15ap = P4V13an
 !
 !V2
 P4V21an = 6.03 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V22an = P4V21an
 P4V23an = P4V11an
 P4V24an = P4V21an
 P4V25an = P4V21an
 P4V21ap = P4V13an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V22ap = P4V13an
 P4V23ap = P4V13an
 P4V24ap = P4V13an
 P4V25ap = P4V13an
 !
 !V3
 P4V31an = P4V21an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V32an = P4V21an
 P4V33an = P4V11an
 P4V34an = P4V21an
 P4V35an = P4V21an
 P4V31ap = P4V13an ![cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V32ap = P4V13an
 P4V33ap = P4V13an
 P4V34ap = P4V13an
 P4V35ap = P4V13an
 !
 !V4
 P4V41an = P4V11an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V42an = P4V11an
 P4V43an = P4V13an
 P4V44an = P4V11an
 P4V45an = P4V11an
 P4V41ap = P4V13an ![cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V42ap = P4V13an
 P4V43ap = P4V13an
 P4V44ap = P4V13an
 P4V45ap = P4V13an
 !
 !V5
 P4V51an = 4.91 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V52an = P4V51an
 P4V53an = P4V51an
 P4V51ap = P4V13an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V52ap = P4V13an
 P4V53ap = P4V13an
 !
 !V6
 P4V61an = 6.28 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V62an = P4V61an
 P4V63an = 8.04
 P4V61ap = 3.68 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V62ap = P4V13an
 P4V63ap = P4V61ap
 !
 !V7
 P4V71an = P4V21an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V72an = P4V61an
 P4V73an = P4V61an
 P4V71ap = P4V61ap ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V72ap = P4V13an
 P4V73ap = P4V61ap
 !
 !V8

P4V81an = P4V61an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V82an = P4V61an
 P4V83an = P4V61an
 P4V81ap = P4V61ap ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V82ap = P4V13an
 P4V83ap = P4V61ap
 !
 !V9
 P4V91an = P4V61an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V92an = P4V61an
 P4V93an = P4V61an
 P4V91ap = P4V61ap ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V92ap = P4V13an
 P4V93ap = P4V61ap
 !
 !V10
 P4V101an = P4V51an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P4V102an = P4V51an
 P4V103an = P4V51an
 P4V101ap = P4V13an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P4V102ap = P4V13an
 P4V103ap = P4V13an
 !
 !-----!
 !**** _ 2.2.3.5 PAVIMENTO 5 _****!
 !-----!
 !
 !V1
 P5V11an = 3.14 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P5V12an = P5V11an
 P5V13an = P5V11an
 P5V14an = P5V11an
 P5V15an = P5V11an
 P5V11ap = P5V11an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P5V12ap = P5V11an
 P5V13ap = P5V11an
 P5V14ap = P5V11an
 P5V15ap = P5V11an
 !
 !V2
 P5V21an = 6.03 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P5V22an = P5V21an
 P5V23an = 3.68
 P5V24an = P5V21an
 P5V25an = P5V21an
 P5V21ap = P5V11an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P5V22ap = P5V11an
 P5V23ap = P5V11an
 P5V24ap = P5V11an
 P5V25ap = P5V11an
 !
 !V3
 P5V31an = P5V21an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P5V32an = P5V21an
 P5V33an = P5V23an
 P5V34an = P5V21an
 P5V35an = P5V21an
 P5V31ap = P5V11an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
 P5V32ap = P5V11an
 P5V33ap = P5V11an
 P5V34ap = P5V11an
 P5V35ap = P5V11an
 !
 !V4
 P5V41an = P5V11an ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
 P5V42an = P5V11an
 P5V43an = P5V11an
 P5V44an = P5V11an
 P5V45an = P5V11an


```

P5V41ap = P5V11an      ![cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P5V42ap = P5V11an
P5V43ap = P5V11an
P5V44ap = P5V11an
P5V45ap = P5V11an
!
!V5
P5V51an = 4.02 ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P5V52an = P5V51an
P5V53an = P5V51an
P5V51ap = P5V11an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P5V52ap = P5V11an
P5V53ap = P5V11an
!
!V6
P5V61an = P5V21an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P5V62an = 6.28
P5V63an = P5V62an
P5V61ap = P5V23an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P5V62ap = P5V11an
P5V63ap = P5V23an
!
!V7
P5V71an = P5V21an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P5V72an = P5V21an
P5V73an = P5V21an
P5V71ap = P5V23an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P5V72ap = P5V11an
P5V73ap = P5V23an
!
!V8
P5V81an = P5V21an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P5V82an = P5V21an
P5V83an = P5V21an
P5V81ap = P5V23an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P5V82ap = P5V11an
P5V83ap = P5V23an
!
!V9
P5V91an = P5V21an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P5V92an = P5V62an
P5V93an = P5V62an
P5V91ap = P5V23an      ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P5V92ap = P5V11an
P5V93ap = P5V23an
!
!V10
P5V101an = 4.02        ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. negativa
P5V102an = P5V21an
P5V103an = P5V21an
P5V101ap = P5V11an     ! [cm²] Pav. i, viga i, tramo i, arm. positiva
P5V102ap = P5V11an
P5V103ap = P5V11an
!
!-----!
!****_                2.2.4 LAJES                _****!
!-----!
!
nel = 10 ![un] número de elementos no qual vai ser dividida a área de arm.
!
!L1 - Para todos os pavimentos
L1anpe = (8.88/nel)    ! [cm²] pavimento i, laje i, armadura negativa
                        ! principal esquerda
L1anpd = (16.81/nel)  ! [cm²] pavimento i, laje i, armadura negativa
                        ! principal direita
L1anss = (10.15/nel)  ! [cm²] pavimento i, laje i, armadura negativa
                        ! secundária superior
L1ansi = (26.64/nel)  ! [cm²] pavimento i, laje i, armadura negativa

```

```

! secundária inferior
L1app = (14.28/nel) ! [cm²] pavimento i, laje i, armadura positiva
! principal
L1aps = (9.83/nel) ! [cm²] pavimento i, laje i, armadura positiva
! secundária
!
!L2 - Para todos os pavimentos
L2anpe = L1anpd
L2anpd = L1anpd
L2anss = L1anss
L2ansi = L1anss
L2app = (11.74/nel)
L2aps = L1anss
!
!L3 - Para todos os pavimentos
L3anpe = L1anpd
L3anpd = L1anpd
L3anpd = L1anss
L3ansi =(14.59/nel)
L3app = L2app
L3aps = L1anss
!
!L4 - Para todos os pavimentos
L4anpe = L1anpd
L4anpd = (14.91/nel)
L4anss = L1anss
L4ansi = L3ansi
L4app = L2app
L4aps = L1anss
!
!L5 - Para todos os pavimentos
L5anpe = L4anpd
L5anpd = L1anpe
L5anss = L1aps
L5ansi = (18.60/nel)
L5app = L1app
L5aps = L1aps
!
!L6 - Para todos os pavimentos
L6anpe = L1aps
L6anpd = (13.01/nel)
L6anss = L1ansi
L6ansi = (15.58/nel)
L6app = (12.06/nel)
L6aps = L1aps
!
!L7 - Para todos os pavimentos
L7anpe = L6anpd
L7anpd = L3ansi
L7anss = L1anss
L7ansi = L2app
L7app = L6app
L7aps = L1anss
!
!L8 - Para todos os pavimentos
L8anpe = L3ansi
L8anpd = L3ansi
L8anss = L3ansi
L8ansi = L1app
L8app = L6app
L8aps = L1anss
!
!L9 - Para todos os pavimentos
L9anpe = L3ansi
L9anpd = L6anpd
L9anss = L3ansi
L9ansi = (13.64/nel)
L9app = L6app
L9aps = L1anss

```

```

!
!L10 - Para todos os pavimentos
L10anpe = L6anpd
L10anpd = L1aps
L10anss = L5ansi
L10ansi = (19.10/nel)
L10app = L6app
L10aps = L1aps
!
!L11 - Para todos os pavimentos
L11anpe = L1anpe
L11anpd = L1app
L11anss = L6ansi
L11ansi = L1anss
L11app = L1app
L11aps = L1aps
!
!L12 - Para todos os pavimentos
L12anpe = L1app
L12anpd = L1app
L12anss = L2app
L12ansi = L1anss
L12app = L2app
L12aps = L1anss
!
!L13 - Para todos os pavimentos
L13anpe = L1app
L13anpd = L1app
L13anss = L1app
L13ansi = L1anss
L13app = L2app
L13aps = L1anss
!
!L14 - Para todos os pavimentos
L14anpe = L1app
L14anpd = L1anpd
L14anss = L9ansi
L14ansi = L1anss
L14app = L2app
L14aps = L1anss
!
!L15 - Para todos os pavimentos
L15anpe = L1anpd
L15anpd = L1anpe
L15anss = L10ansi
L15ansi = L1aps
L15app = L1app
L15aps = L1aps
!

!-----!
!****_                2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS                _****!
!-----!
!-----!
!****_                2.3.1 AÇO                _****!
!-----!
!Dados referentes ao aço CA-50
Es = 21000 ! [kN/cm2] - Módulo de elasticidade longitudinal do aço
fy = 50    ! [kN/cm2] - Tensão de escoamento do aço
vs = 0.3   ! [adm]    - Coeficiente de Poisson do aço
!
!-----!
!****_                2.3.2 CONCRETO - GERAL                _****!
!-----!
!
fck = 2.5                ! [kN/cm2] - Resistência característica do concreto
s = 0.25                ! [adm] - Coef. que depende do tipo de concreto
nurev = 0.2            ! [adm] - Coeficiente de Poisson do concreto

```

```

rh = 70          ! [%] - Umidade relativa do ambiente
tinf = 3000     ! [dias] - Tempo final da analise [modmat=2]
betasc = 5d0    ! [adm] - Coeficiente que depende do tipo de cimento
temperatura = 20 ! [oC] - Temperatura
alpha = 1       ! [adm] - Efeito do tipo de cimento durante a cura
ndec = 10       ! [década] - No. de decadas utilizado para calcular
                ! os intervalos de tempo para o ajuste da cadeia de
                ! Kelvin
epsuct = 0.003  ! [adm] - Deformação última de tração
alphafct = 0.7  ! [adm] - Fator do modelo de Tension Stiffening
                ! (TS) do concreto em geral [0.5 a 0.8]
ktime = 50      ! [dias] - Dia para fazer a saída de dados
keleimid = 55   ! [un] - Ident. do elemento para saída de dados
kkDomIntPt = 1  ! [un] - Ident. do ponto de integração para saída
                ! de dados
tc = 10         ! [dias] - Tempo de um ciclo de concretagem
nce = 3         ! [un] - Número de conjunto de escoras
!
!-----!
!****_                2.3.3 CONCRETO - PILARES                _****!
!-----!
!
modmat1 = 2      ! 1 - Elástico do Ansys, 2 - Usermat
hf1 = 1.15      ! [cm] - Espessura fictícia dos pilares
ts1 = 3         ! [dias] - Idade do concreto no inicio da secagem
ligafluencia1 = 1 ! 1 - Liga fluência, 0 - desliga fluência
ligaretracao1 = 1 ! 1 - Liga retração, 0 - desliga retração
ligafissura1 = 1 ! 1 - Liga fissura, 0 - desliga fissura
!
!-----!
!****_                2.3.4 CONCRETO - VIGAS                _****!
!-----!
!
modmat2 = 2      ! 1 - Elástico do Ansys, 2 - Usermat
hf2 = 0.8       ! [cm] - Espessura fictícia das vigas
ts2 = 3         ! [dias] - Idade do concreto no inicio da secagem
ligafluencia2 = 1 ! 1 - Liga fluência, 0 - desliga fluência
ligaretracao2 = 1 ! 1 - Liga retração, 0 - desliga retração
ligafissura2 = 1 ! 1 - Liga fissura, 0 - desliga fissura
!
!-----!
!****_                2.3.5 CONCRETO - LAJES                _****!
!-----!
!
modmat3 = 2      ! 1 - Elástico do Ansys, 2 - Usermat
hf3 = 4.09      ! [cm] - Espessura fictícia das lajes
ts3 = 3         ! [dias] - Idade do concreto no inicio da secagem
ligafluencia3 = 1 ! 1 - Liga fluência, 0 - desliga fluência
ligaretracao3 = 1 ! 1 - Liga retração, 0 - desliga retração
ligafissura3 = 1 ! 1 - Liga fissura, 0 - desliga fissura
!
!-----!
!****_                2.4 DISCRETIZAÇÃO DA MALHA                _****!
!-----!
!PILARES
dlp = 6 ! [un] - Número de divisões da largura
dbp = 4 ! [un] - Número de divisões da base
dhp = 10 ! [un] - Número de divisões da altura
!
!VIGAS
dlv = 10 ! [un] - Número de divisões da largura
dbv = 4 ! [un] - Número de divisões da base
dhv = 6 ! [un] - Número de divisões da altura
!
!LAJE
div = 10 ! [un] - Número de divisões da largura x e y
!
!-----!
!****_                2.5 CARREGAMENTOS E TEMPOS                _****!
!-----!

```

```

!-----!
!
!CARGA PERMANENTE - PESO PRÓPRIO E REVESTIMENTOS
!
ppl = 0.000225 ! [kN/cm²] - Peso próprio da laje
ppv = 0.0375 ! [kN/cm] - Peso próprio da viga
ppp = 11.25 ! [kN] - Peso próprio do pilar
cppe = 0.065 ! [kN/cm] - Carga permanente da parede externa
cppi = 0.054 ! [kN/cm] - Carga permanente da parede interna
cprev = 0.02 ! [kN/cm] - Carga permanente de revestimento
!
!CARGA ACIDENTAL - CONFORME NBR-6120, DEVIDO AO USO/SERVIÇO
!
causog = 0.0002 ! [kN/cm²] - Carga acidental de uso, escrit./resid.
causof = 0.0001 ! [kN/cm²] - Carga acidental de uso, complementar ao serviço
caserv = 0.0001 ! [kN/cm²] - Carga acidental de serviço, estimado
!
cargalg = ppl + causog ! [kN/cm²] - Carga atuante nas lajes para AG
cargalf = ppl + caserv ! [kN/cm²] - Carga atuante nas lajes para AF
cargave = ppv+cppe+cprev ! [kN/cm] - Carga atuante nas vigas externas
cargavi = ppv+cppi+cprev ! [kN/cm] - Carga atuante nas vigas internas
cargap = ppp ! [kN] - Carga atuante nos pilares
!
dt = 1 ! [dias] - Intervalo de tempo na analise
!
!-----!
!****_ 3. CRIAÇÃO DOS MATERIAIS _****!
!-----!
!
/PREP7 ! Inicia módulo de pré-processamento
!
!-----!
!****_ 3.1 AÇO _****!
!-----!
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,Es
MPDATA,PRXY,1,,vs
TB,BISO,1,1,2, !Material 1
TBTEMP,0
TBDATA,,fy,,,,
!
!-----!
!****_ 3.2 CONCRETO _****!
!-----!
!
*DO,i,1,3,1 !Referente a: 1 - Pilares, 2 - Vigas e 3 - Lajes
*IF,modmat%i,eq,1,then ! Definindo o mat. elástico do Ansys
*DO,j,1,npav,1 ! Número de pavimentos
Erev = 3584.4 ! 21.5E3/10*(fck+0.8)**(1D0/3D0)
MPTEMP,1,0 ! Define uma tabela de temperaturas
MPDATA,EX,%i% %j%,,Erev! Módulo de elasticidade
MPDATA,PRXY,%i% %j%,,nurev ! coeficiente de poisson
*ENDDO
!
*ELSEIF,modmat%i,eq,2,then !Usermat
!
*DO,j,1,npav,1
TB,USER,%i% %j%,1,20 !Material do usuário
TBTEMP,1.0
TBDATA,1,ligafluencia%i%,ligaretracao%i%,ligafissura%i%
!
*IF,i,EQ,1,THEN ! 1 - Pilares
ti = 7+tc*(j-1)
t0 = 1
TBDATA,4,ti
TBDATA,6,t0

```

```

*ELSE                                ! 2 e 3 - Vigas e Lajes
    ti = tc*j
    t0 = 31
    TBDATA,4,ti
    TBDATA,6,t0
*ENDIF
!
TBDATA,5,ts%i%
TBDATA,7,tinf,fck,nurev
TBDATA,10,s,rh,hf%i%,betasc,alpha
TBDATA,15,ndec
TBDATA,16,epsuct,alphafct
TBDATA,18,ktime,kelemid,kkDomIntPt
TB,STATE,%i% %j%,,600
*ENDDO
*ENDIF
*ENDDO
!
!-----!
!****_                4. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS                _****!
!-----!
!-----!
!****_                4.1 PILARES E VIGAS                                _****!
!-----!
!
ET,1,BEAM189
!
KEYOPT,1,1,0 ! 6 graus de liberdade por nó
KEYOPT,1,2,0 ! Seção transv. escalada em função do alongamento axial
KEYOPT,1,4,1 ! Tensão de corte apenas por carga transversal
KEYOPT,1,6,1 ! Esforços e deformações generalizados apenas para os pontos
! de integração no comprimento + Área atualizada
KEYOPT,1,7,2 ! Tensões e deformações em todos pontos de integração
KEYOPT,1,9,3 ! Não utiliza valores extrapolados aos nós
KEYOPT,1,11,0 ! Integração automática
KEYOPT,1,12,0 ! Opção utilizável para peças de seção variável
KEYOPT,1,13,0 ! Saída para hidrodinâmica,default
!
!-----!
!****_                4.2 LAJES                                        _****!
!-----!
!
ET,2,SHELL281
!
KEYOPT,2,8,2 !Armazena resultados em todas as camadas
!
!-----!
!****_                5. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA                        _****!
!-----!
!****_                5.1 PILARES                                        _****!
!-----!
!
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE, 1, BEAM, RECT, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,bp,lp,dbp,dlp,0,0,0,0,0,0,0,0
!Keypoints da Geometria
*DO,i,0,5
    *DO,j,0,3
        *DO,k,0,1
            K,,i*500,j*600,k*300
        *ENDDO
    *ENDDO
*ENDDO
!Keypoints de Orientação
*DO,i,0,5,1
    K,60%i%,i*500,2200,150

```

```

*ENDDO
!Cria as linhas
*DO,i,1,47,2
    LSTR,i,i+1
*ENDDO
!
LSEL,S,LOC,Z,150,, !Seleciona as linhas de quando x=0
LSEL,R,LOC,X,0,,
LATT,11,,1,,600,,1 !Aplica propriedades,elemento, keypoint de
                    !orientação e seção
LESIZE, ALL,, ,dhp !Divide as linhas em "dhp" partes
CM,L11A,LINE       !Cria o componente dos pilares do pav1, primeira fila
                    !Os pilares são assim divididos por questão da adoção do
                    !keypoint de orientação

LSEL,S,LOC,Z,150,,
LSEL,R,LOC,X,500,,
LATT,11,,1,,601,,1
LESIZE, ALL,, ,dhp
CM,L11B,LINE
!
LSEL,S,LOC,Z,150,,
LSEL,R,LOC,X,1000,,
LATT,11,,1,,602,,1
LESIZE, ALL,, ,dhp
CM,L11C,LINE
!
LSEL,S,LOC,Z,150,,
LSEL,R,LOC,X,1500,,
LATT,11,,1,,603,,1
LESIZE, ALL,, ,dhp
CM,L11D,LINE
!
LSEL,S,LOC,Z,150,,
LSEL,R,LOC,X,2000,,
LATT,11,,1,,604,,1
LESIZE, ALL,, ,dhp
CM,L11E,LINE
!
LSEL,S,LOC,Z,150,,
LSEL,R,LOC,X,2500,,
LATT,11,,1,,605,,1
LESIZE, ALL,, ,dhp
CM,L11F,LINE
!
*DO,i,2,npav
    CMSEL,S,L11A
    LGEN,2,ALL, , , , (i-1)*300, ,1,0
    !
    *DO,j,1,i-1,1
        CMSEL,U,L1%j%A,LINE
    *ENDDO
    !
    LATT,1%i%, ,1,,600,,1
    !
    CM,L1%i%A,LINE
    !
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
    CMSEL,S,L11B
    LGEN,2,ALL, , , , (i-1)*300, ,1
    !
    *DO,j,1,i-1,1
        CMSEL,U,L1%j%B,LINE
    *ENDDO
    !
    LATT,1%i%, ,1,,601,,1
    !

```

```

        CM,L1%i%B,LINE
        !
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
    CMSEL,S,L11C
    LGEN,2,ALL, , , , (i-1)*300, ,1
    !
    *DO,j,1,i-1,1
        CMSEL,U,L1%j%C,LINE
    *ENDDO
    !
    LATT,1%i%,,1,,602,,1
    !
    CM,L1%i%C,LINE
    !
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
    CMSEL,S,L11D
    LGEN,2,ALL, , , , (i-1)*300, ,1
    !
    *DO,j,1,i-1,1
        CMSEL,U,L1%j%D,LINE
    *ENDDO
    !
    LATT,1%i%,,1,,603,,1
    !
    CM,L1%i%D,LINE
    !
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
    CMSEL,S,L11E
    LGEN,2,ALL, , , , (i-1)*300, ,1
    !
    *DO,j,1,i-1,1
        CMSEL,U,L1%j%E,LINE
    *ENDDO
    !
    LATT,1%i%,,1,,604,,1
    !
    CM,L1%i%E,LINE
    !
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
    CMSEL,S,L11F
    LGEN,2,ALL, , , , (i-1)*300, ,1
    !
    *DO,j,1,i-1,1
        CMSEL,U,L1%j%F,LINE
    *ENDDO
    !
    LATT,1%i%,,1,,605,,1
    !
    CM,L1%i%F,LINE
    !
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP, , , ,LOW
NUMCMP,KP
!
!-----!
!***_          5.2  VIGAS          _***!
!-----!
!
TYPE,1

```



```

MAT,1
SECTYPE,2, BEAM, RECT, ,0
SECOFFSET,USER,0,25
SECDATA,bv,hv,dbv,dhv,0,0,0,0,0,0,0,0
!
!Keypoints de orientação das vigas em X
*DO,i,0,3,1
    K,70%i%,1250,i*600,1800
*ENDDO
!
!Keypoints de orientação das vigas em Y
*DO,i,0,5,1
    K,80%i%,i*500,900,1800
*ENDDO
!
!Elaboração das linhas em X
!
*DO,j,0,4,1
    *DO,i,1,4,1
        LSTR,(2*i+j*8),(2*i+j*8+8)
    *ENDDO
*ENDDO
!
!Elaboração das linhas em Y
*DO,j,0,5,1
    *DO,i,1,3,1
        LSTR,(2*i+j*8),(2+2*i+j*8)
    *ENDDO
*ENDDO
!Criando componentes de cada tramo de cada viga
*DO,i,1,5,1
    LSEL,S,LOC,X,(2750-500*i),,,
    LSEL,R,LOC,Y,0,,,
    LATT,21,,1,,700,,2
    LESIZE, ALL,,,dlv !
    CM,L211%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,5,1
    LSEL,S,LOC,X,(2750-500*i),,,
    LSEL,R,LOC,Y,600,,,
    LATT,21,,1,,701,,2
    LESIZE, ALL,,,dlv !
    CM,L212%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,5,1
    LSEL,S,LOC,X,(2750-500*i),,,
    LSEL,R,LOC,Y,1200,,,
    LATT,21,,1,,702,,2
    LESIZE, ALL,,,dlv !
    CM,L213%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,5,1
    LSEL,S,LOC,X,(2750-500*i),,,
    LSEL,R,LOC,Y,1800,,,
    LATT,21,,1,,703,,2
    LESIZE, ALL,,,dlv !
    CM,L214%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,3,1
    LSEL,S,LOC,X,2500,,,
    LSEL,R,LOC,Y,(2100-600*i),,,
    LATT,21,,1,,805,,2
    LESIZE, ALL,,,dlv !
    CM,L215%i%,LINE

```

```

*ENDDO
!
*DO,i,1,3,1
    LSEL,S,LOC,X,2000,,
    LSEL,R,LOC,Y,(2100-600*i),,,
    LATT,21,,1,,804,,2
    LESIZE, ALL,, ,d1v !
    CM,L216%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,3,1
    LSEL,S,LOC,X,1500,,
    LSEL,R,LOC,Y,(2100-600*i),,,
    LATT,21,,1,,803,,2
    LESIZE, ALL,, ,d1v !
    CM,L217%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,3,1
    LSEL,S,LOC,X,1000,,
    LSEL,R,LOC,Y,(2100-600*i),,,
    LATT,21,,1,,802,,2
    LESIZE, ALL,, ,d1v !
    CM,L218%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,3,1
    LSEL,S,LOC,X,500,,
    LSEL,R,LOC,Y,(2100-600*i),,,
    LATT,21,,1,,801,,2
    LESIZE, ALL,, ,d1v !
    CM,L219%i%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,1,3,1
    LSEL,S,LOC,X,0,,
    LSEL,R,LOC,Y,(2100-600*i),,,
    LATT,21,,1,,800,,2
    LESIZE, ALL,, ,d1v !
    CM,L2110%i%,LINE
*ENDDO
!
!Criando cópia dos componentes de cada tramo de cada viga
!
*DO,i,2,npav
    *DO,j,1,5
        CMSEL,S,L211%j%
        LGEN,2,all, , , , (i-1)*300, ,1,0
        *DO,k,1,i-1,1
            CMSEL,U,L2%k%1%j%,LINE
        *ENDDO
        LATT,2%i%, ,1,,700,,2
        CM,L2%i%1%j%,LINE
    *ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
    *DO,j,1,5
        CMSEL,S,L212%j%
        LGEN,2,all, , , , (i-1)*300, ,1,0
        *DO,k,1,i-1,1
            CMSEL,U,L2%k%2%j%,LINE
        *ENDDO
        LATT,2%i%, ,1,,701,,2
        CM,L2%i%2%j%,LINE
    *ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav

```

```

*DO,j,1,5
  CMSEL,S,L213%j%
  LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
  *DO,k,1,i-1,1
    CMSEL,U,L2%k%3%j%,LINE
  *ENDDO
  LATT,2%i%,,1,,702,,2
  CM,L2%i%3%j%,LINE
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
  *DO,j,1,5
    CMSEL,S,L214%j%
    LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
    *DO,k,1,i-1,1
      CMSEL,U,L2%k%4%j%,LINE
    *ENDDO
    LATT,2%i%,,1,,703,,2
    CM,L2%i%4%j%,LINE
  *ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
  *DO,j,1,3
    CMSEL,S,L215%j%
    LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
    *DO,k,1,i-1,1
      CMSEL,U,L2%k%5%j%,LINE
    *ENDDO
    LATT,2%i%,,1,,805,,2
    CM,L2%i%5%j%,LINE
  *ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
  *DO,j,1,3
    CMSEL,S,L216%j%
    LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
    *DO,k,1,i-1,1
      CMSEL,U,L2%k%6%j%,LINE
    *ENDDO
    LATT,2%i%,,1,,804,,2
    CM,L2%i%6%j%,LINE
  *ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
  *DO,j,1,3
    CMSEL,S,L217%j%
    LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
    *DO,k,1,i-1,1
      CMSEL,U,L2%k%7%j%,LINE
    *ENDDO
    LATT,2%i%,,1,,803,,2
    CM,L2%i%7%j%,LINE
  *ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
  *DO,j,1,3
    CMSEL,S,L218%j%
    LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
    *DO,k,1,i-1,1
      CMSEL,U,L2%k%8%j%,LINE
    *ENDDO
    LATT,2%i%,,1,,802,,2
    CM,L2%i%8%j%,LINE

```

```

*ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
  *DO,j,1,3
    CMSEL,S,L219%j%
    LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
    *DO,k,1,i-1,1
      CMSEL,U,L2%k%9%j%,LINE
    *ENDDO
    LATT,2%i%,,1,,801,,2
    CM,L2%i%9%j%,LINE
  *ENDDO
*ENDDO
!
*DO,i,2,npav
  *DO,j,1,3
    CMSEL,S,L2110%j%
    LGEN,2,all,,,(i-1)*300,,1,0
    *DO,k,1,i-1,1
      CMSEL,U,L2%k%10%j%,LINE
    *ENDDO
    LATT,2%i%,,1,,800,,2
    CM,L2%i%10%j%,LINE
  *ENDDO
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP,, , ,LOW
NUMCMP,KP
!
!-----!
!****_          5.3 LAJES          _****!
!-----!
!
!
*DO,i,1,npav
  SECTYPE,3%i%,SHELL !associa o tipo de elemento definido
  SECDATA,h1,3%i%,,5 !espessura,material,,número de pontos de integração
  SECOFFSET,TOP !offset na face inferior
  SECCONTROL,,,,, !controles de propriedades padrão
*ENDDO
!
MSHAPE,0,2D !define elementos 2D
MSHKEY,1 !define discretização mapeada
!
!Definindo as áreas das lajes do primeiro pavimento
AL,137,156,138,153 ! Laje 1
AL,133,153,134,150 ! Laje 2
AL,129,150,130,147 ! Laje 3
AL,125,147,126,144 ! Laje 4
AL,121,144,122,141 ! Laje 5
AL,138,157,139,154 ! Laje 6
AL,134,154,135,151 ! Laje 7
AL,130,151,131,148 ! Laje 8
AL,126,148,127,145 ! Laje 9
AL,122,145,123,142 ! Laje 10
AL,139,158,140,155 ! Laje 11
AL,135,155,136,152 ! Laje 12
AL,131,152,132,149 ! Laje 13
AL,127,149,128,146 ! Laje 14
AL,123,146,124,143 ! Laje 15
!
ASEL,ALL,,,
AESIZE,ALL,div,
!
ASEL,ALL,AREA,,!seleciona áreas
AATT,31,1,2,0,31
CM,A31,AREA

```

```

!
*DO,i,2,npav
  CMSEL,S,A31,AREA
  AGEN,2,ALL,,,(i-1)*300,,1,0
  !
  *DO,j,1,i-1,1
    CMSEL,U,A3%j%,AREA
  *ENDDO
  !
  AATT,3%i%,1,2,0,3%i%
  !
  CM,A3%i%,AREA
  !
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP,, , ,LOW
NUMCMP,KP
!
!-----!
!***_          6. CONFECÇÃO DA MALHA          _***!
!-----!
!-----!
!***_          6.1 PILARES          _***!
!-----!
!
!
*DO,i,1,npav
  LMESH,L1%i%A
  LMESH,L1%i%B
  LMESH,L1%i%C
  LMESH,L1%i%D
  LMESH,L1%i%E
  LMESH,L1%i%F
  *IF,i,NE,1,THEN
    CMSEL,U,E1%i-1%,ELEM
  *ENDIF
  CM,E1%i%,ELEM
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
CMSEL,S,E11
*DO,i,2,npav
  CMSEL,A,E1%i%
*ENDDO
CM,E1,ELEM
!
!Selecionando os nós do topo dos pilares, para aplicação de carga
!
*DO,j,1,5,1
  *DO,i,0,5,1
    NSEL,S,LOC,X,i*500
    NSEL,R,LOC,Y,0
    NSEL,A,LOC,Y,600
    NSEL,R,LOC,X,i*500
    NSEL,A,LOC,Y,1200
    NSEL,R,LOC,X,i*500
    NSEL,A,LOC,Y,1800
    NSEL,R,LOC,X,i*500
    NSEL,R,LOC,Z,j*300
    CM,N%j%i%,NODE
  *ENDDO
*ENDDO
!Criando componente dos nós do topo dos pilares, para cada pavimento
*DO,i,1,5,1
  CMSEL,S,N%i%0,NODE
  CMSEL,A,N%i%1,NODE
  CMSEL,A,N%i%2,NODE
  CMSEL,A,N%i%3,NODE

```

```

CMSEL,A,N%i%4,NODE
CMSEL,A,N%i%5,NODE
CM,N%i%,NODE
*ENDDO
!
!-----!
!****_          6.2 VIGAS          _****!
!-----!
!
!Malhando as vigas em x individualmente, para que depois estes componentes
!venham a ajudar na inserção da armadura
CMSEL,U,E1
*DO,i,1,4          !Número da viga
  *DO,j,1,5,1      !Número do tramo da viga
    *DO,k,1,npav   !Número de pavimentos
      LMESH,L2%k%i%j%
      *IF,k,NE,1,THEN
        CMSEL,U,E2%k-1%i%j%,ELEM
      *ENDIF
      *IF,j,NE,1,THEN
        CMSEL,U,E2*npav%i%j-1%,ELEM
      *ENDIF
      *IF,i,NE,1,THEN
        CMSEL,U,E2*npav%i-1%5%,ELEM
      *ENDIF
      CM,E2%k%i%j%,ELEM
    *ENDDO
  *ENDDO
*ENDDO
!
!Criando componentes de vigas inteiras, para aplicação de carga
!
*DO,i,1,npav
  *DO,j,1,4
    CMSEL,S,E2%i%j%1,ELEM
    CMSEL,A,E2%i%j%2,ELEM
    CMSEL,A,E2%i%j%3,ELEM
    CMSEL,A,E2%i%j%4,ELEM
    CMSEL,A,E2%i%j%5,ELEM
    !
    *IF,i,NE,1,THEN
      CMSEL,U,E2%i-1%j%,ELEM
    *ENDIF
    CM,E2%i%j%,ELEM
  *ENDDO
*ENDDO
!
!Malhando as vigas em y individualmente, para que depois estes componentes
!venham a ajudar na inserção da armadura
!
CMSEL,U,E254,ELEM
*DO,i,5,10        !Número da viga
  *DO,j,1,3,1      !Número do tramo da viga
    *DO,k,1,npav   !Número de pavimentos
      LMESH,L2%k%i%j%
      *IF,k,NE,1,THEN
        CMSEL,U,E2%k-1%i%j%,ELEM
      *ENDIF
      *IF,j,NE,1,THEN
        CMSEL,U,E2*npav%i%j-1%,ELEM
      *ENDIF
      *IF,i,NE,1,THEN
        CMSEL,U,E2*npav%i-1%3%,ELEM
      *ENDIF
      CM,E2%k%i%j%,ELEM
    *ENDDO
  *ENDDO
*ENDDO
!

```

```

!Criando componentes de vigas inteiras, para aplicação de carga
!
*DO,i,1,npav
  *DO,j,5,10
    CMSEL,S,E2%i%%j%1,ELEM
    CMSEL,A,E2%i%%j%2,ELEM
    CMSEL,A,E2%i%%j%3,ELEM
    !
    *IF,i,NE,1,THEN
      CMSEL,U,E2%i-1%%j%,ELEM
    *ENDIF
    CM,E2%i%%j%,ELEM
  *ENDDO
*ENDDO
!
!Criando componentes com as vigas de cada pavimento
!para ativação e desativação
!
*DO,i,1,npav
  CMSEL,S,E2%i%1,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%2,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%3,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%4,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%5,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%6,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%7,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%8,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%9,ELEM
  CMSEL,A,E2%i%10,ELEM
  !
  *IF,i,NE,1,THEN
    CMSEL,U,E2%i-1%,ELEM
  *ENDIF
  CM,E2%i%,ELEM
*ENDDO
!
!-----!
!***_          6.3 LAJES          _***!
!-----!
!
CMSEL,U,E25
!Malhando as lajes por pavimento
*DO,i,1,npav
  AMESH,A3%i%
  *IF,i,NE,1,THEN
    CMSEL,U,E3%i-1%,ELEM
  *ENDIF
  CM,E3%i%,ELEM
*ENDDO
!
ALLSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!
CMSEL,S,A31,AREA      !Criando componentes de nós para as lajes
NSLA,S,0
CM,N31,NODE
!
CMSEL,S,A32,AREA
NSLA,S,0
CM,N32,NODE
!
CMSEL,S,A33,AREA
NSLA,S,0
CM,N33,NODE
!
CMSEL,S,A34,AREA
NSLA,S,0

```

```

CM, N34, NODE
!
CMSEL, S, A35, AREA
NSLA, S, 0
CM, N35, NODE
!
!-----!
!****_          7.  INSERÇÃO DA ARMADURA          _****!
!-----!
!
/COLOR, NUM, DGRA, 1      ! Pilares e vigas - Concreto - Cinza
/COLOR, NUM, RED, 2      ! Laje - Concreto - Cinza
!/COLOR, NUM, RED, 3     ! Armaduras - Vermelho
/PNUM, TYPE, 1
/PNUM, TYPE, 2
/NUMBER, 1
!
ESEL, S, TYPE, , 1      ! Seleciona elementos de pilares/vigas
ESEL, A, TYPE, , 2      ! Seleciona elementos de lajes
/TRLCY, ELEM, 0.6, ALL  ! Opção para deixar os elementos 60% translucidos
ALLSEL, ALL
!
!-----!
!****_          7.1 PILARES          _****!
!-----!
!
!Todos os pavimentos
SECTYPE, 100, REINF, DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA, 1, (Pa/2), BEAM, 0, ((lp/2)- cobp)
SECDATA, 1, (Pa/2), BEAM, 0, -((lp/2)- cobp)
CMSEL, S, E1, ELEM
SECN, 100
EREINF
!
!-----!
!****_          7.2 VIGAS          _****!
!-----!
!
!****_          7.2.1 PAVIMENTO 1          _****!
!-----!
!Armadura Negativa
!
SECTYPE, 200, REINF, DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA, 1, P1V11an, BEAM, 0, ((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL, S, E2111, ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL, A, E2141, ELEM
CMSEL, A, E2145, ELEM
SECN, 200
EREINF
!
SECTYPE, 201, REINF, DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA, 1, P1V12an, BEAM, 0, ((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL, S, E2112, ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL, A, E2114, ELEM
CMSEL, A, E2121, ELEM
CMSEL, A, E2122, ELEM
CMSEL, A, E2124, ELEM
CMSEL, A, E2125, ELEM
CMSEL, A, E2131, ELEM
CMSEL, A, E2132, ELEM
CMSEL, A, E2134, ELEM
CMSEL, A, E2135, ELEM
CMSEL, A, E2142, ELEM
CMSEL, A, E2144, ELEM
SECN, 201
EREINF
!
SECTYPE, 202, REINF, DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA, 1, P1V13an, BEAM, 0, ((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.

```



```

CMSEL,S,E2113,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2123,ELEM
CMSEL,A,E2133,ELEM
CMSEL,A,E2143,ELEM
CMSEL,A,E2171,ELEM
CMSEL,A,E2181,ELEM
CMSEL,A,E2191,ELEM
SECN,202
EREINF
!
SECTYPE,203,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P1V15an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2115,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
SECN,203
EREINF
!
SECTYPE,204,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P1V51an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2151,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E21101,ELEM
SECN,204
EREINF
!
SECTYPE,205,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P1V52an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2152,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2161,ELEM
CMSEL,A,E2163,ELEM
CMSEL,A,E2172,ELEM
CMSEL,A,E2173,ELEM
CMSEL,A,E2182,ELEM
CMSEL,A,E2183,ELEM
CMSEL,A,E2192,ELEM
CMSEL,A,E2193,ELEM
CMSEL,A,E21102,ELEM
SECN,205
EREINF
!
SECTYPE,206,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P1V53an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2153,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E21103,ELEM
SECN,206
EREINF
!
SECTYPE,207,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P1V62an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2162,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
SECN,207
EREINF
!
!Armadura Positiva
!
SECTYPE,208,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P1V11ap, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E211,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E212,ELEM
CMSEL,A,E213,ELEM
CMSEL,A,E214,ELEM
CMSEL,A,E215,ELEM
CMSEL,A,E2162,ELEM
CMSEL,A,E2172,ELEM
CMSEL,A,E2182,ELEM
CMSEL,A,E2192,ELEM
CMSEL,A,E2110,ELEM
SECN,208
EREINF
!

```

```

SECTYPE,209,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P1V61ap, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2161,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2163,ELEM
CMSEL,A,E2171,ELEM
CMSEL,A,E2173,ELEM
CMSEL,A,E2181,ELEM
CMSEL,A,E2183,ELEM
CMSEL,A,E2191,ELEM
CMSEL,A,E2193,ELEM
SECN,209
EREINF
!
!-----!
!****_          7.2.2 PAVIMENTO 2          _****!
!-----!
!Armadura Negativa
!
SECTYPE,210,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V11an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2211,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2215,ELEM
CMSEL,A,E2241,ELEM
CMSEL,A,E2245,ELEM
SECN,210
EREINF
!
SECTYPE,211,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V12an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2212,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2214,ELEM
CMSEL,A,E2242,ELEM
CMSEL,A,E2244,ELEM
SECN,211
EREINF
!
SECTYPE,212,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V13an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2213,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2243,ELEM
CMSEL,A,E2252,ELEM
CMSEL,A,E226,ELEM
CMSEL,A,E227,ELEM
CMSEL,A,E228,ELEM
CMSEL,A,E229,ELEM
CMSEL,A,E22102,ELEM
SECN,212
EREINF
!
SECTYPE,213,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V21an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2221,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2225,ELEM
CMSEL,A,E2231,ELEM
CMSEL,A,E2235,ELEM
CMSEL,A,E2251,ELEM
CMSEL,A,E2253,ELEM
CMSEL,A,E22101,ELEM
CMSEL,A,E22103,ELEM
SECN,213
EREINF
!
SECTYPE,214,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V22an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2222,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2224,ELEM
CMSEL,A,E2232,ELEM
CMSEL,A,E2234,ELEM
SECN,214

```

```

EREINF
!
SECTYPE,215,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V23an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2223,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2233,ELEM
SECN,215
EREINF
!
!Armadura Positiva
!
SECTYPE,216,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V11ap, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E221,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E222,ELEM
CMSEL,A,E223,ELEM
CMSEL,A,E224,ELEM
CMSEL,A,E225,ELEM
CMSEL,A,E2262,ELEM
CMSEL,A,E2272,ELEM
CMSEL,A,E2282,ELEM
CMSEL,A,E2292,ELEM
CMSEL,A,E2210,ELEM
SECN,216
EREINF
!
SECTYPE,217,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P2V61ap, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2261,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2263,ELEM
CMSEL,A,E2271,ELEM
CMSEL,A,E2273,ELEM
CMSEL,A,E2281,ELEM
CMSEL,A,E2283,ELEM
CMSEL,A,E2291,ELEM
CMSEL,A,E2293,ELEM
SECN,217
EREINF
!
!-----!
!***_          7.2.3 PAVIMENTO 3          _***!
!-----!
!Armadura Negativa
!
SECTYPE,218,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V11an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2311,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2315,ELEM
CMSEL,A,E2341,ELEM
CMSEL,A,E2345,ELEM
SECN,218
EREINF
!
SECTYPE,219,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V12an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2312,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2314,ELEM
CMSEL,A,E2322,ELEM
CMSEL,A,E2324,ELEM
CMSEL,A,E2332,ELEM
CMSEL,A,E2334,ELEM
CMSEL,A,E2342,ELEM
CMSEL,A,E2344,ELEM
CMSEL,A,E2351,ELEM
CMSEL,A,E2353,ELEM
CMSEL,A,E23101,ELEM
CMSEL,A,E23103,ELEM
SECN,219

```

```

EREINF
!
SECTYPE,220,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V13an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2313,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2343,ELEM
SECN,220
EREINF
!
SECTYPE,221,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V21an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2321,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2325,ELEM
CMSEL,A,E2331,ELEM
CMSEL,A,E2335,ELEM
SECN,221
EREINF
!
SECTYPE,222,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V22an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2323,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2333,ELEM
SECN,222
EREINF
!
SECTYPE,223,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V52an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2352,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E236,ELEM
CMSEL,A,E237,ELEM
CMSEL,A,E238,ELEM
CMSEL,A,E239,ELEM
CMSEL,A,E23102,ELEM
SECN,223
EREINF
!
!Armadura Positiva
!
SECTYPE,224,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V11ap, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E231,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E232,ELEM
CMSEL,A,E233,ELEM
CMSEL,A,E234,ELEM
CMSEL,A,E235,ELEM
CMSEL,A,E2362,ELEM
CMSEL,A,E2372,ELEM
CMSEL,A,E2382,ELEM
CMSEL,A,E2392,ELEM
CMSEL,A,E2310,ELEM
SECN,224
EREINF
!
SECTYPE,225,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P3V13an, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2361,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2363,ELEM
CMSEL,A,E2371,ELEM
CMSEL,A,E2373,ELEM
CMSEL,A,E2381,ELEM
CMSEL,A,E2383,ELEM
CMSEL,A,E2391,ELEM
CMSEL,A,E2393,ELEM
SECN,225
EREINF
!
!-----!
!****_          7.2.4 PAVIMENTO 4          _****!
!-----!

```

!Armadura Negativa

!

SECTYPE,226,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
 SECDATA,1,P4V11an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
 CMSEL,S,E2411,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
 CMSEL,A,E2412,ELEM
 CMSEL,A,E2414,ELEM
 CMSEL,A,E2415,ELEM
 CMSEL,A,E2423,ELEM
 CMSEL,A,E2433,ELEM
 CMSEL,A,E2441,ELEM
 CMSEL,A,E2442,ELEM
 CMSEL,A,E2444,ELEM
 CMSEL,A,E2445,ELEM
 SECN,226

EREINF

!

SECTYPE,227,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
 SECDATA,1,P4V13an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
 CMSEL,S,E2413,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
 CMSEL,A,E2443,ELEM
 SECN,227

EREINF

!

SECTYPE,228,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
 SECDATA,1,P4V21an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
 CMSEL,S,E2421,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
 CMSEL,A,E2422,ELEM
 CMSEL,A,E2424,ELEM
 CMSEL,A,E2425,ELEM
 CMSEL,A,E2431,ELEM
 CMSEL,A,E2432,ELEM
 CMSEL,A,E2471,ELEM
 SECN,228

EREINF

!

SECTYPE,229,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
 SECDATA,1,P4V51an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
 CMSEL,S,E2434,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
 CMSEL,A,E2435,ELEM
 CMSEL,A,E245,ELEM
 CMSEL,A,E2410,ELEM
 SECN,229

EREINF

!

SECTYPE,230,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
 SECDATA,1,P4V61an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
 CMSEL,S,E2461,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
 CMSEL,A,E2462,ELEM
 CMSEL,A,E2472,ELEM
 CMSEL,A,E2473,ELEM
 CMSEL,A,E248,ELEM
 CMSEL,A,E249,ELEM
 SECN,230

EREINF

!

SECTYPE,231,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
 SECDATA,1,P4V63an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
 CMSEL,S,E2463,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
 SECN,231

EREINF

!

!Armadura Positiva

!

SECTYPE,232,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
 SECDATA,1,P4V13an, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
 CMSEL,S,E241,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
 CMSEL,A,E242,ELEM

```

CMSEL,A,E243,ELEM
CMSEL,A,E244,ELEM
CMSEL,A,E245,ELEM
CMSEL,A,E2462,ELEM
CMSEL,A,E2472,ELEM
CMSEL,A,E2482,ELEM
CMSEL,A,E2492,ELEM
CMSEL,A,E2410,ELEM
SECN,232
EREINF
!
SECTYPE,233,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P4V61ap, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2461,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2463,ELEM
CMSEL,A,E2471,ELEM
CMSEL,A,E2473,ELEM
CMSEL,A,E2481,ELEM
CMSEL,A,E2483,ELEM
CMSEL,A,E2491,ELEM
CMSEL,A,E2493,ELEM
SECN,233
EREINF
!
!-----!
!***_                7.2.5 PAVIMENTO 5                _***!
!-----!
!Armadura Negativa
!
SECTYPE,234,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P5V11an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E251,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E254,ELEM
SECN,234
EREINF
!
SECTYPE,235,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P5V21an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2521,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2522,ELEM
CMSEL,A,E2524,ELEM
CMSEL,A,E2525,ELEM
CMSEL,A,E2531,ELEM
CMSEL,A,E2532,ELEM
CMSEL,A,E2534,ELEM
CMSEL,A,E2535,ELEM
CMSEL,A,E2561,ELEM
CMSEL,A,E257,ELEM
CMSEL,A,E258,ELEM
CMSEL,A,E2591,ELEM
CMSEL,A,E25102,ELEM
CMSEL,A,E25103,ELEM
SECN,235
EREINF
!
SECTYPE,236,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P5V23an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2523,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2533,ELEM
SECN,236
EREINF
!
SECTYPE,237,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P5V51an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E255,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E25101,ELEM
SECN,237
EREINF
!

```

```

SECTYPE,238,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P5V62an, BEAM, 0,((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2562,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2563,ELEM
CMSEL,A,E2592,ELEM
CMSEL,A,E2593,ELEM
SECN,238
EREINF
!
!Armadura Positiva
!
SECTYPE,239,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P5V11an, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E251,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E252,ELEM
CMSEL,A,E253,ELEM
CMSEL,A,E254,ELEM
CMSEL,A,E255,ELEM
CMSEL,A,E2562,ELEM
CMSEL,A,E2572,ELEM
CMSEL,A,E2582,ELEM
CMSEL,A,E2592,ELEM
CMSEL,A,E2510,ELEM
SECN,239
EREINF
!
SECTYPE,240,REINF,DISCRETE, ! Seção de reforço (Armaduras)
SECDATA,1,P5V23an, BEAM, 0,-((hv/2)- cobv) !Selecionando a área de arm.
CMSEL,S,E2561,ELEM !Selecionando os tramos com a mesma armadura
CMSEL,A,E2563,ELEM
CMSEL,A,E2571,ELEM
CMSEL,A,E2573,ELEM
CMSEL,A,E2581,ELEM
CMSEL,A,E2583,ELEM
CMSEL,A,E2591,ELEM
CMSEL,A,E2593,ELEM
SECN,240
EREINF
!
!-----!
!***_          7.3 LAJES          _***!
!-----!
!
coorzph = (coblp)/hl          ! [adm] - Cobrimento da camada de armadura
                             !positiva horizontal, normalizado
coorzpv = (coblp+(8/10))/hl ! [adm] - Cobrimento da camada de armadura
                             !positiva vertical, normalizado
coorznc = (hl-2)/hl          ! [adm] - Cobrimento da camada de negativa,
                             !normalizado
coorx = 0.5                   ! [adm] - Coordenada em X, no elemento
coory = 0.5                   ! [adm] - Coordenada em Y, no elemento
!
!Armadura para as lajes, de todos os pavimentos
!
!-----!
!***_          7.3.1 LAJE 1          _***!
!-----!
!
SECTYPE,300,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L1app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECN,300

```

```

EREINF
!
SECTYPE,301,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L1aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,301
EREINF
!
SECTYPE,302,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L1anpe,EDG0,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2395,2495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,302
EREINF
!
SECTYPE,303,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L1anpd,EDG0,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2155
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,303
EREINF
!
SECTYPE,304,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L1anss,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,5,105
SECNUM,304
EREINF
!
SECTYPE,305,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L1ansi,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,445,595
SECNUM,305
EREINF
!
!-----!
!***_          7.3.2 LAJE 2          _***!
!-----!
!
SECTYPE,306,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L2app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM

```



```

CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,306
EREINF
!
SECTYPE,307,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L2aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,307
EREINF
!
SECTYPE,308,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L2anpe,EDG0,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1845,1995
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,308
EREINF
!
SECTYPE,309,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L2anpd,EDG0,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1655
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,309
EREINF
!
SECTYPE,310,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L2anss,EDG0,2,coorx,coorzpn,coorx,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,5,105
SECNUM,310
EREINF
!
SECTYPE,311,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L2ansi,EDG0,2,coorx,coorzpn,coorx,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,445,595
SECNUM,311
EREINF

```

```

!
!-----!
!***_          7.3.3 LAJE 3          _***!
!-----!
!
SECTYPE,312,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L3app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,312
EREINF
!
SECTYPE,313,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L3aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,313
EREINF
!
SECTYPE,314,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L3anpe,EDG0,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1345,1495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,314
EREINF
!
SECTYPE,315,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L3anpd,EDG0,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1155
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,315
EREINF
!
SECTYPE,316,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L3anss,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,5,105
SECNUM,316
EREINF
!
SECTYPE,317,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L3ansi,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM

```

```

CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,445,595
SECNUM,317
EREINF
!
!-----!
!***_          7.3.4 LAJE 4          _***!
!-----!
!
SECTYPE,318,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L4app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,318
EREINF
!
SECTYPE,319,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L4aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,319
EREINF
!
SECTYPE,320,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L4anpe,EDG0,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,845,995
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,320
EREINF
!
SECTYPE,321,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L4anpd,EDG0,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,655
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,321
EREINF
!
SECTYPE,322,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L4anss,EDG0,2,coorx,coorzpn,coorx,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995

```

```

ESEL,R,CENT,Y,5,105
SECNUM,322
EREINF
!
SECTYPE,323,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L4ansi,EDG0,2,coorx,coorz,coorx,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,445,595
SECNUM,323
EREINF
!
!-----!
!***_          7.3.5 LAJE 5          _***!
!-----!
!
SECTYPE,324,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L5app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,324
EREINF
!
SECTYPE,325,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L5aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,325
EREINF
!
SECTYPE,326,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L5anpe,EDG0,1,coory,coorz,coory,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,345,495
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,326
EREINF
!
SECTYPE,327,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L5anpd,EDG0,1,coory,coorz,coory,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,105
ESEL,R,CENT,Y,5,595
SECNUM,327
EREINF
!
SECTYPE,328,REINF,DISCRETE,

```

```

SECDATA,1,L5anss,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,5,105
SECNUM,328
EREINF
!
SECTYPE,329,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L5ansi,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,445,595
SECNUM,329
EREINF
!
!-----!
!*** _                7.3.6 LAJE 6                _***!
!-----!
!
SECTYPE,330,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L6app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,330
EREINF
!
SECTYPE,331,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L6aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,331
EREINF
!
SECTYPE,332,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L6anpe,EDG0,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2395,2495
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,332
EREINF
!
SECTYPE,333,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L6anpd,EDG0,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM

```

```

CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2155
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,333
EREINF
!
SECTYPE,334,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L6anss,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,605,755
SECNUM,334
EREINF
!
SECTYPE,335,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L6ansi,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,1045,1195
SECNUM,335
EREINF
!
!-----!
!****_                7.3.7 LAJE 7                _****!
!-----!
!
SECTYPE,336,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L7app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,336
EREINF
!
SECTYPE,337,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L7aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,337
EREINF
!
SECTYPE,338,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L7anpe,EDG0,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1845,1995
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,338

```

```

EREINF
!
SECTYPE,339,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L7anpd,EDGO,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1655
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,339
EREINF
!
SECTYPE,340,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L7anss,EDGO,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,605,755
SECNUM,340
EREINF
!
SECTYPE,341,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L7ansi,EDGO,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,1045,1195
SECNUM,341
EREINF
!
!-----!
!****_                7.3.8 LAJE 8                _****!
!-----!
!
SECTYPE,342,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L8app,EDGO,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,342
EREINF
!
SECTYPE,343,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L8aps,EDGO,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,343
EREINF
!
SECTYPE,344,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L8anpe,EDGO,1,coory,coorzn,coory,coorzn

```

```

CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1345,1495
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,344
EREINF
!
SECTYPE,345,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L8anpd,EDG0,1,coory,coorzsn,coory,coorzsn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1155
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,345
EREINF
!
SECTYPE,346,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L8anss,EDG0,2,coorx,coorzsn,coorx,coorzsn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,605,755
SECNUM,346
EREINF
!
SECTYPE,347,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L8ansi,EDG0,2,coorx,coorzsn,coorx,coorzsn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,1045,1195
SECNUM,347
EREINF
!
!-----!
!****_          7.3.9 LAJE 9          _****!
!-----!
!
SECTYPE,348,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L9app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,348
EREINF
!
SECTYPE,349,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L9aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM

```



```

ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,349
EREINF
!
SECTYPE,350,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L9anpe,EDGO,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,845,995
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,350
EREINF
!
SECTYPE,351,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L9anpd,EDGO,1,coory,coorzn,coory,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,655
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,351
EREINF
!
SECTYPE,352,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L9anss,EDGO,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,605,755
SECNUM,352
EREINF
!
SECTYPE,353,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L9ansi,EDGO,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,1045,1195
SECNUM,353
EREINF
!
!-----!
!***_                7.3.10 LAJE 10                _***!
!-----!
!
SECTYPE,354,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L10app,EDGO,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,605,1195
SECNUM,354
EREINF

```

```

!
SECTYPE, 355, REINF, DISCRETE,
SECDATA, 1, L10aps, EDGO, 2, coory, coorzpv, coory, coorzpv
CMSEL, S, E31, ELEM
CMSEL, A, E32, ELEM
CMSEL, A, E33, ELEM
CMSEL, A, E34, ELEM
CMSEL, A, E35, ELEM
ESEL, R, CENT, X, 5, 495
ESEL, R, CENT, Y, 605, 1195
SECNUM, 355
EREINF
!
SECTYPE, 356, REINF, DISCRETE,
SECDATA, 1, L10anpe, EDGO, 1, coory, coorzpn, coory, coorzpn
CMSEL, S, E31, ELEM
CMSEL, A, E32, ELEM
CMSEL, A, E33, ELEM
CMSEL, A, E34, ELEM
CMSEL, A, E35, ELEM
ESEL, R, CENT, X, 345, 495
ESEL, R, CENT, Y, 605, 1195
SECNUM, 356
EREINF
!
SECTYPE, 357, REINF, DISCRETE,
SECDATA, 1, L10anpd, EDGO, 1, coory, coorzpn, coory, coorzpn
CMSEL, S, E31, ELEM
CMSEL, A, E32, ELEM
CMSEL, A, E33, ELEM
CMSEL, A, E34, ELEM
CMSEL, A, E35, ELEM
ESEL, R, CENT, X, 5, 105
ESEL, R, CENT, Y, 605, 1195
SECNUM, 357
EREINF
!
SECTYPE, 358, REINF, DISCRETE,
SECDATA, 1, L10anss, EDGO, 2, coorx, coorzpn, coorx, coorzpn
CMSEL, S, E31, ELEM
CMSEL, A, E32, ELEM
CMSEL, A, E33, ELEM
CMSEL, A, E34, ELEM
CMSEL, A, E35, ELEM
ESEL, R, CENT, X, 5, 495
ESEL, R, CENT, Y, 605, 755
SECNUM, 358
EREINF
!
SECTYPE, 359, REINF, DISCRETE,
SECDATA, 1, L10ansi, EDGO, 2, coorx, coorzpn, coorx, coorzpn
CMSEL, S, E31, ELEM
CMSEL, A, E32, ELEM
CMSEL, A, E33, ELEM
CMSEL, A, E34, ELEM
CMSEL, A, E35, ELEM
ESEL, R, CENT, X, 5, 495
ESEL, R, CENT, Y, 1045, 1195
SECNUM, 359
EREINF
!
!-----!
!***_          7.3.11 LAJE 11          _***!
!-----!
!
SECTYPE, 360, REINF, DISCRETE,
SECDATA, 1, L11app, EDGO, 1, coorx, coorzph, coorx, coorzph
CMSEL, S, E31, ELEM

```

```

CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,360
EREINF
!
SECTYPE,361,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L11aps,EDGO,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,361
EREINF
!
SECTYPE,362,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L11anpe,EDGO,1,coory,coorz,coory,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2395,2495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,362
EREINF
!
SECTYPE,363,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L11anpd,EDGO,1,coory,coorz,coory,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2155
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,363
EREINF
!
SECTYPE,364,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L11anss,EDGO,2,coorx,coorz,coorx,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1355
SECNUM,364
EREINF
!
SECTYPE,365,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L11ansi,EDGO,2,coorx,coorz,coorx,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,2005,2495
ESEL,R,CENT,Y,1695,1795
SECNUM,365
EREINF

```

```

! !-----!
!***_          7.3.12 LAJE 12          _***!
!-----!
!
SECTYPE,366,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L12app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,366
EREINF
!
SECTYPE,367,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L12aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,367
EREINF
!
SECTYPE,368,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L12anpe,EDG0,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1845,1995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,368
EREINF
!
SECTYPE,369,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L12anpd,EDG0,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1655
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,369
EREINF
!
SECTYPE,370,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L12anss,EDG0,2,coorx,coorzpn,coorx,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1355
SECNUM,370
EREINF
!
SECTYPE,371,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L12ansi,EDG0,2,coorx,coorzpn,coorx,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM

```

```

CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1505,1995
ESEL,R,CENT,Y,1695,1795
SECNUM,371
EREINF
!
!-----!
!***_          7.3.13 LAJE 13          _***!
!-----!
!
SECTYPE,372,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L13app,EDGO,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,372
EREINF
!
SECTYPE,373,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L13aps,EDGO,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,373
EREINF
!
SECTYPE,374,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L13anpe,EDGO,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1345,1495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,374
EREINF
!
SECTYPE,375,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L13anpd,EDGO,1,coory,coorzpn,coory,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1155
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,375
EREINF
!
SECTYPE,376,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L13anss,EDGO,2,coorx,coorzpn,coorx,coorzpn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1355

```

```

SECNUM,376
EREINF
!
SECTYPE,377,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L13ansi,EDG0,2,coorx,coorzp,coorx,coorzp
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,1005,1495
ESEL,R,CENT,Y,1695,1795
SECNUM,377
EREINF
!
!-----!
!****_                7.3.14 LAJE 14                _****!
!-----!
!
SECTYPE,378,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L14app,EDG0,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,378
EREINF
!
SECTYPE,379,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L14aps,EDG0,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,379
EREINF
!
SECTYPE,380,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L14anpe,EDG0,1,coory,coorzp,coory,coorzp
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,845,995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,380
EREINF
!
SECTYPE,381,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L14anpd,EDG0,1,coory,coorzp,coory,coorzp
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,655
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,381
EREINF
!
SECTYPE,382,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L14anss,EDG0,2,coorx,coorzp,coorx,coorzp

```

```

CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,1205,1355
SECNUM,382
EREINF
!
SECTYPE,383,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L14ansi,EDGO,2,coorx,coorz,coorx,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,505,995
ESEL,R,CENT,Y,1695,1795
SECNUM,383
EREINF
!
!
!
!-----!
!****_          7.3.15 LAJE 15          _****!
!-----!
!
SECTYPE,384,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L15app,EDGO,1,coorx,coorzph,coorx,coorzph
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,384
EREINF
!
SECTYPE,385,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L15aps,EDGO,2,coory,coorzpv,coory,coorzpv
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,385
EREINF
!
SECTYPE,386,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L15anpe,EDGO,1,coory,coorz,coory,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,345,495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,386
EREINF
!
SECTYPE,387,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L15anpd,EDGO,1,coory,coorz,coory,coorz
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM

```

```

CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,105
ESEL,R,CENT,Y,1205,1795
SECNUM,387
EREINF
!
SECTYPE,388,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L15anss,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,1205,1355
SECNUM,388
EREINF
!
SECTYPE,389,REINF,DISCRETE,
SECDATA,1,L15ansi,EDG0,2,coorx,coorzn,coorx,coorzn
CMSEL,S,E31,ELEM
CMSEL,A,E32,ELEM
CMSEL,A,E33,ELEM
CMSEL,A,E34,ELEM
CMSEL,A,E35,ELEM
ESEL,R,CENT,X,5,495
ESEL,R,CENT,Y,1695,1795
SECNUM,389
EREINF
!
!-----!
!****_                8. APLICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES                _****!
!-----!
!
NSEL,S,LOC,Z,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UX,0
D,ALL,UZ,0
D,ALL,ROTX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0
ALLSEL,ALL
!
!-----!
!****_                9. CONFIGURAÇÕES DE ANÁLISE                _****!
!-----!
!
PARSAV,ALL,parametros.txt
/SOLU
!
ANTYPE,0,NEW                ! parte da solução anterior
NLGEOM,ON                ! inclui efeitos de grandes deformações
NROPT,FULL,,ON
LNSRCH,ON
EQSLV,SPAR,,0,        ! Solver Spars Direto
PSCONTROL,ALL,ON
OUTRES,ALL,ALL
OUTRES,SVAR,ALL
SOLCONTROL,ON
AUTOTS,ON
ERESX,NO
KBC,1
TUNIF,temperatura
DELTIM,1,1,1
!
CNVTOL,F,,0.1,2,0.2        ! Parâmetros de convergência para a análise não linear
CNVTOL,U,,0.1,2,0.2        !tolerancia, norma, tol minima

```



```

CNVTOL,M,,0.1,2,0.2
NEQIT,70
NCNV,2,,4000
!
!-----!
!***_                10. SOLUÇÃO                _***!
!-----!
!
*IF,analise,EQ,1,THEN !Análise Global
!
TIME,85 !Tempo Final para análise
!
!Aplicando carga nas lajes
!
SFA,A31,1,PRES,(-cargalg)
SFA,A32,1,PRES,(-cargalg)
SFA,A33,1,PRES,(-cargalg)
SFA,A34,1,PRES,(-cargalg)
SFA,A35,1,PRES,(-cargalg)
!
!Aplicando carga nas vigas externas
*DO,i,1,npav
    SFBEAM,E2%i%1,1,PRES,cargave,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%4,1,PRES,cargave,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%5,1,PRES,cargave,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%10,1,PRES,cargave,,,,,0
*ENDDO
!Aplicando carga nas vigas internas
*DO,i,1,npav
    SFBEAM,E2%i%2,1,PRES,cargavi,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%3,1,PRES,cargavi,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%6,1,PRES,cargavi,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%7,1,PRES,cargavi,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%8,1,PRES,cargavi,,,,,0
    SFBEAM,E2%i%9,1,PRES,cargavi,,,,,0
*ENDDO
!Aplicando carga nos pilares
F,N1,FZ,-cargap,
F,N2,FZ,-cargap,
F,N3,FZ,-cargap,
F,N4,FZ,-cargap,
F,N5,FZ,-cargap,
!
ALLSEL,ALL
LSWRITE
!
ALLSEL,ALL
LSSOLVE,1,,1,
FINISH
!
*ELSE
!
!Abre nova análise
ANTYPE,0,NEW
!
!Seleciona todos os elementos existentes e os desativa
ALLSEL,ALL
ESEL,ALL
EKILL,ALL
!
!Ativa os pilares do primeiro pavimento
EALIVE,E11
ESEL,S,LIVE!
EPLOT!
TIME,7
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE

```

```

FINISH
!
!Abrir uma nova solução, após isso o ANSYS interpreta que
!será sempre aberta uma nova solução
/SOLU
ANTYPE,0,RESTART
!
!Aplica carga nos pilares do primeiro pavimento
CMSEL,S,N1
F,ALL,FZ,-cargap
TIME,8
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,9
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa as vigas e lajes do primeiro pavimento
!
EALIVE,E21
EALIVE,E31
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,10
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,16
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa os pilares do segundo pavimento
!
EALIVE,E12
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,17
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga nos pilares do segundo pavimento
!
CMSEL,S,N2
F,ALL,FZ,-cargap
TIME,18
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,19
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa as vigas e lajes do segundo pavimento
!
EALIVE,E22

```

```

EALIVE,E32
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,20
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,26
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa os pilares do terceiro pavimento
!
EALIVE,E13
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,27
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga nos pilares do terceiro pavimento
!
CMSEL,S,N3
F,ALL,FZ,-cargap
TIME,28
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,29
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa as vigas e lajes do terceiro pavimento
!
EALIVE,E23
EALIVE,E33
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,30
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,36
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa os pilares do quarto pavimento
!
EALIVE,E14
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,37
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE

```

```

!
!Aplica carga nos pilares do quarto pavimento
!
CMSEL,S,N4
F,ALL,FZ,-cargap
TIME,38
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,39
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa as vigas e lajes do quarto pavimento
!
EALIVE,E24
EALIVE,E34
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,40
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga na laje do primeiro pavimento
!
SFA,A31,1,PRES,(-cargalf)
!
!Aplica carga nas vigas externas do primeiro pavimento
SFBEAM,E211,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E214,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E215,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E2110,1,PRES,cargave,,,,,0
!
!Aplica carga nas vigas internas do primeiro pavimento
SFBEAM,E212,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E213,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E216,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E217,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E218,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E219,1,PRES,cargavi,,,,,0
!
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,41
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,46
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa os pilares do quinto pavimento
!
EALIVE,E15
ESEL,S,LIVE!
EPlot!
TIME,47
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!

```

```

!Aplica carga nos pilares do quinto pavimento
!
CMSEL,S,N5
F,ALL,FZ,-cargap
TIME,48
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,49
ESEL,S,LIVE!
EPLOT!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Ativa as vigas e lajes do quinto pavimento
!
EALIVE,E25
EALIVE,E35
ESEL,S,LIVE!
EPLOT!
TIME,50
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga na laje do segundo pavimento
!
SFA,A32,1,PRES,(-cargalf)
!
!Aplica carga nas vigas externas do segundo pavimento
SFBEAM,E221,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E224,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E225,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E2210,1,PRES,cargave,,,,,0
!
!Aplica carga nas vigas internas do segundo pavimento
SFBEAM,E222,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E223,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E226,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E227,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E228,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E229,1,PRES,cargavi,,,,,0
!
ESEL,S,LIVE!
EPLOT!
TIME,51
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,60
ESEL,S,LIVE!
EPLOT!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga na laje do terceiro pavimento
!
SFA,A33,1,PRES,(-cargalf)
!
!Aplica carga nas vigas externas do terceiro pavimento
SFBEAM,E231,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E234,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E235,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E2310,1,PRES,cargave,,,,,0

```

```

!
!Aplica carga nas vigas internas do terceiro pavimento
SFBEAM,E232,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E233,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E236,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E237,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E238,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E239,1,PRES,cargavi,,,,,0
!
ESEL,S,LIVE!
EPLLOT!
TIME,61
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,70
ESEL,S,LIVE!
EPLLOT!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga na laje do quarto pavimento
!
SFA,A34,1,PRES,(-cargalf)
!
!Aplica carga nas vigas externas do quarto pavimento
SFBEAM,E241,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E244,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E245,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E2410,1,PRES,cargave,,,,,0
!
!Aplica carga nas vigas internas do quarto pavimento
SFBEAM,E242,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E243,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E246,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E247,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E248,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E249,1,PRES,cargavi,,,,,0
!
ESEL,S,LIVE!
EPLLOT!
TIME,71
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,80
ESEL,S,LIVE!
EPLLOT!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga na laje do quinto pavimento
!
SFA,A35,1,PRES,(-cargalf)
!
!Aplica carga nas vigas externas do quinto pavimento
SFBEAM,E251,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E254,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E255,1,PRES,cargave,,,,,0
SFBEAM,E2510,1,PRES,cargave,,,,,0
!
!Aplica carga nas vigas internas do quinto pavimento
SFBEAM,E252,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E253,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E256,1,PRES,cargavi,,,,,0

```

```

SFBEAM,E257,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E258,1,PRES,cargavi,,,,,0
SFBEAM,E259,1,PRES,cargavi,,,,,0
!
ESEL,S,LIVE!
EPLLOT!
TIME,81
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
TIME,83
ESEL,S,LIVE!
EPLLOT!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
!Aplica carga de uso nas lajes de todos os pavimentos
!
SFA,A31,1,PRES,(-carga1g)
SFA,A32,1,PRES,(-carga1g)
SFA,A33,1,PRES,(-carga1g)
SFA,A34,1,PRES,(-carga1g)
SFA,A35,1,PRES,(-carga1g)
TIME,84
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE

TIME,85
ESEL,S,LIVE!
EPLLOT!
ALLSEL,ALL
SOLVE
SAVE
!
*ENDIF
!
!-----!
!***_                11. EXTRAÇÃO DE RESULTADOS                _***!
!-----!
!
allsel, all
epplot
ESEL,U,MAT,,1 !RETIRAR A ARMADURA
SET,LAST      !PLOTAR NO ULTIMO PASSO
!
/ESHape,0.0
!
/UDOC,1,DATE,0, !Tira do display a data e o logo do ANSYS
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15
!
CMSEL,S,E21, ELEM
CMSEL,A,E22, ELEM
CMSEL,A,E23, ELEM
CMSEL,A,E24, ELEM
CMSEL,A,E25, ELEM
CM,E2,ELEM
!
CMSEL,S,E31, ELEM
CMSEL,A,E32, ELEM
CMSEL,A,E33, ELEM
CMSEL,A,E34, ELEM
CMSEL,A,E35, ELEM

```

```

CM,E3,ELEM
!
ALLSEL,ALL
/TRLCY,ELEM,0.05,ALL ! Opção para deixar os elementos 60% translucidos
!
ligapilares =1      ! se 1 liga os pilares, se 0 desliga
ligavigas = 1      ! se 1 liga as vigas, se 0 desliga
ligalajes = 0      ! se 1 liga lajes, se 0 desliga
!
z1 = 0
z2 = 1500
x1 = 0
x2 = 0
y1 = 0
y2 = 1800
!
ESEL,S,CENT,X,x1,x2
ESEL,R,CENT,Y,y1,y2
ESEL,R,CENT,Z,z1,z2
ESEL,U,MAT,,1 !RETIRAR A ARMADURA
!
*IF,ligapilares,EQ,0,THEN
    CMSEL,U,E1,ELEM
*ENDIF
*IF,ligavigas,EQ,0,THEN
    CMSEL,U,E2,ELEM
*ENDIF
*IF,ligalajes,EQ,0,THEN
    CMSEL,U,E3,ELEM
*ENDIF
!
!DEFORMADA DO PÓRTICO
!
/DSCALE,ALL,100
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 1,1.0
PRNSOL, U,SUM, 1,1.0
!
!FISSURAÇÃO DO PÓRTICO
!
PLESOL,SVAR,7
PRESOL,SVAR,7
!
!ESFORÇO NORMAL NOS PILARES (FX)
!
/POST1
AVPRIN,0, ,
ETABLE,NORM_I,SMISC,1
ETABLE,NORM_J,SMISC,14
PLLS,NORM_I,NORM_J,1,0,0
PRETAB,NORM_I,NORM_J
!
!ESFORÇO CORTANTE NAS VIGAS (FZ)
!
AVPRIN,0, ,
ETABLE,FZ_I,SMISC,5
ETABLE,FZ_J,SMISC,18
PLLS,FZ_I,FZ_J,1,0,0
PRETAB,FZ_I,FZ_J
!
!MOMENTO FLETOR (MY)
!
AVPRIN,0, ,
ETABLE,MY_I,SMISC,2
ETABLE,MY_J,SMISC,15
PLLS,MY_I,MY_J,1,0,0
PRETAB,MY_I,MY_J
!
!MOMENTO FLETOR (MZ)

```



```
!  
AVPRIN,0, ,  
ETABLE,MZ_I,SMISC,3  
ETABLE,MZ_J,SMISC,16  
PLLS,MZ_I,MZ_J,1,0,0  
PRETAB,MZ_I,MZ_J  
!  
!DESLOCAMENTO VERTICAL DA LAJE (UZ)  
!  
/DSCALE,ALL,100  
/EFACET,1  
PLNSOL, U,Z, 1,1.0  
!  
!FISSURAÇÃO DA LAJE  
!  
PLESOL,SVAR,8  
PRESOL,SVAR,8  
!  
PLESOL,SVAR,9  
PRESOL,SVAR,9  
!  
!ESCOLHE AS FAIXAS DE RESULTADOS NO GRÁFICO  
/CONT,1,9,-2852, ,+4286  
!
```

APÊNDICE D

No Apêndice D consta o cronograma de obra estabelecido para a adoção das etapas construtivas na modelagem do edifício.

