

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELO ANALÍTICO PARA A ANÁLISE E PROJETO DE GRUPOS
DE ESTACAS ASSENTES EM SOLOS MOLES EM PROCESSO DE
ADENSAMENTO**

MATEO PEREZ AGUDELO

ORIENTADOR: JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, Dr.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO:

BRASÍLIA/DF: OUTUBRO / 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELO ANALÍTICO PARA A ANÁLISE E PROJETO DE GRUPOS
DE ESTACAS ASSENTES EM SOLOS MOLES EM PROCESSO DE
ADENSAMENTO**

MATEO PEREZ AGUDELO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR

JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, (UnB)

(ORIENTADOR)

ENNIO MARQUES PALMEIRA, (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

MAURICIO MARTINES SALES, (UFG)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 01 OUTUBRO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

AGUDELO, MATEO PEREZ

Modelo analítico para a análise e projeto de grupos de estacas assentes em solos moles em processo de adensamento. [Distrito Federal] 2018.

xxiv, 163 p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado-Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Modelo Analítico

2. Grupo de Estacas

3. Processo de Adensamento

4. Subsistência Regional

I. ENC/FT/UnB II.

Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGUDELO, M. (2018). Modelo analítico para a análise e projeto de grupos de estacas assentes em solos moles em processo de adensamento. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 163 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Mateo Pérez Agudelo.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Modelo analítico para a análise e projeto de grupos de estacas assentes em solos moles em processo de adensamento.

GRAU / ANO: Mestre / 2018.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação e mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Mateo Pérez Agudelo

(mateo.civil@gmail.com)

Carrera 69 # 90-17, Barrio Alfonso López

Medellín-Antioquia, Colômbia

A meu filho Tomas Perez Pelaez, meu regalo de Deus e da vida mais prezado, para que nunca desista de alcançar seus sonhos e consiga chegar a cada proposito que deseje, para que sempre confie em ele e não esqueça seu origem, para que consiga fazer tanto como quiser e tanto como fosse possível, para que seja sempre FELÍZ.

AGRADECIMENTOS

No primeiro lugar quero agradecer a Deus por me permitir viver esta experiência maravilhosa, e a todas suas abençoes que teve durante tudo este tempo de trabalho constante.

A toda minha família, família original conformada por minha mãe Liliana Agudelo Aristiabal, meu pai Dario Alonso Perez Cuervo e meu irmão Simon Perez Agudelo. Eles deram a força que muitas vezes eu não tive, sempre foram confiantes em que meu trabalho iria sair da melhor forma possível, me ajudaram com suas orações e me abençoaram com seus bons desejos. Igualmente minha família nova e com a qual estou construindo um lar de amor para toda a vida na qual se encontra minha mulher Paula Andrea Pelaez Vivanco e meu filho Tomas Perez Pelaez, eles foram sempre meu apoio, nunca deixaram de me suportar neste caminho tão longo e me levantaram quando caia de desespero, de exaustação ou de impotência, limpavam minhas feridas e me ajudaram a não desacreditar do meu trabalho, me acompanharam e fizeram parte fundamental deste processo especialmente Paula a mulher mais guerreira e apaixonada pelas pequenas coisas e quem durante este tempo fez de mim um melhor homem, melhor esposo e melhor pessoa.

Quero agradecer ao professor Juan Felix Rodriguez Rebolledo meu orientador, pela grande paciência que teve comigo no processo de mestrado, pelas correções quando foram necessárias e pelas ajudas quando mais precisei.

Ao professor Oswaldo Ordoñez Carmona pela sabedora, pela amizade e por me recomendar estudar nesta universidade tão maravilhosa.

A todos meus queridos amigos que conheci nesta viagem, amigos de estudo, amigos de trabalho, amigos do futebol (Comunidade estrangeira e a Jazz pelada), quero agradecer a todas as pessoas que fizeram possível este trabalho. Especialmente a um amigo muito querido Sergio Reyes pelos conselhos, pela força, pela bonita amizade e por me ensinar que na vida se tem que ser muito forte para levar ela em costas, a tua mãe meu uma boa viagem.

À Universidade de Brasília, ao programa de mestrado em Geotecnia e pela oportunidade de ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

"...No fim tudo dá certo, e se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim..."
Fernando Sabino

RESUMO

O recalque progressivo do solo, associado a mudanças das propriedades em profundidade devido aos processos de rebaixamento das pressões intersticiais no mesmo, é considerado como subsidência regional, a interação deste fenômeno com os diferentes sistemas de fundação implementados na construção civil consegue gerar outro fenômeno denominado como atrito negativo, ambos amplamente estudados em diferentes situações onde se apresentam.

No caso da Cidade do México, esta fornece um dos cenários mais importantes para o estudo do comportamento dos sistemas de fundação que interagem com o atrito negativo gerado pela presença da subsidência regional na zona lacustre da cidade. Ao longo do tempo diferentes autores desenvolveram estudos sobre os sistemas de fundação implementados para contrariar o efeito do rebaixamento das pressões intersticiais do solo que historicamente atinge a cidade, estes estudos corresponderam a modelos analíticos baseados em teorias e postulações que levam em consideração cargas atuantes num sistema de fundação em condições limites, tensões e recalques induzidos pela presença de estacas num meio contínuo, tensões devidas a cargas pontuais, tensões devidas a cargas uniformemente distribuídas sobre superfícies com diferente geometria, entre outros, os quais finalmente permitem projetar sistemas de fundação capazes de trabalhar de forma ótima com os efeitos negativos da subsidência regional, e que em algumas situações conseguem ser projetados em linguagens de programação com a finalidade de fornecer ferramentas de análises que sejam representativas nas diferentes investigações desenvolvidas em temas relacionados com o fenômeno da subsidência regional.

O presente trabalho propõe uma atualização mediante a implementação de *Python* como nova linguagem de suporte para um modelo analítico proposto por um destes autores, no qual se implementou para a avaliação da formulação teórica e matemática do modelo a linguagem de programação *Visual Basic 6.0*, plataforma que atualmente não é mais utilizada, devido a que não consegue implementar atualizações por ser uma plataforma descontinuada no mercado.

A nova atualização foi enquadrada principalmente na mudança do código original do modelo, da plataforma *Visual Basic 6.0*, para *Python* com ênfase na mudança do dimensionamento

das variáveis da formulação matemática, com novas funcionalidades gráficas baseadas nas diferentes livrarias que oferece o pacote de *Python*.

A atualização foi avaliada mediante uma comparação dos resultados obtidos de uma modelagem numérica no software *Plaxis 3D* para diferentes configurações de sistemas de fundação, interagindo com a subsidência regional. Obtendo ótimos resultados similares aos conseguidos pelo modelo analítico programado com *Visual Basic 6.0*.

ABSTRACT

The progressive establishment of the soil, associated with the changes of the properties in depth due to the processes of abatement of the interstitial pressures of the same, is considered as regional subsidence, the interaction of this phenomenon with the different foundation systems implemented in civil construction manages to generate another phenomenon called negative friction, both widely studied in different situations where they occur.

In the case of Mexico City, it provides one of the most important scenarios for the study of the behavior of the foundation systems that interact with the negative friction generated by the presence of regional subsidence in the lacustrine zone of the city. Over time, the authors developed studies on the systems of the foundation implemented to counteract the effect of the abatement of the interstitial pressures of the soil which historically has affected by the city, these studies correspond to analytical models based on theories of applications that take into consideration the loads acting in the foundation system under limited conditions, efforts and settlements induced by the presence of pilots in a continuous medium, efforts due to point loads, efforts due to loads uniformly distributed on surfaces with different geometry, among others. Which finally allow to design foundation systems capable of working optimally with the negative effects of regional subsidence, and that in some situations get projected in programming languages in order to provide analysis tools that are representative in different investigations developed in topics related to the phenomenon of the regional subsidence.

This work proposes an update through the implementation of Python as a new support language for an analytical model proposed by one of these authors, in which was implemented, for the evaluation of the theoretical and mathematical formulation of the Visual Basic 6 programming language model, platform that is no longer used, due to the fact that it is not possible to implement updates because it is a discontinued platform in the market.

The new update was mainly framed in the change of the original code of the model, of the Visual Basic 6.0 platform, for Python with emphasis on the changes in the sizing of the variables of the mathematical formulation, with new graphical functionalities based on the different libraries that offers the Python package.

The update was made by comparing the results of a numerical modeling in the software Plaxis 3D, for different configurations of foundation systems, interacting with the regional subsidence, obtaining optimal results similar to those obtained by the Model analytic programmed with Visual Basic 6.0.

RESUMEN

El asentamiento progresivo del suelo, asociado a los cambios de las propiedades en profundidad debido a los procesos de abatimiento de las presiones intersticiales del mismo, es considerado como subsidencia regional, la interacción de este fenómeno con los diferentes sistemas de fundación implementados en la construcción civil consigue generar otro fenómeno denominado como fricción negativa, ambos ampliamente estudiadas em diferentes situaciones donde se presentan.

En el caso de la Ciudad de México, esta proporciona uno de los escenarios más importantes para el estudio del comportamiento de los sistemas de fundación que interactúan con la fricción negativa generada por la presencia de la subsidencia regional en la zona lacustre de la ciudad. A lo largo del tiempo diferentes autores desarrollaron estudios sobre los sistemas de fundación implementados para contrarrestar el efecto del abatimiento de las presiones intersticiales del suelo que históricamente aqueja la ciudad, estos estudios correspondieron a modelos analíticos basados em teorías e postulaciones que tienen en consideración las cargas actuantes en el sistema de fundación en condiciones limites, esfuerzos y asentamientos inducidos por la presencia de pilotes en un medio continuo, esfuerzos debidos a cargas puntuales, esfuerzos debidos a cargas uniformemente repartidas sobre superficies con diferente geometría, entre otros. Los cuales finalmente permiten diseñar sistemas de fundación capaces de trabajar de forma óptima con los efectos negativos de la subsidencia regional, y que em algunas situaciones consiguen ser proyectados en lenguajes de programación con la finalidad de suministrar herramientas de análisis que sean representativas en las diferentes investigaciones desarrolladas em temas relacionados con el fenómeno de la subsidencia regional.

El presente trabajo propone una actualización mediante la implementación de *Python* como nuevo lenguaje de soporte para un modelo analítico propuesto por uno de estos autores, en el cual se implementó, para la evaluación de la formulación teórica y matemática del modelo el lenguaje de programación *Visual Basic 6.0*, plataforma que actualmente no es más utilizada, debido a que actualmente no se consigue implementar actualizaciones por tratarse de una plataforma discontinuada en el mercado.

La nueva actualización fue encuadrada principalmente en el cambio del código original del modelo, de la plataforma *Visual Basic 6.0*, para *Python* con énfasis en los cambios en el dimensionamiento de las variables de la formulación matemática, con nuevas funcionalidades graficas basadas en las diferentes librerías que ofrece el paquete de *Python*.

La actualización fue evaluada mediante una comparación de los resultados obtenidos de un modelamiento numérico en el software *Plaxis 3D*, para diferentes configuraciones de sistemas de fundación, interactuando con la subsidencia regional, obteniendo óptimos resultados similares a los conseguidos por el modelo analítico programado con *Visual Basic 6.0*.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1	SOLOS MOLES.....	3
2.2	SOLOS MOLES EM PROCESSO DE ADENSAMENTO.....	3
2.3	SUBSIDÊNCIA REGIONAL	4
2.3.1	Subsidência regional no Brasil	5
2.3.2	Subsidência regional em Bogotá (Colômbia).....	6
2.3.3	Subsidência regional na cidade de México (México).....	7
2.3.4	Estrutura geotécnica da Cidade do México.....	8
2.3.5	Efeitos da subsidência regional nas fundações do México	10
2.4	FUNDAÇÕES.....	14
2.4.1	Fundações utilizadas para o controle da subsidência	14
2.4.2	Sistema Radier Estaqueado	15
2.4.3	Fundações profundas.....	17
2.4.4	Estacas utilizadas na Cidade de México.....	17
2.4.4.1	Estacas de ponta	18
2.4.4.2	Estacas de atrito.....	18
2.4.4.3	Estacas de ponta penetrante.....	19
2.4.4.4	Estacas de atrito negativo	19
2.4.4.5	Estacas de controle	21
2.4.4.6	Estacas telescópio.....	21

2.4.4.7	Estacas com cobertura anti-atrito (Sánchez e Santoyo 1996)	22
2.4.4.8	Inclusões injetadas.....	23
2.4.4.9	Inclusões Rígidas.....	23
2.5	MODELOS ANALÍTICOS E SUBSIDÊNCIA REGIONAL	24
2.5.1	Cargas atuantes em um sistema de fundação baseado em estacas.	27
2.5.2	Tensões e recalques induzidos pela presença de estacas em um meio contínuo.	31
2.5.3	Tensões devidas a cargas pontuais	31
2.5.4	Tensões devidas a cargas uniformemente repartidas sobre superfícies circulares	31
2.5.5	Tensões devidas a cargas uniformemente distribuídas sobre superfícies horizontais	33
3	MODELO ANALÍTICO PROPOSTO.....	36
3.1	DESCRIÇÃO	36
3.2	MODIFICAÇÕES PROPOSTAS	39
4	IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO	41
4.1	LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO	41
4.2	DESCRIÇÃO	43
4.2.1	Módulo de Geometria e Cargas.....	43
4.2.2	Módulo de Estratigrafia.....	46
4.2.3	Módulo da Piezometria	48
4.2.4	Módulo dos Pontos e Cortes.....	50
4.2.5	Módulo do Nível Neutro	53
4.2.6	Módulo das tensões e recalques	54
4.2.7	Novas funcionalidades do programa	55
4.2.7.1	Módulo Visualização Gráfica.....	55
4.2.7.2	Módulo Gráficas de Contorno.....	60
4.2.7.2.1	Curva de contorno para tensões verticais	61
4.2.7.2.2	Curva de contorno para recalques verticais finais.....	64
4.3	VALIDAÇÃO	67

4.3.1	Considerações Gerais	67
4.3.1.1	Estratigrafia	67
4.3.1.2	Propriedades do solo das camadas.	70
4.3.1.3	Condições piezométricas.....	70
4.3.1.4	Geometria e propriedades das estacas	72
4.3.2	Grupo de estacas suposto infinito.....	73
4.3.3	Grupo de estacas.....	74
4.3.3.1	Etapa 1	75
4.3.3.2	Etapa 2.....	78
4.3.3.3	Etapa 3.....	81
5	CASO DE ESTUDO	85
5.1	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	85
5.1.1	Etapa 1	86
5.1.2	Etapa 2.....	90
5.1.3	Etapa 3.....	94
5.2	ESTADO LIMITE ÚLTIMO	98
5.2.1	Etapa 1	99
5.2.2	Etapa 2.....	103
5.2.3	Etapa 3.....	107
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	APÊNDICE. PROGRAMAÇÃO DA ESTRUTURA ORIGINAL	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Generalização do tipo de subsidência com seu tipo de intervenção principal.....	5
Tabela 4.1. Propriedades consideradas para calibração do modelo analítico.....	70
Tabela 4.2. Propriedades geométricas das estacas para a calibração da atualização do modelo analítico.	72
Tabela 4.3. Configurações de sistemas de fundação selecionados para a validação do modelo analítico.	72
Tabela 5.1. Configurações de sistemas de fundação selecionados para a calibração do modelo analítico.	85
Tabela 5.2. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo numérico (Plaxis 3D).	86
Tabela 5.3. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo analítico (Micra 2018). ...	86
Tabela 5.4. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 1.	87
Tabela 5.5. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 1.	87
Tabela 5.6. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 2.	90
Tabela 5.7. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 2.	90
Tabela 5.8. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 3.	94
Tabela 5.9. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 3.	95
Tabela 5.10. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo numérico (Plaxis 3D).	99
Tabela 5.11. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo analítico (Micra 2018). .	99
Tabela 5.12. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 1. ..	100
Tabela 5.13. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 1.	100
Tabela 5.14. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 2. ..	103
Tabela 5.15. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 2.	103
Tabela 5.16. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 3. ..	107
Tabela 5.17. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 3.	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Subsidência regional na cidade de Bogotá (tomada do site http://agenciadenoticias.unal.edu.co).	7
Figura 2.2. Evolução da subsidência regional (modificado do laboratório de geoinformática 2009).	7
Figura 2.3. Presença de recalques excessivos na infraestrutura da Cidade de México (tomada do site http://saneamientoindustrial.com).	8
Figura 2.4. Principais formações geológicas do Vale do México (modificado de Mooser 1992).	8
Figura 2.5. Zoneamento geotécnico da Cidade do México (modificado do site https://datos.gob.mx).	9
Figura 2.6. Perfis estratigráficos da zona do lago da Cidade do México (modificado de Rodríguez, 2010).	10
Figura 2.7. Perfil típico do rebaixamento das poro-pressões da zona do lago da Cidade de México (modificado de Rodríguez 2010).	12
Figura 2.8. Emersão aparente de um grupo de estacas no lago de Texcoco.	13
Figura 2.9. Emersão aparente apresentada em um dos apoios da linha 4 do metro da Cidade de México (modificado de Rodríguez 2010).	13
Figura 2.10. Tipos de fundações implementadas com maior frequência na zona lacustre da Cidade de México (modificado de Rodríguez 2010).	15
Figura 2.11. Fundamentos teóricos do sistema radier estaqueado E. Rodriguez (2016).	16
Figura 2.12. Estacas de atrito (modificado de Rodríguez 2010).	19
Figura 2.13. Estacas de atrito negativo (modificado de Rodríguez 2010).	20
Figura 2.14. Estacas entrelaçadas (modificado de Rodríguez 2010 e de Girault 1964).	21
Figura 2.15. Estacas de controle (González, 1948).	21
Figura 2.16. Estaca telescópio (modificado de Correa 1969).	22
Figura 2.17. Inclusões rígidas implementadas em um prédio habitacional de grandes dimensões. (modificado de Rodriguez 2010).	24
Figura 2.18. Estaca que suporta a carga da estrutura e o atrito negativo (modificado de Zeevaert 1973).	25
Figura 2.19. Estacas de atrito (modificado de Zeevaert 1973).	26

Figura 2.20. Interação ao longo prazo entre a estaca e o solo (modificado de Reséndiz e Auvinet 1973).....	28
Figura 2.21. Esquemática da abordagem do Mindlin (modificado de Rodriguez 2010).	31
Figura 2.22. Carga uniformemente repartida sobre uma superfície circular a uma profundidade Df. Modificado de Rodriguez (2010).....	32
Figura 2.23 Carga uniformemente repartida sobre uma superfície horizontal a uma profundidade Df. Modificado de Rodriguez (2010).....	33
Figura 2.24. Cargas equivalentes repartidas para um grupo de inclusões. Modificado de Rodriguez (2001).....	34
Figura 3.1. Diagrama de fluxo do modelo analítico Micra 2011	40
Figura 4.1. Quadro de diálogo da atualização do formulário Geometria e Cargas.	44
Figura 4.2. Quadro de diálogo para importar dados do formulário Geometria e Cargas.	44
Figura 4.3. Quadro de diálogo atualizado para ingressar as informações correspondentes ao projeto de análise.	44
Figura 4.4. Visualização 2D da geometria ingressada do projeto a ser analisado.....	45
Figura 4.5. Visualização 3D da geometria ingressada do projeto a ser analisado.....	45
Figura 4.6. Quadro de dialogo atualizado do formulário da Estratigrafia.	46
Figura 4.7. Quadro de diálogo atualizado para ingressar as informações correspondentes à Estratigrafia do projeto de análise.	46
Figura 4.8.. Quadro de diálogo para importar dados do formulário da Estratigrafia.	47
Figura 4.9. Visualização 3D da estratigrafia ingressada.	48
Figura 4.10. Quadro de dialogo atualizado do formulário da Piezometria.....	49
Figura 4.11. Visualização 2D das informações correspondentes aos diferentes rebaixamentos ingressados	49
Figura 4.12. Quadro de dialogo atualizado do formulário dos Pontos e Cortes.....	50
Figura 4.13. Definição de matriz de pontos no formulário.	51
Figura 4.14. Visualização 2D de uma matriz de pontos selecionada	51
Figura 4.15. Definição de ponto individual no formulário.....	52
Figura 4.16. Visualização 2D de um ponto individual selecionado.	52
Figura 4.17. Quadro de dialogo atualizado do formulário de apresentação de resultados do nível neutro e suas variáveis dependentes.	53

Figura 4.18. Quadro de dialogo atualizado do formulário de apresentação de resultados do perfil de tensões verticais finais.....	54
Figura 4.19. Visualização 2D do perfil de tensões verticais finais do analise.	54
Figura 4.20. Quadro de dialogo atualizado do formulário de apresentação de resultados do perfil de recalques verticais finais.	55
Figura 4.21. Visualização 2D do perfil de tensões verticais finais do analise.	55
Figura 4.22. Quadro de dialogo desenvolvido para visualização gráfica 2D e 3D das informações correspondentes à definição do tipo de projeto com suas características de desenho.	56
Figura 4.23. Visualização 2D das áreas e tipo de geometria ingressada para o analise do projeto.....	56
Figura 4.24. Visualização 2D dos vértices das diferentes áreas selecionadas para a análise do projeto.....	57
Figura 4.25. Visualização 2D das coordenadas das diferentes áreas selecionadas para a análise do projeto.....	57
Figura 4.26. Visualização 2D das cargas correspondentes a cada área selecionada para a análise do projeto.....	58
Figura 4.27. Visualização 2D da matriz de pontos selecionada para a análise do projeto. ...	58
Figura 4.28. Visualização 3D das geometrias, estratigrafias correspondentes as áreas selecionadas para análise do projeto.....	59
Figura 4.29. Visualização 3D das geometrias, estratigrafias, e cargas correspondentes as áreas selecionadas para análise do projeto.	59
Figura 4.30. Visualização 3D das geometrias, estratigrafias e matriz de pontos correspondentes as áreas selecionadas para análise do projeto.	60
Figura 4.31. Quadro de diálogo desenvolvido para o desenvolvimento das gráficas de contorno dos resultados de tensões e recalques verticais finais.	61
Figura 4.32. Quadro de diálogo para o desenvolvido da gráfica de contorno correspondente às tensões verticais finais.....	62
Figura 4.33 Visualização 2D em planta do segmento de reta ou corte selecionado para gerar a gráfica de contorno	62

Figura 4.34. Gráfico de contorno de uma análise feita com o modelo analítico Micra 2018 para tensões verticais finais.	63
Figura 4.35. Quadro de diálogo para o desenvolvido da gráfica de contorno correspondente aos recalques verticais finais.	64
Figura 4.36. Visualização 3D em do perfil longitudinal selecionado para gerar a gráfica de contorno.	64
Figura 4.37. Gráfica de contorno de um análises feito com o modelo analítico Micra 2018 para recalques verticais finais.	65
Figura 4.38. Diagrama de fluxo do modelo analítico Micra 2018.	66
Figura 4.39. Perfil estratigráfico típico da zona do lago da Cidade do México. Modificado de (Rodríguez, 2010), utilizado para a calibração da atualização do modelo analítico.	69
Figura 4.40. Condições dos diferentes rebaixamentos apresentados na zona lacustre da Cidade de México, utilizadas para a calibração do modelo analítico.	71
Figura 4.41 Condições dos diferentes rebaixamentos apresentados na zona lacustre da Cidade de México, utilizadas para a calibração da atualização do modelo analítico.	71
Figura 4.42. Variação da profundidade do nível neutro (Z_0) com os espaçamentos entre estacas, para ambos modelos analíticos.	73
Figura 4.43. Acréscimo das tensões verticais efetivas com os espaçamentos $S=1.5$ e $S= 4m$ obtidas com o modelo Micra 2018.	74
Figura 4.45. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo numérico de Rodriguez (2010), e do Surfer Golden com os dados do modelo analítico Micra2018.	75
Figura 4.46. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo analítico Micra 2018 plotado com o Surfer Golden.	76
Figura 4.47. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 1, para o modelo numérico Rodriguez (2010).	77
Figura 4.48. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 1, para o Surfer Golden, com dados do modelo analítico Micra 2018.	77
Figura 4.49. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo numérico de Rodriguez (2010).	79

Figura 4.50. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo analítico Micra 2018 plotado com o Surfer Golden.	79
Figura 4.51. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, para o modelo numérico Rodriguez (2010),.....	80
Figura 4.52. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, para o Surfer Golden, com dados do modelo analítico Micra 2018.....	81
Figura 4.53. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo numérico de Rodriguez (2010).	82
Figura 4.54. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo analítico Micra 2018 plotado com o Surfer Golden.	82
Figura 4.55. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3, para o modelo numérico Rodriguez (2010),.....	83
Figura 4.56. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3, para o Surfer Golden, com dados do modelo analítico Micra 2018.....	84
Figura 5.1. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 1, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.	87
Figura 5.2. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1 do modelo numérico de Leal (2018).....	88
Figura 5.3. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1 do modelo analítico Micra 2018.	89
Figura 5.4. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 1 do modelo analítico Micra 2018.	89
Figura 5.5. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 2, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.	91
Figura 5.6. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2 do modelo numérico de Leal (2018).....	92
Figura 5.7. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2 do modelo analítico Micra 2018.	92
Figura 5.8. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2 resultantes da modelagem numérica Leal (2018).....	93

Figura 5.9. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2 resultantes do modelo analítico MICRA 2018.	93
Figura 5.10. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 3, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D	95
Figura 5.11. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3 do modelo numérico de Leal (2018).....	96
Figura 5.12. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3 do modelo analítico Micra 2018.....	96
Figura 5.13. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3 resultantes da modelagem numérica Leal (2018).....	97
Figura 5.14. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3 resultantes do modelo analítico MICRA 2018.	97
Figura 5.15. União do comportamento das etapas no cálculo dos deslocamentos para cada modelo (Analítico e Numérico) para o estado limite de serviço.	98
Figura 5.16. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 3, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.	100
Figura 5.17. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo numérico de Leal (2018).....	101
Figura 5.18. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo analítico Micra 2018.....	102
Figura 5.19. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3, resultantes do modelo analítico MICRA 2018.	102
Figura 5.20. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 2, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.	104
Figura 5.21. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo numérico de Leal (2018).....	104
Figura 5.22. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo analítico Micra 2018.....	105
Figura 5.23. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes da modelagem numérica Leal (2018).....	106

Figura 5.24. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes do modelo analítico MICRA 2018.	106
Figura 5.25. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 3, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.	108
Figura 5.26. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo numérico de Leal (2018).....	108
Figura 5.27. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo analítico Micra 2018.....	109
Figura 5.28. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes da modelagem numérica Leal (2018).....	110
Figura 5.29. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes do modelo analítico MICRA 2018.	110
Figura 5.30. União do comportamento das etapas no cálculo dos deslocamentos para cada modelo (Analítico e Numérico) para o estado limite último.	111
Figura A1. Menu principal do Micra 2011.....	119
Figura A2. Menu Arquivo com seus correspondentes Sub.Menus e quadros de diálogo. .	120
Figura A3. Sub-Menu Abrir com opções de abrir uma análise anterior em formato. ARE.	121
Figura A4. Sub-Menu Guardar com opções de salvar uma análise anterior em formato. ARE.	121
Figura A5. Quadro de diálogo com a definição dos parâmetros iniciais do projeto.	122
Figura A6. Quadro de diálogo com a definição da estratigrafia do projeto	125
Figura A7. Quadro de diálogo com a definição das condições piezométricas do projeto..	126
Figura A8. Quadro de diálogo com a definição dos pontos de análise do projeto.	127
Figura A9. Quadro de diálogo do menu ver e suas opções de visualização de informação.	128
Figura A10. Quadro de diálogo do menu cálculo do nível neutro com suas variáveis dependentes.	130
Figura A11. Calculo de recalques. Modificado de Adaptado de (Rodríguez, 2010)	138
Figura A12. Quadro de diálogo do menu cálculo dos recalques e tensões do sistema de fundação analisado.	139

LISTA DE NOMENCLATURA E SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

C'	coesão
C_c	coeficiente da reta de compressão
C_d	coeficiente de descarga
C_r	coeficiente da reta de recompressão
C_w	compressibilidade da água
C_s	compressibilidade do material sólido
C_u	coesão não drenada
d	diâmetro da estaca
e	índice de vazios
e_0	índice de vazios inicial
e_{int}	índice de vazios inicial
N	número de golpes SPT
n	porosidade
q_u	Resistência a compressão
x, y, z	coordenadas cartesianas
z	profundidade

Alfabeto Grego

α	coeficiente de poropressão de Biot
γ_{sat}	peso específico saturado
Δ	incremento
λ	índice de compressão
λ^*	índice de compressão modificado
μ	poropressão
ν'	coeficiente de Poisson
ν'	coeficiente de Poisson efetivo
σ, σ	tensão normal total e efetiva, respectivamente
σ_1, σ'_1	tensão normal principal maior total e efetiva, respectivamente
σ_2, σ'_2	tensão normal principal intermediária total e efetiva, respectivamente

σ_3, σ'	tensão normal principal menor total e efetiva, respectivamente
$\sigma_{xx}, \sigma'_{xx}$	tensão normal total e efetiva na direção xx , respectivamente
$\sigma_{yy}, \sigma'_{yy}$	tensão normal total e efetiva na direção yy , respectivamente
$\sigma_{zz}, \sigma'_{zz}$	tensão normal total e efetiva na direção zz , respectivamente
$\sigma_{yz}, \sigma'_{yz}$	tensão cisalhante total e efetiva na direção yx , respectivamente
$\Delta\sigma$	incremento de tensão
Σ	somatório
τ	tensão cisalhante
τ_r	tensão cisalhante no plano de ruptura

A	área do radier de fundação
B	Largura do radier de fundação
C_p	capacidade por ponta
C_s	capacidade por ponta superior
S_u	resistência ao cisalhamento não-drenada
D_f	profundidade de instalação das estacas
F_S	fator de segurança
$F_{(+)}$	atrito positivo limite
$F_{(-)}$	atrito negativo limite
H	espessura da camada
L_p	comprimento da estaca
OCR	Razão de pre-adensamento ($\sigma' / \sigma' p$)
POP	Razão de sob-adensamento ($\sigma' - \sigma' p$)
Q	carga atuante
Q_{estaca}	carga transmitida pela estaca
Q_{neg}	carga por atrito negativo
Δq	incremento de carga
q_c	resistência por ponta da sondagem de cone
q_{iu}	carga última por ponta da cabeça da estaca
q_u	resistência a compressão simples
R_f	capacidade de carga por atrito

R_p	capacidade de carga por ponta
R_u	resistência última
r	radio
w	conteúdo de água
z_0	profundidade do nível neutro
NA	profundidade do lençol freático
α	coeficiente de aderência
$\delta_{Y_{con}}$	deslocamento vertical efetivo no centro do centro do radier com estacas
$\delta_{Y_{reg}}$	subsidiência regional
$\delta_{Y_{sín}} =$	deslocamento vertical efetivo no centro do centro do radier sem estacas
$\delta_{Y_{tot}} =$	deslocamento vertical total no centro do radier com estacas

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As cidades capitais dos países Colômbia e México apresentam similitudes no comportamento e nas características dos solos que interagem com a problemática do atrito negativo gerado pela subsidência regional, entendendo que este fenômeno se apresenta em diferentes proporções em cada cidade, sua similitude se deve ao comportamento que descrevem os sistemas de fundação, implementados para contrariar os efeitos desfavoráveis gerados pelo atrito negativo nos diferentes projetos da construção civil.

Este trabalho se enfoca nos estudos que têm sido desenvolvidos ao longo do tempo para analisar os comportamentos dos sistemas de fundação implementados na zona lacustre da Cidade de México, e deram a origem ao modelo analítico desenvolvido por Rodriguez (2010), o qual forneceu uma ótima ferramenta com ótimos resultados na análise de sistemas de fundação baseados em grupos grandes de estacas que interagem com o atrito negativo gerado pela subsidência regional da zona de estudo, porém, a ferramenta apresentou diferenças consideráveis no momento de comparar seus resultados com uma ferramenta numérica, especificamente para sistemas de fundações diferentes a grupos de estacas grandes. Estas diferenças de forma geral se devem às magnitudes de valores obtidos para incrementos de tensões devido ao efeito da rigidez do radier e ao efeito da interação das estacas com a subsidência regional.

O modelo analítico de Rodriguez (2010), foi programado na linguagem de programação *Visual Basic 6.0*, a qual foi descontinuada pelo fornecedor, o que dificulta a modificação do código original para a implementação de novas abordagens teóricas que permitam diminuir as diferenças mencionadas anteriormente; pelo qual, se precisa como primeira instância uma atualização enfocada na mudança para uma linguagem de programação com novas funcionalidades, com a finalidade de conseguir atingir o propósito de deixar as portas abertas para aplicar novas atualizações bem seja no código original ou na interface de usuário e quem em principio permitiriam melhorar os resultados.

Como proposta para o presente trabalho se estabelece mudar a linguagem de suporte do modelo *Visual Basic 6.0* mediante a implementação da linguagem de programação *Python* com o propósito de fornecer um maior entendimento na interação dos sistemas de fundações com a presença de solos moles em processo de adensamento, além do atrito negativo gerado pela subsidência regional. O presente trabalho propõe uma atualização e modificação ao modelo analítico simplificado desenvolvido por Rodriguez (2010) baseado nas soluções propostas por Mindlin, (1963) e, nos estudos prévios feitos por Reséndiz e Auvinet (1973), Auvinet e Diaz-Mora (1981), Rodriguez (2001), Auvinet e Rodriguez, (2002(b)), levando em consideração como local de estudo a zona lacustre da Cidade de México (México).

Finalmente levar os modelos analíticos a uma linguagem de programação, permitirá gerar novas e melhores alternativas de entendimento das problemáticas estudadas na geotécnica. No caso deste trabalho os resultados obtidos de uma modelagem analítica podem ser comparados com modelos numéricos mais sofisticados baseados em elementos finitos como o caso do programa *Plaxis (3D)*, e com programas de modelação de superfícies como o caso de *Surfer Golden*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Implementação e atualização de modelo analítico para análise e projeto de grupos de estacas assentes em solos moles em processo de adensamento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementar Python como nova linguagem de programação na atualização do modelo analítico para a análise e projeto de grupos de estacas assentes em solos moles em processo de adensamento, proposto por Rodriguez (2010).
- Validar e calibrar o modelo analítico para a análise e projeto de grupos de estacas assentes em solos moles em processo de adensamento, através dos resultados obtidos de modelos numéricos tridimensionais.
- Analisar os esforços desenvolvidos nas estacas e as tensões no solo para diferentes configurações de sistemas de fundação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SOLOS MOLES

Por definição, os solos moles são geralmente solos de origem sedimentares, em geral saturados e predominantemente argilosos. Esses tipos de solos apresentam baixa capacidade de suporte, baixa permeabilidade e elevada compressibilidade. Segundo Martins e Abreu (2002), tais características implicam em um comportamento do solo que quando é submetido à variação de tensões efetivas ($\Delta\sigma'$), função da execução de, por exemplo, um aterro sobre a camada, se pode apresentar grandes deformações ($\Delta L/L_0 > 10\%$, sendo L_0 a espessura da camada de solo argiloso saturado e ΔL o recalque da mesma devido à sobrecarga).

2.2 SOLOS MOLES EM PROCESSO DE ADENSAMENTO

Muitas cidades estão se desenvolvendo sobre solos moles e dentro destas cidades a Cidade do México fornece um ótimo cenário de estudo. Por este motivo é necessário entender o comportamento dos diferentes sistemas de fundação implementados para suportar a infraestrutura em desenvolvimento, assim como as condições do solo de fundação apresentadas in loco. Na Cidade do México vem ocorrendo fenômenos relacionados com o rebaixamento das pressões intersticiais no solo, o que muda as condições de trabalho das fundações apresentando danos como os que foram reportados por Bareño & Rodríguez (1999). Além das condições impostas pelo de rebaixamento, nas estacas instaladas em solos moles que apresentam adensamento por carga vertical, e readensamento do solo após processos de cravação, pode-se gerar o fenômeno do atrito negativo. O atrito negativo induz cargas verticais adicionais e recalques, que em condições extremas, podem levar as estacas à ruptura (Leung et al. 2004).

Segundo Martins (2011), o adensamento primário é o processo de compressão (relação entre a variação de volume de um elemento de solo e a variação do estado de tensões efetivas) ao longo do tempo, para um solo saturado, ocasionado pela expulsão de uma quantidade de água igual à redução do volume de vazios. Como resultado deste processo, tem-se a transferência gradual do excesso de poro-pressão, gerado pelo carregamento, para a tensão efetiva, fenômeno pelo qual os recalques ocorrem com expulsão da água do interior dos vazios do

solo. No caso das argilas saturadas, devida à baixa permeabilidade e o baixo valor do coeficiente de adensamento, esse processo de deformação se desenvolve lentamente.

Além da Cidade do México, Brasil também contribui com diferentes cidades com formação de solos semelhantes, cidades costeiras como Recife, Rio de Janeiro, Salvador, São Paulo, inclusive Campinas apresentam solos moles em sua maioria argilas formadas por depósitos de sedimentos antigos que apresentam valores elevados de teor de umidade e matéria orgânica. No caso de Colômbia por exemplo o solo sobre o qual foi construída a cidade de Bogotá corresponde a um solo argiloso que, segundo Montaña (2013), eventualmente se mistura com areias, apresentando em alguns casos camadas de solo orgânico até de 23 metros e uma camada de areia fina e densa de aproximadamente 34 metros.

Existe uma semelhança importante nestas cidades partindo só da formação de seus solos, utilizados como suporte para a diferente infraestrutura que se vem construindo; porém, existe outro fenômeno ainda mais importante que se apresenta em algumas destas cidades e que entra na abordagem deste trabalho.

2.3 SUBSIDÊNCIA REGIONAL

Segundo NOAO (2002), a subsidência regional é um dos diferentes fenômenos que permite a geração de falhas no solo atingindo de pequenas a grandes áreas de terreno, e associa sua definição a um decaimento do nível da superfície do solo gerado pela remoção de elementos de suporte.

Hewit (2011) descreve o fenômeno de subsidência como o recalque progressivo do solo associado a mudanças das propriedades em profundidade devido a: existência de materiais solúveis, processos de erosão mecânica superficial, fluxo plástico, compactação e subsidência tectônica.

Finalmente, Rodriguez (2010), associa diretamente a subsidência regional apresentada na cidade de México aos processos de abatimento das pressões intersticiais no solo, geradas pela extração de água dos aquíferos para o consumo humano.

Claramente as várias formas de abordar a subsidência regional expressada por os diferentes autores concordam com que a subsidência é essencialmente um movimento descendente do material na superfície do solo.

Existem também diferentes processos mediante os quais é gerado o fenômeno da subsidência regional e que facilmente se consegue dividir do tipo de intervenção, bem seja a atividade humana ou processos naturais do entorno, como se apresenta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Generalização do tipo de subsidência com seu tipo de intervenção principal

Detonante	Tipo de subsidência
Processo natural	Subsidência sobre depósitos compressíveis de grão fino ou solos orgânicos.
Processo natural	Subsidência em argilas que contraem e expandem devido às mudanças de umidade.
Intervenção Humana	Subsidência pelo bombeamento da água, para consumo humano.
Intervenção Humana	Subsidência devida a mineração.
Intervenção Humana	Subsidência pelo rebaixamento do lençol freático devido à construção civil.

Nos países como México e Colômbia especificamente nas cidades de Bogotá e Cidade do México, o último tipo de subsidência citado na Tabela 2.1 está altamente relacionado com os danos das estruturas vizinhas de projetos que apresentam vários níveis de altura, e que na maioria dos casos, também apresentam vários níveis de escavação para subsolos.

2.3.1 Subsidência regional no Brasil

Segundo (Cabral et al. 2006), o aumento do consumo da água no Brasil nos últimos tempos se deve ao aumento da demanda, ao novo conhecimento de aquíferos e posteriormente ao aprimoramento das empresas de perfuração de poços, o qual manifestou diferentes cenários possíveis de ação da subsidência devida à alteração das condições iniciais destes aquíferos; porém, não se apresentam muitas referências que confirmem a subsidência regional como fenômeno recorrente no País.

No mesmo trabalho de Cabral, são enumeradas algumas situações que se apresentaram no Brasil ligadas à subsidência gerada pela extração de água dos aquíferos e dos quais se destacam os seguintes: Sete Lagoas localizada em Minas Gerais, no ano 1988, no qual se

conseguiu medir uma cratera de 20 metros de diâmetro e 5 metros de profundidade na área urbana produto da subsidência em aquíferos cársticos. Cajamar no estado de São Paulo, no ano 1986, que apresentou uma cratera de 31 metros de diâmetro com 13 metros de profundidade.

Mais um caso de subsidência no Brasil corresponde ao ocorrido na cidade de Tamandaré (Região Metropolitana de Curitiba), município que se encontra sobre um aquífero cárstico que vem apresentando uma aproveitamento excessiva, pelo qual administrações e agências locais atribuem ao uso desmedido desta atividade a presença de buracos, dolinas, o recalque do terreno em 4 cm e situações semelhantes devidas ao adensamento drástico da camada de solo superficial, que já estão comprometendo estruturalmente algumas edificações.

2.3.2 Subsidência regional em Bogotá (Colômbia)

Na cidade de Bogotá (Colômbia), historicamente desde tempos da colônia os diferentes processos de aproveitamento das águas dos aquíferos tomaram grande importância devido à quantidade de poços que são encontrados na sub-região da Sabana e na mesma cidade. De acordo com isto, a cidade apresenta diferentes problemáticas associadas à sobre o aproveitamento de aquíferos em diferentes setores da mesma. Segundo Lobo-Guerrero (1992), a extração da água dos aquíferos é muito maior que a recarga natural, pelo qual o nível piezométrico da água subterrânea da bacia artesianas está descendendo a taxas de entre 3 a 5 m/ano. Este rebaixamento é considerado o maior fator de responsável dos fenômenos de compactação e recalque que se conseguem observar nas camadas superficiais da cidade.

O “*Fondo para Atención y Prevención de Emergencias*” (FOPAE), no ano 2010, no documento da “*Zonificación de la respuesta Sísmica de Bogotá para el Diseño Sismoresistente de Edificaciones*”, realizou estudos observacionais que permitiram apreciar indícios de processos de subsidência local que se evidenciaram no deslocamento vertical de estruturas leves (plataformas e escadas de acesso), em bairros como *El Chicó, El Lago, El Polo* e Chapinero (Figura 2.1). Em alguns casos, segundo Bareño & Rodríguez (1999), recalques nestas zonas já foram reportados atingindo até 90 cm.



Figura 2.1. Subsidiência regional na cidade de Bogotá (tomada do site <http://agenciadenoticias.unal.edu.co>).

2.3.3 Subsidiência regional na cidade de México (México)

No caso do México, segundo Rodríguez (2010), nas décadas de 40 e 60, se notou um recalque generalizado na cidade que ocasionou danos na infraestrutura e sérios problemas na estabilidade das construções dispostas sobre o antigo lago de *Texcoco* (Figura 2.2). De acordo com dados históricos, os registros mostraram que a cidade teve recalques que excederam os 10m. Também afirma que na medida em que avança o processo de adensamento, provocado pelo sobre aproveitamento dos aquíferos subterrâneos, os edifícios tendem a apresentar maiores problemas de recalque (Rodríguez et al.2015), como se observa na Figura 2.3.

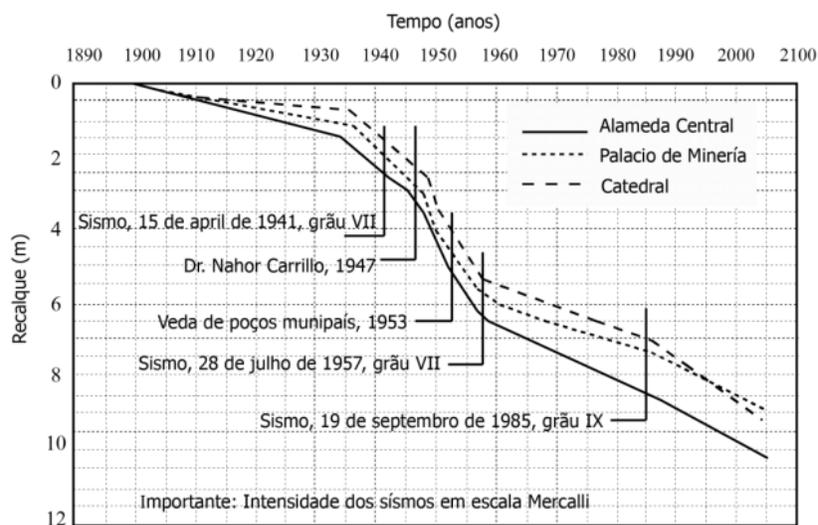


Figura 2.2. Evolução da subsidiência regional (modificado do laboratório de geoinformática 2009).



Figura 2.3. Presença de recalques excessivos na infraestrutura da Cidade de México (tomada do site <http://saneamientoindustrial.com>).

2.3.4 Estrutura geotécnica da Cidade do México

Segundo Mooser (1992), a cidade do México, em grande parte, está construída sobre o fundo do lago Texcoco, principalmente no leste e norte. A zona oeste é desenvolvida na Sierra das Cruces, e ao sul vários assentamentos ocupam o terreno coberto pela lava emitida há 2500 anos pelo vulcão Xitle. A Figura 2.4 apresenta o perfil das principais formações geológicas do vale do México.

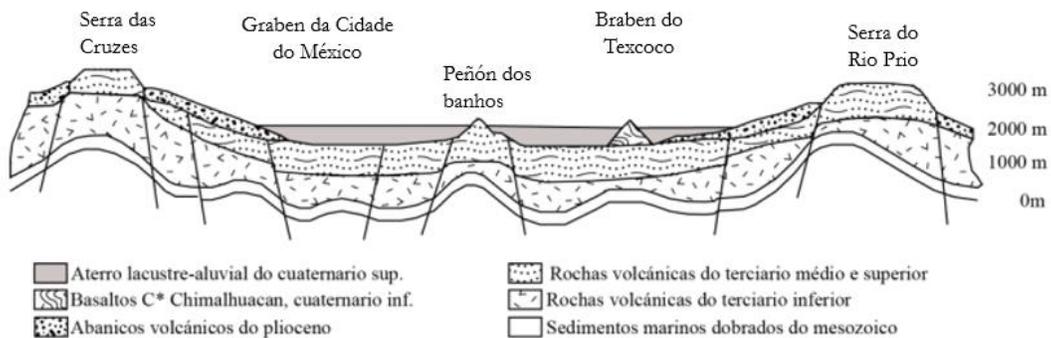


Figura 2.4. Principais formações geológicas do Vale do México (modificado de Mooser 1992).

Na Figura 2.5, se apresenta o mapeamento da área urbana da Cidade do México, a qual foi subdividida em três zonas: a zona de lomas (Zona I), zona de transição (Zona II) e zona do lago (Zona III).

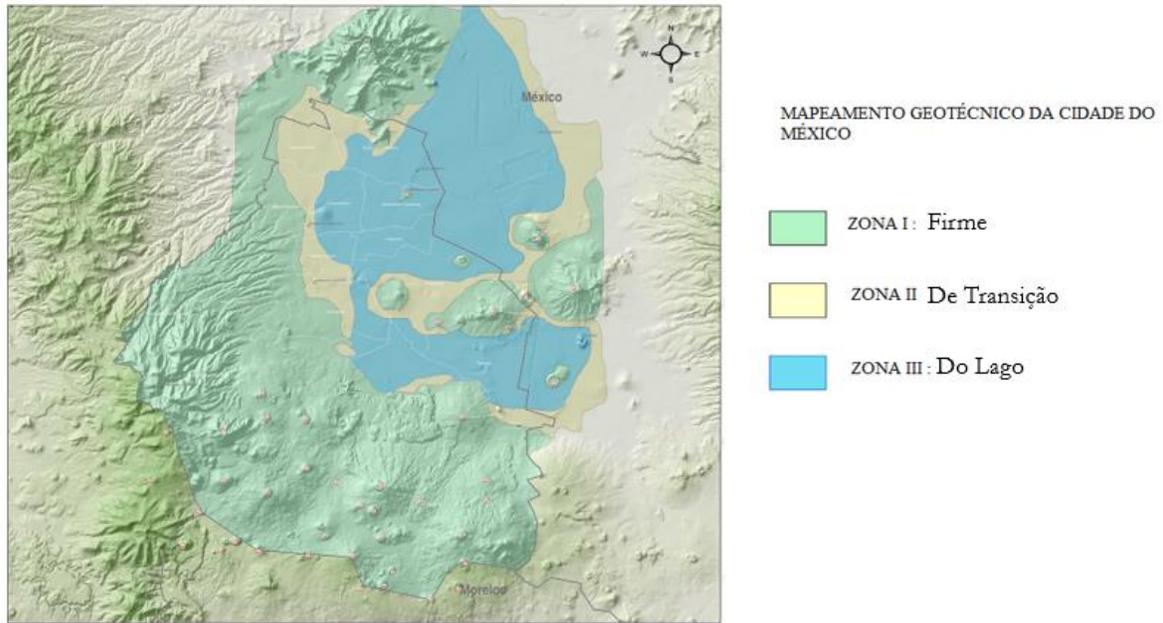


Figura 2.5. Zoneamento geotécnico da Cidade do México (modificado do site <https://datos.gob.mx>).

A zona firme está formada por rochas ou solos que foram depositados fora do ambiente lacustre, geralmente têm pouca compressibilidade e alta resistência ao cisalhamento. A zona de transição tem uma estratigrafia errática, com presença de diversas camadas de areia de origem aluvial, intercaladas com depósitos de argila lacustre com espessura muito variável.

Finalmente, a zona do lago é composta de grandes depósitos de argila altamente compressível, separados por camadas de areia; geralmente estão cobertos na superfície por solos aluviais, materiais secos e aterros artificiais. A espessura deste conjunto pode ser superior aos 50 metros e se encontram apoiados em solos mais rígidos.

A Figura 2.6 mostra o perfil típico do solo da zona do lago, na qual são distinguidas cinco camadas importantes, assim descritas:

- A primeira corresponde à crosta superficial, formada por depósitos aluviais recentes e por aterros artificiais.
- A segunda é a série argilosa superior (SAS), de espessura variável entre 27 e 33 metros, formada por camadas de argila muito compressível com presença em pequenas proporções de areia.

- A terceira é a camada dura (CD), que é uma camada de areia argilosa muito compacta de cerca de três metros de espessura, e encontra-se normalmente a uma profundidade de 30 m ou 35m.
- Segue a série argilosa inferior (SAI) com espessuras variáveis entre 7 e 15 metros, formada por argilas vulcânicas mais resistentes e menos compressíveis que as argilas da série argilosa superior (SAS).
- Finalmente, estão os depósitos profundos (DP), formados por camadas de areia, cascalho, silte e argilas compactas Zemva, (2011a).

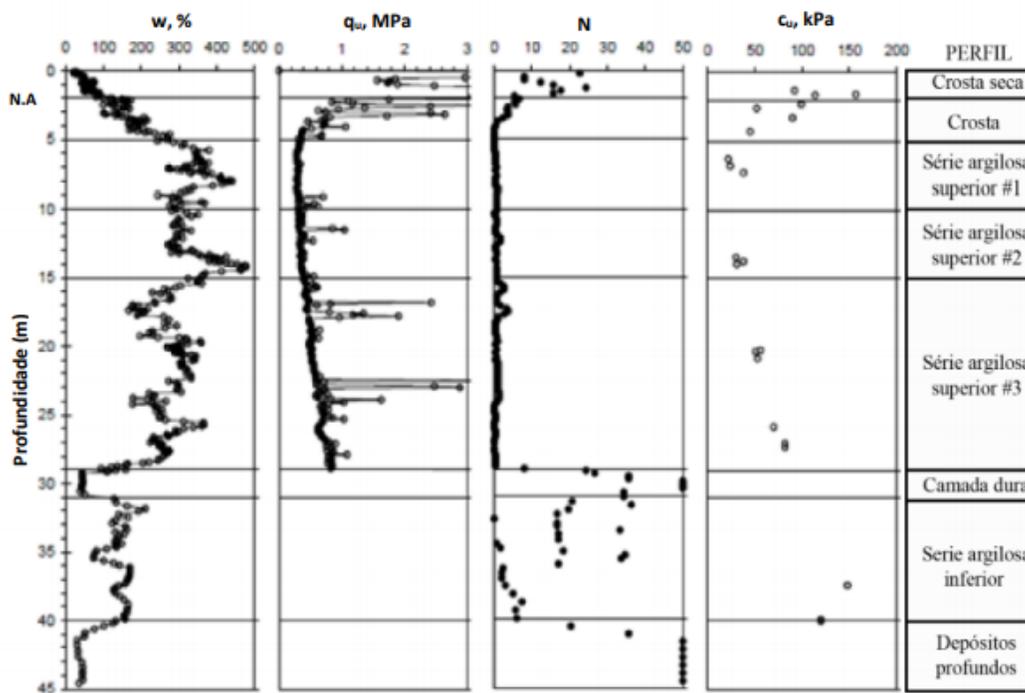


Figura 2.6. Perfis estratigráficos da zona do lago da Cidade do México (modificado de Rodríguez, 2010).

2.3.5 Efeitos da subsidência regional nas fundações do México

No caso cidade do México a subsidência regional ao longo do tempo tem comprometido a integridade física de diferentes tipos de construções como as enunciadas por Zemva (2011a), Rodríguez (2010), Auvinet et al. (2010), Nuñez (1996b), e que em geral se resumem no seguinte:

- Danos aos monumentos históricos;

- Recalques diferenciais nas linhas superficiais de transporte;
- Emersão aparente das estruturas com fundações profundas, gerando atrito negativo;
- Surgimento de trincas nas zonas de transição entre os solos moles e os solos firmes;
- Mudanças progressivas na inclinação de obras de condução, tanto superficiais como subterrâneas;
- Aumento do risco de inundações em caso de ruptura do sistema de esgoto da cidade;
- Danos nas fundações e instalações subterrâneas, entre outras.

O bombeamento dos aquíferos subterrâneos do vale do México, além dos recalques também desenvolve estados de tensão que causam a aparição de trincas na superfície do terreno Alberro et al. (1992). Estas trincas são geradas com maior frequência perto das zonas de transição abrupta, entre solos moles e solos firmes (Murillo, 1992).

Geralmente, para fundações superficiais a condição desfavorável que prevalece e que gera a maioria dos danos nas estruturas são os recalques diferenciais: ao não ter uma profundidade de instalação considerável a subsidência regional não tem muita importância sobre este tipo de fundações; pelo qual, os danos nas fundações superficiais são especificamente as anomalias geotécnicas tais como a formação de desníveis, o que quer dizer que indiretamente o fenômeno da subsidência regional ao ter mais influência nas fundações profundas gerando recalques excessivos em alguns casos e emersões aparentes em outros, transmite estas irregularidades para a superfície.

Na Figura 2.7 se apresenta um perfil típico do rebaixamento da poro-pressão devido à extração da água dos estratos mais permeáveis profundos da zona lacustre da Cidade de México. A camada comumente chamada FAS (formação argilosa superior), contribui pouco ao processo da subsidência regional total; porém, sua deformação é suficiente para afetar de forma significativa ao comportamento de fundações profundas, as quais são instaladas na primeira camada de solo denominada capa dura, conseqüentemente o efeito se incrementa para fundações mais profundas.

Quando um sistema de fundações profundas, a base de estacas de ponta ou estacas de atrito é submetido a um processo de adensamento regional importante, este tende a emergir em relação ao solo circundante.

Segundo Rodríguez (2010), o processo de geração de emersão no sistema de fundação pode gerar as seguintes consequências:

- Danos a estruturas vizinhas. A emersão da própria estrutura (Figura 2.8 e Figura 2.9) pode gerar recalques diferenciais consideráveis nas estradas e estruturas vizinhas que podem afetar seriamente os sistemas de água, gás e o sistema de drenagem, além de aumentar o risco de instabilidade das estruturas.
- Diminuição da confiabilidade da fundação, especialmente em condições sísmicas. A perda do confinamento superficial reduz consideravelmente a resistência ao corte das estacas, e aumenta o risco da instabilidade estrutural das mesmas.
- Comumente, pode-se produzir uma separação de vários centímetros entre o radier e o solo onde são instaladas as estacas. Este problema é considerado crítico quando o projeto estrutural é incorreto e além disso se admite que o solo embaixo do radier toma parte da carga da superestrutura e se assume que em condições sísmicas uma parte da tensão cisalhante se transmite através do contato entre a subestrutura e o solo de instalação.

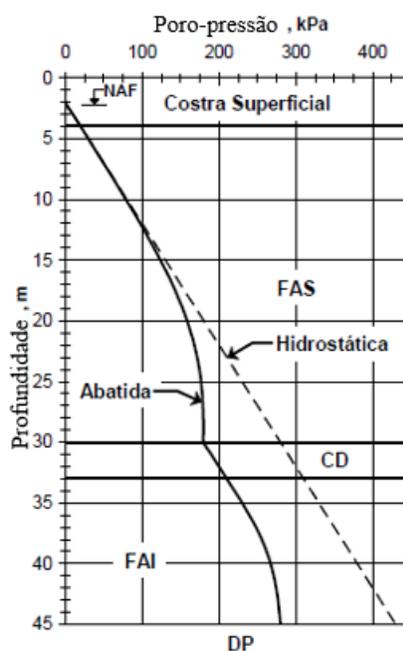


Figura 2.7. Perfil típico do rebaixamento das poro-pressões da zona do lago da Cidade de México (modificado de Rodríguez 2010).



Figura 2.8. Emersão aparente de um grupo de estacas no lago de Texcoco. (modificado de Rodríguez 2010).

Para outro tipo de infraestrutura, como obras lineares tais como linhas de metrô e rodovias, é possível apreciar o efeito dos recalques excessivos gerados pela subsidência regional, devido à interação entre solos muito compressíveis com materiais de maior rigidez; entretanto, os efeitos de emersões aparente são apreciáveis em radiers e em passos a desnível, Pineda (2016).

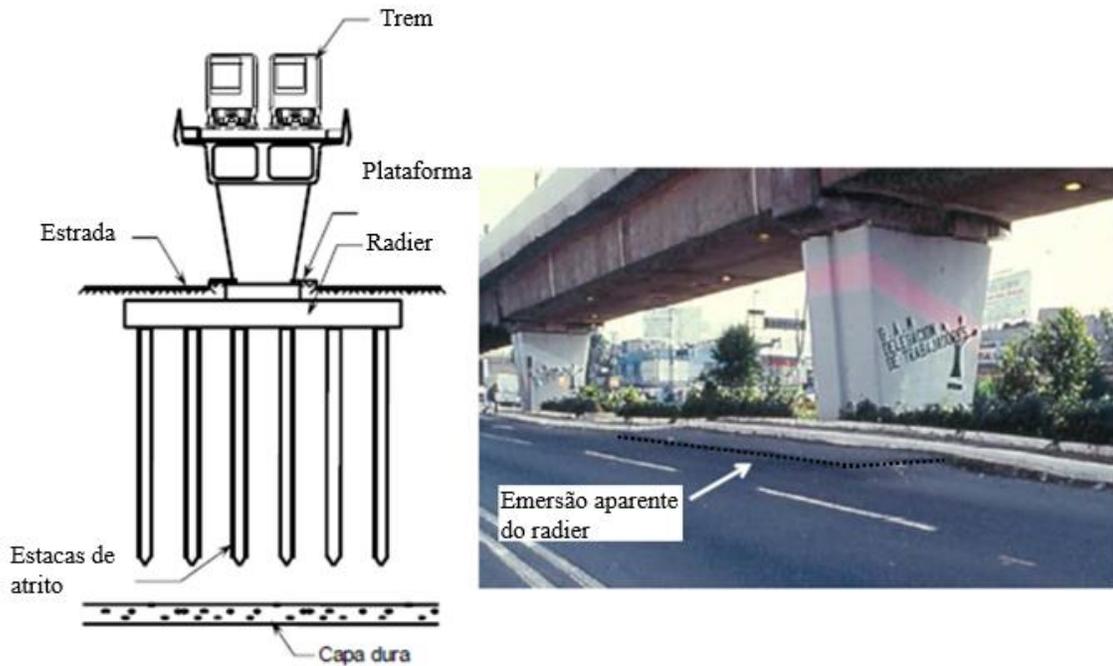


Figura 2.9. Emersão aparente apresentada em um dos apoios da linha 4 do metro da Cidade de México (modificado de Rodríguez 2010).

2.4 FUNDAÇÕES

Segundo Sales (2000), A associação do conjunto de elementos estruturais com o solo circunvizinho em uma obra de infraestrutura corresponde a um sistema de fundação, aquela responsável por suportar o acréscimo de carga da superestrutura. A mesma no momento de transmitir o peso para o solo deve gerar a menor quantidade de recalques possíveis, e sem excesso.

Segundo a norma NBR 6122/2010, um projeto de fundações deve assegurar que as fundações apresentem segurança quanto aos:

- Estado limite último (ELU), associados a colapso parcial ou total da obra;
- Estado limite de serviço (ELS), quando ocorrem recalques, deformações, fissuras, que comprometem o uso da obra.

Na maioria das definições que contemplam os autores para descrever as fundações concordam com que uma fundação indiscutivelmente é um elemento estrutural com a função de transmitir as cargas de uma superestrutura ao solo de apoio.

2.4.1 Fundações utilizadas para o controle da subsidência

No caso da cidade de México, segundo Auvinet e Reséndiz (1991), as fundações têm apresentado uma melhoria devido ao avanço no estudo dos fenômenos do subsolo e também as exigências implementadas pelos regulamentos onde se estipula levar em conta na execução de projetos de infraestrutura a atividade sísmica da região e a presença da problemática da subsidência.

Neste processo de controlar a problemática da subsidência na zona lacustre da cidade do México, e com a finalidade de evitar danos na infraestrutura, as fundações mais comumente implementadas são sapatas, e radier de fundação com o sem estacas de atrito para construções mais leve, estacas de ponta para construções mais pesadas, e especificamente na zona de transição do mapeamento geotécnico da cidade, estacas coladas *insítu* onde o efeito da subsidência se torna mais severo Auvinet, (2009).

Na Figura 2.10 são apresentados os tipos de fundações mais comumente utilizadas na Cidade do México para o controle da subsidência regional.

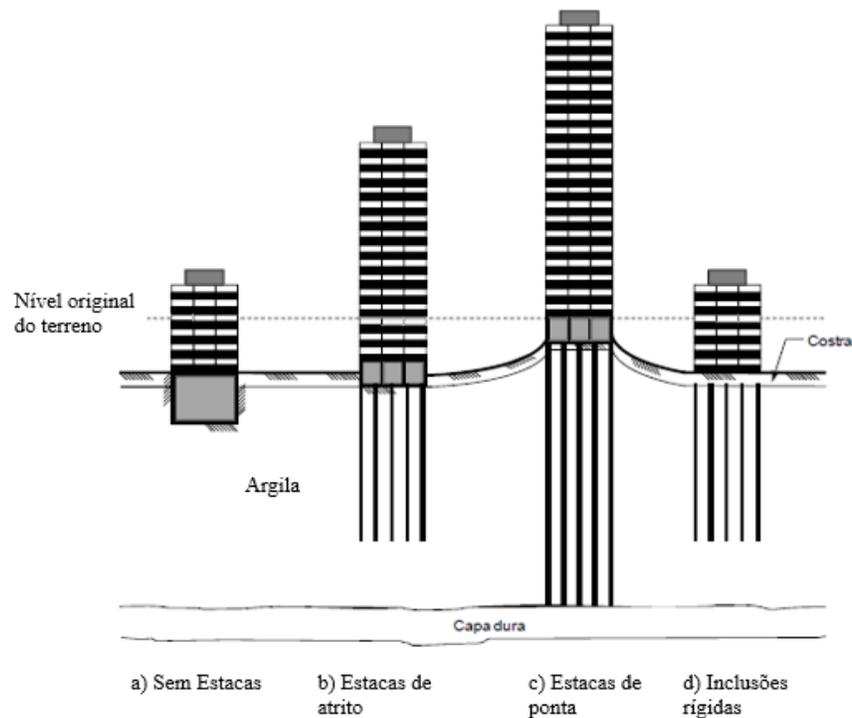


Figura 2.10. Tipos de fundações implementadas com maior frequência na zona lacustre da Cidade de México (modificado de Rodríguez 2010).

2.4.2 Sistema Radier Estaqueado

Segundo Janda et al. (2009), o sistema radier estaqueado corresponde a um sistema de fundação em que os dois componentes estruturais (estacas e placa ou radier) interagem entre si e também com o solo ao redor para suportar as cargas verticais, horizontais e os momentos que chegam da superestrutura. Assim, o sistema radier estaqueado pode ser definido como uma composição geotécnica que consiste na interação de três elementos: estacas, radier e solo.

- Radier Isolado: São placas de concreto que recebem diretamente as cargas provenientes dos pilares e transmitem as tensões para o solo, geralmente são empregados quando se tem solos superficiais.
- Radier estaqueado: São associações de estacas com o elemento estrutural denominado radier ou placa. A diferença básica entre grupos de estacas e radier estaqueado deve-

se ao fato que, no último, o elemento de ligação, o radier, está em contato direto com o solo e deste modo contribui na absorção das cargas derivadas da superestrutura.

- Radier estaqueado combinado: Entende-se pela mesma definição da anterior, mais que, pelo fato de ter uma camada de solo melhorada (material argiloso compactado) como reforço superficial, ele pode incrementar a rigidez em conjunto e absorver uma porcentagem das tensões atuantes sobre o solo mole.

Os sistemas radier estaqueado podem ser projetados para apresentar segurança em estados limites, quais sejam: garantir capacidade de carga e controlar recalques; garantir somente capacidade de carga ou, somente controlar recalques (Mandolini et al.2013). Na concepção tradicional de projeto de grupos de estacas, o número de estacas é calculado dividindo o carregamento total pela capacidade de carga de trabalho individual da estaca, buscando garantir um fator de segurança mínimo (“médio”) para todas as estacas. Quando se analisa a influência da rigidez do grupo, ainda dentro da concepção tradicional, geralmente se encontram carregamentos mais elevados nas estacas periféricas, o que em muitos projetos leva a um aumento do número de estacas para garantir um fator de segurança (FS) mínimo, em todas as estacas (Sales et al.2002).

Na Figura 2.11, se apresenta o comportamento tradicional do sistema radier estaqueado.

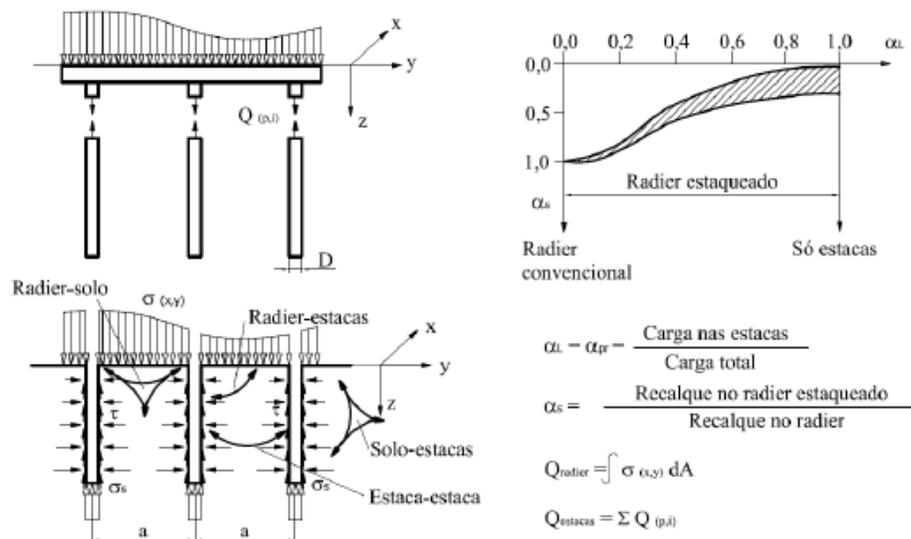


Figura 2.11. Fundamentos teóricos do sistema radier estaqueado E. Rodriguez (2016).

2.4.3 Fundações profundas

As fundações profundas comumente são utilizadas quando as camadas de solo superiores não apresentam a capacidade de carga necessária para suportar o peso da superestrutura, ou quando as deformações na massa de solo excedem os limites permitidos pela normativa, nesses casos é necessário utilizar um tipo de fundação que garanta um comportamento adequado em resposta às solicitações de carga transmitidas para o solo de apoio, e um sistema de fundações profundas são a melhor alternativa.

Nos casos da cidade de México e Bogotá, onde se apresenta a problemática da subsidência interagindo com a presença de solos moles, e inclusive na cidade de Brasília com sua problemática de solos colapsáveis, o estudo e a implementação de fundações profundas têm adquirido considerável importância nos últimos tempos, e a implementação de sistemas de fundação profunda como estacas isoladas, estacas de atrito, radier estaqueado, estacas de ponta ou tubulões são as melhores alternativas para contrariar as problemáticas geradas pela combinação de solos moles em processo de adensamento com fatores como a subsidência e o colapso do solo.

Este tipo de sistema de fundações geralmente trabalha com duas finalidades, a primeira corresponde a fornecer uma maior capacidade de carga para toda a estrutura, e a segunda corresponde a trabalhar diminuindo os recalques excessivos de estruturas muito pesadas. Estes objetivos são cumpridos mediante a transferência de tensões do nível de instalação da subestrutura para níveis inferiores, onde geralmente o solo tem a capacidade de satisfazer adequadamente os dois aspectos.

2.4.4 Estacas utilizadas na Cidade de México

Com a finalidade de acompanhar a subsidência regional sem gerar danos consideráveis para a estrutura, além de afastar-se cada vez mais dos estados limites último e de serviço, estabelecidos pelo regulamento de construções do Distrito Federal, na Cidade de México, têm sido desenvolvidos diferentes tipos de sistemas de fundação profundas.

2.4.4.1 Estacas de ponta

Na zona lacustre da Cidade de México, a única solução para contrariar o peso e altura na construção de edificações geralmente se deve à implementação de fundações a base de estacas de ponta, onde o processo de execução consiste na cravação de estacas de concreto pré-moldado na zona do lago, e para a zona de transição são colocadas estacas de diâmetro considerável moldada no local.

2.4.4.2 Estacas de atrito

Estas estacas são cravadas dentro da formação argilosa superior deixando a ponta a uma distância de vários metros acima da capa dura. Neste caso, o solo compressível existente entre a ponta da estaca e a capa funciona como fusível. Pelo qual, no momento de gerar-se o atrito negativo à estaca penetra a camada de solo e em certa medida as emersões aparentes são evitadas.

Segundo Auvinet e Mendoza (1987), existe uma diferença que tem que ser esclarecida entre os sistemas de fundação baseados principalmente na capacidade de carga das estacas de atrito (uso tradicional das estacas de atrito), e os sistemas que combinam uma caixa ou gaveta (quem permite conseguir uma compensação parcial), com um número limite de estacas cuja função principal é reforçar as camadas mais compressíveis e diminuir os recalques.

No primeiro caso, denominado Tipo I, as estacas são projetadas com um fator de segurança que permita garantir a estabilidade em condições estáticas e sísmicas. Se o fator de segurança é considerado amplo, o comportamento das estacas se pode assemelhar ao comportamento das estacas de ponta com o desenvolvimento do atrito negativo na parte superior; acima do nível neutro onde não existe o movimento relativo entre o solo e à estaca Reséndiz e Auvinet, (1973), neste caso, é possível que a fundação apresente uma emersão aparente.

No segundo caso, denominado Tipo II, as estacas se encontram permanentemente em condição de falha. A estabilidade do conjunto em condições estáticas e sísmicas deve permanecer assegurada principalmente pelo solo localizado embaixo do nível de instalação do caixão da fundação.

A Figura 2.12, apresenta os dois tipos de sistemas de estacas de atrito.

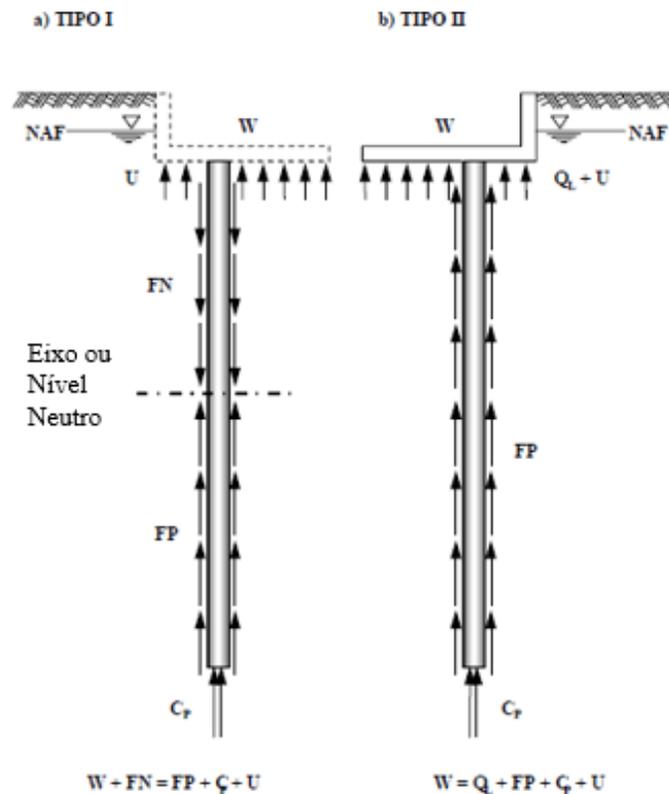


Figura 2.12. Estacas de atrito (modificado de Rodríguez 2010).

2.4.4.3 Estacas de ponta penetrante

Segundo Reséndiz (1964), as estacas de ponta penetrante foram criadas para aumentar a capacidade de carga das estacas de atrito com uma contribuição da ponta, mas delimitando esta última para evitar a emersão. A ponta apresenta um diâmetro inferior ao resto de estacas com o objetivo de favorecer a cravação na camada de apoio, sobre o efeito combinado da carga e do atrito negativo. A ponta pode ser de concreto reforçado (Reséndiz (1964); Ellstein, (1980) ou acero Reséndiz et al.1969).

2.4.4.4 Estacas de atrito negativo

Segundo Correa (1961), as estacas de atrito negativo, são estacas de ponta onde sua cabeça pode penetrar livremente o radier da fundação, o qual pode contribuir de forma significativa para uma diminuição dos recalques, devido a que o atrito negativo é dividido em uma

proporção para o adensamento natural da camada de solo, e outra para as pressões transmitidas pela construção (Figura 2.13).

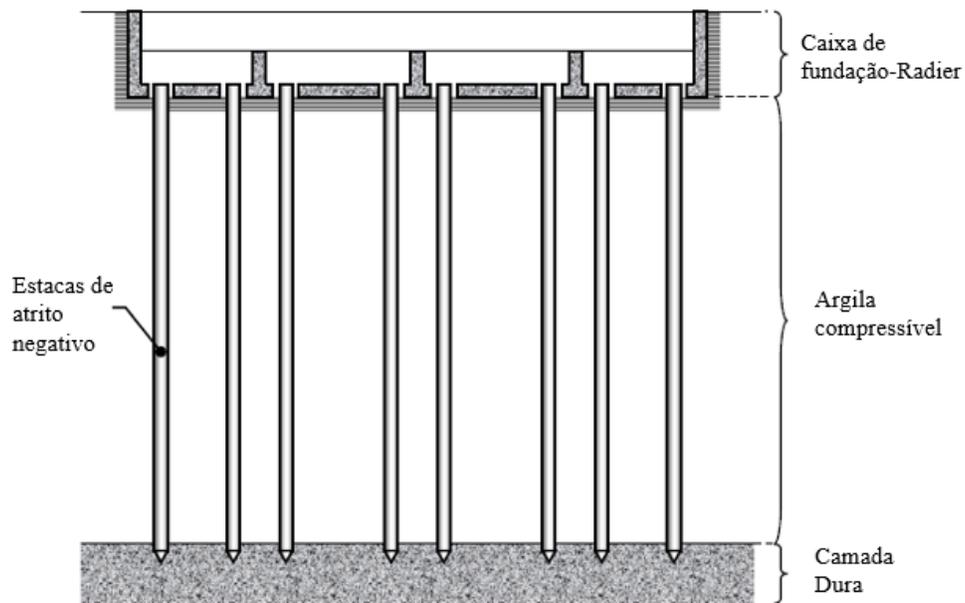


Figura 2.13. Estacas de atrito negativo (modificado de Rodríguez 2010).

As estacas de atrito negativo, recebem a carga pelo peso próprio da estrutura ou pela carga gerada pela subsidência regional, por meio do atrito negativo que se desenvolve em seu fuste, e finalmente é transmitida de sua ponta inferior à camada dura

Existem outros tipos de sistemas de fundação mais elaborados que utilizam estacas de atrito negativo, como é o caso das estacas entrelaçadas Girault (1964,1980), como se apresenta na Figura 2.14, onde o sistema apresenta estacas de atrito negativo apoiadas na camada dura, mas com a diferença de que sua ponta superior é colocada a certa distância do radier de fundação.

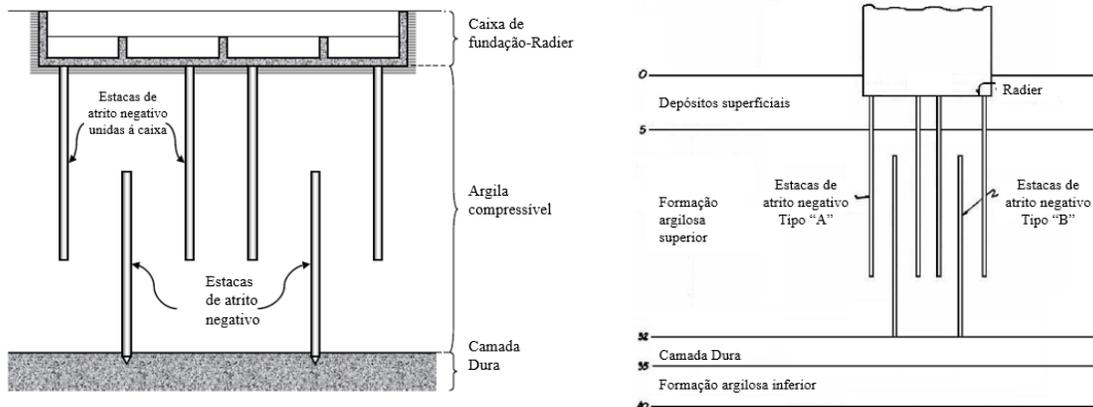


Figura 2.14. Estacas entrelaçadas (modificado de Rodríguez 2010 e de Girault 1964).

2.4.4.5 Estacas de controle

As estacas de controle (Figura 2.15) são estacas de atrito negativo que apresentam na parte superior um dispositivo que permite controlar a carga recebida, e eventualmente permite desenvolver uma descarga total para induzir movimentos corretivos no caso de edificações que apresentem perda na verticalidade ou inclinações consideráveis.

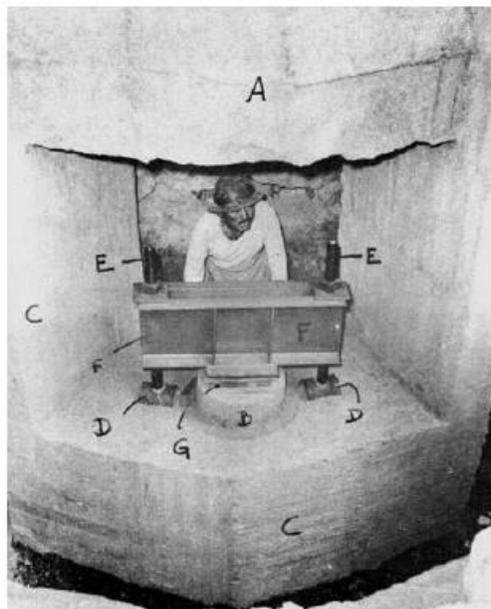


Figura 2.15. Estacas de controle (González, 1948).

2.4.4.6 Estacas telescópico

Segundo Correa (1969), estas estacas apresentam uma secção tubular superior e uma secção inferior (Figura 2.16), construída por um êmbolo que se apoia na camada resistente. Na secção

tubular é possível colocar um recheio de cascalho. Quando o recheio alcança certa altura, se desenvolve o efeito de curvatura que permite a transição de tensões da parte superior para a parte inferior. Controlando a altura do cascalho é possível controlar também a capacidade da ponta da estaca.

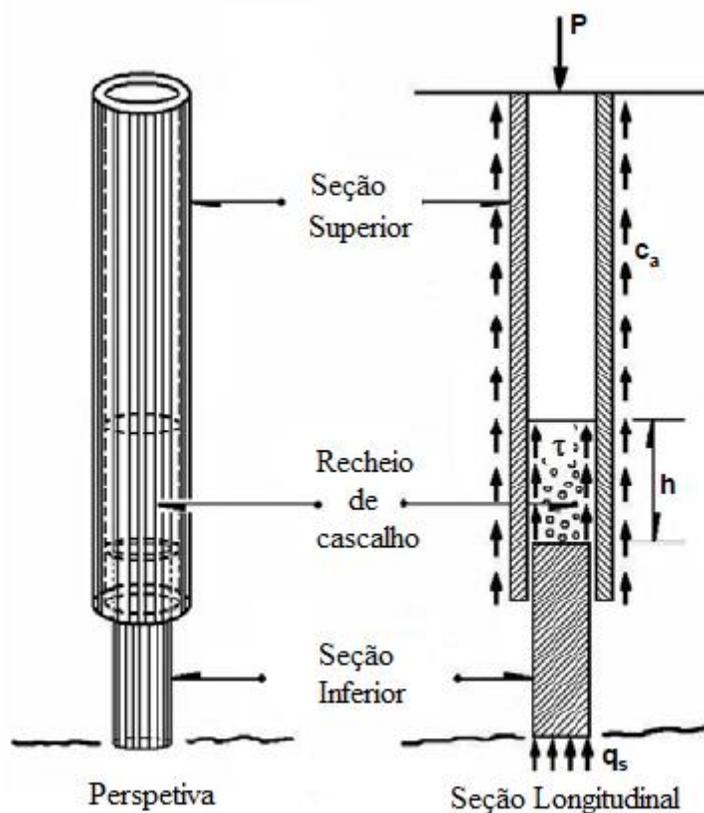


Figura 2.16. Estaca telescópico (modificado de Correa 1969).

2.4.4.7 Estacas com cobertura anti-atrito (Sánchez e Santoyo 1996)

São estacas apoiadas na camada dura (Capa dura), com uma ampliação do diâmetro de sua ponta e estão equipadas com uma cobertura metálica deformável que diminui de forma importante a transmissão do atrito negativo do solo para a estaca. A cobertura está construída por seções de aço alternadas com seções de neoprene que fluem a baixos valores de carga.

Para facilitar o movimento relativo entre a estaca e a cobertura, o espaço anular é preenchido com gordura mineral.

2.4.4.8 Inclusões injetadas

Para a conservação do patrimônio da Cidade de México, ante os recalques consideráveis induzidos pelo bombeio profundo e o rebaixamento do lençol freático, foi proposto o uso de inclusões consistentes em estacas injetadas envoltas em geotêxtil para determinados trechos de uma escavação dentro do subsolo, combinados com lâminas de morteiro injetado por fraturamento hidráulico do subsolo argiloso Santoyo e Ovando (2000). O objetivo principal é reduzir a compressibilidade da argila aplicando o método em zonas de alta compressibilidade, e nas profundidades onde o tratamento resulte mais efetivo; minimizando assim a magnitude dos recalques superficiais.

2.4.4.9 Inclusões Rígidas

Como uma nova alternativa de fundações para conjuntos habitacionais de grande extensão na zona lacustre da Cidade de México, foram propostos também o uso de inclusões de concreto coladas *insitu* (Rodríguez 2001, Rodríguez e Auvinet, 2002), 2006), (2007);(Figura 2.17).

Segundo Rodríguez (2010), para o controle de recalques este sistema de fundação demonstra ser o mais econômico quando é comparado com as fundações baseadas em estacas de atrito, sendo assim relevantes em 3 pontos:

- As inclusões não requerem de aço de reforço, devido a que sua projeção é feita em termos de recalques (previa verificação que em termos de capacidade de carga, a fundação sobre radier sem inclusões é estável).
- O radier da fundação não requer de reforço para transmitir a carga aos elementos, devido a que a ponta superior das estacas, é instalada a uma profundidade suficiente para evitar que as inclusões transmitam cargas pontuais.

- O procedimento construtivo permite obter altos rendimentos, de até 20 inclusões por jornada de trabalho.

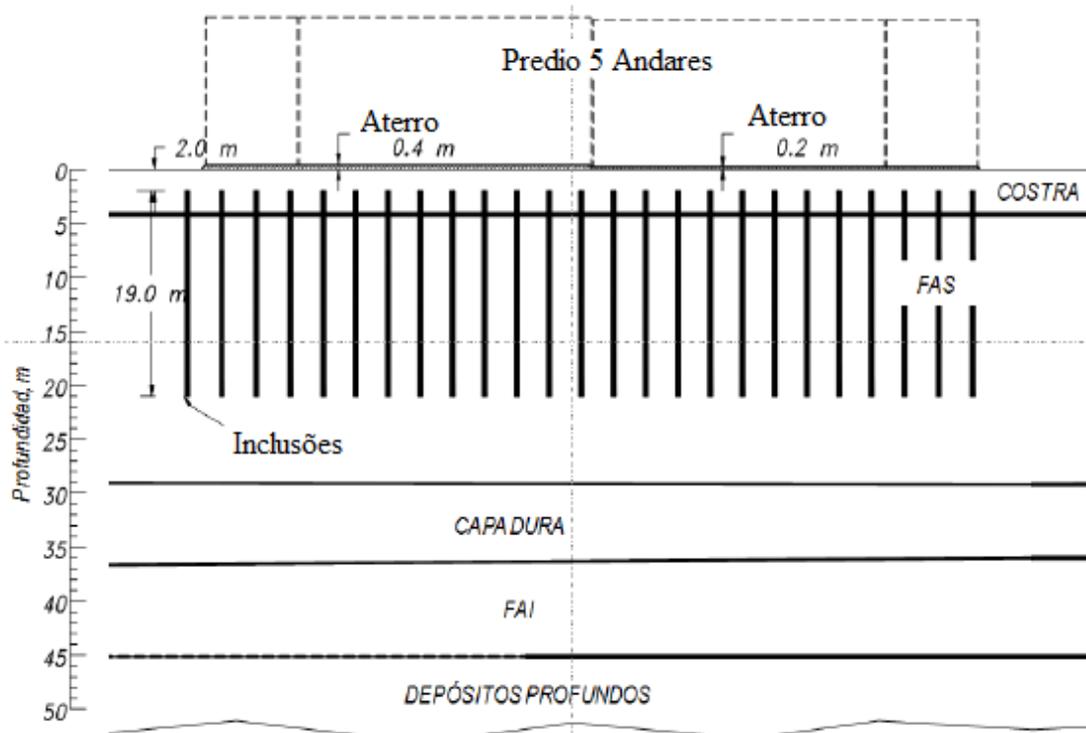


Figura 2.17. Inclusões rígidas implementadas em um prédio habitacional de grandes dimensões. (modificado de Rodriguez 2010).

2.5 MODELOS ANALÍTICOS E SUBSIDÊNCIA REGIONAL

Dos diferentes estudos e modelos analíticos implementados que se têm desenvolvido, para analisar o comportamento dos sistemas de fundação baseados em estacas de atrito, sujeitas ao processo de subsidência regional, no caso da zona lacustre da Cidade de México, destaca o feito por Zeevaert (1973), no qual estabelece que existem dois tipos de casos nos quais se consegue focar o comportamento de uma fundação assente em um solo mole que interage com a subsidência regional.

No primeiro caso se expõe que as estacas conseguem trabalhar sob o atrito positivo, na seção inferior suportando a carga imposta pela estrutura e a força imposta pela geração de atrito negativo, como se apresenta na Figura 2.18.

NF = Atrito negativo

PF = Atrito positivo.

No segundo caso apresentado na Figura 2.19, se considera que as estacas podem trabalhar unicamente sob o atrito positivo limite, suportando uma seção da carga total transmitida pela estrutura e deixando que a outra seção de carga seja suportada pelo solo onde são instaladas as estacas.

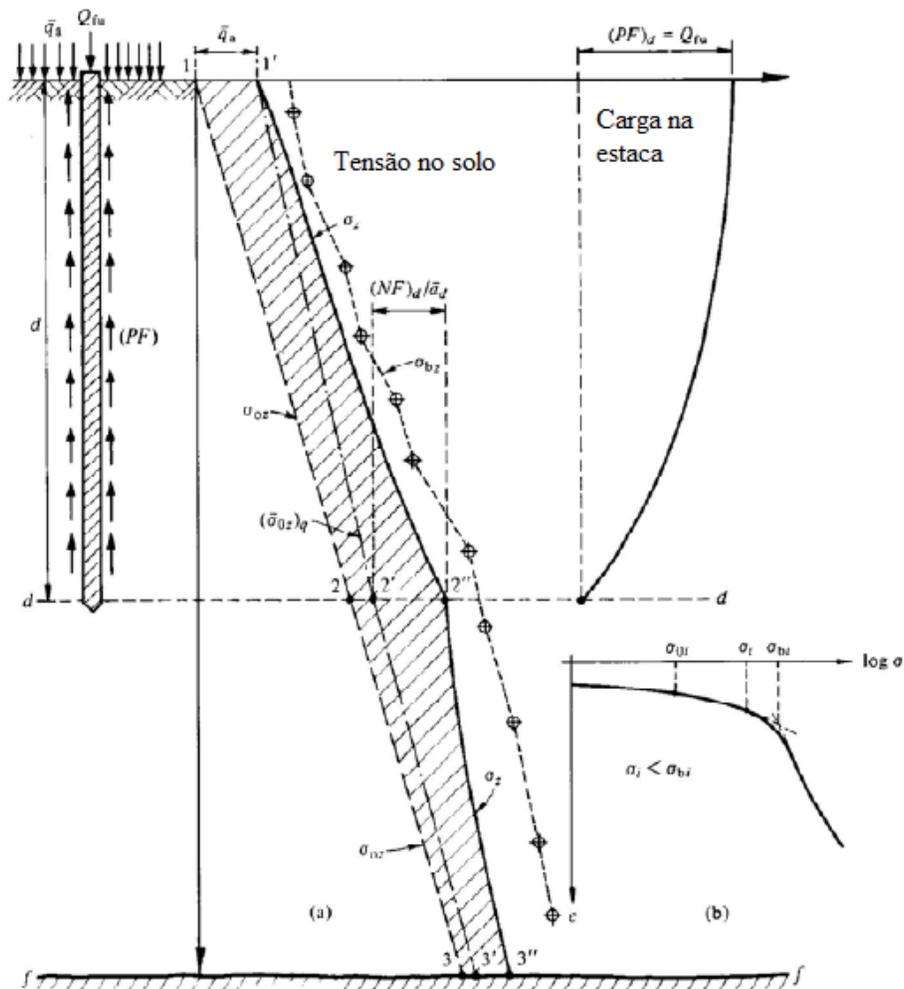


Figura 2.19. Estacas de atrito (modificado de Zeevaert 1973).

O gráfico anterior representa o sistema do caso, onde o recalque final do sistema se consegue calcular como:

$$\delta_c = \sum_0^f m_{vi} (\sigma_i - \sigma_{0i}) \Delta z_i \quad (2.3)$$

Uma desvantagem importante desta abordagem consiste que Zeevaert (1973) não considera o aporte ao sistema de fundação por parte das pontas das estacas e, segundo Rodriguez (2010), o espaçamento entre as estacas no sistema de fundação e a força que se gera pelas pontas das mesmas, muda consideravelmente os resultados das análises.

2.5.1 Cargas atuantes em um sistema de fundação baseado em estacas.

Outro estudo importante corresponde ao feito por Reséndiz e Auvinet (1973), no qual se expõe que no momento onde são desenvolvidas a capacidade por ponta do grupo de estacas e o atrito limite (positivo e negativo) ao longo do fuste das mesmas, a profundidade do nível neutro pode ser calculada mediante aproximações sucessivas variando seu valor até conseguir cumprir a seguinte equação:

$$Q_{estaca} - C_p = |F^{(+)}|_{Z_0}^{Z_p} - |F^{(-)}|_{D_f}^{Z_0} \quad (2.4)$$

onde,

Q_{estaca} = Carga transmitida pelas estacas.

C_p = Capacidade por ponta do grupo de estacas.

$|F^{(+)}|_{Z_0}^{Z_p}$ = Atrito positivo medido desde a profundidade do nível neutro até a ponta das estacas.

$$|F^{(+)}|_{Z_0}^{Z_p} = f_L \cdot P_p \cdot (z_p - z_0) \quad (2.5)$$

Onde,

f_L = Resistência média ao corte ao longo do fuste da estaca medida desde Z_0 até Z_p .

P_p = Perímetro da estaca.

$|F^{(-)}|_{D_f}^{Z_0}$ = Atrito negativo medido desde a profundidade de instalação do radier de fundação D_f , até a profundidade do nível neutro Z_0 .

$$|F^{(-)}|_{D_f}^{Z_0} = f_L \cdot P_p \cdot (z_0 - D_f) \quad (2.6)$$

onde,

f_L = Resistência média ao corte ao longo do fuste da estaca medida desde D_f até Z_0 .

Esta abordagem considera que ao longo do tempo existe um momento onde o deslocamento relativo entre a estaca e o solo se considera nulo e, nesta situação, se apresenta uma mudança no sinal do atrito de negativo para positivo a uma profundidade Z_0 ,

Segundo a Figura 2.20 é representado o comportamento do atrito negativo e positivo na estaca em condições, a) deslocamento relativo entre o solo e à estaca, b) relação entre o desenvolvimento do atrito do sistema e o deslocamento relativo, e finalmente c) Cargas atuantes no sistema.

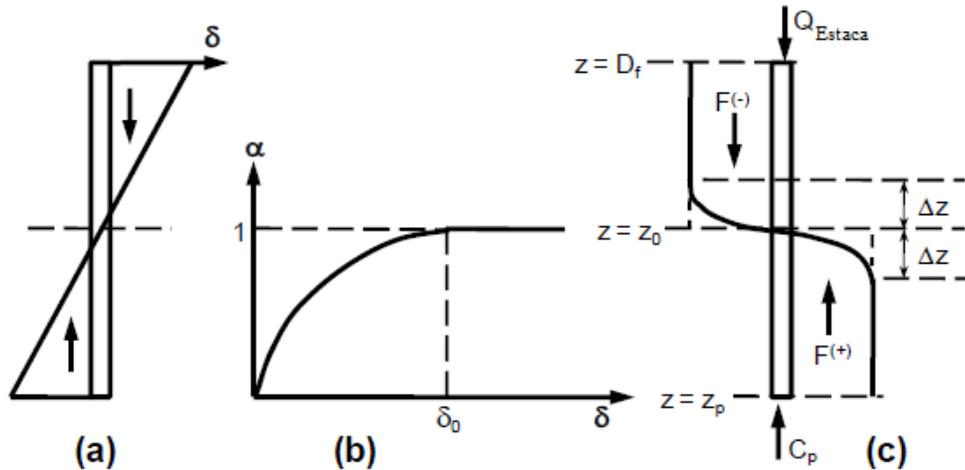


Figura 2.20. Interação ao longo prazo entre a estaca e o solo (modificado de Reséndiz e Auvinet 1973).

Na mesma abordagem se define a magnitude da carga transmitida ao grupo de estacas e ao radier de fundação como variável dependente da resistência última do grupo de estacas.

Assim:

$$R_{estaca} = |F^{(+)}|_{D_f}^{z_p} + C_p \quad (2.7)$$

A carga máxima transmitida pela estrutura ao nível da fundação como:

$$\sum Q_{max} = \sum Q + F_{cajon}^{(-)} - Q_{sub} \quad (2.8)$$

e a carga máxima transmitida ao radier como:

$$Q_{radier} = \sum Q + F_{cajon}^{(-)} - Q_{estaca} - Q_{sub} \quad (2.9)$$

onde;

$\sum Q$ = Somatória das cargas para o sistema de fundação.

$F_{cajon}^{(-)}$ = Atrito negativo transmitido pelas paredes da caixa de fundação.

Q_{sub} = Carga transmitida por supressão na caixa de fundação.

Para a abordagem do sistema foram também definidas duas condições do tipo de comportamento do grupo de estacas, assim:

A primeira condição estabelece que o grupo de estacas consegue suportar a carga máxima transmitida e por conseguinte a profundidade do nível neutro é maior que a profundidade de instalação das estacas, de igual forma o atrito negativo é maior que zero; esta condição leva a uma separação do radier de fundação do solo pelo qual a carga do radier também é igual que zero. A seguinte equação apresenta pontualmente a abordagem da condição.

$$Q_{estaca} = \sum Q_{max}, se \sum Q_{max} < R_{estaca} \quad (2.10)$$

A segunda condição estabelece que o grupo de estacas não consegue suportar a carga máxima transmitida pela estrutura e precisa da ajuda do radier de fundação; nesta condição, o atrito negativo gerado é igual a zero, a profundidade do nível neutro coincide com a profundidade de instalação das estacas e finalmente a carga transmitida ao radier se define mediante a equação 2.5.9

De acordo às anteriores abordagens a carga de cada estaca se consideram como uma variável dependente do valor mínimo entre a resistência da mesma e a carga máxima transmitida:

$$Q_{estaca} = \min(R_{estaca}, \sum Q_{max}) \quad (2.11)$$

Finalmente, as equações resultantes do estudo feito por Reséndiz e Auvinet (1973) permitem desenvolver uma definição do comportamento ao longo prazo para o grupo de estacas, o solo de fundação e a estrutura em termos de tensões, com os seguintes aportes:

- A carga total transmitida pela estrutura às estacas Q_{estaca} , se consegue definir pela equação 2.5.11
- A pressão efetiva de contato transmitida pela estrutura ao solo, se consegue definir pela equação 2.5.8
- A tensão transmitida ao solo através do fuste do grupo de estacas, se consegue definir por meio da equação 2.5.10, variando o valor de Z_o até encontrar a profundidade do nível neutro.
- A carga transmitida ao solo através da ponta das estacas, é definida como C_p .

Segundo Rodríguez (2001); e Rodríguez e Auvinet, (2002), as anteriores equações se conseguem implementar também para a projeção de sistemas de fundações com inclusões rígidas, considerando que a carga transmitida as estacas Q_{estaca} têm que ser igual à capacidade por ponta superior do elemento C_s , tendo como resultado a seguinte equação.

$$C_s - C_p = |F^{(+)}|_{Z_0}^{Z_P} - |F^{(-)}|_{Z_S}^{Z_o} \quad (2.12)$$

onde;

Z_s = Profundidade da ponta superior da inclusão.

Porém, estes mesmos autores conseguiram demonstrar que nem sempre a condição limite se apresenta neste tipo de sistemas de fundação, pelo qual sugerem desenvolver estudos mais realistas da abordagem do atrito negativo para grupo de estacas e inclusões onde se considere o estado de tensões e deformações induzido pela interação do sistema com a subsidência regional.

2.5.2 Tensões e recalques induzidos pela presença de estacas em um meio contínuo.

O acréscimo de tensões gerado no meio de um sistema de fundações devido ao peso da estrutura, o desenvolvimento do atrito negativo e positivo das estacas e a força por ponta se pode calcular por meio da implementação das equações de Mindlin (1936).

2.5.3 Tensões devidas a cargas pontuais

Segundo Mindlin (1936), a tensão vertical induzida por uma carga vertical pontual P, em qualquer ponto de um meio semi-infinito elástico (Figura 2.21), se consegue calcular da seguinte forma:

$$\sigma_z = \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left\{ \frac{-3(z-c)^3}{R_1^5} - \frac{(1-2\nu)(z-c)}{R_1^3} + \frac{(1-2\nu)(z-c)}{R_2^3} + \frac{-3(3-4\nu)(z+c)^3 + 12c(2-\nu)(z+c)^2 - 18c^2(z+c)}{R_2^5} - \frac{30cz(z+c)^3}{R_2^7} \right\} \quad (2.13)$$

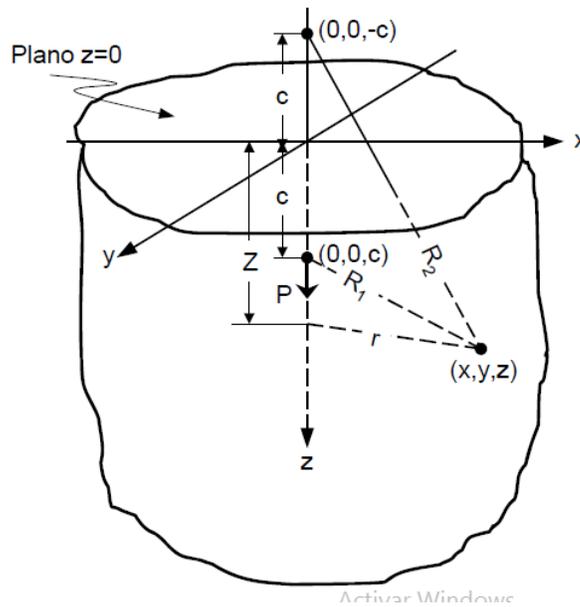


Figura 2.21. Esquemática da abordagem do Mindlin (modificado de Rodriguez 2010).

2.5.4 Tensões devidas a cargas uniformemente repartidas sobre superfícies circulares

Auvinet e Díaz (1981) conseguiram propor uma integração das equações de Mindlin (1936) para calcular as tensões induzidas por cargas repartidas sobre uma superfície circular localizada na superfície localizada a uma profundidade qualquer (Figura 2.22).

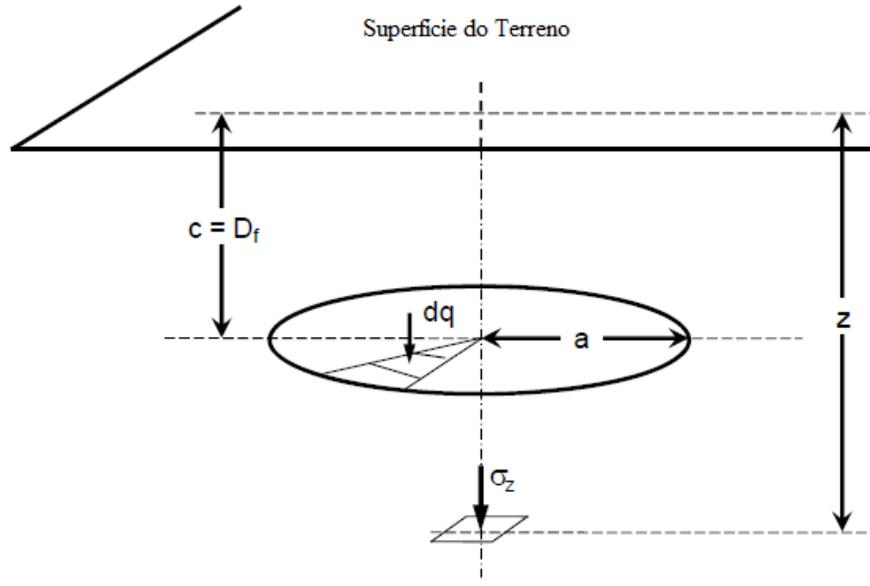


Figura 2.22. Carga uniformemente repartida sobre uma superfície circular a uma profundidade D_f .
Modificado de Rodriguez (2010).

Para uma área de rádio R , a tensão vertical num ponto ao longo de seu eixo a uma profundidade Z , pode-se definir como:

$$\sigma_z = \int_0^{2\pi} \int_0^R d\sigma_z \quad (2.14)$$

Com resultado da integração igual a:

$$\sigma_z = \frac{q}{4(1-\nu)} (I + II + III + IV + V) \quad (2.15)$$

onde;

$$I = (z - D_f)^3 \left\{ \frac{1}{[R^2 + (z - D_f)^2]^{3/2}} - \frac{1}{|z - D_f|^3} \right\} \quad (2.16)$$

$$II = (1 - 2\nu)(z - D_f) \left\{ \frac{1}{[R^2 + (z - D_f)^2]^{1/2}} - \frac{1}{|z - D_f|} \right\} \quad (2.17)$$

$$III = -(1 - 2\nu)(z - D_f) \left\{ \frac{1}{[R^2 + (z - D_f)^2]^{1/2}} - \frac{1}{(z - D_f)} \right\} \quad (2.18)$$

$$IV = \left[(3 - 4\nu)(z - D_f)^3 - 4(2 - \nu)D_f(z + D_f)^2 + 6D_f^2(z + D_f) \right] \left\{ \frac{1}{[R^2 + (z - D_f)^2]^{3/2}} - \frac{1}{(z - D_f)^{3/2}} \right\} \quad (2.19)$$

$$V = 6zDf(z - D_f)^3 \left\{ \frac{1}{[R^2 + (z + D_f)^2]^{5/2}} - \frac{1}{(z + D_f)^{5/2}} \right\} \quad (2.20)$$

2.5.5 Tensões devidas a cargas uniformemente distribuídas sobre superfícies horizontais

Poulos e Davis (1974) implementaram também uma generalização das equações de Mindlin (1936) para calcular tensões induzidas por uma carga repartida uniformemente sobre uma superfície horizontal a uma profundidade D_f , a qual foi denominada como o método dos setores (Figura 2.23).

A influência de um setor de ângulo α e radio R em um ponto localizado embaixo do centro do mesmo, se consegue calcular como:

$$\sigma_z = \frac{\alpha}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R d\sigma_z \quad (2.21)$$

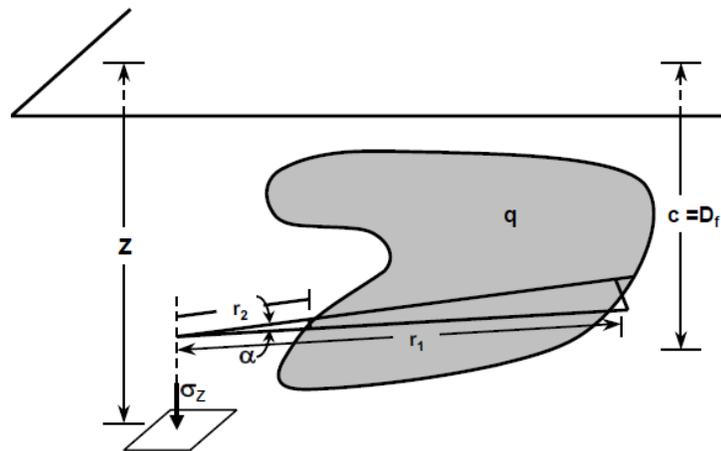


Figura 2.23 Carga uniformemente repartida sobre uma superfície horizontal a uma profundidade D_f . Modificado de Rodriguez (2010).

Onde $d\sigma_z$ corresponde à tensão calculada com a equação 2.5.21, para $P=q\rho d\rho d\theta$. A integração tem como resultado:

$$\sigma_z = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \frac{q}{4(1-\nu)} (I + II + III + IV + V) \quad (2.22)$$

Outra aproximação foi apresentada por Rodriguez (2001) para inclusões rígidas, onde a abordagem consistiu em substituir as forças de ponta, forças geradas pelo atrito negativo e

positivo, e as forças devidas ao peso da estrutura, por cargas equivalentes uniformemente distribuídas em áreas horizontais. (Figura 2.24).

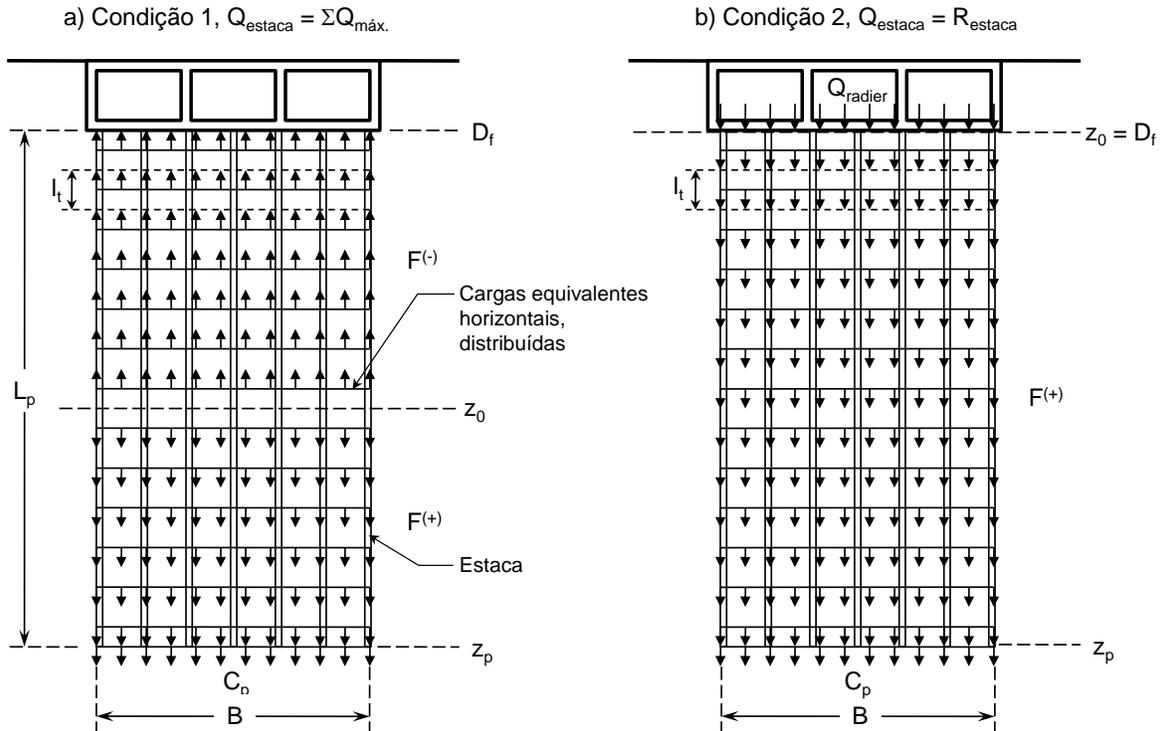


Figura 2.24. Cargas equivalentes repartidas para um grupo de inclusões. Modificado de Rodriguez (2001).

As cargas equivalentes para o atrito positivo e negativo podem ser calculadas com as seguintes equações:

$$f_{eq}^{(+)} = \frac{|F^{(+)}|_{z_0}^{z_p}}{n_{eq}^{(+)} \cdot L \cdot B}, \text{Atrito positivo} \quad (2.23)$$

$$f_{eq}^{(-)} = \frac{|F^{(-)}|_{D_f}^{z_0}}{n_{eq}^{(-)} \cdot L \cdot B}, \text{Atrito Negativo} \quad (2.24)$$

onde;

B= Largura da superfície horizontal ocupada pelas estacas.

L= Comprimento da superfície horizontal ocupada pelas estacas.

$n_{eq}^{(+)}$ = Número de áreas equivalentes consideradas para o atrito positivo.

$n_{eq}^{(-)}$ = Número de áreas equivalentes consideradas para o atrito negativo.

As áreas são definidas como:

$$n_{eq}^{(-)} = \frac{Z_0 - D_f}{l_t} ; n_{eq}^{(+)} = \frac{Z_p - Z_0}{l_t} ; n_{eq} = n_{eq}^{(+)} + n_{eq}^{(-)} = \frac{L_p}{l_t} \quad (2.25)$$

onde;

l_t = Comprimento tributário para cada carga equivalente.

L_p = Comprimento das estacas.

n_{eq} = Número total de áreas equivalentes.

Finalmente o cálculo dos recalques finais do sistema de fundação para esta abordagem, devidos ao adensamento induzido pelas variações das tensões efetivas dentro do meio, se consegue estimando os deslocamentos verticais a partir das curvas de compressibilidade (provas de laboratório adensamento unidimensional).

$$\Delta h = h \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (2.26)$$

onde;

Δh = Recalque.

h = Espessura do estrato.

Δe = Variação do índice de vazios.

e_o = Índice de vazios inicial.

3 MODELO ANALÍTICO PROPOSTO.

Dos diferentes estudos que desenvolveram diferentes autores para analisar o comportamento dos sistemas de fundação com estacas de atrito interagindo com a subsidência regional da zona lacustre da Cidade de México, destacam-se o desenvolvido por Resendiz e Auvinet (1973), posteriormente modificado por Rodriguez (2010), o qual é o foco deste trabalho.

3.1 DESCRIÇÃO

O modelo consegue reproduzir o comportamento das inclusões num solo atingido pelo processo de adensamento devido ao rebaixamento das pressões intersticiais (subsidência regional), ou pelo peso próprio da estrutura. Este comportamento descreve a distribuição de tensões verticais induzidas bem seja por uma inclusão (estaca isolada) ou uma combinação de várias delas (grupo de estacas) em qualquer ponto do meio geotécnico no qual se esteja trabalhando. De igual forma, permite avaliar as deformações que se apresentam no meio a partir das curvas de compressibilidade obtidas dos ensaios de adensamento

A base teórica do algoritmo parte da implementação das equações de Mindlin (1936), para calcular a tensão vertical induzida num ponto qualquer do meio devido a uma carga vertical pontual, localizada a uma certa profundidade; assim mesmo, as expressões de Geddes (1966) permitem calcular as tensões verticais induzidas no meio devido a uma carga repartida ao longo de uma linha vertical, e finalmente os efeitos nas tensões verticais induzidas pelas cargas distribuídas sobre superfícies retangulares são calculadas por meio das aproximações de Auvinet e Espinosa (Auvinet e Díaz, 1981) e Rodriguez,(2001), baseadas nas equações propostas por Poulos e Davis (1974) e Rossa e Auvinet (1992).

Finalmente, o algoritmo criado para representar o modelo, permite determinar em termos gerais o número de inclusões necessárias para diminuir os recalques totais ou diferenciais. O cálculo destes recalques devidos ao adensamento do meio e induzidos pelas variações das tensões efetivas, incluindo as forças internas geradas ao longo das inclusões, se efetua estimando as deformações a partir das curvas de compressibilidade (índice de vazios vs tensão efetiva), determinadas no laboratório mediante os ensaios de adensamento.

O procedimento que utiliza o modelo analítico para a abordagem de qualquer tipo de teste que envolva inclusões se descreve a na seguinte lista de passos:

Passo 1. É avaliado a distribuição inicial de tensões efetivas verticais no centro da camada.

Passo 2. A carga ao longo prazo desenvolvida na cabeça das estacas (Q_{estaca}) é calculada mediante a seguinte equação 3.1.1.

$$Q_{estaca} = \min(R_{estaca}, \sum Q_{max}) \quad (3.1)$$

onde;

Q_{estaca} = Carga transmitida pelas estacas.

$\sum Q_{max}$ = Somatória das cargas máximas do sistema de fundação.

R_{estaca} = Resistência da estaca.

Passo 3. A carga resultante da pressão total de contato entre a subestrutura e o solo (Q_{radier}), é calculada mediante a seguinte equação 3.1.2.

$$Q_{radier} = \sum Q + Q_{estaca} \quad (3.2)$$

onde;

Q_{radier} = Carga transmitida pelo radier.

$\sum Q$ = Somatória das cargas para o sistema de fundação.

Q_{estaca} = Carga transmitida pelas estacas.

Passo 4. A posição do nível neutro é estimada por iterações até que seja satisfeita a seguinte equação 3.1.3,

$$Q_{estaca} - C_p = |F^{(+)}|_{Z_0}^{Z_p} - |F^{(-)}|_{D_f}^{Z_0} \quad (3.3)$$

onde:

Q_{estaca} = Carga transmitida pelas estacas.

C_p = Capacidade por ponta do grupo de estacas.

$|F^{(+)}|_{Z_0}^{Z_P}$ = Atrito positivo medido desde a profundidade do nível neutro até a ponta das estacas.

$$|F^{(+)}|_{Z_0}^{Z_P} = f_L \cdot P_p \cdot (z_p - z_0) \quad (3.3.1)$$

onde,

f_L = Resistência média ao cisalhamento ao longo do fuste da estaca medida desde Z_0 até Z_p .

P_p = Perímetro da estaca.

$|F^{(-)}|_{D_f}^{Z_0}$ = Atrito negativo medido desde a profundidade de instalação do radier de fundação

D_f , até a profundidade do nível neutro Z_0 .

$$|F^{(-)}|_{D_f}^{Z_0} = f_L \cdot P_p \cdot (z_0 - D_f) \quad (3.3.2)$$

onde,

f_L = Resistência média ao cisalhamento ao longo do fuste da estaca medida desde D_f até Z_0 .

Esta abordagem considera que ao longo do tempo existe um momento onde o deslocamento relativo entre a estaca e o solo se considera nulo e, nesta situação ocorre uma mudança no sinal do atrito de negativo para positivo a uma profundidade Z_0

Nesse caso, o atrito negativo é considerado como limite e é estimado a partir da resistência ao cisalhamento do solo em contato com a estaca, levando em conta que a força de arraste gerada pelo rebaixamento piezométrico que atua sobre a estaca do grupo não pode ser maior que o peso do solo contido no volume tributário da mencionada estaca.

Passo 5. É calculado um campo de tensões equivalentes, substituindo as forças por atrito positivo, negativo e por ponta por cargas uniformemente repartidas em áreas horizontais localizadas em determinadas profundidades. As tensões induzidas por estas cargas em qualquer profundidade são calculadas empregando técnicas numéricas para a integração das equações de Mindlin (1936), como: método dos setores generalizado (Poulos e Davis 1974).

Passo 6. Os recalques induzidos pela variação das tensões efetivas gerado pelas cargas equivalentes uniformemente repartidas e pelo rebaixamento futuro das pressões intersticiais,

é calculado a partir das curvas de compressibilidade (índice de vazios vs tensão efetiva), obtidas de ensaios de adensamento unidimensional.

3.2 MODIFICAÇÕES PROPOSTAS

No trabalho de Rodriguez (2010), depôs de implementar uma metodologia para análise e projeto de inclusões baseados em modelos numéricos com casos de estudo da zona lacustre da Cidade de México, os resultados demonstraram que o procedimento descrito anteriormente, sobrestima os efeitos do atrito negativo, devido a que não se alcançam as condições limite na parte superior das estacas centrais, além de evidenciar que o atrito positivo não pode ser maior que o incremento aparente do peso submerso, da massa de solo que envolve a estaca acima do nível neutro, devido às forças de filtração induzidas pelo rebaixamento das pressões intersticiais. Pelo qual foi proposta uma nova equação que permite atingir a anterior sugestão e que modifica substancialmente a equação 3.1.3 do passo 4.

$$\left|F_{Df}^{(-)Z_o}\right| = \min\{f_L|_{Df}^{Z_o} \cdot P_p \cdot (Z_o - D_f), \Delta\sigma'(Z_o) \cdot (A - N_p \cdot A_p)\} \quad (3.4)$$

onde,

$f_L|_{Df}^{Z_o}$ = Resistência média ao corte ao longo do fuste da estaca desde D_f até Z_o .

P_p = Perímetro da estaca.

$\Delta\sigma'(Z_o)$ = Incremento da tensão vertical efetiva devido ao rebaixamento das pressões intersticiais na profundidade Z_o .

A = Superfície do grupo de estacas.

N_p = Número de estacas.

A_p = Área transversal da estaca.

Na Figura 3.1 se apresenta o fluxograma da abordagem do modelo analítico na versão Micra 2011.

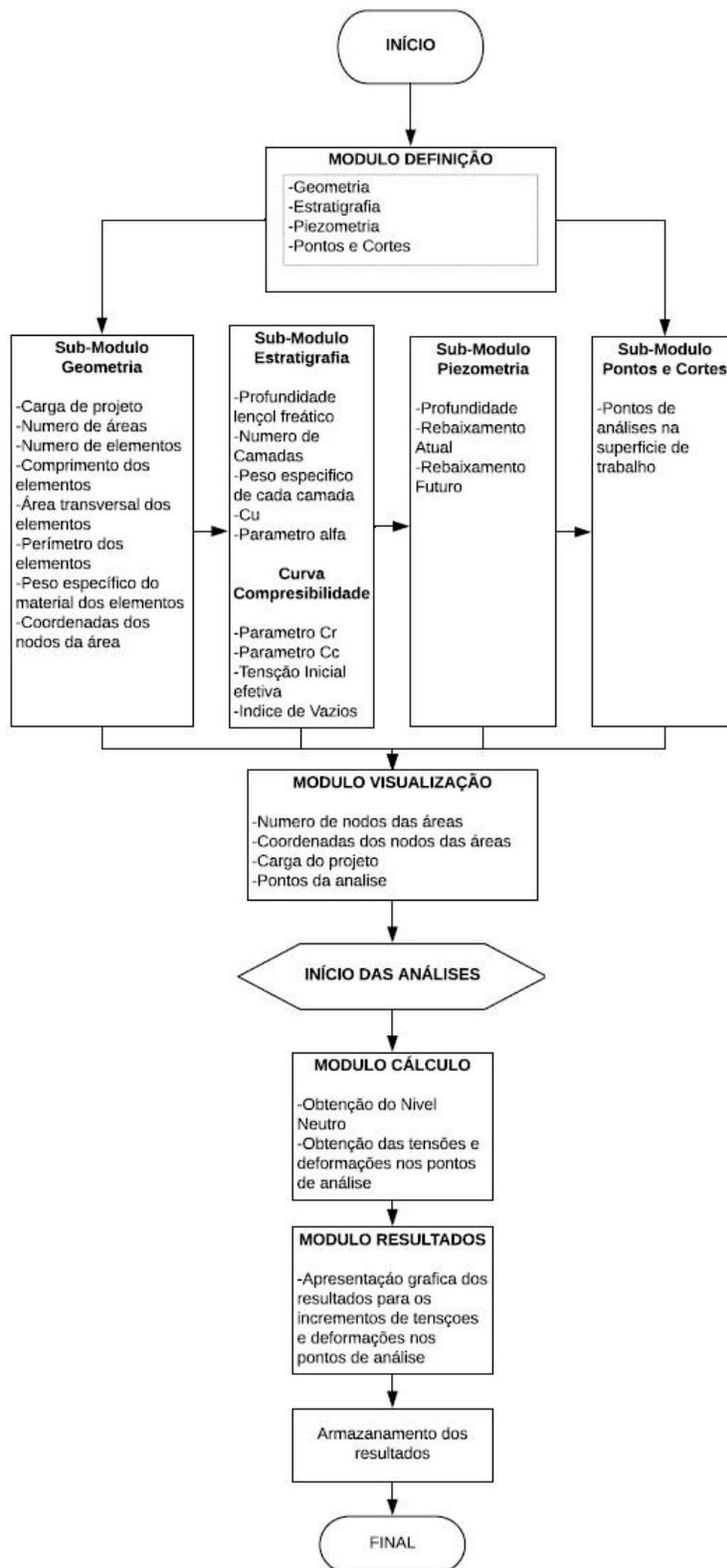


Figura 3.1. Diagrama de fluxo do modelo analítico Micra 2011

4 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO

O programa aqui proposto, essencialmente com a nova modificação, calcula as mudanças de tensões geradas pela presença ou inclusão de elementos ou inclusões em um solo em processo de adensamento. Sua hipótese básica corresponde a: Na superfície desses elementos é alcançada uma condição limite de resistência para tensão cisalhante, que constitui a condição de fronteira para o campo de tensões modificado. Porém, neste caso, é utilizada uma aproximação que consiste em substituir as cargas de ponta e de atrito por cargas uniformemente repartidas sobre áreas retangulares. O programa permite adicionalmente calcular os recalques totais previsíveis levando em conta simultaneamente à condição de tensão inicial e induzida pelas inclusões.

4.1 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

A última versão do modelo analítico (Micra 2011) foi desenvolvido na linguagem *Visual Basic 6*, que só teve suporte pela Microsoft até 2008. Neste sentido, a fim de atualizar o modelo em questão, se procurou uma linguagem de programação mais nova que permite integrar novas atualizações ao modelo em sua parte gráfica e posteriormente em sua estrutura de código.

Com o objetivo de diminuir a dificuldade do preenchimento de cada formulário, para conseguir o mesmo resultado linguagem *Python* (versão 3.6.1) forneceu os principais fatores para ser selecionado como linguagem de programação para atualizar o modelo analítico.

Segundo Lutz (2013), depois de ter conseguido uma ampla experiência como docente ensinando Python nos últimos 16 anos, é possível identificar alguns temas e fatores comuns que permitem aos usuários de Python escolhê-lo como linguagem de programação de preferência, tais como:

- Qualidade do software: Um dos principais fatores corresponde a legibilidade que oferece Python, coerência e qualidade do software. Um código Python é projetado para ser legível e apresentar uma uniformidade que permita uma fácil e rápida compreensão para qualquer programador.

- **Produtividade do desenvolvedor:** O Python aumenta a produtividade do desenvolvedor muitas vezes além de compilado, o qual resulta em uma diminuição na escrita do código, diferenciando-se das linguagens tradicionais como C, C++ ou inclusive Java (para uma mesma ideia programada nas diferentes linguagens mencionadas, o Python oferece o mesmo resultado em menos linhas de código). Programas em Python também são executados imediatamente sem as longas etapas de compilação e link exigidas por algumas outras ferramentas, impulsionando ainda mais a velocidade do programador.
- **Portabilidade do Programa:** A maioria dos programas que podem ser gerados em Python conseguem-se manter sem alterações pelo qual é possível executá-los nos principais sistemas operativos atuais como Linux ou Windows, só com copiar o script e levando de uma plataforma para outra. Dentro da mesma portabilidade; Python oferece várias opções de codificação de interfaces gráficas de usuário, programas de acesso a bancos de dados.
- **Bibliotecas de suporte:** Sem dúvida uma das maiores vantagens da linguagem de programação Python, é a grande quantidade de bibliotecas de suporte que apresenta com uma grande coleção de funcionalidades pré-construídas e portáveis, conhecidas como a biblioteca padrão. Esta biblioteca suporta uma matriz de programação em nível de aplicativos.
- **Integração de componentes:** os scripts criados em Python podem se comunicar facilmente com outras partes de um aplicativo, usando uma variedade de mecanismos de integração. Essas integrações permitem que o Python seja usado como personalização de produto e ferramenta de extensão. Em outros termos, o código Python pode importar outras linguagens de programação e suas bibliotecas como por exemplo C, C++, e Java.

Python é usado em todo o mapa da programação atual, em termos de domínios de aplicativos, sendo aplicável quase todos os campos. Pelo qual se consegue concluir que esta linguagem consegue conectar diferentes áreas da indústria, com diferentes propósitos provando sua versatilidade.

4.2 DESCRIÇÃO

O programa Micra 2018, como foi denominada esta nova versão do modelo, tomou como ponto de partida a modificação da arquitetura que apresentava o modelo anterior (Anexo 1), mas implementou modificações consideráveis em todos seus módulos tanto na interface gráfica do programa como no código original do mesmo.

4.2.1 Módulo de Geometria e Cargas

A interface do módulo de *Geometria y Cargas* foi programada com modificações na estrutura e na maneira de ingressar os dados no formulário com respeito ao formulário inicial. Levando em conta o fato de conseguir uma diminuição importante no tempo de ingresso dos dados e aumentar a facilidade do procedimento, se programou o formulário com janelas emergentes ativadas com diferentes ações em botões principais; por exemplo, no momento de definir o número de áreas no primeiro quadro de texto (Figura 4.1), se ativa uma janela que permite ingressar os dados referentes a informação relevante do projeto, em forma de tabela e manualmente (Figura 4.3); assim mesmo, se a opção de ingressar os dados manualmente não é viabilizada pelo usuário, foi criado um botão adicional que permite oferecer ao usuário importar a informação previamente preenchido em um arquivo de Excel, a qual pode ser carregada no formulário de forma mais rápida e fácil, só com clicar no botão *Importar datos* (Figura 4.2).

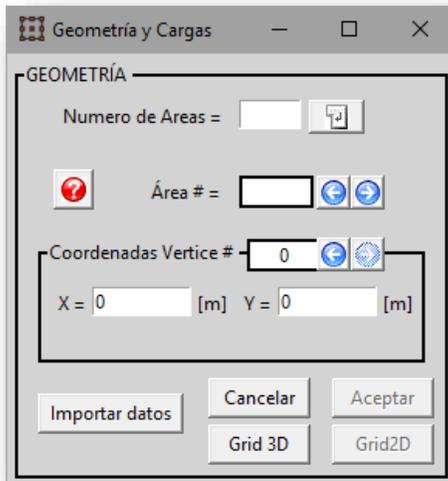


Figura 4.1.Quadro de diálogo da atualização do formulário Geometria e Cargas.

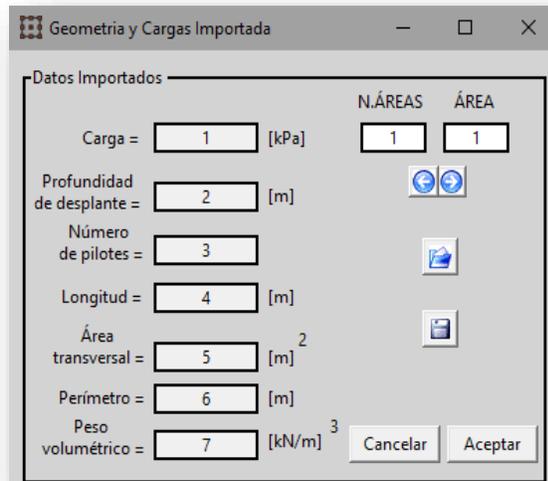


Figura 4.2.Quadro de diálogo para importar dados do formulário Geometria e Cargas.

Area	Carga [Kpa]	P.Desplante [m]	N.Pilotes [Uni]	Longitud P [m]	A.transversal P [m ²]	Perimetro [m]	Peso Volumetrico [kN/m ³]
1	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 4.3.Quadro de diálogo atualizado para ingressar as informações correspondentes ao projeto de análise.

Adicionalmente, foi desenvolvida uma opção nova neste formulário que permite ao usuário visualizar a geometria ingressada em 3D e 2D como se apresenta nas Figura 4.4 e Figura 4.5.

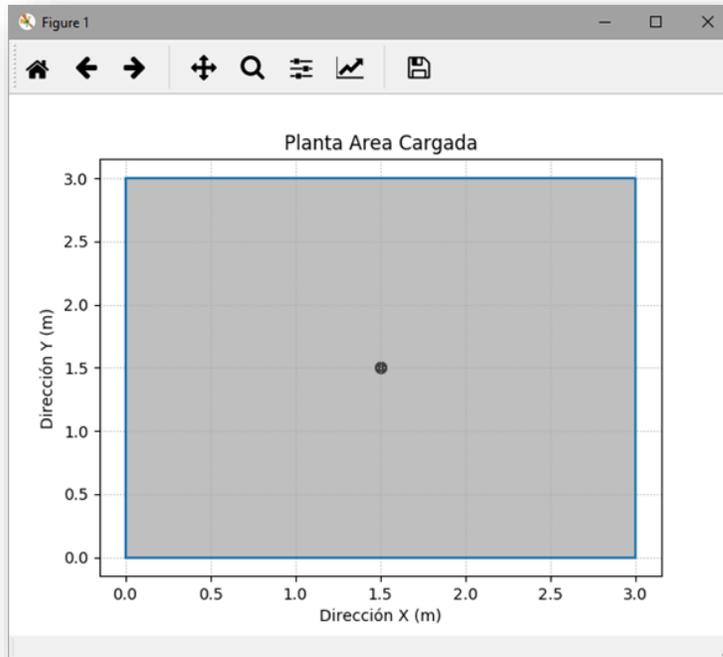


Figura 4.4. Visualización 2D da geometria ingressada do projeto a ser analisado.

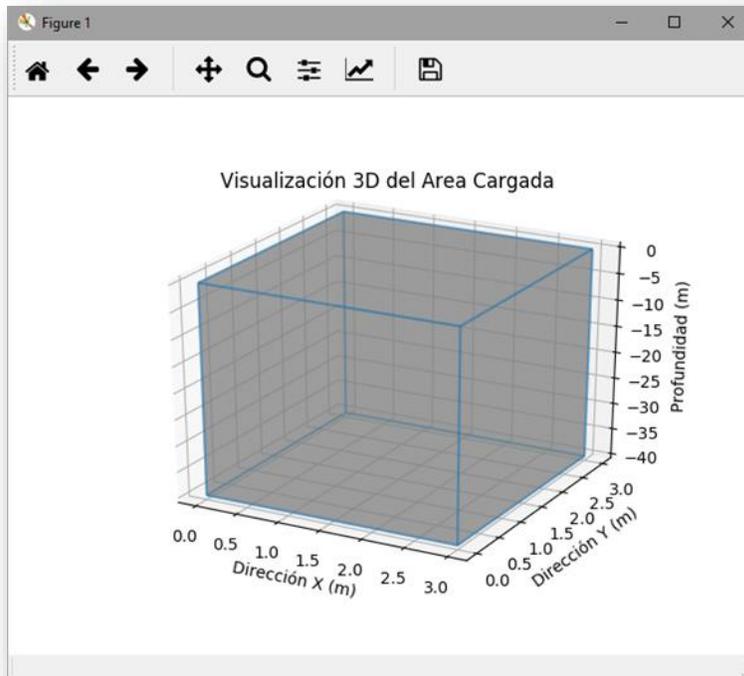


Figura 4.5. Visualización 3D da geometria ingressada do projeto a ser analisado.

4.2.2 Módulo de Estratigrafia

Com os mesmos objetivos que o formulário de *Geometria y Cargas*, foi atualizado o quadro de dialogo correspondente ao módulo da *Estratigrafia*, como se apresenta na Figura 4.6. Neste caso, foi programada um ingresso de informação variável por variável manualmente em forma de tabela, com número de filas igual ao número de estratos, selecionados na primeira janela emergente como se apresenta na Figura 4.7.

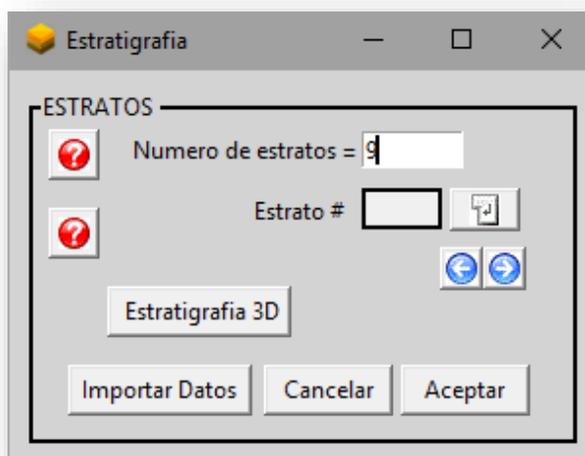


Figura 4.6. Quadro de dialogo atualizado do formulário da Estratigrafia.

Estrato	F.Superior [m]	PV.Efectivo [kN/m3]	Resistencia CU	α	Profundidad NAF [m]	F.l Ultimo Estrato [m]	Cr	Cc	oo	eo	POP
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											

Figura 4.7. Quadro de diálogo atualizado para ingressar as informações correspondentes à Estratigrafia do projeto de análise.

Foi programado também neste formulário a opção de importar toda a informação referente à estratigrafia mediante o botão *Importar Datos*, o qual como mencionado anteriormente, importa a informação de um arquivo tipo Excel previamente preenchido. (Figura 4.8).

Adicionalmente, foi programado um botão que permite visualizar a estratigrafia ingressada em formato 3D, onde pontualmente se identifica a geometria desenhada no formulário anterior e as diferentes camadas de solo que contemplam perfil estratigráfico de solo onde vão ser assentado o grupo de estacas. (Figura 4.9)

Estratigrafia Importada

Datos Importados

Profundidad del NAF = 2 [m]

Numero de estratos = 12

Estrato # 1

Frontera superior = 0.0 [m]

Peso volumétrico efectivo = 14.5 [kN/mj]

Cu = 125 [KPa]

α = 1

Curva de compresibilidad

Cr = 0.06

Cc = 0.6

σ_o = 1 [kPa]

ϵ_o = 1.8

POP = 196

Frontera inf. del ultimo estrato = 29 [m]

Cancelar Almacenar

Figura 4.8. Quadro de diálogo para importar dados do formulário da Estratigrafia.

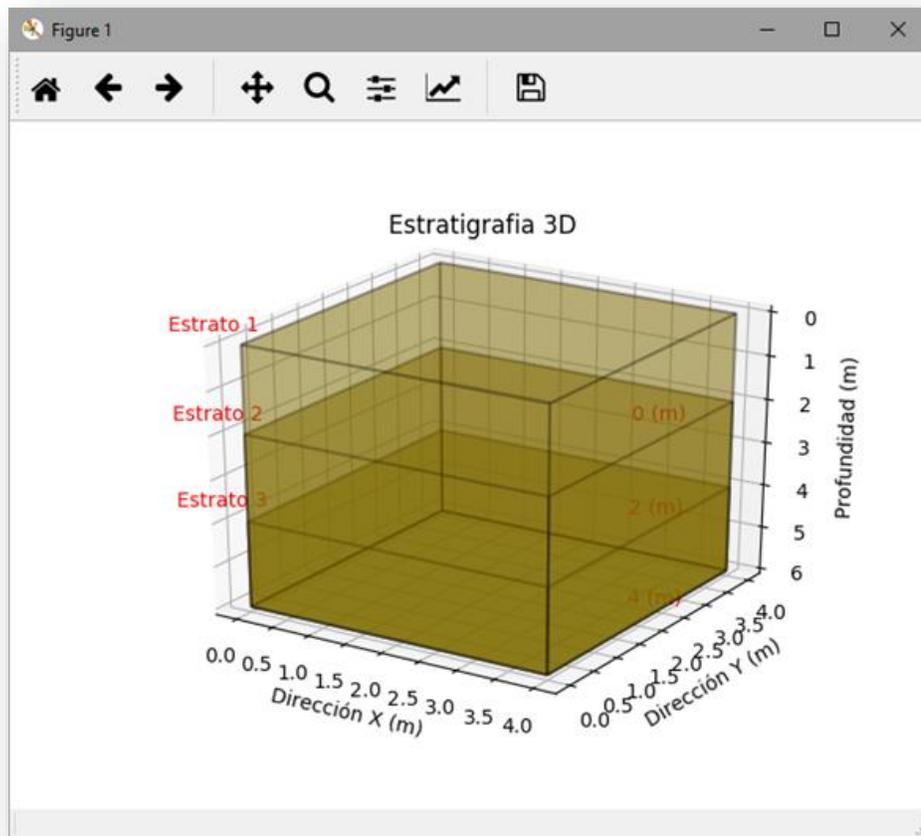


Figura 4.9. Visualização 3D da estratigrafia ingressada.

4.2.3 Módulo da Piezometria

O módulo de *Piezometria* foi programado com a mesma essência que o módulo do programa anterior, mas com algumas modificações na arquitetura do módulo (Figura 4.10), Outra modificação está na maneira de plotar os valores correspondentes aos rebaixamentos iniciais e futuros ingressados no formulário. Igualmente, foi programado o botão para importar os dados, e com esta ação permitir ao usuário plotar com mais rapidez as condições da piezometria adotadas para a análise. (Figura 4.11).

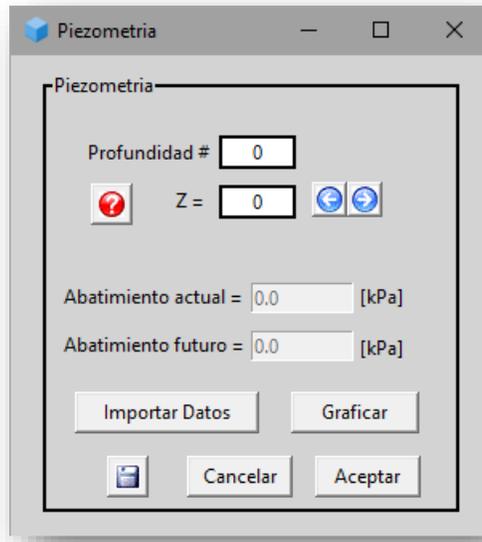


Figura 4.10. Quadro de dialogo atualizado do formulário da Piezometria.

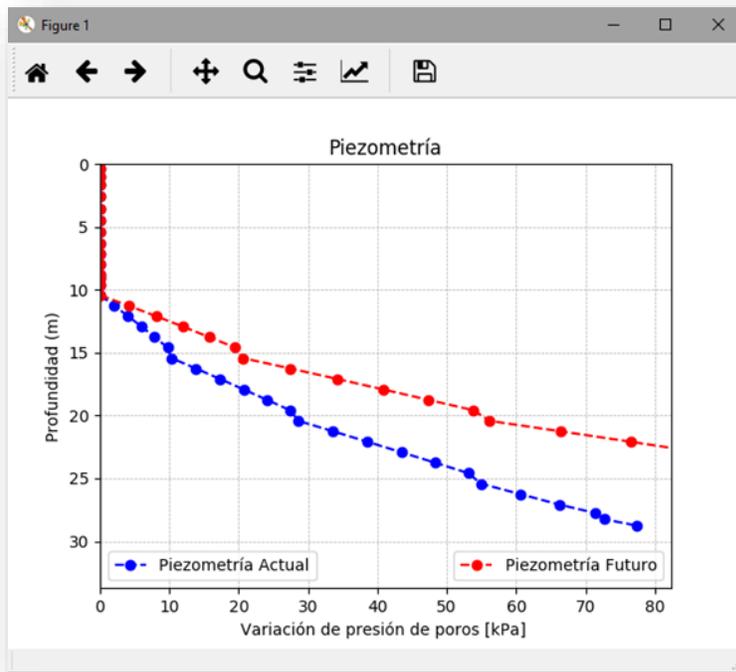


Figura 4.11. Visualização 2D das informações correspondentes aos diferentes rebaixamentos ingressados

4.2.4 Módulo dos Pontos e Cortes

A programação da interface do módulo, correspondente a seleção dos pontos na superfície para os cálculos finais, apresentou poucas mudanças consideráveis respeito ao módulo do programa anterior salvo pela arquitetura do formulário (Figura 4.12) e pela adição de uma visualização 2D do sistema de pontos escolhido, que aparece logo de clicar no botão *Aceptar*.

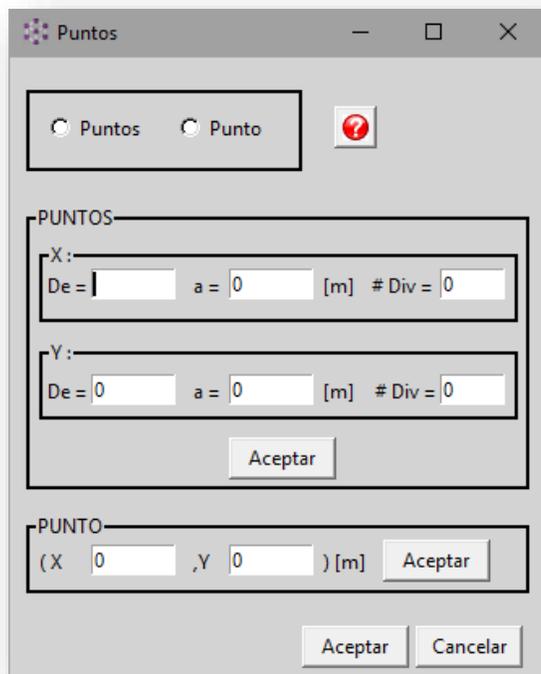


Figura 4.12. Quadro de dialogo atualizado do formulário dos Pontos e Cortes.

Neste formulário, foram programadas duas opções de seleção de pontos da superfície para as posteriores análises: A primeira opção corresponde a uma seleção de vários pontos onde serão ingressados os limites em cada direção (X e Y) com que se gerará uma matriz de pontos dentro ou fora da área de trabalho selecionada (Figura 4.13 e Figura 4.14). A segunda opção permite selecionar só um ponto da superfície onde serão só ingressadas as coordenadas do mesmo ponto dentro ou fora da área de trabalho selecionada. (Figura 4.15 e Figura 4.16).

The screenshot shows a window titled "Puntos" with the following elements:

- Buttons: "Puntos" (selected), "Punto", and a help icon.
- Section "PUNTOS":
 - X: De = 0, a = 4 [m], # Div = 2
 - Y: De = 0, a = 4 [m], # Div = 2
 - Button: "Aceptar"
- Section "PUNTO":
 - (X 0, Y 0) [m]
 - Button: "Aceptar"
- Bottom buttons: "Aceptar", "Cancelar"

Figura 4.13. Definição de matriz de pontos no formulário.

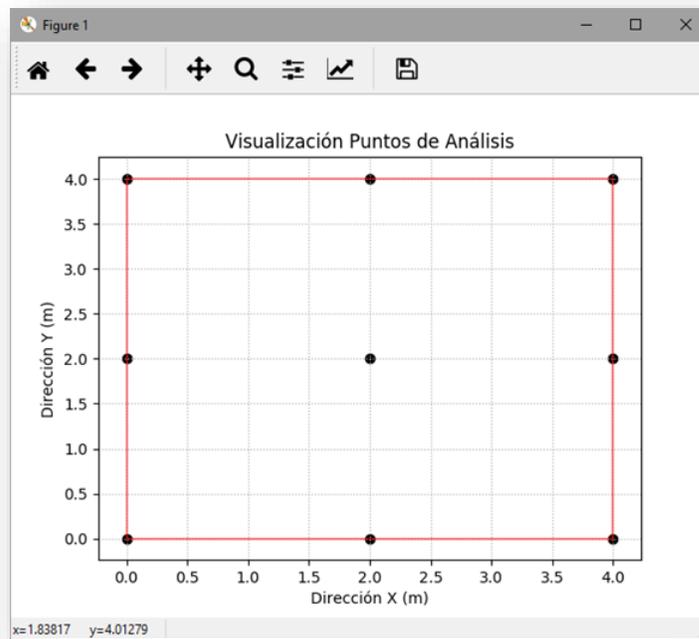


Figura 4.14. Visualização 2D de uma matriz de pontos selecionada

Figura 4.15. Definição de ponto individual no formulário.

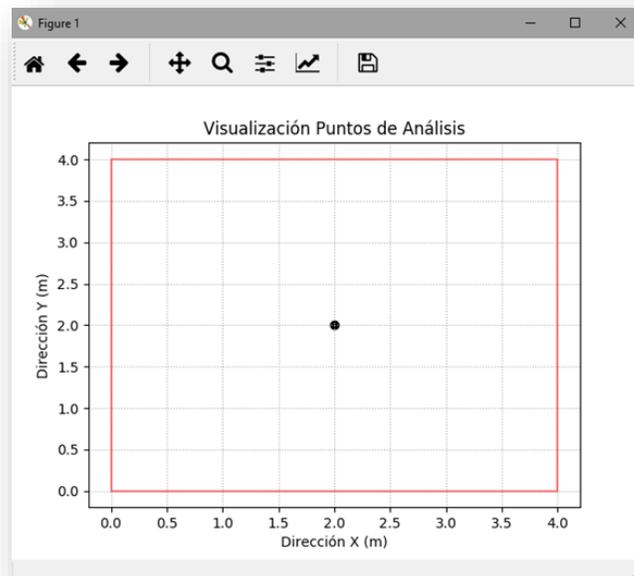


Figura 4.16. Visualização 2D de um ponto individual selecionado.

4.2.5 Módulo do Nível Neutro

No caso do formulário correspondente ao cálculo do *Nível Neutro* e todas suas variáveis dependentes, a programação também foi encaminhada a não gerar mudanças consideráveis, devido que se considera o formulário como módulo de resposta ou de apresentação de resultados, pelo qual continua com a mesma arquitetura (Figura 4.17).

The image shows a software dialog box titled "Nivel Neutro". It contains several input fields for numerical values, each followed by a unit in brackets. The values are as follows:

Parameter	Value	Unit
AREA #	1	
Peso neto transmitido por el grupo de pilotes	-160.00	[kN]
Fricción Negativa en las paredes del cajón	0.00	[kN]
Fuerza por subpresión en el cajón	0.00	[kN]
Fuerza por capacidad por punta del grupo de pilotes	-144.00	[kN]
Fricción positiva máxima en el fuste de los pilotes	16.00	[kN]
Carga para $F_n > 0$	-144.00	[kN]
Carga para $F_n = 0$	228.00	[kN]
Carga minima	-144.00	[kN]
Fuerza a nivel de desplante	0.00	[kN]
Fuerza por fricción positiva	0.00	[kN]
Fuerza por fricción negativa 1	16.00	[kN]
Fuerza por fricción negativa 2	0.00	[kN]
Fricción negativa	0.00	[kN]
Profundidad del nivel neutro	4.00	[m]

Below these fields is a section titled "Cargas equivalentes" containing three sub-inputs:

Parameter	Value	Unit
Carga #	0	
Profundidad =	0	[m]
Carga =	0	[kPa]

At the bottom of the dialog box are two buttons: "Cancelar" and "Aceptar".

Figura 4.17. Quadro de dialogo atualizado do formulário de apresentação de resultados do nível neutro e suas variáveis dependentes.

4.2.6 Módulo das tensões e recalques

Por fim, o módulo referente à apresentação dos resultados das análises sobre os perfis de tensões e recalques verticais finais (*Esfuerzos y Asentamientos*), foi programado com a finalidade de conseguir plotar os resultados por ponto, não se afastando muito da ideia original do programa anterior. Neste formulário, se tem os mesmos quadros de texto que o anterior, nos quais se consegue identificar o número do ponto selecionado e suas respectivas coordenadas. Foi programado também, o botão *Graficar* que permite plotar o perfil de tensões ou recalques se fosse o caso, para finalmente adicionar no formulário um botão programado com a opção de salvar a informação em um arquivo de Excel para posteriores análises.

Nas Figura 4.18 e Figura 4.19 se apresentam os esquemas de geração dos resultados correspondentes à seleção de tensões verticais finais.

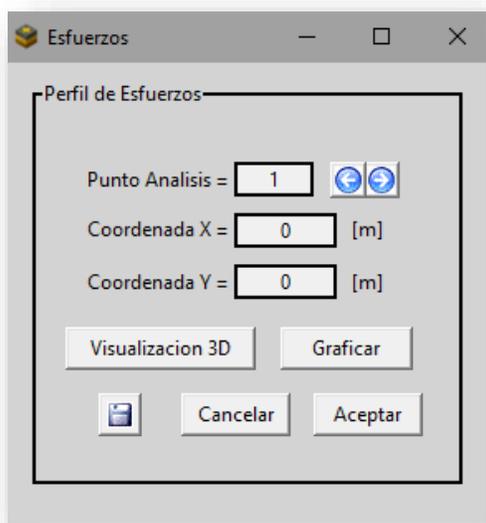


Figura 4.18. Quadro de dialogo atualizado do formulário de apresentação de resultados do perfil de tensões verticais finais.

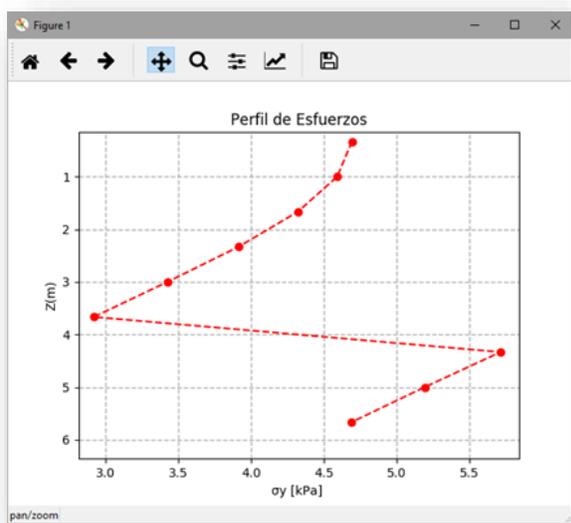


Figura 4.19. Visualização 2D do perfil de tensões verticais finais do analise.

Finalmente, nas Figura 4.20 e Figura 4.21 se apresenta o esquema de geração dos resultados correspondentes aos recalques verticais finais.

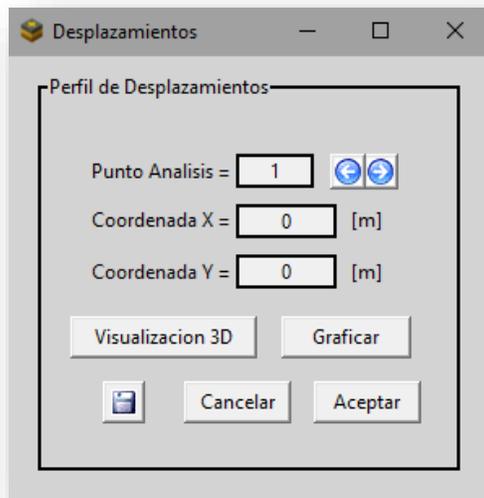


Figura 4.20. Quadro de dialogo atualizado do formulário de apresentação de resultados do perfil de recalques verticais finais.

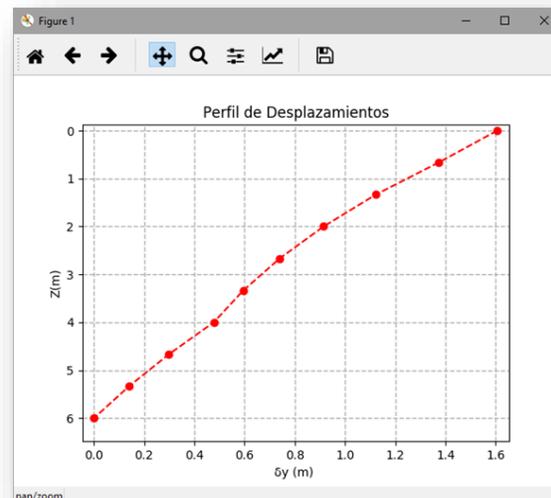


Figura 4.21. Visualização 2D do perfil de tensões verticais finais do análise.

4.2.7 Novas funcionalidades do programa

Dentro do caminho para alcançar o produto final referente ao objetivo de atualização do programa selecionando uma nova linguagem de programação, foram adicionadas novas funcionalidades no programa que permitem ao usuário interagir mais a fundo com o tipo de análises que se está desenvolvendo, estas novas funcionalidades correspondem a um módulo de visualização gráfica completo denominado *Visualización Gráfica*, e a um módulo de geração de gráficos de contorno chamado *Gráficas de Contorno*.

4.2.7.1 Módulo Visualização Gráfica

Este módulo foi programado e adicionado como foi comentado no parágrafo anterior com a finalidade de permitir que o usuário tivesse uma grande opção de identificar graficamente as informações ingressadas nos formulários de definição do problema (*Geometria y Cargas, Estratigrafia, Piezometria, Puntos y Cortes*) diligenciados com anterioridade. No formulário consegue-se identificar duas alternativas de visualização, a primeira 2D e a segunda 3D, nas quais aparecem as seguintes sub-alternativas (Figura 4.22):

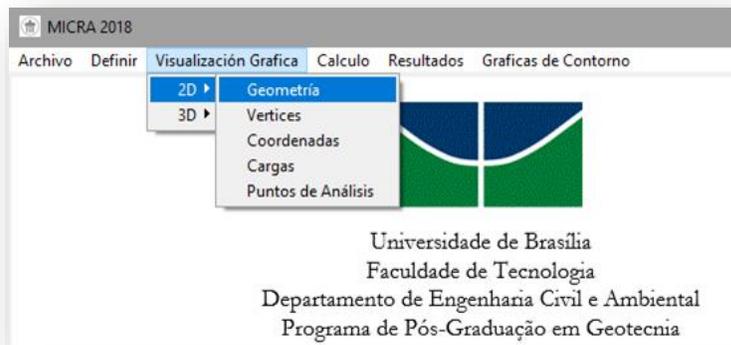


Figura 4.22. Quadro de diálogo desenvolvido para visualização gráfica 2D e 3D das informações correspondentes à definição do tipo de projeto com suas características de desenho.

- *Visualización 2D:*
 - *Geometria.* (Figura 4.23).
 - *Vértices* (Figura 4.24)
 - *Coordenadas* (Figura 4.25)
 - *Cargas* (Figura 4.26)
 - *Puntos de Análisis* (Figura 4.27)

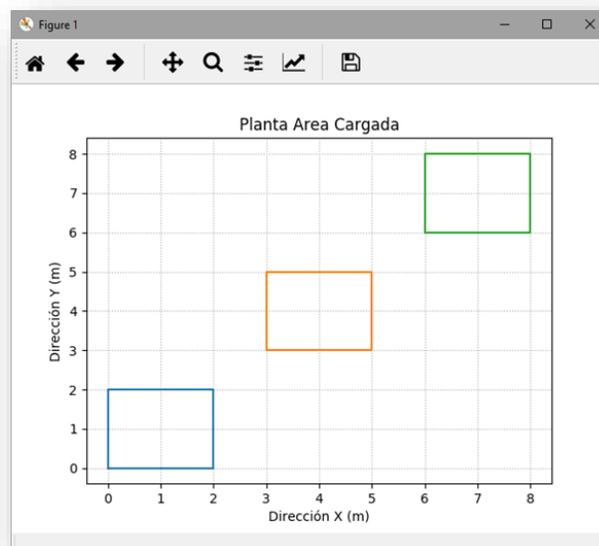


Figura 4.23. Visualização 2D das áreas e tipo de geometria ingressada para o análise do projeto.

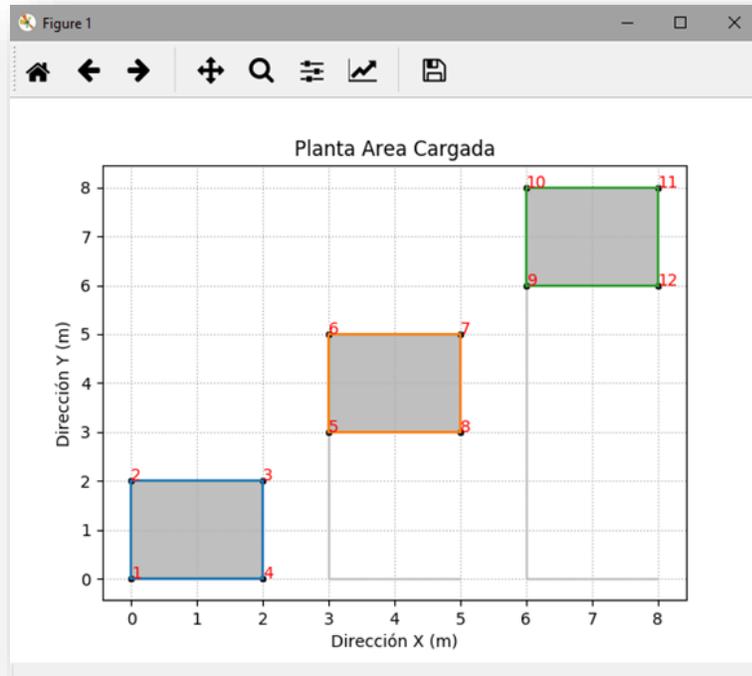


Figura 4.24. Visualização 2D dos vértices das diferentes áreas selecionadas para a análise do projeto.

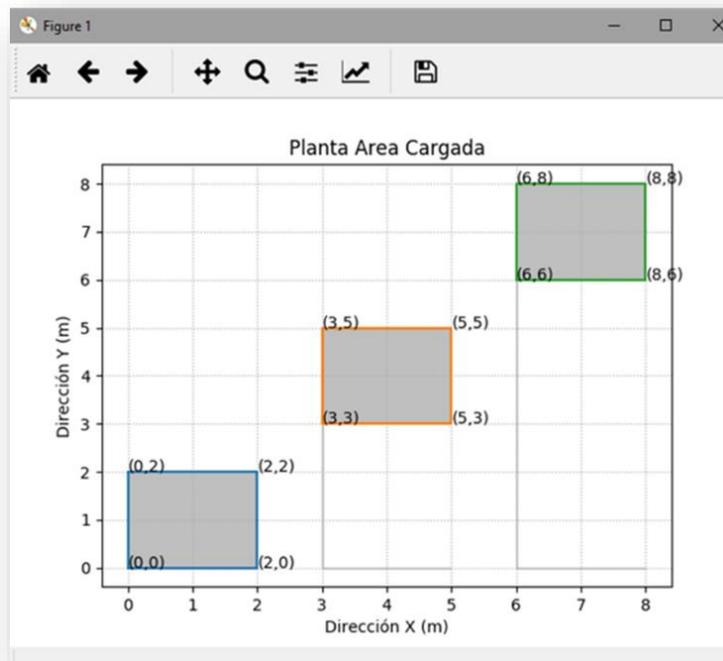


Figura 4.25. Visualização 2D das coordenadas das diferentes áreas selecionadas para a análise do projeto.

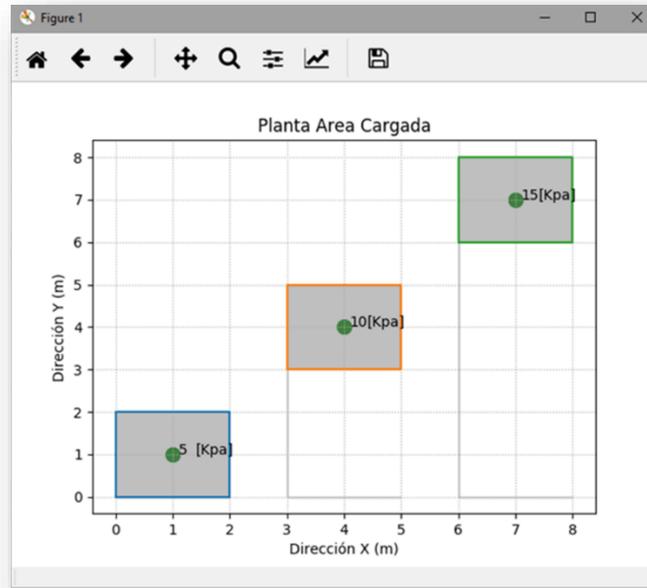


Figura 4.26. Visualização 2D das cargas correspondentes a cada área selecionada para a análise do projeto.

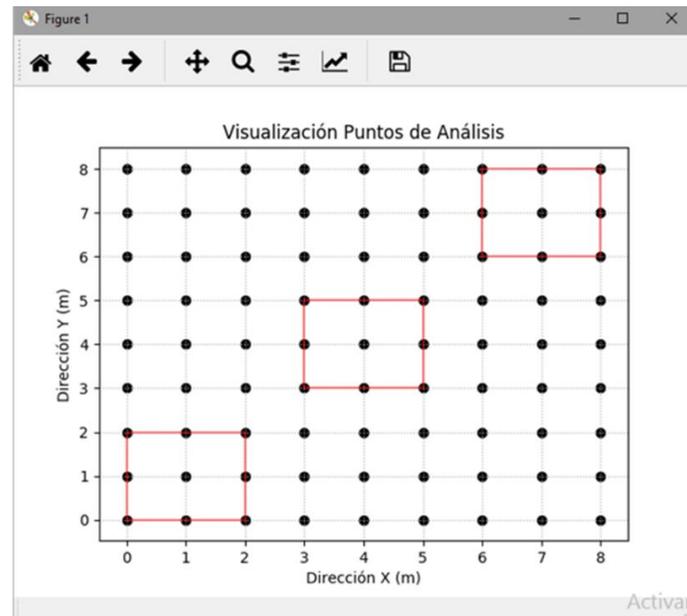


Figura 4.27. Visualização 2D da matriz de pontos selecionada para a análise do projeto.

- *Visualización 3D:*
 - *Geometria* (Figura 4.28)
 - *Cargas* (Figura 4.29)

- *Puntos de Análisis* (Figura 4.30)

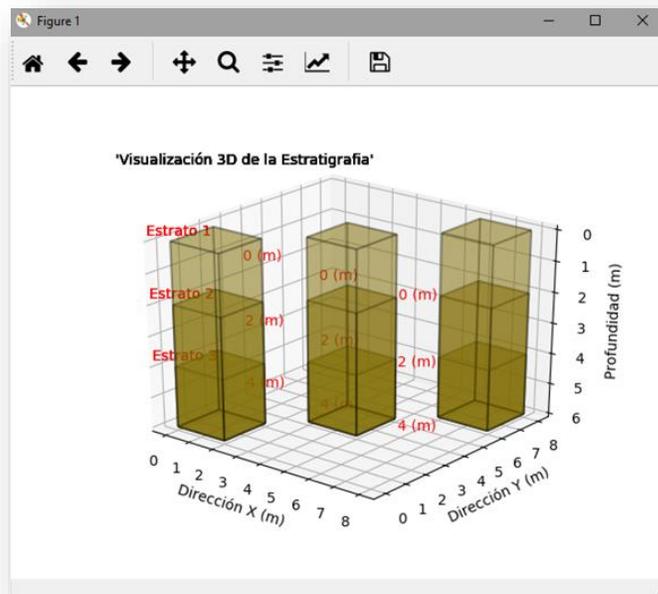


Figura 4.28. Visualización 3D das geometrias, estratigrafias correspondentes as áreas selecionadas para análise do projeto.

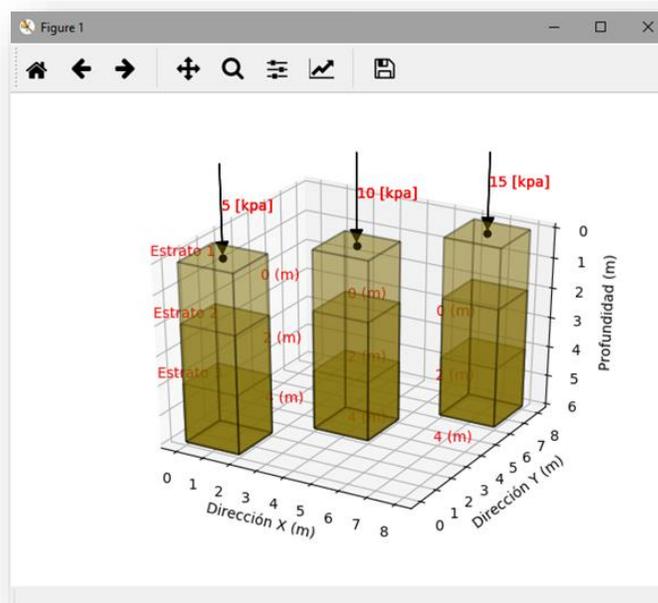


Figura 4.29. Visualización 3D das geometrias, estratigrafias, e cargas correspondentes as áreas selecionadas para análise do projeto.

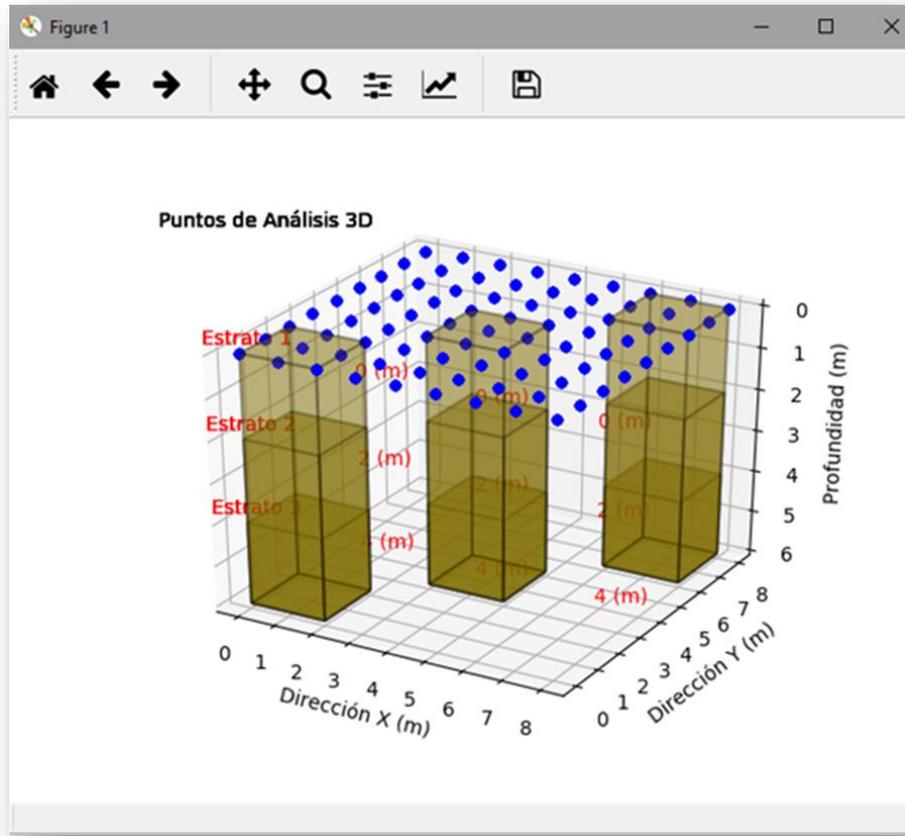


Figura 4.30. Visualização 3D das geometrias, estratigrafias e matriz de pontos correspondentes as áreas selecionadas para análise do projeto.

4.2.7.2 Módulo Gráficas de Contorno

O seguinte módulo programado consistiu em adicionar ao programa uma nova forma de apresentar ao usuário os resultados obtidos da análise com respeito aos valores de tensões e recalques finais correspondentes a cada ponto selecionado, por meio de um gráfico de contorno ou gráfico de curvas de nível, (Figura 4.31).



Figura 4.31. Quadro de diálogo desenvolvido para o desenvolvimento das gráficas de contorno dos resultados de tensões e recalques verticais finais.

Este gráfico permite visualizar em 2D os valores de tensões ou recalques do sistema de fundação a qualquer profundidade dentro dos limites superior (superfície profundidade =0) e inferior (fronteira inferior da última camada de solo) da estratigrafia ingressada.

Para gerar o contorno dos valores foi necessário programar dentro do código uma interpolação que permitisse calcular valores intermediários de pontos não selecionados e que apresentara resultados consistentes.

4.2.7.2.1 Curva de contorno para tensões verticais

Para o desenvolvimento deste gráfico foi programado um formulário que permite selecionar uma direção (X ou Y), dois valores correspondentes aos limites de um segmento de reta (inicial e final), e finalmente um valor de posição dentro dos limites da matriz de pontos da superfície selecionada com anterioridade no módulo de *Puntos y Cortes* como se apresenta na Figura 4.32 e na Figura 4.33. Com estas três variáveis selecionadas, o programa cria um perfil transversal, o qual pode ser visualizado clicando o botão *Gráficar*, esta visualização 2D proporciona uma vista previa da posição e do comprimento do perfil escolhido.

O resultado final consiste em um gráfico de contorno correspondente ao resultado da interpolação de todos os valores de tensões verticais finais resultantes dos pontos da matriz analisados no projeto e que coincidem com o perfil transversal selecionado.

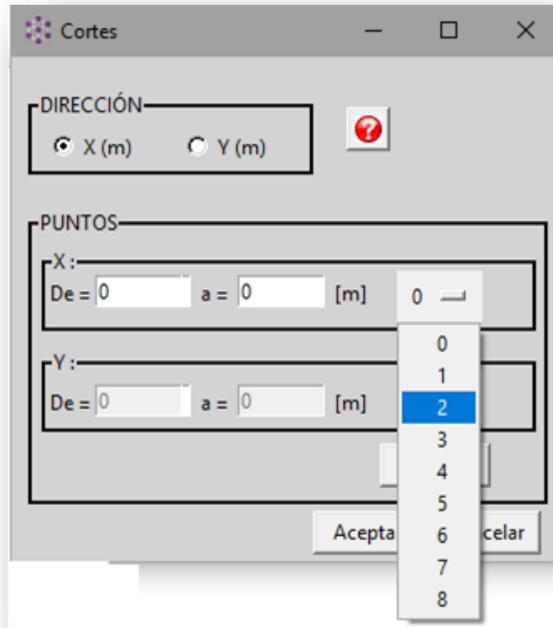


Figura 4.32. Quadro de diálogo para o desenvolvimento da gráfica de contorno correspondente às tensões verticais finais

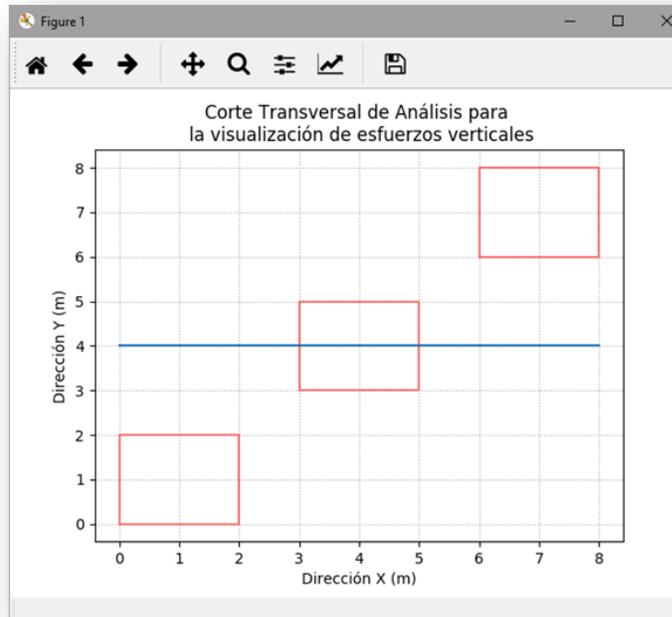


Figura 4.33 Visualização 2D em planta do segmento de reta ou corte selecionado para gerar a gráfica de contorno

A vantagem principal desta nova funcionalidade versa sobre a importância de analisar espacialmente os dados mediante gráficos que permitam avaliar o comportamento tridimensional da relação que existe entre três variáveis (uma variável dependente, duas variáveis contínuas), sendo projetadas em um gráfico de duas dimensões.

Foi desenvolvido então, um módulo que trabalhara com uma variável dependente principal como são os resultados das tensões e recalques verticais finais, e duas variáveis contínuas como a posição (X, Y) e a elevação ou profundidade (Z), (Figura 4.34).

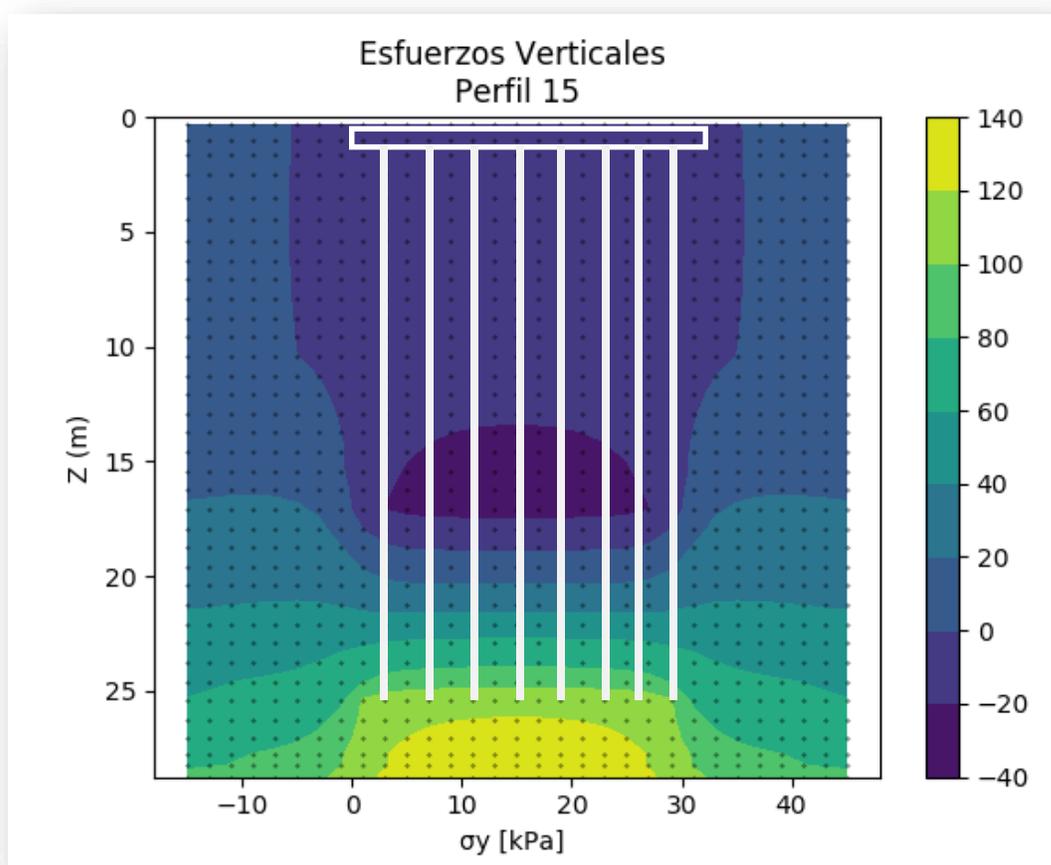


Figura 4.34. Gráfico de contorno de uma análise feita com o modelo analítico Micra 2018 para tensões verticais finais.

Nesta nova versão do modelo analítico (Micra2018), é possível fazer a comparação direta dentro do programa sem necessidade de utilizar outros softwares para o desenvolvimento de gráficas de contorno.

4.2.7.2.2 Curva de contorno para recalques verticais finais

Da mesma forma como se trabalhou no desenvolvimento do gráfico de tensões verticais finais, foi desenvolvido o gráfico correspondente a recalques finais, com a diferença de que o programa neste caso gera um perfil longitudinal, o qual pode ser visualizado também clicando o botão *Gráficar*, como se consegue observar na Figura 4.35 e Figura 4.36 .

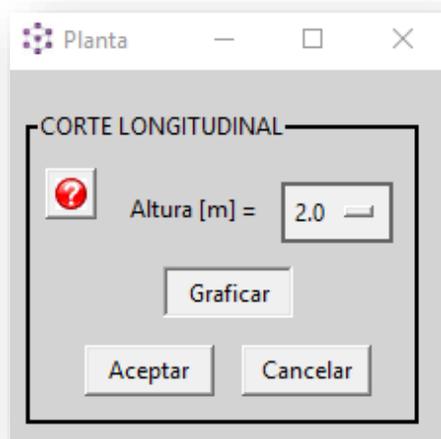


Figura 4.35. Quadro de diálogo para o desenvolvimento da gráfica de contorno correspondente aos recalques verticais finais.

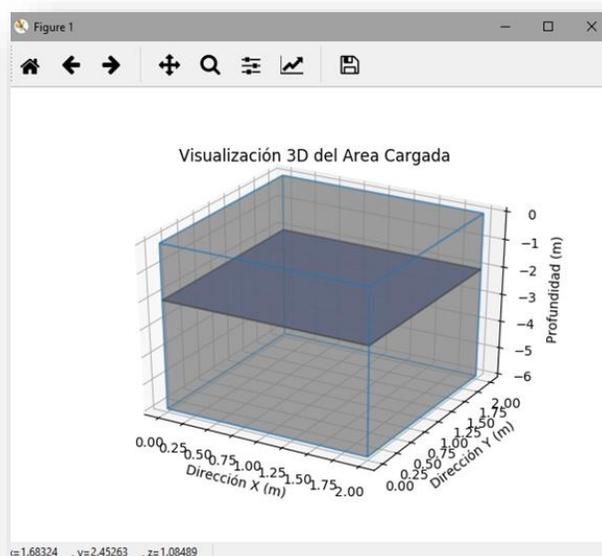


Figura 4.36. Visualização 3D em do perfil longitudinal selecionado para gerar a gráfica de contorno

O gráfico final que se apresenta na Figura 4.37 corresponde a um gráfico de contorno que permite visualizar em planta os recalques finais no sistema de fundação através de uma escala de cores a qual estabelece uma cor para diferentes intervalos de valor de recalque. O gráfico também permite comparar resultados da mesma análise feita mediante uma implementação de ferramentas numéricas como (*Plaxis 3D*), e apresenta resultados similares aos conseguidos com um software especializado em gerar gráfica gráfica de contorno como (*Surfer Golden Software*).

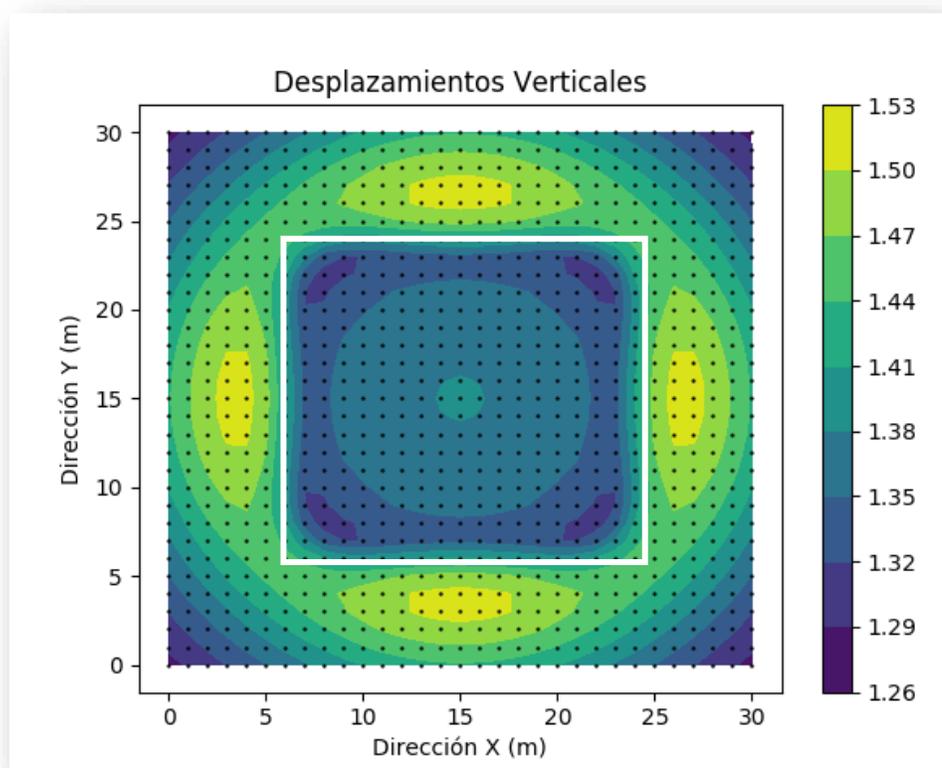


Figura 4.37. Gráfica de contorno de um análises feito com o modelo analítico Micra 2018 para recalques verticais finais.

Finalmente na Figura 4.38, se apresenta o novo fluxograma da nova versão do modelo analítico Micra 2018.

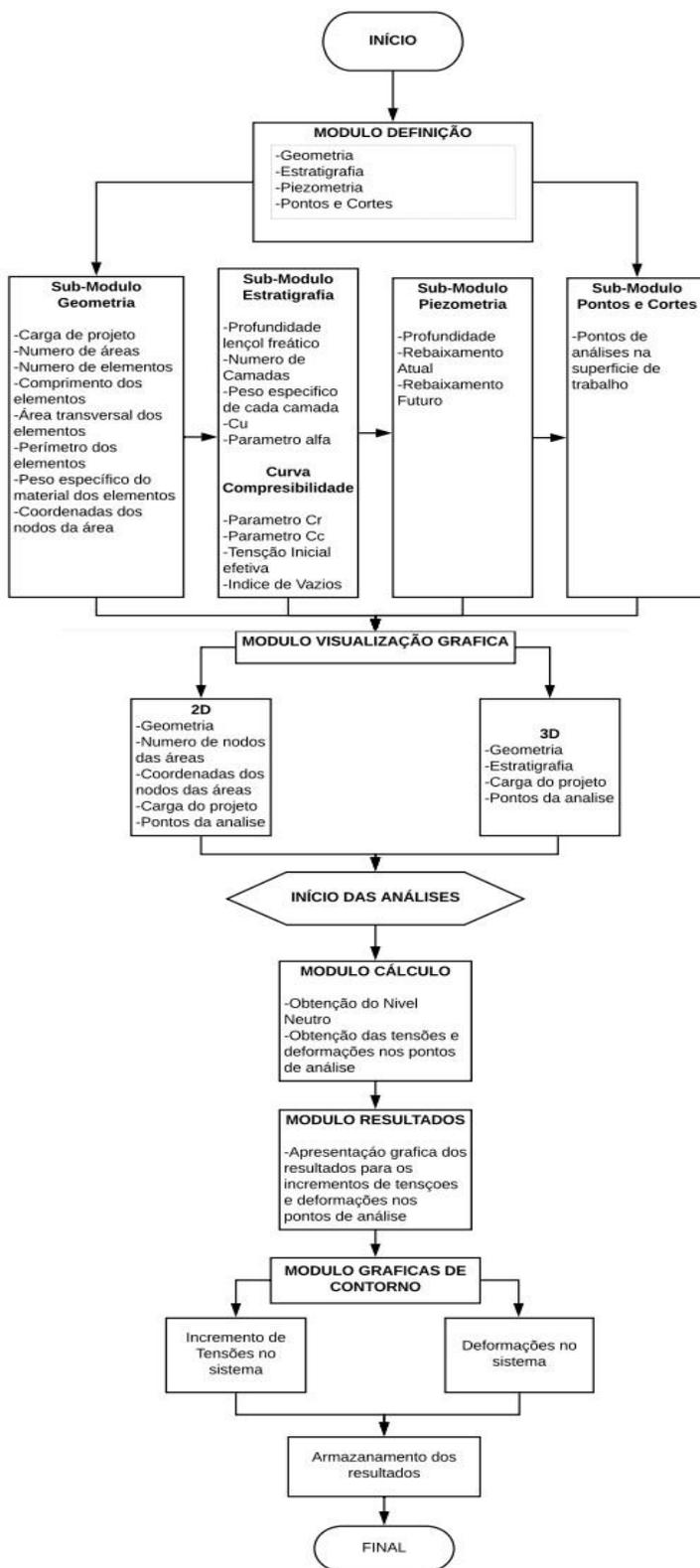


Figura 4.38. Diagrama de fluxo do modelo analítico Micra 2018.

4.3 VALIDAÇÃO

A validação da nova versão do modelo analítico foi encaminhada mediante o desenvolvimento de algumas das análises que foram implementadas no trabalho de Rodriguez (2010), no qual se estudaram diferentes sistemas de fundação (comumente utilizadas na zona lacustre da Cidade de México), tanto no modelo analítico como no modelo numérico. Isto tem a finalidade de comparar os resultados apresentados pelos modelos concluir qual modelo consegue representar melhor o comportamento da fundação com o processo de adensamento induzido pela subsidência regional.

A modelagem numérica implementada por Rodriguez (2010), foi desenvolvida mediante o programa de elementos finitos *Plaxis 3D* com a implementação do modelo constitutivo SCLAY-1.

A ideia de analisar algumas das mesmas configurações de sistemas de fundação utilizadas por Rodriguez (2010) se deve especificamente a demonstrar que a nova versão do modelo analítico reproduz os mesmos resultados que a versão anterior.

4.3.1 Considerações Gerais

4.3.1.1 Estratigrafia

Com a finalidade de conseguir modelar as condições típicas das áreas em desenvolvimento da zona lacustre da Cidade de México (nosso foco de estudo), foi utilizada informação dos estudos da mecânica de solos provenientes do oriente da cidade, perto do ex-lago Texcoco, onde a área é caracterizada como zona em desenvolvimento para novas construções habitacionais de interesse social de grandes dimensões; além disso, a área apresenta os processos de rebaixamento do lençol freático (subsidência regional) devido ao bombeamento da água para consumo exterior, pelo qual o local de estudo fornece diferentes condições que permitem desenvolver uma ótima análise.

A informação pontual da estratigrafia implementada foi fornecida pela base de dados do Sistema de informação Geográfica de Engenharia da UNAM (SIG,2008), na qual se encontram estudos desenvolvidos na área considerada com sondagens de cone elétrico, SPT,

amostragem com sistema Shelby, caracterização em laboratório e testes mecânicos como triaxiais e adensamento unidimensional.

O perfil estratigráfico implementado se encontra conformado por oito camadas, com as seguintes propriedades:

Costra Seca: Espessura de 2 m, medidos desde a superfície, formada por argilas de consistência muito rígida, com um conteúdo de água médio de $w = 55\%$, e uma carga de pre-adensamento alta devida aos ciclos que se apresentam com o umedecimento e secagem.

Costra: Espessura de 3 m, medidos desde o final da *Costra Seca* até os 5 m de profundidade, conformada também por uma argila pre-adensada, mas, embaixo do lençol freático. Sua consistência varia entre média e alta, e apresenta um conteúdo de água médio de $w = 170\%$.

FAS: Espessura de 24 m, medidos desde o final da *Costra* até os 29 m de profundidade, consiste em uma formação argilosa com presença de argilas altamente compressíveis de consistências moles. Foi dividida em três camadas em função do seu conteúdo de água e nível de pre-adensamento; assim:

- **FAS#1:** Apresenta um teor de água médio de $w = 340\%$ e uma relação de sobre-adensamento *OCR* (Tensão de pre-adensamento/Tensão vertical efetiva) de 1.6, comprimento de 5 m medidos desde o início da formação argilosa até a profundidade de 10 m.
- **FAS#2:** Apresenta um teor de água médio de $w = 350\%$ e um *OCR* de 1.1; espessura de 5m medidos desde o final da formação argilosa # 1 até a profundidade de 15m.
- **FAS#3:** Apresenta um teor de água médio de $w = 270\%$, e um *OCR* de 1.1; espessura de 14m medidos desde o final da formação argilosa # 2 até uma profundidade de 29 m.

Capa Dura: Comprimento de 2m medidos desde o final da FAS até a profundidade de 31 m, conformada por areias argilosas de compactidade variável entre densa e muito densa, com um conteúdo de água de $w = 30\%$.

FAI: Denominada a formação argilosa inferior, conformada por argilas altamente compressíveis de consistência mole, intercaladas com algumas mini-camadas de argilas arenosas e teor de água médio de $w = 140\%$; espessura de 8m medidos desde o final da CAPA Dura até uma profundidade de 40 m.

Depósitos Profundos: Constituídos por areias e cascalho de compacidade muito densa, com um conteúdo de água médio de $w = 40\%$; comprimento de 5m medidos desde o final da FAI até a profundidade de 45m.

Na Figura 4.39 se apresenta a estratigrafia descrita anteriormente, com os perfis correspondentes a o conteúdo de água (w), resistência por ponta do cone elétrico (q_c), sondagem SPT (N) e a resistência não drenada (S_u) obtida por meio de ensaios de compressão triaxial tipo UU. (não adensado, não drenado).

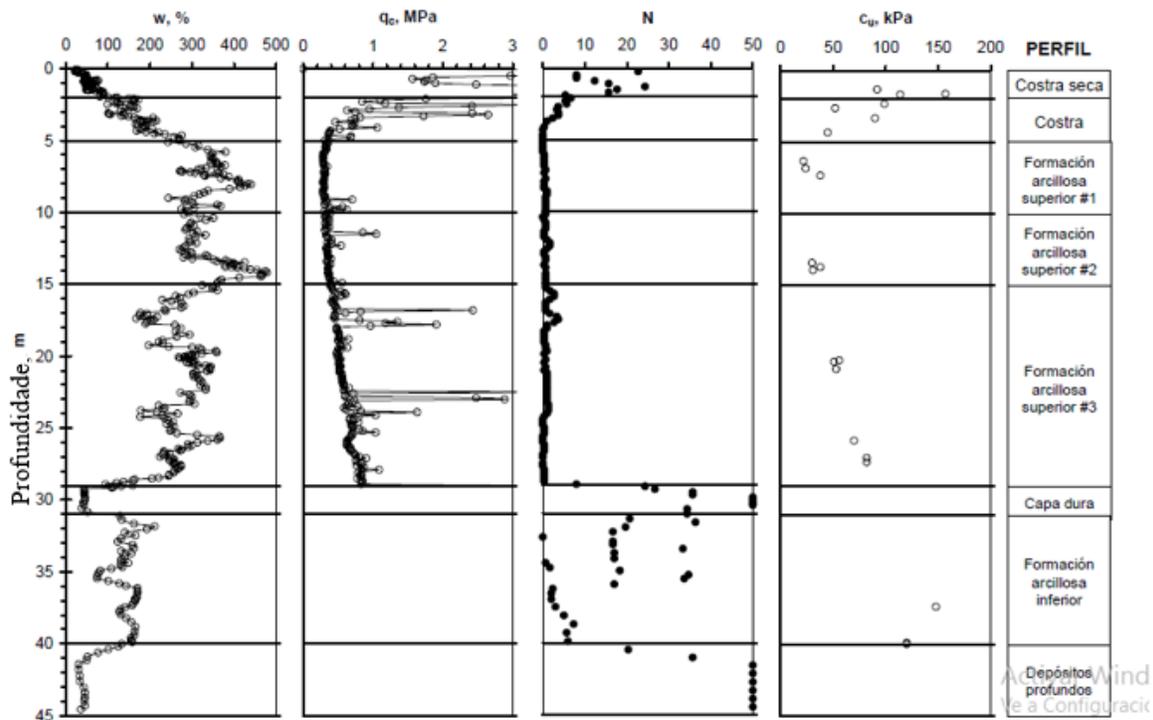


Figura 4.39. Perfil estratigráfico típico da zona do lago da Cidade do México. Modificado de (Rodríguez, 2010), utilizado para a calibração da atualização do modelo analítico.

4.3.1.2 Propriedades do solo das camadas.

As camadas de solo selecionadas para a validação do modelo analítico se apresentam na Tabela 4.1. Os valores do índice de vazios inicial, do coeficiente de compressão e recompressão, e a tensão de sob-adensamento POP, foram obtidos dos ensaios de adensamento unidimensional. S_u representa o valor médio da resistência ao cisalhamento não drenada obtido dos ensaios triaxiais tipo UU, como foi mencionado anteriormente.

Tabela 4.1. Propriedades consideradas para calibração do modelo analítico.

<i>Estrato</i>	<i>Comprimento (m)</i>	<i>Fronteira (m)</i>	γ' (<i>kN/m³</i>)	S_u (<i>kPa</i>)	e_o	C_c	C_r	<i>POP (kPa)</i>
<i>Costra Seca</i>	2	0-2	14.5	125	1.8	0.6	0.06	196
<i>Costra</i>	5	2-5	2.0	60	5.4	4.5	0.29	130
<i>FAS1</i>	5	5-10	1.4	28	8.7	7.7	0.47	25
<i>FAS2</i>	5	10-15	1.1	33	10	7.6	0.53	5
<i>FAS3</i>	14	15-29	1.5	70	7.2	6.3	0.33	10

4.3.1.3 Condições piezométricas

A profundidade do lençol freático (NA), e o perfil das poro-pressões inicial foram obtidas mediante medições realizadas em tubos de observação, piezômetros abertos de vários estudos do mesmo pacote de mecânica de solos oferecido por SIG (2008), instalados a diferentes profundidades da formação argilosa (FAS) e na *Capa Dura*.

O valor inicial da poro-pressão é considerado como um rebaixamento moderado representativo da zona de estudo e para as análises que vão considerar a influência da subsidência regional foram utilizadas as hipóteses de rebaixamento futuro apresentadas na Figura 4.40 e Figura 4.41 , onde:

- Hipóteses # 1: Corresponde a um rebaixamento moderado representativo da zona de estudo.
- Hipóteses # 2: Corresponde a um rebaixamento extremo o qual pode-se considerar possível da zona de estudo.

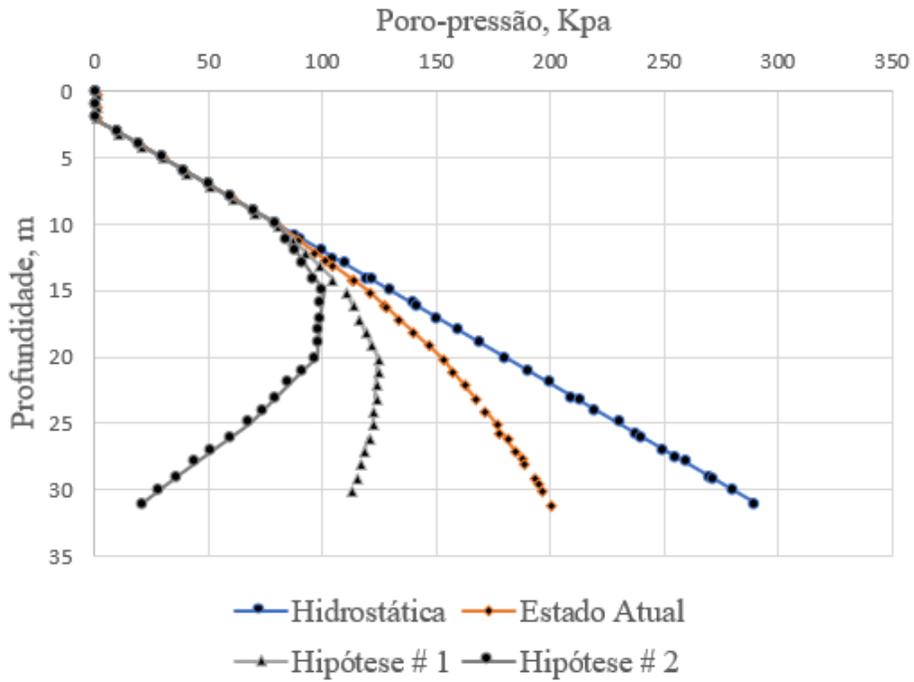


Figura 4.40. Condições dos diferentes rebaixamentos apresentados na zona lacustre da Cidade de México, utilizadas para a calibração do modelo analítico.

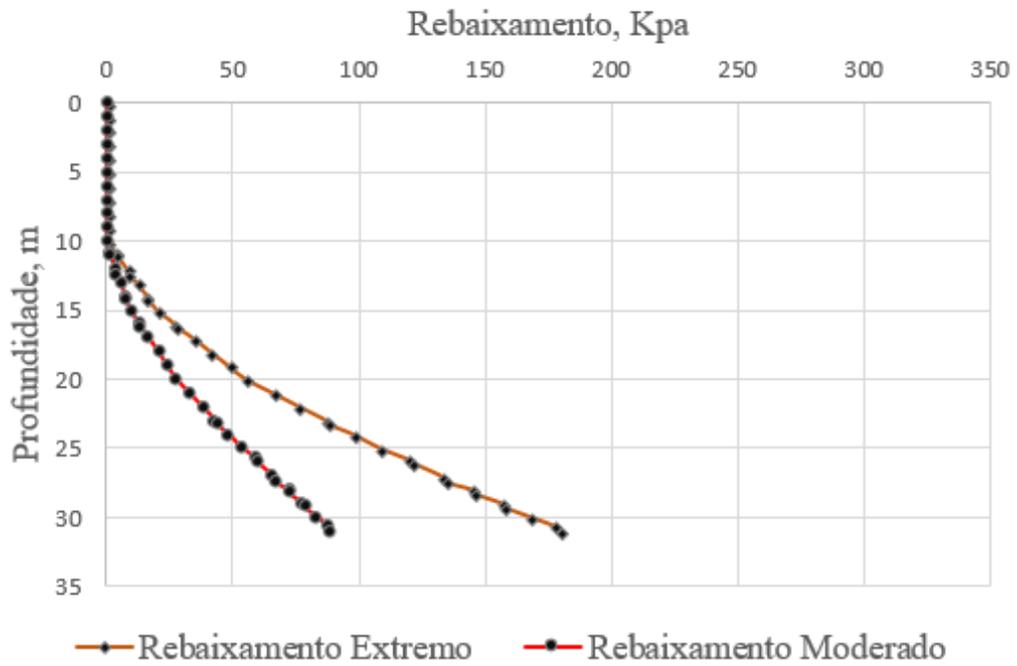


Figura 4.41 Condições dos diferentes rebaixamentos apresentados na zona lacustre da Cidade de México, utilizadas para a calibração da atualização do modelo analítico

4.3.1.4 Geometria e propriedades das estacas

Na Tabela 4.2 se apresentam as propriedades geométricas das estacas consideradas para a análise.

Tabela 4.2. Propriedades geométricas das estacas para a calibração da atualização do modelo analítico.

<i>Secção</i>	<i>Material</i>	<i>L_{pil} (m)</i>	<i>D (m)</i>	<i>A_t (m²)</i>	<i>P_e (m)</i>	<i>γ (kN/m³)</i>
Quadrada	Concreto	25	0.4	0.1963	1.5708	24

onde,

L_{pil} = Comprimento da estaca.

D = Diâmetro da estaca.

A_t = Área transversal da estaca.

P_e = Perímetro da estaca.

γ = Densidade do concreto.

Adicionalmente as análises feitas no modelo analítico foram efetuadas em três etapas, do mesmo modo que o modelamento numérico de Rodriguez (2010):

- Etapa.1: Se implementou uma tensão de 75 Kpa aplicada diretamente sobre o radier da fundação, a magnitude da tensão é considerada como um valor de carga representativo de um prédio entre cinco e dez andares.
- Etapa.2: Se aplicou a primeira hipótese de rebaixamento (hipótese #1, rebaixamento moderado) das pressões intersticiais, representando condições típicas a futuro da zona de estudo.
- Etapa.3: Se considerou a segunda hipótese de rebaixamento (hipótese #2, rebaixamento extremo), o qual representa uma condição extrema, mas possível.

Na Tabela 4.3 são apresentadas as configurações de sistemas de fundação implementados para validar a nova versão do modelo analítico.

Tabela 4.3. Configurações de sistemas de fundação selecionados para a validação do modelo analítico.

<i>ID</i>	<i>Sistema de fundação</i>	<i>Configuração</i>	<i>Dimensões (m)</i>	<i>Carga (kPa)</i>	<i>Etapas de análises</i>
1	Grupo de estacas suposto infinito	Radier quadrado	200 x 200	75	E1,E2,E3

2	Grupo de estacas	Radier quadrado	20 x 20	75	E1,E2,E3
---	------------------	-----------------	---------	----	----------

4.3.2 Grupo de estacas suposto infinito

A primeira configuração de sistema de fundação selecionada consiste em um grupo de estacas suposto infinito repartidas em uma fundação quadrada com dimensões arbitrárias de 200 m x 200 m, no qual as deformações e as tensões foram obtidas no centro do radier. Neste caso, foram comparados os resultados da variação do nível neutro com variações também no espaçamento entre as estacas (Figura 4.42).

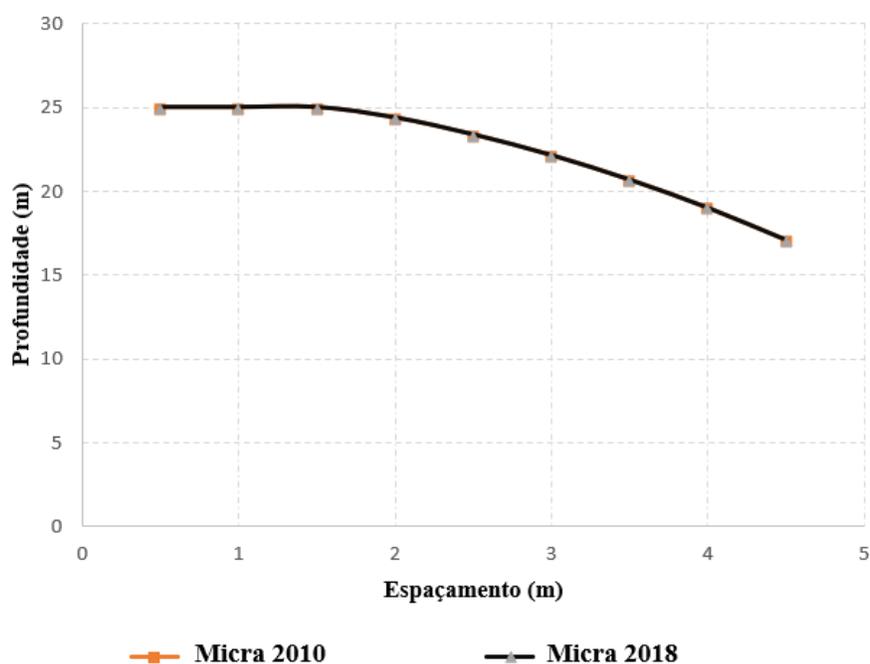


Figura 4.42. Variação da profundidade do nível neutro (Z_0) com os espaçamentos entre estacas, para ambos modelos analíticos.

Do anterior gráfico se consegue identificar que o comportamento para ambos modelos analíticos é razoavelmente similar, evidenciando que a nova versão consegue de igual forma reproduzir os resultados da anterior versão.

Adicionalmente, se compararam os resultados dos perfis de incremento de tensões para as três etapas de análises mencionadas anteriormente (E1,E2, e E3), com dois tipos de

espaçamentos entre as estacas ($S = 1.4 \text{ m}$ e $S = 4 \text{ m}$), como se apresenta na Figura 4.43 e

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

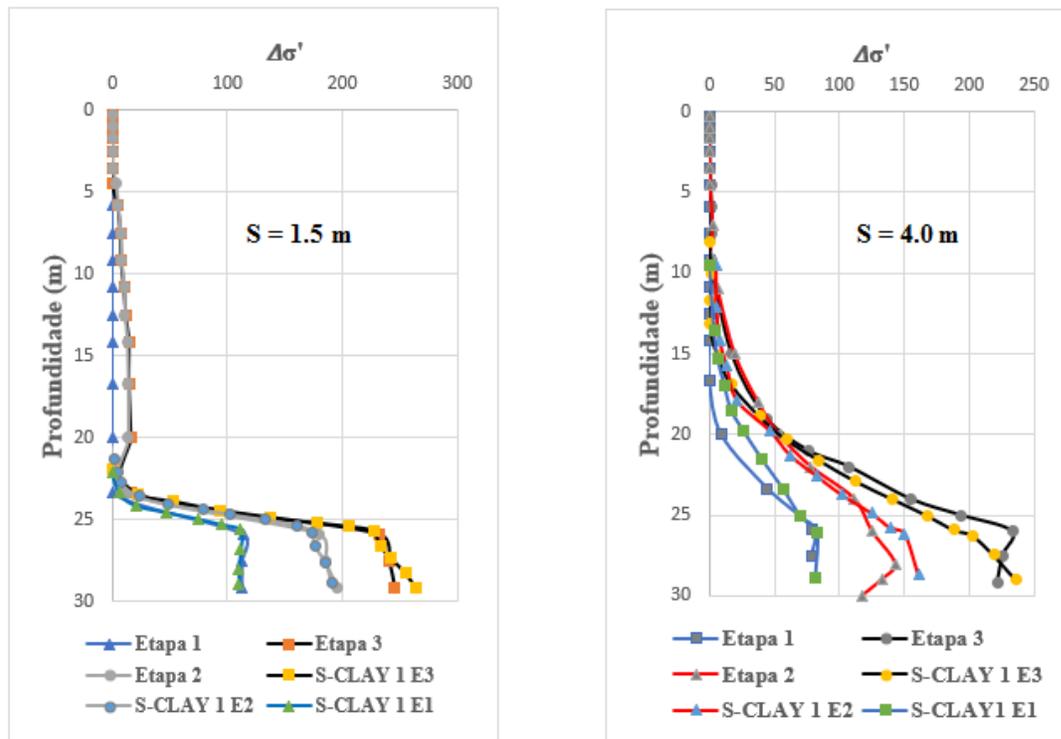


Figura 4.43. Acréscimo das tensões verticais efetivas com os espaçamentos $S=1.5$ e $S= 4\text{m}$ obtidas com o modelo Micra 2018.

De acordo com anteriores gráficos, é possível concluir que os resultados apresentados pela nova versão do modelo analítico (Micra 2018-Python), representam também para este caso o comportamento obtido do modelo analítico anterior (Micra 2011- Visual Basic).

4.3.3 Grupo de estacas

Para a segunda configuração selecionada foi escolhido também um sistema de fundação baseado em estacas com radier quadrado de dimensões $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, e um número total de estacas de 100 repartidas uniformemente sobre a área do radier, que representa um sistema de fundação típico utilizado na zona lacustre da Cidade de México para construções habitacionais de entre 5 e 10 andares.

Para este caso, foram analisadas as mesmas três etapas mencionadas anteriormente e foram comparados os resultados correspondentes aos recalques e incremento de tensões obtidas da

modelagem numérica e analítica feita por Rodriguez (2010), com os resultados obtidos pela nova versão do modelo analítico; e finalmente foi utilizado o software *Surfer Golden* (programa especializado em curvas de nível ou gráficos de contorno), com o propósito de gerar os gráficos de contorno que permitiram validar os gráficos geradas pela nova versão do modelo analítico.

4.3.3.1 Etapa 1

Nas Figura 4.44 e Figura 4.45 se apresentam os recalques verticais obtidos de um corte horizontal superficial ($Z = 0$ m), para a primeira etapa analisada na nova versão do modelo analítico comparando os resultados com o modelo numérico de Rodriguez (2010).

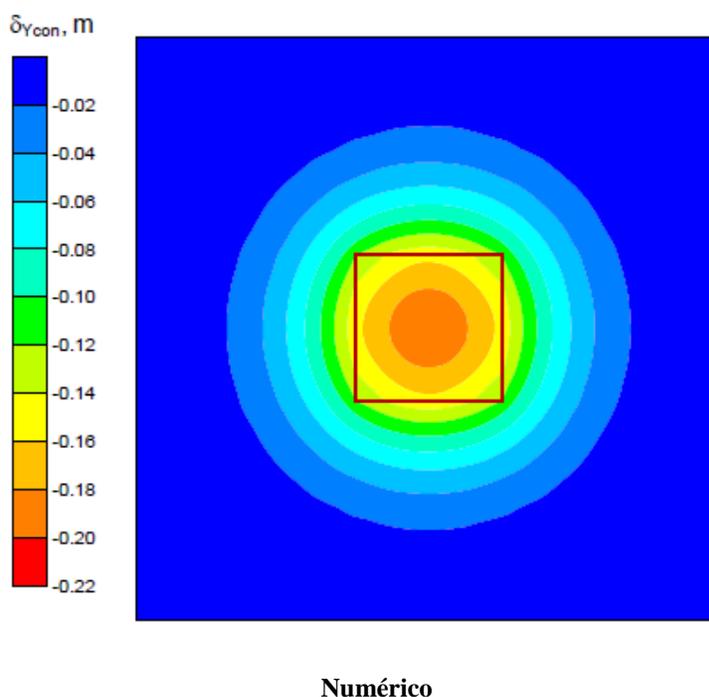
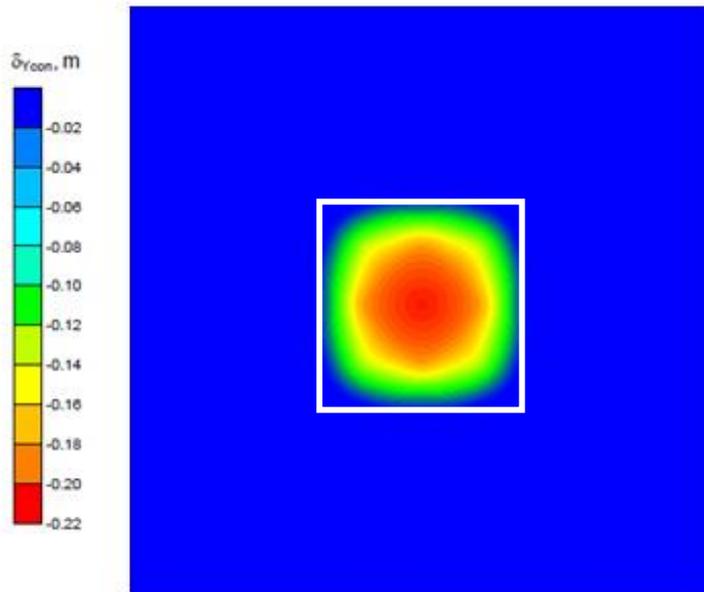


Figura 4.44. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo numérico de Rodriguez (2010), e do *Surfer Golden* com os dados do modelo analítico Micra2018.



Analítico

Figura 4.45. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo analítico Micra 2018 plotado com o *Surfer Golden*.

Da representação anterior se pode deduzir que o comportamento dos modelos é consideravelmente similar; mas, claramente existem algumas diferenças na distribuição dos recalques ao longo da área estudada. No modelo analítico os recalques se concentram no centro da superfície carregada, entretanto para o modelo numérico representa uma influência maior na área que não contém estacas.

Da Figura 4.45 se consegue identificar que o tipo de gráfico gerado pelo software *Surfer Golden* para recalques verticais consegue representar muito bem os resultados.

Como foi comentado anteriormente também foram comparados os resultados dos incrementos da tensão efetiva vertical obtidos de cada modelo. Na Figura 4.46 se apresentam os resultados obtidos do modelo numérico e na Figura 4.47 se apresentam os resultados obtidos do modelo analítico.

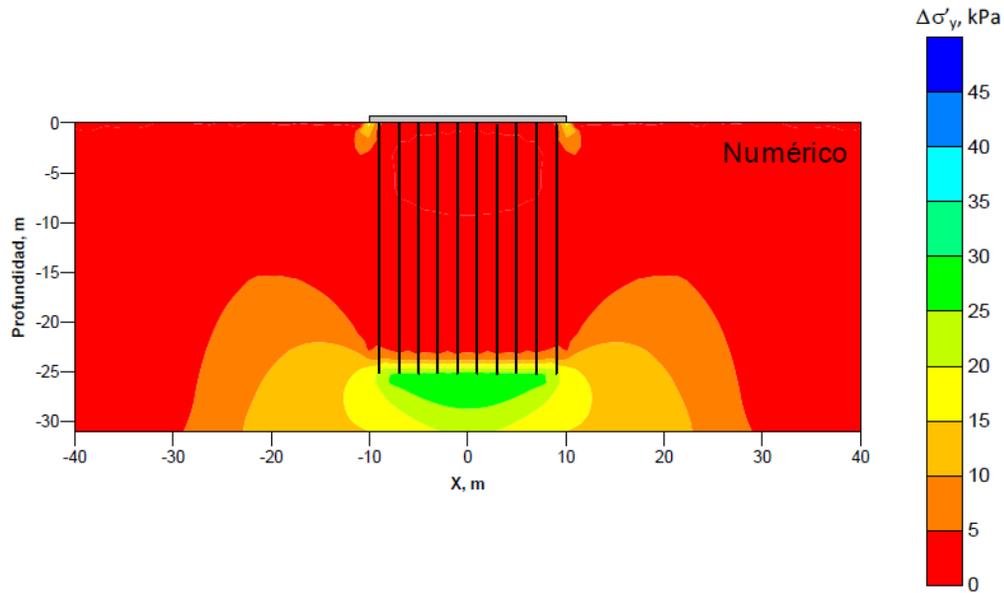


Figura 4.46. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 1, para o modelo numérico Rodriguez (2010).

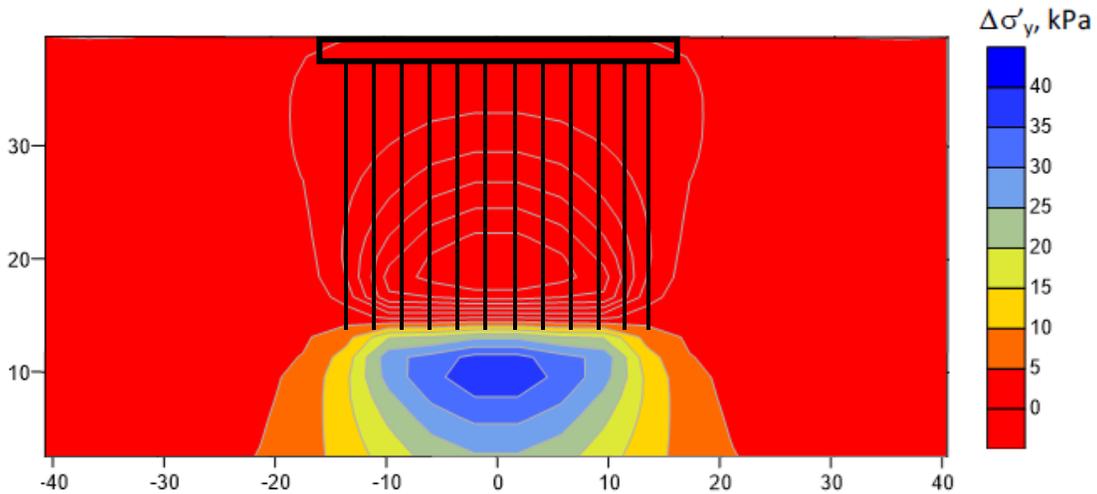


Figura 4.47. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 1, para o *Surfer Golden*, com dados do modelo analítico Micra 2018.

De acordo aos anteriores gráficos se consegue deduzir que o comportamento do incremento das tensões efetivas está bem representado pelo modelo analítico comparado com o modelo numérico.

Adicionalmente, se identificou que o modelo analítico em suas duas versões, não consegue reproduzir deformações por fora da área carregada na mesma medida que o modelo numérico, e certamente isto se deve a que o incremento de tensões efetivas obtidas pelo

modelo numérico apresentam uma concentração de tensões na borda do radier da fundação devido à rigidez do elemento. No modelo analítico a diferença do numérico, como a rigidez não foi levada em conta na programação, a carga é transmitida diretamente do radier às estacas sem considerar o efeito da rigidez dos elementos estruturais.

4.3.3.2 Etapa 2

Para esta etapa da mesma forma que na anterior, se calcularam as deformações e tensões na nova versão do modelo analítico para posteriormente serem comparadas com os resultados do modelo numérico, levando em conta que esta segunda etapa a análise incluiu nos parâmetros da piezometria, a condição de um rebaixamento moderado subministrado pela hipótese # 2.

O resultado final dos recalques no sistema de fundação é obtido por meio do recalque gerado na profundidade onde é desenvolvido o nível neutro, devido ao recalque que aporta o processo do rebaixamento moderado. A seguinte equação permite entender o procedimento de cálculo do recalque final do grupo de estacas quando estas interagem com as hipóteses de rebaixamento.

$$\delta_{final} = \delta_{Regional} - \delta_{Total} \quad (5.1.1)$$

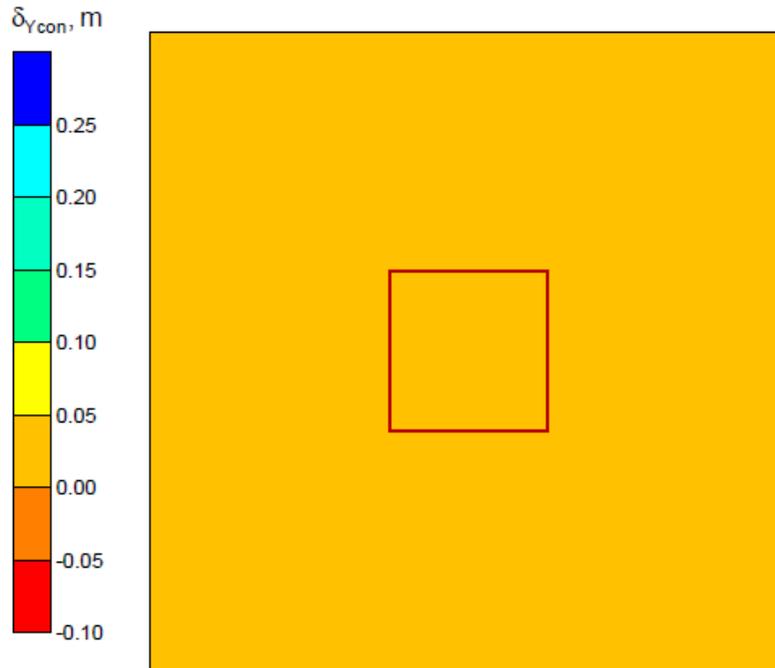
onde;

δ_{final} = Deslocamento final (m).

$\delta_{Regional}$ = Deslocamento regional (m) (Subsidência regional).

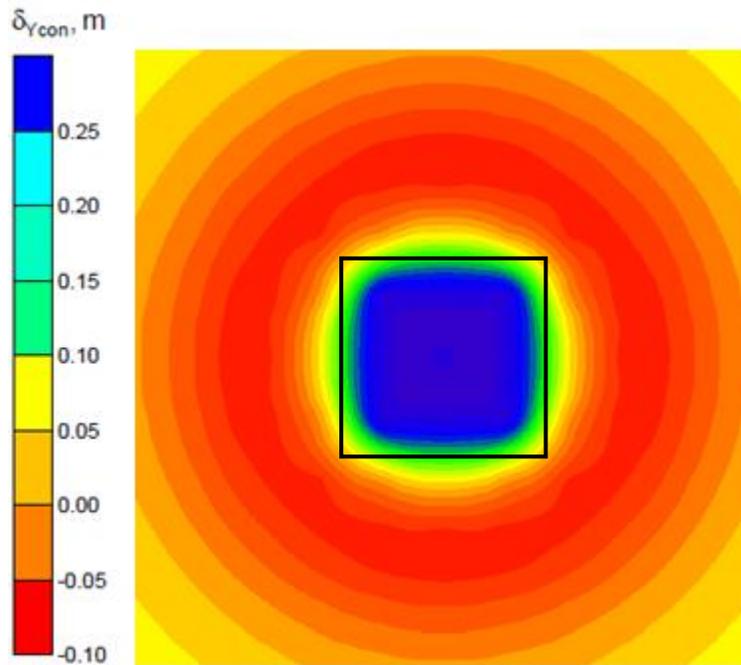
δ_{Total} = Deslocamento efetivo total no centro do radier.

Nas Figura 4.48 e Figura 4.49 se apresentam os resultados dos recalques da etapa para ambos modelos.



Numérico

Figura 4.48. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo numérico de Rodriguez (2010).



Analítico

Figura 4.49. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo analítico Micra 2018 plotado com o *Surfer Golden*.

Para a segunda etapa os resultados das deformações obtidos dos modelos apresentam diferenças consideráveis, onde o modelo numérico não apresenta as emersões que o modelo analítico manifesta.

Na Figura 4.50 se apresentam os resultados do incremento de tensões obtidos do modelo numérico, seguido da Figura 4.51 onde se apresentam os resultados obtidos do modelo analítico.

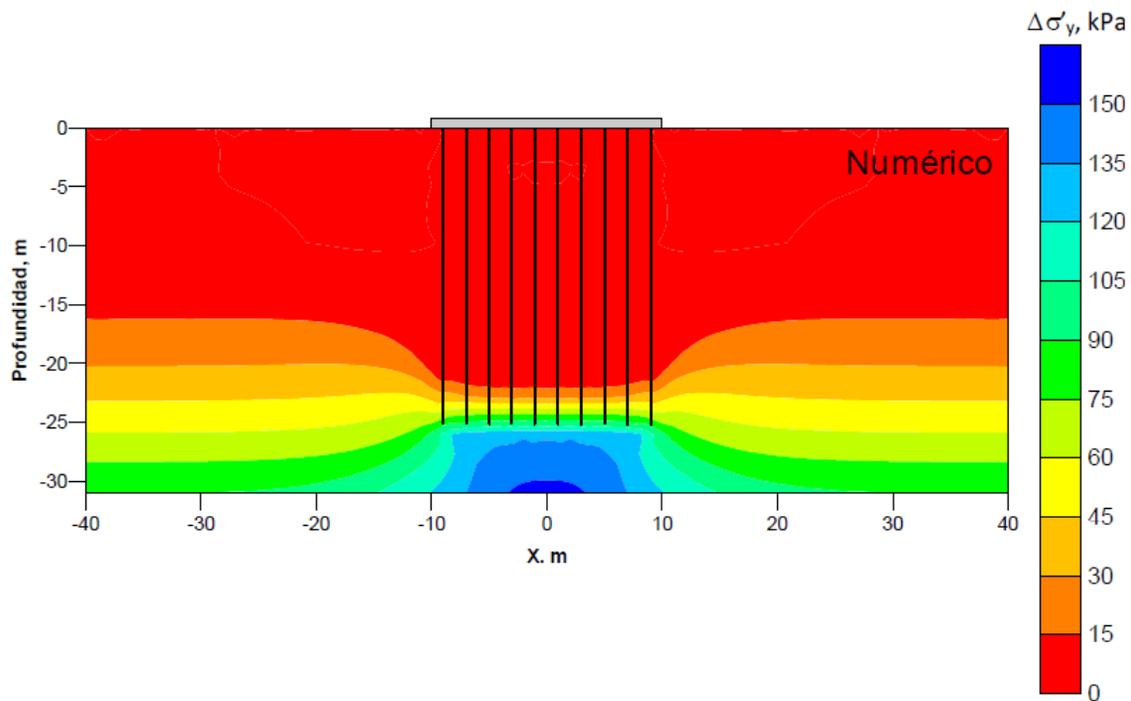


Figura 4.50. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, para o modelo numérico Rodriguez (2010),

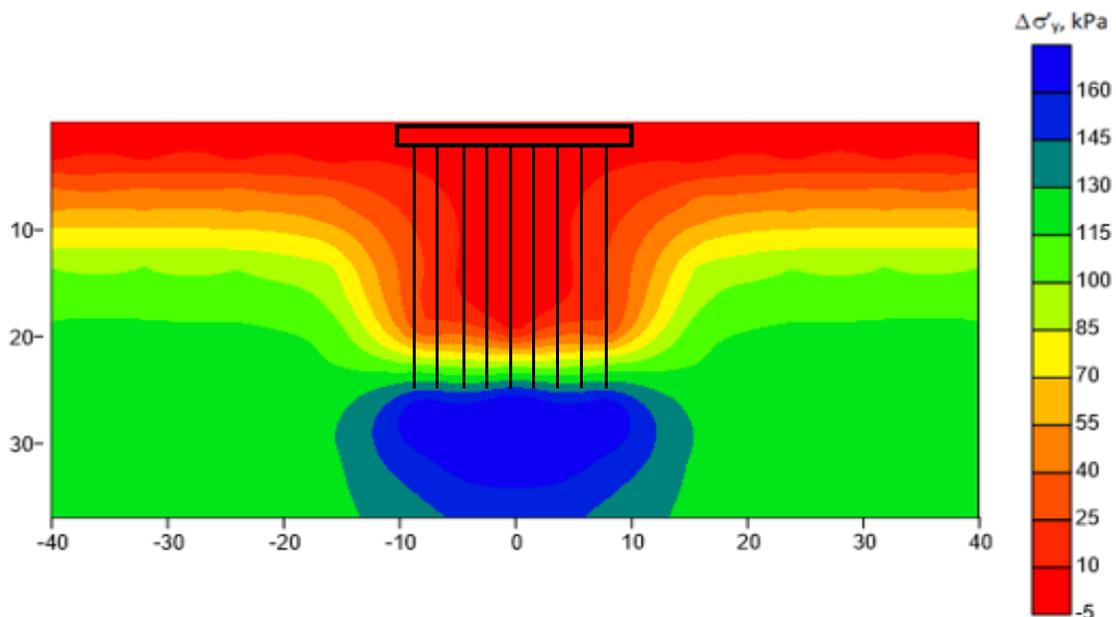
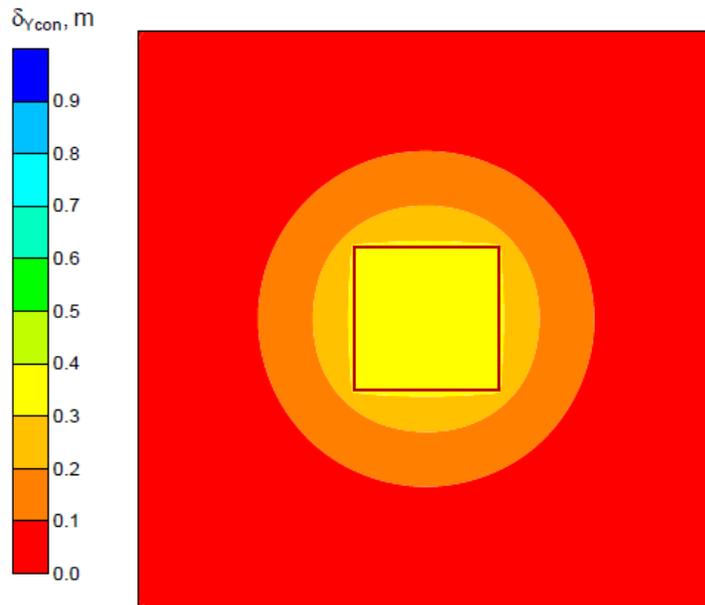


Figura 4.51. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, para o *Surfer Golden*, com dados do modelo analítico Micra 2018.

Dos gráficos anteriores se consegue observar que o incremento de tensões efetivas gerado por fora da área de influência das estacas, é consideravelmente maior no modelo analítico que no modelo numérico. Isto se dá devido que a subsidência regional interage com as estacas do sistema de fundação de forma considerável permitindo que o solo entre as estacas tente puxar as mesmas para baixo com maior intensidade. Com esta ação o atrito negativo e positivo nas estacas aumenta permitindo que no meio do sistema se concentre o incremento de tensões.

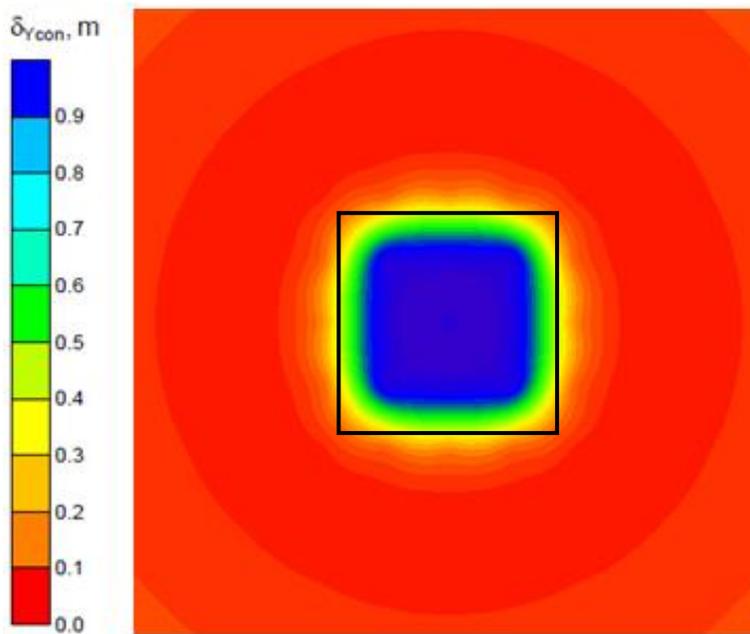
4.3.3.3 Etapa 3

Finalmente, para a terceira etapa onde foi implementada a consideração do rebaixamento extremo, se conseguiu identificar diferenças consideráveis em ambos modelos. Nas Figura 4.52 e Figura 4.53 se apresentam os resultados dos recalques da etapa para ambos modelos, e igualmente o procedimento de cálculo dos recalques finais no sistema de fundação corresponde ao descrito na etapa anterior devido à interação do sistema de fundação com a hipótese do rebaixamento extremo.



Numérico

Figura 4.52. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo numérico de Rodriguez (2010).



Analítico

Figura 4.53. Gráfica de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo analítico Micra 2018 plotado com o *Surfer Golden*.

Nesta terceira etapa consideravelmente a medida que se incrementa o rebaixamento das condições piezométricas no sistema de fundação, são incrementadas as diferenças entre os

resultados de deslocamentos obtidos para o modelo analítico e numérico. O modelo analítico apresenta uma emersão aparente de quase 100 cm, entretanto o modelo numérico só de 30 cm.

Nas Figura 4.54 e Figura 4.55, apresentam-se os resultados do incremento de tensões obtidos para ambos modelos respectivamente.

De forma geral, segundo os gráficos comparadas do modelo analítico atualizado e do modelo numérico para este sistema de fundações com suas dimensões, o modelo analítico consegue reproduzir bem o comportamento do grupo de estacas; porém, se observaram diferenças consideráveis sustentadas em alguns casos pela rigidez não considerada das estacas e do radier, e em outros casos pela interação da subsidência regional com o grupo de estacas.

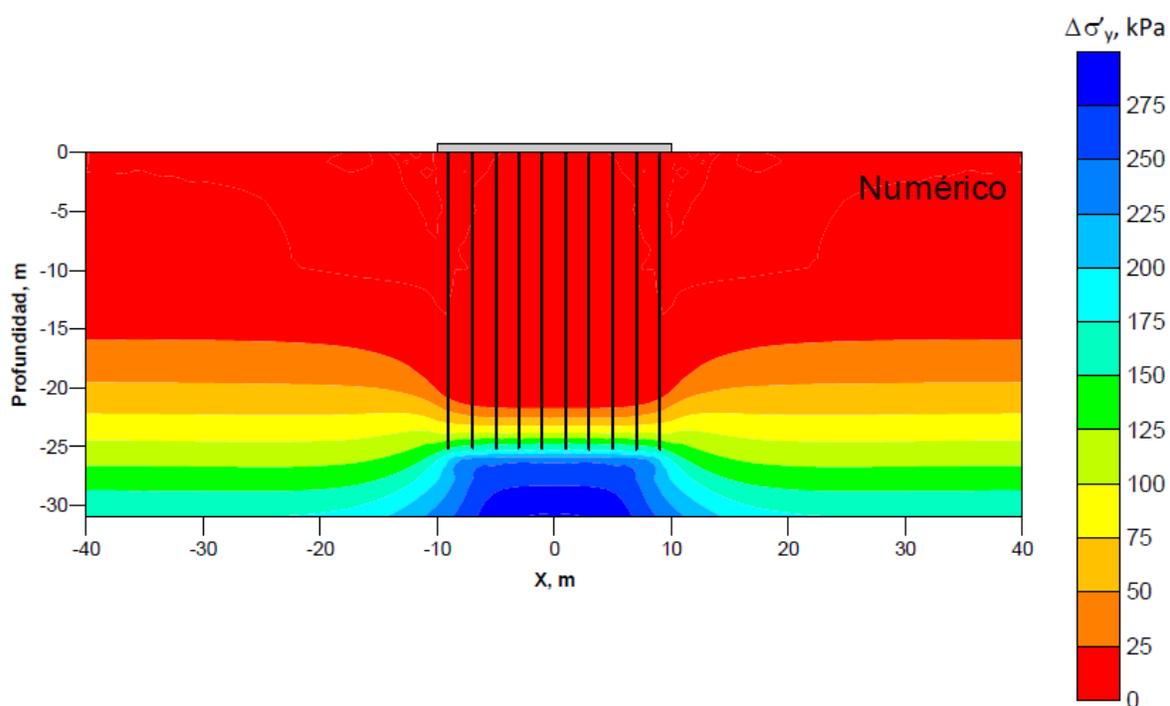


Figura 4.54. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3, para o modelo numérico Rodriguez (2010),

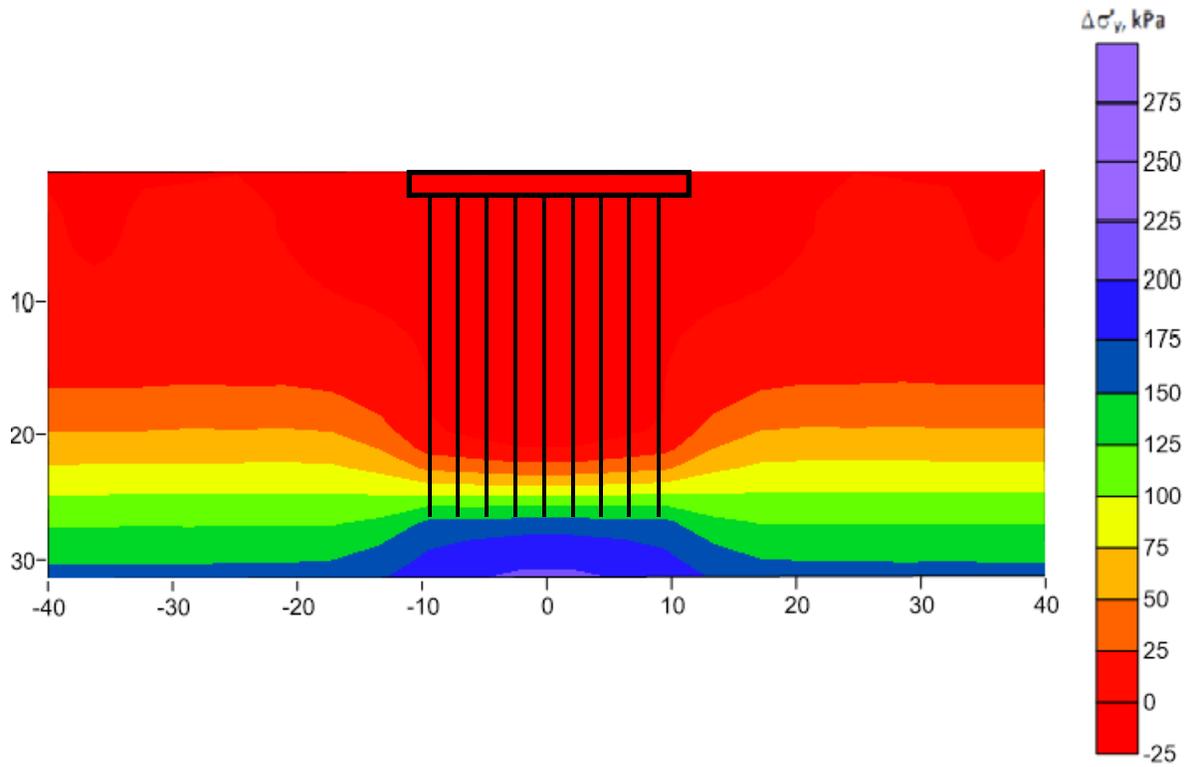


Figura 4.55. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3, para o *Surfer Golden*, com dados do modelo analítico Micra 2018

5 CASO DE ESTUDO

Finalmente neste trabalho, além das análises desenvolvidas para validar a nova versão do modelo analítico, foi estudado um caso particular de sistema de fundação também típico da zona lacustre da Cidade de México, correspondente a um grupo de estacas com radier quadrado com dimensões 30 m x 30 m, para dois tipos de condição, a primeira representando o estado limite de serviço para o controle de recalques e a segunda o estado limite ultimo para o controle de capacidade de carga do grupo de estacas;

Os resultados foram comparados com uma modelagem numérica mediante a implementação do programa *Plaxis 3D*, desenvolvida por Leal (2018), com principal diferença respeito à modelagem numérica utilizada no capítulo anterior (Rodriguez,2010), a implementação do modelo constitutivo Cam Clay Modificado (CCM), com a finalidade de conseguir interpretar possíveis variações nos resultados devidas a uma mudança do modelo constitutivo que representa o comportamento do solo de fundação.

Na Tabela 5.1 é apresentada a configuração do sistema de fundação implementado como estudo de caso avaliado na nova versão do modelo analítico.

Tabela 5.1. Configurações de sistemas de fundação selecionados para a calibração do modelo analítico.

<i>I</i> <i>D</i>	<i>Sistema de fundação</i>	<i>Configuração</i>	<i>Dimensões (m)</i>	<i>Carga (kPa)</i>	<i>Etapas de análises</i>
1	Grupo de estacas	Radier quadrado	30x30	60	E1,E2,E3
2	Grupo de estacas	Radier quadrado	30x30	110	E1,E2,E3

5.1 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

Na Tabela 5.2 e

Tabela 5.3 são apresentados os resumos das considerações adotadas para o modelo numérico e analítico respectivamente.

Tabela 5.2. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo numérico (Plaxis 3D).

Considerações para o modelo numérico		
$B = L$	$B = L$	Radier quadrado.
B	30m	Largura do radier.
D_f	0	Radier superficial.
B_p	0.4m	Diâmetro equivalente circular = 0,4m.
L_p	25m	Comprimento das estacas.
$N.A$	2m	Lençol freático inicial a 2m de profundidade.
N_p	36	Número de estacas, espaçamento (5 m)
$Carga$	60 kpa	Carga sobre o radier.

Tabela 5.3. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo analítico (Micra 2018).

Considerações para o modelo Analítico		
$B = L$	$B = L$	Radier quadrado.
B	30m	Largura do radier.
D_f	0	Radier superficial.
B_p	0.4m	Diâmetro equivalente circular = 0,4m.
L_p	25m	Comprimento das estacas.
$N.A$	2m	Lençol freático inicial a 2m de profundidade.
S	0.5m-5m	espaçamento entre estacas (0.5 m até 5m)
$Carga$	60 kpa	Carga sobre o radier.
A_p	0,1963m ²	Área transversal da estaca.
P_p	1,5708m	Perímetro da estaca.
$Pevol$	24 kN/m ³	Densidade do concreto (Material da estaca)

5.1.1 Etapa 1

Na Tabela 5.4 se consegue observar os resultados obtidos do modelo analítico para os recalques medidos no centro do radier ($x = 15$, $y = 15$) para cada tipo de espaçamento entre as estacas; Na Tabela 5.5 se apresenta o resultado do recalque no centro do radier para o modelo numérico.

Tabela 5.4. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 1.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>	<i>Nível Neutro (m)</i>
15	15	-1,11E+00	0,5	2463	25
15	15	0,588	1	616	25
15	15	0,463	1,5	274	24,3
15	15	0,44	2	174	23,2
15	15	0,431	2,5	99	21,1
15	15	0,5	3	68	18,8
15	15	0,613	3,5	50	16,2
15	15	0,739	4	38	10,8
15	15	0,79	4,15	36	9,2
15	15	0,927	4,5	30	3,7
15	15	1,394	5	25	1

Tabela 5.5. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 1.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>
15	15	0,3419	0,5	36

Os dados representados nas tabelas anteriores, foram plotados na Figura 5.1 para conseguir uma maior interpretação do comportamento do sistema de fundação em cada modelo.

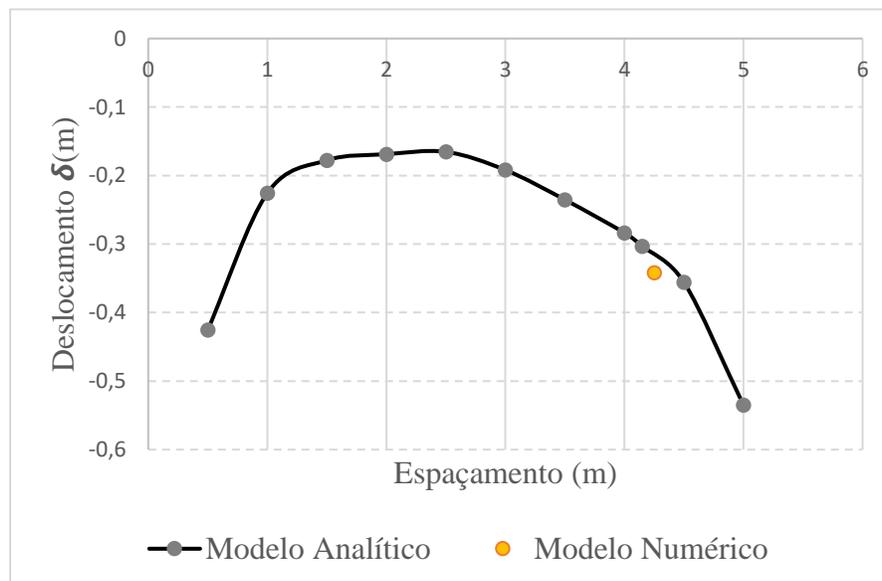


Figura 5.1. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 1, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.

Das informações anteriores e especificamente do gráfico se consegue observar que existe uma boa representação dos resultados por parte do modelo analítico na primeira etapa, devido a que o recalque final (para um número de estacas de 36) no modelo numérico representou um valor de 0.34 m, porém para o modelo analítico para um valor aproximado de estacas (38) apresentou um recalque final de 0.39 m. A diferença entre ambos resultados pode-se justificar com a mudança do modelo constitutivo para representar o comportamento do solo, evidenciando uma maior aproximação dos resultados com o modelo constitutivo S-CLAY 1 que com CCM.

Graficamente foram também comparados os resultados dos recalques no sistema de fundação para ambos modelos. Considerando que no caso do modelo numérico foi analisado só um quarto do sistema de fundação devido à simetria do caso de estudo o gráfico final representara de igual forma um quarto do sistema de fundação, entanto para o modelo analítico a simetria do problema não foi considerada pelo qual o gráfico representa todo o

Na Figura 5.2 se consegue identificar o gráfico correspondente ao quarto dos recalques no sistema de fundação implementado no modelo numérico, e na Figura 5.3 se apresentam os recalques do modelo analítico.

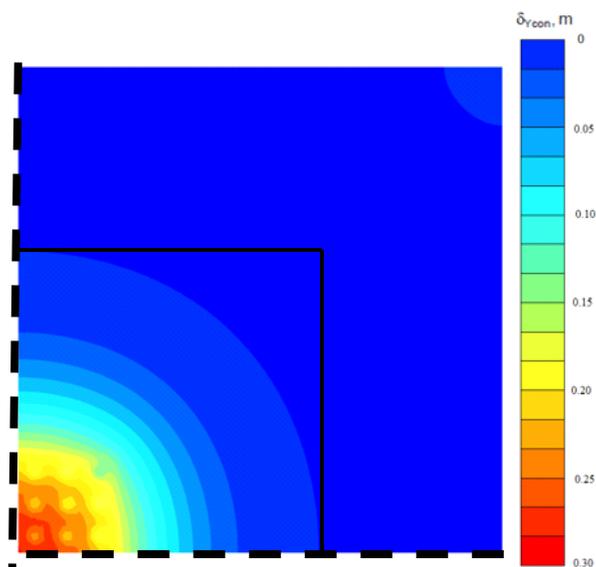


Figura 5.2. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1 do modelo numérico de Leal (2018).

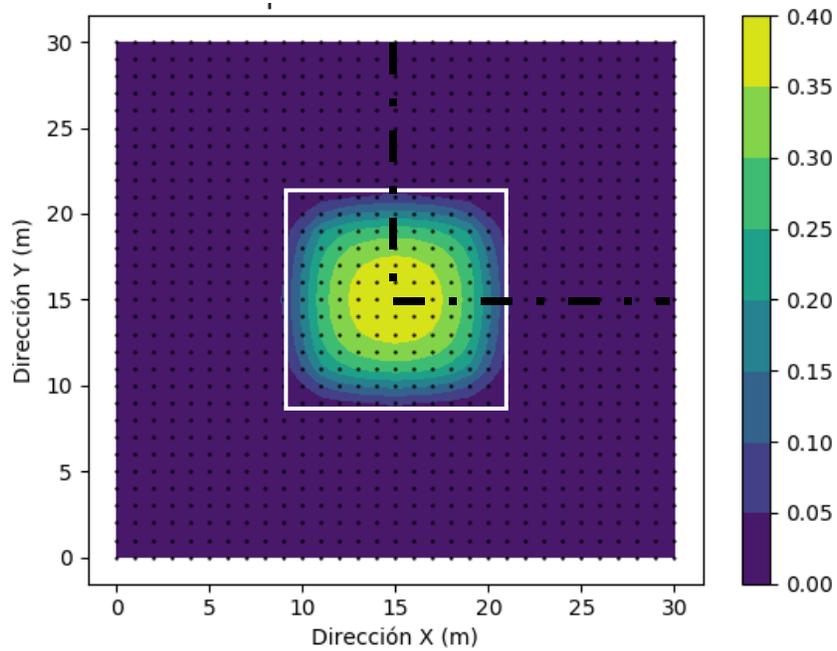


Figura 5.3. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1 do modelo analítico Micra 2018.

Dos anteriores gráficos se consegue constatar que em relação aos resultados comparados anteriormente, graficamente se representa a mesma conclusão de que ambos modelos para a primeira etapa da análise apresentam um comportamento similar.

Finalmente, na Figura 5.4 se apresentam os resultados correspondentes ao modelo analítico.

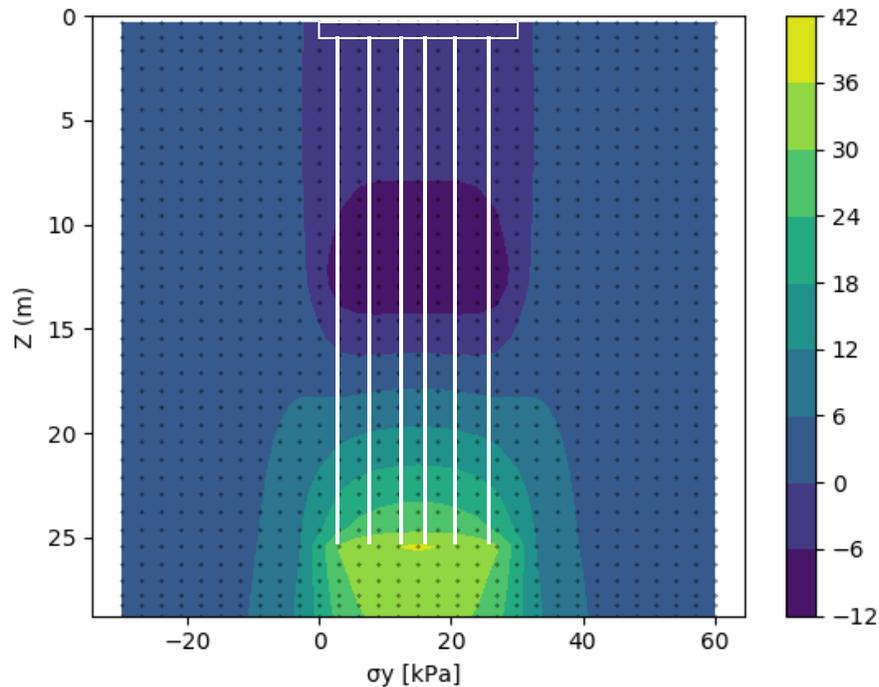


Figura 5.4. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 1 do modelo analítico Micra 2018.

Para o caso das tensões verticais do sistema apresentadas, o comportamento é similar aos casos analisados anteriormente no capítulo de validação do modelo analítico para o sistema de fundação 20 m x 20 m na primeira etapa de análises, nos quais se identificam similitude considerável no desenvolvimento das tensões ao longo da profundidade das estacas com incrementos importantes nas pontas devido ao aporte de carga da ponta das estacas ao solo de fundação.

5.1.2 Etapa 2

Na segunda etapa a metodologia de comparação de resultados foi igual que na etapa anterior gerando as tabelas correspondentes aos resultados de recalques (Tabela 5.6 para o modelo analítico e Tabela 5.7 para o modelo numérico) finais do sistema de fundação; porém, deve se levar em conta que nesta etapa o recalque total no sistema foi medido na profundidade do nível neutro, para posteriormente calcular o recalque final como foi calculado para a mesma etapa de análise no capítulo de validação da nova versão do modelo analítico.

Tabela 5.6. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 2.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>S. Regio (m)</i>	<i>Recalque final (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>
15	15	1,45E+00	1,32	-0,13	0,5	2463
15	15	1,018	1,32	0,306	1	616
15	15	0,908292	1,32	0,415708	1,5	274
15	15	1,061	1,32	0,263	2	174
15	15	1,291	1,32	0,033	2,5	99
15	15	1,469	1,32	-0,145	3	68
15	15	1,683	1,32	-0,359	3,5	50
15	15	1,88	1,32	-0,556	4	38
15	15	1,943	1,32	-0,619	4,15	36
15	15	2,242	1,32	-0,918	4,5	30
15	15	2,67	1,32	-1,346	5	25

Tabela 5.7. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 2.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>S. Regio (m)</i>	<i>Recalqu. final (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>
15	15	1,532	1,1	-0,049	0,5	36

Para esta etapa a subsidência regional obtida no modelo numérico correspondeu a um valor de $\delta_{Regional}=1.1$ m, e para o modelo analítico correspondeu a um valor de $\delta_{Regional}=1.32$ m.

Na Figura 5.5 se apresentam graficamente os resultados tabulados anteriormente, correspondentes ao desenvolvimento de recalques no sistema de fundação para ambos modelos.

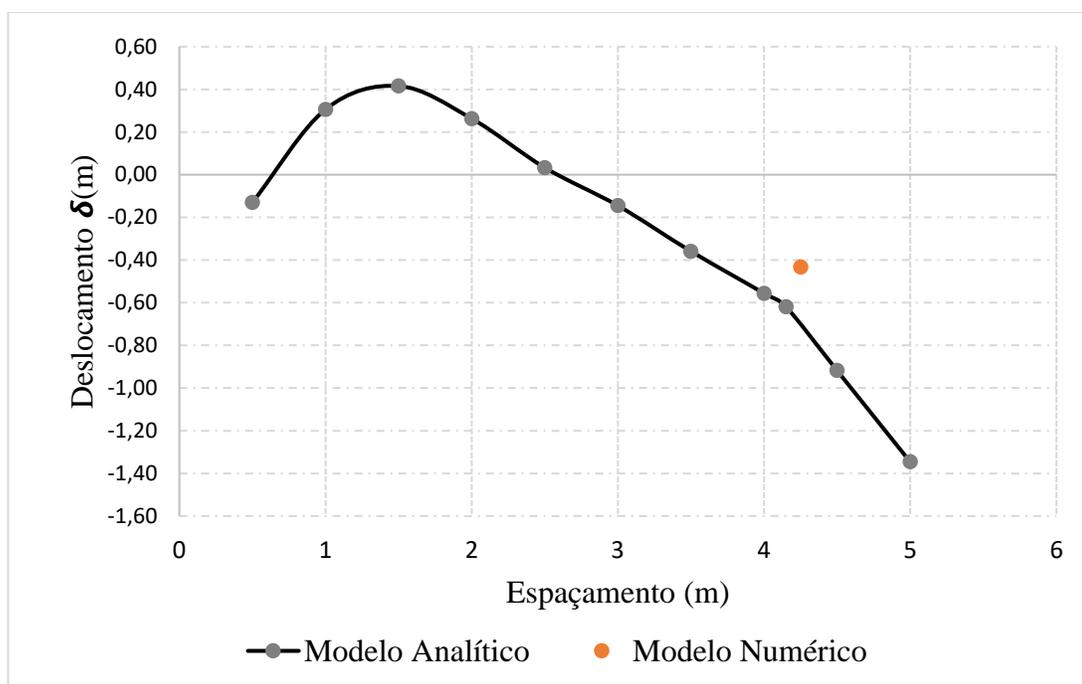


Figura 5.5. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 2, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.

Do gráfico anterior se consegue observar que os resultados de ambos modelos começam a se afastar um pouco por causa da diferença de 22 cm que se apresenta nos resultados da subsidência regional encontrados em cada modelo.

Também é importante identificar que até um espaçamento de aproximadamente três vezes o inicial (1.5 m) os recalques apresentam um acréscimo importante devido que as estacas se encontram menos espaçadas, e o peso específico do solo entre as mesmas é substituído pelo peso específico do grupo.

Seguindo com a metodologia de comparação nesta etapa também forma comparados os resultados dos recalques no sistema de fundação para os dois modelos.

Na Figura 5.6 se apresenta o gráfico correspondente ao quarto dos recalques no sistema de fundação resultantes do modelo numérico, e na Figura 5.7 se apresentam os correspondentes ao modelo analítico.

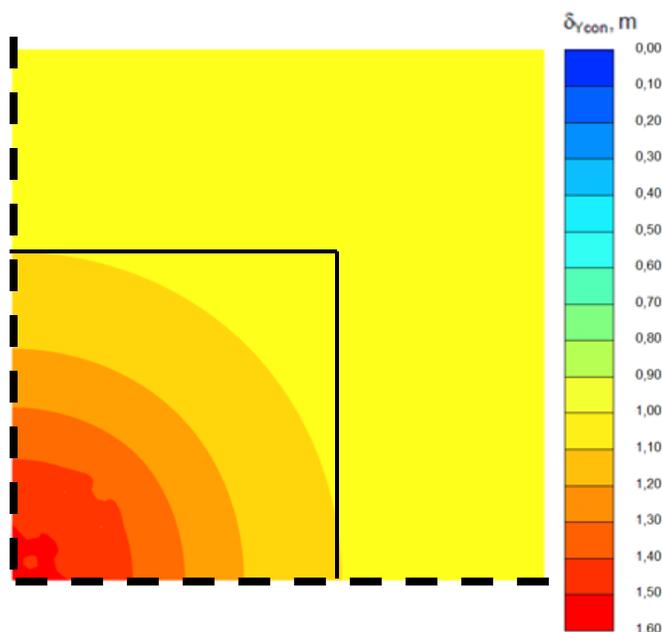


Figura 5.6. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2 do modelo numérico de Leal (2018).

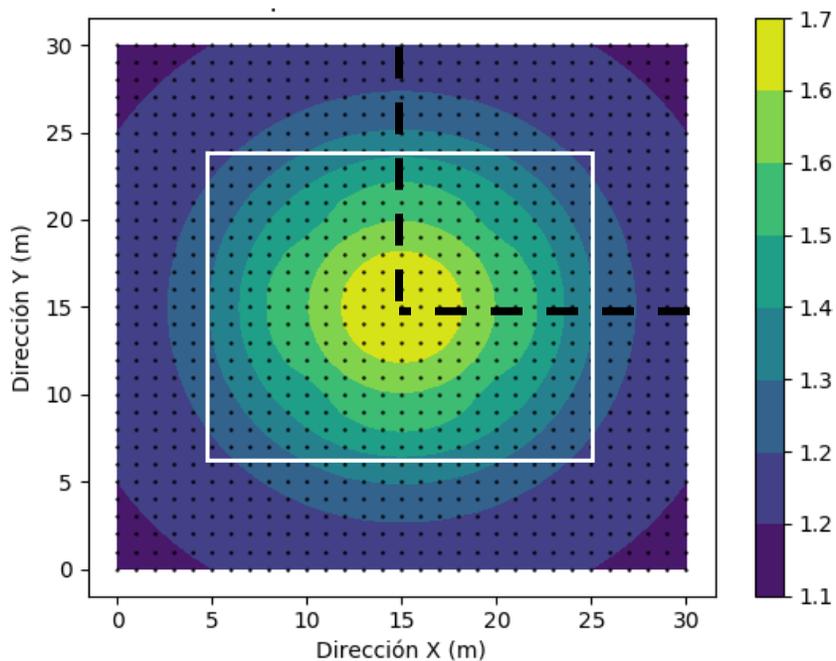


Figura 5.7. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2 do modelo analítico Micra 2018.

Nas Figura 5.8 e Figura 5.9 são apresentados os resultados das tensões verticais para o sistema de fundação (Etapa 2), a primeira correspondente à modelagem numérica, e a segunda ao modelo analítico.

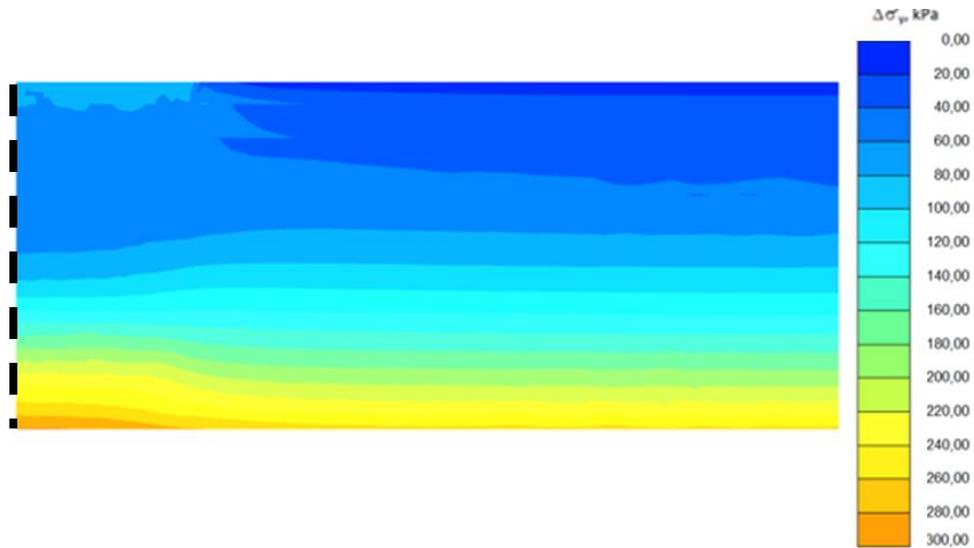


Figura 5.8. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2 resultantes da modelagem numérica Leal (2018).

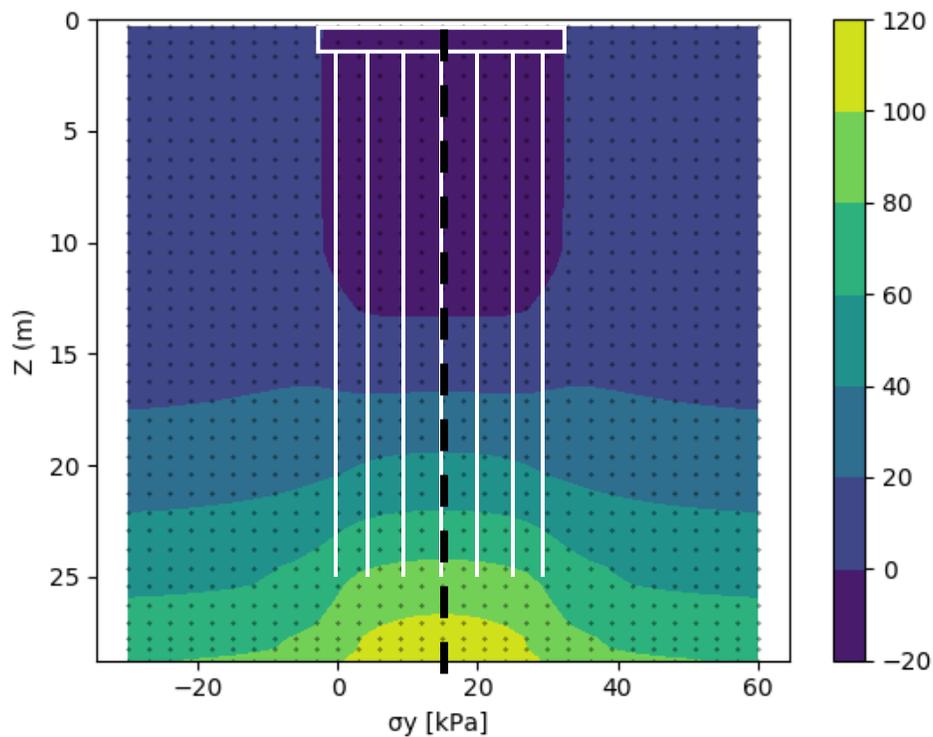


Figura 5.9. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2 resultantes do modelo analítico MICRA 2018.

Os gráficos apresentam o mesmo comportamento das tensões ao longo do comprimento das estacas, entendendo que o perfil gerado da modelagem numérica obedece só a metade do sistema de fundação. Assim, o perfil gerado do modelo analítico corresponde a um perfil de todo o sistema de fundação. Os valores das tensões efetivamente aumentam devido á interação do sistema de fundação com a condição de rebaixamento moderado das pressões intersticiais do solo.

No caso dos gráficos que representam os resultados dos recalques finais no sistema de fundação se consegue identificar também uma similitude no comportamento e nos valores obtidos no centro do radier.

5.1.3 Etapa 3

Finalmente, para a terceira etapa a subsidência regional obtida no modelo numérico correspondeu a um valor de $\delta_{Regional}=2.29\text{ m}$, e para o modelo analítico correspondeu a um valor de $\delta_{Regional}=2.8\text{ m}$.

Nas Figura 5.8 e Figura 5.9 são apresentados os resultados de recalques para ambos modelos.

Tabela 5.8. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 3.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>Recalque final (m)</i>	<i>S. Regional (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>
15	15	1,756	1,041	2,80	0,5	2463
15	15	1,399	1,398	2,80	1	616
15	15	1,606	1,191	2,80	1,5	274
15	15	1,898	0,899	2,80	2	174
15	15	2,23	0,567	2,80	2,5	99
15	15	2,546	0,251	2,80	3	68
15	15	2,805	-0,008	2,80	3,5	50
15	15	3,16	-0,363	2,80	4	38
15	15	3,248	-0,451	2,80	4,15	36
15	15	3,579	-0,782	2,80	4,5	30
15	15	3,974	-1,177	2,80	5	25

Tabela 5.9. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 3.

Coordenada X	Coordenada Y	Recalque δy (m)	S. Regio (m)	Recalq. final (m)	Espaçamen. (m)	N. Estacas (Uni)
15	15	2,339	2,29	-0,049	0,5	36

E finalmente, na Figura 5.10 são representados graficamente os recalques desenvolvidos no sistema, e plotados ambos modelos no mesmo gráfico.

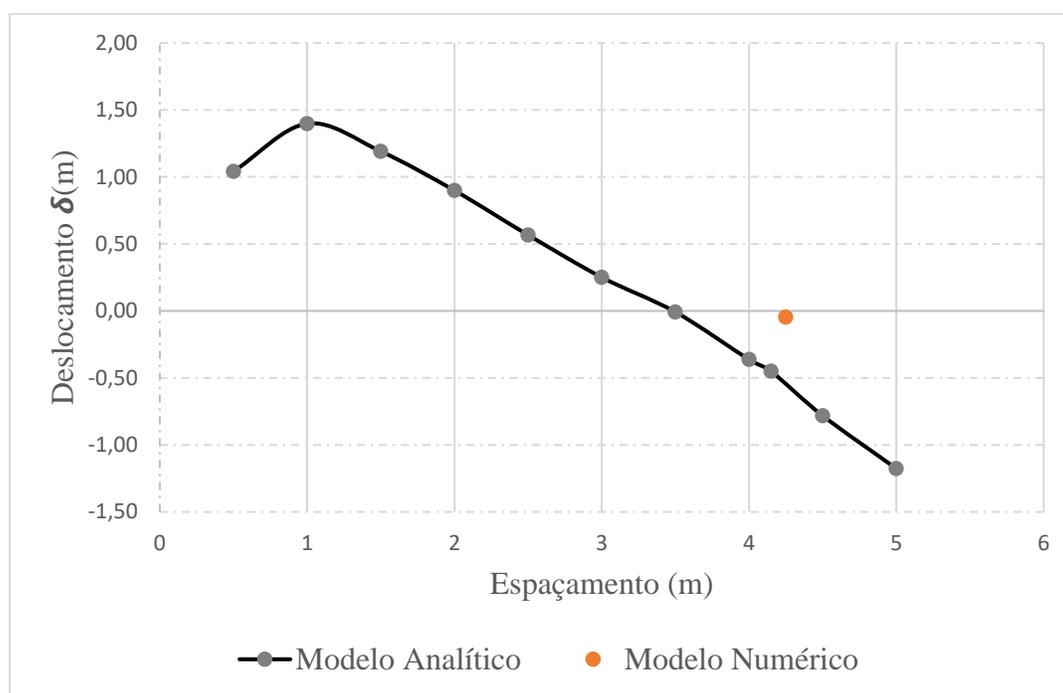


Figura 5.10. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 3, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D

O gráfico anterior apresenta o mesmo comportamento identificado na segunda etapa, com a diferença que nesta o rebaixamento extremo permite que no tramo entre o espaçamento 0 e 3 m se gerem maiores recalques no sistema de fundação em comparação com os obtidos no mesmo tramo na Etapa 2.

Finalmente, para a terceira etapa na Figura 5.11 se apresenta o gráfico correspondente ao quarto dos recalques no sistema de fundação resultantes do modelo numérico, e na Figura 5.12 se apresentam os correspondentes ao modelo analítico, nas quais se consegue identificar uma diferença gráfica muito maior que nos gráficos similares das etapas anteriores. Porém, o que representa esta diferença no caso do modelo numérico se deve a que o software está representando um decaimento do nível da superfície constante e não diferencial como nos

outros casos, o que quer dizer que a subsidência regional neste caso graficamente foi somada ao recalque gerado pelo sistema de fundação.

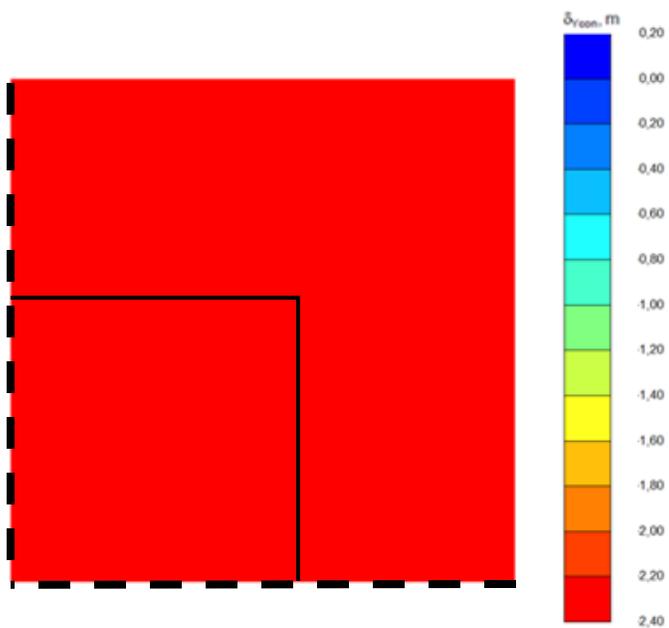


Figura 5.11. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3 do modelo numérico de Leal (2018).

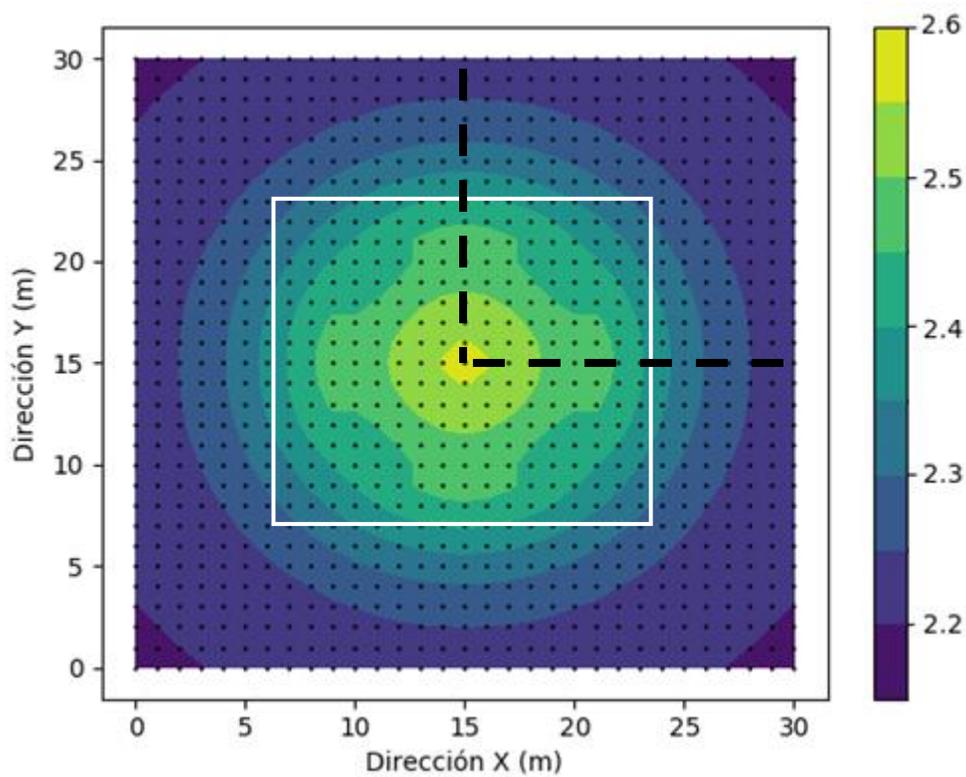


Figura 5.12. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3 do modelo analítico Micra 2018

De igual forma que na Etapa 2 os gráficos que apresentam o desenvolvimento das tensões verticais no sistema de fundação tanto para o modelo analítico como para a modelagem numérica (Figura 5.13 e Figura 5.14 respectivamente) para a Etapa 3 da análises, apresentam similitude em seu comportamento. Neste caso, os valores das tensões são efetivamente muito maiores, devido ao rebaixamento extremo das pressões intersticiais do solo, ao qual estão sendo submetidas as estacas do sistema de fundação

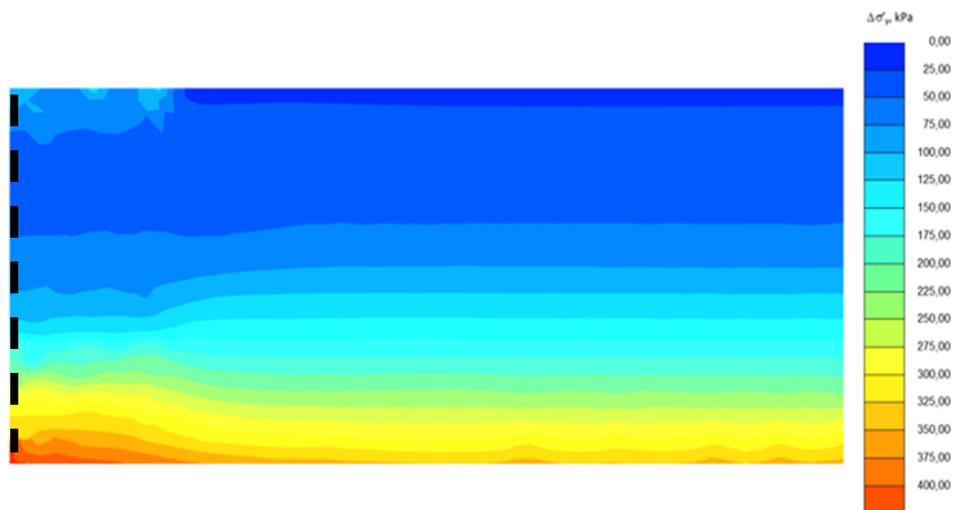


Figura 5.13. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3 resultantes da modelagem numérica Leal (2018).

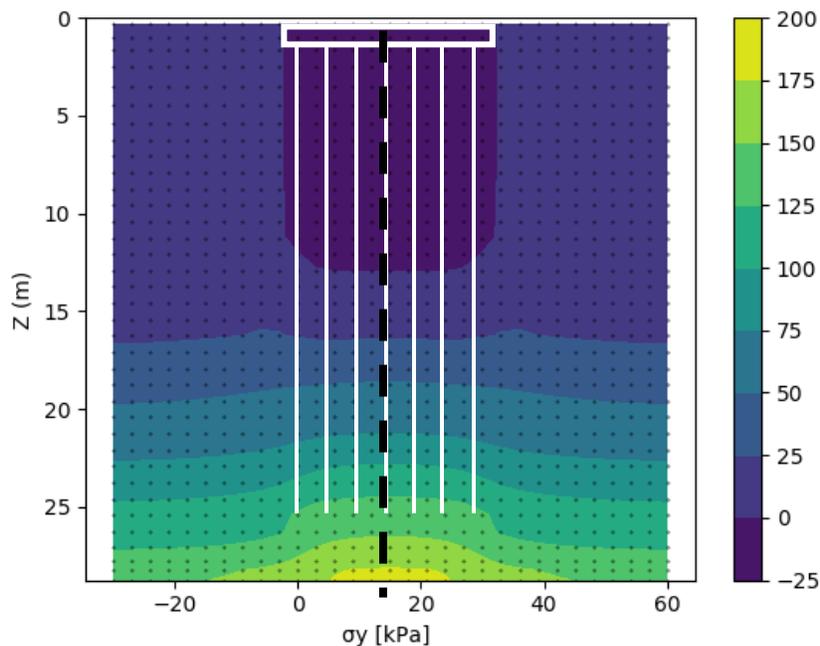


Figura 5.14. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3 resultantes do modelo analítico MICRA 2018.

Finalmente, a Figura 5.15 apresenta o desenvolvimento dos deslocamentos obtidos para cada etapa das análises, assim é possível comparar os diferentes comportamentos que cada uma delas atingiu no desenvolvimento do estudo.

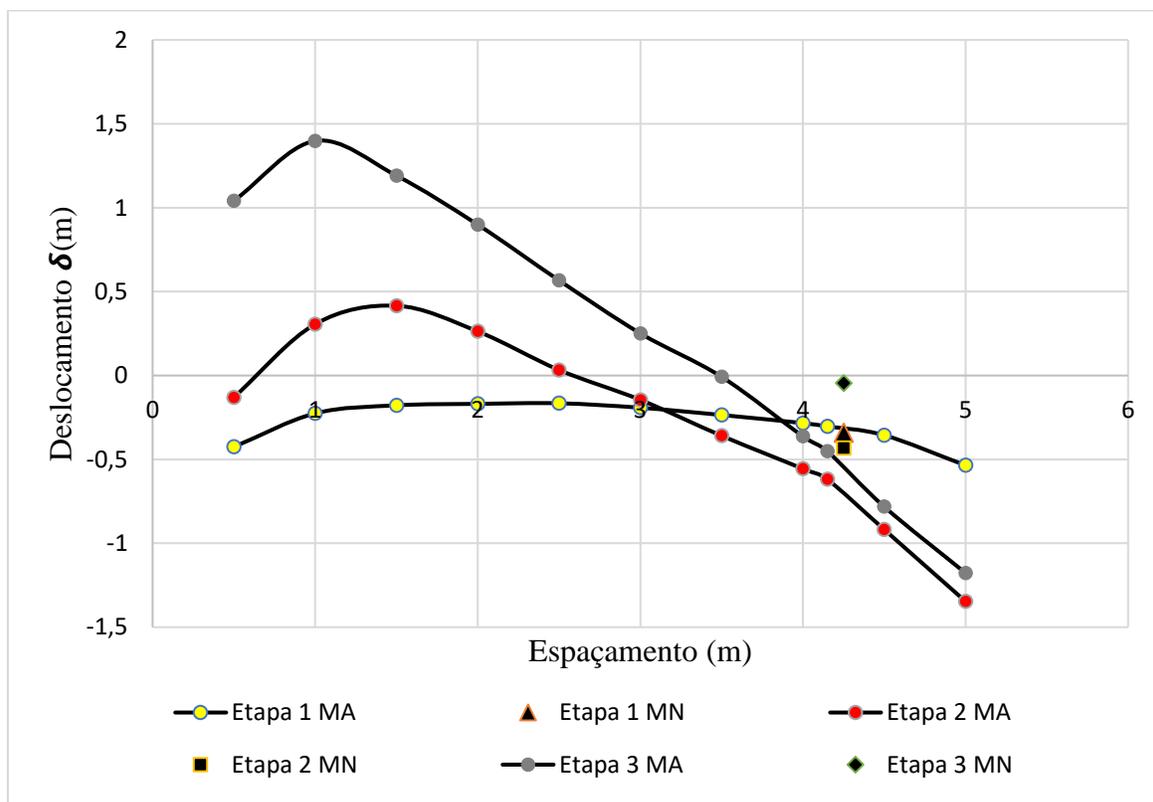


Figura 5.15. União do comportamento das etapas no cálculo dos deslocamentos para cada modelo (Analítico e Numérico) para o estado limite de serviço.

A partir do gráfico se consegue interpretar que, para o modelo analítico, a primeira etapa o deslocamento só representa recalques em todo o sistema de fundação em todos os espaçamentos estudados. Para as seguintes etapas se apresenta uma emersão aparente para os espaçamentos iniciais e posteriormente se apresenta um recalque progressivo. Resultados esperados e consideravelmente próximos aos valores obtidos da modelagem numérica.

5.2 ESTADO LIMITE ÚLTIMO

O mesmo procedimento das análises, desenvolvidas para o caso de estudo correspondente ao estado limite de serviço, foi implementado para o estado limite último. Foram analisadas todas as etapas, nos dois modelos, e comparados seus resultados. A grande diferença deste estado estabelece uma carga maior (110 KPa) para todas as etapas das análises em comparação com o caso anterior (60 KPa).

Nas Tabela 5.10 e Tabela 5.11 são apresentados os resumos das considerações adotadas para o modelo numérico e analítico respetivamente.

Tabela 5.10. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo numérico (Plaxis 3D).

Considerações para o modelo numérico		
$B = L$	$B = L$	Radier quadrado.
B	$30m$	Largura do radier.
D_f	0	Radier superficial.
B_p	$0.4m$	Diâmetro equivalente circular = 0,4m.
L_p	$25m$	Comprimento das estacas.
$N.A$	$2m$	Lençol freático inicial a 2m de profundidade.
N_p	100	Número de estacas, espaçamento (5 m)
Carga	$110 kpa$	Carga sobre o radier.

Tabela 5.11. Considerações grupo de estacas 30 x 30 m, modelo analítico (Micra 2018).

Considerações para o modelo Analítico		
$B = L$	$B = L$	Radier quadrado.
B	$30m$	Largura do radier.
D_f	0	Radier superficial.
B_p	$0.4m$	Diâmetro equivalente circular = 0,4m.
L_p	$25m$	Comprimento das estacas.
$N.A$	$2m$	Lençol freático inicial a 2m de profundidade.
S	$0.5m-5m$	espaçamento entre estacas (0.5 m até 5m)
Carga	$110 kpa$	Carga sobre o radier.
A_p	$0,1963m^2$	Área transversal da estaca.
P_p	$1,5708m$	Perímetro da estaca.
$Pevol$	$24 kN/m^3$	Densidade do concreto (Material da estaca)

5.2.1 Etapa 1

Nas Tabela 5.12 e Tabela 5.13 apresentam o resultados dos recalques no centro do radier para o modelo analítico e o modelo numérico respetivamente.

Tabela 5.12. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 1.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>	<i>Nível Neutro (m)</i>
15	15	-1,09	0,5	2463	25
15	15	-0,56	1	616	25
15	15	-0,33	1,5	274	25
15	15	-0,43	2	174	24,27
15	15	-0,56	2,5	99	18,41
15	15	-0,86	3	68	13,34
15	15	-1,50	3,5	50	3,55
15	15	-2,12	4	38	0
15	15	-2,35	4,15	36	0
15	15	-2,96	4,5	30	0
15	15	-3,42	5	25	0

Tabela 5.13. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 1.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>
15	15	-0,6507	0,5	100

Na Figura 5.16 são apresentados os resultados tabelados para os recalques no centro do radier nos dois modelos.

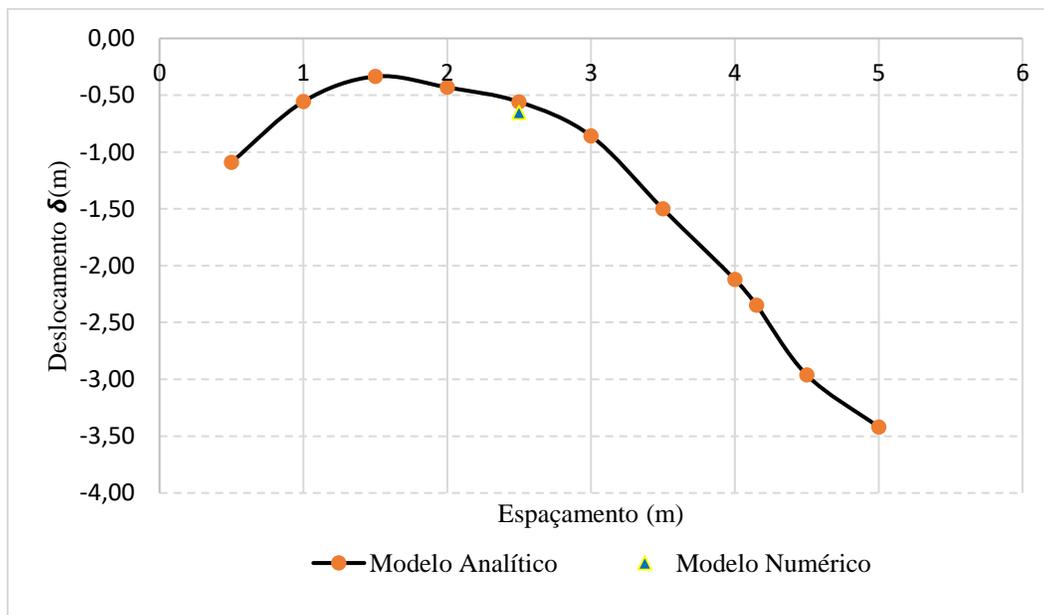


Figura 5.16. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 3, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.

Neste caso, os resultados dos recalques para os dois modelos, considerando a variação do espaçamento entre as estacas e comparando a trajetória gerada pelo modelo analítico e o ponto obtido do modelo numérico, se consegue identificar uma similitude no comportamento do recalque obtido no centro do radier; apresentando só uma diferença de aproximadamente 10 mm.

Igualmente também foram comparados os resultados dos recalques no sistema de fundação para ambos os modelos. Sopesando de igual forma que no caso do modelo numérico a análise foi implementada só em um quarto do sistema de fundação devido à simetria do caso de estudo.

Nas Figura 5.17 e Figura 5.18 são apresentados graficamente os resultados dos modelos para os recalques finais gerados no sistema de fundação.

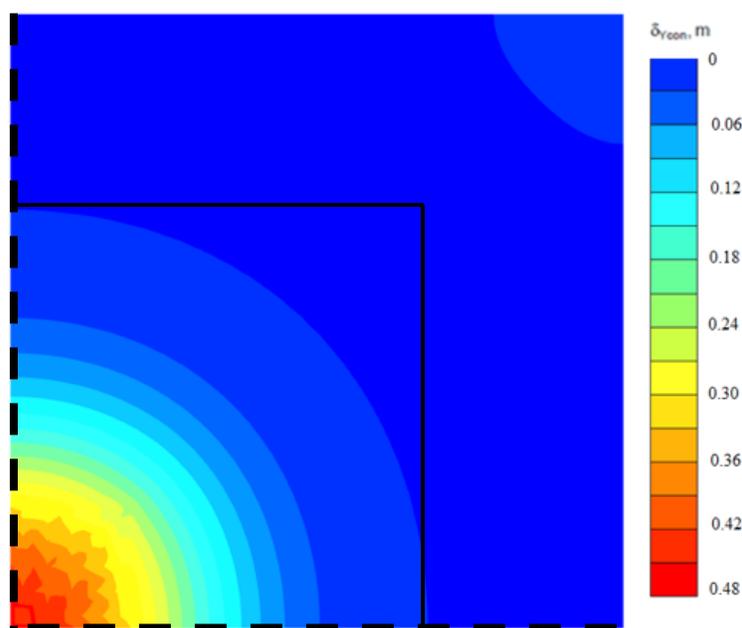


Figura 5.17. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo numérico de Leal (2018).

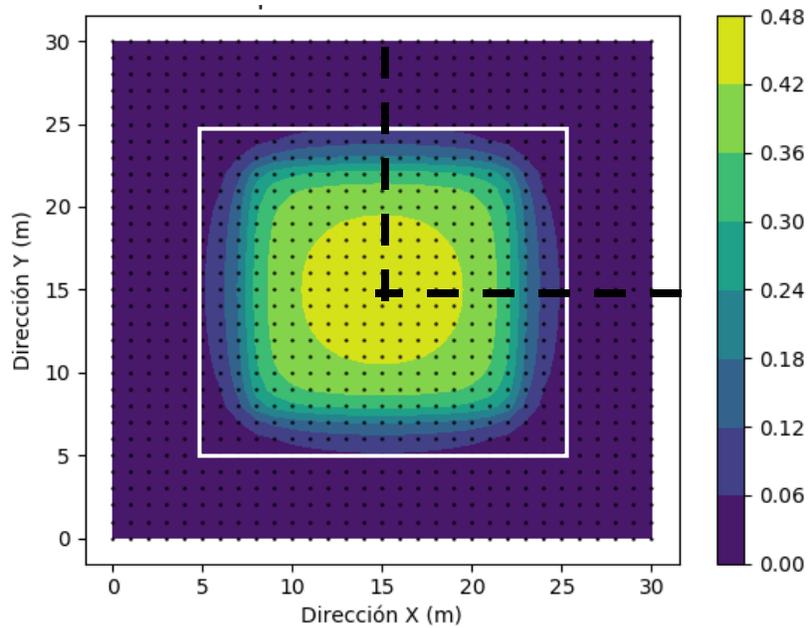


Figura 5.18. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 1, do modelo analítico Micra 2018.

O comportamento continua sendo para ambos os modelos independente do caso de estudo (limite ultimo ou limite serviço) para a primeira etapa.

Finalmente, para as tensões finais, na Figura 5.19 se apresentam os resultados correspondentes ao modelo analítico.

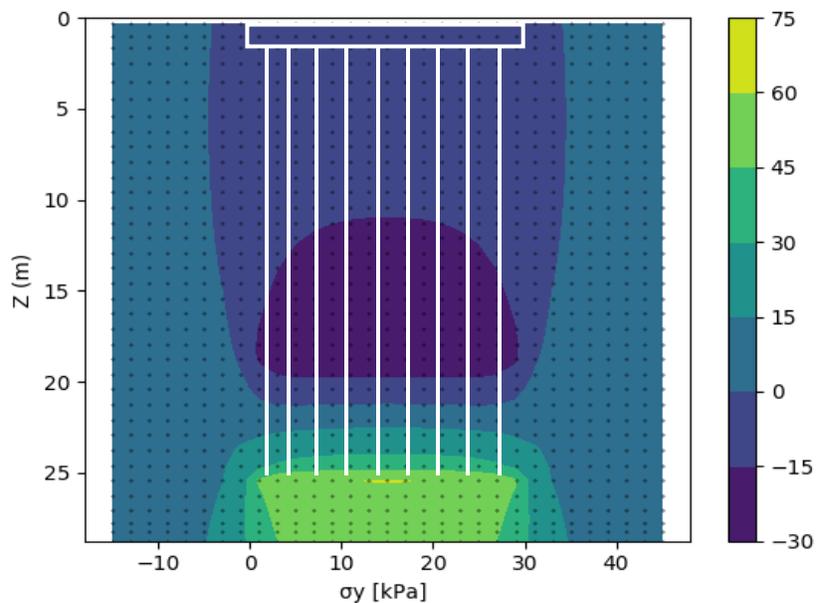


Figura 5.19. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 3, resultantes do modelo analítico MICRA 2018.

5.2.2 Etapa 2

Mesmo como no caso de estudo anterior, na segunda etapa, a metodologia de comparação de resultados foi igual levando em conta a contribuição aos cálculos de recalques e tensões devidos à consideração da hipótese de rebaixamento moderado e o cálculo diferenciado do recalque final no sistema de fundação como foi comentado anteriormente.

As seguintes tabelas (Tabela 5.14 e Tabela 5.15), apresentam os cálculos correspondentes aos recalques para ambos modelos.

Tabela 5.14. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 2.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>S. Regional (m)</i>	<i>Recalque final (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>
15	15	1,39	1,18	-0,21	0,5
15	15	0,81	1,18	0,37	1
15	15	0,81	1,18	0,37	1,5
15	15	1,16	1,18	0,02	2
15	15	1,50	1,18	-0,32	2,5
15	15	2,11	1,18	-0,93	3
15	15	2,80	1,18	-1,62	3,5
15	15	3,43	1,18	-2,25	4
15	15	3,64	1,18	-2,46	4,15
15	15	4,23	1,18	-3,05	4,5
15	15	4,67	1,18	-3,49	5

Tabela 5.15. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 2.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>S. Regional (m)</i>	<i>Recalque final (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>
15	15	1,25	1,06	-0,195	0,5	100

Na Figura 5.20. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 2, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D. são representados os resultados tabelados para os recalques no centro do radier em ambos modelos.

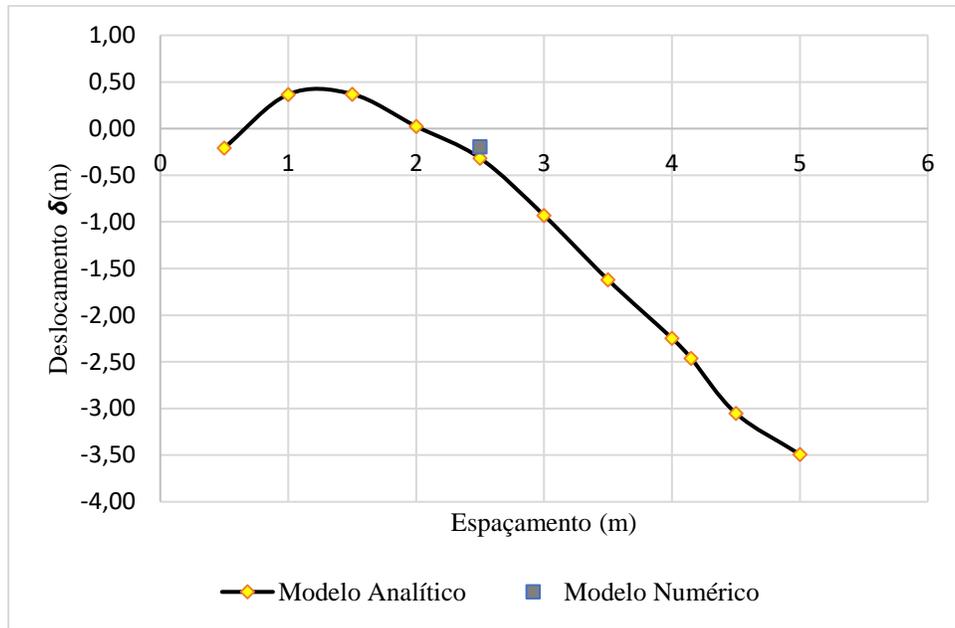


Figura 5.20. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 2, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.

Nas Figura 5.21 e Figura 5.22 são apresentados graficamente os resultados dos modelos para os recalques finais gerados no sistema de fundação.

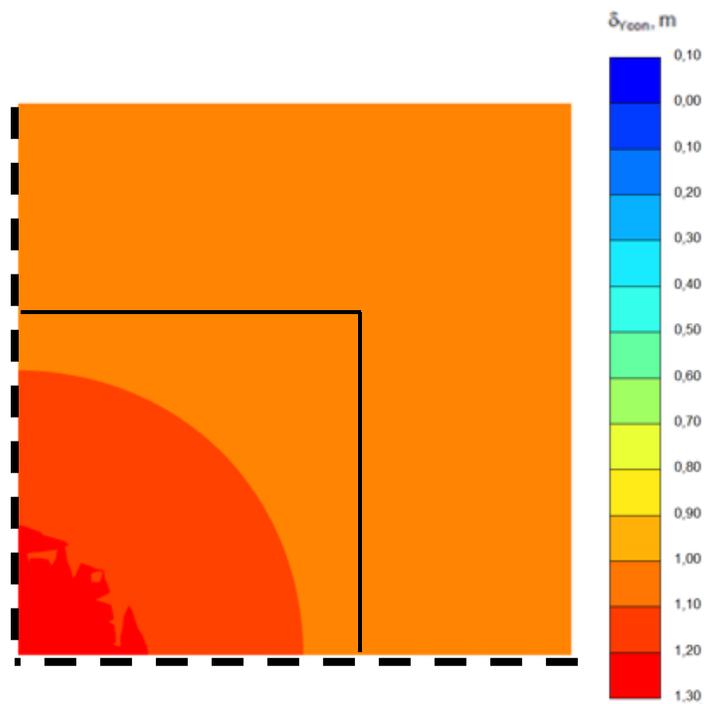


Figura 5.21. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo numérico de Leal (2018).

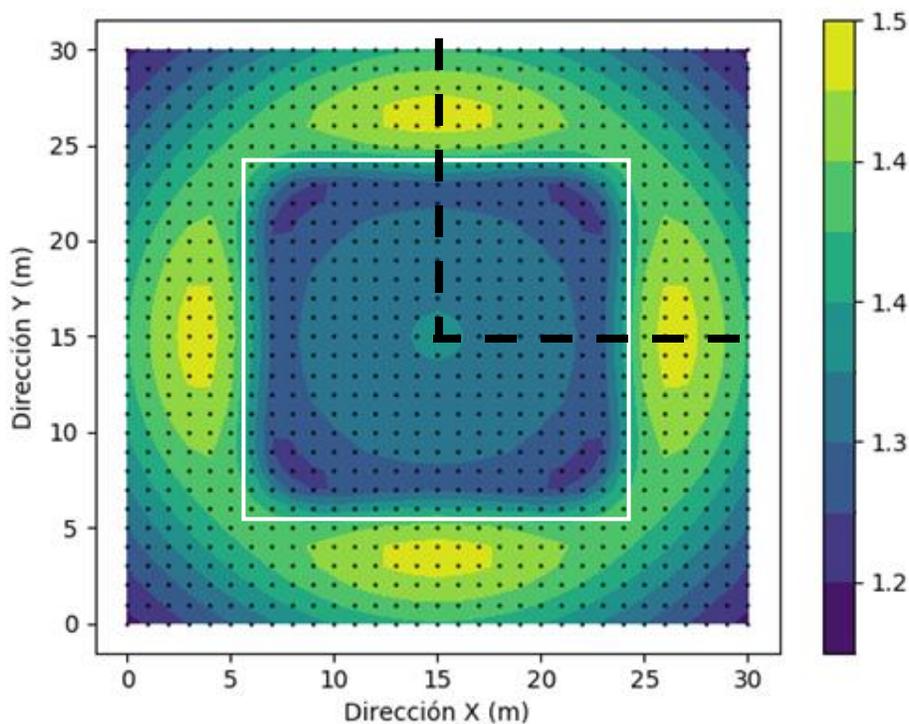


Figura 5.22. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 2, do modelo analítico Micra 2018

Neste caso, graficamente se apresentam algumas diferenças do quarto representado pelo modelo numérico e o representado pelo modelo analítico.

Finalmente nas Figura 5.23 e Figura 5.24 se apresentam os resultados das tensões desenvolvidas no sistema de fundação para ambos modelos, apresentando também similitudes no comportamento graficamente, mas com diferenças nos valores gerados devido á interação da subsidência regional com o grupo de estacas.

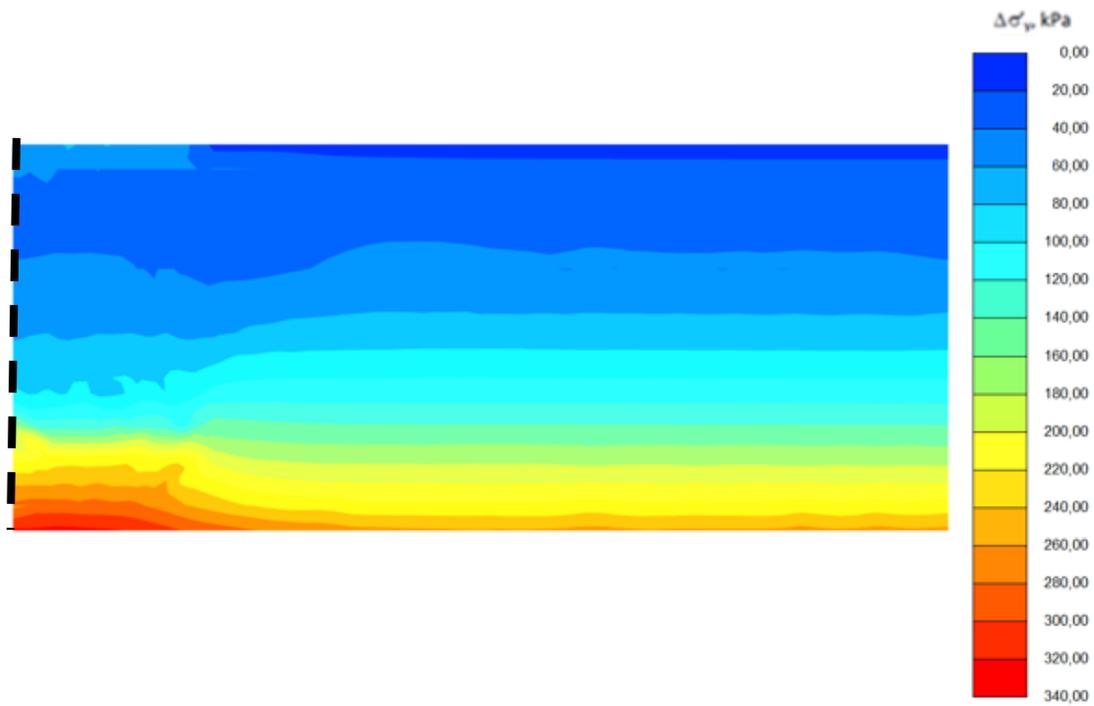


Figura 5.23. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes da modelagem numérica Leal (2018).

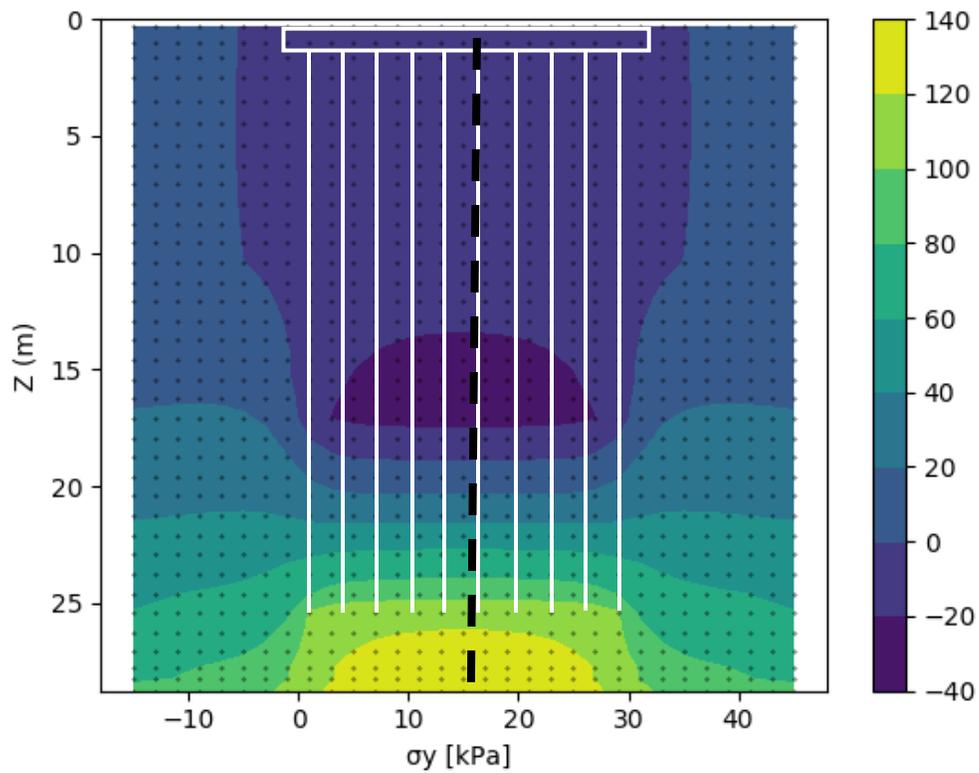


Figura 5.24. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes do modelo analítico MICRA 2018.

5.2.3 Etapa 3

Finalmente, a terceira etapa analisada com a contribuição da abordagem da hipótese de rebaixamento extremo apresenta os seguintes resultados nas seguintes tabelas (Tabela 5.16 e Tabela 5.17), para os recalques para ambos os modelos.

Tabela 5.16. Resultados dos recalques do modelo analítico Micra 2018 para a Etapa 3.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>S. Regional (m)</i>	<i>Recalque final (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>
15	15	1,63	2,26	0,63	0,5
15	15	1,03	2,26	1,23	1
15	15	1,37	2,26	0,89	1,5
15	15	1,79	2,26	0,47	2
15	15	2,28	2,26	-0,02	2,5
15	15	3,00	2,26	-0,74	3
15	15	3,70	2,26	-1,44	3,5
15	15	4,32	2,26	-2,06	4
15	15	4,54	2,26	-2,28	4,15
15	15	5,12	2,26	-2,86	4,5
15	15	5,56	2,26	-3,30	5

Tabela 5.17. Resultados dos recalques do modelo numérico Plaxis 3D para Etapa 3.

<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>	<i>Recalque δy (m)</i>	<i>S. Regional (m)</i>	<i>Recalque final (m)</i>	<i>Espaçamento (m)</i>	<i>N. Estacas (Uni)</i>
15	15	2,249	2,296	0,047	0,5	100

Na Figura 5.25 são representados os resultados tabelados para os recalques no centro do radier em ambos modelos.

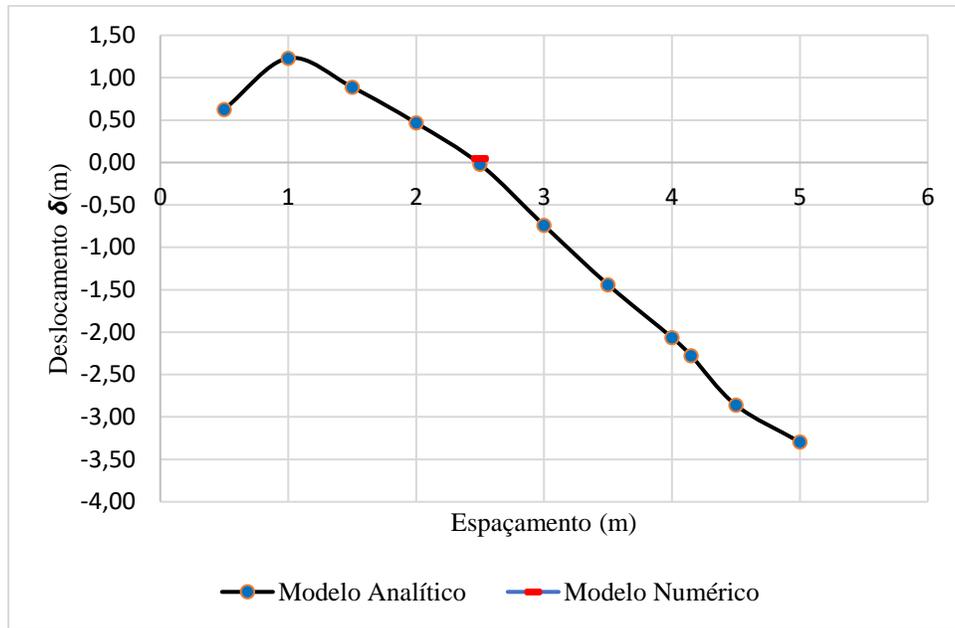


Figura 5.25. Desenvolvimento do recalque com a variação do espaçamento entre as estacas para a Etapa 3, para o modelo Micra 2018 e o ponto do modelo numérico Plaxis 3D.

Nas Figura 5.26 e Figura 5.27 são apresentados graficamente os resultados dos modelos para os recalques finais gerados no sistema de fundação.

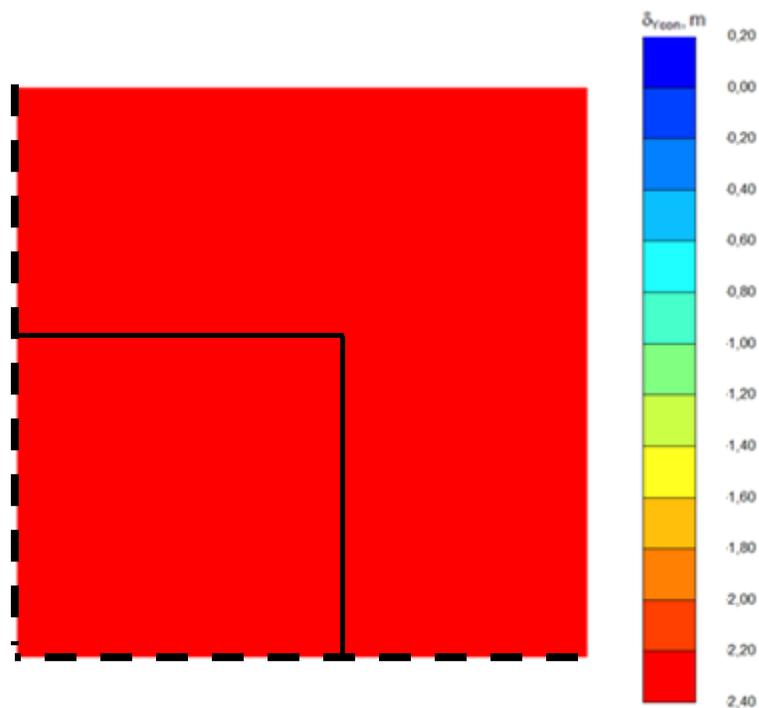


Figura 5.26. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo numérico de Leal (2018).

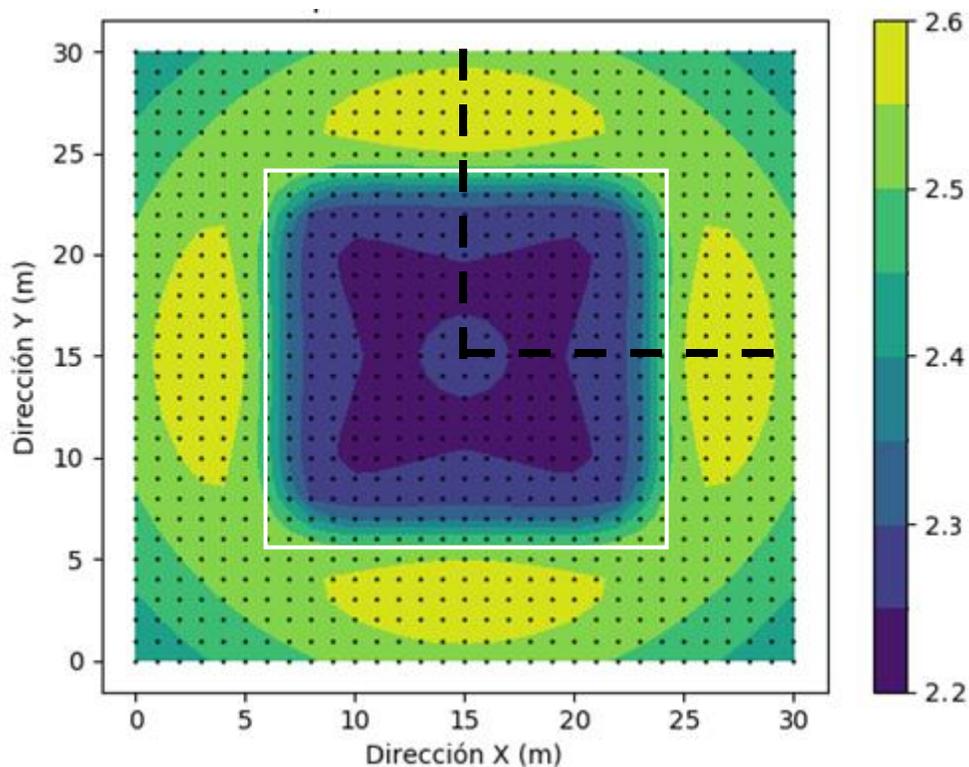


Figura 5.27. Gráfico de contorno dos recalques verticais superficiais para a Etapa 3, do modelo analítico Micra 2018

Igualmente que na etapa anterior, é apresentado graficamente algumas diferenças do quarto representado pelo modelo numérico e o representado pelo modelo analítico, no qual o modelo numérico representa um recalque constante ao longo da profundidade como na etapa 3 do estado limite de serviço, e o modelo analítico representa um desenvolvimento de uma emersão aparente no centro do radier de 2.2 m.

Finalmente, nas Figura 5.28 e Figura 5.29, se apresentam os resultados das tensões desenvolvidas no sistema de fundação para ambos modelos, e como similarmente se identificou na etapa anterior se o comportamento graficamente descreve o desenvolvimento das tensões ao longo das estacas, mas são evidentes também as diferenças nos valores gerados em ambos modelos.

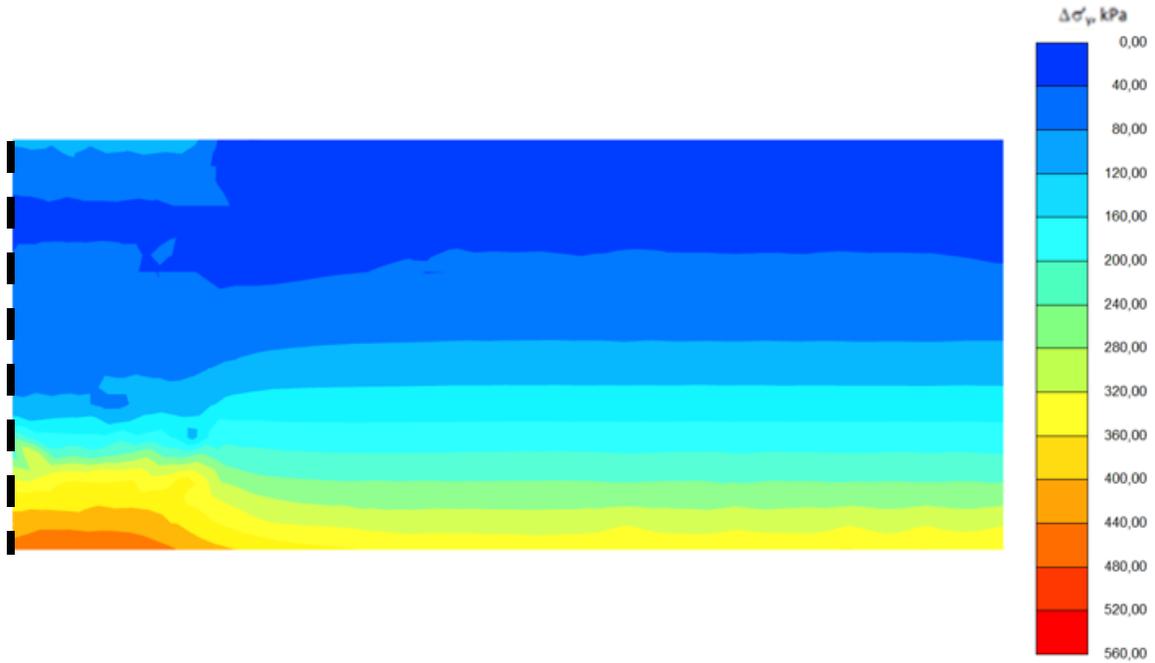


Figura 5.28. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes da modelagem numérica Leal (2018).

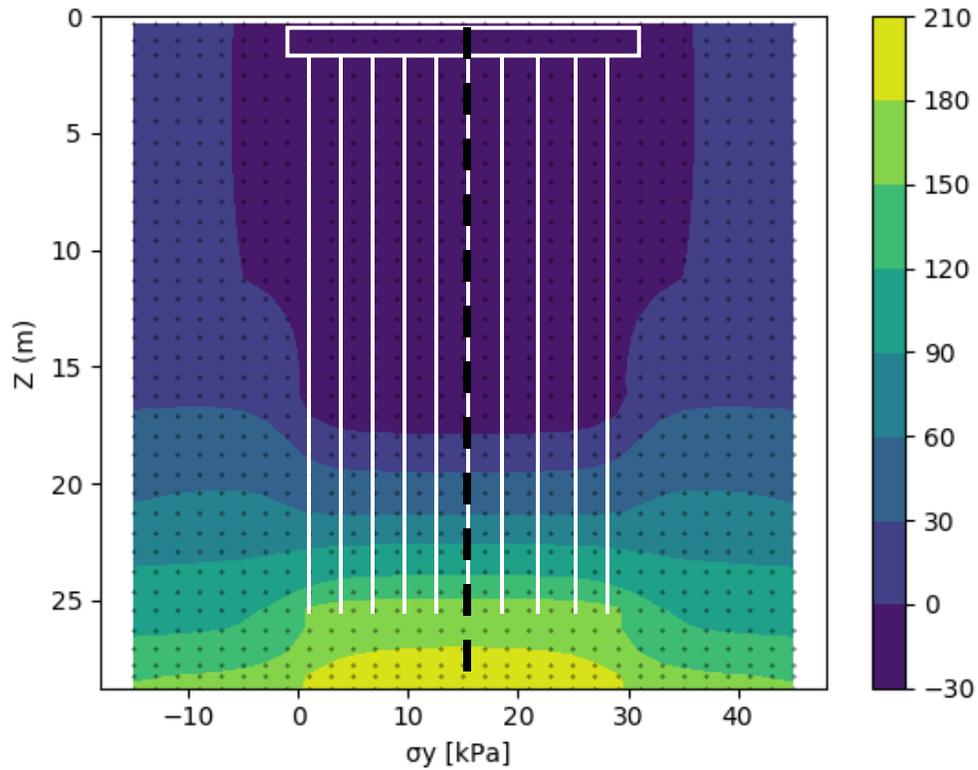


Figura 5.29. Acréscimo das tensões verticais efetivas para a Etapa 2, resultantes do modelo analítico MICRA 2018.

Da mesma forma que no gráfico final das três etapas das análises para o estado limite de serviço, neste caso foi gerado o gráfico das mesmas etapas das análises com seus resultados correspondentes aos recalques finais do sistema de fundação apresentados na Figura 5.30.

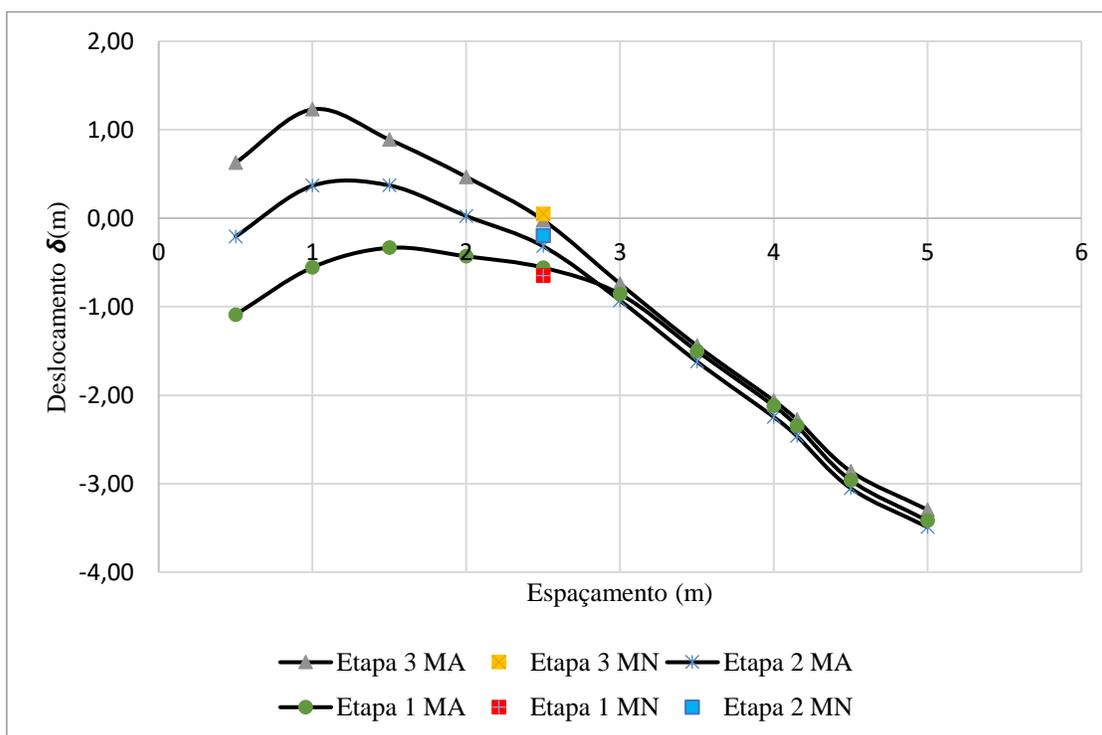


Figura 5.30. União do comportamento das etapas no cálculo dos deslocamentos para cada modelo (Analítico e Numérico) para o estado limite último.

Do gráfico se consegue concluir que neste caso de estudo os resultados para esta gráfica se encontram mais perto um de outro em comparação com o caso anterior, evidenciando uma maior estabilidade nos resultados obtidos; porém, de igual forma se considera que a primeira etapa representa um deslocamento progressivo em todo o sistema de fundação; entanto que, para as seguintes etapas se apresenta uma emersão aparente para os espaçamentos iniciais e posteriormente se apresenta um recalque contínuo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho apresentou como principal objetivo desenvolver uma modificação na linguagem de programação de um modelo analítico que permite estudar o comportamento de sistemas de fundação baseados em grupos de estacas assentes em solos moles em processos de adensamento gerado pelo fenômeno do rebaixamento de pressões intersticiais denominado subsidência regional, o qual é característico dos solos argilosos encontrados na zona lacustre da Cidade do México (local do estado).

As novas funcionalidades programadas para o modelo analítico em sua nova versão (Micra 2018) permitem ao usuário ter um maior controle da informação ingressada na definição do tipo de projeto que deseja analisar. No caso do formulário de visualização 2D e 3D se conseguiu dotar ao modelo analítico de opções que normalmente são comuns em softwares mais sofisticados, como permitir visualizar as geometrias das áreas de trabalho em conjunto com a estratigrafia do solo onde serão colocadas as estacas com a finalidade de conseguir um maior entendimento espacial do sistema de fundação implementado.

No caso do novo formulário implementado para geração de gráficos de contorno, a opção permite ao usuário desenvolver dois tipos de gráficos, uma para os resultados de tensões verticais finais e outra para recalques verticais finais; estes gráficos conseguem representar espacialmente a relação que existe entre a variável dependente (tensão e deformação) com duas variáveis do espaço (X,Y), as quais permitem melhorar o entendimento pontual da resposta do solo de fundação frente as solicitações de carga impostas no momento de definir o tipo de projeto a ser analisado.

Os gráficos de contorno geradas pelo formulário na nova versão do modelo analítico (Micra2018), conseguem representar de forma ótima e confiável os resultados de tensões e deformações, segundo as comparações feitas com gráficos de contorno geradas de um software especializado como o *Surfer Golden* utilizando os mesmos dados de análises.

A validação do Micra2018 foi feita da comparação dos resultados obtidos com o modelo analítico em sua versão anterior (Micra2011) e com a modelagem numérica feita por Rodriguez (2010), se consegue identificar que os resultados são praticamente iguais.

O modelo analítico em sua nova versão, assim como na anterior, consegue representar muito bem o comportamento do solo em relação aos recalques e tensões verticais finais do sistema de fundação dentro da área ocupada pelo grupo de estacas, em comparação com a modelagem numérica; porém, para o solo que se encontra afastado do grupo de estacas o modelo analítico não consegue reproduzir a distribuição do desenvolvimento de tensões e recalques para estas áreas, devido a que o modelo numérico considera o comportamento tridimensional do problema, além da rigidez do radier e das estacas, entretanto o modelo analítico ignora estas variáveis.

Algumas das diferenças do modelo analítico e os modelos numéricos se devem à abordagem que cada um deles implementa para estudar o comportamento do sistema de fundação e que foram também enunciadas por Rodriguez (2010) em seu trabalho. No caso do modelo analítico, por exemplo, as propriedades de resistência do solo de fundação estão definidas em termos de tensões totais, entanto que para os modelos numéricos em termos de tensões efetivas. O modelo analítico calcula o atrito negativo e a carga por ponta a partir da resistência não drenada, entretanto para os modelos numéricos a resistência não é desenvolvida em sua totalidade para espaçamentos pequenos entre estacas.

Para os dois casos de estudo analisados tanto o modelo numérico de Leal (2018) como o modelo analítico Micra 2018, apresentaram igualmente similitudes importantes de forma geral no comportamento do sistema de fundação implementado; porém, o estado-limite ultimo apresento uma maior aproximação entre ambos modelos.

Quando são incluídas as condições de rebaixamento das pressões intersticiais do solo no projeto, os modelos nas etapas 2 e 3 para os diferentes sistemas de fundação apresentam diferenças consideráveis. O modelo analítico apresenta maiores incrementos de tensões na ponta das estacas, isto se deve a que o modelo analítico não consegue reproduzir muito bem o desenvolvimento de tensões para as estacas de borda e suas áreas próximas, as quais recebem a maior ação da subsidência regional que tenta puxar para baixo as mesmas gerando um aumento no atrito negativo, positivo e a carga por ponta.

O comportamento de grupo de estacas é descrito em termos gerais como ótimo pelo modelo analítico para todas as etapas em comparação com o modelo numérico, existem algumas diferenças representadas por diferentes metodologias de abordagem dos casos de estudo, mas

para termos práticos o resultado foi o esperado, considerando que certamente as ferramentas numéricas baseadas em elementos finitos seguem sendo as mais significativas e sofisticadas para analisar este tipo de situação.

Para posteriores trabalhos e pesquisas que pretendam ter como base a presente dissertação, a recomendação geral mais importante corresponde a transformar o modelo a um modelo tridimensional, melhorando no código a abordagem da subsidência regional e sua forma de interagir com o grupo de estacas em três dimensões, com o objetivo de considerar o comportamento das estacas de borda e assim aproximar muito mais os resultados dos modelos analíticos com os modelos numéricos. Uma segunda recomendação corresponde a incluir no código a rigidez das estacas e do radier.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERRO, J., & HERNÁNDEZ, R. (1992). Génesis de las grietas de Tensión en el Valle de México. El subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones, (Sesión II).

AUVINET, G. (2009). Land subsidence in Mexico City. Geotechnical Engineering in urban areas affected by land subsidence. Volume prepared by ISSMGE TC #36 (págs. 3-11). México: SMIG

AUVINET, G. & DÍAZ-MORA, C. (1981). Programa de computadora para predecir movimientos verticales de cimentaciones. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, No 438.

AUVINET, G. & MENDOZA, M. (1987). Consideraciones respecto al diseño de cimentaciones sobre pilotes de fricción. Memo. VII RNIS, Querétaro.

AUVINET, G., & RESÉNDIZ, D. (1991). Foundations on soft soils: design criteria. En IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Viña del Mar (págs. 1629-1649). Chile: Sociedad Chilena de Geotecnia.

AUVINET, G. & RODRÍGUEZ, J. F. (2002(b)). Modeling of friction piles in consolidating soils. Proc. Int. Deep Found. Cong., ASCE, Orlando: 224-235.

AUVINET, G., & RODRÍGUEZ, J. F., & RANGEL, J. L. (2010). Construction of deep tunnel shafts in Mexico city soft clays by the flotation method. Acta Geotechnica, 5(1), 63–68. <https://doi.org/10.1007/s11440-010-0115-2>.

BAREÑO, E. & RODRÍGUEZ, E. (1999). Clays Shrinkage (In Spanish). Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia, 155 p.

BROMS, B. B. (1969). Design of pile groups with respect to negative skin friction. Proc. 7th ICSMFE, Special Session No. 8, México.

COMBARIEU, O. (1988). Amélioration des sols par inclusions rigides verticales application à l'édification de remblais sur sols médiocres. Rev. Franç. Géotech., No. 44 : 57-79

CORREA, J. J. (1961). The application of negative friction piles to reduction of settlement. Proc. 5th ICSMFE, Paris.

CORREA, J. J. (1969). A telescopic type of pile for subsidence conditions. Proc. Specialty session on negative skin friction and settlements of piled foundations, 5th ICSMFE, México DF.

ELLSTEIN, A. (1980). El pilote penetrante o P3. Mem. de la Reunión Conjunta Consultores-Constructores Cimentaciones profundas, México DF.

ENDO, M. MINOU, A. KAWASAKI, T. & SHIBATA, T. (1969). Negative skin friction acting on steel pipe pile in clay. Proc. 7th ICSMFE, México DF, 2: 85-92.

ERGUN, M. U., & SONMEZ, D. (1995). Negative skin friction from surface settlement measurements in model group test. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(6), 1075-1079.

FOPAE (2010). *Microzonificación Sísmica de Bogotá*. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. FOPAE. Bogotá D.C, Colombia, 21 p.

GIRAULT, P. (1980). Pilotes entrelazados. Teoría y funcionamiento. Mem. de la Reunión conjunta Consultores-Constructores Cimentaciones profundas, México DF.

GIRAULT, P. (1964). A new type of pile foundation. *Proc. Conf. on Deep Found.* 1.

GONZÁLEZ, F. (1948). Level control in buildings by means of adjustable piling. *Proc. 2nd ICSMFE*, 4, p. 152, Rotterdam.

HEWITT, V.M. (2011). Possible Effects of the Negative Friction over Piles Induced by the Bogota Soils Subsidence Phenome. (In Spanish). Tesis de Maestría en Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia, 159 p.

JANDA, T., CUNHA, R. D., KUKLK, P., & ANJOS, G. D. (2009). Three dimensional finite element analysis and back-analysis of CFA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil. *Soils and Rocks*, 32(1): 3-18.

KRISHNAMOORTHY, A. & KUMAR, S. (2014). Analysis of pile foundation on soft consolidating soil. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*: 74-77.

LEUNG, C. (2009b). Negative skin friction on piles groups. *Engineering Research*, 24(1).

LEUNG, C., LIAO, B., CHOW, Y., SHEN, R. & KOG, Y. (2004). Behavior of pile subject to negative skin friction and axial load. *Soils and Foundations*. 44(6):17-26.

LOBO-GUERRERO, A. (1992). *Geology and Hidrogeology of the Bogotá City* (In Spanish). Sociedad Colombiana de Ingenieros, Sociedad Colombiana de Geotecnia, VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, Bogotá D.C, Colombia: 1-20.

LUTZ, M, (2011). *Programming python fourth edition*, Sebastopol, Crimea: O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472.

MANDOLINI, A., DI LAORA, R., & MASCARUCCI, Y. (2013). Rational Design of Piled Raft. *Procedia Engineering*, 57: 45-52.

MARTINS, I. S. M., 2011, "Adensamento", Slides da Aula de Adensamento/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MARTINS, I. M., & ABREU, F. (2002) Uma Solução Aproximada para o Adensamento Unidimensional com Grandes Deformações e Submersão de Aterros. *Solos e Rochas*, n. 25, p. 3-14.

MINDLIN, R. D., 1936, "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid ", *Physics*, Vol. 7, may.

- MOOSER, F. (1992). Estratigrafía y estructura del Valle de México. El subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones, 29–36.
- MURILLO, R. (1992). Sobreexplotación del acuífero de la cuenca del valle de México: Efectos y Alternativas. El subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones, (Sesión II), 109–120.
- NOAO. (2002). Understanding Subsidence. The Hartford Loss Control Department. Technical Information Paper Series, United States, 6p.
- NUÑEZ, C. (1996b). Hundimiento del subsuelo de la ciudad de México. XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, 99–102.
- OKABE, T. (1977). Large negative friction and friction free pile methods, Proceedings, 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 1.
- POULOS, H. G. & DAVIS, E. H. (1974). The use of the sector method for calculating stresses and displacements in an elastic mass. Elastic solutions for Soil and Rock Mechanics, Series in Soil Engineering, John Wiley & Sons.
- RESÉNDIZ, D. (1964). On a type of point bearing pile through sinking subsoil, Proc. Conf. on Deep Found., Mexico DF, 1: 385-403.
- RESÉNDIZ, D. & AUVINET, G. (1973). Analysis of pile foundations in consolidating soils. Proc. 8th ICSMFE, Moscow, 2: 211-218.
- RESÉNDIZ, D., AUVINET, G. & SILVA, C. (1969). Conception et comportement des fondations du Palais des Sports de la ville de Mexico en présence de frottement négatif. Proc. Specialty Session on negative skin friction and settlements of piled structures, 7th ICSMFE, México
- RODRIGUEZ, E. (2016). Análise Experimental do Comportamento de Sistemas Radier Estaqueado em Solos Moles em Processos de Adensamento. Universidade de Brasília.
- RODRIGUEZ, J.F. (2001). Use of Rigid Inclusions to Settlement Soft Soil Control (In Spanish). Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM, México D. F., México, 154 p.
- RODRIGUEZ, J.F. (2010). Modeling Behavior of Piles and Inclusions Under Regional Consolidation in the Lake Área of Mexico City. (In Spanish). Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM, México D.F., México, 244 p.
- RODRÍGUEZ, J.F. & AUVINET, G. (2002(a)). Manual de construcción geotécnica, Capítulo 9, Inclusiones. SMMS, 2: 404-446.
- RODRÍGUEZ, J. F. & AUVINET, G. (2002(b)). Aplicación del método de los elementos finitos al diseño de cimentaciones piloteadas. Mem. II Cong. Int. Métodos Numéricos en Ing. y Ciencias Aplicadas, Guanajuato.

RODRÍGUEZ, J. F. & AUVINET, G. (2006). Rigid inclusions in Mexico City soft soils. Int. Symp.: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions, TC36, Mexico DF.

RODRÍGUEZ, J.F. & AUVINET, G. (2007). Rigid Inclusions in Mexico City Soft Soils, Proc. 13th PCSMGE, Isla de Margarita.

RODRÍGUEZ, J.F., AUVINET, G. Y., & MARTÍNEZ, H. E. (2015). Settlement analysis of friction piles in consolidating soft soils. DYNA,82(192), 211-220.

SALES, M. M. (2000). Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. Dissertação de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 257 p.

SALES M.M., CUNHA R.P., CARVALHO J.C. DE & SILVA C.M. (2002). Previsões de Comportamento de um radier estaqueado no Distrito Federal. XII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, São Paulo, Brasil, 8p.

SANTOYO, E. & OVANDO, E. (2000). Catedral y Sagrario de la Ciudad de México. Corrección geométrica y endurecimiento del subsuelo. TGC Geotécnia, México DF

ZEEVART, L. (1973). Foundation engineering for difficult subsoil conditions. Van Nostrand Reinhold Company.

ZEMVA, S. (2011a). Diseño y Construcción de Lumbreras en Suelos Blandos por el procedimiento de los Anillos Prefabricados. Universidad Nacional Autónoma de México.

APÊNDICE. PROGRAMAÇÃO DA ESTRUTURA ORIGINAL

O programa Micra2011 está constituído especificamente por um menu principal (Figura A1), o qual se encontra dividido em 5 menus numerados da seguinte forma:

1. *Archivo*
2. *Definir*
3. *Ver*
4. *Calculo*
5. *Resultados*

Menu principal: No momento de executar o programa aparece uma janela com o menu principal numa barra horizontal na parte superior especificando os diferentes menus listados anteriormente.

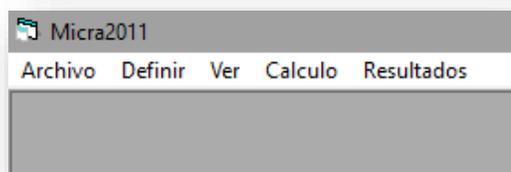
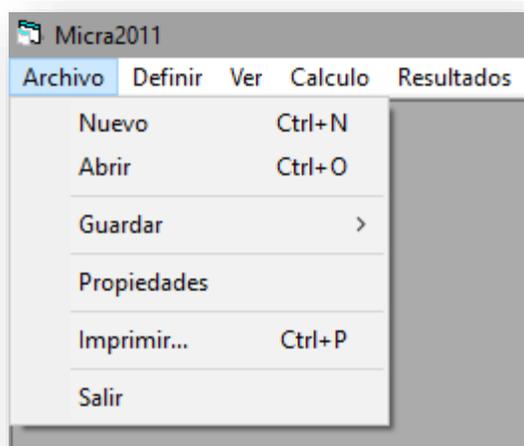


Figura A1. Menu principal do Micra 2011.

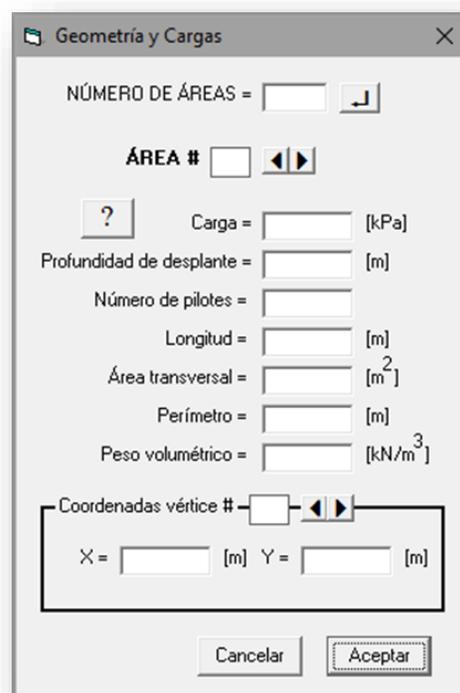
Menu *Archivo*: Esta janela permite ter acesso a todas as opções ou sub-menus que tradicionalmente aparecem em qualquer programa e que comumente são denominados quadros de diálogo.

- a) *Nuevo*
- b) *Abrir*
- c) *Guardar*
- d) *Propiedades*
- e) *Imprimir*
- f) *Salir*

Sub-Menu *Nuevo*: Este quadro de diálogo permite ingressar uma nova análise partindo do preenchimento do formulário de *Geometria y Cargas* como se apresenta na Figura A2, No qual aparecem os quadros de texto para ser diligenciados com informação correspondente ao tipo de projeto que se deseja analisar e quines serão explicados mais para frente.



a) Interfase do menu arquivo.



b) Sub-Menu Geometria e cargas.

Figura A2. Menu Arquivo com seus correspondentes Sub.Menus e quadros de diálogo.

Sub-Menu *Abrir*: Este quadro de diálogo permite abrir ou carregar no programa uma análise previamente já guardada com extensão tipo *ARE*, e na qual se deseja continuar trabalhando sem necessidade de começar novamente o preenchimento do formulário *Geometria y Cargas*, (Figura A3).

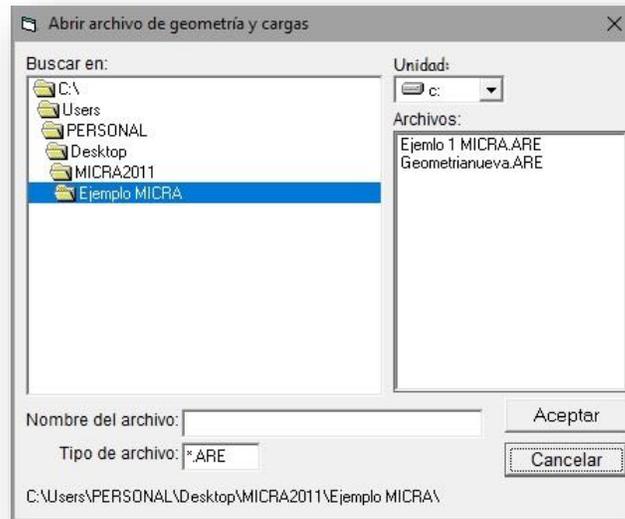


Figura A3. Sub-Menu Abrir com opções de abrir uma análise anterior em formato. ARE.

Sub-Menu *Guardar*: Neste quadro de diálogo é possível salvar a informação correspondente a três tipos de funcionalidades, a primeira faz referência ao formulário de *Geometria y Cargas* que foi inicialmente diligenciado, a segunda e terceira funcionalidade correspondem aos resultados de tensões e recalques verticais do sistema de fundação implementado, (Figura A4).

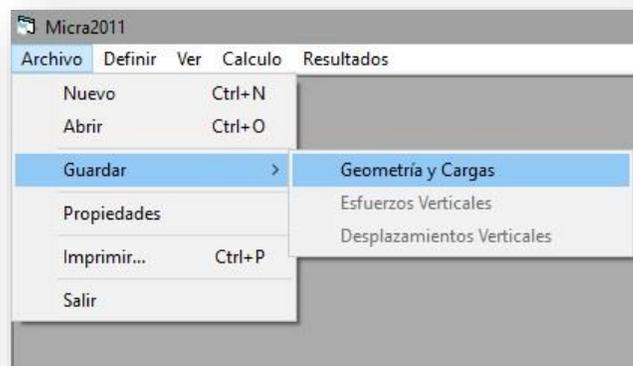


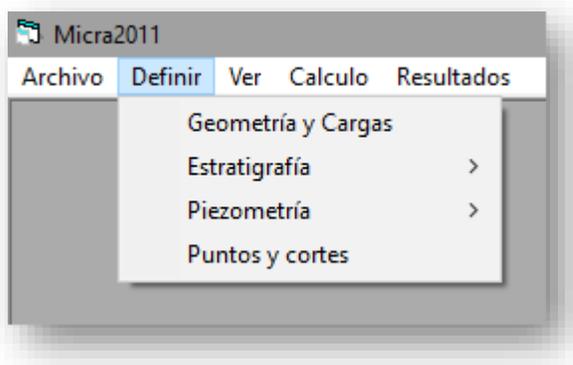
Figura A4. Sub-Menu Guardar com opções de salvar uma análise anterior em formato. ARE.

Sub-Menu *Imprimir*: Este quadro de diálogo permite imprimir os resultados de tensões e recalques verticais do sistema de fundação implementado.

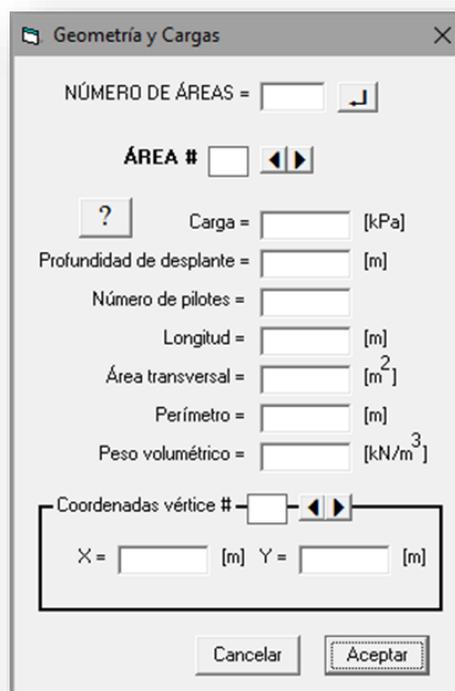
Sub-Menu *Salir*: Finalmente está a opção permite sair do Menu *Archivo*, mediando este quadro de diálogo.

Menu *Definir*: O menu *Definir*, a presentado na Figura A5, permite começar a ingressar toda a informação relevante do projeto de sistema de fundação a ser analisado; os diferentes formulários ou sub-menus para preencher esta informação são listados assim:

- a) *Geometria y Cargas*
- b) *Estratigrafía*
- c) *Piezometria*
- d) *Puntos y Cortes*



a) Interfase do menu definir.



b) Sub Menu Geometria e Cargas.

Figura A5. Quadro de diálogo com a definição dos parâmetros iniciais do projeto.

Sub-Menu *Geometria y Cargas*: O primeiro formulário a ser preenchido corresponde à definição da geometria em planta da área que se deseja analisar junto com todas os dados que

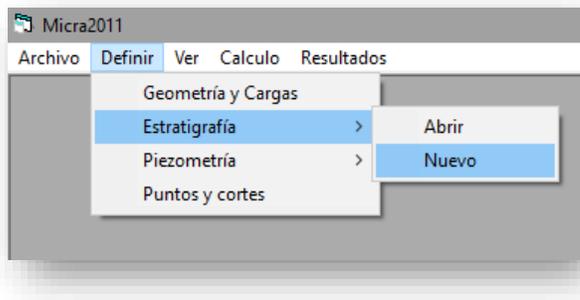
permitem definir num começo as propriedades gerais do projeto. Na seguinte lista são explicados cada um dos quadros de texto presentes no formulário.

- *Número de Áreas*: O número de áreas corresponde a subdivisão de setores no qual se deseja colocar certa quantidade de inclusões ou de estacas como sistema de fundação.
- *AREA*: Se refere ao *label* que informa a áreas na qual se estão preenchendo os dados para sua posterior análise
- *Carga*: Corresponde a carga que se deseja colocar sobre o número de estacas escolhido simulando o peso da superestrutura. (As unidades do valor a ingressar são em [Kpa]).
- *Profundidad de desplante*: Se refere a profundidade na qual se desejam incluir as estacas (As unidades do valor a ingressar são em [m]).
- *Número de pilotes*: Corresponde ao número de estacas que serão incluídas no solo como sistema de fundação dentro da área de estudo.
- *Longitud*: Se refere ao comprimento das estacas (As unidades do valor a ingressar são em [m]).
- *Área transversal*: Corresponde a área da secção transversal de cada estaca. (As unidades do valor a ingressar são em [m²]).
- *Perimetro*: Se refere ao perímetro da secção transversal de cada estaca. (As unidades do valor a ingressar são em [m]).
- *Peso Volumétrico*: Corresponde ao peso específico do material de cada estaca. (As unidades do valor a ingressar são em [kN/m³]).
- *Coordenadas Vértice #*: Se refere a *label* no qual se informa o número do vértice que se está preenchendo nos quadros de texto da coordenada X e a coordenada Y.
- *Cuadro de texto X*: Correspondente a posição do vértice na coordenada X.
- *Cuadro de texto Y*: Correspondente a posição do vértice na coordenada Y.

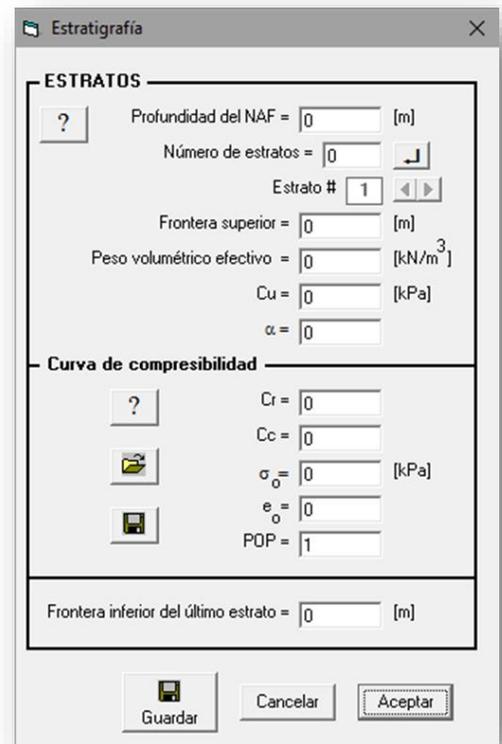
Sub-Menu *Estratigrafia*: O seguinte quadro de diálogo corresponde ao preenchimento do formulário relacionado com a estratigrafia do solo de fundação, no qual os quadros de texto permitem ingressar os dados e as informações pertinentes a descrição das diferentes camadas de solo do perfil estratigráfico que se deseja analisar como se consegue observar na Figura A6, além disso, é possível ingressar informações sobre o comportamento dos recalques

mediante curvas de compressibilidade obtidas de ensaios de adensamento unidimensional. Na seguinte lista são explicados cada um dos quadros de texto presentes no formulário:

- *Profundida del NAF*: Se refere a profundidade no qual se encontra o lençol freático.
- *Número de estratos*: Corresponde ao número de camadas que serão adicionadas no perfil estratigráfico do solo de fundação.
- *Estrato #*: Se refere ao *label* de identificação da camada na qual se está preenchendo a informação do formulário.
- *Frontera superior*: Corresponde a fronteira superior de cada camada ingressada no perfil estratigráfico
- *Peso volumétrico efectivo*: Se refere ao peso específico do solo de cada camada, em condições efetivas.
- *Cu*: Corresponde a resistência não drenada do solo de cada camada
- α : Se refere ao parâmetro alfa
- *Cr (Curva compresibilidad)*:Corresponde ao índice de recompressão da curva de compressibilidade.
- *Cc (Curva compresibilidad)*:Se refere ao índice de compressão da curva de compressibilidade.
- σ_o (*Curva compresibilidad*):Corresponde a tensão total inicial de para cada camada de solo.
- *eo (Curva compresibilidad)*:Se refere ao índice de vazios inicial da curva de compressibilidade.
- *POP*: Corresponde a tensão de sobre adensamento.



a) Interfase do menu definir.



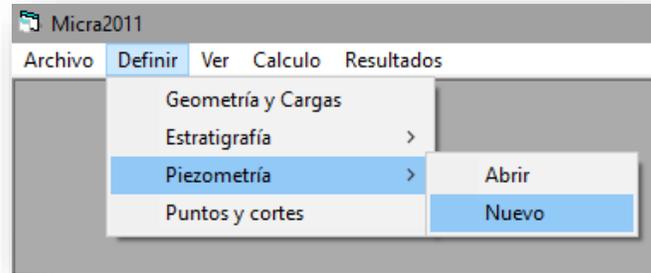
c) Sub Menu Estratigrafia.

Figura A6.Quadro de diálogo com a definição da estratigrafia do projeto

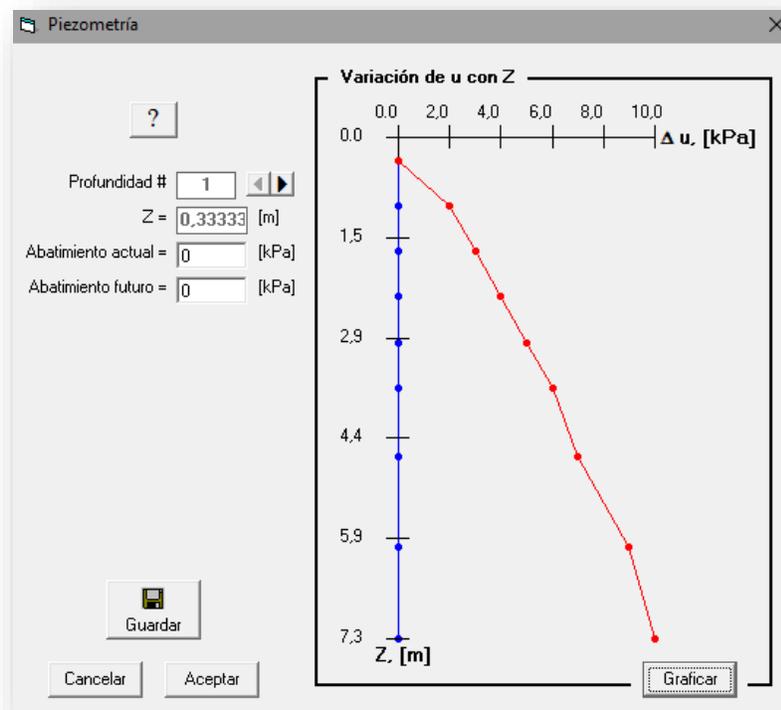
Sub-Menu *Piezometria*: O quadro de diálogo correspondente ao formulário da *Piezometria* (Figura A7) o qual permite ingressar informação relacionada com os diferentes rebaixamentos inicial e futuro ao que serão submetidas as análises; estes rebaixamentos correspondem as condições iniciais e finais nas quais se encontra a poro-pressão para as simulações da subsidência regional. Na seguinte lista são explicados cada um dos quadros de texto presentes no formulário:

- *Abatimiento actual*: Corresponde a condição inicial na qual se encontram as poro-pressões nas camadas de solo da estratigrafia.
- *Abatimiento futuro*: Corresponde a condição final na qual se encontram as poro-pressões nas camadas de solo da estratigrafia.
- *Profundidad #*: Se refere ao *label* que identifica o número da profundidade.

- Z:Corresponde a profundidade na qual foram subdivididas as camadas e onde serão calculados as tensões verticais e os recalques verticais.



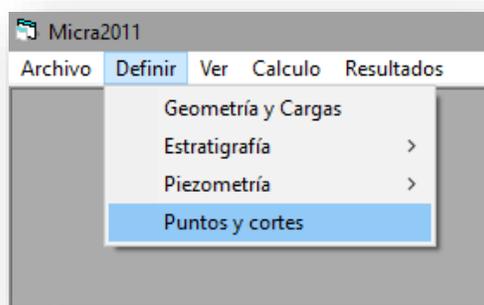
a) Interfase do menu definir.



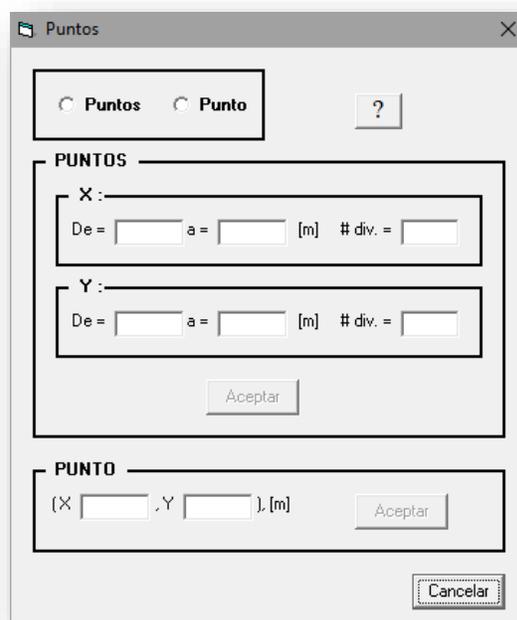
b) Sub Menu Piezometria.

Figura A7. Quadro de diálogo com a definição das condições piezométricas do projeto

Sub-Menu *Puntos y Cortes*: Este formulário (Figura A8) permite escolher os pontos na superfície onde vão ser calculadas as tensões verticais finais e os recalques verticais, tendo a opção de escolher só um ponto na superfície ou vários pontos que permitam criar um corte para posteriormente ter uma maior densidade de informação no momento de desenvolver uma análise.



a) Interfase do menu definir.

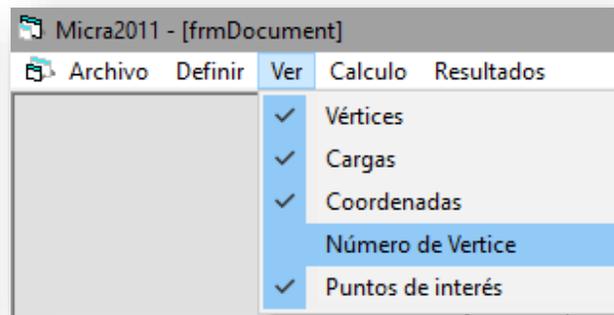


b) Sub Menu Pontos e Cortes.

Figura A8. Quadro de diálogo com a definição dos pontos de análise do projeto.

Menu *Ver*: O menu *ver*, corresponde ao menu gráfico do aplicativo, onde se consegue visualizar em 2D (Figura A9) algumas informações que foram ingressadas nos formulários anteriores; este menu apresenta quatro sub-menus de opções listadas assim:

- a) *Vértices*: Se refere aos vértices da área de trabalho.
- b) *Cargas*: Corresponde as cargas ingressadas para cada área de trabalho.
- c) *Coordenadas*: Se refere as coordenadas da área de trabalho.
- d) *Puntos de interes*: Corresponde aos pontos da superfície escolhidos para os cálculos.



a) Interfase do menu Ver.

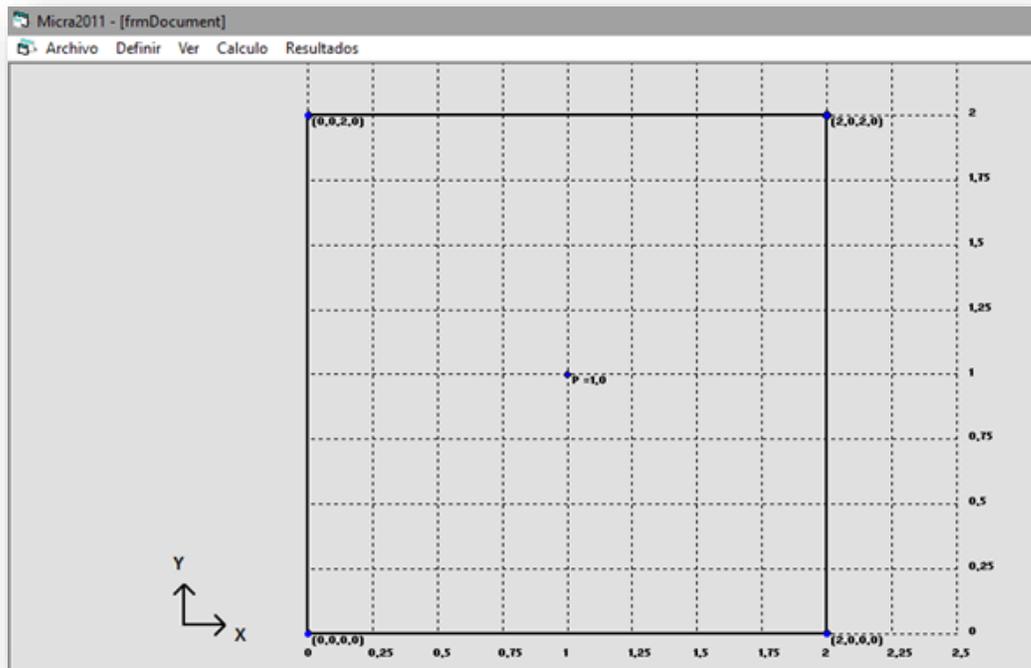


Figura 1. Visualização das diferentes opções de o menu ver.

Figura A9. Quadro de diálogo do menu ver e suas opções de visualização de informação.

Menu *Calculo*: O menu permite realizar os cálculos correspondentes a profundidade do Nível Neutro, tensões verticais e recalques finais do sistema de fundação ingressado, quem em final são os produtos aos quais o modelo analítico pretende chegar com a análise.

- a) *Nível neutro.*
- b) *Esfuerzos y Asentamientos*

Sub-Menu *Nível neutro*: Este quadro de diálogo permite calcular a profundidade do nível neutro para cada área com inclusões. O cálculo se realiza por médio de iterações variando a profundidade do nível neutro (Z_o) até cumprir a seguinte igualdade:

$$Q_{min} - Cap_{Pun} = Fri_{PoPil} - Fri_{NePil} \quad (\text{Figura A11})$$

onde;

Z_s =Profundidade da ponta superior das estacas.

Z_o =Profundidade do nível Neutro.

Z_p =Profundidade da ponta inferior das estacas.

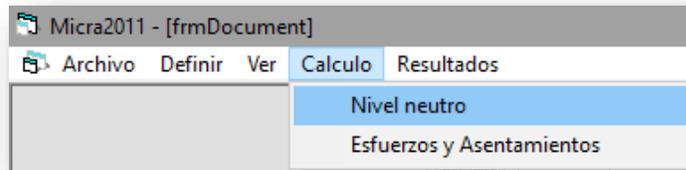
Q_{min} =Carga mínima transmitida nas estacas.

Cap_{Pun} =Capacidade de carga por ponta das estacas.

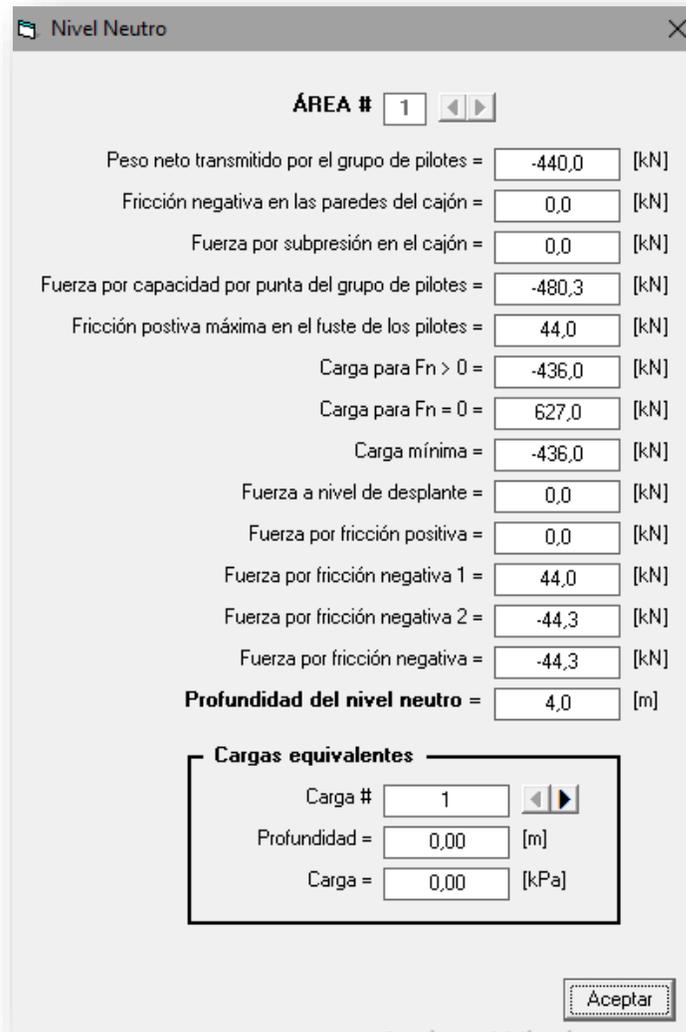
Fri_{PoPil} = Atrito positivo gerado nas estacas e medido desde Z_s até Z_o .

Fri_{NePil} = Atrito negativo gerado nas estacas medido desde Z_o até Z_p .

Neste procedimento, são calculadas também outras variáveis dependentes que determinam o número de iterações necessárias para encontrar a profundidade do nível neutro, estas variáveis no final do cálculo são apresentadas nos diferentes quadros de texto da janela *Nível Neutro* (Figura A10), as definições e equações correspondentes a estas variáveis são listadas a continuação:



a) Interfase do menu Calculo.



b) Sub- menu cálculo do nível neutro.

Figura A10. Quadro de diálogo do menu cálculo do nível neutro com suas variáveis dependentes.

- *Peso neto transmitido por el grupo de pilotes:* Corresponde ao peso transmitido a cada camada de solo transmitido pelo grupo das estacas do sistema de fundação:

$$CarPil = Apil * (Hl(i + 1) - Hl(i)) * (PeVoPil - Gama) * Npil$$

(Figura
A11)

onde;

CarPil=Peso neto transmitido pelas estacas.

Apil=Área transversal da secção das estacas.

PeVolPil=Peso específico do material de construção das estacas.

Gama=Peso específico da camada do solo.

Npil=Numero de estacas do sistema de fundação.

Hl(i+1) -Hl(i)= Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

- *Fricción negativa en las paredes del cajón:* Se refere ao atrito negativo gerado nas paredes da caixa de fundação, se for necessário adicionar no sistema de fundação.

$$FriNegCa = Alfa * Su * 2 * (Cpto + Lgra) * (Hl(i + 1) - Hl(i))$$

(Figura
A11)

onde;

FrinNegCa=Atrito negativo da caixa de fundação.

Alfa=Fator de aderência.

Su=Resistencia não drenada de cada camada de solo.

Cpto =Comprimento da área projetada de trabalho.

Lgra =Largura da área projetada de trabalho.

Hl(i+1) -Hl(i)= Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

- *Fuerza por subpresion em el cajón*: Corresponde a força gerada por sub-pressão na caixa de fundação quando fosse o caso de adicionar no sistema de fundação.

$$FuSubp = 10 * (Df - Znaf) * Cpto * Lgra$$

(Figura
A11)

onde;

FuSubp= Força gerada por sub-pressão.

Df=Profundidade ou nível de instalação das estacas.

Znaf=Profundidade do lençol freático.

Cpto =Comprimento da área projetada de trabalho.

Lgra =Largura da área projetada de trabalho.

Hl(i+1) -Hl(i)= Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

- *Fuerza por capacidad por punta del grupo de pilotes*: Se refere a força gerada pela capacidade que conseguem atingir as pontas do grupo das estacas no sistema de fundação.

$$CapPun = (Su * 9 + Esftot) * Apil * Npil$$

(Figura
A11)

$$Esftot = Gama * (Hl(i + 1) - HL(i))$$

(Figura
A11)

onde;

CapPun= Capacidade de carga por ponta das estacas.

Su= Resistencia não drenada de cada camada de solo.

Esftot=Tensão vertical inicial de cada camada.

Apil = Área transversal da secção das estacas.

N_{pil} = Numero de estacas do sistema de fundação.

$HL(i+1) - HL(i)$ = Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

- *Fricción positiva máxima em el fuste de los pilotes*: Corresponde ao atrito positivo máximo gerado ao longo do fuste de cada estaca no sistema de fundação.

$$FricPosMax = Alfa * Su * Ppil * Npil * (HL(i + 1) - HL(i))$$

(Figura
A11)

onde;

$FriPosMax$ = Atrito positivo máximo.

Su = Resistencia não drenada de cada camada de solo.

$Alfa$ = Fator de aderência.

$Ppil$ = Perímetro de cada estaca.

$Npil$ = Numero de estacas do sistema de fundação.

$HL(i+1) - HL(i)$ = Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

- *Carga para $F_n > 0$* : Se refere a carga gerada no grupo de estacas para a condição onde o atrito negativo e maior que zero.

$$Q1 = Carga * (Cpto * Lgra) + FriNegCa - FuSubp + CarPil$$

(Figura
A11)

onde;

$Q1$ = Carga no grupo de estacas na condição 1.

$Carga$ = Carga de analises inicialmente adotada simulando o peso da superestrutura.

$FuSubp$ = Força gerada por sub-pressão.

$FriNegCa$ = Atrito negativo da caixa de fundação.

$CarPil$ = Peso neto transmitido pelas estacas.

$Cpto$ = Comprimento da área projetada de trabalho.

$Lgra$ = Largura da área projetada de trabalho.

- *Carga para $F_n=0$* : Se refere a carga gerada no grupo de estacas para a condição onde o atrito negativo e igual que zero.

$$Q2 = CapPun + FricPosMax \quad \text{(Figura A11)}$$

onde;

$Q2$ = Carga no grupo de estacas na condição 2.

$CapPun$ = Capacidade de carga por ponta das estacas.

$FriPosMax$ = Atrito positivo máximo.

- *Carga mínima*: Se refere a carga mínima gerada no grupo de estacas para e quem determina se o sistema de fundação de estacas está trabalhando em grupo o individual, mediante a seguinte desigualdade:

$$\text{Si } Q1 < Q2 \text{ então } Qmin = Q1, \quad \text{no caso contrario } Qmin = Q2 \quad \text{(Figura A11)}$$

- *Fuerza a nível de desplante*: Corresponde a força gerada na profundidade onde são cravadas as estacas.

$$FuCim = FuCim - (Ga * (HL(i + 1) - HL(i))) * (Cpto * Lgra) \quad \text{(Figura A11)}$$

onde;

$Fucim$ = Força na profundidade de instalação das estacas.

Ga = Peso específico total da camada de solo.

$Cpto$ = Comprimento da área projetada de trabalho.

$Lgra$ = Largura da área projetada de trabalho.

$HL(i+1) - HL(i)$ = Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

- *Fuerza por fricción positiva*: Corresponde ao atrito positivo gerado no grupo de estacas do sistema de fundação; calculado desde Z_s até Z_o

$$FriPoPil = Alfa * Su * Ppil * Npil * (HL(i + 1) - HL(i))$$

(Figura
A11)

onde;

$FriPoPil$ = Atrito positivo.

Su = Resistencia não drenada de cada camada de solo.

$Alfa$ = Fator de aderência.

$Ppil$ = Perímetro de cada estaca.

$Npil$ = Numero de estacas do sistema de fundação.

$HL(i+1) - HL(i)$ = Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

- *Fuerza por fricción negativa*: Corresponde ao atrito negativo gerado no grupo de estacas do sistema de fundação; calculado desde Z_o até Z_p :

$$FriNePil = Alfa * Su * Ppil * Npil * (HL(i + 1) - HL(i))$$

(Figura
A11)

onde;

$FriNePil$ = Atrito Negativo.

Su = Resistencia não drenada de cada camada de solo.

$Alfa$ = Fator de aderência.

$Ppil$ = Perímetro de cada estaca.

$Npil$ = Numero de estacas do sistema de fundação.

$HL(i+1) - HL(i)$ = Longitude da estaca, concordante com a longitude de cada camada.

Uma vez calculada a profundidade do Nível Neutro, é calculado o número, a profundidade e a carga correspondente a cada uma das áreas equivalentes da seguinte forma:

- *Carga #*: Se refere ao *label* de identificação da carga equivalente que se está calculando.
- *Profundidad*: Corresponde à profundidade na qual se calcula a carga equivalente.
- *Carga*: Se refere à carga equivalente calculada.

$$Q_s = \frac{Nc * Su_u^s * Apil * Npil}{A_G} * (-1) \quad \text{(Figura A11)}$$

$$Q_p = \frac{Nc * Su_u^p * Apil * Npil}{A_G} * (+1) \quad \text{(Figura A11)}$$

$$f_N^n = \frac{Nc^n * Su_u^n * Ppil * Npil * Lpil}{A_G} * (-1) \quad \text{(Figura A11)}$$

$$f_P^n = \frac{Nc^n * Su_u^p * Ppil * Npil * Lpil}{A_G} * (+1) \quad \text{(Figura A11)}$$

onde;

Q_s = Carga equivalente por ponta superior.

Q_p = Carga equivalente por ponta inferior.

A_G =Área ocupada pelo grupo de estacas.

$Ppil$ = Perímetro de cada estaca.

$Npil$ = Numero de estacas do sistema de fundação.

$Lpil$ = Comprimento tributário da estaca.

f_N = Carga por atrito negativo para a área equivalente n.

f_P = Carga por atrito positivo para a área equivalente n.

S_u = Resistencia não drenada de cada camada de solo.

α = Fator de aderência.

Sub-Menu *Esfuerzos y Asentamientos*: Neste quadro de diálogo, são calculadas as seguintes variáveis:

- O cálculo da tensão efetiva (σ_z) inicial para cada estratigrafia por médio do peso volumétrico efetivo de cada estrato, mas o abatimento piezométrico inicial.
- O cálculo do incremento de tensões gerado pelas cargas equivalentes mais o rebaixamento piezométrico inicial ($\Delta\sigma_z$), em cada um dos pontos de interesse.
- Finalmente o cálculo dos recalques (ΔH), por médio da implementação das seguintes equações.

$$\Delta H = H * \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (\text{Figura A11})$$

Para curvas de compressibilidade (Figura A11) onde;

ΔH = Variação da espessura da camada.

Δe = Variação da relação de vazios.

e_o = Índice de vazios inicial.

H = Espessura da camada de solo

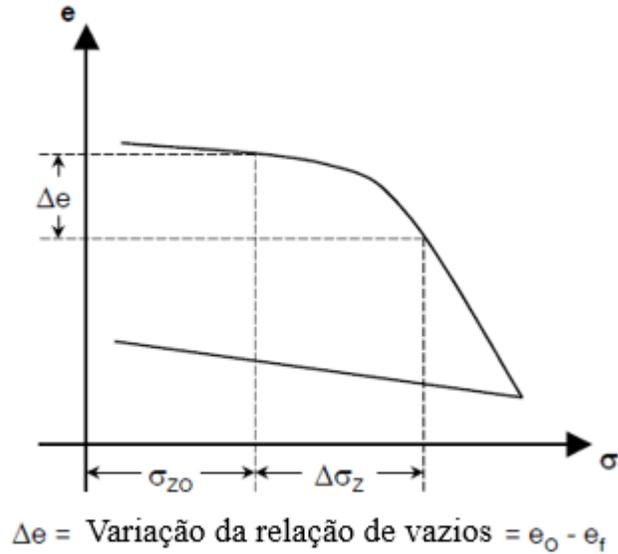


Figura A11. Cálculo de recalques. Modificado de Adaptado de (Rodríguez, 2010)

$$\Delta H = H * m_V * \Delta \sigma_Z$$

(Figura A11)

Para o coeficiente de variação volumétrica;

ΔH = Variação da espessura da camada.

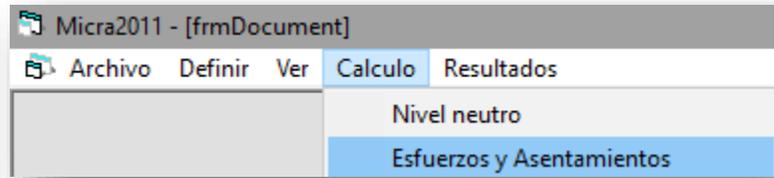
m_V = Coeficiente de variação volumétrica.

$\Delta \sigma_Z$ = Incremento de tensões.

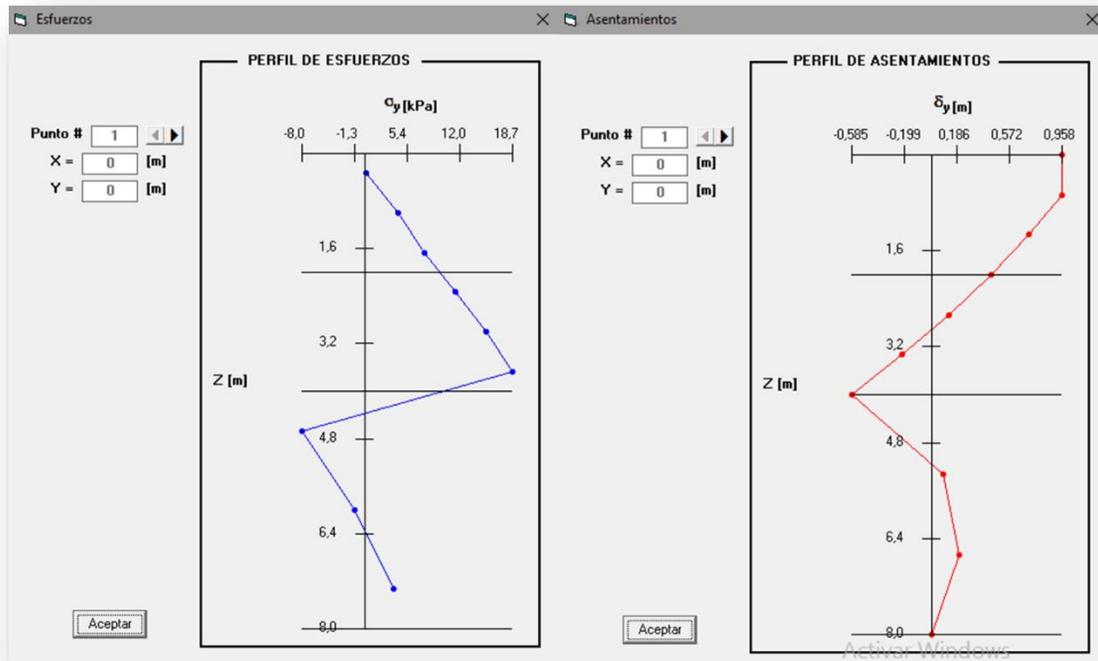
H = Espessura da camada de solo

Menu *Resultados*: Finalmente o menu Resultados (Figura A12), apresenta graficamente os resultados correspondentes tanto para o perfil de tensões verticais finais com para o perfil de recalques verticais ao longo da profundidade da estratigrafia; para cada ponto da superfície escolhido no formulário de *Puntos y Cortes*.

- a) *Perfil de Esfuerzos*: Se refere ao perfil de tensões verticais finais.
- b) *Perfil de Asentamientos*: Se refere ao perfil de recalques verticais finais.



a) Interfase do menu Calculo



b) Sub- menu cálculo dos recalques e tensões verticais finais do projeto.

Figura A12. Quadro de diálogo do menu cálculo dos recalques e tensões do sistema de fundação analisado.

Uma vez calculadas as tensões e recalques finais, o programa permite visualizar os resultados obtidos, em forma gráfica como se apresentou anteriormente ou exportando a informação por médio de um arquivo de texto.