



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC
Campus A. C. Simões
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1276
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br



PROJETO DE ESTRUTURA DE FUNDAÇÃO EM CONCRETO
DO TIPO RADIER

Luís Eduardo Santos Dória

Maceió/AL

2007

**PROJETO DE ESTRUTURA DE FUNDAÇÃO EM CONCRETO
DO TIPO RADIER**

LUÍS EDUARDO SANTOS DÓRIA

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

Orientador: Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima

Maceió/AL

2007

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

D696p Dória, Luís Eduardo Santos.
Projeto de estrutura de fundação em concreto do tipo radier / Luís Eduardo Santos Dória. – Maceió, 2007.
xiii, 93 f. : il. graf., tabs.

Orientador: Flávio Barboza de Lima.
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.

Bibliografia: f. 92-93.

1. Radier. 2. Fundações (Engenharia). 3. Concreto armado. 4. Concreto protendido. 4. Analogia de grelha. I. Título.

CDU: 624.012.45/.46



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC
Av. Lourival de Melo Mota, S/N
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1276
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br
Homepage: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec>



Membros da Banca de Exame da Dissertação de Mestrado do Engenheiro Civil **LUÍS EDUARDO SANTOS DÓRIA**, intitulada “PROJETO DE ESTRUTURA DE FUNDAÇÃO EM CONCRETO DO TIPO RADIER”, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, no dia 31 do mês de outubro do ano de 2007, às 8 horas e 30 minutos, na Sala de Aula do PPGEC/CTEC/UFAL.

MEMBROS DA BANCA:

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
Orientador – CTEC/UFAL
CPF: 304.363.624-49

Prof. Dr. Narbal Ataliba Marcellino
UFSC
CPF: 178.824.199-15

Profª Drª Viviane Carrilho Leão Ramos
CTEC/UFAL
CPF: 470.034.304-44

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que tem iluminado meu caminho e feito com que eu sempre consiga atingir meus objetivos.

Agradeço a minha mãe Joana pelo incentivo em todos os momentos para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu irmão André pela ajuda e pelas sugestões que me deu neste trabalho.

A minha namorada Fernanda que também me incentivou bastante para a conclusão deste trabalho.

Ao meu pai Eduardo que sempre se mostrou disposto a me ajudar na conclusão deste trabalho.

Ao professor Flávio Barboza, por sua ajuda e por seus conhecimentos passados para que eu conseguisse terminar este trabalho.

A Fundação de Amparo a Pesquisa de Alagoas (FAPEAL), pela concessão de uma bolsa de estudos.

Aos meus amigos do Programa de Pós Graduação da UFAL que também passaram por esta mesma experiência.

Ao pessoal do suporte da TQS que tiraram minhas dúvidas quanto à utilização do programa.

Aos meus amigos, Fernando, Clebenilson e Alexandre, por todo o incentivo.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados aspectos relacionados à classificação quanto a geometria e a rigidez bem como, à análise estrutural de fundações tipo radier em concreto armado e em concreto protendido. Algumas estratégias de modelagem e solução do sistema estrutural são discutidas, com foco no procedimento de analogia de grelha sobre base elástica, considerando-se a interação solo-estrutura. São apresentados os procedimentos para a análise automatizada de radier por analogia de grelha empregando o sistema CAD/TQS. Em um estudo de caso, três exemplos reais com emprego de cabo reto centrado na placa e parabólico foram comparados caso fosse adotado radier em concreto armado, tendo como parâmetros de comparação o consumo e o custo de materiais. Os resultados desses estudos de caso mostraram que o radier em concreto protendido permitiu uma redução na espessura da laje, porém para os casos estudados apresentou um custo total maior, devido ao emprego de concreto com maior resistência à compressão, necessidade de armadura passiva por ser elemento fletido, ancoragens e custo das cordoalhas, respectivamente. Não foram considerados os custos operacionais de aplicação da protensão.

Palavras-chave: radier, concreto armado, concreto protendido, analogia de grelha.

ABSTRACT

This work presents some aspects related to geometry and rigidity classification and structural analysis of reinforced and prestressed concrete mat foundations. Some strategies for modeling and solving the structural system are discussed, with focus on grid analogy with elastic restraints and soil-structure interaction. Details of the computer aided design of mat foundations by grid analogy performed at CAD/TQS system are also presented. The material list and cost are investigated and compared for three real buildings considering two prestressed cable geometry: straight and parabolic. The results show that the prestressed concrete mat foundation gives thinner thickness and greater total cost. The former is due to increasing in concrete resistance and the last is due to additional rebars and multistrand cost. The prestressing cost was not considered.

Keywords: mat foundation, reinforced concrete, prestressed concrete, grid analogy.

CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	<i>JUSTIFICATIVA.....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>OBJETIVOS.....</i>	<i>2</i>
1.3	<i>APRESENTAÇÃO.....</i>	<i>3</i>
2	FUNDAÇÃO TIPO RADIER: CLASSIFICAÇÃO, MATERIAIS E RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS.....	4
2.1	<i>CLASSIFICAÇÃO DOS RADIERS</i>	<i>6</i>
2.1.1	Quanto à geometria	6
2.1.2	Quanto à rigidez à flexão.....	8
2.1.3	Quanto à Tecnologia	9
2.1.3.1	Radier em Concreto Armado.....	9
2.1.3.2	Radier em Concreto Protendido	11
2.2	<i>MATERIAIS</i>	<i>15</i>
2.2.1	Concreto	15
2.2.2	Cordoalhas Engraxadas	16
2.2.3	Armadura Passiva.....	17
2.3	<i>RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS</i>	<i>17</i>
3	INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA	21
3.1	<i>PRESSÕES DE CONTATO.....</i>	<i>24</i>
3.2	<i>CONSTANTES ELÁSTICAS DO SOLO.....</i>	<i>25</i>
3.2.1	Ensaio de Placa.....	27
3.2.1.1	Execução da Prova de Carga	28
3.2.2	Uso de Tabelas	30
3.2.3	Determinação a Partir de Cálculo do Recalque da Fundação Real.....	32
4	MODELOS DE CÁLCULO	34
4.1	<i>ESTABILIDADE E CAPACIDADE DE PORTE DO RADIER</i>	<i>34</i>
4.2	<i>DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES E CÁLCULO DE ESFORÇOS.....</i>	<i>35</i>
4.3	<i>MÉTODOS DE CÁLCULO.....</i>	<i>35</i>
4.3.1	Método Estático.....	35
4.3.2	Método da Placa sobre Solo de Winkler	36
4.3.2.1	Método do American Concrete Institute (A.C.I.)	37
4.3.3	Sistema de Vigas sobre Base Elástica	37

4.3.4	Método das Diferenças Finitas	37
4.3.5	Método dos Elementos Finitos	38
4.4	<i>ANALOGIA DE GRELHA</i>	39
4.4.1	Malha da Grelha	40
4.4.2	Carregamento das Barras.....	41
4.4.3	Propriedades Geométricas e Físicas das Barras.....	42
4.4.4	Esforços nas Barras	43
5	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL AUTOMATIZADA	
	EMPREGANDO ANALOGIA DE GRELHA	45
5.1	<i>RADIER EM CONCRETO ARMADO</i>	45
5.1.1	Etapas de um Projeto.....	49
5.2	<i>RADIER EM CONCRETO PROTENDIDO</i>	50
5.2.1	Etapas do Projeto.....	50
5.2.2	Modelo de Cálculo	53
5.2.3	Regiões de Protensão Uniforme e Regiões de Transferência de Esforços	53
5.3	<i>CRITÉRIOS DE GRELHA</i>	55
5.4	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	56
6	ESTUDO DE CASO	57
6.1	<i>EXEMPLO 01</i>	57
6.1.1	Concreto Armado	63
6.1.2	Concreto Protendido.....	65
6.1.3	Análise de Custos	66
6.1.4	Influência da Configuração do Cabo.....	67
6.2	<i>EXEMPLO 02</i>	72
6.2.1	Concreto Armado	74
6.2.2	Concreto Protendido.....	76
6.2.3	Análise de Custos	78
6.2.4	Influência da Configuração do Cabo.....	78
6.3	<i>EXEMPLO 03</i>	81
6.3.1	Concreto Armado	83
6.3.2	Concreto Protendido.....	85
6.3.3	Análise de Custos	87
6.3.4	Influência da Configuração do Cabo.....	88
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Radier liso.....	7
Figura 2.2 - Radier com pedestais ou cogumelos.....	7
Figura 2.3 - Radier nervurado.....	8
Figura 2.4 - Radier em caixão.....	8
Figura 2.5 – Fissura paralela à junta de contração.....	10
Figura 2.6 – Fissuras superficiais concentradas.....	10
Figura 2.7 – Fissuras de retração por evaporação.....	11
Figura 2.8 – Detalhe construtivo do radier.....	12
Figura 2.9 – Radier em concreto protendido.....	13
Figura 2.10 – Detalhe da cordoalha de sete fios.....	16
Figura 2.11 – Detalhe da ancoragem.....	19
Figura 3.1 – Interação solo-estrutura.....	21
Figura 3.2 – Elemento de laje com dimensões unitárias submetido à tensões normais e cisalhantes.....	23
Figura 4.1 – Estratégias de modelagem do sistema estrutural pelo MEF.....	38
Figura 4.2 – Representação de uma grelha sobre base elástica.....	39
Figura 4.3 – Aplicação de carga concentrada na grelha.....	41
Figura 4.4 – Barras da grelha.....	42
Figura 4.5 – Representação de um elemento de grelha.....	43
Figura 4.6 – Esforços atuantes nas barras.....	44
Figura 5.1 – Modelo estrutural.....	46
Figura 5.2 – Modelo de grelha.....	47
Figura 5.3 – Faixas de distribuição de armadura.....	47
Figura 5.4 – Critérios de Projeto adotados segundo a NBR 6118:2003.....	48
Figura 5.5 – Esforços no radier.....	48
Figura 5.6 – Armadura do radier.....	49
Figura 5.7 – Definição da constante elástica.....	52
Figura 5.8 – Critérios do modelo utilizando protensão.....	52
Figura 5.9 – Definição do espaçamento das barras.....	53

Figura 5.10 – Regiões de protensão uniforme.	54
Figura 5.11 – Distribuição dos cabos.	54
Figura 5.12 – Critérios da grelha.	55
Figura 5.13 – Critérios gerais de grelha.	55
Figura 6.1 – Planta do radier com os carregamentos das paredes.....	58
Figura 6.2 – Modelo estrutural do exemplo de caso.....	59
Figura 6.3 – Geração da grelha – espaçamento de 100 cm.....	59
Figura 6.4 – Representação dos momentos na grelha.....	60
Figura 6.5 – Geração da grelha – espaçamento de 30 cm.....	61
Figura 6.6 - Representação dos momentos na grelha.	61
Figura 6.7 - Representação dos deslocamentos na grelha.....	62
Figura 6.8 – Geração da grelha – espaçamento de 40 cm.....	62
Figura 6.9 – Faixas de armadura homogênea nas direções X e Y.	63
Figura 6.10 – Armadura positiva.....	63
Figura 6.11 – Armadura negativa.	64
Figura 6.12 – Regiões de protensão uniforme (RPU).....	65
Figura 6.13 – Detalhe dos cabos nas duas direções do radier.....	66
Figura 6.14 – Perfil do cabo na placa de fundação.....	68
Figura 6.15 – Distribuição de tensão devido às ações frequentes.....	68
Figura 6.16 – Distribuição de tensão devido às ações permanentes – cabo reto.	69
Figura 6.17 – Distribuição de tensão devido às ações permanentes – cabo curvo.....	69
Figura 6.18 – Geração dos cabos de protensão.....	70
Figura 6.19 – Distribuição de tensões aplicando o cabo curvo.....	71
Figura 6.20 – Distribuição de tensões aplicando o cabo reto	71
Figura 6.21 – Planta do radier.	72
Figura 6.22 – Modelo do exemplo 03.....	73
Figura 6.23 – Grelha com espaçamento de 30 cm.....	73
Figura 6.24 – Grelha com espaçamento de 40 cm.....	74
Figura 6.25 – Faixas de armadura homogênea nas direções X e Y.	74
Figura 6.26 – Armadura positiva.....	75

Figura 6.27 – Armadura negativa.....	75
Figura 6.28 – Faixas de protensão uniforme.	76
Figura 6.29 – Geração dos cabos de protensão.....	77
Figura 6.30 – Distribuição de tensões – cabo reto.....	79
Figura 6.31 – Distribuição de tensões – cabo parabólico.	79
Figura 6.32 – Geração do modelo com os cabos parabólicos.....	80
Figura 6.33 – Planta do radier.	81
Figura 6.34 – Modelo do exemplo 02.....	82
Figura 6.35 – Grelha com espaçamento de 30 cm.....	82
Figura 6.36 – Grelha com espaçamento de 40 cm.....	83
Figura 6.37 – Faixas de armadura homogênea nas direções X e Y.	83
Figura 6.38 – Armadura positiva.....	84
Figura 6.39 – Armadura negativa.	84
Figura 6.40 – Faixas de protensão uniforme.	85
Figura 6.41 – Geração dos cabos.....	86
Figura 6.42 – Distribuição de momentos utilizando o cabo reto	88
Figura 6.43 – Distribuição de momentos utilizando o cabo parabólico.....	88
Figura 6.44 –Geração dos cabos parabólicos.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Correspondência entre classe de agressividade do concreto (NBR 6118:2003).....	16
Tabela 2-2 – Características das monocordoalhas engraxadas de 7 fios – Aço CP 190 RB ou RN.	16
Tabela 2-3 – Características das armaduras passivas.	17
Tabela 3-1 – Módulo de reação do solo k_{s1} em kgf/cm^3 (Terzaghi, 1955).	30
Tabela 3-2 – Módulo de reação k em kgf/cm^3 (ACI, 1997).....	31
Tabela 3-3 – Valores do módulo de reação vertical k_s (Moraes, 1972).	32
Tabela 6-1 – Quantidade de armadura para o radier em concreto armado.	64
Tabela 6-2 – Quantidade de cabos no radier em concreto protendido.....	66
Tabela 6-3 – Custo de material (R\$) do radier em concreto armado (ORSE, 2007).	67
Tabela 6-4 – Custo de material (R\$) do radier em concreto protendido (ORSE, 2007).....	67
Tabela 6-5 – Quantidade de armadura para o radier em concreto armado.	76
Tabela 6-6 – Quantidade de cabos no radier em concreto protendido.....	77
Tabela 6-7 – Custo de material (R\$) do radier em concreto armado (ORSE, 2007).	78
Tabela 6-8 – Custo de material (R\$) do radier em concreto protendido (ORSE, 2007).....	78
Tabela 6-9 – Quantidade de armadura para o radier em concreto armado.	85
Tabela 6-10 – Quantidade de cabos no radier em concreto protendido.....	86
Tabela 6-11 – Custo de material (R\$) do radier em concreto armado (ORSE, 2007).	87
Tabela 6-12 – Custo de material (R\$) do radier em concreto protendido (ORSE, 2007).....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

l - Espaçamento entre colunas

k_v - Módulo de reação vertical

b - Largura da faixa

E_c - Módulo de elasticidade longitudinal

I - Momento de inércia à flexão

L - Comprimento

N - Força normal

V - Força de cisalhamento

σ - Pressão normal

τ - Tensão cisalhante

Δ - Deslocamento

R_r - Rigidez relativa

E - Módulo de elasticidade do solo

B - Largura da placa

t - Espessura da placa

K - Constante elástica

A_f - Área de influência

$\sigma(x, y)$ - Tensão de contato média na base da fundação

$w(x, y)$ - Deslocamento vertical

$K_v(kN/m)$ - Coeficiente de mola para os deslocamentos verticais

$K_h(kN/m)$ - Coeficiente de mola para os deslocamentos horizontais

$K_\theta(kN.m/rad)$ - Coeficiente de mola para as rotações

ν - Coeficiente de Poisson

q - Carregamento

w - Recalque

k_{s1} - Módulo de reação do ensaio de placa

ε - Deformação

D - Rigidez à flexão da placa

g - Carga permanente

f_{ck} - Resistência à compressão do concreto

E_o - Módulo tangente

G - Módulo de deformação ao cisalhamento

J - Momentos de inércia à torção

h - Altura do elemento de barra

\varnothing - Diâmetro

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo de fundações tipo radier aparece a partir de trabalhos como o de Nascimento & Oliveira (2002) que estudaram fundações tipo radier em concreto protendido, que tem sido bastante difundida, por exemplo, em obras do Programa de Arrendamento Residencial – PAR da Caixa Econômica Federal, sendo que em muitos dos exemplos se questiona, se a solução em concreto protendido foi a mais adequada, considerando a pequena espessura de concreto e uso de cabo centrado, aliado à necessidade de uma armadura passiva mínima. Considerando os carregamentos envolvidos nas obras de interesse social e para resistências admissíveis de solo em torno de $0,7 \text{ kgf/cm}^2$ talvez um radier em concreto armado resultasse mais econômico, o que deve ser questionado. Entende-se que a escolha do tipo de fundação deve ser fruto da análise de diversas alternativas e não se deve deixar levar pelas imposições do sistema que se apresente no mercado.

Por outro lado, resente-se de um material bibliográfico que sintetize o dimensionamento desse tipo de fundação, seja com o uso de protensão ou não, e de ferramenta computacional dedicada que possa otimizar o serviço nos escritórios de projeto de fundação.

No projeto estrutural podem ser usados vários modelos, desde os mais simplificados até alguns mais complexos. Um modelo simples seria o cálculo de lajes “trabalhando” de maneira invertida (de baixo para cima) apoiadas nas paredes e solicitadas pela reação no solo. Neste caso o projetista tem de assumir uma distribuição de tensões no solo compatíveis com a natureza do mesmo. Um modelo mais refinado, recomendado para visualizar um comportamento mais próximo do real, seria considerar

a laje apoiada em base elástica, que é obtida a partir das características do solo. A análise dos esforços é, então, realizada por programas específicos, que normalmente utilizam o Método dos Elementos Finitos.

Portanto, o tipo de fundação em radier em concreto armado e protendido, sobretudo este último, está sendo bastante utilizado nas edificações no Brasil, auxiliando como tecnologia a projetos de cunho social. Mas, se faz necessário o estudo criterioso e adequado para permitir a vida útil de tais estruturas, estabelecendo-se ferramentas adequadas para simular consistentemente os casos a serem executados.

Nesse contexto, espera-se que o trabalho contribua diretamente com o elo de projetos dentro da cadeia produtiva da construção civil, acrescentando os resultados dos estudos ao rol das contribuições acadêmicas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é o estudo de estruturas de fundação do tipo radier em concreto armado e protendido, contribuindo com a sistematização do conhecimento utilizado para projeto, enfatizando-se a aplicação automatizada da analogia por grelha sobre base elástica. Os objetivos específicos são:

- a) sistematizar os conhecimentos teóricos existentes sobre fundação em radier armado e protendido;
- b) estudar as rotinas de analogia de grelha automatizada;
- c) determinar os parâmetros constitutivos da placa e do meio equilibrante para serem introduzidos nas rotinas computacionais e permitir a simulação computacional de casos;
- d) escolher e processar casos práticos e teóricos a serem processados;
- e) estudar comparativamente as fundações em radier em concreto armado e protendido para obras usuais no programa PAR.

1.3 APRESENTAÇÃO

Este texto foi estruturado e elaborado em sete capítulos que consiste na apresentação de pesquisa bibliográfica efetuada, uma introdução, definição de objetivos e estudo de fundação do tipo radier utilizando a analogia de grelha, aonde aplicou-se os conceitos apresentados em um estudo de caso.

A estrutura do texto:

- No primeiro capítulo são apresentados a justificativa e os objetivos do trabalho;
- No capítulo 2, são discutidos aspectos relacionados à classificação dos radiers quanto a geometria e a rigidez e aos parâmetros necessários para o cálculo deste tipo de estrutura em concreto armado e em concreto protendido;
- No capítulo 3, estudou-se a interação solo-estrutura, aplicando o modelo de grelha sobre base elástica;
- Em seguida, no capítulo 4, são apresentados os métodos de cálculo de fundação do tipo radier, dando atenção ao método de analogia de grelha;
- No capítulo 5, apresentam-se os procedimentos de análise de estrutura do tipo radier em concreto armado e em concreto protendido;
- Em seguida, no capítulo 6, foi feito um estudo de caso de alguns projetos de fundação do tipo radier, utilizando a analogia de grelha para obtenção dos esforços e análise dos resultados;
- Finalmente, apresentam-se as considerações finais.

2 FUNDAÇÃO TIPO RADIER: CLASSIFICAÇÃO, MATERIAIS E RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS.

No presente capítulo serão apresentados alguns critérios de projeto de fundação do tipo radier, bem como vantagens, materiais utilizados e recomendações construtivas.

O radier é um tipo de estrutura de fundação superficial, executada em concreto armado ou protendido, que recebe todas as cargas através de pilares ou alvenarias da edificação, distribuindo-as de forma uniforme ao solo.

A fundação do tipo radier é empregada quando:

- o solo tem baixa capacidade de carga;
- deseja-se uniformizar os recalques;
- as áreas das sapatas se aproximam umas das outras ou quando a área destas for maior que a metade da área de construção.

A fundação do tipo radier pode ser suportada por pilares em situações em que o lençol freático encontra-se próximo a superfície ou aonde a base do solo é susceptível a grandes recalques. As tensões de contato penetram no solo para uma elevada profundidade ou têm grande intensidade superficial, ambos os fatores tendem para um acréscimo do recalque.

A NBR 6122:1996 define o radier como um elemento de fundação superficial que abrange todos os pilares da obra ou carregamentos distribuídos.

Segundo o ACI 360R-92 (1997), o radier é uma laje continuamente suportada pelo solo, com carga total, quando uniformemente distribuída menor ou igual a 50% da capacidade de suporte admissível do solo. A laje pode ser uniforme ou de espessura variável, e pode conter elementos de enrijecimento como nervuras ou vigas. A laje pode ser de concreto simples, concreto reforçado ou concreto protendido. O reforço de aço é utilizado para os efeitos de retração e temperatura ou carregamento estrutural. Segundo

Almeida (2001), em geral, considerando a situação atual da construção civil Brasileira, pode ser dito que o radier, recebe pouca atenção tanto durante a fase de projeto quanto durante a fase de construção. Como consequência, as recomendações que poderiam evitar muitos problemas são simplesmente ignoradas. Aliás, convém mencionar que uma Norma Brasileira para projeto e execução de laje sobre solo nem sequer existe. Entretanto, existe literatura de excelente qualidade produzida principalmente pelo American Concrete Institute (ACI) e pelo Post-Tensioning Institute (PTI).

A escolha da disposição estrutural e das dimensões dos elementos é provavelmente a decisão mais importante do projeto. A não ser quando a experiência prévia ou fatores determinantes ditarem a forma exata do projeto, várias possibilidades devem ser estudadas, apesar do projetista poder limitar o número de soluções considerando as diversas restrições e por um cálculo preliminar mais grosseiro e avaliações de custo.

Na construção civil Brasileira, a utilização de radier está repleta de mitos. Um desses mitos estabelece que o sistema composto por estacas e vigas baldrame seria mais econômico. Esse mito está particularmente sedimentado e provavelmente foi verdade décadas atrás quando a disponibilidade de concreto usinado era escassa. Nos dias atuais, o radier pode ser projetado e executado com economia e mais importante ainda, é enfatizar que esse sistema proporciona uma plataforma estável para o restante da construção.

Antes do início da execução, deve-se dar atenção aos fatores que influenciam diretamente o desempenho da laje como o tipo de solo, a uniformidade do suporte da base, a qualidade do concreto, o tipo e espaçamento das juntas e o acabamento superficial. O ponto que merece grande destaque é o conhecimento da natureza e características do solo sobre o qual o radier será executado.

Como o desempenho estrutural do radier depende tanto da qualidade do concreto como também das propriedades do solo sobre o qual está apoiado, as recomendações da literatura estrangeira são enfatizadas para a dosagem, a fabricação, a aplicação e o acabamento do concreto e também para a caracterização e a preparação do solo para proporcionar um suporte uniforme para a laje.

Para o cálculo estrutural, é importante conhecer o módulo de reação do solo. Para carregamentos moderados, somente um grau limitado de informação geotécnica está normalmente disponível. Entretanto, assumindo uma homogeneidade no solo do local de interesse, uma das formas de se obter o módulo de reação do solo é através do

ensaio CBR (California Bearing Ratio) para esse solo. A situação ideal de projeto é o projetista estrutural contar com a colaboração de um especialista em solo.

A resistência do solo é muito importante para o desempenho de fundação do tipo radier, principalmente para suportar carregamentos elevados. Esta resistência do solo é influenciada pelo grau de compactação e pelo teor de umidade. O método de compactação melhora as propriedades estruturais do solo.

O subleito é tão importante quanto a próprio radier para garantir que o radier desempenhe a função para o qual foi projetado, assegurando que as condições de apoio sejam uniformes para o radier. Possíveis causas da não uniformidade de suporte como solos expansivos ou solos colapsíveis não podem ser excluídas. É importante solicitar à um engenheiro especializado em geotecnia, a classificação desse solo, os ensaios para granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e CBR nas condições naturais de umidade e compactação.

A base é o terreno natural nivelado e compactado, sobre o qual o radier é executado. Pode-se melhorar a base da fundação através de drenagem, compactação e estabilização do solo. Devido a rigidez do radier, os carregamentos aplicados são distribuídos em grandes áreas e as pressões na base são normalmente baixas. A base deve ser uniforme.

Quando o suporte uniforme não é obtido através de nivelamento e compactação, aplica-se uma sub-base, como forma de correção da base.

A classificação adequada do solo deve ser realizada para identificar os solos potencialmente problemáticos. Esta classificação é de uso comum no dimensionamento de radier. De acordo com a classificação do solo, é possível estimar o módulo de reação do solo utilizando tabelas, parâmetro importante para o dimensionamento do radier, que será abordado no capítulo 3.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RADIERS

Os radiers podem ser classificados quanto a sua geometria, quanto à rigidez à flexão e quanto à tecnologia.

2.1.1 QUANTO À GEOMETRIA

Classificam-se como lisos, com pedestais, nervurados e caixão.

- *radiers lisos (figura 2.1)* – tem a vantagem de ter grande facilidade de execução. Este é o tipo de radier que tem sido utilizado nas edificações do Programa de Arrendamento Residencial - PAR em Maceió. Essas edificações possuem até 4 (quatro) pavimentos.

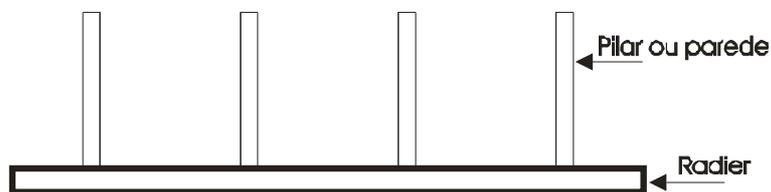


Figura 2.1 - Radier liso.

- *radiers com pedestais ou cogumelos (figura 2.2)* – aumenta a espessura sob os pilares e melhora a resistência a flexão e ao esforço cortante. Os pedestais podem ser superiores ou inferiores, tendo este último a vantagem de ser feita na escavação e deixar a superfície do piso plana.

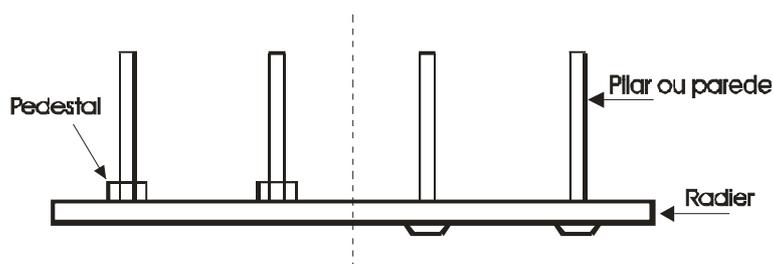


Figura 2.2 - Radier com pedestais ou cogumelos

- *radiers nervurados (figura 2.3)* – executa-se com nervuras secundárias e nervuras principais, colocadas sob os pilares, podendo ser superiores ou inferiores. No caso de nervuras inferiores executa-se sobre a escavação, o que não acontece no caso das nervuras superiores, sendo necessária a colocação de agregado para deixar a superfície do piso plana.

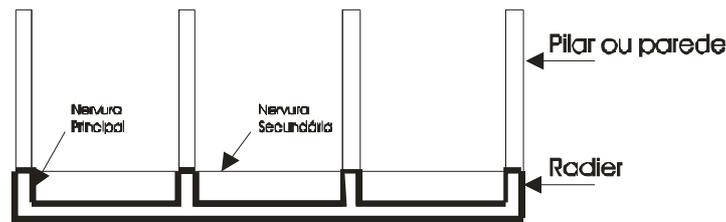


Figura 2.3 - Radier nervurado.

- *radiers em caixão* (figura 2.4) – utiliza-se com a finalidade de ter uma grande rigidez e pode ser executado com vários pisos.

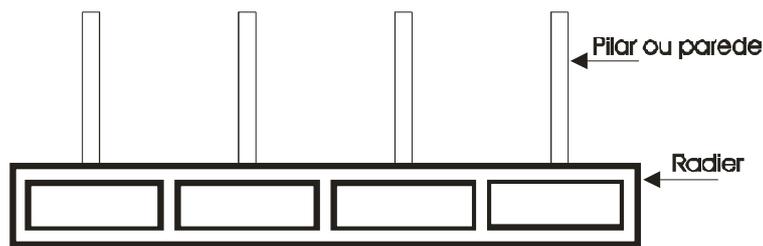


Figura 2.4 - Radier em caixão.

Os tipos acima citados estão em ordem crescente de rigidez. Estes radiers são feitos com espessura variando de 0,15 m a 2,00 m, dependendo do tipo empregado.

2.1.2 QUANTO À RIGIDEZ À FLEXÃO

São classificados em rígidos e elásticos. Os radiers rígidos são aqueles cuja rigidez a flexão é relativamente grande, portanto, o elemento estrutural pode ser tratado como um corpo rígido. Os radiers elásticos possuem menor rigidez e os deslocamentos relativos da placa não são desprezíveis.

Segundo o American Concrete Institute – ACI (1997), o radier é considerado rígido quando:

1. o espaçamento entre colunas atender a seguinte condição:

$$l \leq \frac{1,75}{\sqrt[4]{\frac{k_v \cdot b}{4 \cdot E_c \cdot I}}} \quad (2.1)$$

onde b é a largura da faixa de influência da linha de colunas, k_v é o coeficiente de reação vertical e $E_c I$ é a rigidez à flexão da faixa.

2. a variação nas cargas e espaçamentos das colunas não for maior que 20%.

Naturalmente, quando pelo menos uma das condições não é atendida, o radier é classificado como flexível.

2.1.3 QUANTO À TECNOLOGIA

A tecnologia empregada na execução de radier é o concreto armado e o concreto protendido, com a utilização de cordoalhas engraxadas. A seguir serão apresentadas as vantagens de cada tecnologia.

2.1.3.1 RADIER EM CONCRETO ARMADO

A especificação da resistência à compressão do concreto tem influência direta na determinação da espessura do radier e nas propriedades das superfícies acabadas. A resistência à compressão também tem influência na deformação de retração, na deformação lenta e nas deformações devido à variação da temperatura ambiente. A determinação e a especificação dessa resistência são fundamentais para o desempenho estrutural do radier em concreto armado.

A resistência ao desgaste (abrasão) do concreto, do radier, está diretamente relacionada com a resistência à compressão do concreto. Pesquisas da Portland Cement Association (1983) tem mostrado que a resistência ao desgaste (abrasão) aumenta com a redução da quantidade de água ou com um aumento na quantidade de cimento, ou ambos, tanto um como outro também aumentam a resistência à compressão do concreto. A qualidade da argamassa é que é importante; a solidez e a dureza do agregado graúdo começam a ficar importantes somente após o desgaste da superfície da argamassa.

Durante a execução do radier, a concretagem e o acabamento superficial são igualmente importantes tanto quanto a resistência do material, porque essas operações produzem um efeito significativo sobre a qualidade de camada fina (de 1,5 mm a 3,0 mm) na superfície superior do radier, evitando principalmente o aparecimento de fissuras. Na fabricação do concreto deve-se ter cuidado com os seguintes fatores: resistência à compressão, quantidade mínima de cimento, tamanho máximo do agregado graúdo, slump e uma pequena quantidade de ar incorporado.

Fissuras em radier em concreto armado podem aparecer em virtude do movimento do solo, do comportamento térmico do concreto ou do comportamento de retração do concreto. Fissuras devidas aos carregamentos não deveriam existir no caso das lajes sem armadura, pois as mesmas são dimensionadas com tensões de tração inferiores a resistência à tração do concreto na flexão (módulo de ruptura). Entre os tipos de fissuração mais frequentes em placa de fundação tipo radier, destacam-se:

- Fissura paralela à junta de contração (figura 2.5) onde uma provável causa é a combinação de calor de hidratação e dia quente na concretagem. Na primeira noite após a concretagem, se juntas de contração não tiverem sido instaladas, a retração devido à diminuição da temperatura pode fissurar o concreto. As juntas de contração devem ser instaladas no mesmo dia da concretagem.

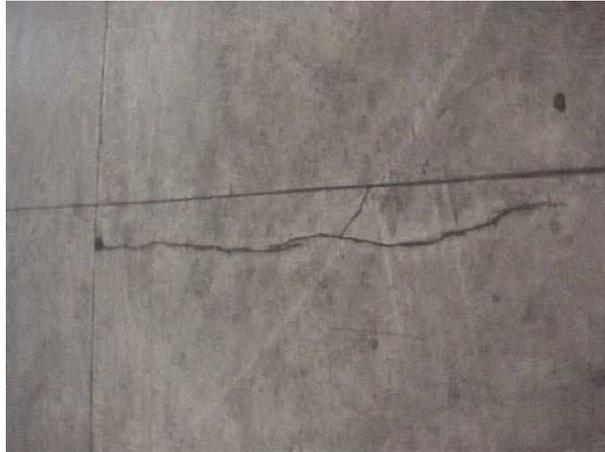


Figura 2.5 – Fissura paralela à junta de contração.

Fonte: Almeida (2001)

- Fissuras superficiais concentradas (figura 2.6), essencialmente um problema estético, mas é também evidência de evaporação muito rápida. Podem ser evitadas com métodos de acabamento adequados.



Figura 2.6 – Fissuras superficiais concentradas.

Fonte: Almeida (2001)

- Fissuras de retração por evaporação (figura 2.7), ocorrem após o concreto endurecido e atravessam toda a espessura da laje. Geralmente, pelo menos uma das

pontas está localizada numa junta de contração. Quando a fissura origina-se de outra, a ramificação tende a formar um ângulo reto.



Figura 2.7 – Fissuras de retração por evaporação.

Fonte: Almeida (2001)

2.1.3.2 RADIER EM CONCRETO PROTENDIDO

A simplicidade da execução é característica deste sistema no qual, as cordoalhas e seus acessórios requerem trabalho muito simples na obra, como pode ser observado na figura 2.8.

A determinação da altura de um elemento estrutural deve ser realizada logo na fase inicial do processo de cálculo. Cauduru (2000) recomenda que a altura de um elemento em concreto protendido seja da ordem de 70% da altura desse elemento em concreto armado.

O sistema mais empregado é o de protensão sem aderência que não requer injeção de pasta de cimento, utiliza-se portanto cordoalhas engraxadas descritas a seguir, o que contribui para a sua simplicidade.

Dada esta simplicidade, esse sistema de fundações em “Radier” consome mensalmente nos Estados Unidos mais de 3 mil toneladas de cordoalhas engraxadas segundo o Post Tensioning Institute (1996). Esta tecnologia, introduzida no Brasil, vem sendo aplicada com sucesso, em diversas construções em Fortaleza, Natal, Recife, Maceió, etc., principalmente na construção de edificações do tipo PAR financiados pela CEF. Com isso, foi feito no presente trabalho, um estudo de caso comparando-se o custo da execução de uma fundação do tipo radier em concreto armado e em concreto protendido.

Pavimentos e pisos industriais e comerciais protendidos são executados no Brasil há mais de 30 anos, tendo sido utilizadas as tecnologias da protensão aderente com bainhas metálicas, e não aderente com bainhas de papel e betume.

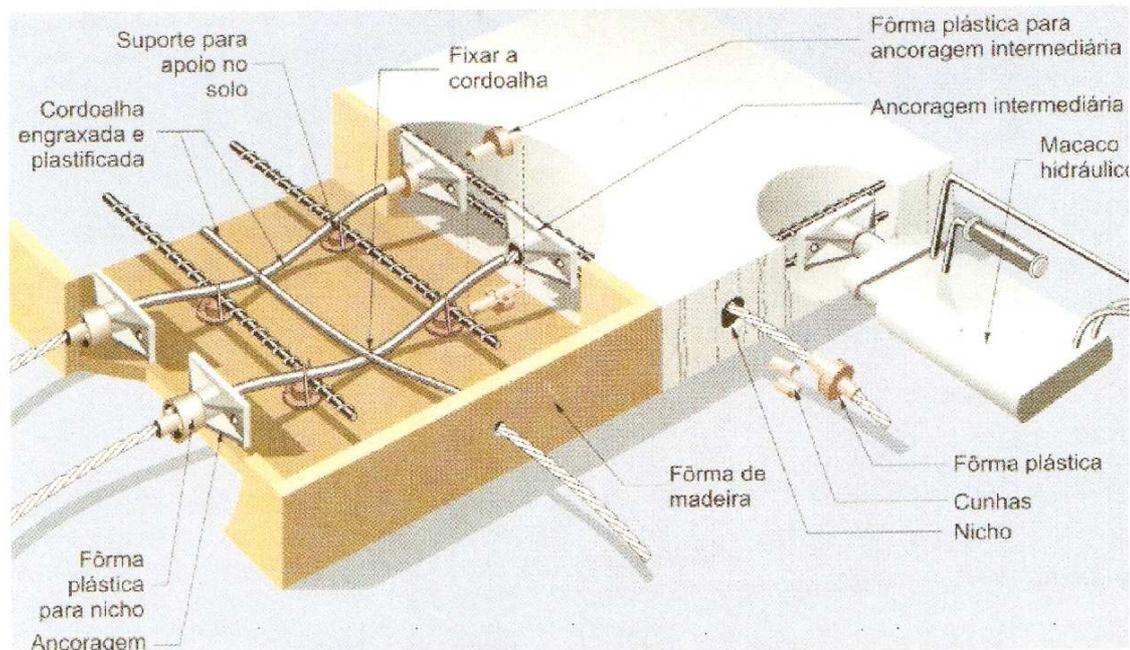


Figura 2.8 – Detalhe construtivo do radier protendido.

Fonte: Emerick 2002

Nos Estados Unidos, a tecnologia adotada desde o início da aplicação, foi a de cordoalhas enraxadas e plastificadas, método extremamente prático e de fácil aplicação.

Com relação ao mercado de cordoalhas enraxadas e plastificadas, 80% das construções residenciais que não utilizam porões, nos Estados Unidos, eram feitas sobre radiers (S.O.G. – “Slab On Ground”) protendidos com cordoalhas enraxadas e plastificadas – os chamados cabos monocordoalhas, onde cada cordoalha é fixada por uma só ancoragem em cada extremidade.

Segundo Cauduru (2000) o mercado de radiers era o dobro do mercado de prédios protendidos, o impressionante número de 36.000 toneladas no ano. O crescimento desse mercado desde o início dos registros (1977) foi enorme, passando de 6.000 t/ano para 52.000 t/ano em 1998.

A extensão da estatística mostra que esse mercado iniciou seu desenvolvimento na região sudoeste dos Estados Unidos, da Califórnia ao Texas. Essa região possui grande incidência de solos expansíveis, que com o aumento da umidade se expande,

levando a quebras das lajes executadas em concreto armado. A partir do sucesso da utilização dessa técnica naquela região, seu uso expandiu-se por todo o país, atingindo o Canadá.

Num crescimento vertiginoso, é a principal destinação das cordoalhas engraxadas e plastificadas naquele país, superando em 50% o enorme mercado das lajes planas para edifícios (PTI - Post-Tensioning Institute - 1996).

Segundo Cauduru (2000), a divulgação desta tecnologia no Brasil começou em um seminário de atualização tecnológica sobre protensão, ocorrido em Embu - SP em julho de 1996, o processo finalmente decolou na cidade de Fortaleza – CE.

A fundação do tipo radier em concreto protendido (figura 2.9), é muito utilizada em edificações do tipo PAR (Programa de Arrendamento Residencial) por sua simplicidade, rapidez, segurança e flagrantes vantagens técnicas e econômicas.



Figura 2.9 – Radier em concreto protendido.

Fonte: Cauduru 2000

Em Fortaleza já foram executadas as primeiras fundações tipo radier protendido com cordoalhas engraxadas, para edifícios residenciais de 2, 7, 12 e 15 andares.

Segundo Cauduru (2000), a obra pioneira no Brasil foi a construção em Fortaleza, do primeiro radier protendido com cordoalhas engraxadas e plastificadas, para edifício residencial de grande altura, em agosto de 1999.

A laje foi construída com espessura de 50 cm, contendo pequenos capitéis sob os pilares mais carregados, com espessura de 80 cm. O edifício possui 14 pavimentos. A

simplicidade, o baixo custo e a rapidez na execução determinaram a mudança do projeto original que previa a tradicional fundação profunda.

Segundo Moura (2000), o emprego de cordoalhas engraxadas em lajes assentadas sobre o solo, destinadas a apoiar residências, galpões e mesmo edifícios de grande porte, tem sido muito comum nos Estados Unidos (onde são chamados de “slabs on ground”) e apresenta vantagens bastante atraentes:

- a laje desempenha a função de fundação; por se estender em toda projeção da edificação, transmite de maneira segura as suas cargas ao solo, sem exigir dele grande resistência, já que as tensões a serem equilibradas pelo solo ficam bastante diluídas;
- a laje já desempenha as funções de piso pronto, com excelente qualidade de acabamento, estando praticamente pronto para receber a pavimentação;
- o construtor está dispensado de fazer escavações, alicerces em alvenaria de pedra, baldrame e cintas, além do piso citado no item anterior.

Segundo o Concrete Society (2000), o concreto protendido pós tracionado possui as seguintes vantagens com relação ao radier em concreto armado:

- menor espessuras das lajes;
- redução da fissuração;
- rapidez de construção;
- maior impermeabilidade.

Em relação ao sistema de protensão utilizando bainhas metálicas, a utilização de cordoalhas engraxadas é mais vantajosa pelos seguintes motivos:

- reduz perdas por atrito;
- simplifica a montagem dos cabos;
- não requer grauteamento das bainhas;
- pode ser construído com maior velocidade;
- geralmente é mais barato.

O cálculo de radier em concreto protendido por pós-tração difere do procedimento de cálculo do concreto armado pelo efeito positivo que a protensão confere à estrutura. No concreto armado a armadura apresenta-se inicialmente sem tensões; a tensão na armadura resulta da deformação e fissuração da estrutura submetida a carregamento. Desta forma pode-se considerar que a armadura trabalha passivamente. Por outro lado, os cabos nos pisos de concreto protendido são inicialmente tensionados

pelos macacos, assim estes se apresentam sob tensão antes da estrutura ser carregada. A força no cabo é determinada pelo projetista e praticamente não varia quando a estrutura esta sob a ação da carga permanente e variável no Estado Limite de Utilização.

Do instante em que os cabos de protensão são tensionados até o estágio final alguns anos depois da aplicação da protensão, muitas perdas ocorrem reduzindo a tensão no cabo.

Segundo o Concrete Society (2000) estas perdas são agrupadas em duas categorias: perdas imediatas e progressivas. No primeiro grupo, destacam-se:

- perdas por atrito;
- perdas na ancoragem;
- perdas devido ao encurtamento elástico do concreto.

Estas perdas ocorrem durante a protensão e ancoragem dos cabos. Entre as perdas progressivas, citam-se:

- perdas por retração do concreto;
- perdas por fluência do concreto sob efeito da protensão;
- perdas por relaxação do aço.

Apesar destas perdas ocorrerem em um período de dez ou mais anos, a maior parte delas acontece nos primeiros 2 anos. Normalmente as perdas reduzem a força de protensão de aproximadamente 10% na transferência e 20% após todas as perdas.

Qualquer que seja a técnica utilizada para o cálculo estrutural deve-se levar em consideração além das cargas permanentes e variável, as cargas provenientes da protensão. As metodologias de análise estrutural serão apresentadas no capítulo 4.

2.2 MATERIAIS

2.2.1 CONCRETO

A escolha do tipo do concreto e a classe será influenciada pela durabilidade, resistência requerida nas primeiras idades, materiais disponíveis e fatores econômicos. A NBR 6118:2003 estabelece valores mínimos de resistência à compressão de acordo com a classe de agressividade para concreto armado e protendido (tabela 2.1).

Tabela 2-1 – Correspondência entre classe de agressividade do concreto (NBR 6118:2003).

TIPO	Classe de Agressividade			
	I	II	III	IV
CONCRETO ARMADO	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
CONCRETO PROTENDIDO	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

2.2.2 CORDOALHAS ENGRAXADAS

As cordoalhas devem estar limpas e livres de corrosão. Rasgos ou falhas da cobertura plástica devem ser reparados antes do lançamento do concreto com fita plástica para isolar a cordoalha do concreto (Emerick, 2002).

Os materiais dos cabos utilizados em pisos de concreto pós-tensionados são normalmente cordoalhas de 7 fios (figura 2.10)., com aços de relaxação normal.

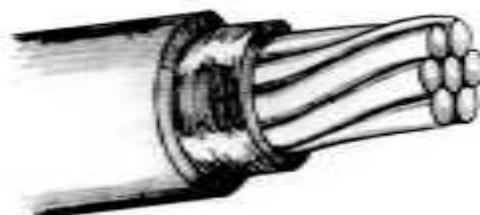


Figura 2.10 – Detalhe da cordoalha de sete fios.

A Tabela 2.2 apresenta algumas propriedades físicas e geométricas das monocordoalhas engraxadas de 7 fios com diâmetro de 12,7 mm e 15,2 mm.

Tabela 2-2 – Características das monocordoalhas engraxadas de 7 fios – Aço CP 190 RB ou RN.

Tipo de cordoalha	Ø 12,7 mm (1/2")	Ø 15,2 mm (3/8")
Área mínima (mm ²)	98,7	140
Área aproximada (mm ²)	101,4	143,5
Peso linear com bainha e graxa (kg/m)	0,89	1,24
Carga de ruptura – f_{ptk} (kN)	187,3	265,8
Módulo de elasticidade (GPa)	Aproximadamente 196	
Alongamento após ruptura	3,5%	
Ø cordoalha + bainha (mm)	15,4	18,1

Cabos não aderentes são protegidos por uma camada de graxa no interior de uma capa plástica de PEAD-polietileno de alta densidade, impermeável à água,

extremamente resistente e durável, extrudado diretamente sobre a cordoalha já engraxada em toda sua extensão, o que permite a livre movimentação da cordoalha em seu interior (Emerick, 2002).

Sob condições normais, as cordoalhas são fornecidas diretamente pelas indústrias, já engraxadas e com a capa plástica. Em nenhuma circunstância deve-se utilizar o PVC como capa protetora, uma vez que este material pode liberar íons de cloretos em certas condições.

2.2.3 ARMADURA PASSIVA

Segundo a NBR 6118:2003, nos projetos de estruturas de concreto armado deve ser utilizado aço classificado pela NBR 7480:1996 com o valor característico da resistência de escoamento nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60. Os diâmetros e seções transversais nominais devem ser os estabelecidos na NBR 7480:1996.

A tabela 2.3 apresenta algumas características do aço utilizado em estruturas em concreto armado.

Tabela 2-3 – Características das armaduras passivas.

Massa específica	7850 kg/m ³
Coefficiente de dilatação térmica	10 ⁻⁵ /°C
Módulo de Elasticidade	210 GPa

2.3 RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS

Segundo Almeida (2001) o subleito deve proporcionar suporte firme e razoavelmente uniforme para a laje, mesmo quando o subleito estiver molhado. Caso contrário, usa-se brita graduada. Solo de argila expansiva deve estar úmido, acima do seu teor de umidade ótima, antes do concreto ser lançado.

Para acomodar variação de temperatura sazonal, recomenda-se a colocação de juntas de expansão para permitir a laje expandir, e instala-se juntas de contração para minimizar fissuras aleatórias devido a contração. Para evitar fissuras que aparecem no dia seguinte ao lançamento do concreto, instala-se juntas de contração no mesmo dia em que o concreto foi lançado.

Para evitar fissuras fragmentadas, usa-se socagem leve e não se adiciona cimento seco à superfície para absorver água exsudada. Para evitar fissuras de retração plástica, usa-se uma cobertura de controle da evaporação pulverizada no concreto fresco em tempo quente ou ventoso. Adicionalmente, usa-se reforço de fibras de nylon ou polipropileno. Não adiciona-se água de mistura no concreto além do necessário para um slump adequado, que deve ser no máximo 5" (12,7 cm). Usa-se concreto com tamanho máximo de agregado maior ou igual a 3/4" (1,9 cm). Para concreto com seixo rolado, que usa tamanho máximo de agregado 3/8" (1,0 cm), reduz-se o espaçamento recomendado para as juntas de contração em 3' (0,9 m).

Para se obter o melhor desempenho deste tipo de fundação devem ser observados os seguintes cuidados:

- a preparação do solo consiste em seu nivelamento e compactação. É exigido o controle do CBR e valores adotados pelo projetista devem ser comprovados por meio de ensaios.
- deve ser colocada uma forma nas 4 laterais fechando a área a ser concretada (com altura entre 10 cm e 15 cm) de acordo com o cálculo estrutural. Para prédio acima de 3 pavimentos a altura é maior. Para edificações de pequeno porte (térreo + pav. superior) espessuras de 10 cm são suficientes, com taxas baixíssimas de armadura passiva (às vezes nenhuma armadura).
- as tubulações para as instalações hidro-sanitárias e os eletrodutos já devem estar posicionadas no solo sob a placa, com saídas através da laje. Mesma observação é pertinente para as saídas das armaduras de escadas e pilares, para evitar cortes indesejáveis numa laje já concretada.
- após a colocação das instalações deve ser colocado uma manta plástica para isolar o terreno do concreto.

Segundo Cauduru (2000), particularmente no caso do radier em concreto protendido pode-se citar ainda recomendações tais como:

- as cordoalhas são montadas, geralmente espaçadas entre 80 cm a 120 cm uma da outra e devendo a altura ser no eixo da forma. Recomendam-se concretos de f_{ck} pelo menos de 30 MPa.
- o comprimento dos cabos normalmente não deve ultrapassar 40 m. Acima desse valor, deve-se adotar ancoragens intermediárias, criando-se juntas de concretagem.

- em cada ancoragem (cada cordoalha possui uma em cada extremidade) devem ser colocadas 2 barras de aço que servirão de fretagem auxiliando a distribuição das forças de protensão (figura 2.11). A protensão sem aderência ocorre quando as armaduras de protensão só estão ancoradas no concreto nas extremidades das peças estruturais. A falta de aderência pode prejudicar ou mesmo não impedir a fissuração da peça estrutural sendo necessário utilizar uma armadura aderente (passiva) para prevenir a fissuração.
- procede-se a protensão das cordoalhas, que consiste em esticar as cordoalhas com um macaco hidráulico apropriado para o uso com uma força de 150 kN em cada cabo.

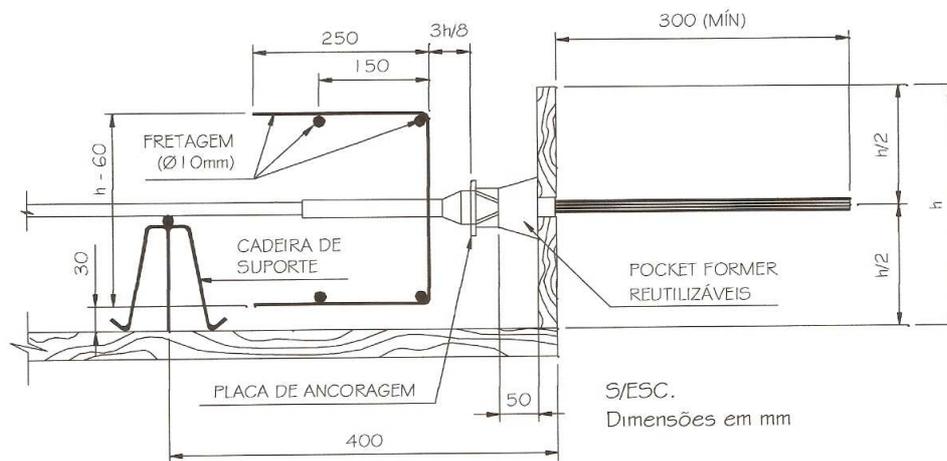


Figura 2.11 – Detalhe da ancoragem.

Fonte: Emerick 2002

- para o caso de monocordoalhas engraxadas utiliza-se como ancoragem passiva uma ancoragem igual à ativa pré-encunhada (pré-blocada).
- o pré-encunhamento das ancoragens passivas deve ser feito com o macaco hidráulico para a força total de protensão prevista no projeto, caso contrário, existirá o risco de escorregamento durante a protensão na extremidade ativa.
- dependendo da topografia, pode ser necessária a construção de uma contenção ao longo do perímetro da edificação, inclusive como elemento de proteção à erosão.
- as pontas excedentes dos cabos devem ser cortadas com oxigênio-acetileno.
- o nicho deverá ser fechado com grout.

-para cargas concentradas ou lineares de grande valor recomendam-se, respectivamente, capitéis ou nervuras invertidas.

3 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

A análise da interação solo-estrutura tem como finalidade fornecer os deslocamentos reais da fundação e seus esforços internos. Esses esforços podem ser obtidos diretamente através da análise da interação ou, indiretamente, por meio das pressões de contato. A determinação das pressões de contato é necessária para o cálculo dos esforços internos no radier, a partir do qual é feito seu dimensionamento estrutural.

Segundo a VSL International LTD (1990) o peso próprio e as cargas horizontais aplicadas pela estrutura resultam em tensões e deformações significantes na região do solo ao redor da fundação. A deformação no solo diminui a medida que a distância entre o ponto considerado e a fundação aumenta, e a região além desta distância exerce uma influência pouco significativa no comportamento global da estrutura. Conseqüentemente, essa região do solo pode ser modelada como rígida.

Na Figura 3.1, a região deformável do solo sob a fundação e a região em volta que pode ser idealizada como rígida são denominadas I e II respectivamente. O limite entre as duas regiões é determinado através de uma análise mais detalhada e a região I pode ser modelada como uma parte do sistema estrutural inteiro.

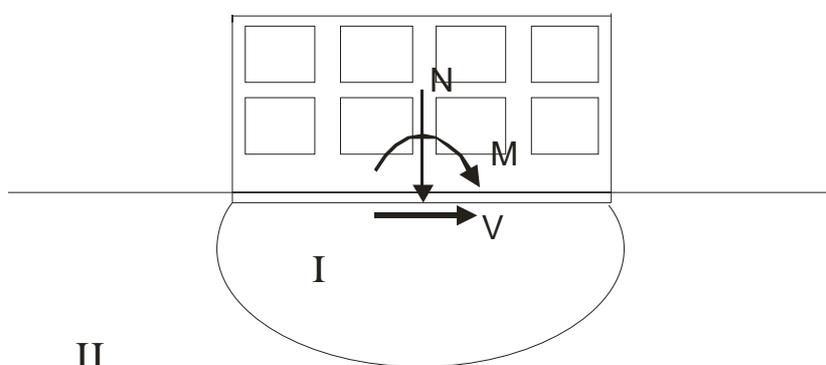


Figura 3.1 – Interação solo-estrutura.

Segundo a VSL International LTD (1990), no primeiro passo a estrutura é analisada assumindo fundação rígida. No segundo passo, as reações determinadas na base da estrutura são aplicadas na fundação e a resultante das forças e momentos são obtidos na base para o dimensionamento da fundação. Dependendo da maneira de determinar a distribuição de pressão no solo, vários métodos podem ser adotados. Esses incluem o método de distribuição de pressão linear no solo, método de fundação elástica simples e avançado e métodos mais sofisticados.

Para fundações relativamente pequenas, o método de distribuição de pressão linear no solo apresenta uma simplificação satisfatória. Para fundações flexíveis e ou relativamente grandes, o método de fundação elástica é mais apropriado. Este método assume que as pressões no solo são proporcionais as determinadas na fundação. A constante de proporcionalidade, k_s , é denominada de módulo de reação do solo. Em geral k_s varia ao longo da fundação. Entretanto, cálculos preliminares com um valor médio da constante é normalmente adotado.

Para solo granular e fundação flexível, os recalques não serão uniformes, com valores máximos ocorrendo perto das extremidades da fundação. Para solo não granular e fundação flexível, os recalques também serão não-uniformes mas o recalque máximo ocorrerá no centro da fundação. Em todo caso, porém, a pressão do solo sob uma fundação flexível tenderá a ser mais uniforme. Do contrário, para uma fundação rígida, os recalques serão mais ou menos uniformes considerando que a distribuição de pressão do solo não será uniforme, com valores de máximo ocorrendo perto do centro da fundação para solos granulares e se aproximando das extremidades para solos não-granulares.

Os valores máximos de k_s ocorrem perto do centro da fundação em solo granular e se aproximam da extremidade da fundação em um solo não-granular. Em todo caso, a distribuição de k_s seria em geral não uniforme.

O método da fundação elástica simples utiliza um valor constante de k_s . Por outro lado, vários métodos de fundação elástica avançada consideram a variação do módulo de reação do solo ao longo da fundação.

O comprimento L , é um parâmetro empregado como estimativa para o tamanho da região de influência de uma carga que age na fundação. Essa medida é proporcional à raiz quarta da razão entre a rigidez da fundação e do solo, então, alterações por fatores iguais a 2 ou 10, na relação da rigidez afetarão o comprimento L por fatores iguais a 1,19 ou 1,78, respectivamente.

Segundo a VSL International LTD (1990), as deformações da fundação são consideradas como contendo ações na estrutura. Como consequência, as reações na base da estrutura mudarão, conduzindo a uma mudança adicional das deformações na fundação. Com técnicas iterativas satisfatórias as pequenas mudanças de reações e deformações poderão ser aproximadas a qualquer grau de precisão desejado.

O projetista não só tem que considerar a transferência de cargas verticais, mas também a transferência de cargas horizontais. Normalmente, a transferência de forças de cisalhamento na base de uma fundação é tornada possível pela fricção do subgrade. Tipicamente, a relação V/N de forças são da ordem de 0.1 ou menos e conseqüentemente a transferência de cargas horizontais não cria em geral dificuldades. Porém, aonde há transferência de carga ou alta resistência, são desejados valores de fricção do subgrade. Baixos valores de fricção do subgrade reduzirão as ações causadas por mudanças volumétricas da fundação. Tais mudanças volumétricas são causadas principalmente por retração e efeitos de temperatura e para um menor grau de protensão e fluência do concreto.

O problema de fricção do subgrade ilustrado na Figura 3.2 onde mostra que um elemento de laje unitário é submetido a uma pressão normal constante, σ , e uma tensão cisalhante, τ . Estas tensões aplicadas são transferidas da laje pela interface da base do elemento para o solo subjacente. Aumentando τ , um deslocamento Δ ocorrerá. Para baixos valores de τ não haverá nenhum deslocamento relativo na interface, o deslocamento inteiro Δ se dará devido à deformação no solo. Sob um valor mais alto de τ , começarão deslocamentos relativos na interface. O aumento de Δ será devido ao deslizamento puro na interface.

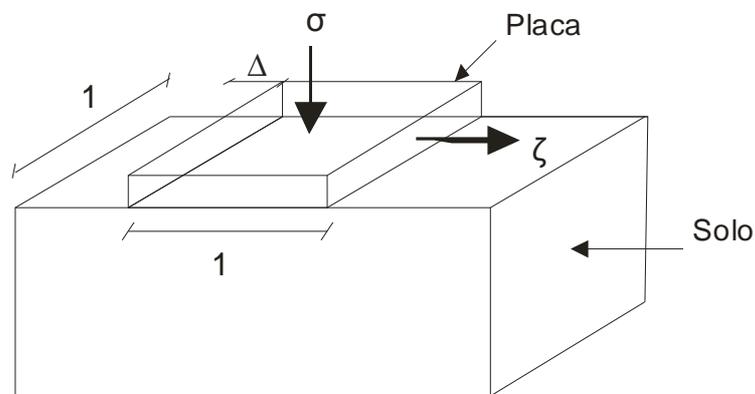


Figura 3.2 – Elemento de laje com dimensões unitárias submetido à tensões normais e cisalhantes.

Para fins práticos, o comportamento não-linear pode ser idealizado. O comportamento rígido-plástico, é frequentemente usado por causa de sua aplicação simples. Para fundações relativamente longas e de baixos coeficientes de fricção, esta idealização promoverá aproximações razoáveis. Um comportamento elasto-plasto, provê uma melhor aproximação da relação cisalhamento/deslocamento atual. O comportamento elasto-plasto corresponde a uma deformação pura do solo e um deslizamento puro na interface, respectivamente. O deslocamento, Δ , pode variar de aproximadamente 0,5 a 2 mm, dependendo do tipo de interface. Para interfaces lisas, o valor de Δ será mais baixo que para interfaces ásperas.

Quanto maior for a rigidez da fundação, mais uniformes serão seus recalques. Se essa fundação receber mais de um pilar, os recalques diferenciais entre pilares serão menores. Pode-se uniformizar os recalques adotando fundações combinadas e enrijecendo-as.

Essa análise de interação solo-estrutura pode ser feita com um método computacional em que um programa de análise de estruturas representa o solo através de molas nos pontos que correspondem a fundação. No presente trabalho, esta análise foi feita utilizando o programa de cálculo estrutural TQS.

3.1 PRESSÕES DE CONTATO

As características das cargas aplicadas constituem o fator mais importante na definição das pressões de contato, uma vez que a resultante dessas pressões deve ser igual e oposta à resultante das cargas. Além disso, a intensidade das cargas também influenciam a distribuição de pressões de contato, uma vez que com o aumento da carga, as pressões nas bordas se mantêm constantes e há um aumento das pressões de contato na parte central.

O segundo fator mais importante é a rigidez relativa entre o radier e o solo. Quanto mais flexível for a fundação, mais as pressões de contato refletirão o carregamento.

Segundo Meyerhof (1953), a rigidez relativa (R_r), em radiers, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$R_r = \frac{E_c \cdot I}{E \cdot B^3} \quad (3.1)$$

onde E_c é o Módulo de Young do material da placa, I é o momento de inércia da seção transversal da placa, por unidade de largura, E é o Módulo de Young do solo e B é a largura da placa.

Schultze (1966) utiliza a seguinte expressão para definir a rigidez relativa R_r :

$$R_r = \frac{E_c \cdot t^3}{E \cdot L^3} \quad (3.2)$$

onde t e L são a espessura e o comprimento da placa, respectivamente.

As propriedades do solo afetam as pressões de contato uma vez que a resistência ao cisalhamento do solo determina as pressões máximas nos bordos.

3.2 CONSTANTES ELÁSTICAS DO SOLO

De acordo com Scarlat (1993), do ponto de vista teórico, o método mais preciso para se considerar a deformabilidade do solo é através de uma análise iterativa tridimensional, na qual o solo e a estrutura são idealizados como um sistema único. Nesse tipo de análise, o solo é considerado até os limites em que os efeitos de tensão possam ser desprezados e, nesse caso, a existência de apoios para os limites não teriam efeito algum sobre a resposta da ISE (Interação solo-estrutura).

Esse tipo de análise é muito sofisticado e requer métodos numéricos, como por exemplo, o Método dos Elementos Finitos. Dessa maneira, esse processo está ao alcance de poucos profissionais, sendo que normalmente é necessária uma grande experiência e a necessidade de um conhecimento aprofundado a respeito de modelos constitutivos. Por esse motivo, tal alternativa tem sido empregada apenas no meio científico e eventualmente no meio prático, quando a importância do problema justifica esse tipo de análise.

Scarlat (1993) relata que uma maneira mais simplificada de quantificar o efeito da deformabilidade dos solos, embora menos precisa que a análise iterativa considerando meio contínuo tridimensional, consiste em considerar uma série de molas discretas sob a base da fundação. Estas molas são representadas pelo coeficiente de apoio elástico K_s (kN/m), que é diretamente proporcional ao módulo de reação k_i (kN/m³) e à área carregada A_f (m²), conforme Eq. (3.3). Assim como Scarlat (1993), Shukla (1984) também apresentam uma abordagem simplificada para a determinação do módulo de reação.

$$k_i = \frac{K_s}{A_f} \quad (3.3)$$

Esse procedimento simplificado é baseado na Hipótese de Winkler e negligencia a interação das molas adjacentes, sendo que os erros tendem a crescer para o caso de solos pouco rígidos. Para o caso de deformação vertical a Hipótese de Winkler é dada pela equação:

$$\sigma(x, y) = k_s^v \cdot w(x, y) \quad (3.4)$$

Onde,

$\sigma(x, y)$ é a tensão de contato média na base da fundação;

$w(x, y)$ é o deslocamento vertical;

k_s^v é o módulo de reação vertical, sendo este valor definido em função do tipo de solo que compõe o maciço de fundação.

Segundo Souza (2006), se for assumido que a base da fundação permanece rígida após a deformação elástica do solo, é possível admitir, de maneira aproximada, uma variação linear das tensões. Conseqüentemente, o conjunto de molas pode ser substituído por três molas globais no centro da fundação, com as seguintes características:

K_v (kN/m) coeficiente de mola para os deslocamentos verticais, w ;

K_h (kN/m) coeficiente de mola para os deslocamentos horizontais, x, y ;

K_θ ($kN.m/rad$) coeficiente de mola para as rotações, (φ, ϖ) .

Os coeficientes de apoio elásticos apresentados anteriormente permitem calcular os deslocamentos a partir da Hipótese de Winkler, conforme ilustram as equações:

$$w = \frac{N}{K_v} = \frac{F}{k_s^v \cdot A_f} \quad (3.5)$$

$$v = \frac{N}{K_h} = \frac{F}{k_s^h \cdot A_f} \quad (3.6)$$

$$\varphi = \frac{M}{K_\theta} = \frac{M}{k_s^\varphi \cdot I_f} \quad (3.7)$$

Normalmente costuma-se assumir $k_s = k_s^v = k_s^s = k_s^\varphi$. Entretanto, vários ensaios têm demonstrado que tais valores são normalmente diferentes. Isso ocorre uma vez que o módulo de reação k_s não é uma constante do solo e depende de uma série de fatores tais como: forma e dimensões da fundação e tipo de construção

Como já foi explicado, representa-se o radier como uma grelha sobre base elástica, ou seja, sobre um sistema de molas, as quais são posicionadas nos nós da grelha. Para o dimensionamento do radier é necessário conhecer a constante elástica (k) da mola, que depende do tipo do solo. Essa constante pode ser determinada através de:

- ensaios de placa;
- tabelas;
- cálculo do recalque da fundação real.

3.2.1 ENSAIO DE PLACA

O ensaio de placa é padronizado pela NBR 6489:1984 e pode ser utilizado para obter parâmetros de deformação, parâmetros de resistência, prever o recalque de uma fundação por extrapolação direta e para obter o coeficiente de reação vertical (k_v).

Segundo a norma brasileira NBR 6489:1984, o ensaio de placa deve ter as seguintes características:

- a cota da superfície de carga deverá sempre ser a mesma que a das eventuais bases do radier da futura fundação;
- placa circular com área de $0,5 \text{ m}^2$, ocupando todo fundo da cava;
- A relação entre a largura e a profundidade do poço para a prova deve ser a mesma que entre a largura e a profundidade da futura fundação;
- ao abrir-se o poço, todos os cuidados serão necessários para evitar alteração do grau de umidade natural e amolgamento do solo na superfície de carga;
- o dispositivo de transmissão de carga deve ser tal que a mesma seja aplicada verticalmente, no centro da placa, e de modo a não produzir choques ou trepidações;
- os recalques devem ser medidos por extensômetros sensíveis a $0,01 \text{ mm}$, colocados em dois pontos diametralmente opostos da placa;
- os dispositivos de referência para medidas de recalque devem estar livres da influência dos movimentos da placa, do terreno circunvizinho, do caixão ou das ancoragens; seus apoios devem achar-se a uma distância igual a pelo menos 1,5 vez o diâmetro ou lado da placa, medida a partir do centro desta última.

3.2.1.1 EXECUÇÃO DA PROVA DE CARGA

Segundo a norma NBR 6489:1984, no ensaio de placa deve-se verificar os seguintes processos:

- carga aplicada à placa em estágios sucessivos de no máximo 20% da taxa admissível provável do solo;
- em cada estágio de carga, os recalques serão lidos imediatamente após a aplicação desta carga e após intervalos de tempo sucessivamente dobrados (1, 2, 4, 8, 15 minutos, etc.). Só será aplicado novo acréscimo de carga depois de verificada a estabilização dos recalques (com tolerância máxima de 5% do recalque total neste estágio, entre leituras sucessivas);
- o ensaio deve ser levado até pelo menos observar-se um recalque total de 25 mm ou até atingir-se o dobro da taxa admitida para o solo;
- a carga máxima alcançada no ensaio, caso não se vá até à ruptura, deve ser mantida pelo menos durante 12 h;
- a descarga deve ser feita em estágios sucessivos, não superiores a 25% da carga total, lendo-se os recalques de maneira idêntica à do carregamento e mantendo-se cada estágio até a estabilização dos recalques, dentro da precisão admitida.

Alguns cuidados são necessários na execução e interpretação dos ensaios de placas, dentre os quais, citam-se:

- Heterogeneidade: caso haja estratificação do terreno, os resultados do ensaio poderão indicar muito pouco do que acontecerá à fundação real;
- Presença de lençol d'água: o recalque de placas em areias submersas pode ser até duas vezes maior que em areias secas ou úmidas;
- Drenagem parcial: em solos argilosos, pode ocorrer adensamento, com isso o recalque observado estará entre o instantâneo e o final ou drenado;
- Não linearidade da curva carga-recalque: pode haver uma forte não linearidade, e pode haver mudança de comportamento quando o carregamento atinge a tensão de pré-adensamento.

Como resultados do ensaio é apresentada uma curva pressão-recalque onde figuram as observações feitas no início e no fim de cada estágio de carga, com indicação dos tempos decorridos.

Quando o objetivo é obter o coeficiente de reação vertical, k_v , considerando que a relação pressão-recalque é linear (para métodos de análise de fundações que utilizam a Hipótese de Winkler), aplica-se:

$$k_v = \frac{q}{w} \quad (3.8)$$

A não-linearidade dessa relação pode ser levada em consideração em métodos de cálculo sofisticados, que representam o solo por uma mola não linear. Alguns cuidados permitem a consideração da não linearidade da relação pressão-recalque. É quando o k_v é obtido na faixa de pressões prevista.

Antes de ser utilizado, o k_v precisa ser corrigido para a forma e as dimensões da fundação real. O coeficiente de reação não é uma propriedade apenas do solo, mas também da forma (I_s) e da dimensão (B) da fundação. Sendo assim, para um meio elástico homogêneo e semi-infinito tem-se:

$$k_v = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{I_s} \frac{1}{B} \quad (3.9)$$

Onde:

B – menor dimensão do radier

ν – Coeficiente de Poisson

E – Módulo de Young

I_s – fator de forma do radier e de sua rigidez

Segundo Velloso & Lopes (2004), o módulo de reação vertical definido com ensaios de placa pode ser corrigido em função da dimensão e da forma da fundação real, conforme ilustram as equações 3.10 (para solos arenosos) e 3.11 (para solos argilosos).

$$(k_s^v)_{fundação} = (k_s^v)_{placa} \left(\frac{B_{fundação} + B_{placa}}{2B_{fundação}} \right)^2 \quad (3.10)$$

$$(k_s^v)_{fundação} = (k_s^v)_{placa} \cdot \frac{A_{placa}}{A_{fundação}} \quad (3.11)$$

Onde,

$B_{fundação}$ – largura do radier;

B_{placa} – largura da placa;

$A_{fundação}$ – área da fundação;

A_{placa} – área da placa.

3.2.2 USO DE TABELAS

É possível obter os valores da constante elástica na literatura. A tabela 3.1 apresenta os valores sugeridos por Terzaghi (1955) para a constante elástica de solos argilosos e arenosos. Os valores de k_v em uma placa quadrada de 1 pé (ks_1) são os seguintes:

Tabela 3-1 – Módulo de reação do solo ks_1 em kgf/cm^3 (Terzaghi, 1955).

Argilas	Rija	Muito Rija	Dura
Qu (kgf/cm^2)	1 – 2	2 – 4	> 4
Faixa de valores	1,6 – 3,2	3,2 – 6,4	> 6,4
Valor proposto	2,4	4,8	9,6
Areias	Fofa	Méd. Compacta	Compacta
Faixa de valores	0,6 – 1,9	1,9 – 9,6	9,6 – 32
Areia acima N. A.	1,3	4,2	16
Areia submersa	0,8	2,6	9,6

Estes valores apresentados na literatura e por ensaios de placa devem ser corrigidos de acordo com a forma e a dimensão da placa. Este coeficiente é uma resposta do solo a um carregamento aplicado por uma determinada estrutura e não uma propriedade apenas do solo.

Segundo o American Concrete Institute (1988), a transformação do ks_1 obtido no ensaio de placa para o k_v , que é utilizado no cálculo da fundação pode ser feita com:

$$k_v = ks_1 \cdot \left(\frac{b}{B}\right)^n \quad (3.12)$$

onde n é um coeficiente que varia entre 0,5 e 0,7. No caso do radier, o valor de B é muito grande causando um k_v pequeno.

A tabela 3.2 foi adaptada do American Concrete Institute e apresenta o intervalo da constante elástica k em função dos limites de variação do CBR para cada tipo de solo classificado.

Tabela 3-2 – Módulo de reação k em kgf/cm³ (ACI, 1997).

SOLO	CBR		k (kgf/cm ³)		
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
FINO	OH	2,0	5,0	0,77	3,32
	CH	2,0	5,0	0,77	3,32
	MH	2,5	8,0	1,36	4,82
	OL	2,0	8,0	0,77	4,82
	ML	3,0	15,0	1,85	7,13
	CL	3,0	15,0	1,85	7,13
	GROSSO	SC	10,0	20,0	5,59
SU		10,0	20,0	5,59	8,33
SP		15,0	25,0	7,13	9,33
SM		20,0	40,0	8,33	11,66
SW		20,0	40,0	8,33	11,66
GC		20,0	40,0	8,33	11,66
GU		25,0	50,0	9,33	12,89
GP		35,0	60,0	10,97	13,94
GM		40,0	80,0	11,66	15,73
GW		60,0	80,0	13,94	15,73

Legenda:

G – pedregulho

S – areia

M – sedimento

C – argila

W – bem graduado

P – pobremente graduado

U – uniformemente graduado

L – baixa a média compressibilidade

H – alta compressibilidade

O – orgânico

Na ausência de dados experimentais apropriados, Moraes (1972) recomenda utilizar os valores da Tabela 3.3 para a adoção dos valores do módulo de reação vertical k_s .

Tabela 3-3 – Valores do módulo de reação vertical k_s (Moraes, 1972).

Tipo de Solo	k_s (kN/m³)
Turfa leve - solo pantanoso	5.000 a 10.000
Turfa pesada – solo pantanoso	10.000 a 15.000
Areia fina de praia	10.000 a 15.000
Aterro de silte, de areia e cascalho	10.000 a 20.000
Argila molhada	20.000 a 30.000
Argila úmida	40.000 a 50.000
Argila seca	60.000 a 80.000
Argila seca endurecida	100.000
Silte compactado com areia e pedra	80.000 a 100.000
Silte compactado com areia e muita pedra	100.000 a 120.000
Cascalho miúdo com areia fina	80.000 a 120.000
Cascalho médio com areia fina	100.000 a 120.000
Cascalho grosso com areia grossa	120.000 a 150.000
Cascalho grosso com pouca areia	150.000 a 200.000
Cascalho grosso com pouca areia compactada	200.000 a 250.000

3.2.3 DETERMINAÇÃO A PARTIR DE CÁLCULO DO RECALQUE DA FUNDAÇÃO REAL

Os procedimentos para o cálculo de recalques podem ser separados em dois grupos: cálculo direto e indireto.

O cálculo direto pode ser feito através da Teoria da Elasticidade ou por métodos numéricos, como Método dos Elementos Finitos e Método dos Elementos de Contorno.

No cálculo do recalque pelo procedimento indireto segue-se o seguinte procedimento:

- Divisão do terreno em subcamadas, em função das propriedades dos materiais (nas mudanças de material, iniciam-se novas subcamadas) ou de proximidade da carga ou de variação no estado de tensão – (subcamadas devem ser menos espessas onde são maiores as variações no estado de tensão).

- Cálculo no ponto médio de cada subcamada e na vertical do ponto onde se deseja conhecer o recalque das tensões iniciais e o acréscimo de tensão, por solução da Teoria da Elasticidade.

- Combinando, no ponto médio de cada subcamada, as tensões iniciais, o acréscimo de tensões e as propriedades de deformação da subcamada, obtém-se a deformação média da subcamada, ε_z . O produto da deformação pela espessura da camada, Δh , fornece a parcela de recalque da subcamada, ou seja:

$$\Delta w = \varepsilon_z \cdot \Delta h \quad (3.13)$$

- Somando-se as parcelas de recalques das subcamadas, obtém-se o recalque total:

$$w = \sum \Delta w \quad (3.14)$$

Com um carregamento vertical igual ao somatório das cargas verticais e com o recalque obtido pela expressão anterior (considerado médio), calcula-se o coeficiente de reação através da seguinte expressão:

$$k_v = \frac{\bar{q}}{w} \quad (3.15)$$

onde:

$$\bar{q} = \Sigma V / A \quad (3.16)$$

Permitindo levar em conta as propriedades das diferentes camadas submetidas a diferentes solicitações, o que não acontece nos procedimentos anteriores.

Nota-se que a modelagem do radier considerando-se apoios elásticos depende essencialmente da definição apropriada da rigidez da mola. No capítulo seguinte serão apresentados alguns modelos de cálculo para fundação do tipo radier, com a utilização da constante elástica, representando a interação solo-estrutura.

4 MODELOS DE CÁLCULO

Os métodos de cálculo de radier abrangem os procedimentos de avaliação da estabilidade, capacidade de suporte, distribuição de tensões e/ou esforços internos solicitantes, os quais são os parâmetros necessários para a avaliação dos estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS).

Essencialmente, busca-se a solução da equação diferencial de equilíbrio de uma placa sobre base elástica.

4.1 ESTABILIDADE E CAPACIDADE DE PORTE DO RADIER

O radier precisa combater o recalque excessivo, que pode ser de longo tempo (consolidação) ou ocorrência rápida (elástica ou imediata).

Segundo Montoya (1987), no projeto de um radier deve-se procurar que a resultante das ações transmitidas pela estrutura passe o mais perto possível do centro de gravidade do radier com a finalidade de conseguir uma distribuição de tensões no solo o mais uniforme possível e evitar recalques diferenciais, gerando a inclinação da edificação. Recomenda-se que, para qualquer hipótese de carga, a resultante esteja dentro da zona de segurança do radier. Caso essa condição não seja atendida, necessitará um estudo da distribuição de tensões sob o radier, avaliando com todo rigor os recalques e determinando as inclinações que podem ocorrer na edificação. O recalque máximo de um radier não deve passar de 5 cm se o radier estiver apoiado sobre solo sem coesão (arenoso), nem de 7,5 cm se apoiado sobre solo coesivo (argiloso).

4.2 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES E CÁLCULO DE ESFORÇOS

A distribuição de tensões no terreno sob o radier é necessária para o cálculo dos esforços na mesma. Tensões estas que não são fáceis de se obter. Supõe-se uma distribuição uniforme de tensões no terreno que conduz, dadas as dimensões do radier, a uma estimativa dos esforços gerando uma economia do mesmo.

Um procedimento correto é o cálculo do radier sobre base elástica, aonde substitui-se a placa por uma malha sobre apoios elásticos equivalente. É conveniente que os pilares coincidam com os nós da malha e que as nervuras, se existirem, coincidam com as vigas fictícias. Cada nó é considerado apoiado em uma mola, cuja constante elástica é obtida multiplicando-se o coeficiente do solo pela área do pilar da mesma que corresponde a cada nó. Aplicam-se cargas dos pilares nos nós correspondentes e, em seguida, resolve-se o modelo estrutural utilizando programas como Elementos Finitos, Diferenças Finitas, com a finalidade de se obter os momentos fletores e torçores e os esforços cortantes, que serão utilizados no dimensionamento. Também são obtidos os deslocamentos em pontos distintos do radier, os quais são empregados na verificação do recalque.

4.3 MÉTODOS DE CÁLCULO

Segundo Velloso e Lopes (2004), os métodos de cálculo de fundação do tipo radier são: Método Estático, Sistema de Vigas Sobre Base Elástica, Método da Placa Sobre Solo de Winkler, Método do American Concrete Institute, Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos.

4.3.1 MÉTODO ESTÁTICO

Admite-se que a distribuição da pressão de contato varia linearmente sob o radier (radiers rígidos), denominado cálculo com variação linear de pressões ou que as pressões são uniformes nas áreas de influencia dos pilares (radiers flexíveis), conhecido como cálculo pela área de influência dos pilares.

Este método é indicado apenas para o cálculo dos esforços internos na fundação para seu dimensionamento, pois só leva em conta o equilíbrio da reação do terreno e das

cargas atuantes, com isso não é possível fazer uma avaliação da distribuição de recalques.

Cálculo com variação linear de pressões – neste cálculo, as pressões de contato são determinadas a partir da resultante do carregamento. Utiliza-se este método para cálculo de radiers nervurados e em caixão, que apresentam grande rigidez relativa.

As faixas são calculadas como vigas de fundação independentes.

Cálculo pela área de influência dos pilares – aplicado em radiers de rigidez relativa média. Este método segue o seguinte procedimento:

1. determinar a área de influência de cada pilar, A_f
2. calcular a pressão média nesta área

$$q_i = \frac{Q_i}{A_f} \quad (4.1)$$

3. determinar uma pressão média atuando nos painéis
4. calcular os esforços nas lajes e vigas e as reações nos apoios, se estas reações forem muito diferentes das cargas nos pilares, deve-se redefinir as pressões médias nos painéis.

4.3.2 MÉTODO DA PLACA SOBRE SOLO DE WINKLER

Na hipótese de Winkler, as pressões de contato são proporcionais aos recalques, como foi apresentado na equação 3.8.

Neste método, o deslocamento de uma placa delgada, considerando uma região distante dos carregamentos e assente sobre um sistema de molas, é calculada pela Eq. (4.2):

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2 \cdot \partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + k \cdot w = 0 \quad (4.2)$$

onde D é a rigidez à flexão da placa, calculada por:

$$D = \frac{E_c \cdot t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4.3)$$

onde t é a espessura da placa, E_c é o Módulo de Young do material da placa e ν é o Coeficiente de Poisson do material da placa.

4.3.2.1 MÉTODO DO AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (A.C.I.)

Este método se baseia na hipótese de Winkler e é aplicado em radiers lisos e flexíveis. Calculam-se os momentos fletores e os esforços cortantes em cada ponto da placa gerados por cada pilar. Em seguida somam-se as ações de cada pilar nos pontos em estudo.

Seqüência de procedimentos do método:

- 1- Cálculo da rigidez à flexão da placa D (Equação 4.3);
- 2- Escolhe-se um número de pontos na placa para o cálculo dos esforços;
- 3- Calculam-se os momentos fletores, convertendo para coordenadas retangulares;
- 4- Calcula-se o esforço cortante em coordenadas retangulares.

Os passos 3 a 4 são repetidos para cada pilar e os resultados são somados algebricamente.

4.3.3 SISTEMA DE VIGAS SOBRE BASE ELÁSTICA

No cálculo desse sistema, separa-se o radier em dois sistemas de faixas ortogonais, de acordo com a geometria do radier e a distribuição dos pilares, onde cada faixa é tratada como uma viga de fundação isolada sobre base elástica, utilizando a hipótese de Winkler, apresentada no item 4.3.2. Em cada direção de estudo, deve-se tomar a totalidade da carga nos pilares.

4.3.4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Consiste na resolução de um sistema de equações algébricas, onde relaciona-se o deslocamento de um ponto aos deslocamentos de pontos vizinhos. Na placa é gerada uma malha, onde nos cruzamentos estão os pontos em estudo.

Quando se tem uma carga concentrada em um ponto da placa, substitui-se por uma carga distribuída equivalente. Se a carga não atua exatamente em um nó da placa, basta distribuí-la nos nós vizinhos.

Abaixo, a equação diferencial de flexão da placa, incluindo uma sobrecarga uniforme p e uma carga concentrada P , em termos de diferenças finitas:

$$\frac{\Delta^4 w_k}{\Delta x^4} + \frac{2\Delta^4 w_k}{\Delta x^2 \Delta y^2} + \frac{\Delta^4 w_k}{\Delta y^4} = \frac{p_k}{D} - \frac{k_v w_k}{D} + \frac{P}{D\Delta x \Delta y} \quad (4.12)$$

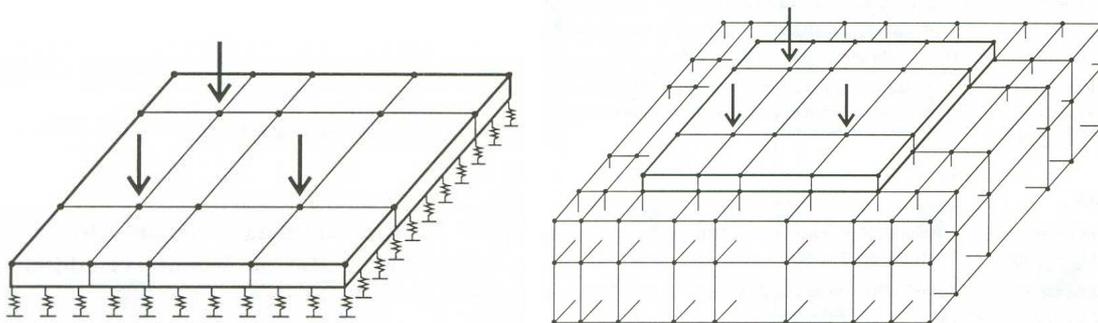
Algumas desvantagens do método segundo Bowles (1982):

- a aplicação das condições de contorno exigem subrotinas adicionais;
- é difícil simular furos, reentrâncias e entalhes;
- é difícil considerar momentos aplicados nos nós.

4.3.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Este método consiste no emprego de funções aproximadas para representar o campo de deslocamentos em cada elemento. A continuidade do meio é garantida impondo-se condições de compatibilidade de deslocamentos e rotações nos nós dos elementos adjacentes.

O radier é discretizado em elementos de placa sobre apoios elásticos que representam a rigidez do solo (figura 4.1a). Uma outra estratégia de modelagem do sistema, mais complexa, consiste em representar o radier por elementos de placa e representar o solo por elementos sólidos (figura 4.1b). Neste modelo pode-se levar em conta a heterogeneidade do solo.



(a) Elementos de placa sobre apoio elástico

(b) Elementos de placa sobre elementos sólidos

Figura 4.1 – Estratégias de modelagem do sistema estrutural pelo MEF.

O método permite a análise de placas com geometrias mais complicadas e uma variação do solo num plano horizontal. No caso em estudo, faixas do radier são substituídas por elementos retilíneos unidimensionais, conduzindo a um modelo de grelha.

Os resultados obtidos neste método é influenciado pelo refinamento da malha e pelo tipo de elemento finito utilizado.

Algumas vantagens do método segundo Bowles (1982):

- permite considerar qualquer condição de contorno;
- fácil de programar para reentrâncias e furos;
- facilmente adaptável para placas circulares.

4.4 ANALOGIA DE GRELHA

Segundo Barboza (1992), a técnica de analogia de grelha foi usada pioneiramente por Lightfoot e Sawko em 1959. Com a constatação que os procedimentos de análise para pórticos planos e grelhas pelo método dos deslocamentos eram parecidos e as equações básicas de compatibilidade de deformações eram muito similares nos dois casos, eles procuraram adaptar um programa para cálculo de pórtico plano e utilizaram-no para cálculo de grelha.

A analogia de grelha é um método bastante usado para análise de lajes, principalmente devido a sua facilidade de compreensão e utilização, e tem apresentado resultados satisfatórios para uma grande quantidade de pavimentos (Stramandinoli 2003).

O método consiste em substituir o radier por uma grelha equivalente composta de elementos do tipo barra, onde cada barra representa uma faixa determinada da laje conforme a abertura escolhida para a malha (figura 4.2), no caso da protensão, nestas barras estarão compreendidas as cordoalhas na faixa escolhida.

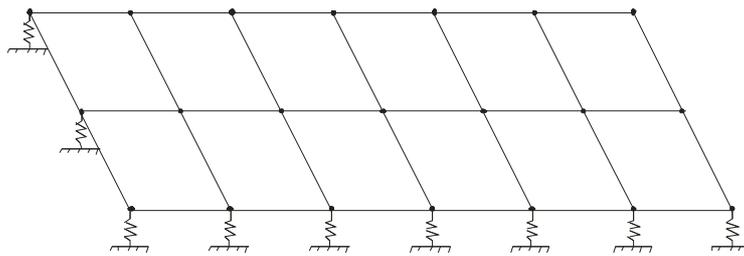


Figura 4.2 – Representação de uma grelha sobre base elástica.

Segundo Hambly (1976), a rigidez a torção em toda a região do radier é assumida pela superposição de análises concentrando-se em uma barra de grelha equivalente. A rigidez longitudinal do radier é concentrada nas barras longitudinais e a rigidez transversal é concentrada nas barras transversais. Idealmente a rigidez da barra será semelhante quando, dado um protótipo do radier e a grelha equivalente submetidos a cargas idênticas, as duas estruturas apresentarem deslocamentos idênticos e esforços internos equivalentes. Ou seja, os momentos fletores, forças de cisalhamento e

momentos torçores nas barras da grelha terão resultantes de tensão iguais na seção transversal correspondente do radier à barra representada.

Na grelha, não há princípio matemático ou físico que faça com que os momentos torçores sejam automaticamente iguais nas direções ortogonais em um nó. Se a discretização da malha for muito grande, a grelha se deformará e apresentará distorções aproximadamente iguais nas direções ortogonais, bem como momentos torçores aproximadamente iguais se as rigidezes à torção forem às mesmas nas duas direções.

O momento fletor em qualquer barra da grelha só é proporcional a sua curvatura. Em um elemento de laje, o momento em qualquer direção depende tanto da curvatura naquela direção, quanto da curvatura na direção ortogonal.

A vinculação das barras permite a interação de forças ortogonais ao plano da grelha e de dois momentos em torno dos eixos pertencentes a esse plano por nó da barra. Cada nó apresenta três graus de liberdade, sendo uma translação ortogonal e duas rotações no plano do radier.

4.4.1 MALHA DA GRELHA

Os raders possuem geometrias variadas, assim como formas diferentes de carregamentos, dessa forma, não é possível definir uma malha ideal. No entanto é possível adotar alguns critérios para raders retangulares, que devem ser adequados a cada projeto (Hambly 1976).

Crítérios que devem ser levados em consideração na discretização da malha da grelha para obtenção dos esforços no radier:

- Quanto mais discretizada for a malha, melhores serão os resultados obtidos. Estes resultados deixam de ser satisfatórios quando a largura das barras for menor que 2 ou 3 vezes a espessura do radier.
- Nas regiões aonde há grande concentração de esforços, como cargas concentradas, recomenda-se adotar uma malha cuja largura das barras não seja maior que 3 ou 4 vezes a espessura da laje.
- Os espaçamentos das barras da grelha, em cada direção não devem ser muito diferentes, para que haja uma uniformidade na distribuição dos carregamentos.
- É necessário colocar uma linha de barras no contorno do radier, diminuindo a largura para o cálculo do momento de inércia a torção de $0,3h$, por se tratar do ponto onde passa a resultante das tensões de cisalhamento devidas à torção.

4.4.2 CARREGAMENTO DAS BARRAS

O carregamento no radier, provenientes de pilares, alvenaria estrutural, peso próprio e cargas acidentais, podem ser representado de diversas formas, através de carregamentos uniformemente distribuídos ou cargas concentradas.

Segundo Almeida (2002), as cargas aplicadas no radier são distribuídas entre os elementos de grelha equivalente, de acordo com a área de influência de cada uma. Podem ser consideradas uniformemente distribuídas ao longo dos elementos, ou dentro de um certo grau de aproximação, concentradas nos nós, quando há grande refinamento da discretização. Neste caso, pode-se utilizar o processo de áreas de influência, onde cada carga a uma distância menor ou igual a metade do comprimento da barra, em ambas as direções, é levada diretamente ao nó, ou seja:

$$Q_i = (g + q) \cdot A_f \quad (4.13)$$

Onde,

g – é a carga permanente aplicada na laje, por unidade de área;

q – é a carga acidental aplicada na laje, por unidade de área;

A_f – é a área de influência do nó i ;

Q_i – é a carga aplicada no nó i da grelha.

As cargas concentradas são aplicadas diretamente nos nós (figura 4.3).

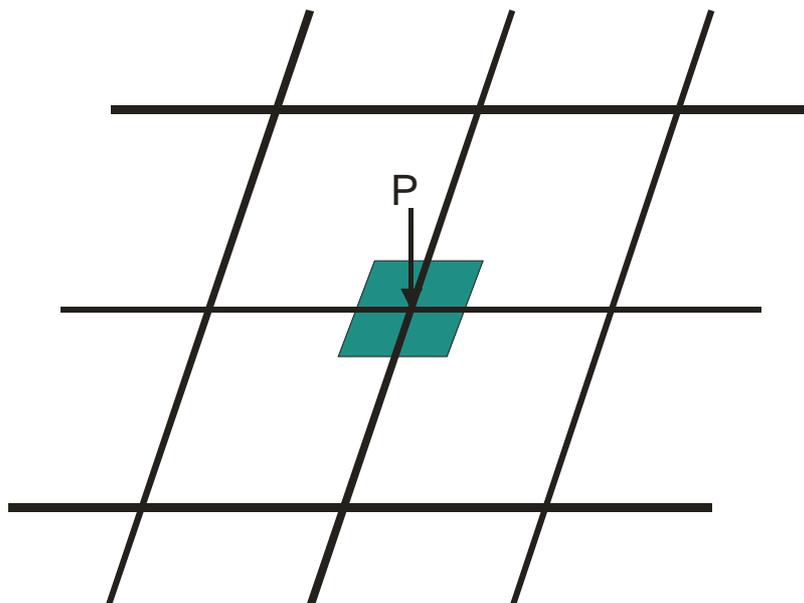


Figura 4.3 – Aplicação de carga concentrada na grelha.

4.4.3 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E FÍSICAS DAS BARRAS

As propriedades das barras (figura 4.4) influenciam diretamente no resultados. Cada faixa da grelha irá representar uma faixa da placa, apresentando a espessura da laje e a largura, a qual é dependente da malha da grelha. Portanto, as barras devem apresentar propriedades que representem geométrica e fisicamente a placa em estudo.

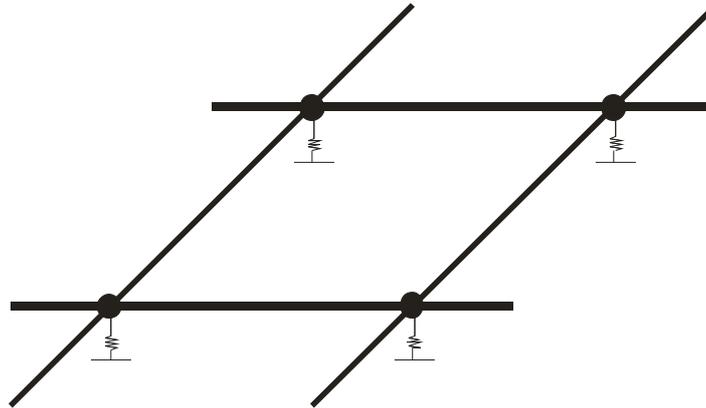


Figura 4.4 – Barras da grelha.

As propriedades físicas das barras dependem do material da placa. Neste trabalho, serão analisadas placas em concreto armado, sendo necessário definir o módulo de deformação longitudinal E , e o módulo de deformação ao cisalhamento G . O valor de G é obtido diretamente, através de relação definida pela Resistência dos Materiais, dependendo unicamente do valor do coeficiente de Poisson e do módulo de deformação longitudinal.

O módulo de deformação longitudinal a ser adotado para o concreto armado é o módulo secante do concreto E_{cs} . Segundo a norma brasileira de estruturas de concreto NBR 6118:2003, o módulo de deformação longitudinal do concreto E_{cs} é definido pela expressão que segue:

$$E_{cs} = 0,85.E_{ci} \quad (4.14)$$

onde E_{ci} é o módulo tangente, dado por

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (4.15)$$

e f_{ck} é o valor característico da resistência à compressão do concreto, em MPa.

A relação que define o valor do módulo de deformação ao cisalhamento G , de acordo com o valor de ν e E adotados, para materiais isotrópicos em estado plano de tensões, é dada por:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.16)$$

As propriedades geométricas dos elementos de grelha podem ser consideradas a partir de uma faixa de largura b , igual a soma da metade das distâncias entre os elementos vizinhos, e da espessura h da laje (Figura 4.5).

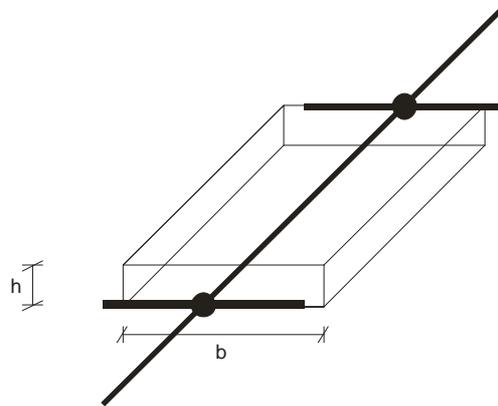


Figura 4.5 – Representação de um elemento de grelha.

Os momentos de inércia à flexão (I) e torção (J) são, portanto, calculados para uma seção retangular de dimensões $b \times h$, como segue:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.17)$$

$$J = \frac{3 \cdot b^3 \cdot h^3}{10 \cdot (b^2 + h^2)} \quad (4.18)$$

4.4.4 ESFORÇOS NAS BARRAS

O carregamento atuante nas barras provoca rotações e deslocamentos horizontais, bem como esforços nodais. Os esforços nodais que surgem nas barras são três (Figura 4.6):

- Momentos fletores, no sentido do eixo da barra – m ;
- Esforços cortantes, no sentido do eixo z – v ;
- Momentos torçores, no sentido transversal ao eixo da barra – t .

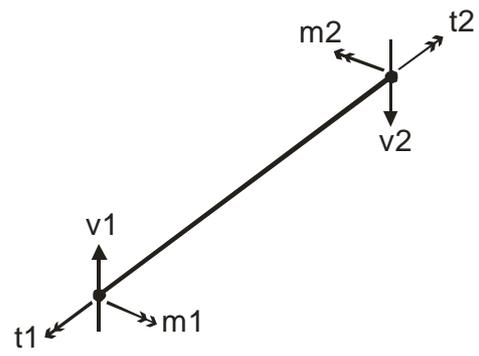


Figura 4.6 – Esforços atuantes nas barras.

5 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL AUTOMATIZADA EMPREGANDO ANALOGIA DE GRELHA

Serão apresentados os procedimentos de análise estrutural automatizada de radier em concreto armado e protendido, empregando-se o método de cálculo de analogia de grelha sobre base elástica. Esses procedimentos consistem na modelagem da geometria, aplicação de carregamentos, definição dos parâmetros elásticos do solo e discretização da grelha. Nesse trabalho, foi empregado o Sistema TQS para concreto estrutural que consiste numa seqüência de programas bastante utilizado no projeto de edifícios e que possibilita meios de cálculo de fundação do tipo radier em concreto armado e em concreto protendido utilizando analogia de grelha, considerando o radier sobre base elástica. Por não ser uma ferramenta específica para este tipo de elemento estrutural e sim um sistema geral para análise de estruturas, faz-se necessário algumas adaptações na geração do modelo. Apresenta-se neste capítulo uma seqüência de procedimentos a ser seguida permitindo a aplicação do programa na análise de fundação tipo radier.

5.1 RADIER EM CONCRETO ARMADO

O programa funciona da seguinte forma: primeiro define-se o modelo estrutural (figura 5.1), que contem informações referentes ao radier, como dimensões (largura, comprimento e espessura da placa) e carregamentos (no caso carregamentos lineares provenientes da alvenaria estrutural). Em seguida defini-se que o modelo se trata de uma placa sobre base elástica, é quando atribui-se um valor para a constante elástica.

Para se obter o processamento da planta de forma, gerando o modelo do radier para o lançamento da malha de barras que corresponde a grelha se faz necessário inserir um pilar de dimensões mínimas, que não existe no modelo real, atribuindo-se a ele a mesma constante elástica de mola dos nós adotados na grelha, sem esta consideração o programa simplesmente não reconhece o equilíbrio da placa. Na figura 5.1 corresponde ao pilar P1 inserido no eixo da placa.

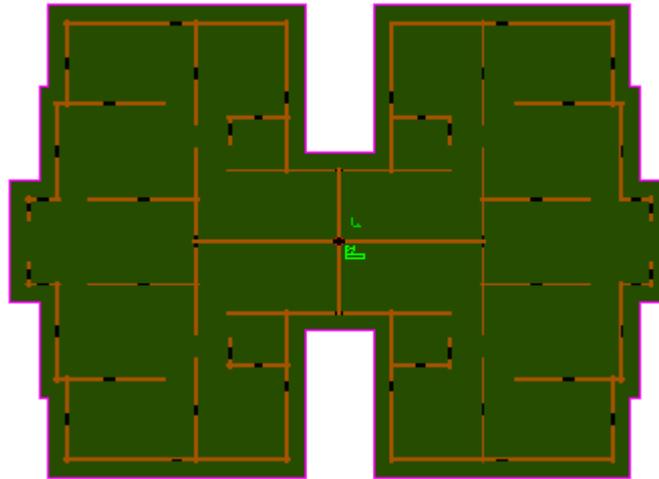


Figura 5.1 – Modelo estrutural.

Um critério de fundamental importância é a determinação da espessura do radier. Inicialmente adota-se uma espessura e processa-se o modelo, depois analisa-se os resultados, se estes forem satisfatórios, mantém-se a espessura, se não é necessário aumentar ou diminuir a espessura da placa.

Depois que o modelo foi definido, executa-se o processamento da planta de forma e gera-se o desenho desta planta de forma. Com a forma processada, é necessário gerar a grelha, aonde define-se o espaçamento das barras, através dos critérios de laje plana. Em seguida o desenho da grelha é gerado (figura 5.2) com seus dados e os esforços resultantes são transferidos para o dimensionamento do radier.

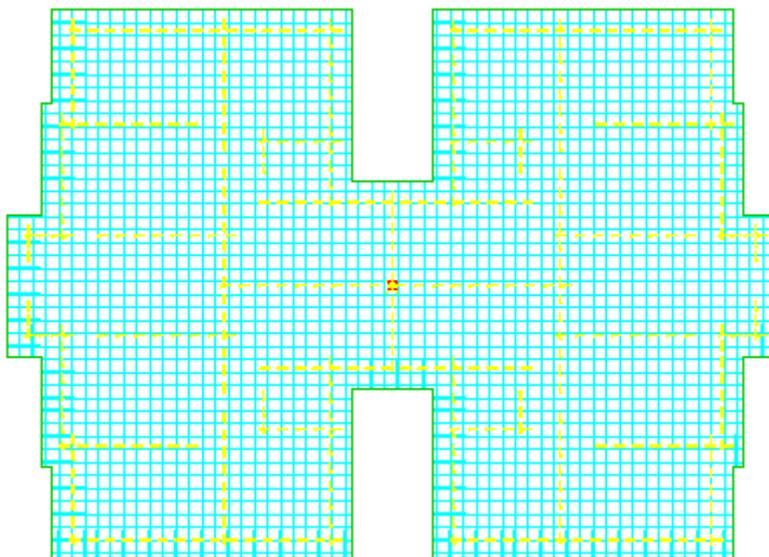


Figura 5.2 – Modelo de grelha.

O Editor de Esforços e Armaduras tem por objetivo o detalhamento automático de lajes maciças, planas, calculadas por processo simplificado, grelha (utilizado no presente trabalho) ou elementos finitos.

O cálculo de esforços em lajes, normalmente, resulta numa variedade de esforços e de armaduras teóricas para suportá-los. É possível distribuir armaduras automaticamente, mas isto tornaria as armaduras excessivas ou de difícil execução.

Com o Editor de Esforços, é possível definir faixas de distribuição de armaduras homogêneas (figura 5.3), que ao mesmo tempo sejam econômicas e de fácil execução na obra.

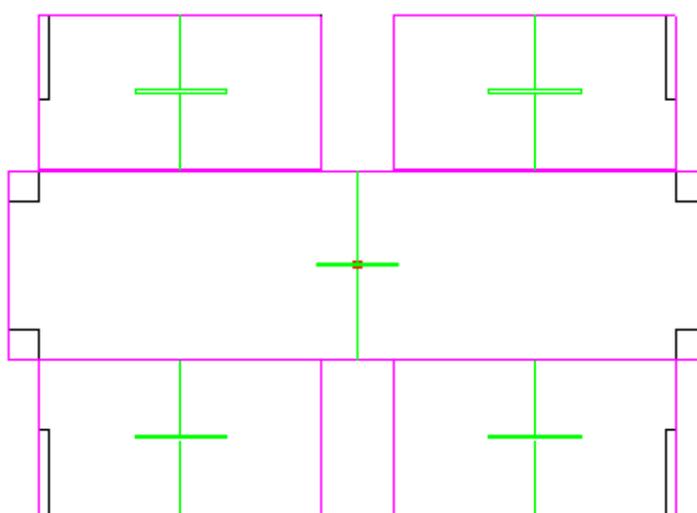


Figura 5.3 – Faixas de distribuição de armadura.

Definidas as faixas de distribuição de esforços, o detalhamento de armaduras é automático dentro dos critérios adotados (figura 5.4). As armaduras geradas dentro do editor podem ser editadas antes do desenho final ser gravado.

CAD/Lajes - Edição dos critérios de projeto - Grelha/Elementos finitos

Critérios Gerais | Concreto | Aço | Flexão | Nervuradas | Treliçadas | Cisalhamento | Punção | Homogeneização

Identificação do Projetista

Coeficiente de majoração de esforços

Cobrimento geral cm

Cobrimento alternativo p/ dobras cm

Cobrimentos

Figura 5.4 – Critérios de Projeto adotados segundo a NBR 6118:2003.

Depois de definidos todos os critérios de projeto processa-se o modelo para a obtenção dos esforços no radier como é mostrado na figura 5.5.

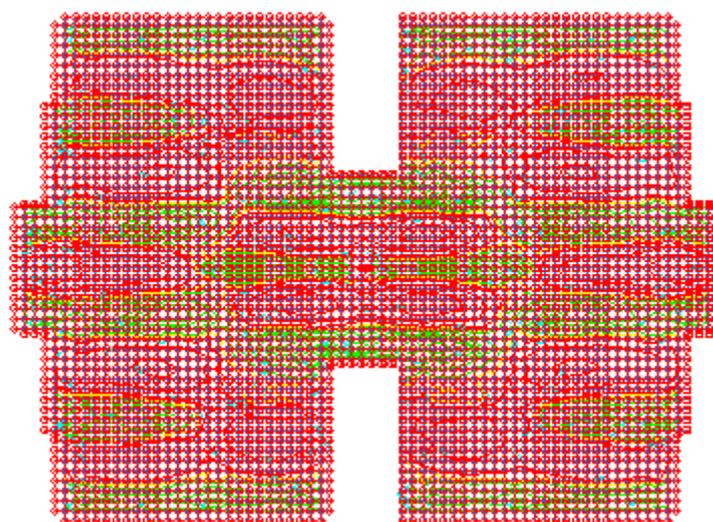


Figura 5.5 – Esforços no radier.

Ao processar o modelo, o programa calcula e apresenta o desenho das armaduras do radier (figura 5.6).

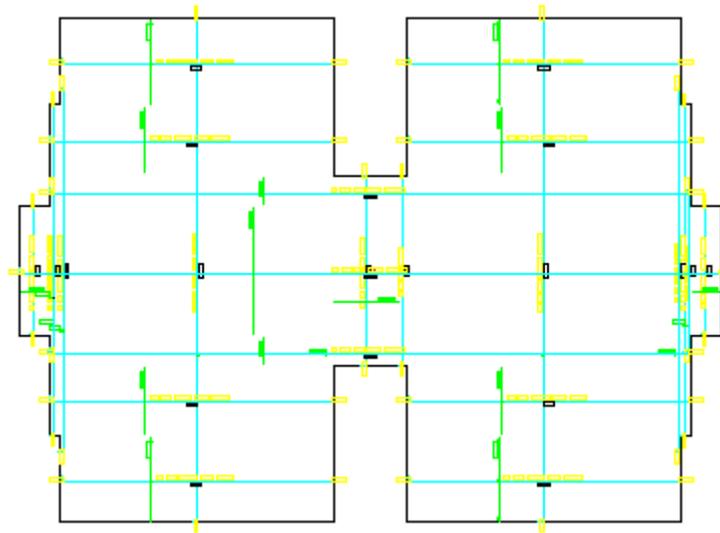


Figura 5.6 – Armadura do radier.

No caso do exemplo modelado em concreto armado, obtêm-se os seguintes resultados:

- esforços atuantes na placa para cada tipo de carregamento;
- cálculo das armaduras positivas e negativas;
- tabela de ferro, com a quantidade detalhada;
- desenhos com o detalhamento das armaduras.

5.1.1 ETAPAS DE UM PROJETO

As etapas envolvidas em um projeto de radier em concreto armado são as seguintes:

- definição da forma, onde são definidos a distribuição e orientação dos carregamentos lineares e definida a espessura do radier;
- especificação dos materiais a serem empregados (aços e concreto);
- definição dos diferentes casos de carregamentos atuantes sobre a laje;
- definição das faixas de distribuição das armaduras;
- discretização da laje através de elementos de grelha;
- definição da constante elástica no nó da grelha (Capítulo 3);
- processamento do modelo para cálculo dos esforços e detalhamento das armaduras;
- análise dos resultados.

5.2 RADIER EM CONCRETO PROTENDIDO

A aplicação de protensão em lajes tem crescido muito no Brasil, mas em uma escala menor que em países como os Estados Unidos, Canadá, Austrália e alguns países da Europa. Isso se deve a falta de ferramentas computacionais que possibilitem a elaboração de projetos de lajes protendidas com a mesma presteza daquelas disponíveis para elaboração de projetos em concreto armado.

No caso do exemplo modelado em concreto protendido, obtêm-se os seguintes resultados:

- sugestão de quantidades de cabos, com seu respectivo perfil para cada região de protensão uniforme.
- cálculo de tensões, quantidade de armadura passiva necessária e verificação de fissuração.
- planta de cabos com ancoragem correspondente e relatório de interferência entre cabos de protensão.
- perfis dos cabos em planta e tabela do aço de protensão utilizado.
- transferência de dados para editor de esforços e armaduras para o detalhamento da armadura passiva.
- cálculo do hiperestático de protensão na grelha e as deformações devido às forças de alívio provocadas pelos cabos.
- desenho do cabo em planta e em perfil e a armadura passiva.

5.2.1 ETAPAS DO PROJETO

As etapas envolvidas na criação de um projeto de laje protendida são as seguintes:

- definição da forma, onde são definidos a distribuição e orientação dos carregamentos lineares e definida a espessura do radier;
- especificação dos materiais a serem empregados, como o aço e o concreto (item 2.5.1);
- definição dos diferentes casos de carregamentos atuantes sobre a laje. No presente trabalho utilizou-se carregamentos lineares provenientes da alvenaria, devido ao estudo de edificações do tipo PAR que são executadas em alvenaria estrutural (item 4.4.1);

- discretização da laje através de elementos de grelha. É necessário definir o espaçamento das barras da grelha (seção 4.4);
- definição da constante elástica no nó da grelha de acordo com o solo (figura 5.7), utilizando tabelas da bibliografia estudada como foi visto no capítulo anterior;
- cálculo dos deslocamentos e esforços solicitantes, sem a consideração da protensão;
- definição e edição das variáveis contidas no arquivo de critérios de protensão;
- determinação de regiões (em planta) delimitadas por linhas poligonais que possuirão a mesma protensão (RPU) (item 5.2.3);
- dimensionamento da protensão que abrange a definição do número, da bitola, e do traçado dos cabos em elevação, além de sua distribuição em planta. No presente trabalho o estudo foi feito com o cabo reto, que é muito utilizado em fundações do tipo radier para edificações do tipo PAR;
- cálculo dos efeitos (momentos) hiperestáticos da protensão;
- verificação do atendimento das seguintes condições: compressão excessiva no ato da protensão; descompressão para a combinação quase-permanente; estado limite de abertura de fissuras para a combinação frequente de ações; estado limite último à solicitações normais que corresponde ao cálculo da armadura passiva necessária à flexão;
- detalhamento da armadura passiva relativa à flexão;
- geração dos desenhos dos cabos em planta e em perfil;
- cotagem dos cabos para verificação de interferências;
- extração de lista de cabos de protensão e armadura convencional, dados necessários para análise da viabilidade deste projeto.

Para a análise de radier em concreto protendido utilizando o cabo reto, foi necessário calibrar o cobrimento da armadura de protensão para que esta situação seja atendida.

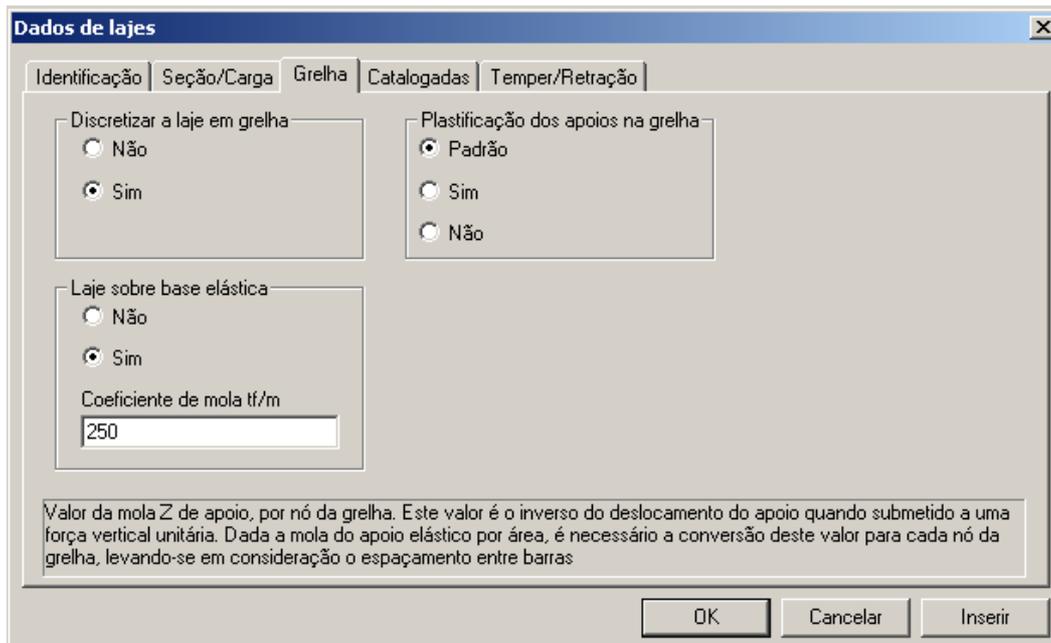


Figura 5.7 – Definição da constante elástica.

No presente trabalho foram definidos os critérios do modelo utilizando concreto protendido com cordoalhas engraxadas como mostra a figura 5.8. O programa foi concebido apenas para os casos de protensão parcial. Por se tratar de uma estrutura em contato com o solo, foi adotado para o Radier uma abertura de fissura igual a 0,01 mm, simulando um caso de protensão completa.

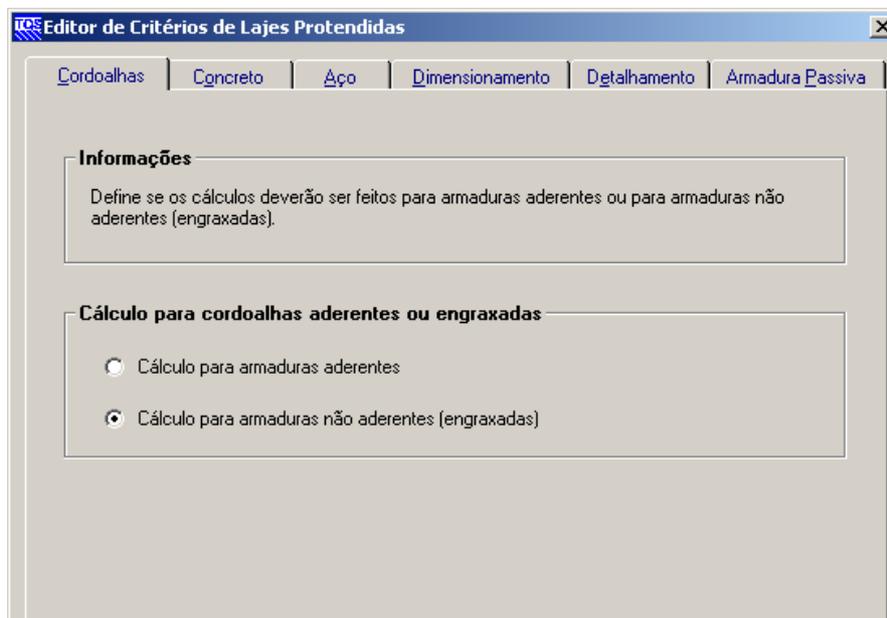


Figura 5.8 – Critérios do modelo utilizando protensão.

5.2.2 MODELO DE CÁLCULO

O módulo de protensão adota o modelo de grelha na análise estática das lajes protendidas. A determinação dos deslocamentos, esforços e reações, resultantes da aplicação das diversas combinações de carregamento sobre o radier, é realizada através de tal modelo, supondo-o com comportamento elástico linear.

Partindo-se de um determinado espaçamento, a discretização do radier é realizada automaticamente. Nessa discretização, os elementos de barra da grelha são orientados segundo os eixos X e Y do radier (figura 5.9). Deste modo, as barras podem ser classificadas como horizontal, paralela ao eixo X do radier, ou como vertical, paralela ao eixo Y do radier.

Espaçamento entre barras verticais (cm):	<input type="text" value="35"/>
Espaçamento entre barras horizontais (cm):	<input type="text" value="35"/>
Direção principal (graus):	<input checked="" type="radio"/> Única <input type="radio"/> Por laje <input type="text" value="0"/>
Origem X da malha (cm):	<input type="text" value="0"/>
Origem Y da malha (cm):	<input type="text" value="0"/>

Figura 5.9 – Definição do espaçamento das barras.

Durante as fases de lançamento dos cabos e de verificações, é possível editar os diagramas de momentos resultantes da análise de grelha, corrigindo distorções decorrentes do modelo que julgue existir.

5.2.3 REGIÕES DE PROTENSÃO UNIFORME E REGIÕES DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS

Estas regiões são definidas para o lançamento da cablagem e para a verificação e o dimensionamento à flexão do radier.

A região de protensão uniforme (RPU) é definida como uma região poligonal do radier para o qual são adotados iguais espaçamentos, diâmetro, força de protensão e traçado para todos os cabos contidos nesta região (figura 5.10).

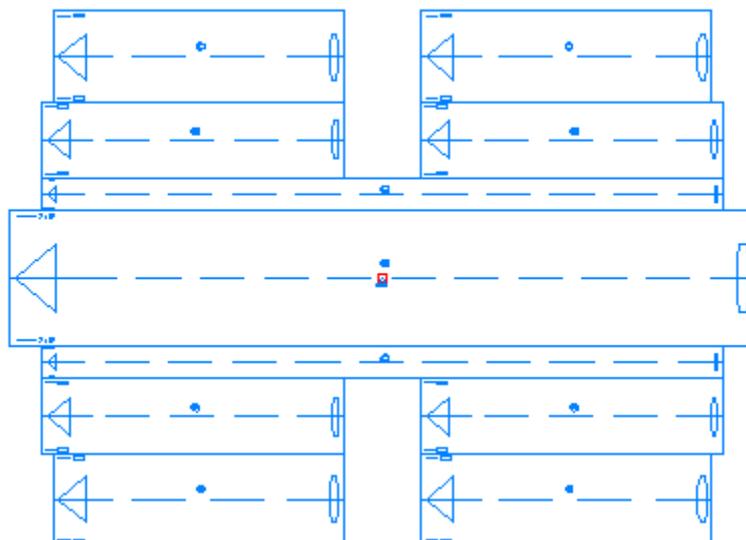


Figura 5.10 – Regiões de protensão uniforme.

Define-se como região de transferência de esforços (RTE), como sendo uma região poligonal do radier, que contém uma ou diversas RPU's e que determinam a região para extração das solicitações (momentos fletores) para as RPU's e as dimensões da seção transversal que serão empregadas no dimensionamento. Basicamente as RPU's determinam a região para o desenho dos cabos e a RTE determina a região de influência da protensão contida nas diversas RPU's que pertencem a esta RTE.

Os cabos de protensão são distribuídos paralelamente a um dos lados da RPU ao qual é associada (figura 5.11).

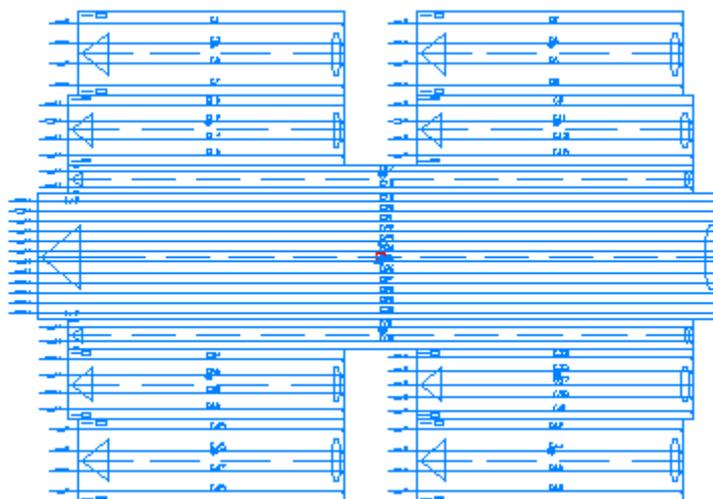


Figura 5.11 – Distribuição dos cabos.

Para cada RPU tem-se apenas um traçado de cabo. Além disto, o cabo deve iniciar no começo da RPU e terminar no fim da RPU.

5.3 CRITÉRIOS DE GRELHA

É possível definir todos os critérios para geração da grelha utilizando o modelo de laje plana como pode-se observar na figura 5.12.

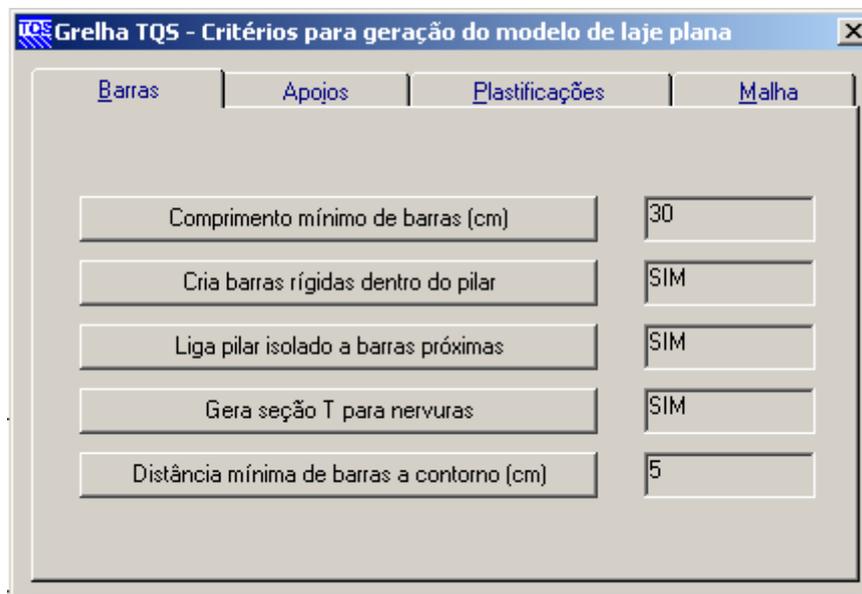


Figura 5.12 – Critérios da grelha.

Alem de editar os critérios para o modelo de laje plana como foi mostrado, pode-se editar os critérios gerais de grelha como mostra a figura 5.13.

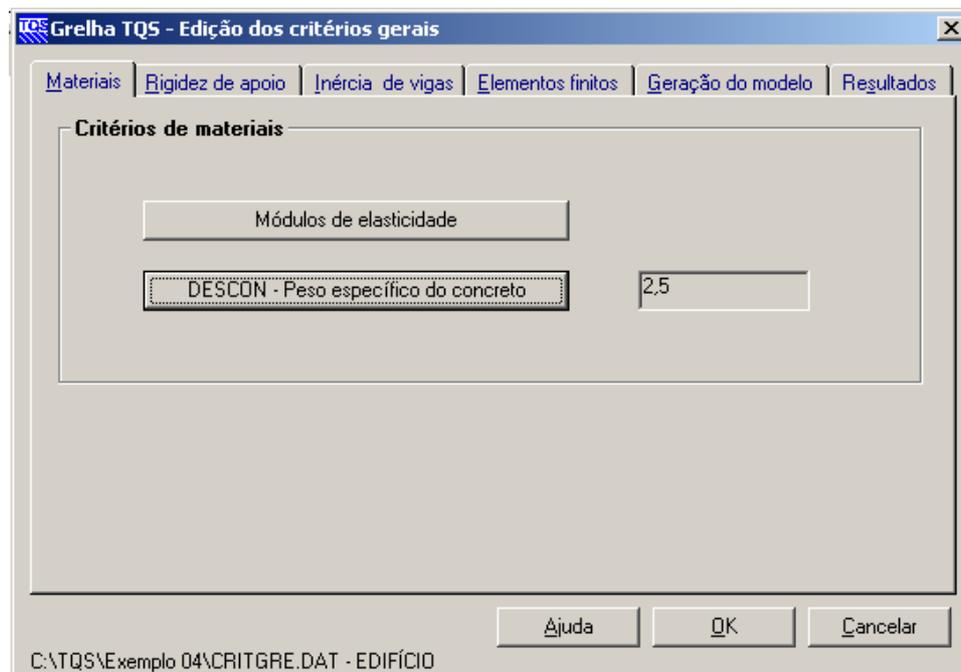


Figura 5.13 – Critérios gerais de grelha.

No editor é possível definir os critérios para o material utilizado, como o coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade longitudinal e transversal (item 4.4.2). Define-se também o espaçamento das barras da grelha como foi visto no item 5.2.2.

Estes critérios são de fundamental importância para que o modelo apresente resultados coerentes.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como exposto anteriormente, o uso do sistema computacional escolhido permitiu, com base nos procedimentos de entrada de dados e modelagem estrutural apresentados, obter os esforços no radier calculados através da analogia de grelha sobre base elástica, bem como a quantidade e o detalhamento das armaduras para um radier em concreto armado ou protendido. Os valores da quantidade de armadura serão utilizados como parâmetro de comparação entre essas duas alternativas nos exemplos apresentados no Capítulo seguinte com o objetivo de verificar qual método é mais viável. Comprovando ou não que o radier em concreto protendido é mais vantajoso economicamente. Uma outra análise que será feita é quanto à utilização do cabo reto em radier protendido.

6 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo apresentam-se exemplos de dimensionamento de radier em concreto armado e em concreto protendido. Será empregado o modelo de analogia de grelha sobre base elástica para modelagem do radier e do solo. O modelo estrutural será elaborado e processado empregando-se o sistema CAD/TQS, o qual fornece a quantidade de material para comparação dos resultados. Os exemplos correspondem a obras executadas.

6.1 EXEMPLO 01

Neste exemplo foi analisado, como pode ser observado na figura 6.1, uma edificação residencial com 3 pavimentos construído na Cidade de Fortaleza.

A resistência do concreto à compressão foi adotada igual ao valor mínimo estabelecido na NBR 6118:2003. Para classe de agressividade II (moderada urbana), esse valor mínimo é igual a 25 MPa para concreto armado e 30 MPa para concreto protendido.

As cargas lineares provenientes da alvenaria estrutural foram calculadas e lançadas no modelo em tf/m. Foram consideradas cargas distribuídas no radier provenientes das ações permanentes e acidentais iguais a 1 tf/m² e 0,15 tf/m², respectivamente.

No projeto estrutural original definiu-se uma espessura de 15 cm para o radier em concreto protendido, que foi mantida no modelo elaborado. Para o radier em concreto armado, adotou-se uma espessura igual a 20 cm, para compensar a resistência à compressão relativamente inferior. A razão entre a espessura do radier em concreto

armado e protendido é de 0,75, portanto, próximo do valor sugerido por Cauduru (2000) (item 2.5.2).

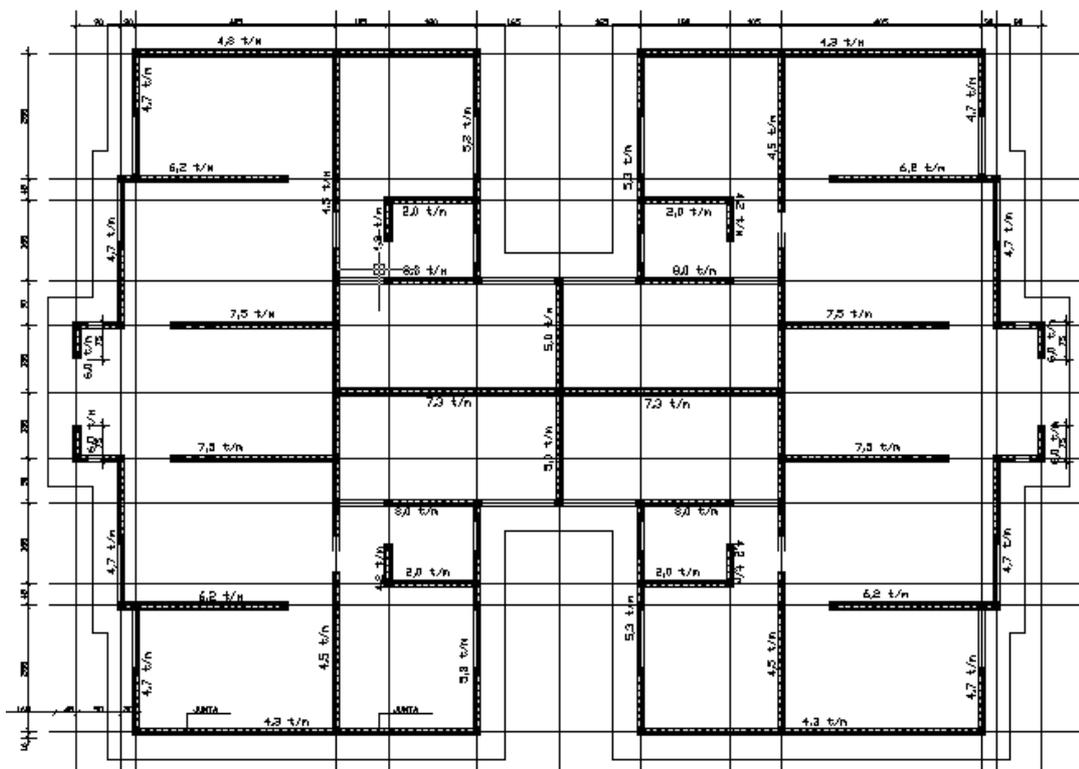


Figura 6.1 – Planta do radier com os carregamentos das paredes.

No estudo, a grelha foi discretizada primeiramente com espaçamento regular nas duas direções igual a 100 cm. Para o solo foi admitida uma argila rija com módulo de reação igual a 2400 tf/m^3 , que é o valor médio proposto por Terzaghi (1955) para esse solo (tabela 3.1). Em seguida, o valor do módulo de reação foi corrigido utilizando a equação 3.12, chegando-se ao valor de $339,4 \text{ tf/m}^3$. Considerando-se o espaçamento entre as barras da grelha (1m), obtém-se um valor de constante elástica igual a $339,4 \text{ tf/m}$ (Eq. 3.3).

Após a calibração do modelo estrutural com os critérios estabelecidos acima, o modelo foi processado como mostra a figura 6.2, na qual observa-se a placa com os carregamentos provenientes da alvenaria aplicados.

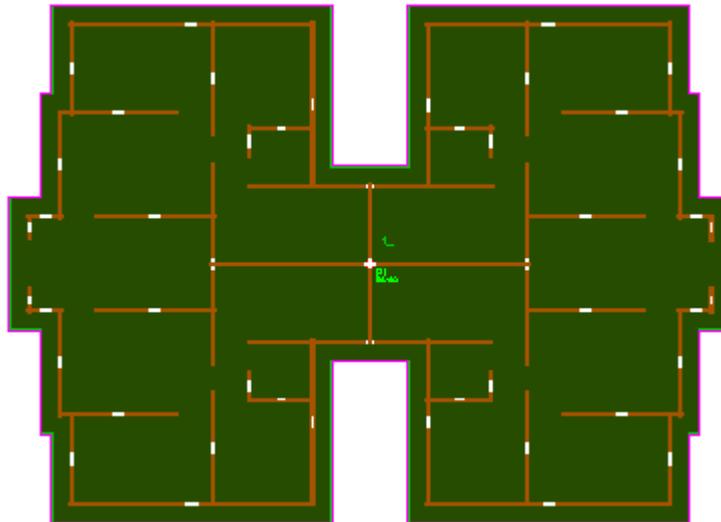


Figura 6.2 – Modelo estrutural do exemplo de caso.

Com o modelo estrutural processado, gerou-se a grelha com o espaçamento de barra igual a 100 cm (figura 6.3) e com a colocação de uma mola em cada nó da grelha representando a base elástica. Após a geração da grelha, cada barra fornece as dimensões da seção transversal e os carregamentos aplicados. Os procedimentos de processamento do modelo estrutural e de geração da grelha são utilizados para os dois casos: concreto armado e concreto protendido.

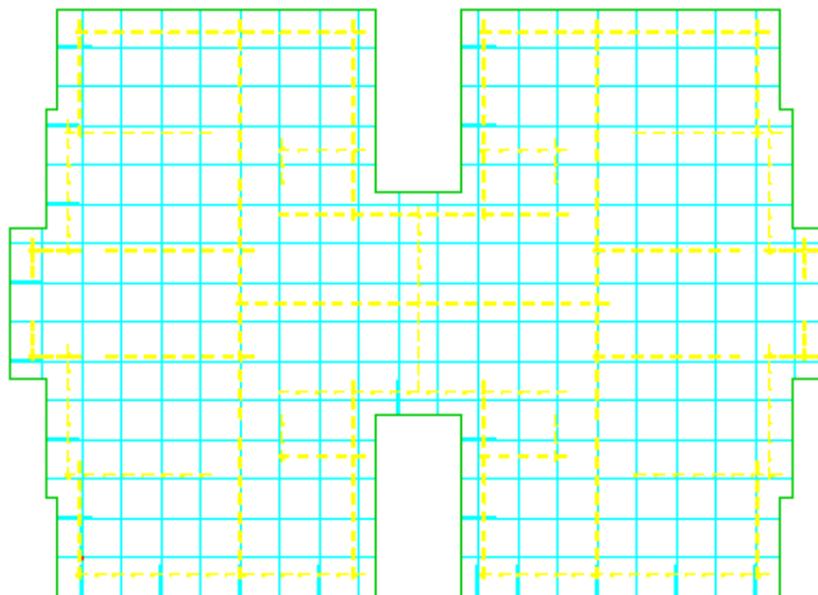


Figura 6.3 – Geração da grelha – espaçamento de 100 cm.

Após o processamento da grelha, como mostrado na Figura 6.4, que apresenta a representação dos momentos fletores, observou-se que os resultados apresentados não foram consistentes, pois identificou-se a falta de simetria na distribuição dos esforços, visto que a distribuição de cargas e o lançamento da grelha são simétricos. Isto foi atribuído a discretização adotada. No caso de concreto protendido, com esta malha ocorreram regiões de protensão uniforme que não continham barra da grelha impossibilitando a geração dos cabos.

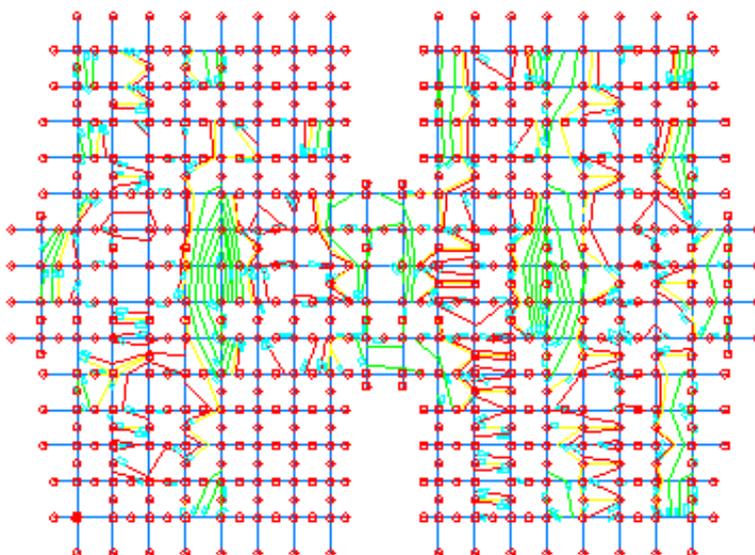


Figura 6.4 – Representação dos momentos na grelha.

Em seguida, a grelha foi discretizada com espaçamento de barras de 30 cm, (figura 6.5) valor este proposto por Hambly (1976), de acordo com a espessura da placa adotada para o radier em concreto protendido. Com o espaçamento adotado chegou-se ao valor de 30,54 tf/m para a constante elástica.

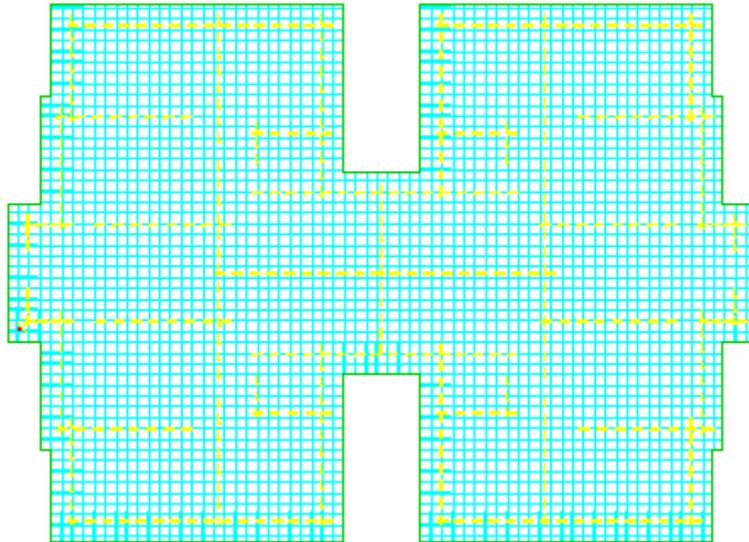


Figura 6.5 – Geração da grelha – espaçamento de 30 cm.

Com o espaçamento de barra de 30 cm, o modelo apresentou resultados coerentes, aonde percebe-se a simetria na distribuição de momentos e nos deslocamentos como mostra a figura 6.6 e 6.7.

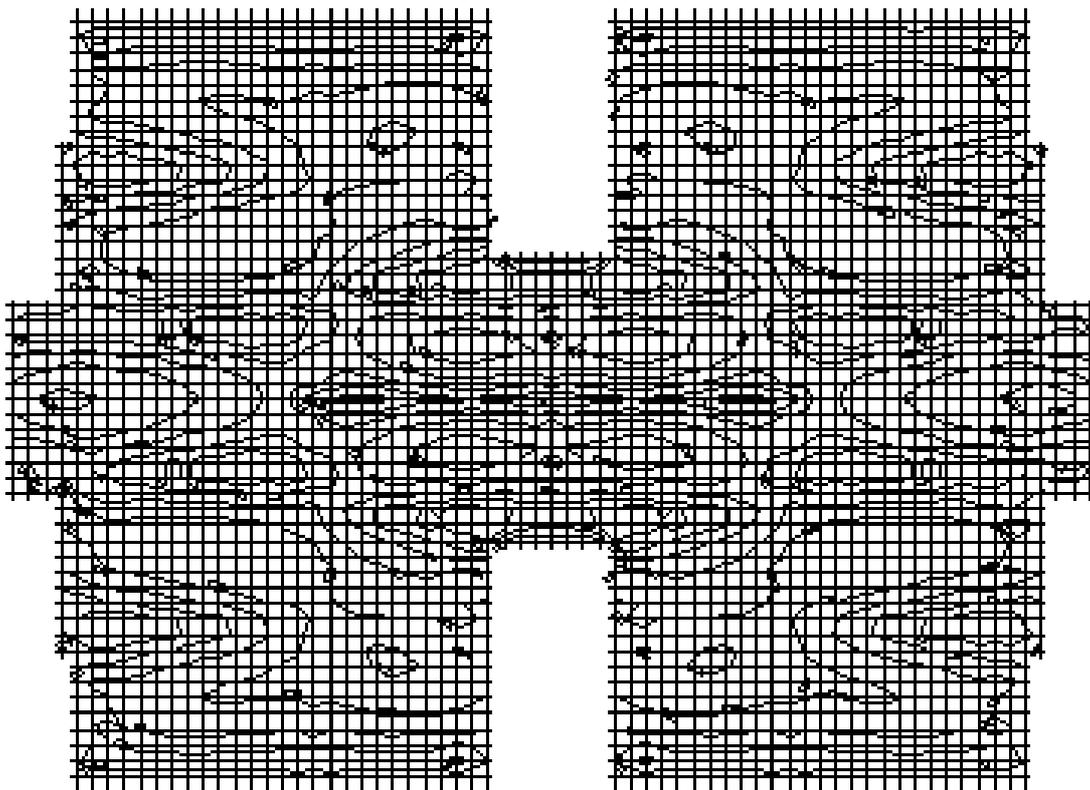


Figura 6.6 - Representação dos momentos na grelha.

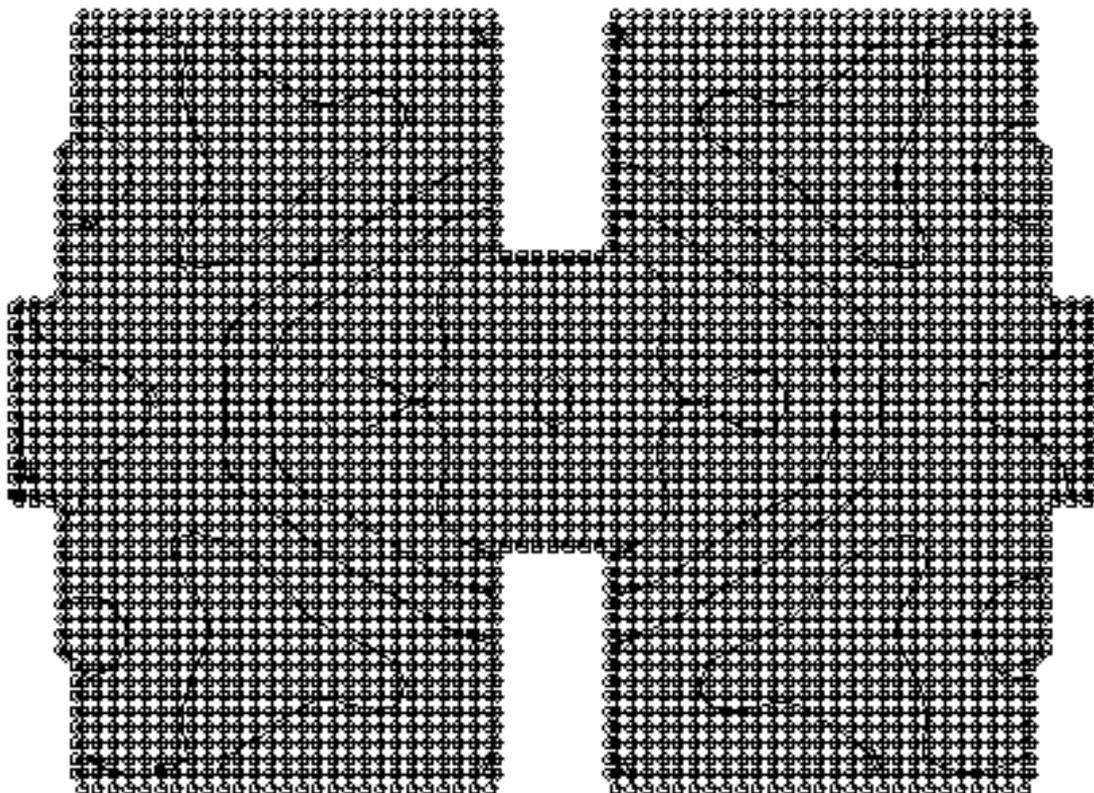


Figura 6.7 - Representação dos deslocamentos na grelha

Para o mesmo exemplo, utilizando concreto armado, adotou-se 20 cm de espessura da placa, logo o espaçamento das barras foi alterado para 40 cm (figura 6.8). Devido a mudança na discretização da grelha, o valor da constante elástica foi modificado para 54,3 tf/m.

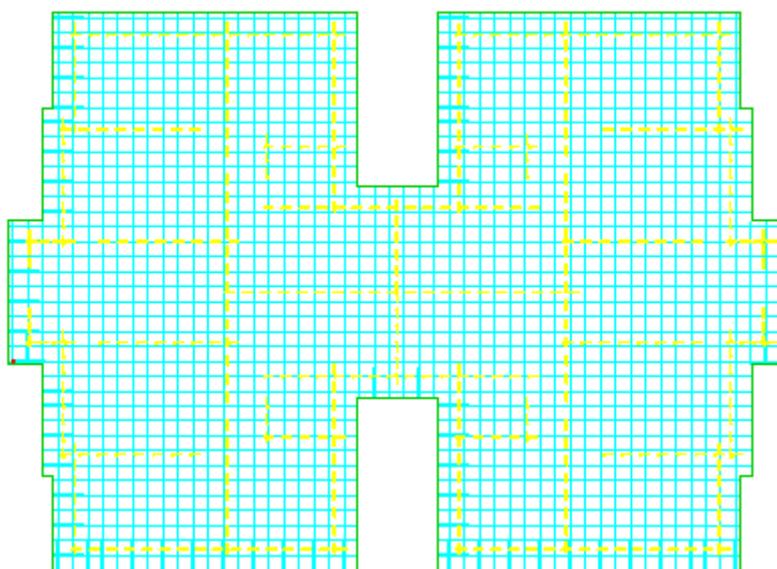


Figura 6.8 – Geração da grelha – espaçamento de 40 cm.

6.1.1 CONCRETO ARMADO

Para o dimensionamento do radier em concreto armado são definidas faixas de armadura homogênea nas direções X e Y, visando a economia de material e a facilidade na execução (figura 6.9).

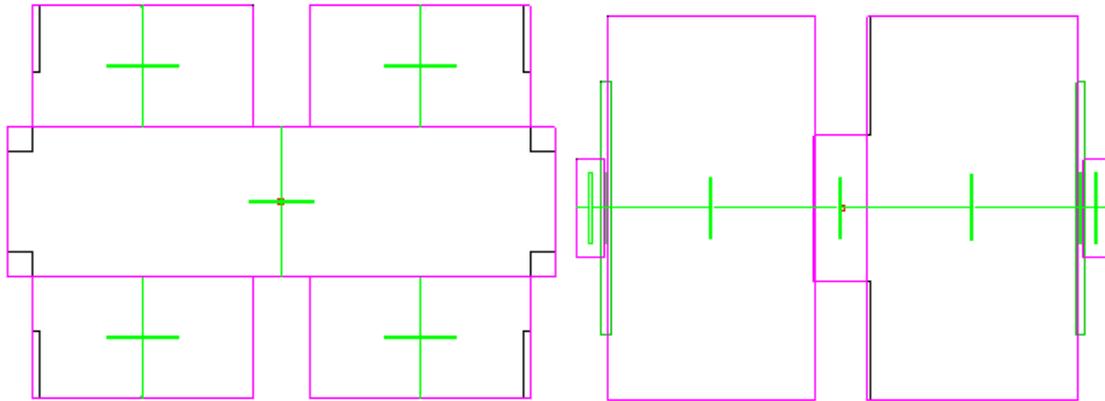


Figura 6.9 – Faixas de armadura homogênea nas direções X e Y.

Com a grade gerada e com as faixas definidas, foi feito o cálculo das armaduras positivas e negativas do radier e gerou-se os detalhamentos, conforme apresentado na figura 6.10 e 6.11.

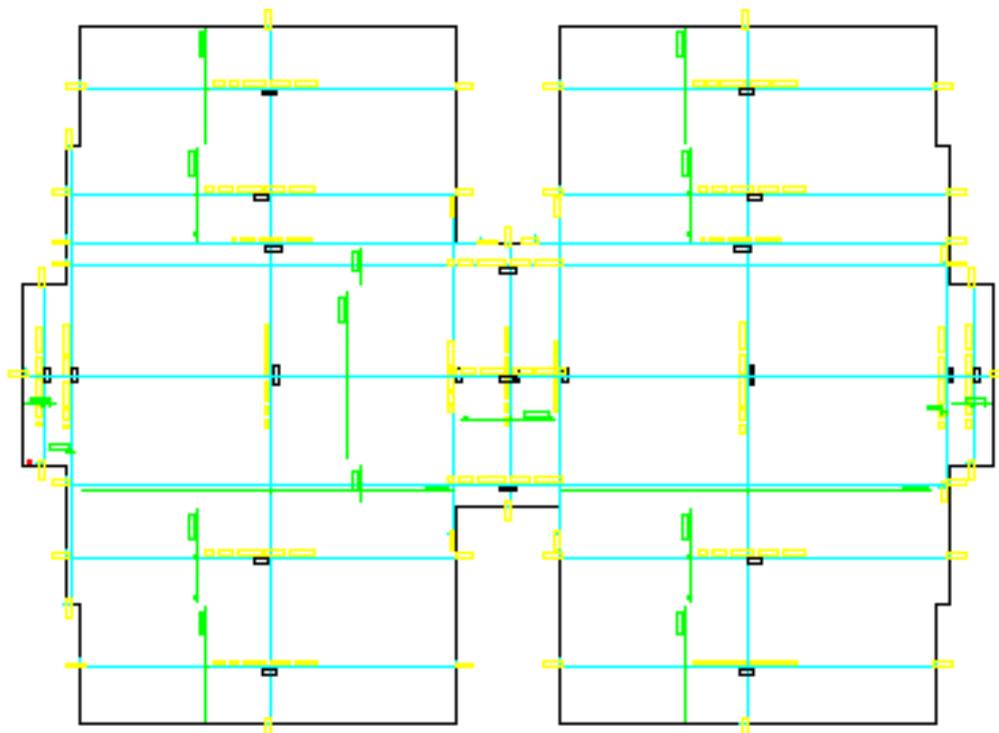


Figura 6.10 – Armadura positiva.

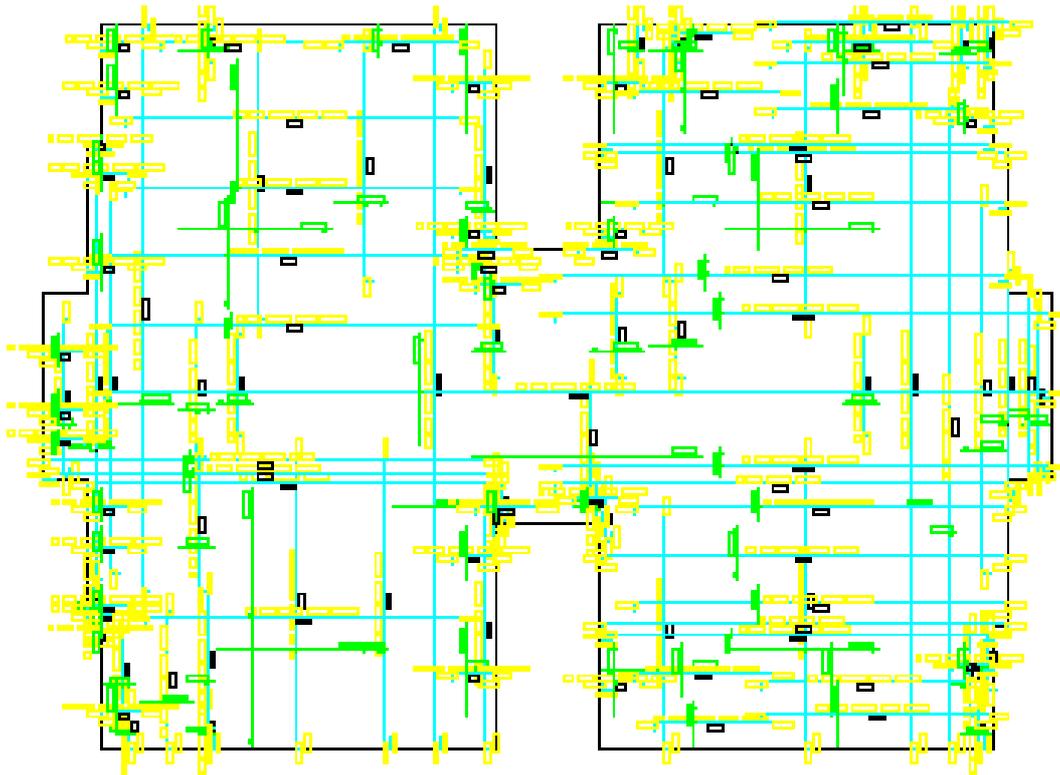


Figura 6.11 – Armadura negativa.

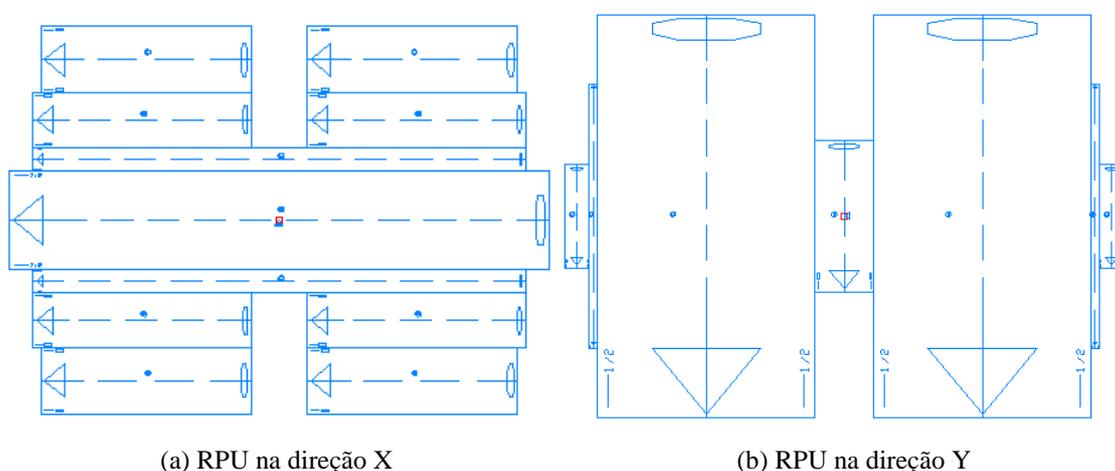
Tabela 6-1 – Quantidade de armadura para o radier em concreto armado.

RESUMO PARA AÇO CA-50		
Ø	Comprimento (m)	Peso (kg)
5.0	989	158
6.3	7128	1782
8.0	29	12
10.0	936	590
12.5	1265	1265
TOTAL – 50 A – kg+10%		4013,90
TOTAL – 60 B		158

6.1.2 CONCRETO PROTENDIDO

No modelo de radier em concreto protendido, alterou-se a espessura do radier para 15 cm, diminuindo assim o peso próprio da placa. O radier foi calculado com concreto de 30 MPa, que é a resistência mínima estabelecida na NBR 6118:2003, para a classe de agressividade estabelecida.

Com o modelo definido, processou-se a fôrma e gerou-se a grelha como foi visto anteriormente. Para dar continuidade ao cálculo do radier em concreto protendido, transferiu-se os esforços gerados na grelha para o radier protendido. A partir daí foram definidas as regiões de protensão uniforme nas duas direções (figura 6.12) como foi visto no capítulo anterior (item 5.2.3).



(a) RPU na direção X

(b) RPU na direção Y

Figura 6.12 – Regiões de protensão uniforme (RPU).

Como no presente trabalho definiu-se que o estudo do radier em concreto protendido é com o cabo reto (situação muito utilizada em fundação do tipo radier), foi necessário adotar que o cobrimento da armadura é metade da espessura da placa de fundação.

Com os critérios acima estabelecidos, foram gerados os cabos nas duas direções da placa de fundação, conforme ilustrado na figura 6.13.

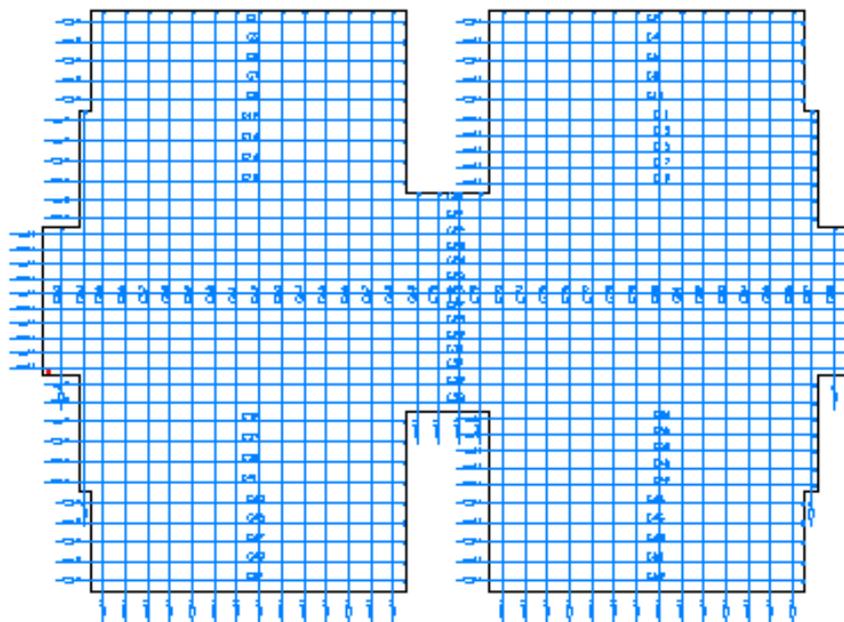


Figura 6.13 – Detalhe dos cabos nas duas direções do radier.

Com a quantidade de cabos em cada RPU definida foi possível gerar a quantidade de cabos nas duas direções, que é apresentada na tabela 6.2.

Tabela 6-2 – Quantidade de cabos no radier em concreto protendido.

CABO				
Ø	COMPRIMENTO (m)	PESO		
		kg/m	kg	kg+4%
2 Ø 12.7	2735,77	0,886	2424,00	2521,00

6.1.3 ANÁLISE DE CUSTOS

As tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os custos de material do radier em concreto armado e em concreto protendido, respectivamente. Esta análise foi elaborada considerando apenas o custo do material, não sendo contabilizado o custo da execução. Os custos dos materiais utilizados neste estudo foram retirados do programa de orçamento ORSE (Sistema de Orçamentos de Obras de Sergipe).

Tabela 6-3 – Custo de material (R\$) do radier em concreto armado (ORSE, 2007).

MATERIAL	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL
Aço CB 60	kg	1,54	158	243,32
Aço CA 50	kg	3,88	4013,90	15573,93
Concreto 20MPa	m ³	230,00	53,07	12206,10
			TOTAL	28023,35

Tabela 6-4 – Custo de material (R\$) do radier em concreto protendido (ORSE, 2007).

MATERIAL	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL
Cordoalha para concreto protendido	kg	6,33	2521,00	15957,93
Concreto 30 MPa	m ³	250,00	39,80	9950,00
Armadura Passiva	kg	3,88	2756,00	10693,28
Ancoragem	Unid.	15,00	428,00	6420,00
			TOTAL	43021,21

Como pode-se observar na tabela 6.3 e 6.4, o custo do material utilizado na execução de fundação do tipo radier em concreto protendido é mais elevado do que o custo da fundação em concreto armado. Na fundação em concreto protendido é possível economizar no volume de concreto, pois aplica-se concretos com maiores resistências, possibilitando a diminuição da espessura da placa. Em contrapartida, o custo da armadura de protensão é muito alto, encarecendo este tipo de estrutura.

6.1.4 INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO CABO

Um outro estudo realizado neste exemplo foi analisar o comportamento da placa de fundação com a utilização do cabo de protensão reto, centrado na espessura da placa (figura 6.14) e parabólico.

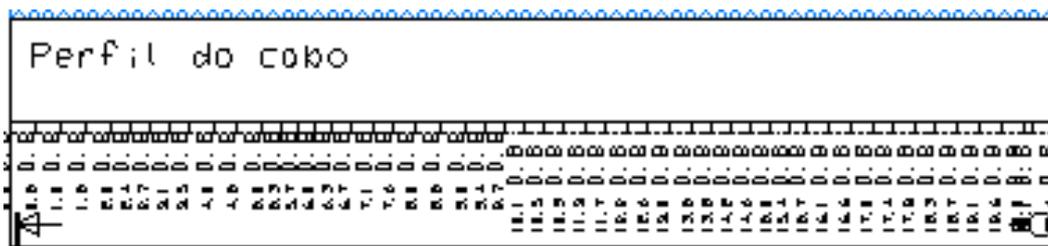


Figura 6.14 – Perfil do cabo reto na placa de fundação.

Com o lançamento dos cabos, foi possível analisar a distribuição de tensões nas regiões de protensão uniforme para os carregamentos freqüentes e para os carregamentos permanentes. Logo, é possível verificar que a distribuição de tensões está dentro dos limites, na região analisada, para carregamentos freqüentes (figura 6.15). O que não acontece para as ações permanentes, como mostra a figura 6.16. A distribuição de tensões excedeu os limites para aquela determinada região nas fibras inferiores.

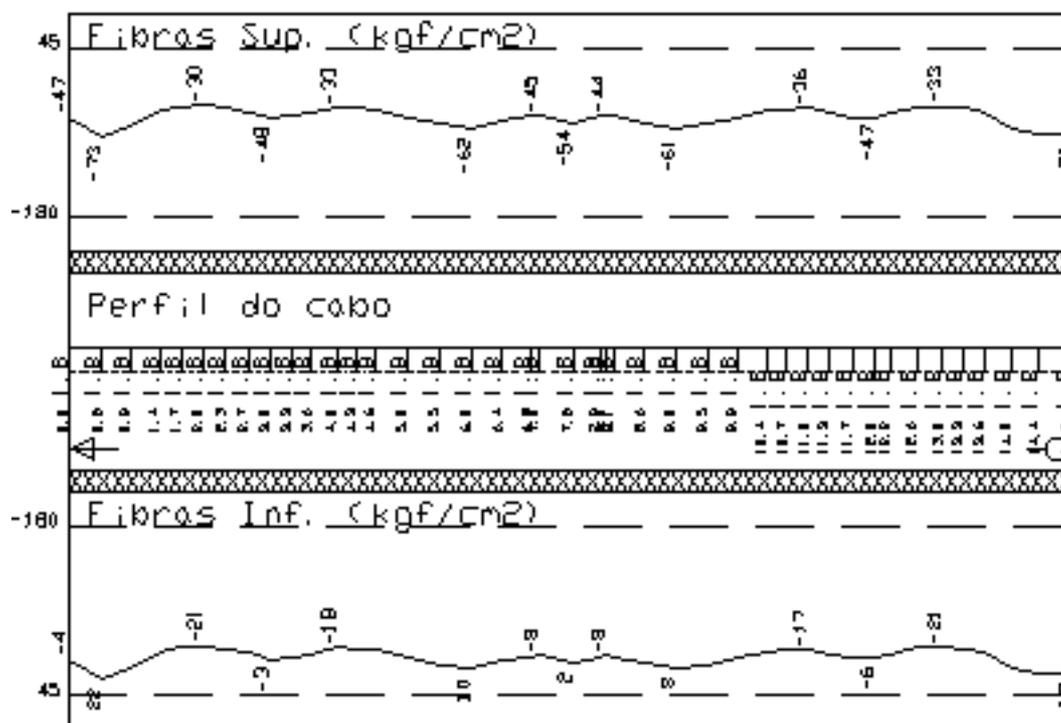


Figura 6.15 – Distribuição de tensão devido às ações freqüentes.

Segundo Hanai (2000), o traçado do cabo ideal é aquele que produz um diagrama de momentos com a mesma forma, mas com sinal oposto, do diagrama de momentos da carga aplicada. Isto nem sempre é possível devido às condições variadas de carregamento e das limitações geométricas.

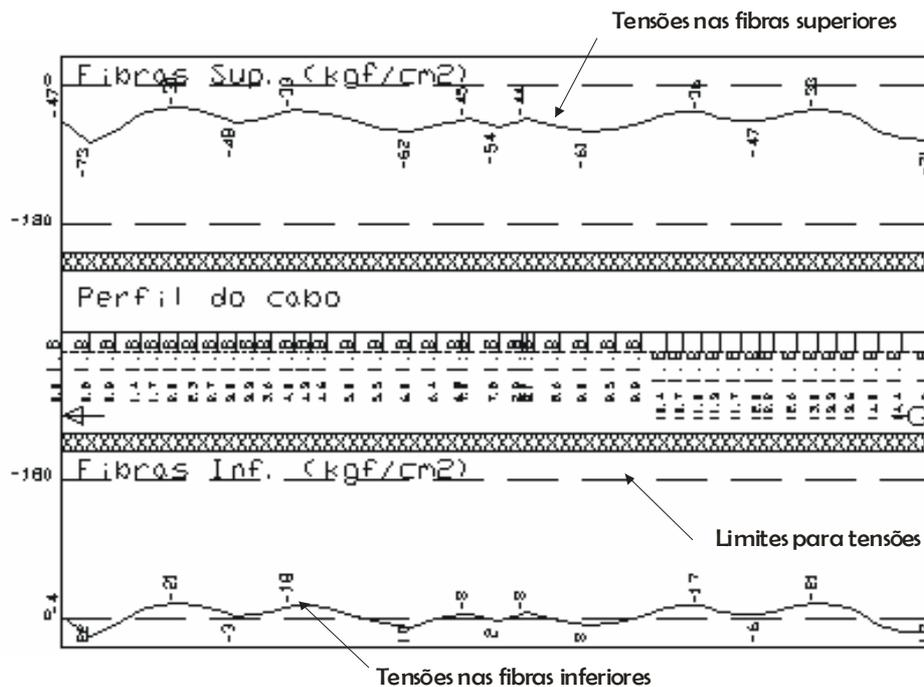


Figura 6.16 – Distribuição de tensão devido às ações permanentes – cabo reto.

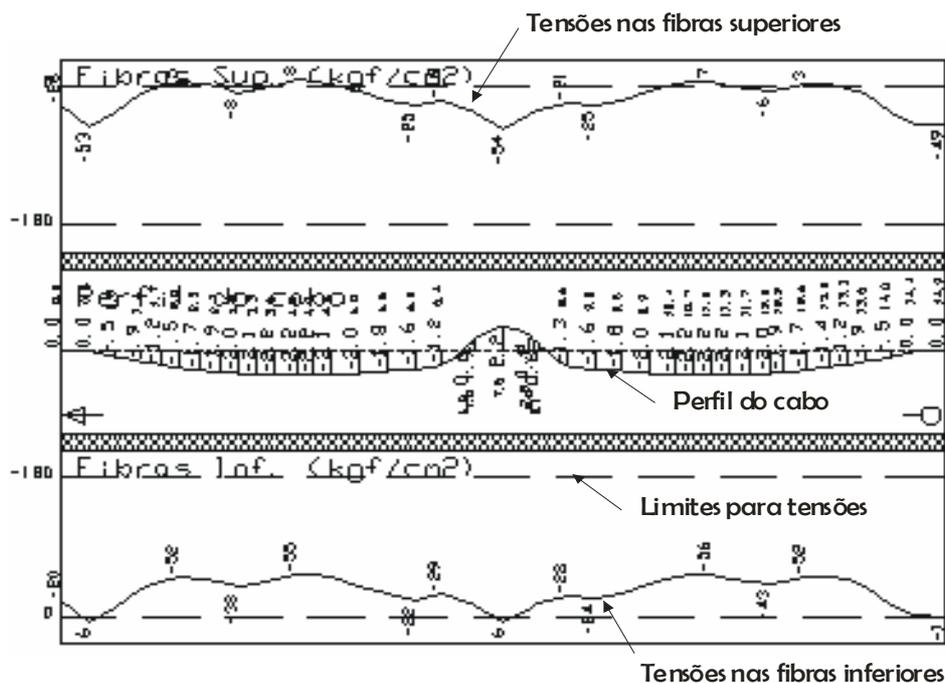


Figura 6.17 – Distribuição de tensão devido às ações permanentes – cabo curvo.

Nota-se na figura 6.17, que a distribuição de tensões está próxima do limite nulo nas fibras superiores. Esta proximidade se deve a melhor distribuição de momentos decorrentes da utilização do cabo parabólico. O modelo aplicado com o cabo parabólico necessitou de uma quantidade inferior de cabos comparado com o modelo com o cabo reto (figura 6.16), devido a melhor distribuição de momentos.

Considerando que o solo agora seja uma argila dura cujo módulo de reação vale 9600 tf/m^3 , valor este proposto por Terzaghi (1955). Corrigindo este valor para a placa de fundação em estudo, chegou-se a uma constante elástica de $122,18 \text{ tf/m}$. Aplicando-se a mesma discretização (30 cm), chegou-se no resultado apresentado na figura 6.18, aonde nota-se uma redução na quantidade de cabos, devido ao aumento da constante elástica.

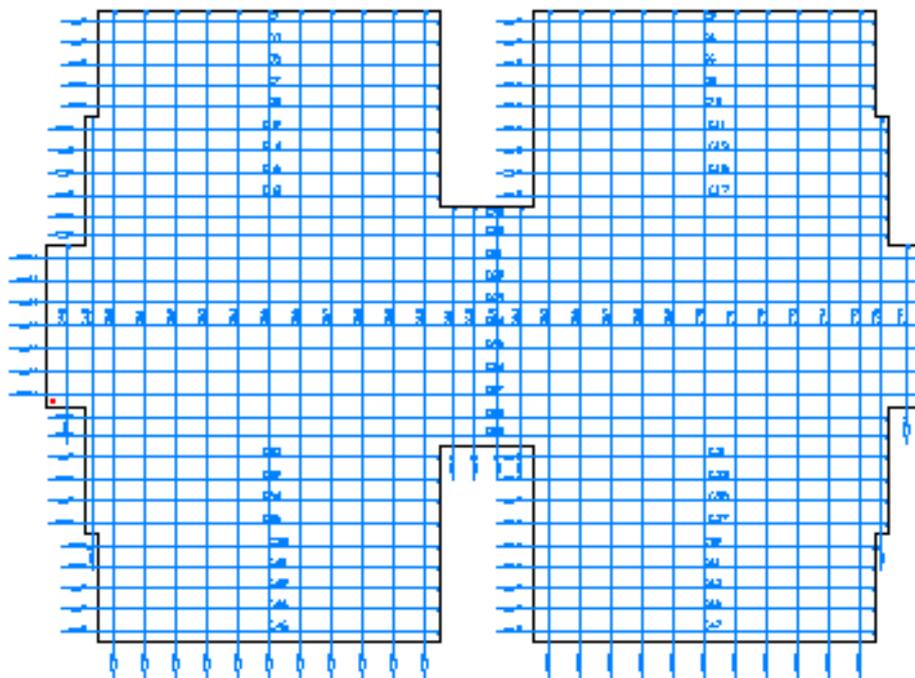


Figura 6.18 – Geração dos cabos de protensão.

Após a geração dos cabos, utilizando um valor maior para constante elástica, foram geradas a distribuição de tensões para a mesma região analisada anteriormente, com o cabo parabólico (figura 6.19) e com o cabo reto (figura 6.20). Nota-se que em ambos os casos a distribuição de tensões ultrapassa os limites. No modelo utilizando o cabo parabólico percebe-se uma melhor distribuição de tensões para as ações permanentes. O modelo com o cabo reto é muito utilizado aqui na cidade de Maceió, devido à facilidade de execução, mas nem sempre é a melhor solução, necessitando de uma análise detalhada de todos os critérios como tipo de solo e geometria do radier para determinar o modelo adequado para aquela determinada situação. Em ambos os modelos necessitam-se a colocação de armadura passiva para melhorar a distribuição de tensão.

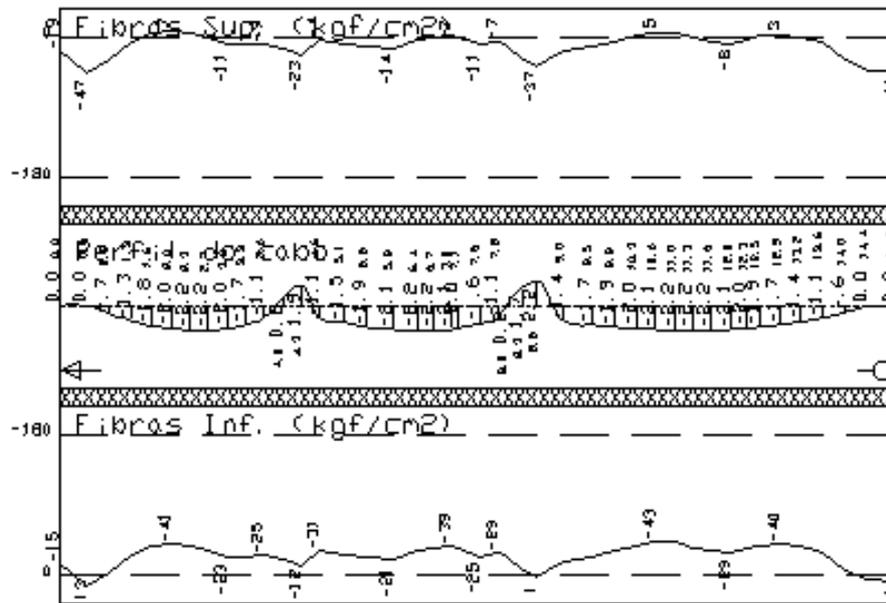


Figura 6.19 – Distribuição de tensões aplicando o cabo curvo.

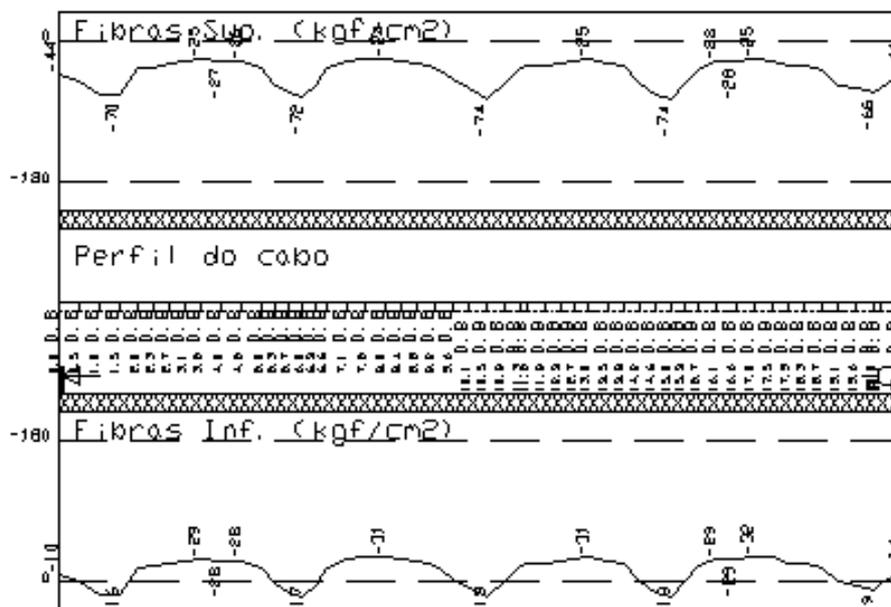


Figura 6.20 – Distribuição de tensões aplicando o cabo reto

Através da análise feita com o modelo em concreto armado e em concreto protendido para este exemplo, conclui-se que o modelo em concreto armado é mais viável, porém, o modelo em concreto protendido apresentou grande vantagem com relação a abertura de fissura, não sendo necessária a implantação de junta de contração.

6.2 EXEMPLO 02

O exemplo 02 trata-se de uma edificação situada na cidade de Aracajú (figura 6.21), com 04 pavimentos.

Foram adotadas as mesmas resistências do concreto para classe de agressividade II (moderada urbana), que é de 25 MPa para concreto armado e de 30 MPa para concreto protendido.

As cargas lineares provenientes da alvenaria estrutural foram calculadas e lançadas no modelo em tf/m (figura 6.22). As cargas distribuídas no radier provenientes das ações permanentes e acidentais iguais a 1,0 e 0,15 tf/m², respectivamente.

Neste modelo, foi adotada uma espessura de 20 cm para o radier em concreto protendido e de 25 cm para o radier em concreto armado.

Na ausência das propriedades geotécnicas do solo, adotou-se uma areia compacta com módulo de reação igual a 4200 tf/m³, que é o valor médio proposto por Terzaghi (1995) para esse solo (tabela 3.1). Em seguida, o valor do módulo de reação foi corrigido utilizando a equação 3.12, chegando-se ao valor de 339,98 tf/m³. Considerando-se o espaçamento entre as barras da grelha de 30 cm para o concreto protendido, obtém-se um valor de constante elástica igual a 30,59 tf/m (Eq. 3.3) e adotando um espaçamento de 40 cm para o radier em concreto armado obtém-se 54,39 tf/m para a constante elástica.

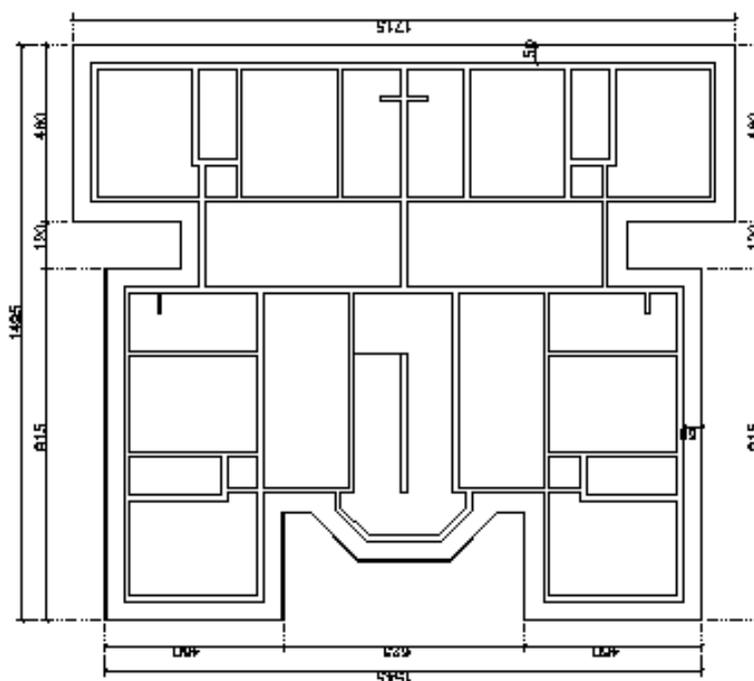


Figura 6.21 – Planta do radier.

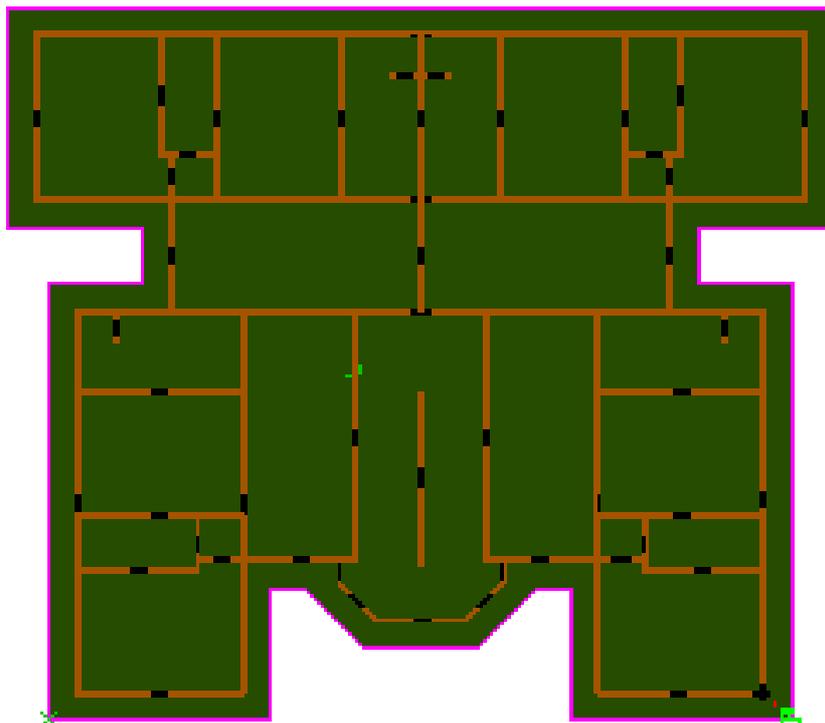


Figura 6.22 – Modelo do exemplo 03.

Após processar o modelo com os critérios adotados, gerou-se a grelha para o radier em concreto protendido (figura 6.23) e em concreto armado (figura 6.24) obtendo-se os esforços na placa.

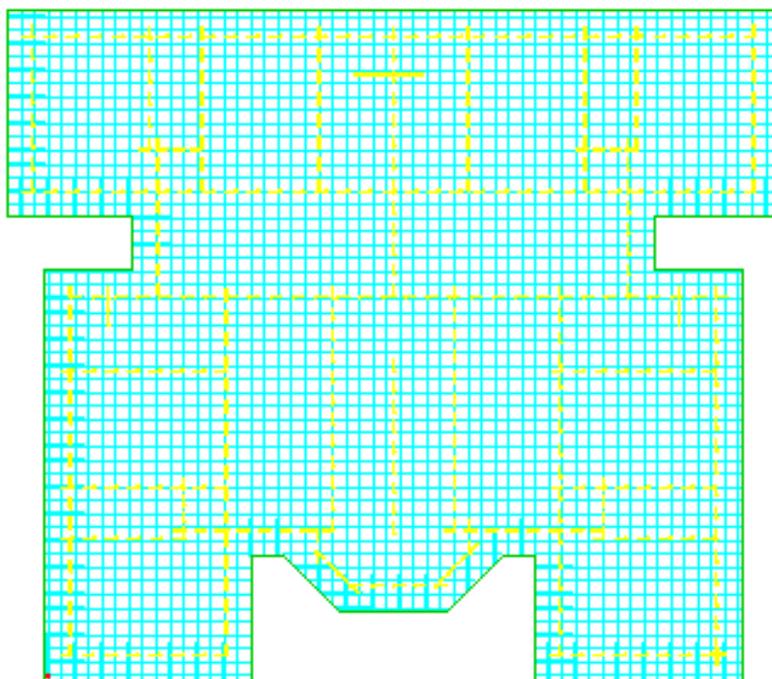


Figura 6.23 – Grelha com espaçamento de 30 cm.

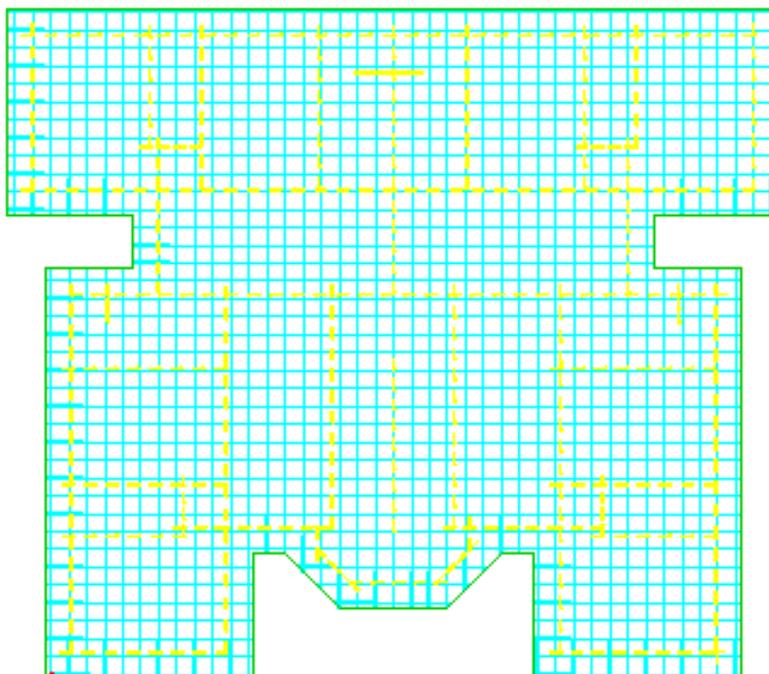


Figura 6.24 – Grelha com espaçamento de 40 cm.

6.2.1 CONCRETO ARMADO

Para o dimensionamento do radier, foram definidas as faixas de armadura homogênea nas direções X e Y (figura 6.25).

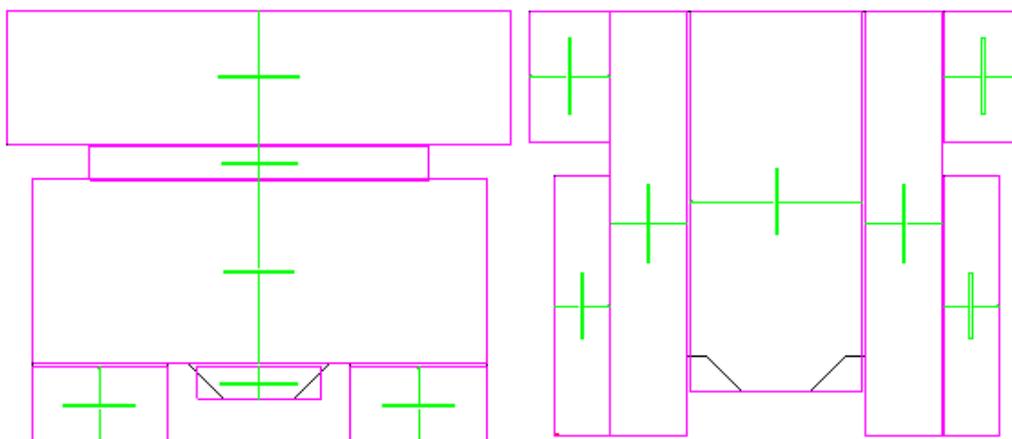


Figura 6.25 – Faixas de armadura homogênea nas direções X e Y.

Com as faixas definidas, as armaduras positivas e negativas foram calculadas e detalhadas como mostra a figura 6.26 e 6.27.

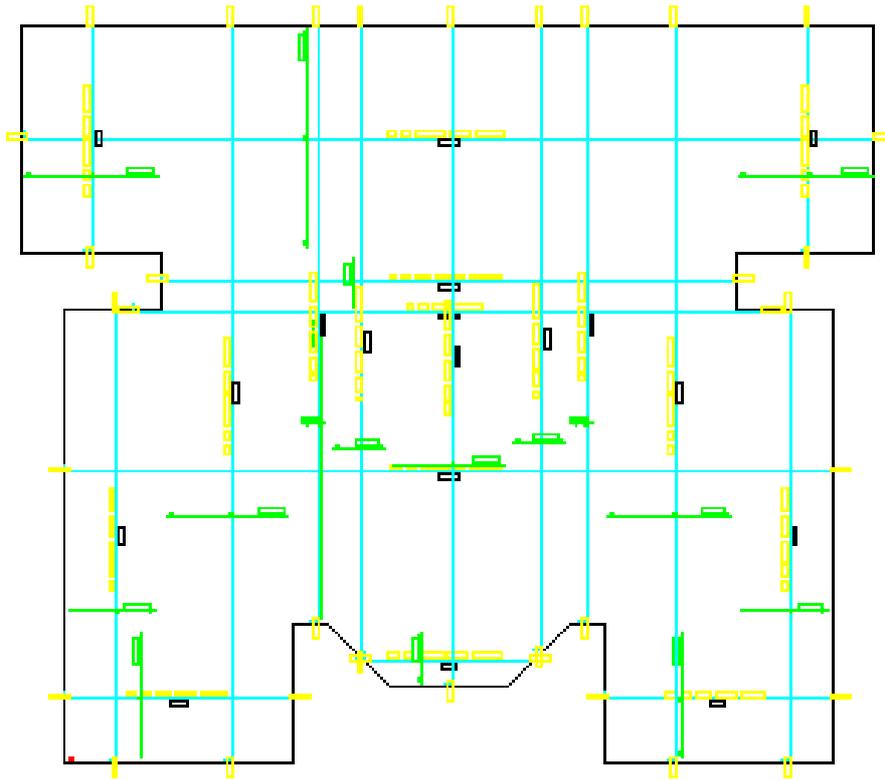


Figura 6.26 – Armadura positiva.

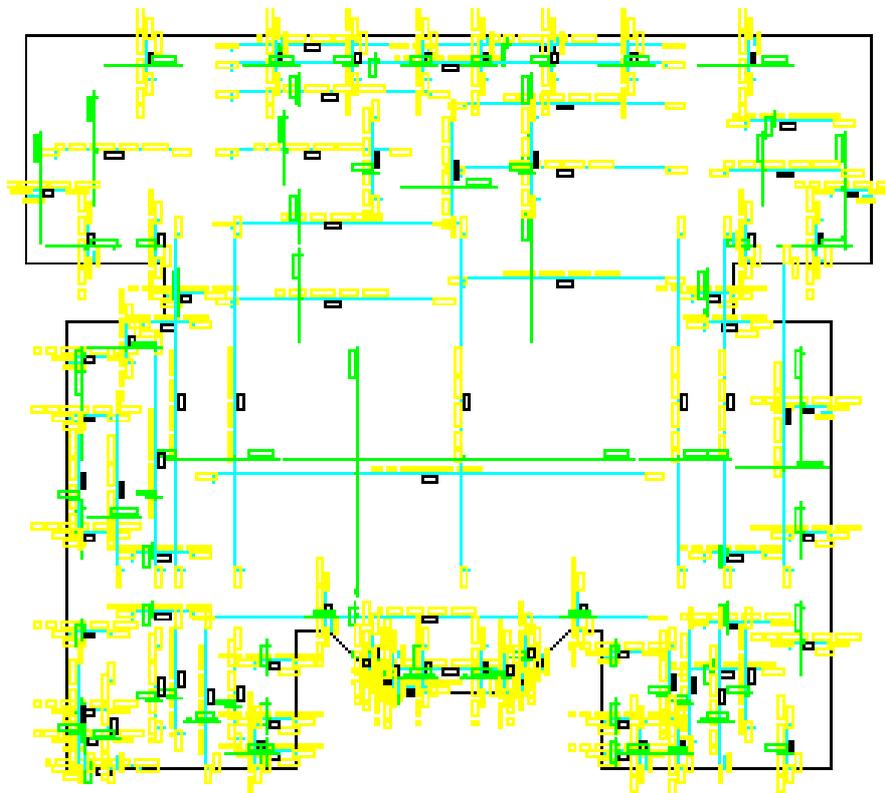


Figura 6.27 – Armadura negativa.

Tabela 6-5 – Quantidade de armadura para o radier em concreto armado.

RESUMO PARA AÇO CA-50		
Ø	Comprimento (m)	Peso (kg)
6.3	3215	803
8.0	426	171
10.0	1227	773
12.5	841	841
TOTAL – 50 A – kg+10%		2845,70

6.2.2 CONCRETO PROTENDIDO

O modelo de radier em concreto protendido, foi gerado com espessura de 15 cm e resistência do concreto a compressão de 30 MPa.

No calculo do radier em concreto protendido, transferiu-se os esforços gerados na grelha para o radier protendido. A partir daí foram definidas as regiões de protensão uniforme nas duas direções (figura 6.28).

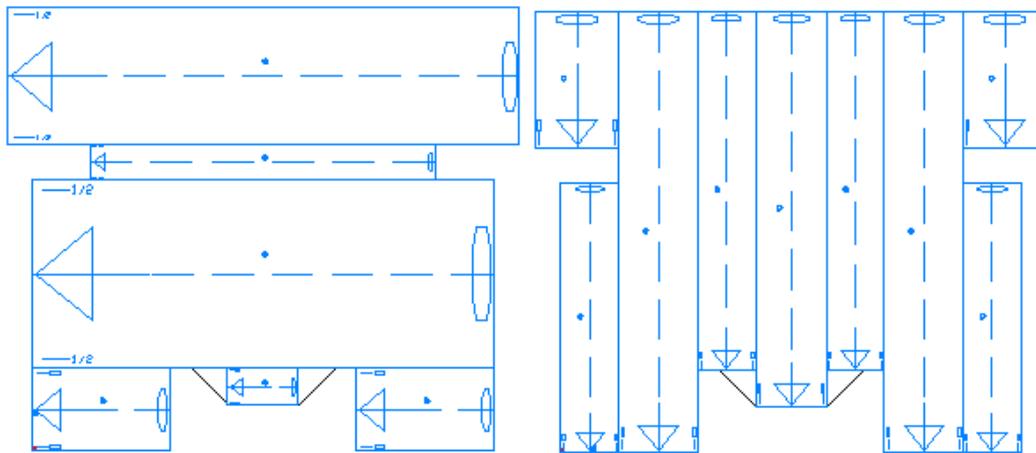


Figura 6.28 – Faixas de protensão uniforme.

Após a definição das faixas de protensão uniforme, foram gerados os cabos do radier nas duas direções. Esses cabos são retos e centrados na espessura da placa.

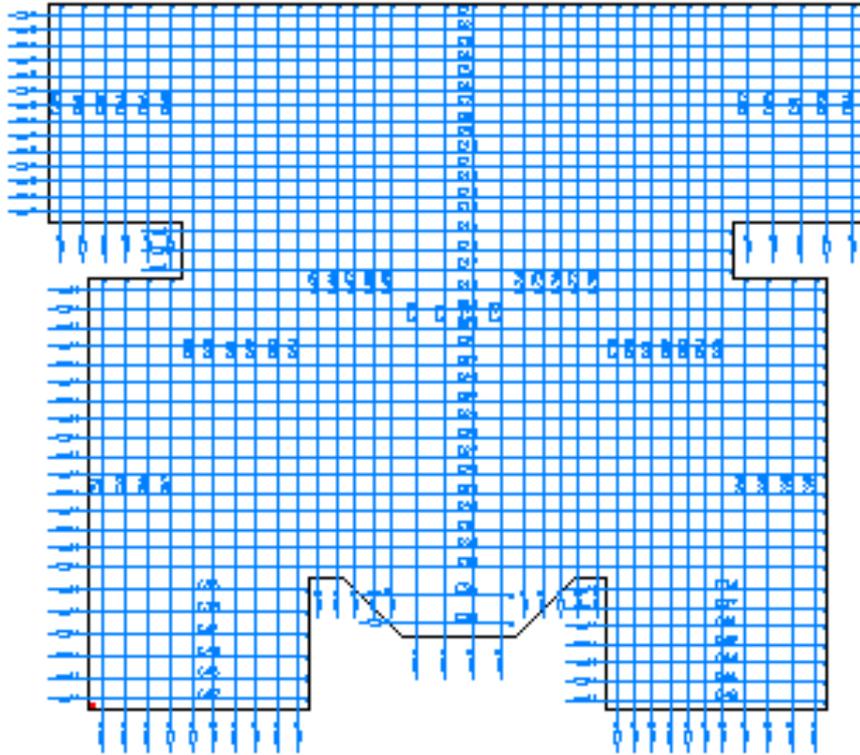


Figura 6.29 – Geração dos cabos de protensão.

Após a geração dos cabos nas duas direções, foi feito o quantitativo de cabos, apresentado na tabela 6.6.

Tabela 6-6 – Quantidade de cabos no radier em concreto protendido.

CABO				
Ø	COMPRIMENTO (m)	PESO		
		kg/m	kg	kg+4%
2 Ø 12.7	2264,36	0,886	2006	2086

6.2.3 ANÁLISE DE CUSTOS

As tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os custos de material do radier em concreto armado e em concreto protendido, respectivamente.

Tabela 6-7 – Custo de material (R\$) do radier em concreto armado (ORSE, 2007).

MATERIAL	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL
Aço CA 50	kg	3,88	2845,70	11041,31
Concreto 20MPa	m ³	230,00	41,46	9535,80
			TOTAL	20577,11

Tabela 6-8 – Custo de material (R\$) do radier em concreto protendido (ORSE, 2007).

MATERIAL	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL
Cordoalha para concreto protendido	kg	6,33	2086	13204,38
Concreto 30 MPa	m ³	250,00	31,09	7772,50
Armadura Passiva	kg	3,88	1915	7430,20
Ancoragem	Unid.	15,00	376	5640,00
			TOTAL	34047,08

Como pode-se ver nas tabelas acima, o custo para execução do radier em concreto protendido foi superior ao custo do radier em concreto armado.

6.2.4 INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO CABO

Neste exemplo foi feita uma análise da distribuição de tensões em uma determinada região de protensão uniforme do radier. Esta análise foi feita com a aplicação do cabo reto, centrado na espessura da placa e com o cabo parabólico.

Nas figuras 6.30 e 6.31 é possível observar a distribuição de momentos com o cabo reto e parabólico respectivamente.

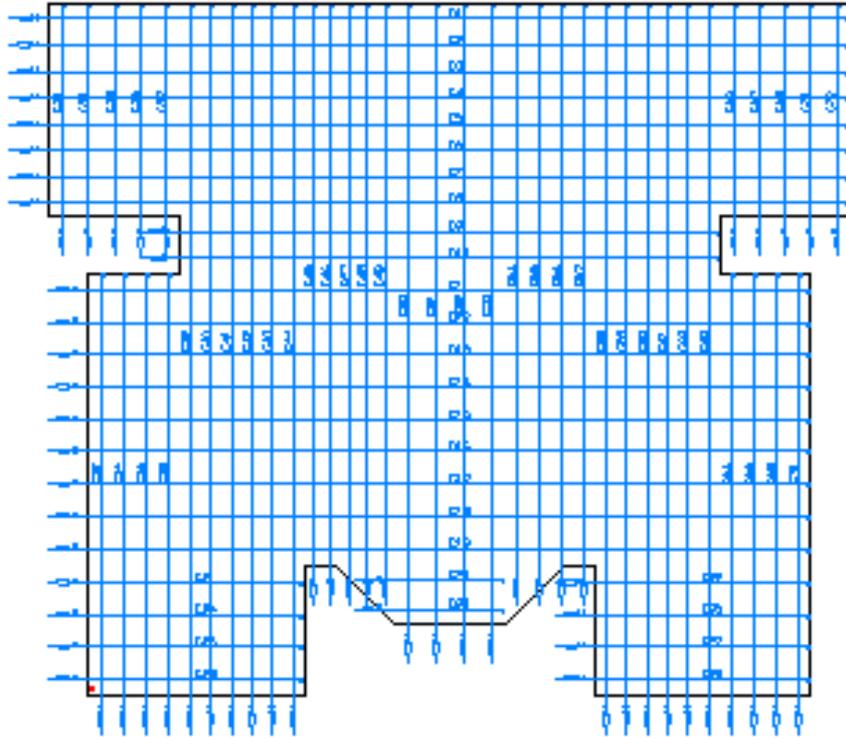


Figura 6.32 – Geração do modelo com os cabos parabólicos.

Com uma melhor distribuição de momentos e de tensões devido as ações permanentes, o modelo utilizando o cabo parabólico apresentou uma redução na quantidade de cabos (figura 6.32), tornando este modelo mais viável do que o modelo utilizando o cabo reto.

6.3 EXEMPLO 03

O exemplo 03 trata-se de uma edificação situada na cidade de Maceió (figura 6.33), com 04 pavimentos.

Foram adotadas as mesmas resistências do concreto para classe de agressividade II (moderada urbana), que é de 25 MPa para concreto armado e de 30 MPa para concreto protendido.

As cargas lineares provenientes da alvenaria estrutural foram calculadas e lançadas no modelo em tf/m (figura 6.34). As cargas distribuídas no radier provenientes das ações permanentes e acidentais iguais a 1,0 e 0,15 tf/m², respectivamente.

Neste modelo, foi adotada uma espessura de 15 cm para o radier em concreto protendido e de 20 cm para o radier em concreto armado.

Na primeira análise adotou-se uma argila dura com módulo de reação igual a 9600 tf/m³, que é o valor médio proposto por Terzaghi (1955) para esse solo (tabela 3.1). Em seguida, o valor do módulo de reação foi corrigido utilizando a equação 3.12, chegando-se ao valor de 1442,34 tf/m³. Considerando-se o espaçamento entre as barras da grelha de 30 cm para o concreto protendido, obtém-se um valor de constante elástica igual a 129,81 tf/m (Eq. 3.3) e de 230,77 tf/m para o radier em concreto armado, com espaçamento de barras de 40 cm.

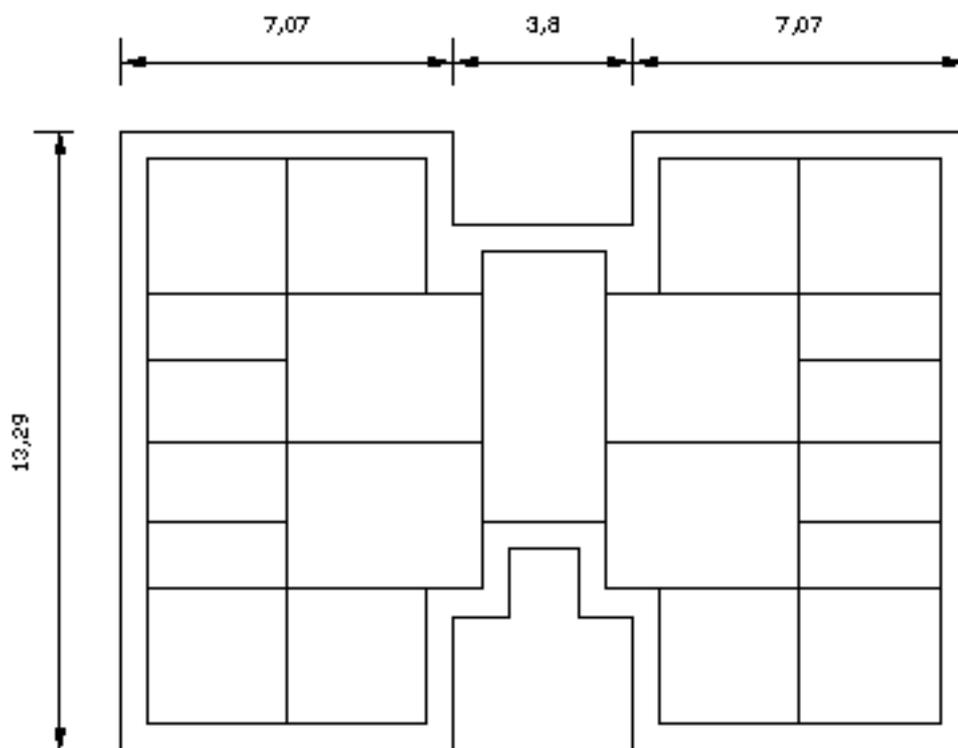


Figura 6.33 – Planta do radier.

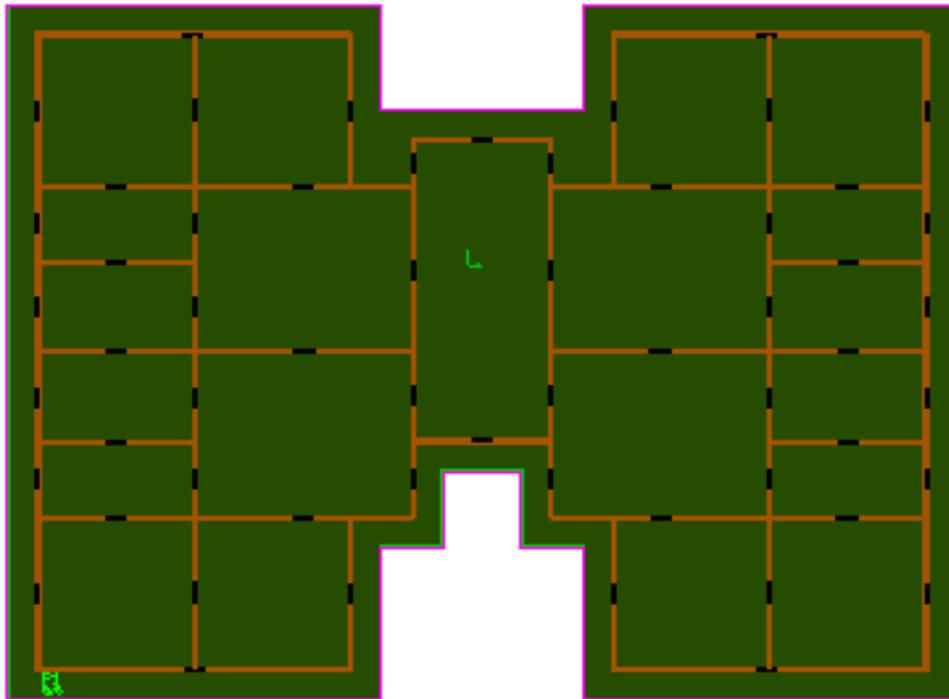


Figura 6.34 – Modelo do exemplo 02.

Após a geração do modelo, gerou-se a grelha (figura 6.35) com o espaçamento adotado de acordo com a espessura do radier que é de 15 cm, para o concreto protendido.

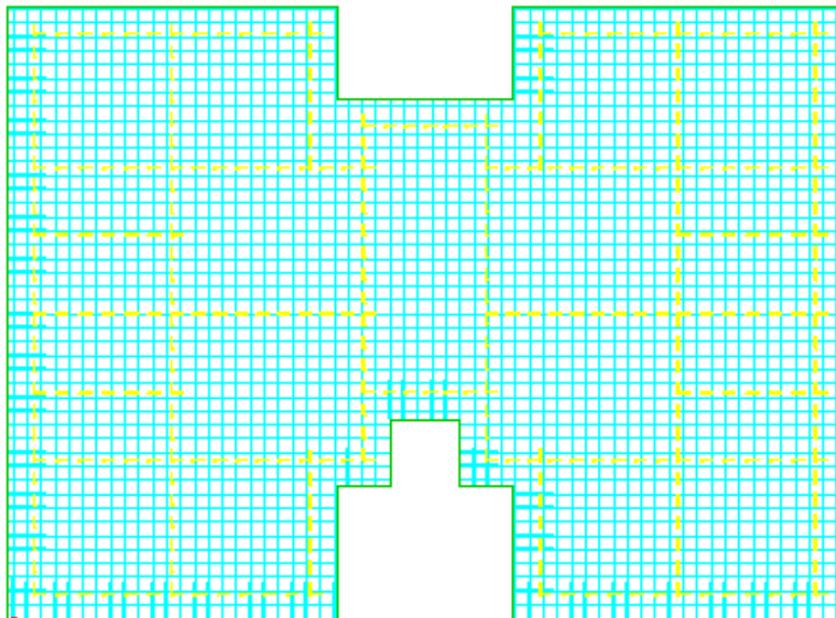


Figura 6.35 – Grelha com espaçamento de 30 cm.

O modelo em concreto armado foi gerado com espaçamento de 40 cm, como mostrar a figura 6.36.

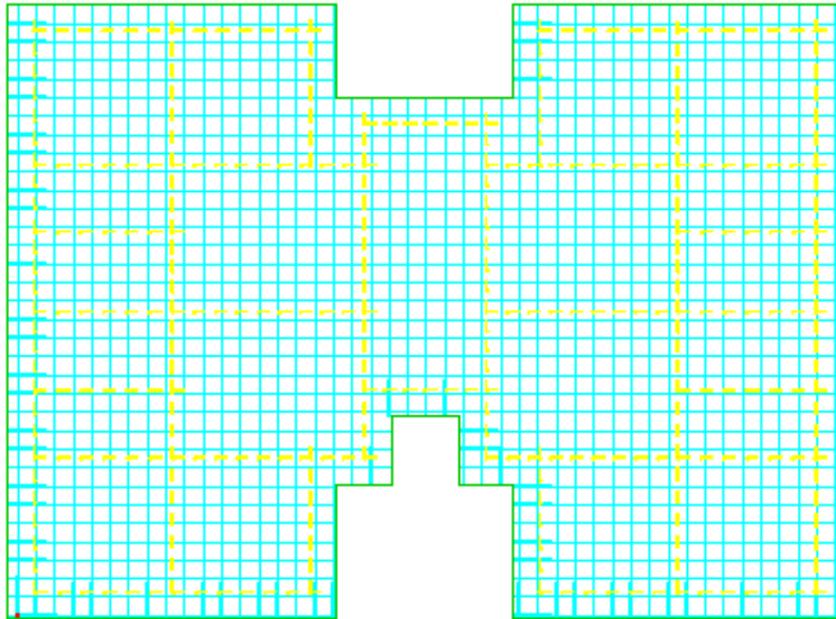


Figura 6.36 – Grelha com espaçamento de 40 cm.

6.3.1 CONCRETO ARMADO

Após a geração da grelha procedeu-se o dimensionamento do radier, aonde foram definidas as faixas de armadura homogênea nas direções X e Y (figura 6.37).

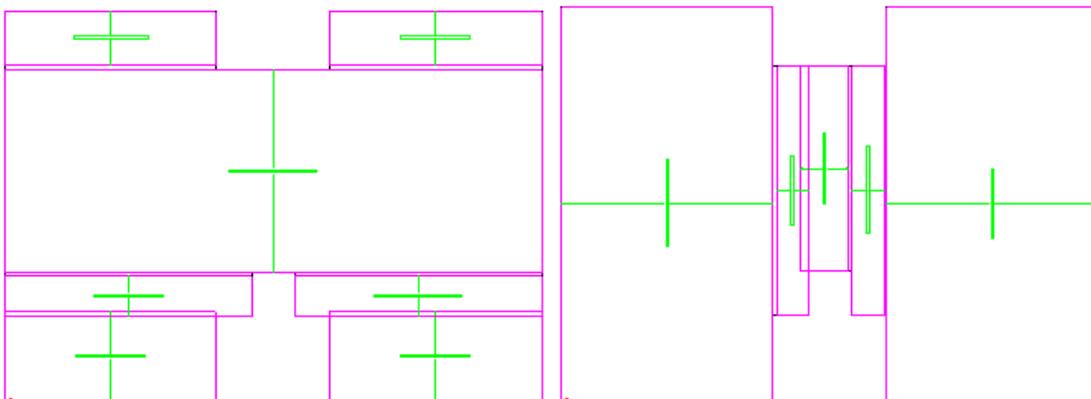


Figura 6.37 – Faixas de armadura homogênea nas direções X e Y.

Com as faixas definidas, as armaduras positivas e negativas foram calculadas e detalhadas como mostra a figura 6.38 e 6.39.

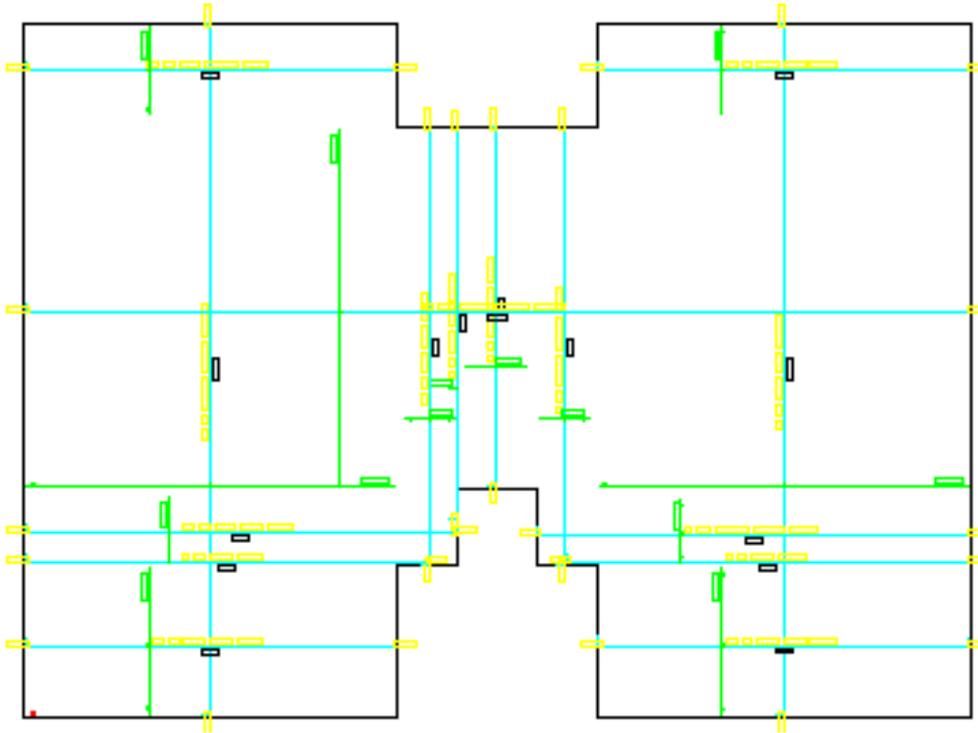


Figura 6.38 – Armadura positiva

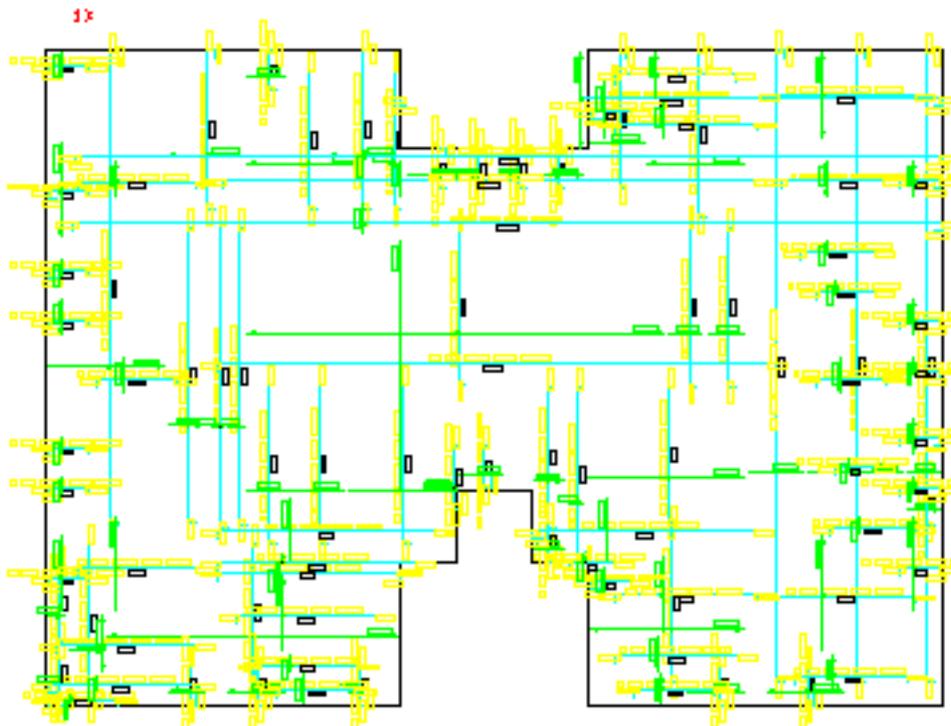


Figura 6.39 – Armadura negativa.

A tabela 6.9 mostra o quantitativo de armadura para o radier em concreto armado.

Tabela 6-9 – Quantidade de armadura para o radier em concreto armado.

RESUMO PARA AÇO CA-50		
Ø	Comprimento (m)	Peso (kg)
6.3	4106	1027
10.00	1826	1150
12.5	1921	1921
TOTAL – 50 A – kg+10%		4507,80

6.3.2 CONCRETO PROTENDIDO

No cálculo do radier em concreto protendido, transferiu-se os esforços gerados na grelha para o radier protendido. A partir daí foram definidas as regiões de protensão uniforme nas duas direções (figura 6.40).

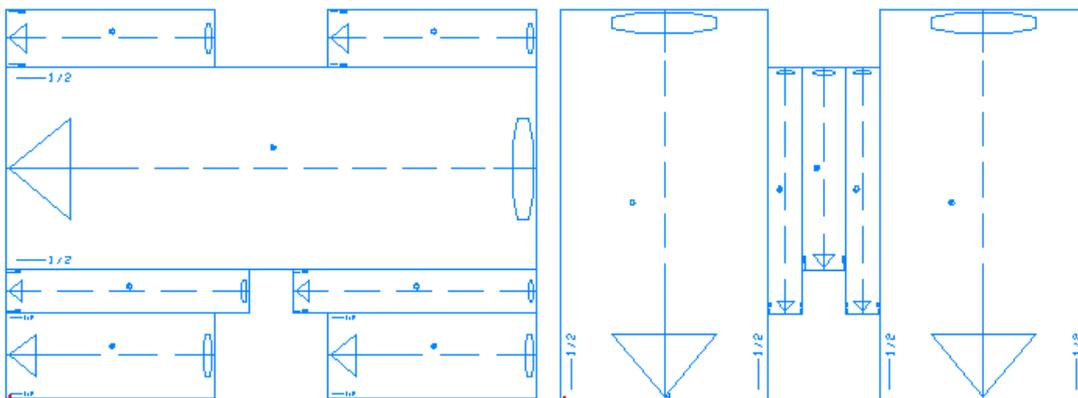


Figura 6.40 – Faixas de protensão uniforme.

Após a definição das faixas de protensão uniforme, foram gerados os cabos do radier nas duas direções como mostrar a figura 6.41. Esses cabos são retos e centrados na espessura da placa.

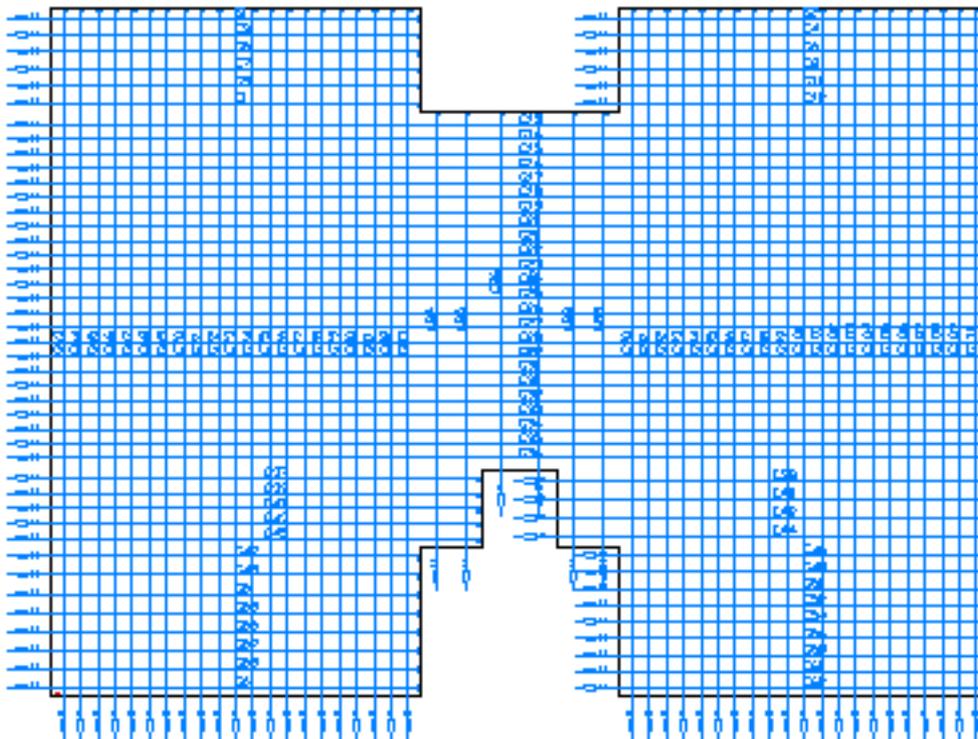


Figura 6.41 – Geração dos cabos.

Após a geração dos cabos nas duas direções, foi feito o quantitativo de cabos, apresentado na tabela 6.10.

Tabela 6-10 – Quantidade de cabos no radier em concreto protendido.

CABO				
Ø	COMPRIMENTO (m)	PESO		
		kg/m	kg	kg+4%
2 Ø 12.7	2754,19	0,886	2440	2538

6.3.3 ANÁLISE DE CUSTOS

As tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os custos de material do radier em concreto armado e em concreto protendido, respectivamente.

Tabela 6-11 – Custo de material (R\$) do radier em concreto armado (ORSE, 2007).

MATERIAL	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL
Aço CA 50	kg	3,88	4507,80	17490,26
Concreto 20MPa	m ³	230,00	43,14	9922,20
			TOTAL	27412,46

Tabela 6-12 – Custo de material (R\$) do radier em concreto protendido (ORSE, 2007).

MATERIAL	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL
Cordoalha para concreto protendido	kg	6,33	2538	16065,54
Concreto 30 MPa	m ³	250,00	32,53	8132,50
Armadura Passiva	kg	3,88	2176	8442,88
Ancoragem	Unid.	15,00	440	6600,00
			TOTAL	39240,92

Para este exemplo o custo do radier em concreto protendido também superou o custo do radier em concreto armado.

Não foram somados os gastos com mão de obra. Levando em consideração que a execução do radier em concreto protendido requer uma mão de obra mais qualificada, isto tornará este modelo ainda mais caro comparado com o modelo em concreto armado.

6.3.4 INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO CABO

Após a geração dos cabos para o modelo utilizando o cabo reto, gerou-se o modelo utilizando o cabo curvo e analisou-se a distribuição de momentos para uma determinada região de protensão uniforme como mostra as figuras 6.42 e 6.43.

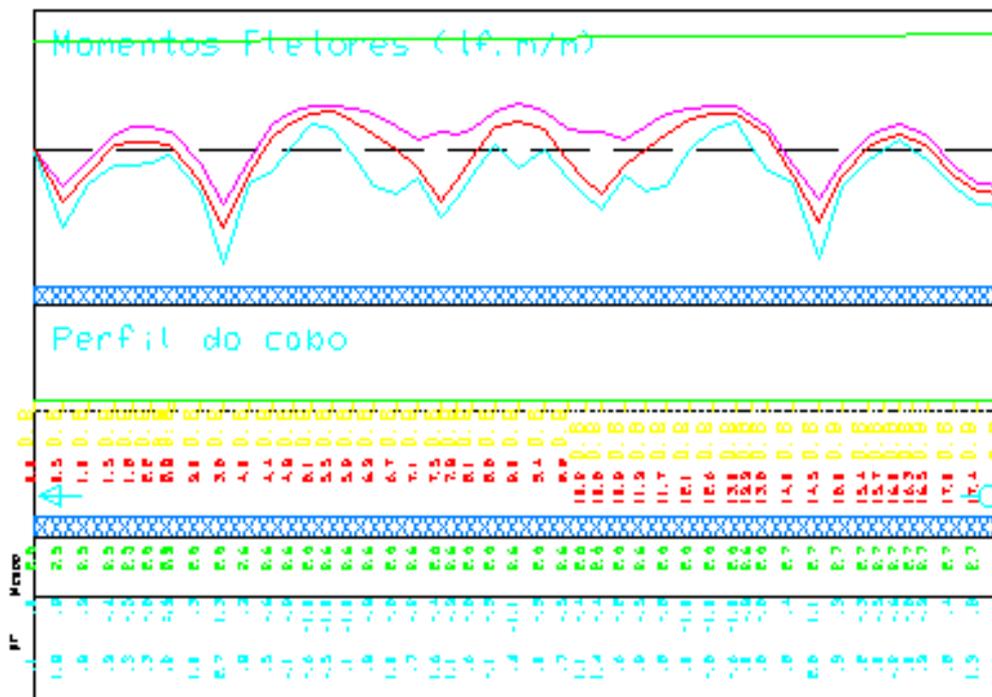


Figura 6.42 – Distribuição de momentos utilizando o cabo reto

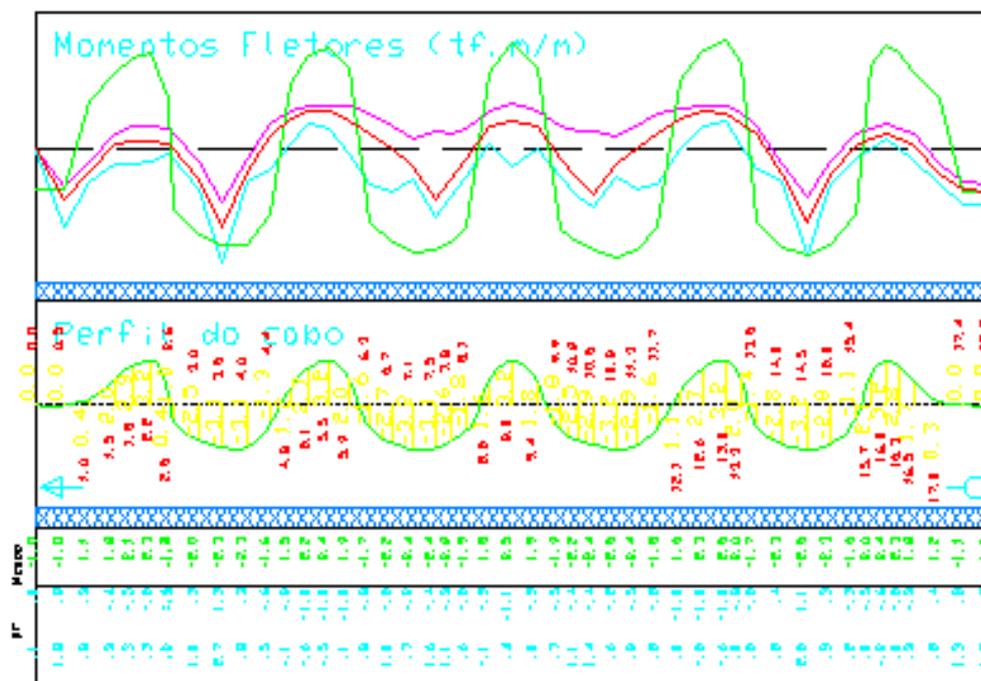


Figura 6.43 – Distribuição de momentos utilizando o cabo parabólico.

Nota-se que o modelo utilizando o cabo parabólico apresentou uma melhor distribuição dos momentos naquela determinada região, possibilitando uma melhor distribuição de tensões devido as ações permanentes. Isto gerou um modelo com quantidade de cabos inferior ao modelo com o cabo reto, como mostra a figura 6.44.

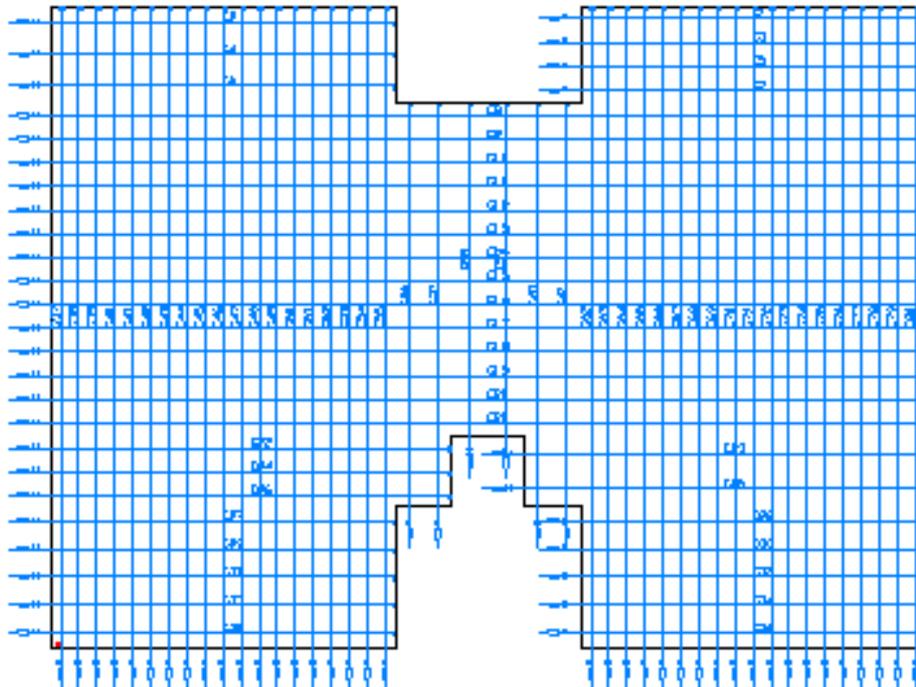


Figura 6.44 –Geração dos cabos parabólicos.

Com isso é necessário que em cada projeto se faça uma análise das vantagens e desvantagens de cada modelo para aquela determinada situação com o objetivo de gerar um projeto de fundação que atenda as condições exigidas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelo apresentado entende-se que os objetivos do trabalho foram atingidos, foi observado que o modelo de analogia de grelha se mostrou muito eficiente no estudo de fundação do tipo radier em concreto armado e em concreto protendido, pois apresentou resultados consistentes.

O espaçamento das barras da grelha é de fundamental importância para a consistência dos resultados, tendo que se levar em conta a geometria da placa em estudo. Todos os exemplos apresentados neste trabalho apresentaram resultados consistentes com o espaçamento de barras adotado.

Com a análise do radier sobre base elástica foi possível considerar a contribuição do solo na interação com a estrutura empregando um sistema de molas nos nós da grelha. As constantes elásticas adotadas nos exemplos levaram em conta a geometria do radier e o espaçamento de barras adotado, com isso foi possível fazer um estudo coerente da fundação.

A estrutura em concreto protendido apresenta vantagens quanto ao tempo de execução, ao controle da fissuração e na redução da espessura da placa. Em contrapartida o radier em concreto armado pode ser mais viável, pois o custo do material é menor. Isso acontece porque apesar da redução da espessura do radier, o concreto protendido necessita uma resistência à compressão mínima maior. Portanto, o custo proveniente do aumento da resistência e das cordoalhas pode superar o custo de materiais do radier em concreto armado.

Na execução de radier em concreto protendido é necessária mão de obra mais qualificada o que encarece ainda mais a execução.

Por tanto a que se fazer uma análise prévia do emprego das duas tecnologias antes de se definir o tipo de radier a ser utilizado, não identificando-se um tipo generalizado que comprovadamente seja mais econômico sempre.

Este tipo de fundação em radier se mostrou muito eficiente em edificações do tipo PAR (executados em alvenaria estrutural), pois possibilita uma melhor distribuição dos carregamentos provenientes da alvenaria para a fundação, reduzindo o recalque diferencial e melhorando a distribuição de tensões no solo.

O modelo utilizando o cabo parabólico teve uma melhor distribuição de momentos e de tensões devido aos carregamentos permanentes comparado com o modelo utilizando o cabo reto. Devido a esta melhora na distribuição de tensões houve uma redução na quantidade de cabos, tornando este modelo mais viável.

É necessário um estudo detalhado das propriedades do solo e da geometria do radier com o objetivo de gerar o modelo mais adequado para aquela determinada estrutura.

Devido ao aumento no emprego deste tipo de estrutura se faz necessária uma ferramenta computacional específica para análise de radier e comparação dos resultados empregando outros métodos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Design of slabs on grade** (ACI 360R-92), 1997.

ALMEIDA, F.M. **Estruturas de Pisos de Edifícios com a Utilização de Cordoalhas Engraxadas**, 2002. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos.

ALMEIDA, L.C. **Laje Sobre Solo para Fundação de Residências**, 2001. Dissertação de Mestrado da UNICAMP/FEC.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6489: Prova de Carga Direta Sobre Terreno de Fundação**, Rio de Janeiro, 1984.

BARBOZA, A.S.R. **Contribuição à Análise Estrutural de Sistemas Lajes-Vigas de Concreto Armado Mediante a Analogia de Grelha**, 1992. Dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BOWLES, J.E. **Foundation Analysis and Design**. Third Edition. Tokyo, 1982, Ed. McGraw-Hill.

CAUDURU, E.L. **Execução de Radiers Protendidos**. 2000. Trabalho apresentado no 42º Congresso Brasileiro do Concreto.

EMERICK, A.A. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**, 2002. Notas de aula.

HAMBLY, Edmund C. **Bridge Deck Behaviour**. London. Ed. John Wiley & Sons, Inc. London. (1976).

HANAI, J. B.. **Lajes de Edifícios em Concreto Protendido com Cabos Pós-Tracionados – Manual de Projeto**, 2000. Tradução do Relatório Técnico nº 43, Concrete Society. São Carlos.

MONTOYA, P.J.; MESEGUER, A.G; CABRÉ, F.M. **Hormigón Armado**, 8ª Edición – Barcelona, 1987. Ed. Gustavo Gili, S. A.

MOURA, J.R.B. **Estruturas de Concreto Protendido**, 2000. Curso Introdutório da Universidade de Fortaleza – UNIFOR.

NASCIMENTO, G.S; OLIVEIRA, W.L.A.O. **Estudos de Fundações Tipo Radier em Concreto Protendido**. 2002. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil da UFAL.

ORSE, 2007. Disponível em: www.sinope.gov.br. Acesso em 12 de setembro de 2007.

POST TENSIONING INSTITUTE, **Design and Construction of Post-tensioned Slabs-on-Ground**, Second Edition, 1996.

SCARLAT, A. S. **Effect of Soil Deformability on Rigidity – Related Aspects of Multistory Buildings Analysis**. ACI Structural Journal, v.90, n.02, 1993.

SISTEMAS INTEGRADOS CAD TQS – versão windows, **Manual de Critérios de Projetos de Grelha**; TQS Informática, São Paulo – SP.

SOUZA, R.A. **Interação Solo-Estrutura em Edifícios Sobre Fundações Rasas – Um Estudo Sobre a Variação de Esforços nos Pilares de Concreto Armado**, 2006. Artigo publicado pela Universidade Estadual de Maringá.

STRAMANDINOLI, J.S.B. **Contribuições à Análise de Lajes Nervuradas por Analogia de Grelha**, 2003. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina.

TERZAGHI, K. **Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction**. Geotechnique, v.05., n.04, 1955.

VELOSO, D.; LOPES, F.R. **Fundações: Critérios de Projeto – Fundações Superficiais**, Nova Edição – São Paulo – 2004. Ed. Oficina de Textos.

VSL INTERNATIONAL LTD. **Post Tensioned Foundation**, 1990. Second Printing.