

TEMA LIVRE

**ANÁLISE NUMÉRICA UTILIZANDO O
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA
RADIÉR EM CONCRETO ARMADO****NUMERICAL ANALYSIS USING THE FINITE
ELEMENT METHOD TO SHALLOW REINFORCED
CONCRETE**

Cláudio Márcio Ribeiro³⁰
Prof. Dr. Thiago Bomjardim³¹
Prof. Dr. Romero César Gomes³

Submissão: 30/10/2017

Revisão: 21/11/2017

Aceite: 11/12/2017

Resumo: Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso para uma solução em fundação do tipo radier, demonstrando ser uma solução competitiva e racional. Pretende-se apresentar as análises de otimização da geometria do radier, utilizando 3 tipos de solos com consideração dos efeitos da interação solo estrutura-ISE, propondo a geometria ideal para o cada tipo de maciço geotécnico. Utilizou-se para a análise um software comercial de Elementos Finitos. Como resultados obteve-se: deslocamento (recalque) na fundação, tensão resultante do solo e quantitativos de materiais.

Palavras chave: Radier. Análise numérica. Maciço geotécnico. Método dos Elementos Finitos

Abstract: “The objective of this article is to present a case study on a solution about the Slab Foundations, which could be competitive as well as realistic. This article pretends to demonstrate the slab foundation analysis and its geometry optimization, based on three kind of soils, considering the effect of Soil-Structure Interaction (SSI). Also, proposing an ideal geometry for each kind of these geotechnical works. For the analysis was utilized a software with the capability of the Finite Element Methods (FEM), which the results are, the soil tension, the foundation settlement and the material take-off.

Keywords: Raft Foundation, Numerical Analysis, Geotechnical Characters, Finite Element Methods (FEM)

³⁰ Mestrando em Engenharia Geotécnica. NUGEO/UFOP. cmr7solucaoestrutural@gmail.com

³¹ Doutor em Engenharia Geotécnica. Professor Adjunto IV. PUC-MG. porto@pucminas.br

³ Doutor em Engenharia Geotécnica. UFOP. Professor Titular. romero@em.ufop.br

Introdução

A geotecnia tem diversas aplicações no ramo da engenharia, dentre elas, na área de fundações. O segmento de engenharia de fundações, ora abordado, vem se aprimorando e evoluindo nas últimas décadas, e a cada dia surgem inovações nas técnicas construtivas.

Sabe-se que os empreendimentos de engenharia vêm exigindo na área geotécnica, constante especialização dos profissionais de engenharia e arquitetura, objetivando o aprimoramento das técnicas de fundação a serem aplicadas nas novas construções. Neste sentido, soluções que garantam segurança, reduzam tempo da obra, dentre outras que otimizem a sua execução e proporcionem economia, são demandas atuais essenciais para o sucesso e consolidação de um empreendimento de construção, e para seus fins comerciais. De conseguinte, os processos construtivos e as gestões dos projetos geotécnicos, exigem dos engenheiros de fundações conhecimentos aprofundados nas áreas de mecânica dos solos e rocha, e também de geologia de engenharia.

Portanto, gerar soluções inovadoras e economicamente viáveis dentro deste campo da engenharia, resulta em desafios a serem superados nesta área específica.

Sob tais aspectos, os projetos de fundações são desenvolvidos considerando dois modelos consagrados mundialmente pela geotecnia, conforme especificados abaixo e já definidos pela NBR 6122/2010:

- Fundação rasa: sapatas, sapatas corridas, blocos e pequenos tubulões, radier;
- Fundação profunda: tubulões profundos, estacas (escavadas e cravadas).

Segundo a NBR 6122/2010, radier é o elemento de fundação superficial que abrange parte ou a totalidade dos pilares de uma estrutura, distribuindo-lhe os carregamentos.

Assim sendo, a utilização da solução em radier para fundação de edifícios torna-se cada vez mais necessária, diante do atual cenário econômico brasileiro. Rapidez e economia na execução são alguns dos principais fatores que incentivam a aplicação do radier. Por outro lado, torna-se necessária a utilização de ferramentas computacionais, que possibilitem cada vez mais análises geotécnicas/estruturais rigorosas sob o ponto de vista conceitual, evitando-se, assim, previsões inadequadas e conseqüentemente, danos estruturais praticamente irreversíveis (**Figura 1**).

Figura 1 - Trinca em Alvenaria Estrutural provocada por recalque na fundação.



Fontes:<http://estamosricos.com.br/comparacoes/predios-do-minha-casa-no-rio-terao-que/> Acessado em: 21 out. 2017.

Materiais de Métodos

Modelagem do radier para estudo de caso

O estudo de caso em explanação, apresenta metodologia para dimensionamento de um projeto em radier de concreto armado, em edifício residencial de quatro pavimentos, com paredes de concreto armado moldado *in*

loco. Esse estudo foi idealizado para a empresa Impacto Engenharia e Empreendimentos Ltda., localizada na Região Metropolitana de Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais. Os projetos foram concebidos para o programa Minha Casa Minha Vida, na cidade de São Joaquim de Bicas, Minas Gerais. Esse empreendimento foi classificado, segundo a NBR-12721/2006, como edificação de uso residencial, de padrão PP-4B (Prédio Popular de Quatro Pavimentos com baixo padrão de Acabamento). Dentro dessa classificação, foi aplicada a melhor metodologia e logística na concepção do projeto de fundação. Obteve-se dados de sondagens de 3 furos no qual foram executados segundo procedimento da NBR 6484/2002, tendo solo coesivo como resultado para os três furos.

Caracterização da edificação

O edifício residencial tem quatro pavimentos, e foi projetado em conformidade com as seguintes concepções arquitetônicas:

- I. Pavimento térreo sem pilotis (Figura 2) com quatro apartamentos, com uma unidade adaptada para pessoas portadoras de necessidade especiais (PNE), e com área total de projeção de 208,86 m²;
- II. Pavimento tipo com quatro apartamentos, sem adaptações especiais;
- III. Pavimento cobertura sem acesso, com telhado cerâmico cobrindo todos os apartamentos;
- IV. Toda a arquitetura deste edifício foi concebida para utilização de estrutura de paredes de concreto armado, com modelagem estrutural no conceito de paredes em monolítico sólido, semelhante à metodologia de cálculo de alvenaria estrutural (Figura 3).

Figura 2. Planta baixa do pavimento térreo do edifício.

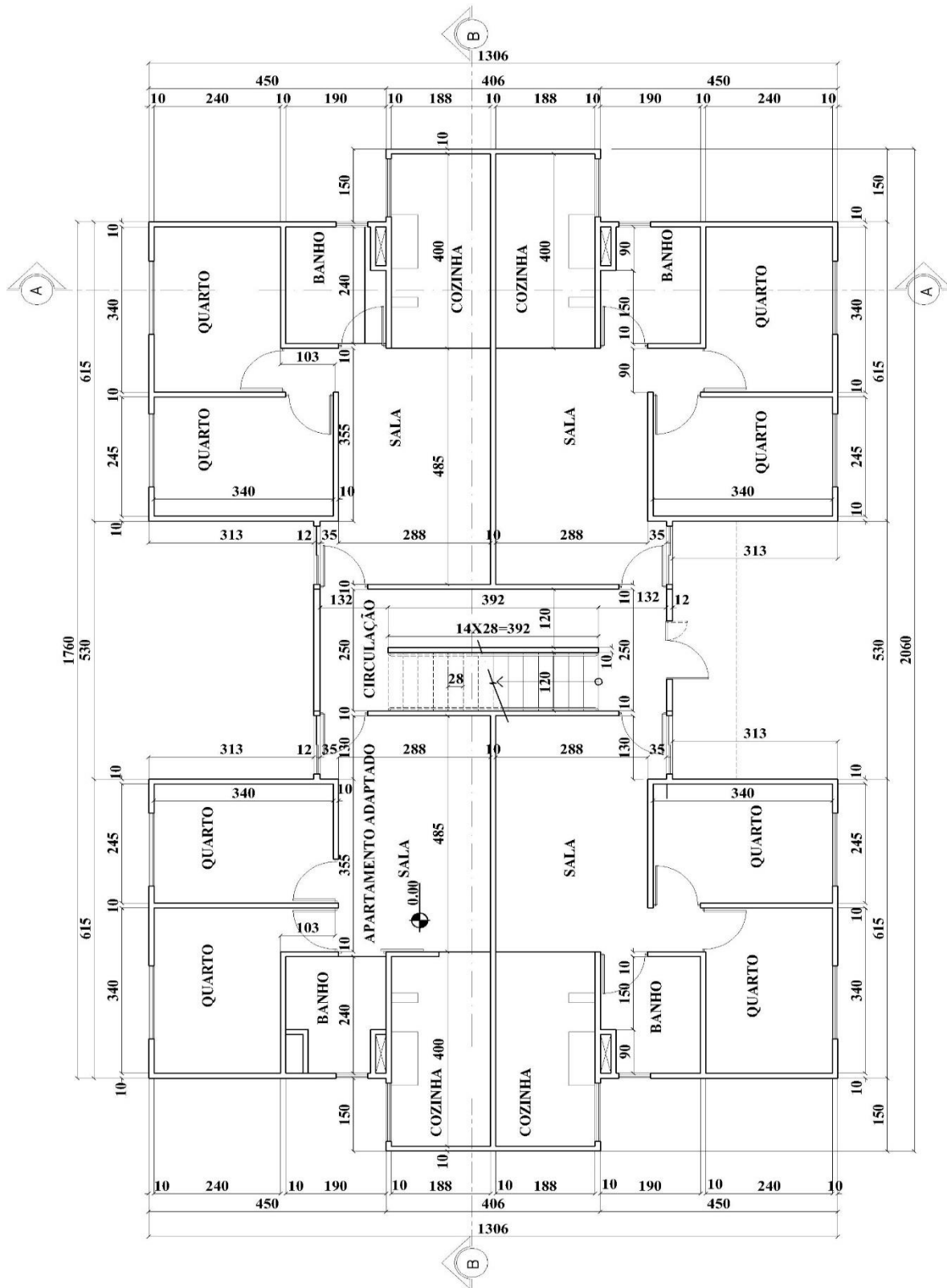


Figura 3. Modelo estrutural do edifício com paredes de concreto armado.

Dentro destas modelagens da fundação dos radies, adotaram-se os parâmetros da tabela abaixo, como base para o dimensionamento estrutural e geotécnico de cada um dos modelos (tabela 2).

Tabela 2. Modelos e seus parâmetros utilizados na análise de elementos finitos.

Grupo	Modelos	Consistência dos solo NBR 7250/82	NSPT adotado Média N° goples	Tensão admissível do Solo (MPa)	Espessura do Radier(cm)
1	1 a 3	MOLE	5	0,10	15 - 25 - 40
	4 a 6	MOLE	5	0,10	15 - 25 - 40
	6 a 9	MOLE	5	0,10	15 - 25 - 40
2	10 a 12	MÉDIO	10	0,20	15 - 25 - 40
	13 a 15	MÉDIO	10	0,20	15 - 25 - 40
	16 a 18	MÉDIO	10	0,20	15 - 25 - 40
3	19 a 21	RIJO	15	0,30	15 - 25 - 40
	22 a 24	RIJO	15	0,30	15 - 25 - 40
	25 a 27	RIJO	15	0,30	15 - 25 - 40

Dados para concepção do radier

O software Cypecad realiza cálculos e dimensionamento de estruturas e fundações em concreto armado, madeira e aço para estruturas submetidas a esforços verticais e horizontais. Com ele é possível criar desenhos que ilustram as cargas existentes, os esforços em cada ponto da estrutura, deformações, armaduras longitudinais e transversais designadas, assim como a compatibilidade com arquivos DWG, além de listagens de dados e resultados de cálculos.

O radier em questão é uma laje maciça, cuja discretização dos planos se realiza em elementos finitos de malha 20 x 20 cm, onde se efetua uma condensação estática de todos os graus de liberdade. O programa trabalha com 6 graus de liberdade, sendo 3 de rotação e 3 de translação em torno dos eixos: X, Y e Z. Considera-se inderfomabilidade em seu plano e deformação por cortante. As lajes de fundação têm discretização idêntica às de lajes maciças de piso, com molas, cuja constante se define a partir do coeficiente de Winkler, em que cada plano pode ter coeficientes diferentes.

Foram feitas 27 modelagens numéricas, conforme tabela 2, com diferentes características geométricas e com propriedades que as distinguem, como a espessura da laje de fundação e o comprimento de borda/rodapé, além de propriedades geotécnicas, variáveis quanto à tensão admissível do solo e, conseqüentemente, o seu coeficiente de recalque.

São relacionados os Modelos através dos quais foram realizadas análises numéricas pelo Método dos Elementos Finitos, sendo fornecidos parâmetros de geometria, tensão admissível e coeficiente de recalque (K_v s) baseado na teoria de Winkler, e utilizados dados fornecidos pelo método Morrison (1993) (tabela 3).

Tabela 3. Modelos utilizados na simulação numérica dos radies.

MODELOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA				
MODELO	ESPESSURA DO RADIER (H) cm	FÔRMA COMP. RODAPÉ	TENSÃO ADMISSÍVEL DO SOLO (MPa)	COEFICIENTE DE RECALQUE Kvs (KN/m³)
MODELO 1	16	Sem borda	0,10	22000
MODELO 2	25	Sem borda	0,10	22000
MODELO 3	40	Sem borda	0,10	22000
MODELO 4	16	60	0,10	22000
MODELO 5	25	60	0,10	22000
MODELO 6	40	60	0,10	22000
MODELO 7	16	120	0,10	22000
MODELO 8	25	120	0,10	22000
MODELO 9	40	120	0,10	22000
MODELO 10	16	Sem borda	0,20	40000
MODELO 11	25	Sem borda	0,20	40000
MODELO 12	40	Sem borda	0,20	40000
MODELO 13	16	60	0,20	40000
MODELO 14	25	60	0,20	40000
MODELO 15	40	60	0,20	40000
MODELO 16	16	120	0,20	40000
MODELO 17	25	120	0,20	40000
MODELO 18	40	120	0,20	40000
MODELO 19	16	Sem borda	0,30	60000
MODELO 20	25	Sem borda	0,30	60000
MODELO 21	40	Sem borda	0,30	60000
MODELO 22	16	60	0,30	60000
MODELO 23	25	60	0,30	60000
MODELO 24	40	60	0,30	60000
MODELO 25	16	120	0,30	60000
MODELO 26	25	120	0,30	60000
MODELO 27	40	120	0,30	60000

O Cypecad, por meio do Método dos Elementos Finitos, analisou a laje de fundação como um sistema de molas, adotando a metodologia de Winkler. São apresentadas as malhas que ilustram os lançamentos dos modelos, especificando-se os números de nós e os números de elementos para modelos de radier sem borda (**Figura 4**), com borda com comprimento de 60 cm (**Figura 5**) e com borda com comprimento de 120 m, respectivamente (**Figura 6**).

Figura 4. Modelo de malha para um radier sem borda

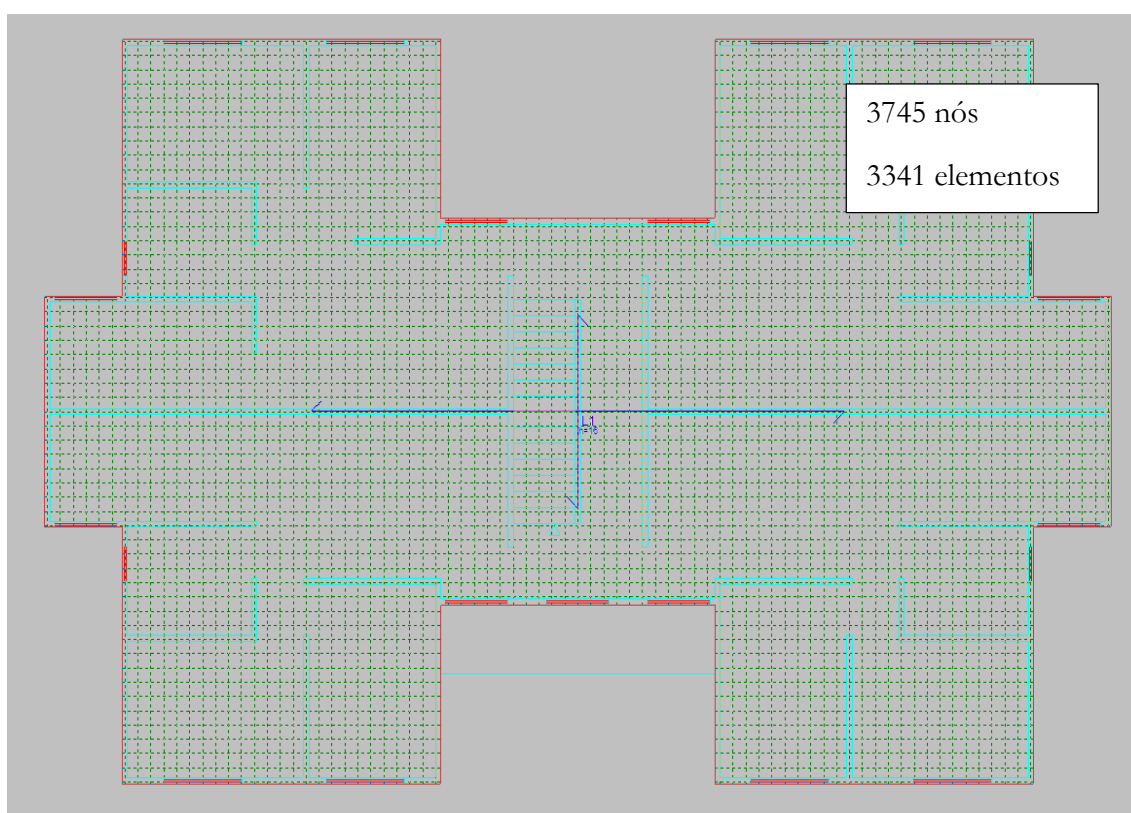


Figura 5. Modelo de malha para um radier com 60cm de borda.

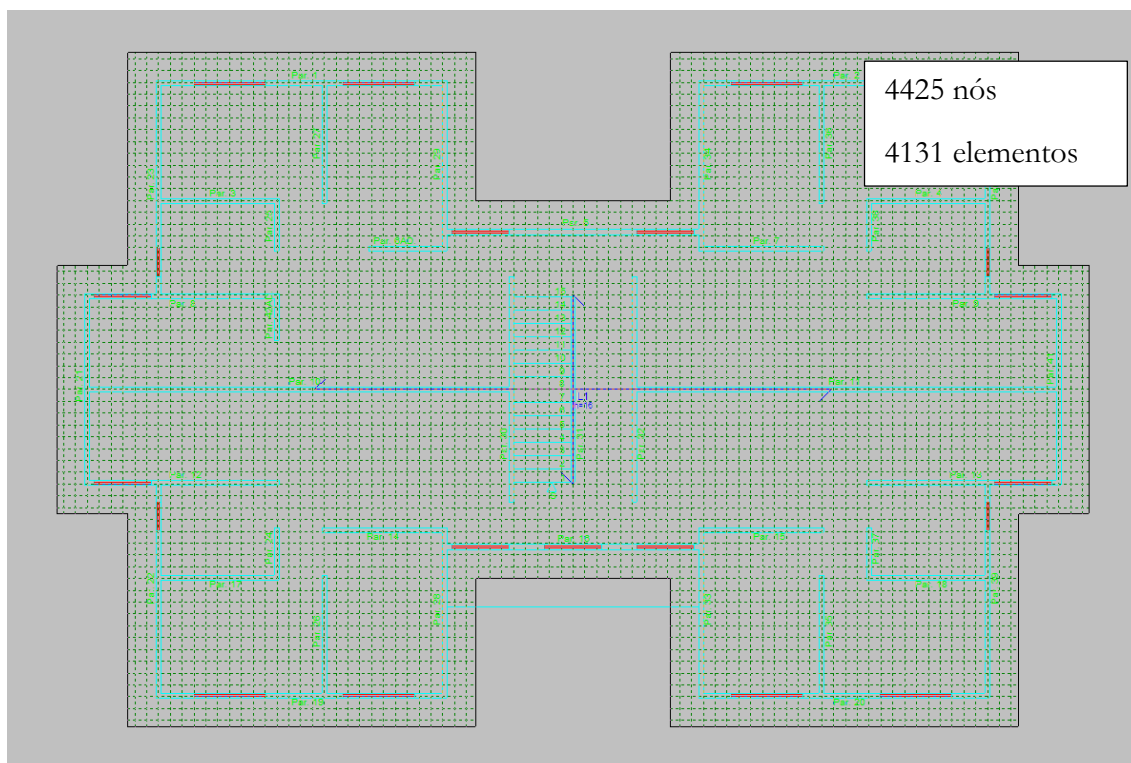
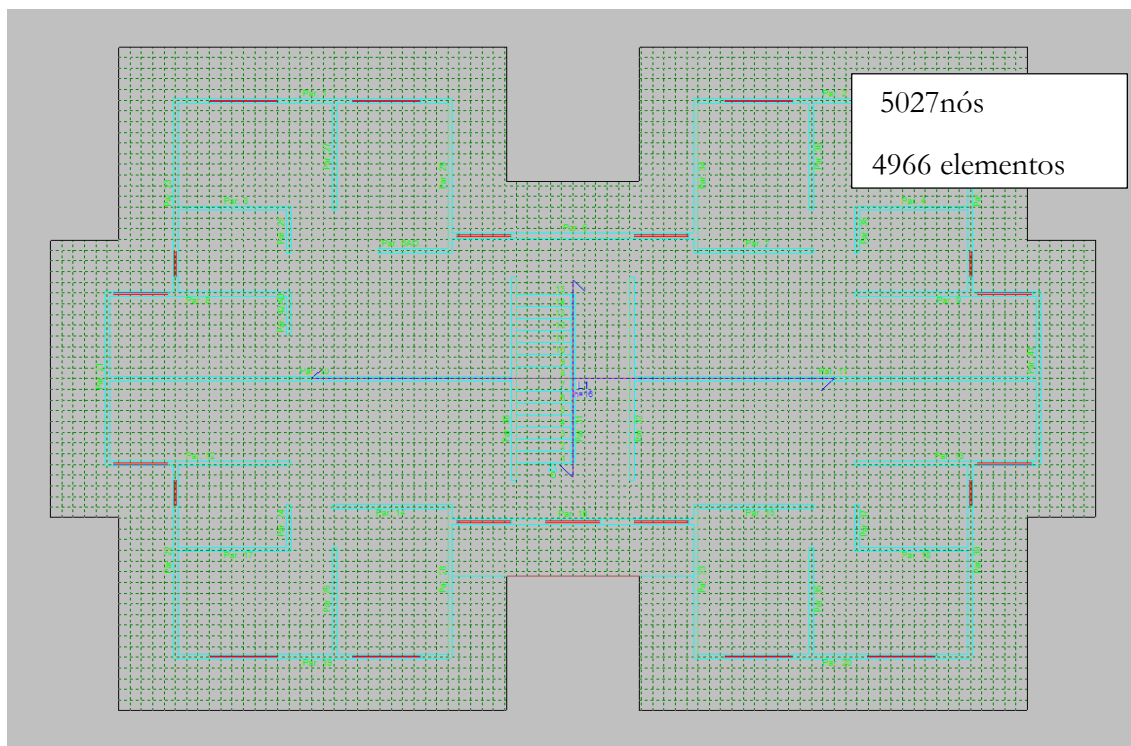
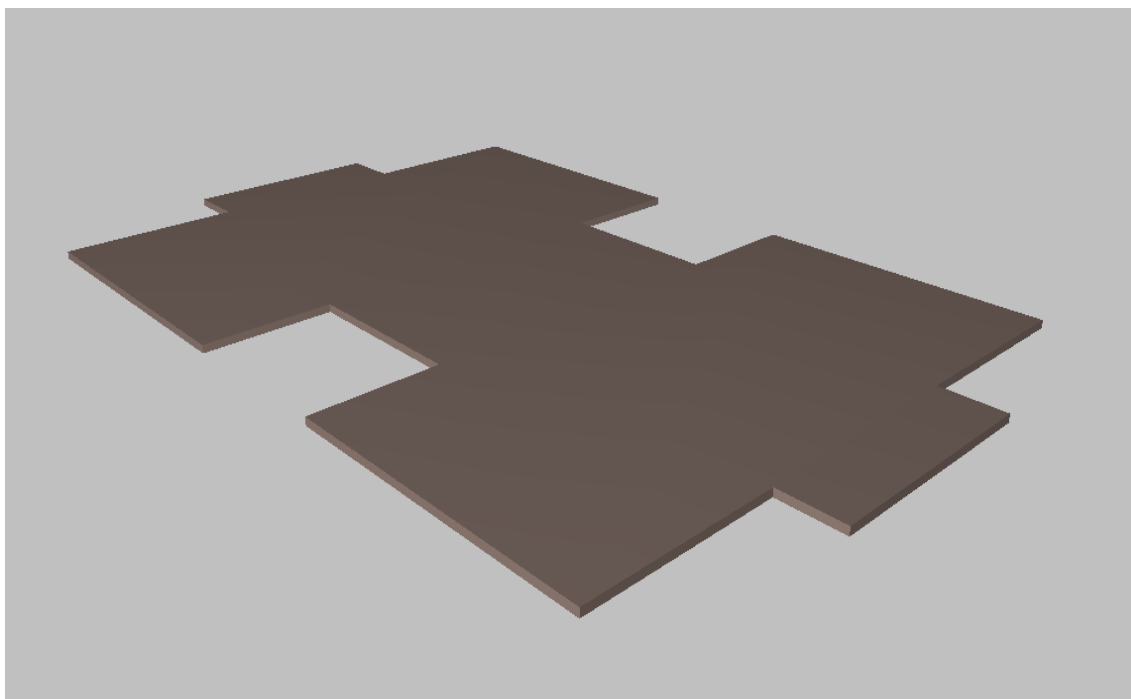


Figura 6. Modelo de malha para um radier com 120cm de borda.



Utilizando-se o *software* Cypecad, gerou-se uma imagem 3D dos elementos de fundação tipo radier que foram analisados (**Figura 7**).

Figura 7. Modelo 3D do radier.



Resultados

Os resultados das análises numéricas obtidas nos 27 (vinte e sete) modelos propostos de radier, foram comparados e analisados para a obtenção de parâmetros de tensões e deslocamento, verificando-se o quanto a geometria da fôrma influencia na distribuição das tensões sobre o solo, e qual foi o deslocamento que cada placa apresentou de acordo com os parâmetros de espessura e utilização do coeficiente de recalque K_v s adotados em cada análise. São apresentados 3 dos 27 modelos feitos em modelagens de elementos finitos, apresentando-se os principais resultados de isovalores para tensão no solo e deslocamento do radier (Figuras 8 a 13).

Figura 8. Tensão resultante no solo do Modelo 1 (tensão em MPa).

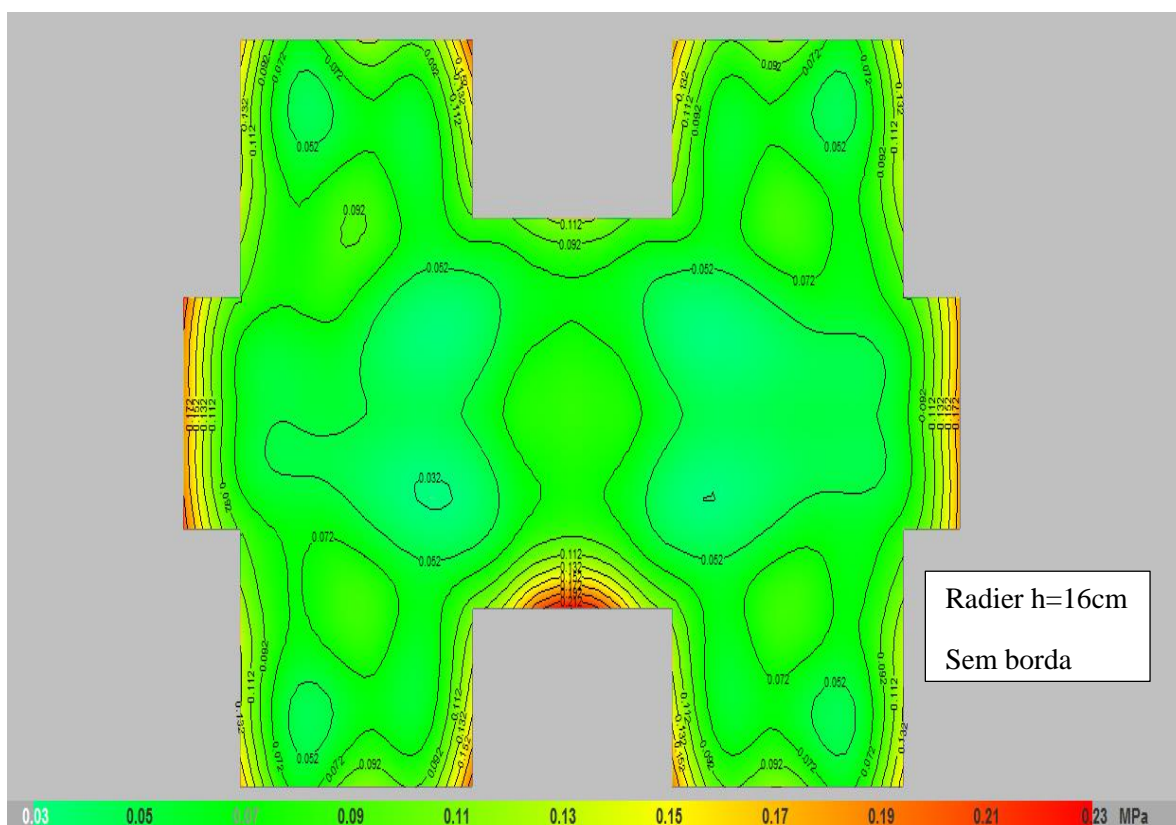


Figura 9. Recalque no radier do Modelo 1 (deslocamento em mm)

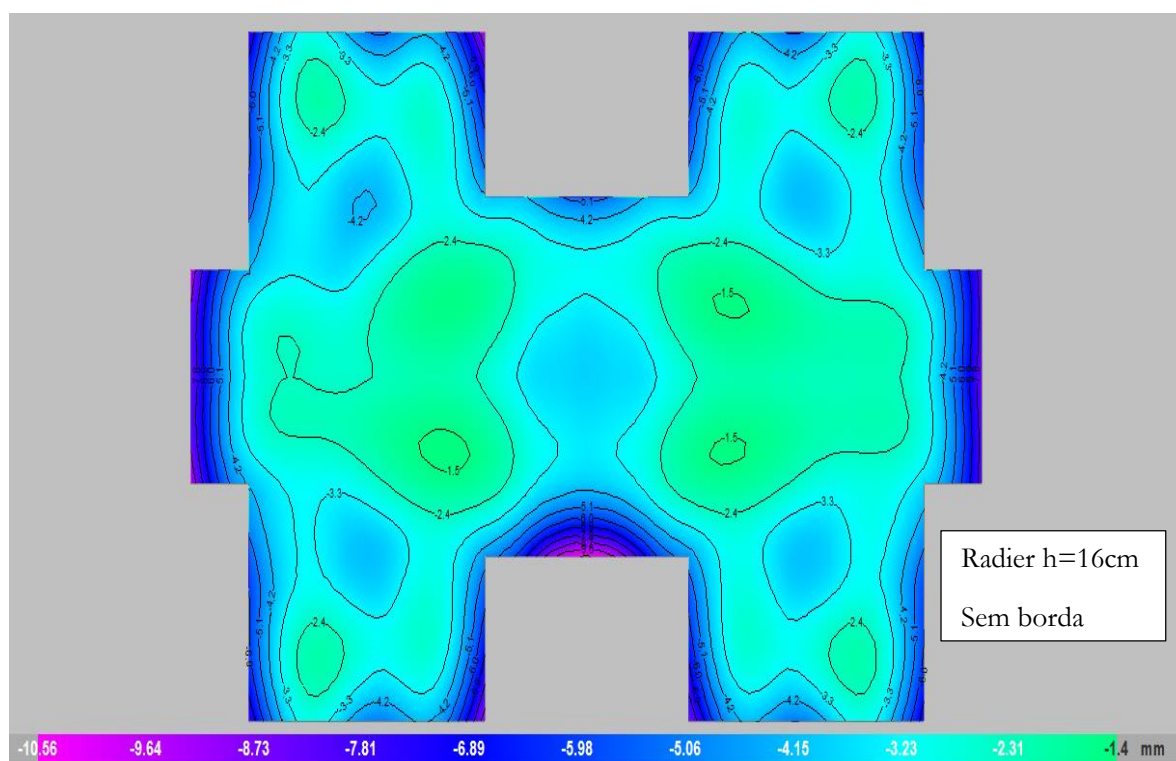


Figura 10. Tensão resultante no solo do Modelo 10 (tensão em MPa).

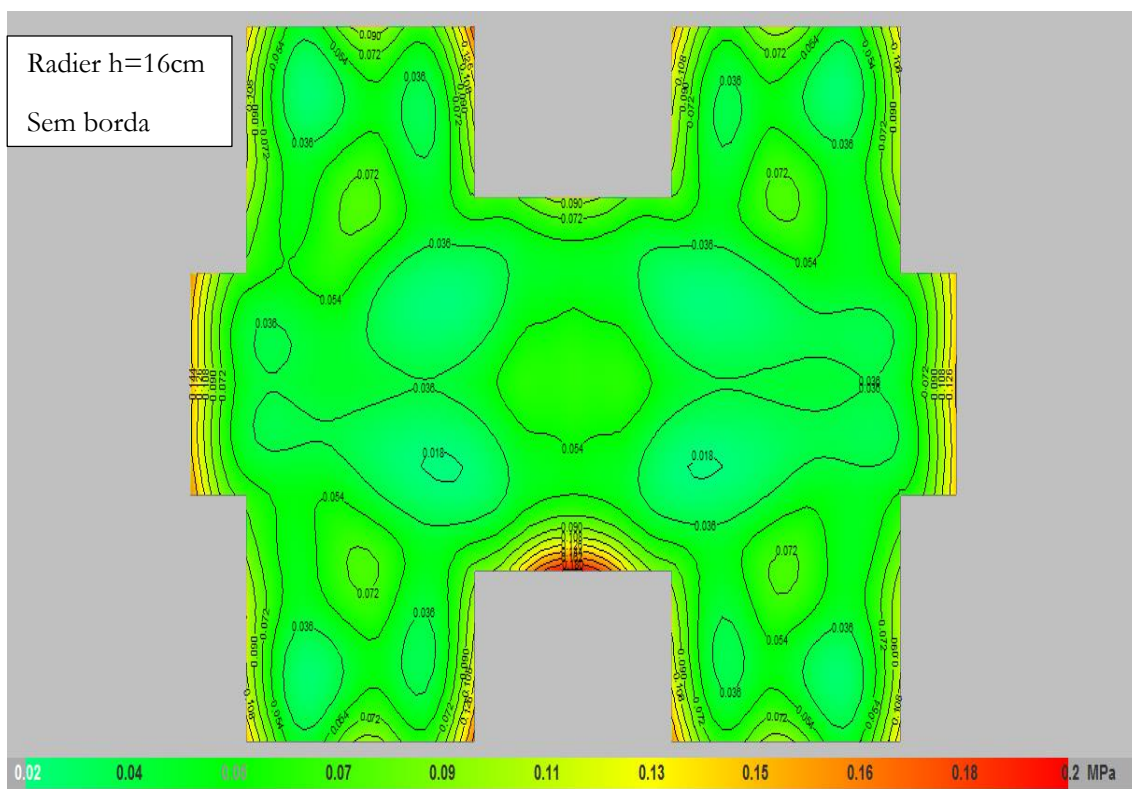


Figura 11. Recalque no radier do Modelo 10 (deslocamento em mm).

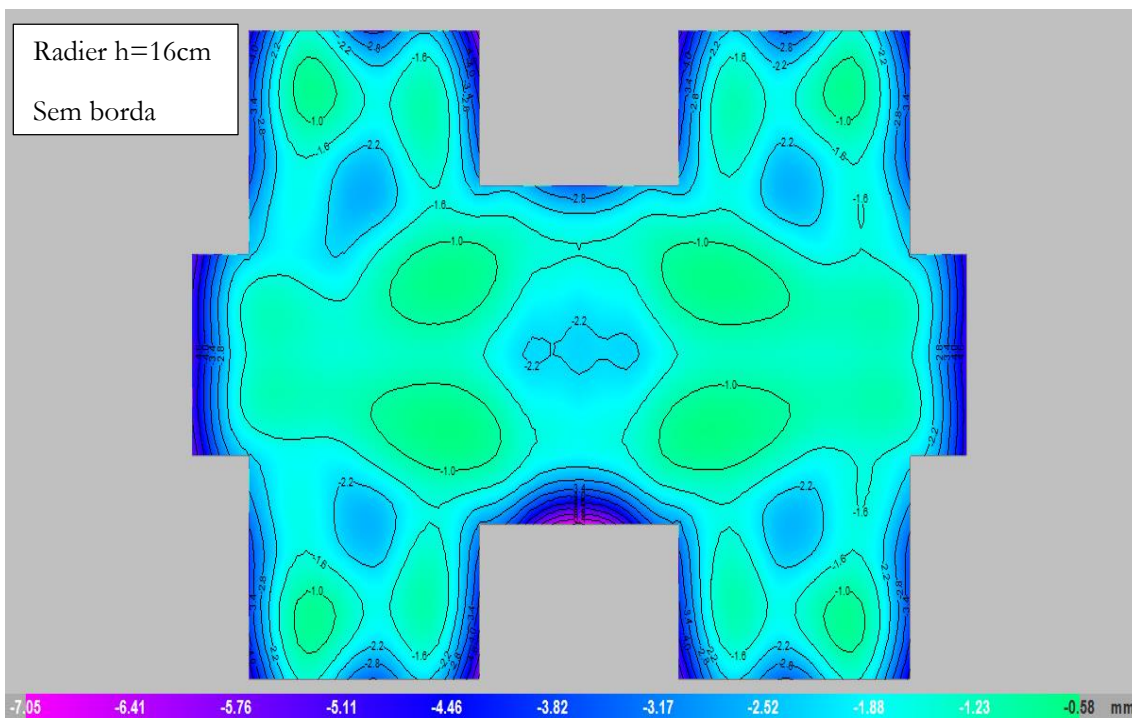


Figura 12. Tensão resultante no solo do Modelo 19 (tensão em MPa)

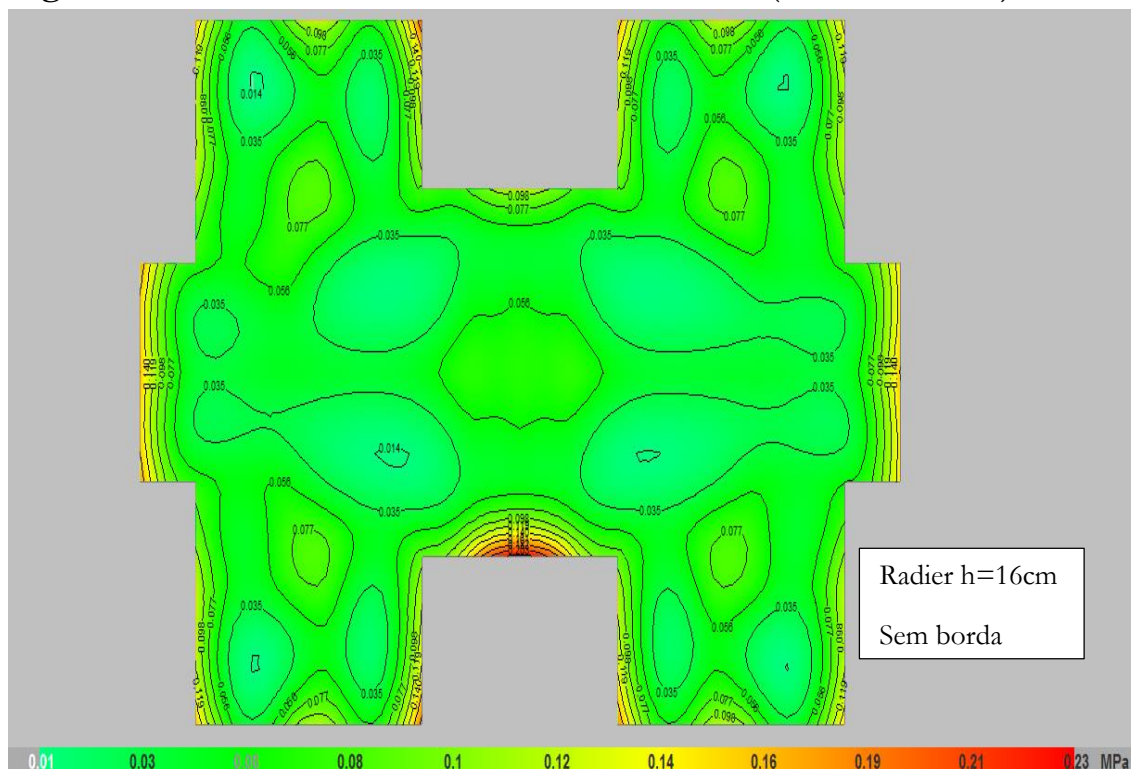
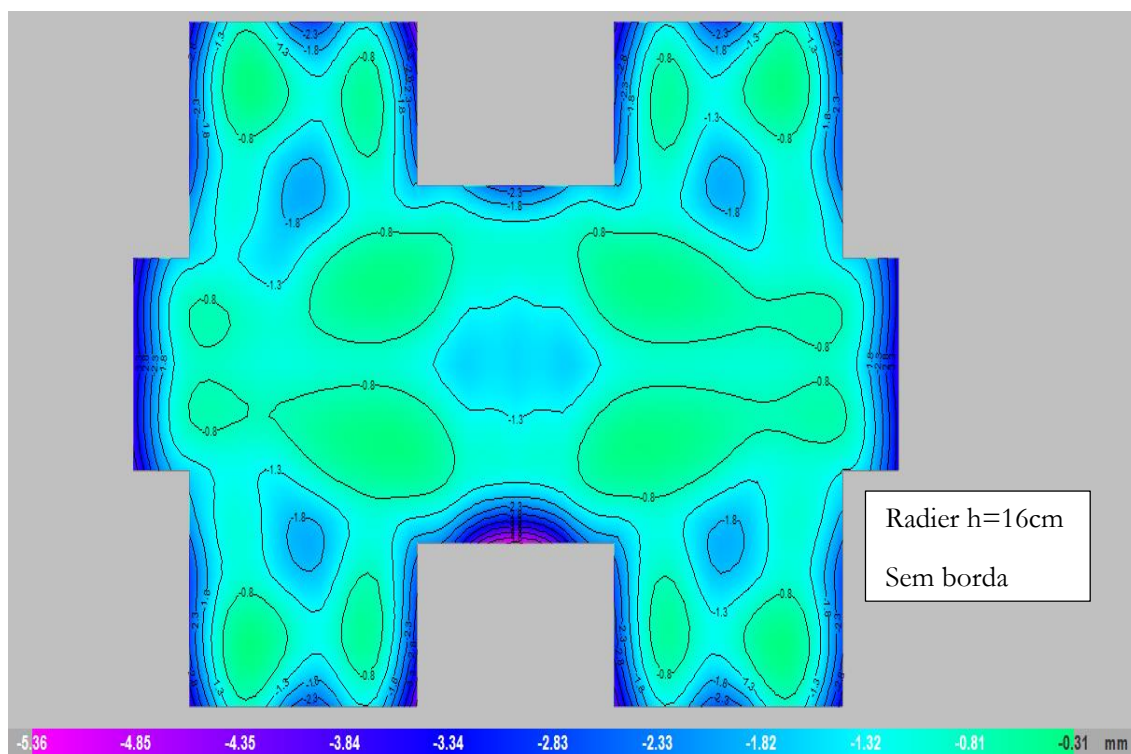


Figura 13. Recalque no radier do Modelo 19 (deslocamento em mm).



Para melhor compreensão, apresenta-se uma planilha das análises numéricas encontradas, comparativa de tensões admissível e máxima resultantes (**tabela 4**), recalques totais e deslocamentos máximos (**tabela 5**) e taxa de insumos: fôrma, volume de concreto e aço (**tabela 6**), para os 27 modelos analisados.

Tabela 4. Resultados da tensão admissível nos Modelos de radier analisados.

MODELO	TENSÃO ADMISSÍVEL DO SOLO σ_a (MPa)	TENSÃO MÁXIMA RESULTANTE NO RADIER σ_r (MPa)	TENSÃO $\sigma_a < \sigma_r$	% UTILIZAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL
Modelo 1	0,1	0,23	Não Ok	230,00%
Modelo 2	0,1	0,16	Não Ok	160,00%
Modelo 3	0,1	0,14	Não Ok	140,00%
Modelo 4	0,1	0,09	Ok	90,00%
Modelo 5	0,1	0,07	Ok	70,00%
Modelo 6	0,1	0,06	Ok	60,00%
Modelo 7	0,1	0,07	Ok	70,00%
Modelo 8	0,1	0,06	Ok	60,00%
Modelo 9	0,1	0,06	Ok	60,00%
Modelo 10	0,2	0,2	Ok	100,00%
Modelo 11	0,2	0,14	Ok	70,00%
Modelo 12	0,2	0,11	Ok	55,00%
Modelo 13	0,2	0,09	Ok	45,00%
Modelo 14	0,2	0,08	Ok	40,00%
Modelo 15	0,2	0,07	Ok	35,00%
Modelo 16	0,2	0,08	Ok	40,00%
Modelo 17	0,2	0,07	Ok	35,00%
Modelo 18	0,2	0,06	Ok	30,00%
Modelo 19	0,3	0,23	Ok	76,67%
Modelo 20	0,3	0,15	Ok	50,00%
Modelo 21	0,3	0,11	Ok	36,67%
Modelo 22	0,3	0,1	Ok	33,33%
Modelo 23	0,3	0,09	Ok	30,00%
Modelo 24	0,3	0,07	Ok	23,33%
Modelo 25	0,3	0,09	Ok	30,00%
Modelo 26	0,3	0,07	Ok	23,33%
Modelo 27	0,3	0,06	Ok	20,00%

Tabela 5. Resultados de recalques/deslocamentos diferenciais.

MODELO	RECALQUE TOTAL MÁXIMO $S_{máx}$ (mm)	RECALQUE TOTAL MÍNIMO $S_{mín}$ (mm)	RECALQUE DIFERENCIAL MÁXIMO $\delta_{máx}$ (mm)	DISTÂNCIA ENTRE OS DOIS PONTOS (mm)	RECALQUE DIFERENCIAL ADMISSÍVEL δ_{adm} (mm)	$\delta_{máx} \leq \delta_{adm}$
1	-10,56	-1,4	-9,16	4300	8,6	Não ok
2	-7,44	-1,99	-5,45	6000	12	Ok
3	-6,25	-2,54	-3,71	6300	12,6	Ok
4	-5,54	-1,29	-4,25	4600	9,2	Ok
5	-4,66	-1,82	-2,84	5200	10,4	Ok
6	-4,1	-2,39	-1,71	6300	12,6	Ok
7	-4,7	0,3	-5	6000	12	Ok
8	-4	-0,31	-3,69	5900	11,8	Ok
9	-3,65	-0,97	-2,68	12800	25,6	Ok
10	-7,05	-0,58	-6,47	4400	8,8	Ok
11	-4,77	-1,01	-3,76	4700	9,4	Ok
12	-3,76	-1,31	-2,45	6300	12,6	Ok
13	-3,28	-0,61	-2,67	4500	9	Ok
14	-2,8	-0,91	-1,89	4800	9,6	Ok
15	-2,42	-1,23	-1,19	6300	12,6	Ok
16	-2,86	0,26	-3,12	5700	11,4	Ok
17	-2,39	-0,09	-2,3	6000	12	Ok
18	-2,13	-0,42	-1,71	6000	12	Ok
19	-5,36	-0,31	-5,05	4300	8,6	Ok
20	-3,58	-0,61	-2,97	4600	9,2	Ok
21	-2,66	-0,84	-1,82	6400	12,8	Ok
22	-2,26	-0,3	-1,96	4500	9	Ok
23	-1,99	-0,56	-1,43	4800	9,6	Ok
24	-1,7	-0,79	-0,91	5900	11,8	Ok
25	-2,04	0,19	-2,23	6200	12,4	Ok
26	-1,69	0	-1,69	5800	11,6	Ok
27	-1,49	-0,25	-1,24	6800	13,6	Ok

Tabela 6. Volumes de fôrma, consumo de concreto e aço dos Modelos.

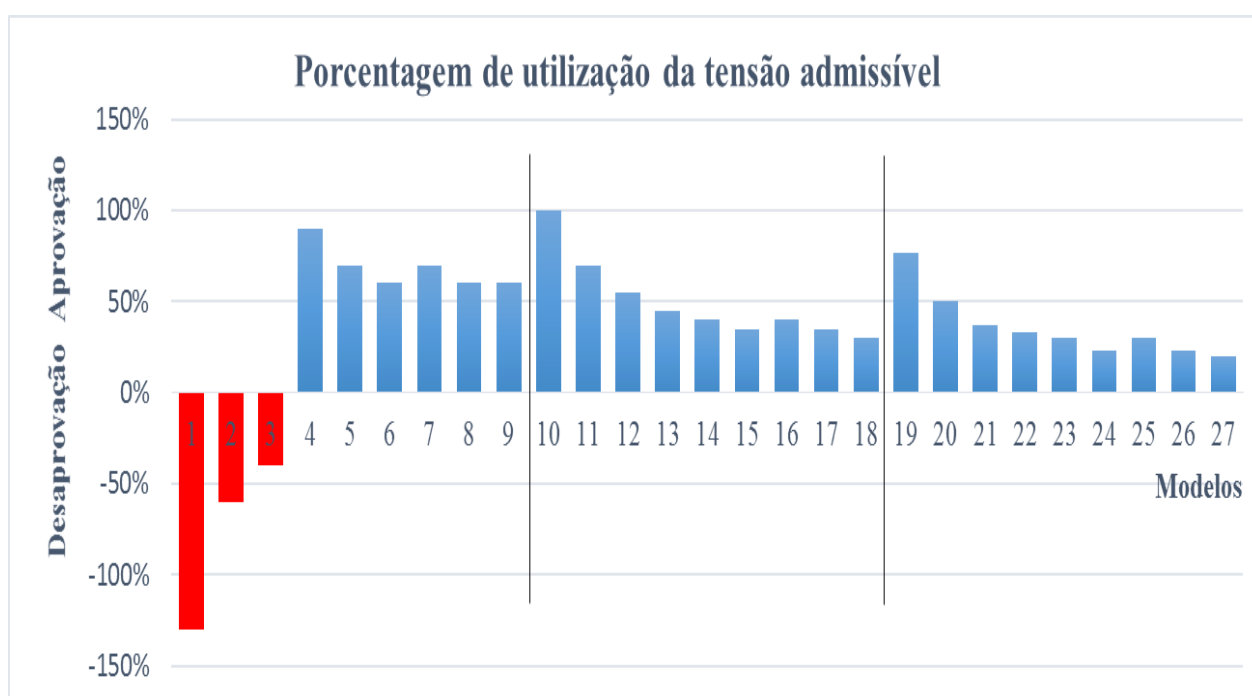
MATERIAIS UTILIZADOS				
GRUPO	MODELO	FORMA (m²)	CONCRETO (m³)	AÇO (kg)
1	Modelo 1	-	-	-
	Modelo 2	-	-	-
	Modelo 3	-	-	-
	Modelo 4	13,54	41,31	3416
	Modelo 5	21,16	64,55	2982
	Modelo 6	33,86	103,28	3749
	Modelo 7	14,31	49,67	4169
	Modelo 8	22,36	77,61	3624
	Modelo 9	35,78	124,17	4529
2	Modelo 10	12,78	33,42	3594
	Modelo 11	19,96	52,21	2908
	Modelo 12	31,94	83,54	3100
	Modelo 13	13,54	41,31	3008
	Modelo 14	21,16	64,55	2730
	Modelo 15	33,86	103,28	3704
	Modelo 16	14,31	49,67	3820
	Modelo 17	22,36	77,61	3202
	Modelo 18	35,78	124,17	4451
3	Modelo 19	12,78	33,42	3223
	Modelo 20	19,96	52,21	2826
	Modelo 21	31,94	83,54	3058
	Modelo 22	13,54	41,31	2926
	Modelo 23	21,16	64,55	2639
	Modelo 24	33,86	103,28	3612
	Modelo 25	14,31	49,67	3424
	Modelo 26	22,36	77,61	3127
	Modelo 27	35,78	124,17	4433

Discussão

Analisando-se os modelos em que a tensão admissível é maior que a tensão solicitante, calcula-se a porcentagem de utilização da tensão resultante, ou seja: qual a proporção da tensão admissível que está sendo utilizada, como mostrado na **tabela 4**. Ressalta-se que, para cálculos estruturais de fundações em geral, considera-se a tensão admissível igual à tensão solicitante, utilizando-se sempre os fatores de segurança necessários, de tal forma que a resistência do solo estaria sendo totalmente usada, fato este que, dependendo do caso, pode gerar economia de materiais.

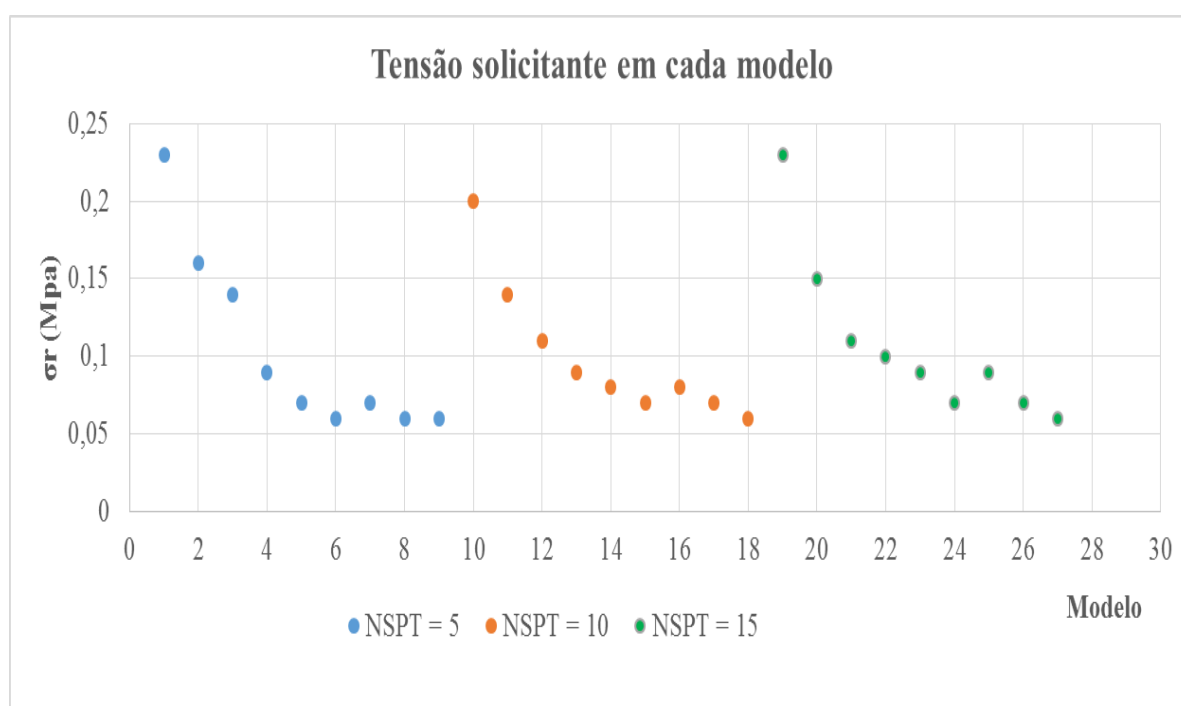
Primordialmente, destaca-se que as análises feitas têm o intuito de balizar a escolha de um modelo mais adequado para fundações do tipo radier. Contudo, vários fatores podem influenciar essa tomada de decisão. O modelo mais indicado é aquele cujos parâmetros geotécnicos, geométricos e estruturais estejam dentro das taxas mais próximas ao valor de 100%. Esse fator, porém, depende da interação entre o solo e a estrutura de fundação que culminará na melhor escolha para cada modelo de fundação (gráfico 1).

Gráfico 1. Demonstra a utilização de tensão admissível do solo nos Modelos.



Analisando-se os valores mostrados na **tabela 4**, constata-se que alguns modelos do grupo 1: Modelos 1, 2 e 3, não estão de acordo com a premissa $\sigma < \sigma_r$. Isso significa que os modelos em questão não suportam a tensão que está sendo solicitada. Logo, o solo poderá entrar em ruptura. Ainda dentro desse grupo, merece destaque o Modelo 4, que teve 90% de aproveitamento da tensão resultante, o que, *a priori*, faz com que seja considerado um modelo altamente indicado para todos dentro do grupo 1 (gráfico 2).

Gráfico 2. Demonstra a tensão solicitante do solo nos Modelos.



Para o grupo 2, todos os modelos apresentam tensões resultantes menores ou iguais à tensão admissível. Entretanto, o Modelo 10 tem 100% da utilização da tensão resultante, o que mostra um indício de que seja o modelo “ideal”, pelo menos para esse requisito.

Já no grupo 3, o Modelo 19 teve aproximadamente 77% de aproveitamento da tensão resultante, sendo esse o modelo que apresenta melhor resultado.

As lajes do radier apresentam um recalque máximo admissível, que deve

ser menor do que o recalque máximo gerado pelos esforços solicitantes da estrutura. Para análise de recalques diferenciais específicos ou distorções angulares, também foi possível a avaliação conforme valores da **tabela 5**. Devido ao fato de estar em contato com o solo, a laje de fundação não tem seu maior recalque diferencial no centro da placa, como as lajes convencionais, sendo suas deformações tecnicamente conhecidas como deslocamentos. Com o uso do *software* Cypecad, para simulação numérica, obtém-se os valores dos recalques (deslocamentos) em toda a placa, conforme ilustrados nas figuras de isovalores para deslocamentos **Figuras 9, 11 e 13**. Segundo BJERRUM (1963), o recalque diferencial máximo $\delta_{\text{máx}}$ resulta da diferença entre os recalques máximos e mínimos, e a distância entre esses dois pontos, se refere ao vão que foi analisado para o cálculo da distorção angular β e dado para cada tipo de solo.

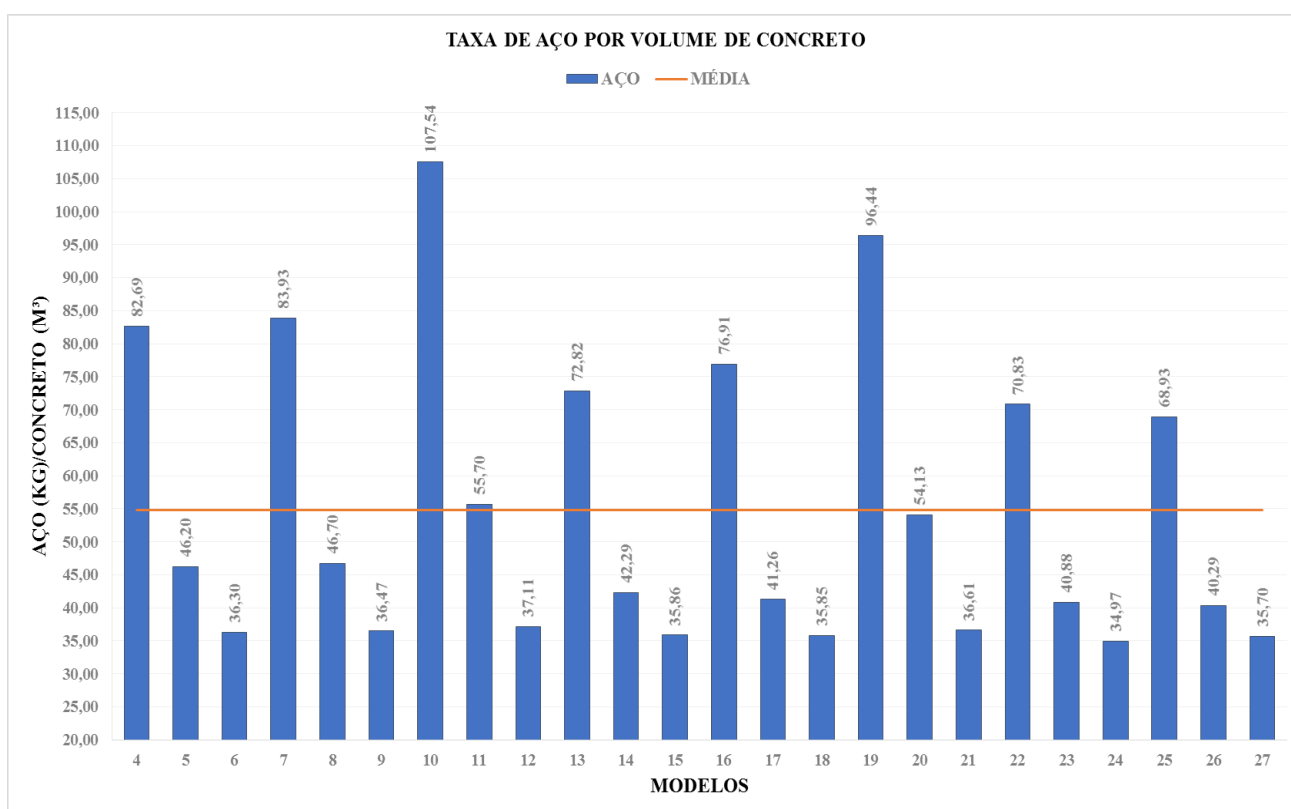
Na **tabela 5** ficou demonstrado os valores de deslocamento/recalque diferencial máximos e admissíveis, comparando-os com os gerados pelos esforços solicitantes, e também, os valores de distorção angular para cada modelo, sendo que, para se atingir um limite seguro de não-ocorrência de fissuras em obras prediais, considerou-se um valor máximo de β igual a 1/500. Para o cálculo do recalque diferencial máximo admissível, utilizou-se a razão entre a distância entre os dois pontos (vão) analisados $L/500$, ou seja: os modelos que tiverem recalque diferencial devido ao esforço solicitante, menor do que o recalque diferencial admissível, também terão valores de distorção angular inferiores a 1/500. Os valores de recalque/deslocamento negativos representam uma conversão (afundamento) usada pelo programa.

Com os resultados da **tabela 5**, percebe-se que apenas o Modelo 1 teve recalque/deslocamento diferencial máximo maior do que o valor admissível, e é o único modelo em desacordo com o valor de β estabelecido anteriormente. O deslocamento/recalque total $S_{\text{máx}}$ do radier não deve ultrapassar 25 mm, conforme recomendações de SOUZA (2012), e de acordo com os valores da **tabela 5**, todos os modelos em questão têm deslocamentos menores. Assim

sendo, todos estão de acordo com o quesito deslocamento final. Logo, os modelos estão dentro dos limites do Estado-Limite de Serviço (ELS), com exceção do Modelo 1.

Aumentando-se a espessura do radier, reduz-se a taxa de diminuição da quantidade de aço por metro cúbico de concreto (tabela 6). Com isso, há grande variação das taxas de aço vinculadas aos modelos de espessura de 16 cm, sendo que essa taxa diminui quando se trata de espessura de 25 cm, até se tornar praticamente irrelevante para radier com espessura de 40 cm (gráfico 2).

Gráfico 2. Resultados com taxa de aço utilizado por cada Modelo.



Conclui-se, portanto, que o aumento da espessura do radier está diretamente relacionado com a diminuição da taxa de aço por volume de concreto, sendo que há variação de acordo com a rigidez do solo. Quanto maior a rigidez do solo, menor a taxa de aço por volume de concreto, se forem comparados três modelos que têm a mesma espessura e o mesmo comprimento de borda, mas com N_{SPT} diferentes. Para espessuras de 16 cm e de 25 cm,

Modelos 25 e 26, respectivamente, possuem menores consumo de volumes de concreto e aço. Esse fato se deve ao maior comprimento da borda e à maior tensão admissível do solo. Já para os radiers de espessura de 40 cm, não se observam grandes diferenças de taxas de aço, devido às escolhas das barras feitas na homogeneização, e o modelo mais indicado é o Modelo 6. Todavia, é necessária a realização de outras análises, avaliando-se as variações de comprimento de borda e de tensão admissível.

Conclusões

Conclui-se que este trabalho, ao analisar numericamente a fundação em radier de concreto armado, com a utilização de software em elementos finitos, permitiu as seguintes observações:

- a rigidez do solo e seus parâmetros geotécnicos são os fatores mais determinantes para o dimensionamento da espessura da placa do radier, sendo, inclusive, o que garante que a fundação atenda os pré-requisitos relativos ao dimensionamento dos estados-limites últimos e de serviço;
- a correta obtenção dos valores da tensão admissível para cada tipo de solo utilizados nos modelos, após rigidez obtida por meio do ensaio de SPT, constitui um dos principais dados que possibilitam o perfeito dimensionamento do radier;
- comprovou-se que a influência da rigidez e da tensão admissível do solo, quando não obtidas e utilizadas de forma correta, poderão trazer sérios problemas de deslocamentos e tensão resultantes excessivas na placa do radier;
- constatou-se que a geometria da borda e da espessura do radier, são os dois principais fatores que exercem influência sobre o dimensionamento que determina a escolha do modelo ideal para esse tipo de fundação;
- após se atingir a tensão admissível necessária com determinada

geometria, ao se aumentarem as dimensões do radier no mesmo grupo, não se observa diferença alguma considerável em ganho de resistência, apenas um aumento de consumo;

- as tensões admissíveis do elemento de fundação, de acordo com os valores estipulados neste trabalho, demonstram que as fundações que têm índice de aproveitamento de tensão na ordem de 40% da tensão solicitante, são as que apontam para o melhor modelo de radier a ser adotado.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7250. *Identificação e descrição de amostras dos solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos*. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 6502. *Rochas e Solos*. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484. Solo - *Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12721. *Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios*. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2010.

BJERRUM, L. Discussion - Section VI Interaction between structure and soil., EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., ISSMFE, Wiesbaden, v. II, v. 2, p. 135-137, 1963.

BJERRUM, L. Discussion. EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3, Wiesbaden, v. III, p. 135, 1963.

CYPECAD – *Manual do sistema Cypecad 3D* – O Software do calculista moderno - Critérios de cálculo. São Paulo: Múltiplos Computação Gráfica, 2017.

MORRISON, NELSON. *Interacción suelo-estructuras: semi-espacio de winkler*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1993.

SOUZA, FÁBIO ALBINO. *Radier: projeto e execução*. Notas de aula. Belo Horizonte, 2012