

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CÂMPUS VOTUPORANGA

PHAMELA CAMILA PERES FERREIRA CONTADINI

**BULBO DE TENSÕES:
UM DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL GRÁFICO A PARTIR DA TEORIA
DA ELASTICIDADE COM GERAÇÃO DE RELATÓRIO EM *PDF***

VOTUPORANGA

2018

Phamela Camila Peres Ferreira Contadini

**BULBO DE TENSÕES:
UM DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL GRÁFICO A PARTIR DA TEORIA
DA ELASTICIDADE COM GERAÇÃO DE RELATÓRIO EM *PDF***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus Votuporanga.

Professora Orientadora: Ma. Cristiane Prado Marin.

Votuporanga

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

| | |
|-------|--|
| C759b | <p>Contadini, Phamela Camila Peres Ferreira, 1989- Bulbo de tensões: um desenvolvimento computacional gráfico a partir da teoria da elasticidade com geração de relatório em PDF / Phamela Camila Peres Ferreira Contadini – Votuporanga, 2018. 65 p. : il. color.; 29,8 cm. Bibliografia: p. 57-59 Inclui Apêndices</p> <p>Orientadora: Cristiane Prado Marin Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, 2018.</p> <p>1. Resistência dos solos. 2. Solos – elasticidade. 3. Software – desenvolvimento. 4. Gráficos em engenharia. 5. Relatórios técnicos. I. Título.</p> <p>CDD – 624.151360285</p> |
|-------|--|

Phamela Camila Peres Ferreira Contadini

**BULBO DE TENSÕES:
UM DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL GRÁFICO A PARTIR DA TEORIA
DA ELASTICIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus Votuporanga.

Professora Orientadora: Ma. Cristiane Prado Marin.

Aprovado pela banca examinadora em 26 de junho de 2018.

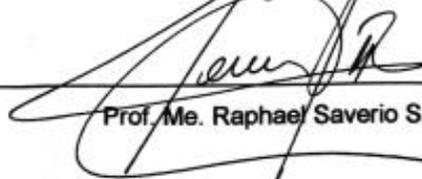
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Ma. Cristiane Prado Marin



Prof. Ma. Angélica Paiva Ramos



Prof. Me. Raphael Saverio Spozito

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, presente em todos os momentos de minha jornada.

Meus pais, Suely Aparecida Peres Ferreira e Aldenor dos Santos Ferreira foram fundamentais nesta fase, pois todo o apoio, incentivo e motivação permitiram que eu finalizasse este trabalho e também o curso. Meus sobrinhos e cunhados queridos, Vitor e Theo, e Geraldo e Helena, que me fazem querer ser uma pessoa melhor a cada dia.

Ao meu marido, Leandro de Faria Contadini, que desde o início da minha jornada acadêmica, há 10 anos me apoia e incentiva, mesmo diante das dificuldades e da distância.

Minha sogra, Mércia de Faria, pelo carinho e preocupação de sempre. Bem como, meu sogro Geraldo e sua esposa Thaís pelo apoio contínuo.

Em especial, a Profa. Ma. Cristiane Prado Marin, que além de orientadora foi professora, amiga, motivadora e dona de uma índole admirável. Meus sinceros agradecimentos, não somente pela orientação deste trabalho, mas também por ser responsável pelo meu crescimento intelectual, pessoal e profissional.

As amigas conquistadas ao longo da graduação: Isabella Cássia, por toda ajuda em programação e no dia - a - dia em sala de aula, Priscila Bordini e Isabela Pietrobon por todo companheirismo pessoal e acadêmico. Ao colega Gabriel Morgan, por sempre ser prestativo e não medir esforços para ajudar o próximo, além dos ensinamentos em programação.

Enfim, agradeço a todos que foram essenciais para a iniciação e término deste trabalho, além daqueles que incentivaram minha permanência e finalização deste curso de Engenharia Civil.

EPÍGRAFE

"Um dia, quando olhar para trás, os anos de luta lhe parecerão os mais bonitos".

Sigmund Freud

RESUMO

Correlacionar o comportamento real do solo quando este está sujeito a uma sobrecarga com o dimensionamento de uma estrutura está longe de ser uma tarefa fácil devido às particularidades, principalmente do solo. Dessa forma, a Teoria da Elasticidade visa facilitar e permitir os cálculos estruturais com certa segurança, baseado em constatações empíricas. O solo quando não está carregado, possui tensões em um plano horizontal que dependem de suas características intrínsecas e da altura do material depositado acima deste plano. Com o carregamento aplicado este valor de tensão advém do formato desta sobrecarga. Então existem diversas equações que descrevem o comportamento do acréscimo de tensão no solo para cada tipo de carregamento. Nesta pesquisa foram abordadas as Equações de Boussinesq para uma carga concentrada, as Equações de Melan para uma carga linear e as Equações para uma sapata corrida. Dessa forma, com tais equações o *software* desenvolvido é alimentado com o mínimo de informações, como a sobrecarga aplicada, por exemplo, e automaticamente é executado o bulbo de tensões e gerado um relatório completo em *pdf* contendo todas as informações pertinentes para *download*. Este estudo tem como objetivos principais alcançar a esfera acadêmica, já que são conteúdos que fazem parte da grade curricular de diversos cursos superiores e tecnólogos, além de possibilitar a previsão de recalque, devido às intersecções de bulbos ocasionados pela proximidade dos edifícios, por escritórios de projetos de fundação.

Palavras-chave: Teoria da Elasticidade. Bulbo de Tensões. Relatório em *pdf*. Equação de Boussinesq. Equação de Melan. Equação para sapata corrida.

ABSTRACT

Correlating real soil behavior when it is subjected to an overload with the dimensioning of a structure is far from being an easy task due to particularities, especially the ones from the soil. This way, the elasticity theory aims to facilitate and allow the structural calculations with certain security, based on empirical verification. When the soil is not charged, it has stresses in a horizontal plan that depend on its intrinsic characteristics on the height of the material deposited on this plan. With the applied load, this stress value comes from the shape of this overload. Therefore, there are several equations that describe the behavior of stress increase on soil for each kind of load. In this research, the Boussinesq Equations were approached for a concentrated load, Melan Equations for a linear load and the Equations for a footing beam. This way, with such equations, the software developed is filled with the minimum of information, for example the overload applied, and automatically the stresses bulb is performed and a complete report is made in *pdf* with all the pertinent information for *download*. This research has as the objective to reach the academic sphere, as the contents are part of the curricular grade of several degree and technical courses, besides making possible the prediction of settlement, due to the intersection of bulbs caused by the proximity of buildings, by offices of foundation projects.

Keywords: Theory of Elasticity. Bulb of Tensions. PDF Report. Boussinesq Equation. Melan Equation. Equations for a footing beam.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - a) Problema real, b) Superestrutura e fundação isoladas e c) modelo com vínculos elásticos..... | 24 |
| Figura 2 - Bulbo de tensões pelo SAP2000 considerando a interação solo - estrutura | 25 |
| Figura 3 - Informações referentes ao recalque no edifício Núncio Malzoni em Santos | 26 |
| Figura 4 - Edifício Mahembi a esquerda da foto, inclinado em direção ao Paineiras, à direita..... | 27 |
| Figura 5 - Esquema das forças que atuam no contato entre grãos e suas componentes..... | 28 |
| Figura 6 - Tensões Geostáticas horizontais | 31 |
| Figura 7 - Deformação no solo como consequência de deslocamento de partículas | 32 |
| Figura 8 - Tensões geradas no maciço devido ao carregamento pontual | 33 |
| Figura 9 - Tensões geradas no maciço devido ao carregamento linear | 35 |
| Figura 10 - Tensões geradas no maciço devido à sapata corrida | 36 |
| Figura 11 - Distribuição de tensões com a profundidade..... | 37 |
| Figura 12 - Espriamento das tensões..... | 38 |
| Figura 13 - (a) Espriamento de tensões com a carga dividida em duas faixas (b) Sobreposição da distribuição real e aproximada | 38 |
| Figura 14 - Distribuição de tensões em sapatas rígidas e flexíveis | 40 |
| Figura 15 - Distribuição de tensão simplificada | 41 |
| Figura 16 - Bulbo de tensões de uma carga (a) concentrada e de uma (b) distribuída | 42 |
| Figura 17 - Página da internet em 1994 em um <i>Macintosh</i> | 44 |
| Figura 18 - Tela de edição do Sublime Text 3.0 | 45 |
| Figura 19 - Página da internet em 2018 | 46 |
| Figura 20 - Teste da geração do bulbo de tensões para uma carga pontual mediante planilha do Microsoft Excel..... | 47 |
| Figura 21 - Teste da geração do bulbo de tensões para uma carga linear mediante planilha do <i>Microsoft Excel</i> ®..... | 48 |
| Figura 22 - Página inicial do <i>software</i> | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 23 - Exemplo de geração do bulbo e profundidade máxima atingida | 49 |
| Figura 24 - Erro devido à raiz negativa..... | 50 |
| Figura 25 - Vista da aba Carga Concentrada (Boussinesq) | 51 |
| Figura 26 - Vista da aba Carga Concentrada (Melan) | 52 |
| Figura 27 - Vista da aba Carga Distribuída sobre uma placa retangular | 52 |
| Figura 28 - Visualização do plano cartesiano em malha quadriculada | 54 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|---|
| pdf | Formato portátil de documento |
| kx | Coeficiente de mola na direção x |
| ky | Coeficiente de mola na direção y |
| kz | Coeficiente de mola na direção z |
| F | Força normal |
| N | Componente vertical da força normal |
| T | Componente horizontal da força normal |
| σ | Tensão normal |
| A | Área |
| τ | Tensão cisalhante |
| u | Porosidade |
| γ_w | Peso específico da água |
| h_w | Altura do nível d'água |
| σ' | Tensão efetiva |
| σ_v | Tensão vertical total |
| γ_i | Peso específico da camada de solo |
| z_i | Altura da camada de solo |
| σ'_h | Tensão horizontal efetiva |
| σ'_v | Tensão vertical efetiva |
| K_0 | Coeficiente de empuxo em repouso |
| P | Carga Pontual |
| z | Distância vertical até o ponto de análise |
| x | Distância horizontal até o ponto de análise |
| R | Tangente entre x e z |
| μ | Coeficiente de Poisson |
| q | Carregamento linear |
| α | Ângulo formado entre a extremidade e a posição intermediária da carga |
| β | Ângulo entre a posição vertical e a posição intermediária da carga |
| p | Carregamento distribuído por unidade de área |
| b, b_0 | Base da sapata |
| σ_0 | Tensão inicial |

| | |
|-------------|--------------------------|
| Q | Carga concentrada |
| φ_0 | Ângulo de espraçamento |
| A, B, M, N | Pontos |
| L | Metade da base da sapata |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1. | OBJETIVOS | 21 |
| 1.1.1. | Objetivos Gerais | 21 |
| 1.1.2. | Objetivos Específicos | 21 |
| 2. | REFERENCIAL TEÓRICO | 23 |
| 2.1. | SOLOS | 27 |
| 2.2. | TENSÕES NO SOLO | 28 |
| 2.2.1. | Porosidade e o Princípio das Tensões Efetivas | 29 |
| 2.2.2. | Tensões Iniciais - Condição Geostática | 30 |
| 2.2.3. | Tensão Vertical de Carga Externa | 32 |
| 2.2.3.1. | Solução de Boussinesq - Carga Pontual | 33 |
| 2.2.3.2. | Solução de Melan - Carga Linear | 34 |
| 2.2.3.3. | Carga uniforme sobre uma placa retangular de comprimento infinito | 35 |
| 2.2.4. | Distribuição e Espreadimento de Tensões | 37 |
| 2.2.5. | Distribuição de Tensões Sob a Base da Sapata | 39 |
| 2.3. | BULBO DE TENSÕES | 42 |
| 2.4. | BASES DE PROGRAMAÇÃO | 43 |
| 2.4.1. | HTML | 43 |
| 2.4.2. | JAVASCRIPT | 45 |
| 3. | METODOLOGIA | 47 |
| 3.1. | ABA: CARGA CONCENTRADA (BOUSSINESQ) | 50 |
| 3.2. | ABA: CARGA LINEAR (MELAN) | 51 |
| 3.3. | ABA: CARGA DISTRIBUÍDA SOBRE PLACA RETANGULAR | 52 |
| 3.4. | GERAÇÃO DE RELATÓRIO EM <i>PDF</i> | 53 |
| 3.5. | PLANO CARTESIANO EM MALHA QUADRICULADA | 53 |
| 4. | CONCLUSÕES | 55 |
| | REFERÊNCIAS | |
| | APÊNDICE A – EXEMPLO DE RELATÓRIO GERADO EM PDF: CARGA PONTUAL | |
| | APÊNDICE B – EXEMPLO DO RELATÓRIO GERADO EM PDF: CARGA LINEAR | |
| | APÊNDICE C – EXEMPLO DO RELATÓRIO GERADO EM PDF: SAPATA CORRIDA | |

1. INTRODUÇÃO

Antes do início de qualquer construção, no âmbito da Engenharia Civil, é indispensável o conhecimento das camadas de solo que suportarão toda estrutura, pois somente assim é possível afirmar se o solo resistirá aos esforços que nele irão atuar durante a construção de uma obra e após a sua finalização.

Nesse sentido, para determinar a capacidade resistente do solo, suas características e se há presença de água realiza-se a sondagem do solo. Esta prospecção fornecerá parâmetros para se definir a profundidade e o tipo de fundação empregado. Isto porque, por meio da Geologia, sabe-se que as camadas de solo que constituem a parte superficial da crosta terrestre não são homogêneas e lineares; devido aos processos químicos e físicos que envolvem a formação do solo estar em constante desenvolvimento.

Assim, conhecer apenas as características e particularidades do maciço não é suficiente para definirmos como as tensões serão distribuídas ao longo de sua profundidade e lateralidade, bem como suas deformações e capacidade portante. Para isso, se faz necessário conhecer também o tipo de carregamento que será aplicado em sua superfície.

Na literatura e na prática existe uma grande variedade de carregamentos, a exemplos: carga pontual, carga linear, carga triangular, carga circular, carga trapezoidal, entre outras.

Todos estes carregamentos são responsáveis por induzirem no interior do maciço de solo acréscimos de tensões e conseqüentemente deformações. A partir destas constatações, cada carregamento foi analisado e estudado por pesquisadores da área, a fim de se obter soluções e equações satisfatórias a cerca das envoltórias.

Dessa forma, Pinto (2006) descreve que a união no interior do subsolo de pontos com os mesmos percentuais de tensão aplicada dão origem a linhas denominadas bulbos de tensão. Com o desenho dos bulbos é possível visualizar a distribuição das tensões no solo de acordo com sua profundidade e afastamento lateral; sendo assim, o espraiamento é considerado máximo quando o acréscimo de tensões é próximo de zero. Em projetos, convencionou-se para esta envoltória um acréscimo de tensão igual a 10% da tensão inicial (MACHADO; MACHADO, s.d.).

Então, com tais informações este trabalho começou a se materializar, pois mediante pesquisas e buscas por *softwares* e mecanismos que realizassem de maneira automática, interativa e gratuita a criação dos bulbos de tensões e a geração de um relatório completo com os dados obtidos em *pdf*, notou-se a carência nesta área.

Assim sendo, a realização deste trabalho embasado em conceitos de uso frequente nas universidades, faculdades e em escritórios de projetos de engenharia, principalmente, tem o intuito de:

- Nas universidades e faculdades:
 - Permitir que os discentes visualizem realmente o bulbo de tensão, de forma que os valores de profundidade e afastamento horizontal também estejam presentes. Criando assim um melhor desenvolvimento cognitivo sobre o assunto e a percepção de grandeza;
 - Compreender o formato do bulbo e o espraiamento das tensões;
 - Aumentar o contato dos alunos com ferramentas que desenvolvam aptidões técnicas na área;
 - Agregar conhecimentos como uma nova metodologia para os docentes durante suas aulas;
 - Contribuir com o Núcleo de Engenharia Virtual e Experimental (NEVE) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus de Votuporanga.

- Em escritórios de projetos de engenharia:
 - Possibilitar a obtenção de dados para o cálculo do recalque diferencial de fundações; principalmente em grandes centros urbanos, que devido ao aumento da densidade populacional levou a verticalização das edificações e a maior proximidade entre elas; gerando então, possíveis sobreposições de bulbos de tensões.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos Gerais

Desenvolvimento e criação de um *software* que forneça a parte gráfica e os valores das tensões ao longo do bulbo produzido mediante uma malha quadriculada. Além da geração de um relatório completo em *pdf* passível de *download* contendo os máximos valores de profundidade e afastamento lateral.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Fornecer a representação gráfica dos bulbos de tensões de acordo com os diferentes carregamentos aplicados e dados fornecidos pelo usuário.
- b) Verificar a veracidade dos cálculos e resultados obtidos pelo *software*.
- c) Emitir relatórios completos no formato *pdf*.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nos meados de 2003, Vitoreti (2003) discorria em sua dissertação a respeito da relação entre o solo e a estrutura e afirmava que a falta de resultados conclusivos e as incertezas na área ocorriam devido ao isolamento entre as subáreas da Engenharia Civil, de estruturas e de geotecnia.

O passar dos anos e o desenvolvimento computacional, relacionados a *softwares* para cálculos estruturais, vem mudando essa perspectiva e permitindo a aproximação dessas subáreas. E também proporcionando uma melhor acurácia no desenvolvimento de projetos.

A prática de muitos escritórios voltados ao cálculo estrutural consiste na determinação das dimensões dos elementos que formam a estrutura de acordo com um conjunto específico de carregamentos. Sendo a estrutura formada pela união de elementos como vigas, pilares e lajes.

De maneira convencional, os apoios das estruturas, que denominamos fundações, são admitidos como indeslocáveis, sejam engastados ou rotulados, o que resultam em reações de apoio (verticais, horizontais e momentos fletores, dependendo do tipo de vinculação). Essas cargas são então repassadas ao engenheiro de fundações, que realiza o dimensionamento, calculando seus recalques atuantes e comparando-os com os admissíveis.

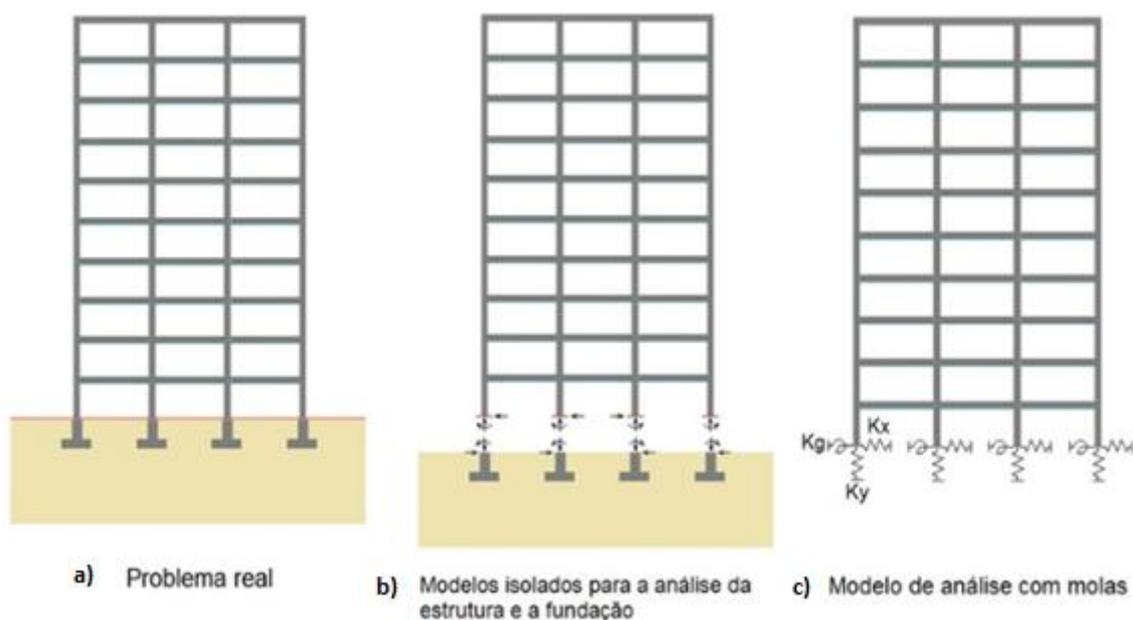
No entanto, sabe-se que “devido a deformações ocorrentes no solo, as fundações solicitam a superestrutura, geralmente hiperestática, de maneira diferente da hipótese dos apoios indeslocáveis, modificando os esforços atuantes na estrutura” (IWAMOTO, 2000. p.01).

Isto é, a hipótese de vínculos engastados ou rotulados conduz a resultados que não condizem com o comportamento verdadeiro da estrutura, pois subentende - se que os esforços estruturais não dependem do solo. Assim sendo, o cálculo que considera esta relação mútua entre superestrutura, infraestrutura e maciço de solo se ajusta melhor ao comportamento real da distribuição de tensões e deformações.

Do que se tem contato atualmente, alguns *softwares* que já estão no mercado realizam esta interação; podemos citar: o SAP2000, o Eberick e o CAD/TQS. Simplificadamente, tais programas adotam coeficientes de mola (vínculos elásticos) para representar o comportamento do solo (IGLESIA, s.d.).

Afim de entendimento, a Figura 1 representa um edifício que pode ser dimensionado utilizando o modelo de apoios indeslocáveis ou com vinculação elástica.

Figura 1 - a) Problema real, b) Superestrutura e fundação isoladas e c) modelo com vínculos elásticos

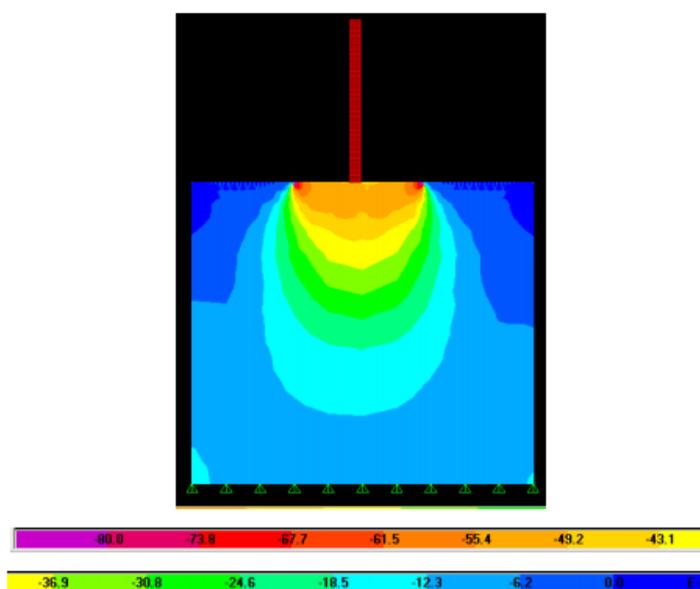


Fonte: Adaptado, Iglesia, Socrate Munóz, s.d.

Porto (2010) em sua dissertação realizou um estudo que tinha como objetivo principal verificar os bulbos de tensões provenientes de um edifício piloto de 11 pavimentos, utilizando 03 relatórios de sondagens SPT reais. A modelagem do edifício se deu pelo Método dos Elementos Finitos no SAP2000. E o maciço foi modelado considerando apoio elástico, conforme a formulação proposta por Winkler, e meio contínuo, adotando o solo como elementos sólidos cujas dimensões respeitam as equações do bulbo de tensões estabelecidas por Boussinesq.

Segue na Figura 2 um dos bulbos de tensões obtidos no trabalho de Porto (2010):

Figura 2 - Bulbo de tensões pelo SAP2000 considerando a interação solo - estrutura



Fonte: Porto (2010)

Os resultados obtidos por ele indicaram que os modelos que não consideram a interação solo - estrutura superestima a previsão dos recalques diferenciais, por não considerarem a rigidez do solo. E no que se refere à distribuição do bulbo de tensões, ela está intimamente ligada às estimativas de recalques.

Dessa forma, compreendemos que há uma relação intrínseca entre a delimitação do bulbo de tensões, a interação solo - estrutura e a determinação do recalque.

Um caso clássico que exemplifica essa situação foi o ocorrido na orla de Santos, em que cerca de 98 edifícios encontravam-se com até 2,1 metros de desaprumo, conforme o Jornal do Engenheiro (2001). Fato este que se iniciou após a construção dos mesmos em meados de 1940, e que passados 60 anos poucos foram os que tiveram sua estrutura realinhada; devido ao alto custo e a demanda de conhecimentos específicos do solo em questão.

Farias (2010) discorre sobre este acontecimento que virou atração turística na cidade:

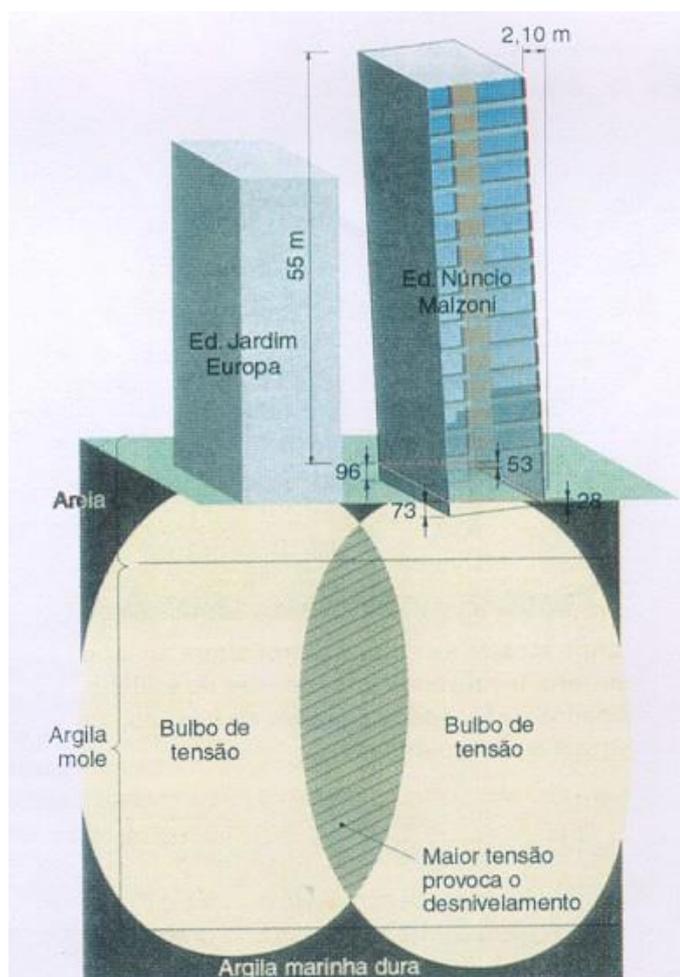
O maior problema, então, não é o afundamento do prédio em alguns milímetros, mas o recalque diferencial, causado pela concentração

de cargas em um dos pontos do edifício. Quando um prédio é construído fora dos padrões exigidos, e ergue-se um edifício vizinho, este por sua vez acaba influenciando ao ponto de forçar o outro a entortar (FARIAS, 2010).

Dias (2010) atribui também este elevado recalque ao tipo de solo santista; uma espessa camada de argila marinha mole (SPT entre 0 a 4) variando de 10 a 30 metros, após uma camada de até 20 metros de areia compactada (SPT entre 9 a 30).

A Figura 3 esquematiza o ocorrido no edifício Núncio Malzoni com algumas informações pertinentes a este caso específico, bem como a superposição dos bulbos.

Figura 3 - Informações referentes ao recalque no edifício Núncio Malzoni em Santos



Fonte: Stuart, 2000.

E na Figura 4 é possível visualizar a inclinação acentuada do edifício Mahembi, com 1,18 metros de desaprumo.

Figura 4 - Edifício Mahembi a esquerda da foto, inclinado em direção ao Paineiras, à direita



Fonte: Dias, 2010.

2.1. SOLOS

Da mesma forma que foi considerada na pesquisa de Porto (2010) para a delimitação do maciço indeslocável, este trabalho utiliza os fundamentos da Teoria da Elasticidade para a estimativa das tensões no solo.

Sendo assim, o solo é admitido como um meio isotrópico, de extensão infinita e homogênea e com deformações proporcionais às tensões aplicadas (MACHADO; MACHADO, s.d.).

A admissão de meio isotrópico considera que o Módulo de Elasticidade do solo seja constante em todas as direções, mesmo havendo conhecimentos de que este valor tenda a variar tanto em profundidade como lateralmente (MACHADO; MACHADO, s.d.).

A hipótese de meio homogêneo e de extensão infinita considera as mesmas propriedades ao longo de todas as direções do maciço.

E, finalmente, a proporcionalidade exata entre tensão e deformação pode ser admitida apenas para pequenas deformações, tal que o estado de tensão seja muito distante da ruptura (BUENO; VILAR, 2003).

Sabe-se, no entanto, que os solos não são homogêneos e isotrópicos e apresentam relação tensão - deformação não linear.

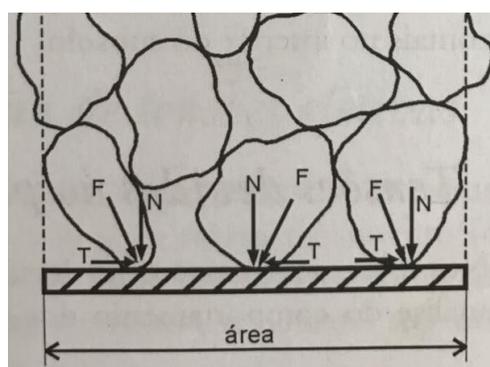
Apesar de reconhecidas as limitações da Teoria da Elasticidade, as soluções que serão apresentadas foram desenvolvidas tendo-a como base. Segundo PINTO (2006), uma justificativa para isto é o fato de as análises com este procedimento conduzirem a soluções bem sucedidas e comprovadas, com razoável aproximação mediante acompanhamento de obras, além da simplicidade quando se compara a outros métodos.

2.2. TENSÕES NO SOLO

Segundo Gerscovich (2008) qualquer ponto no interior da massa de solo está sujeito a solicitações devido ao peso próprio (tensões iniciais), além daquelas oriundas da ação de forças externas. Tais solicitações resultam em esforços no maciço e, conseqüentemente, estados de tensão normal e cisalhante, variantes em função do plano adotado.

A Figura 5 esquematiza simplificada as forças que atuam numa massa de solo apoiada em uma placa plana horizontal posicionada no interior do maciço. Essas forças podem ser decompostas em componentes normais e tangenciais:

Figura 5 - Esquema das forças que atuam no contato entre grãos e suas componentes



Fonte: Pinto, 2006.

Com isso, a definição do conceito de tensão normal se dá pela expressão:

$$\sigma = \frac{\sum N}{A} \quad (1)$$

Onde $\sum N$ é a somatória das componentes normais das forças que atuam na área A .

E a tensão cisalhante é definida como:

$$\tau = \frac{\sum T}{A} \quad (2)$$

Sendo $\sum T$ a somatória das componentes tangenciais das forças que atuam na área A .

Uma importante consideração feita por Gerscovich (2008) a respeito da área a ser utilizada nos cálculos das tensões no solo, visualizada na Figura 5; é que esta não é a área de contato entre os grãos, mas sim do plano horizontal total, acarretando em regiões de sólidos e vazios. E isto ocorre devido a sua inviabilidade de determinação do tamanho dos grãos e dos arranjos estruturais.

Ainda de acordo com a mesma autora, o solo em sua constituição é considerado um sistema formado por 3 fases distintas: partículas sólidas, água e/ou ar.

E quando se tem a presença de água devido ao lençol freático, a tensão normal total é considerada como a soma da tensão transmitida pelo contato direto entre os grãos com a pressão da água (pressão neutra) (PINTO, 2006).

2.2.1. Poro Pressão e o Princípio das Tensões Efetivas

Porosidade ou pressão neutra é aquela provocada pela ação da gravidade nas moléculas de água localizada entre os vazios do esqueleto do solo (MARANGON, 2013). A letra que a representa na Mecânica dos Solos é a u e a determinação é feita pela Equação 3.

$$u = \gamma_w \cdot h_w \quad (3)$$

De forma que γ_w o peso específico da água e h_w é a altura do nível da água.

A fluidez da água provoca em cada grão separadamente pressões em todas as direções, fato este que gera uma resultante nula em cada partícula. Assim, pressão neutra é aquela que não provoca deslocamentos nos grãos (MARANGON, 2013).

Com a definição da poro - pressão é possível compreender o Princípio da Tensão Efetiva apresentado por Terzaghi em 1923 em Craig (2013) e em Pinto (2006). Assim o princípio se aplica a solos completamente saturados e relaciona três tensões:

1. A *tensão normal total* (σ) é a soma da tensão normal efetiva e da pressão neutra (Equação (4));
2. A *pressão da água nos poros* (u), que é a pressão da água que preenche os espaços vazios entre as partículas sólidas;
3. A *tensão normal efetiva* (σ'), tensão transmitida pelo contato entre as partículas (Equação (5)).

$$\sigma = \sigma' + u \quad (4)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (5)$$

Portanto, a tensão efetiva é responsável pelo comportamento mecânico do solo, e somente com sua análise é possível estudar cientificamente os fenômenos que envolvem a resistência e deformações dos solos (PINTO, 2006).

2.2.2. Tensões Iniciais - Condição Geostática

Também conhecidas como Tensões Geostáticas, estas são definidas a partir do peso próprio do maciço de solo acima do plano de análise.

Na condição geostática assumimos que a superfície do terreno e as subcamadas sejam horizontais e que exista pouca variabilidade das propriedades do maciço ao longo da direção horizontal (GERSCOVICHI, 2008).

Dessa forma, não existem tensões cisalhantes e a tensão vertical total para solos estratificados ou não é definida pela Equação 6:

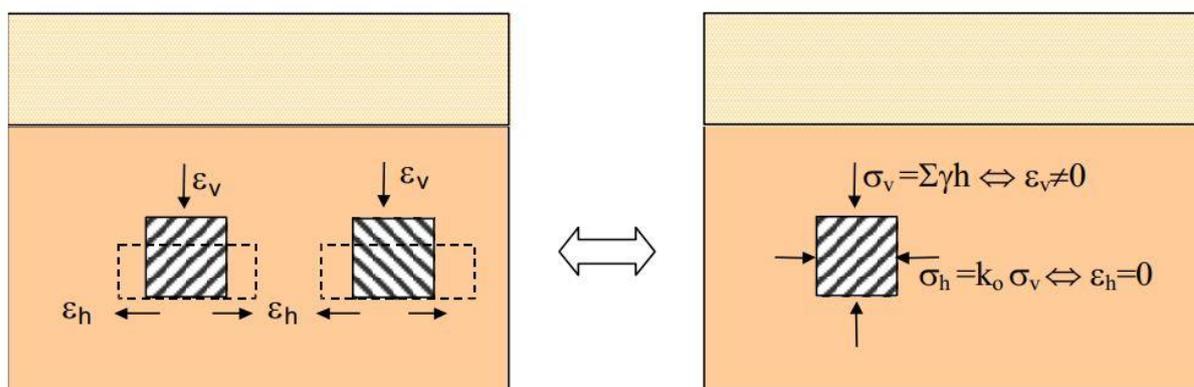
$$\sigma_v = \sum (\gamma_i \cdot z_i) \quad (6)$$

Sendo γ_i o peso específico da camada de solo (saturado ou não), dependendo das condições em que o solo se encontra, e z_i a altura desta camada.

Segundo Gerscovich (2008) este conceito de tensão vertical implica em deformações nulas na direção horizontal devido ao confinamento do solo, surgindo então as tensões horizontais, ou seja, a compensação de efeitos que ocorre entre elementos adjacentes.

Então, as tensões horizontais surgem para que não haja deformação nesta direção. A Figura 6 ilustra esta situação:

Figura 6 - Tensões Geostáticas horizontais



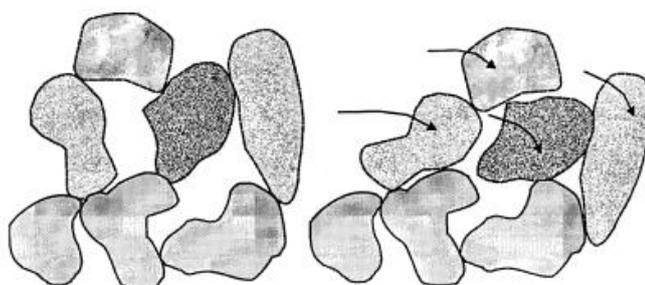
Fonte: Gerscovich (2008)

Com isso definimos a tensão horizontal efetiva (Equação 7) em função da sua tensão vertical efetiva aplicada e do coeficiente de empuxo em repouso (K_0), sendo este valor associado às propriedades de deformação do material e, assim, definido em termos das tensões efetivas e não totais.

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (7)$$

Segundo Pinto (2006, p. 86) “todos os efeitos mensuráveis resultantes de variações de tensão nos solos, como compressão, distorção e resistência ao cisalhamento são devidos a variações de tensões efetivas”, que envolvem o deslocamento relativo das partículas, vide Figura 7.

Figura 7 - Deformação no solo como consequência de deslocamento de partículas



Fonte: Pinto (2006)

Dessa forma, considerar a compressão individual das partículas é totalmente desprezível em comparação com a deformação decorrente dos deslocamentos das mesmas. Por isso, “entende-se que as deformações nos solos sejam devidas somente a variações de tensões efetivas, que correspondem à parcela das tensões referente às forças transmitidas pelas partículas” (PINTO, 2006, p. 87).

2.2.3. Tensão Vertical de Carga Externa

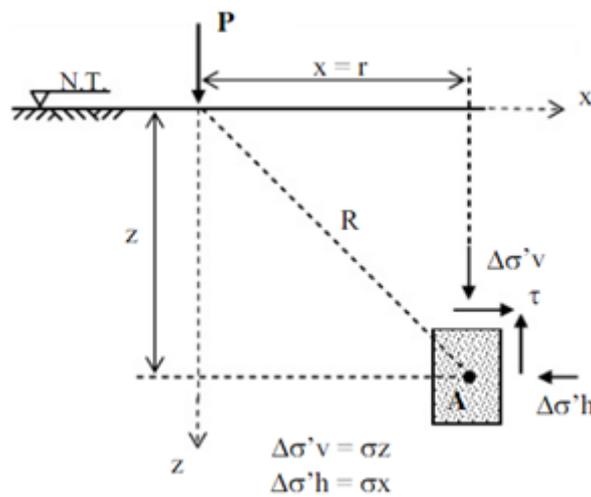
Além das tensões oriundas do peso próprio do solo, existem também as geradas por sobrecargas. Com isso, o método de cálculo utilizado para a determinação das tensões depende do formato do carregamento.

Neste trabalho trataremos de três tipos de sobrecargas sob o viés da Teoria da Elasticidade, são elas: de uma carga pontual, de uma carga linear e de uma carga uniforme sobre uma placa retangular de comprimento infinito.

2.2.3.1. Solução de Boussinesq - Carga Pontual

Boussinesq em 1885, de acordo com Pinto (2006) determinou as tensões, as deformações e os deslocamentos num semi - espaço infinito devido à aplicação de uma carga concentrada aplicada na superfície deste semi - espaço. A Figura 8 representa as tensões para este caso.

Figura 8 - Tensões geradas no maciço devido ao carregamento pontual



Fonte: Nogueira, s.d., adaptado.

Assim, delimitando nosso objeto de estudo, as tensões para os acréscimos de tensões ficam:

- Tensão vertical:

$$\Delta\sigma_v = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (8)$$

- Tensão horizontal:

$$\Delta\sigma_h = \frac{P}{2\pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot r^3 \cdot z}{R^5} - \frac{1 - 2\mu}{R \cdot (R + z)} \right] \quad (9)$$

- Tensão cisalhante:

$$\Delta\tau = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{r \cdot z^2}{R^5} \quad (10)$$

Sendo:

$P \Rightarrow$ A carga concentrada

$z \Rightarrow$ A distância vertical até o ponto de análise

$r \Rightarrow$ A distância horizontal até o ponto de análise

$\mu \Rightarrow$ O coeficiente de *Poisson*.

$R = \sqrt{(r^2 + z^2)}$, indicado na Figura 8

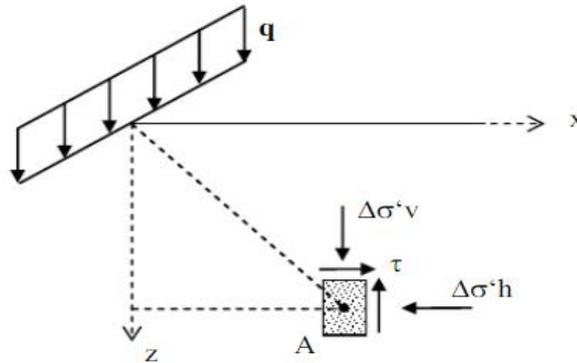
Uma importante conclusão a partir das equações de Boussinesq é que os acréscimos de tensões independem dos parâmetros elásticos do material, ou seja, independem do tipo de solo (ORTIGÃO, 2007).

As expressões de Boussinesq serviram como base para que demais pesquisadores a utilizassem para solucionar outras situações existentes, como cargas lineares e áreas carregadas. Isto porque estenderam os conceitos utilizados mediante o princípio da superposição dos efeitos e com as ferramentas de integrações matemáticas (NOGUEIRA, s.d.).

2.2.3.2. Solução de Melan - Carga Linear

As soluções de Melan para um carregamento linear (q) são muito semelhantes às propostas por Boussinesq para uma carga concentrada. A Figura 9 exemplifica este tipo de carregamento em um elemento posicionado no interior do maciço.

Figura 9 - Tensões geradas no maciço devido ao carregamento linear



Fonte: Nogueira, s.d.

- Tensão vertical:

$$\Delta\sigma_v = \frac{2 \cdot q \cdot z^3}{\pi (z^2 + x^2)^2} \quad (11)$$

- Tensão horizontal:

$$\Delta\sigma_h = \frac{2 \cdot q \cdot x^2 \cdot z}{\pi (z^2 + x^2)^2} \quad (12)$$

- Tensão cisalhante:

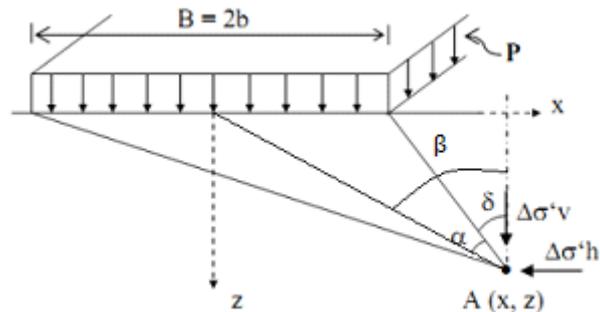
$$\tau_{xy} = \frac{2 \cdot q \cdot z^2 \cdot x}{\pi (z^2 + x^2)^2} \quad (13)$$

2.2.3.3. Carga uniforme sobre uma placa retangular de comprimento infinito

Considerando uma placa retangular em que uma das suas dimensões é muito maior que a outra, os esforços introduzidos no esqueleto de solo podem ser calculados utilizando equações desenvolvidas por Terzaghi e Carothers (MARANGON, 2013).

Um exemplo são as fundações em sapatas corridas, como mostrado na Figura 10, onde as pressões num ponto (M) situado a uma profundidade (Z), com os ângulos α e β em radianos, são dadas pelas equações a seguir.

Figura 10 - Tensões geradas no maciço devido à sapata corrida



Fonte: Nogueira, s.d., adaptado.

- Tensão vertical:

$$\Delta\sigma_v = \frac{p}{\pi} (2\alpha + \text{sen } 2\alpha \cdot \cos 2\beta) \quad (14)$$

- Tensão horizontal:

$$\Delta\sigma_h = \frac{p}{\pi} (2\alpha - \text{sen } 2\alpha \cdot \cos 2\beta) \quad (15)$$

- Tensão cisalhante:

$$\tau_{xy} = \frac{p}{\pi} (\text{sen } 2\alpha \cdot \cos 2\beta) \quad (16)$$

Sendo,

$p \Rightarrow$ O carregamento distribuído por unidade de área;

$\alpha \Rightarrow$ O ângulo formado entre a extremidade e a posição intermediária da sobrecarga a partir do ponto de análise (M);

$\beta \Rightarrow$ O ângulo entre a posição vertical e a posição intermediária do carregamento, conforme a Figura 10.

Na bibliografia existem outras soluções em função, principalmente, da distribuição do carregamento. Aqui foram apresentadas apenas as três soluções que foram utilizadas no trabalho.

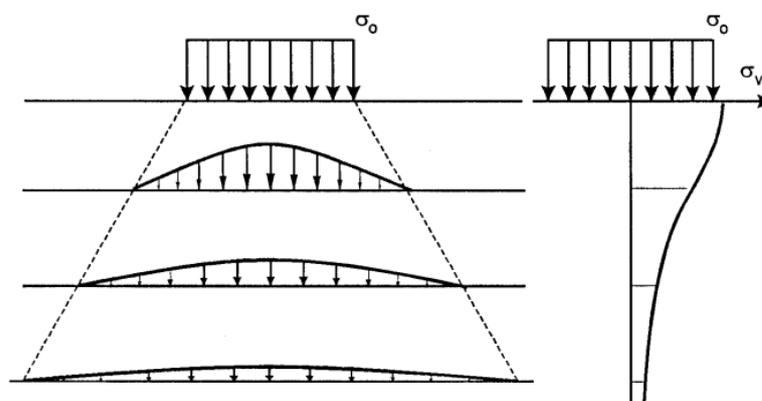
2.2.4. Distribuição e Espraiamento de Tensões

Dado qualquer tipo de carregamento em uma área bem definida, o acréscimo de tensão produzido no interior da massa de solo não se restringe a projeção desta área carregada. Ocorrem também aumentos de tensão nas laterais desta região, que se somam às anteriores devidas ao peso próprio (PINTO, 2006).

Devemos salientar também que estes aumentos ocorrem se há sobrecargas no terreno, no caso de cortes há decréscimos de tensões, aliviando a carga no solo.

Assim, das considerações de Pinto (2006) compreendemos que o aumento da área de atuação da carga aplicada provoca uma diminuição das tensões verticais conforme a profundidade aumenta. A Figura 11 representa esta condição.

Figura 11 - Distribuição de tensões com a profundidade

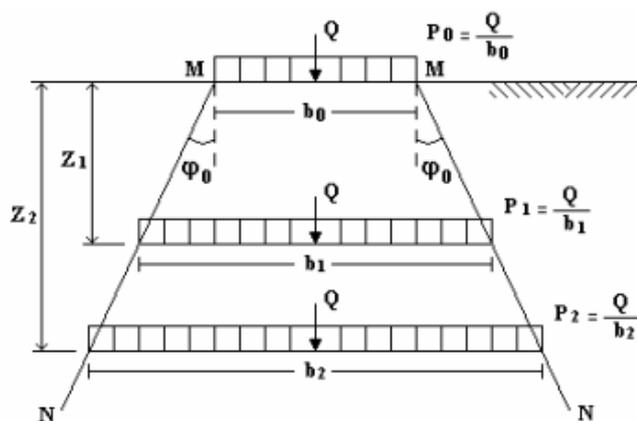


Fonte: Pinto, 2006.

Essa distribuição de tensões em forma de sino representa o que ocorre realmente no interior do solo quando este é carregado. As tensões se concentram na região do eixo de simetria da carga e vão diminuindo conforme se afastam horizontalmente; fato este que já verificado experimentalmente como afirma Marangon (2013).

A simplificação deste caso é denominada espraçamento de tensões. Na Figura 12 é possível visualizá-lo e sua formulação é abordada na Equação 17.

Figura 12 - Espraçamento das tensões

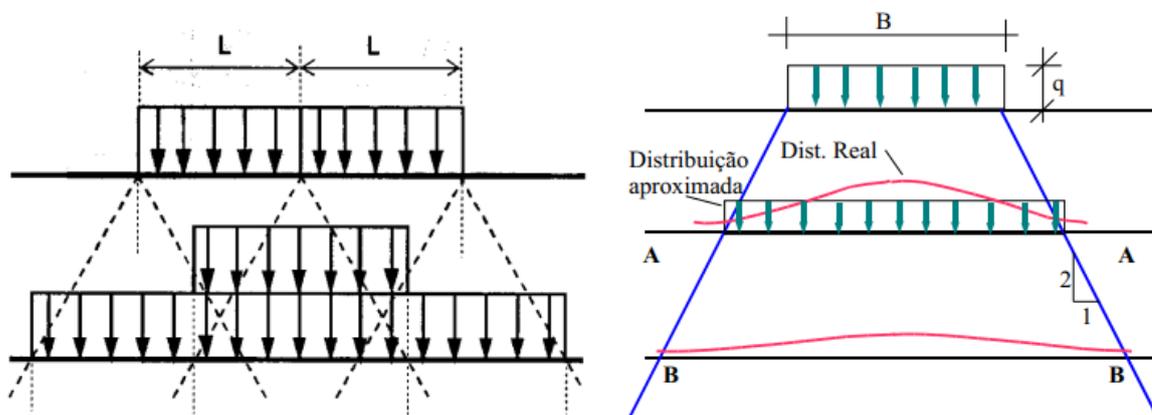


Fonte: Nogueira, s. d.

Nesta hipótese a carga aplicada “Q” se distribui em profundidade segundo um ângulo (φ_0), chamado ângulo de espraçamento ou propagação. Assim, o alinhamento MN restringe a propagação das tensões.

Esta aproximação não considera a teoria da elasticidade, e sim relações trigonométricas juntamente com a definição de tensão; além de contradizer a sobreposição dos efeitos, como pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - (a) Espraçamento de tensões com a carga dividida em duas faixas (b) Sobreposição da distribuição real e aproximada



(a) Fonte: Pinto, 2006.

(b) Fonte: Machado; Machado, s.d.

Como pode ser visto, na divisão de um carregamento em dois no item (a), haveria maior concentração de tensão na região central, no entanto esta prática adota a faixa constante.

Com este método a tensão vertical independe do tipo de carregamento e é definida como:

$$\sigma_v = \frac{2 b_0}{2 b_0 + 2 z \cdot \text{tg } \varphi_0} \cdot \sigma_0 \quad (17)$$

Pinto (2006) afirma que esta simplificação pode ser útil em alguns casos, no entanto é uma estimativa muito grosseira, podendo indicar tensões em pequena profundidade maior que a tensão aplicada na superfície do terreno em algumas situações.

Dessa forma, esta metodologia é ainda mais simplista se comparada com as realizadas tendo como base a Teoria da Elasticidade, como já foram descritas.

2.2.5. Distribuição de Tensões Sob a Base da Sapata

Denominado também como pressão de contato, tem como objetivo definir a distribuição de tensão em uma sapata em função do tipo de solo sob ela.

Silva (1998) descreve que as principais variáveis neste caso envolvem a natureza do solo (se rocha, areia ou argila) e a rigidez da fundação (se flexível ou rígida).

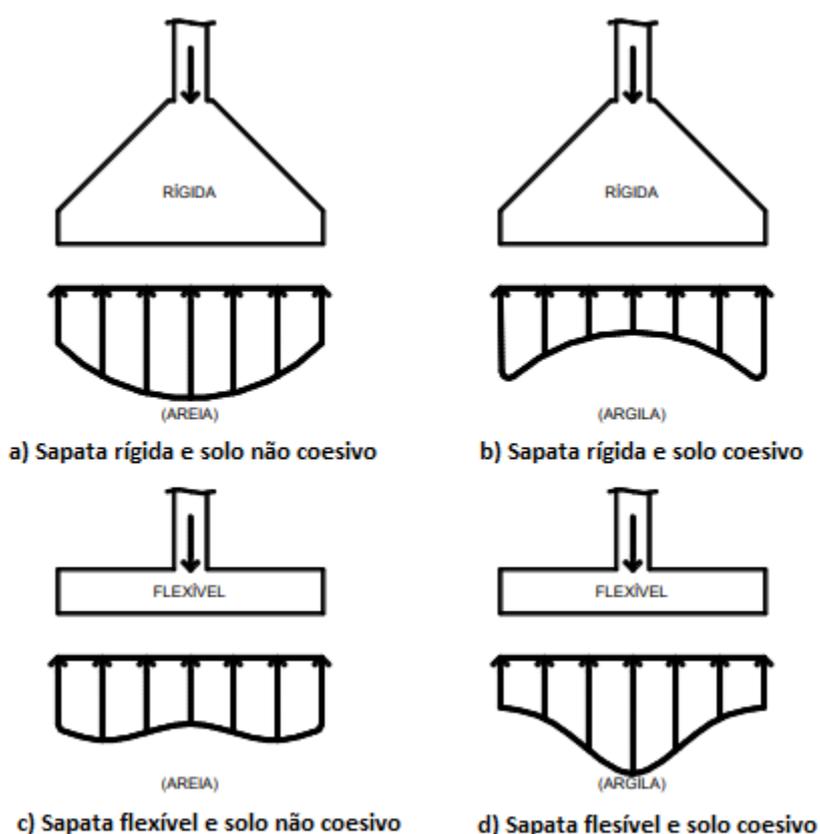
Compreender como essa distribuição se comporta envolve o conhecimento de fatores como:

- Existência de excentricidade do carregamento aplicado;
- Intensidade de possíveis momentos fletores aplicados;
- Rigidez da fundação;
- Propriedades do solo;
- Rugosidade da base da fundação.

Bastos (2016), além de definir os fatores acima, afirma que a pressão exercida no solo não é uniformemente distribuída, sendo confirmada por estudos analíticos e de campo.

A Figura 14 expressa de maneira aproximada o comportamento desta distribuição para as sapatas rígidas e flexíveis, para a areia e argila considerando uma carga aplicada concentrada.

Figura 14 - Distribuição de tensões em sapatas rígidas e flexíveis



Fonte: Bastos, 2016.

Assim em sapatas rígidas apoiadas sobre solos granulares, como areia, a pressão é maior no centro, para vencer o aumento da rigidez devido confinamento, e decresce em direção às bordas da sapata (Figura 14 a). No caso de solos argilosos, ao contrário, a pressão é maior nas proximidades das bordas e menor no centro (Figura 14 b) (MACHADO; MACHADO, s.d.).

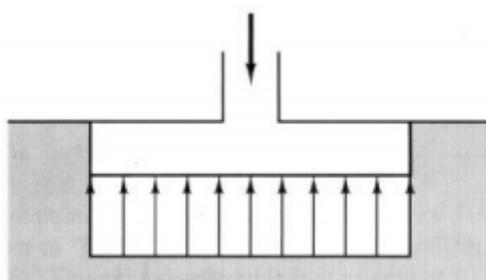
Em sapatas flexíveis, no entanto, seu comportamento é mais complexo, apresentado curvaturas quando apoiadas em areia, como pode ser visualizado na

Figura 14 c; e em solos argilosos, uma distribuição aproximadamente triangular, com máximo valor no centro da sapata que diminui até as extremidades, vide Figura 14 d.

Nesse sentido, para fundações flexíveis apoiadas em solos não coesivos, observa-se um recalque mais acentuado nos bordos em relação à região central da fundação flexível, isto porque o confinamento do solo provoca um aumento do módulo de elasticidade, conferindo-lhe maior rigidez (MACHADO; MACHADO, s.d.).

Devido à complexidade desta análise é comum assumir que a distribuição seja uniforme, como a Figura 15, além de que o erro cometido com a simplificação não é significativo, conforme Coduto (2001) *apud* Bastos (2016).

Figura 15 - Distribuição de tensão simplificada



Fonte: Bastos, 2016.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) na NBR 6118, no item 22.6.1, permite que em sapatas rígidas se possa:

“admitir plana a distribuição de tensões normais no contato sapata - terreno, caso não se disponha de informações mais detalhadas a respeito. Para sapatas flexíveis ou em casos extremos de fundação em rocha, mesmo com sapata rígida, essa hipótese deve ser revista” (NBR 6118, 2014).

E no item 22.6.2.3 relativo às sapatas flexíveis: “A distribuição plana de tensões no contato sapata - solo deve ser verificada”.

2.3. BULBO DE TENSÕES

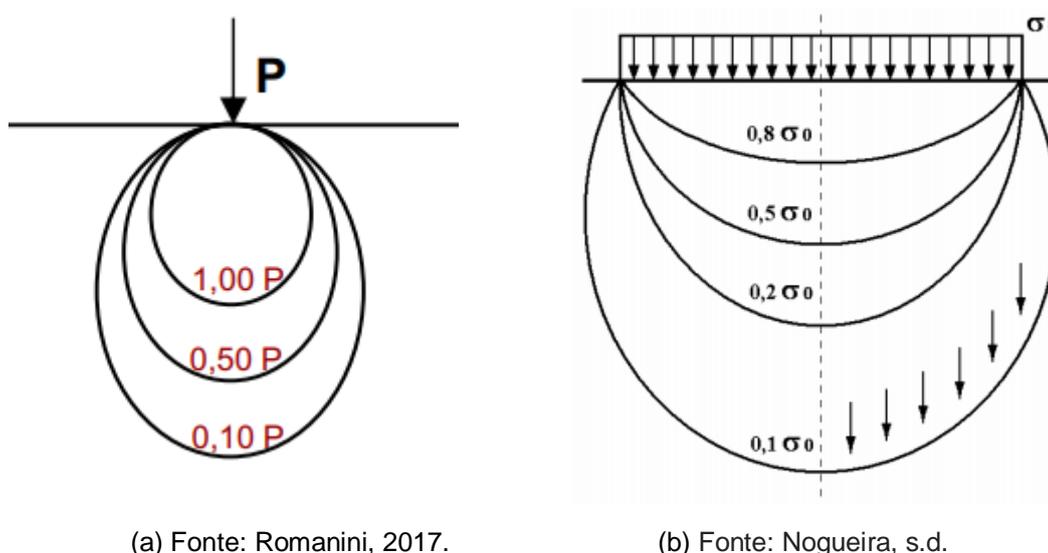
Finalmente, o bulbo de tensões, objeto de estudo desta pesquisa, possui definição simples, no entanto carregada de conceitos importantes.

Dessa forma, a união de pontos do maciço de solo solicitados por tensões iguais gera superfícies de distribuição de tensão denominadas isóbaras, ou então, bulbo de tensões, vide Figura 16.

Como a tensão devido às cargas externas diminui com o afastamento do ponto de aplicação da carga (em profundidade e lateralidade) conforme discutido anteriormente, inferimos que a tensão, em qualquer ponto no interior da massa limitada pela isóbara (dada por σ_z) é maior que σ_z e qualquer ponto fora da isóbara têm tensão menor que σ_z .

Pinto (2006) considera errônea a definição de bulbo de tensão “como a região do subsolo em que houve acréscimo de tensão devido ao carregamento”, pois “na realidade existem tantos bulbos de tensão quantos níveis de acréscimo de tensão que se queira considerar”.

Figura 16 - Bulbo de tensões de uma carga (a) concentrada e de uma (b) distribuída



Para efeitos de projetos, a envoltória, ou seja, o bulbo mais afastado do carregamento é considerado aquele que corresponde a 10% da carga aplicada. Hachich et. al descreve sobre esta consideração:

Bulbo de pressões ou de tensões é a denominação dada a região abaixo da base, dentro do qual valores significativos de tensões são induzidos ao subsolo. Tensões inferiores a 10% da aplicada pela fundação ou placa são geralmente negligenciáveis para os problemas práticos. Isto significa que o bulbo de tensões atinge profundidades da ordem de 1,5 a 2,0 vezes a largura da área carregada, sendo este último valor adotado com frequência (HACHICH et al., p. 733, 1998).

2.4. BASES DE PROGRAMAÇÃO

2.4.1. HTML

O acrônimo html vem do inglês *Hyper Text Markup Language* e significa Linguagem de marcação de hipertexto. Seu papel, apesar de simplista é essencial para criação de páginas online, pois é o que permite a exibição das funções na tela (EIS, 2011).

De acordo com William (2012) o criador desta linguagem, Tim Berners-Lee, desenvolveu-a para sanar problemas de comunicação e disseminação das pesquisas entre ele e seu grupo de colegas em 1990 no CERN (*European Council for Nuclear Research: Conselho Europeu de Pesquisas Nucleares*), na Suíça. E desde então está no sua 8ª versão, denominada HTML5.2 e implementada em 2017.

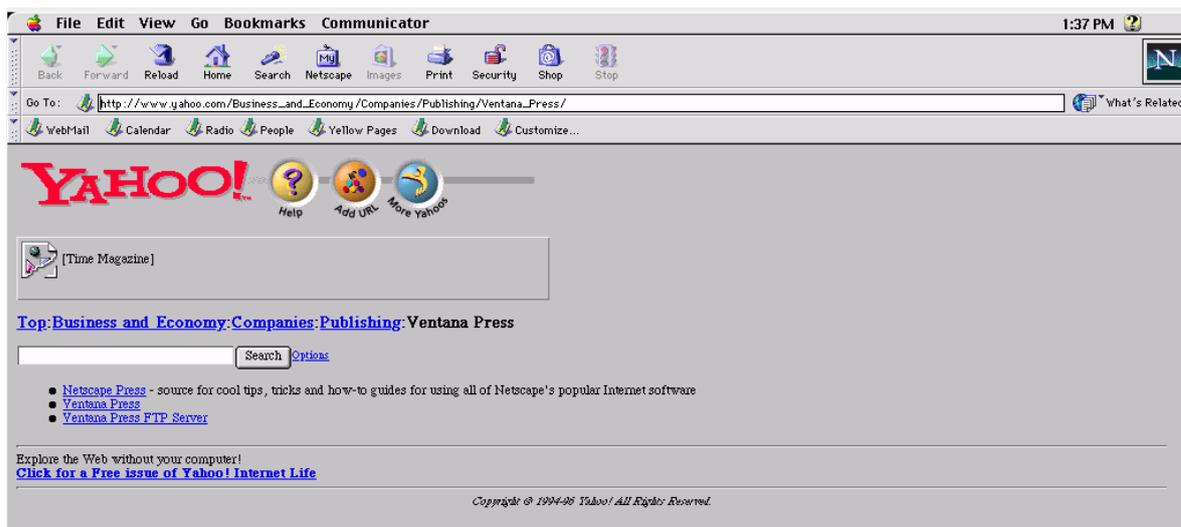
Assim, esta linguagem é constituída de códigos que delimitam conteúdos específicos, segundo uma sintaxe própria. Estes códigos que definem o tipo de letra, o tamanho, cor, espaçamento, e vários outros aspectos do site.

Cercal (2013) afirma que no início era muito complicado aprender html, pois eram muitos comandos para se fazer algo simples. A cada versão, o html fica mais fácil de utilizar e adquire novas funções. Atualmente qualquer pessoa interessada pode acessar a internet e aprender a construir um *site* básico em pouco tempo; seguindo passos de tutoriais e aprendendo as funções de cada código, devido a grande disponibilidade de material *online*.

Mesmo sendo a primeira linguagem em âmbito mundial não é a única, no entanto é a mais conhecida e aceita.

No site <http://oldweb.today> criado em 2015, é possível encontrar páginas de internet desde o ano 1992 até 2018 para as plataformas *Windows*, *Macintosh* e *Linux*. A Figura 17 é um exemplo de como eram as páginas na internet em 1994.

Figura 17 - Página da internet em 1994 em um *Macintosh*



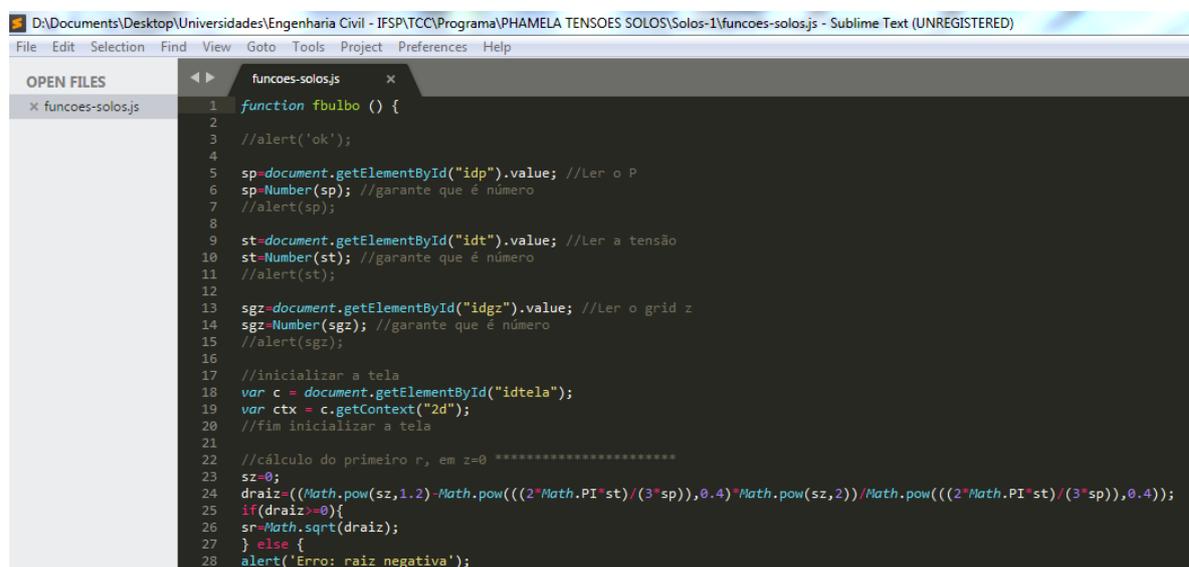
Fonte: Rhizome, 2015.

Graças ao intenso desenvolvimento neste ramo já é possível integrar várias linguagens na mesma página da *web*, como por exemplo, o *CSS* e o *JavaScript*, permitindo maior interação entre o usuário e a página.

A criação e edição de códigos podem ser realizadas em qualquer editor de texto comum, como o *Bloco de Notas*® que acompanha todas as versões do *Microsoft Windows*®. Sendo que para testar os códigos o nome do arquivo deve ser seguido pela extensão *.html*. Não é necessário acesso a internet para visualizá-lo, pois o código está na própria máquina em que será executado.

Neste trabalho utilizamos o editor *Sublime Text 3.0* devido à facilidade em inserir os códigos e por ser gratuito, segue sua tela principal de edição na Figura 18.

Figura 18 - Tela de edição do Sublime Text 3.0



```

1 function fbulbo () {
2
3 //alert('ok');
4
5 sp=document.getElementById("idp").value; //Ler o P
6 sp=Number(sp); //garante que é número
7 //alert(sp);
8
9 st=document.getElementById("idt").value; //Ler a tensão
10 st=Number(st); //garante que é número
11 //alert(st);
12
13 sgz=document.getElementById("idgz").value; //Ler o grid z
14 sgz=Number(sgz); //garante que é número
15 //alert(sgz);
16
17 //inicializar a tela
18 var c = document.getElementById("idtela");
19 var ctx = c.getContext("2d");
20 //fim inicializar a tela
21
22 //cálculo do primeiro r, em z=0 *****
23 sz=0;
24 draiz=((Math.pow(sz,1.2)-Math.pow(((2*Math.PI*st)/(3*sp)),0.4)*Math.pow(sz,2))/Math.pow(((2*Math.PI*st)/(3*sp)),0.4));
25 if(draiz>=0){
26 sr=Math.sqrt(draiz);
27 } else {
28 alert('Erro: raiz negativa');

```

Fonte: A própria autora, 2018.

2.4.2. JAVASCRIPT

Antes do surgimento desta linguagem a navegação na internet era considerada estática, não tinha interação com usuário e era composta apenas por textos, *links* e imagens “sem vida” (SILVA, 2015).

Assim, o JavaScript permite a criação de conteúdos que se atualizam dinamicamente, o controle de multimídias, gráficos 2D/3D animados e uma infinidade mais.

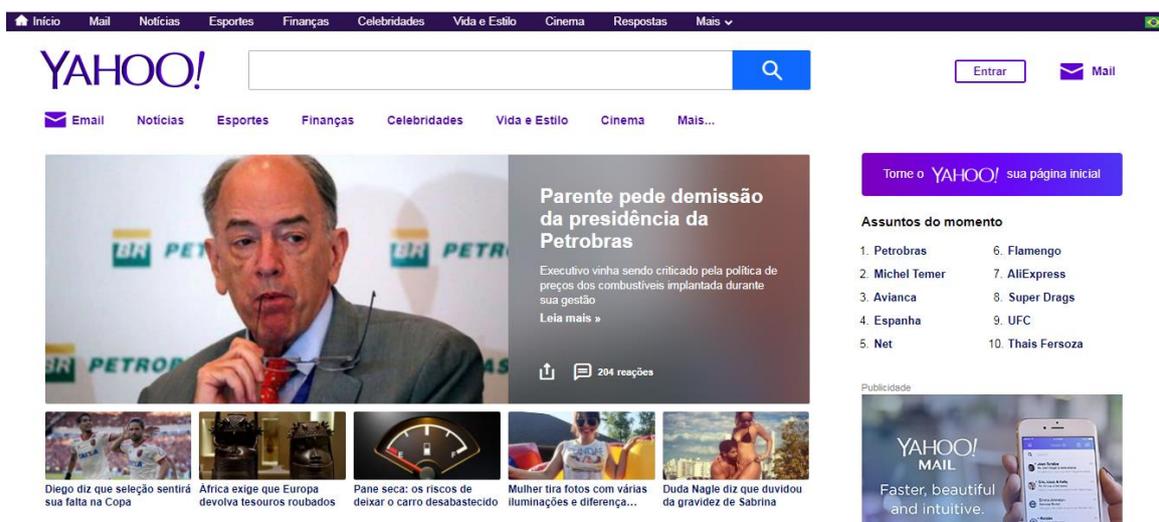
Essa linguagem foi criada em 1995 por Brendan Eich com “o propósito de oferecer aos desenvolvedores formas de tornar determinados processos de páginas *web* mais dinâmicos, tornando seu uso mais agradável” (SILVA, 2015).

Uma de suas características importantes é que a base de sua programação faz com que ele rode localmente no próprio navegador, sem a necessidade de acesso ao servidor para ser executado.

Ainda segundo Silva (2015), a consolidação desta linguagem se deu um ano após sua criação, quando a *Microsoft*® a portou para seu navegador. Atualmente o sucesso do JavaScript se estendeu para *smartphones*, *tables* e programas para *desktop*.

É possível comparar a página do site *Yahoo!*® em 1994 (Figura 17) em que apenas a linguagem *html* era utilizada, com a mesma página em 2018 (Figura 19) após o desenvolvimento do JavaScript e várias outras linguagens.

Figura 19 - Página da internet em 2018



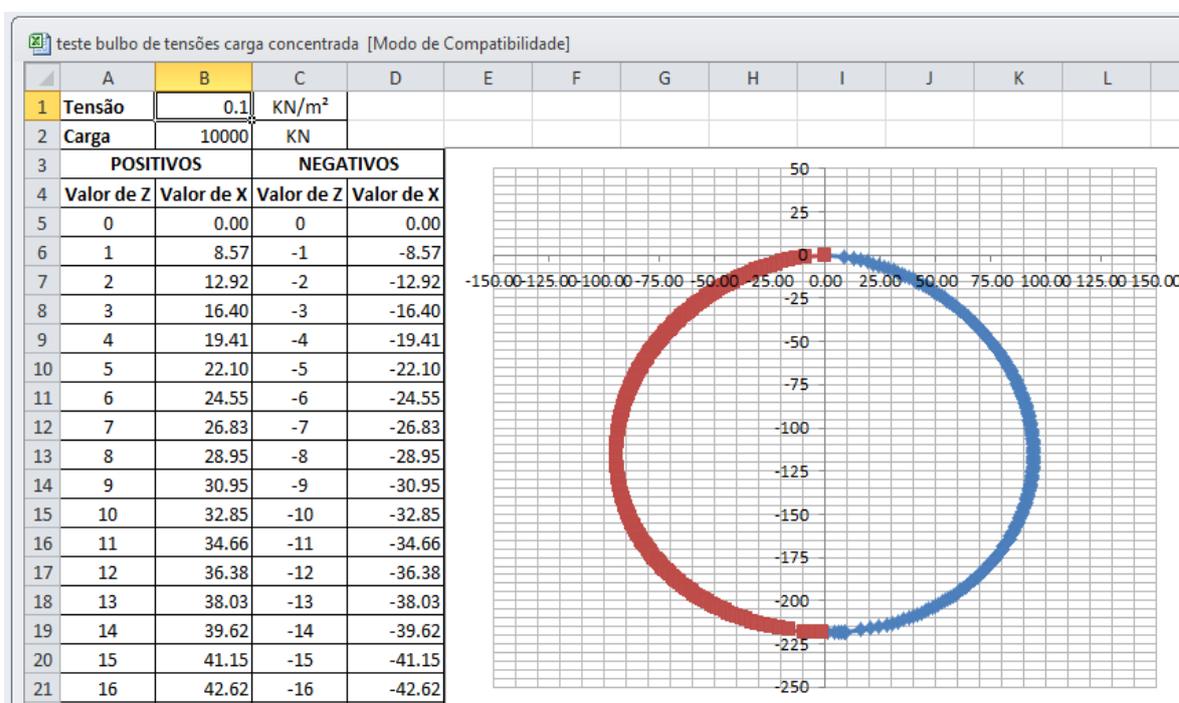
Fonte: *Yahoo!*®

A diferença entre elas é nítida, na versão mais atual as notícias são atualizadas constantemente e durante a permanência no site elas vão alternando a posição em destaque; a mesma atualização ocorre para a previsão do tempo.

3. METODOLOGIA

Antes de iniciar o desenvolvimento do programa utilizou-se a planilha do *Microsoft Excel*® para visualizar como a Equação 8, de Boussinesq para a tensão vertical, se comporta mediante a inserção de uma grande quantidade de valores para a incógnita da profundidade (z) e também poder variar os valores de carga e o limite de tensão, conforme a Figura 20.

Figura 20 - Teste da geração do bulbo de tensões para uma carga pontual mediante planilha do Microsoft Excel



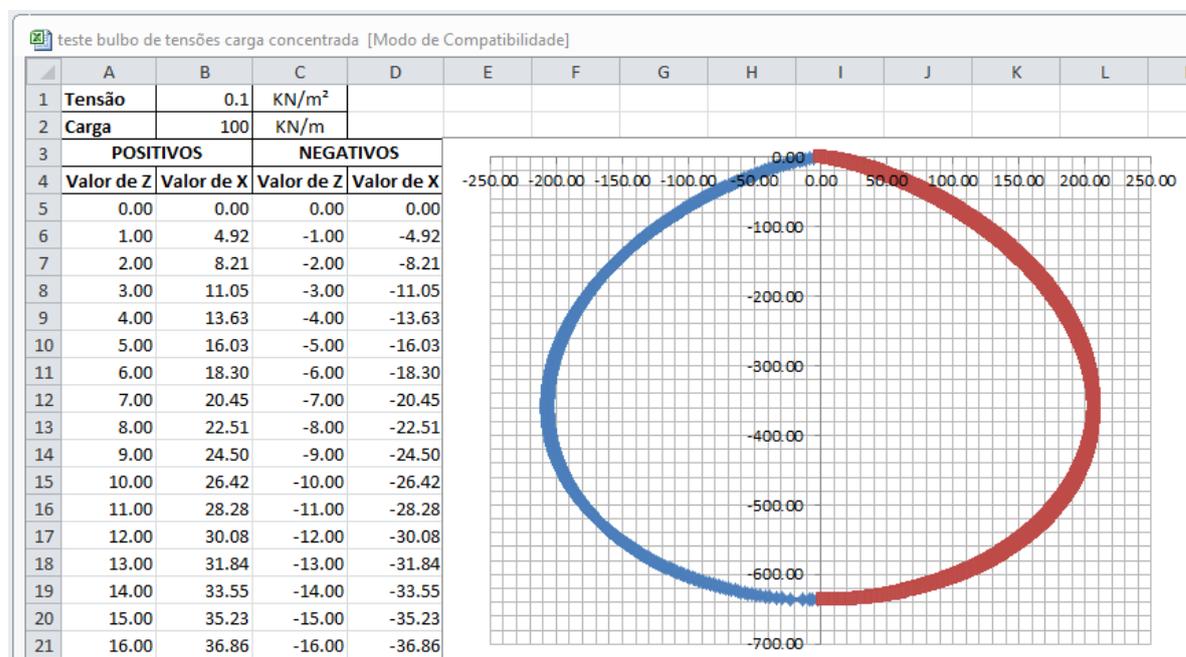
Fonte: A própria autora, 2018.

Neste caso, a profundidade máxima atingida foi de 218,5 m para uma carga pontual de 10.000 kN, ou seja, para valores mais profundos a raiz da equação é negativa, impossibilitando o cálculo. Em situações como estas o programa alerta sobre esta condição, como mostrado na Figura 24.

Notou-se também que a definição da envoltória tem papel fundamental no desenvolvimento de um bulbo com valores significativos de tensões induzidas.

A Solução de Melan também foi testada previamente no *Microsoft Excel*® da mesma forma que a solução anterior, como pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21 - Teste da geração do bulbo de tensões para uma carga linear mediante planilha do *Microsoft Excel®*



Fonte: A própria autora, 2018.

Neste caso, para um carregamento de 100 kN/m e a tensão limite de 0,1 kN/m² a profundidade atingida foi de 636,6 m, muito maior se comparada com a de Boussinesq com carga de 10000 kN e mesma tensão.

Assim como já comentado, esta profundidade também é limitada pelo surgimento de raízes negativas para determinados valores de afastamentos, sejam laterais ou de profundidade.

Mesmo estas equações terem partido inicialmente daquelas referentes a carga pontual, notamos uma pequena diferença no formato do bulbo, sendo este menos arredondado.

Já o bulbo referente a sapata corrida também foi desenvolvido a priori no *Microsoft Excel®*, porém mesmo para um carregamento de baixa intensidade a quantidade de pontos gerados é superior ao admitido por este *software* para gerar o mesmo gráfico das soluções anteriores. Desta forma, a complexidade desta equação, dependendo da intensidade do carregamento, acarreta em uma lentidão do sistema.

O *software*, após aprovação fará parte da plataforma NEVE do IFSP campus de Votuporanga, como citado anteriormente, sendo assim, manteve-se seus padrões de visualização e área de trabalho (Figura 22).

Figura 22 - Página inicial do *software*



VOLTAR À PÁGINA PRINCIPAL DO NEV

| Título | Data | Autora | Orientadora | Tipo | Curso |
|------------------|------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| TENSÕES EM SOLOS | 26/06/2018 | Phamela C. Peres Ferreira Contadini | Profa. Ma. Cristiane Prado Marin | Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) | Engenharia Civil |

CARGA CONCENTRADA (BOUSSINESQ) CARGA LINEAR (MELAN) CARGA DISTRIBUÍDA SOBRE PLACA RETANGULAR

Fonte: A própria autora, 2018.

Ainda utilizando a Equação de Boussinesq, foi realizado o mesmo exemplo básico do teste anterior em uma versão elementar do *software*, vide Figura 23.

Figura 23 - Exemplo de geração do bulbo e profundidade máxima atingida

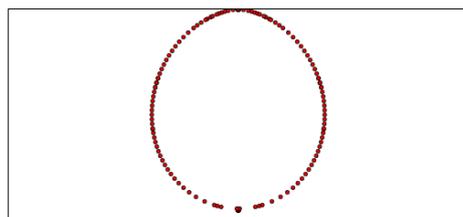
| Título | Data | Autor | Orientador | Tipo | Curso |
|------------------|------------|---|--|--------------------------------------|------------------|
| TENSÕES EM SOLOS | 30/11/2017 | Phamela Camila Peres Ferreira | Profa. Cristiane Prado Marin | Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) | Engenharia Civil |

P (kN):

Tensão limite (kN/m²):

Grid z (m):

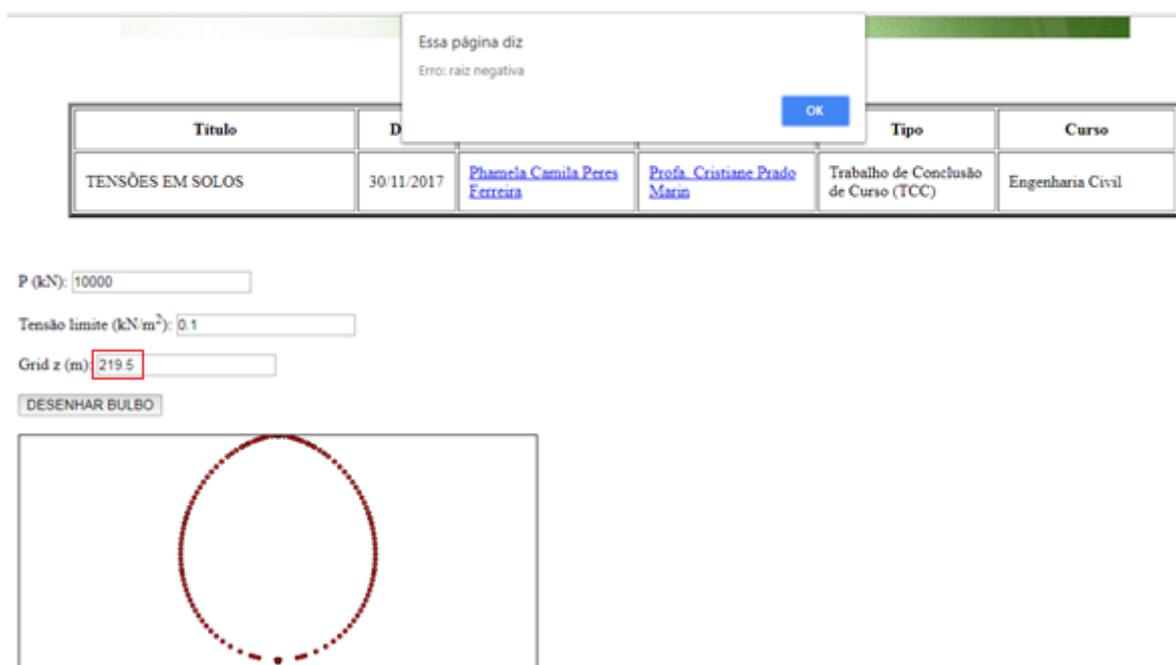
DESENHAR BULBO



Fonte: A própria autora, 2018.

Assim, verificamos que os valores estão em concordância e para profundidades maiores o erro citado aparece como alerta na tela principal (Figura 24)

Figura 24 - Erro devido à raiz negativa



Fonte: A própria autora, 2018.

3.1. ABA: CARGA CONCENTRADA (BOUSSINESQ)

Nesta aba o usuário tem a seguinte vista do programa, conforme Figura 25. Sendo possível visualizar a direita o esquema que apresenta as variáveis envolvidas para esta solução e a esquerda, as células para o usuário entrar com os valores de carga concentrada em kN e da tensão limite em kN/m², sendo para este, pré-estabelecido o limite fornecido por Hachich (1998) de 10% da tensão aplicada, porém fica como opção para o utente variar ou não este valor.

Abaixo da tensão limite está posicionado o botão "Desenhar Bulbo", em que o comando é executado, e posteriormente está a região gráfica em que o bulbo de tensões é traçado.

E finalmente, o botão "Gerar Relatório" está localizado na parte inferior esquerda como o último elemento da página.

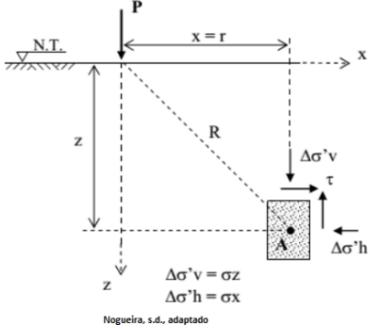
Figura 25 - Vista da aba Carga Concentrada (Boussinesq)

CARGA CONCENTRADA (BOUSSINESQ)
CARGA LINEAR (MELAN)
CARGA DISTRIBUÍDA SOBRE PLACA RETANGULAR

Insira os dados abaixo:

P (kN):

Tensão limite (kN/m²):



*Nota: Hachich (1998) afirma que tensões inferiores a 10% da aplicada pela fundação são geralmente negligenciáveis para problemas práticos.

**Unidades da malha quadriculada em metros.

Fonte: A própria autora, 2018.

Ainda referente ao limite de tensão, foi inserido uma nota explicativa ao usuário na parte inferior direita, abaixo do esquema, com os seguintes dizeres:

**Nota: Hachich (1998) afirma que tensões inferiores a 10% da aplicada pela fundação são geralmente negligenciáveis para problemas práticos.*

3.2. ABA: CARGA LINEAR (MELAN)

Manteve-se o mesmo padrão da aba anterior, com o intuito de tornar a experiência intuitiva ao usuário, podendo ser visualizada na Figura 26.

As mudanças estão apenas no esquema, que referencia a carga linear e na unidade do carregamento a ser digitado na célula, kN/m.

Figura 26 - Vista da aba Carga Concentrada (Melan)

CARGA CONCENTRADA (BOUSSINESQ) CARGA LINEAR (MELAN) CARGA DISTRIBUÍDA SOBRE PLACA RETANGULAR

Insira os dados abaixo:

q (kN/m):

Tensão limite (kN/m²):

Desenhar Bulbo

*Nota: Hachich (1998) afirma que tensões inferiores a 10% da aplicada pela fundação são geralmente negligenciáveis para problemas práticos.

**Unidades da malha quadriculada em metros.

Fonte: A própria autora, 2018.

3.3. ABA: CARGA DISTRIBUÍDA SOBRE PLACA RETANGULAR

Por fim, para a sapata corrida as mesmas considerações citadas nas abas anteriores são válidas, vide Figura 27.

De forma que, alterou-se apenas a unidade do carregamento para kN/m² e adicionou-se uma célula para ser inserido o comprimento da base da sapata (B), pois para a determinação dos ângulos da Equação 14 e consequentemente a representação gráfica do bulbo, este valor é necessário e variável para cada caso.

Figura 27 - Vista da aba Carga Distribuída sobre uma placa retangular

CARGA CONCENTRADA (BOUSSINESQ) CARGA LINEAR (MELAN) CARGA DISTRIBUÍDA SOBRE PLACA RETANGULAR

Insira os dados abaixo:

p (kN/m²):

Base da Fundação B (m):

Tensão limite (kN/m²):

Desenhar Bulbo

*Nota: Hachich (1998) afirma que tensões inferiores a 10% da aplicada pela fundação são geralmente negligenciáveis para problemas práticos.

**Unidades da malha quadriculada em metros.

Fonte: A própria autora, 2018.

3.4. GERAÇÃO DE RELATÓRIO EM *PDF*

Conforme a necessidade do usuário em realizar uma análise mais criteriosa e organizada, cada aba para determinação dos diferentes bulbos de tensões é dotada com um botão específico para a geração do relatório completo em *pdf*, posicionado abaixo da região gráfica, como já mencionado.

Eles possuem as equações utilizadas para elaboração do bulbo e a profundidade lateral e vertical máxima obtida em cada rotina de cálculo; para que haja melhor entendimento e detalhamento dos cálculos realizados.

Estes arquivos podem ser baixados ou visualizados *online* no próprio computador e em qualquer dispositivo capaz de abrir arquivos com extensões (*.pdf*).

Nos Apêndices A, B e C encontram-se exemplos dos relatórios gerados para cada um dos tipos de carregamentos abordados neste trabalho.

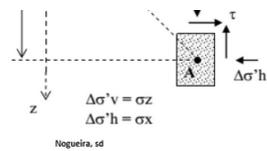
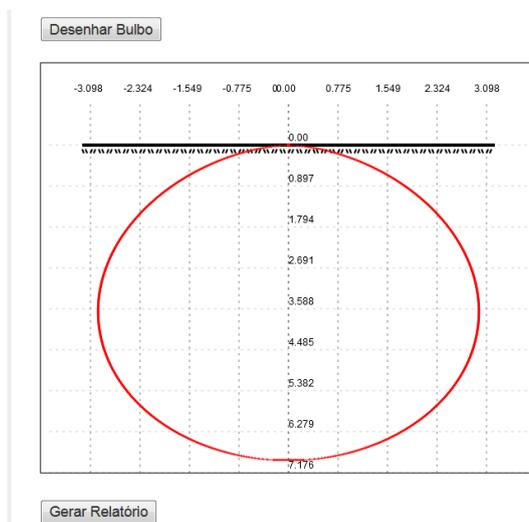
3.5. PLANO CARTESIANO EM MALHA QUADRICULADA

No momento em que o botão “Desenhar Bulbo” for clicado, este será plotado em escala adequada na área gráfica, isto porque há a necessidade de não extrapolar os limites desta região e garantir que, mesmo para um baixo ou alto carregamento ele possa ser visualizado adequadamente.

Inserimos ainda, o plano cartesiano com origem na posição de aplicação da carga para a solução de Boussinesq e na região intermediária do carregamento para a solução de Melan e da sapata corrida.

A malha quadriculada foi um artifício utilizado para facilitar a compreensão da extensão da região de tensões significativas limitada pelo bulbo. É possível visualizá-la na Figura 28.

Figura 28 - Visualização do plano cartesiano em malha quadriculada



*Nota: Hachich (1998) afirma que tensões inferiores a 10% da aplicada pela fundação são geralmente negligenciáveis para problemas práticos.

**Unidades da malha quadriculada em metros.

Fonte: A própria autora, 2018.

4. CONCLUSÕES

Acreditamos que o desenvolvimento computacional gráfico das três soluções propostas neste trabalho e o referente levantamento teórico, será de grande valia, especialmente para o meio acadêmico, pois existe uma necessidade inerente ao ser humano de visualização, principalmente na área das exatas, em relacionar as funções aos gráficos, e é isso que este *software* propõe.

Além disso, permitirá a compreensão dos equacionamentos das tensões para alguns tipos de carregamentos e da importância da envoltória para a limitação de uma região de tensão significativa.

O programa pode ainda ser utilizado para que os discentes confirmem se os valores obtidos manualmente estão coerentes, facilitando a aquisição de conhecimentos por meio do bulbo gerado.

Mesmo apresentando diversas vantagens, a rotina de cálculo do bulbo por trás do gráfico gerado apresenta morosidade para certos tipos de carregamentos e/ou até o travamento do sistema. Isto porque, como abordado anteriormente, o cálculo ocorre para uma grande quantidade de pontos para que seja possível obter o melhor formato das envoltórias.

Para as equações de carga pontual e linearmente distribuída o cálculo do bulbo foi realizado isolando a incógnita x , ficando a profundidade (z) como parâmetro a ser variado até o limite da profundidade máxima. No entanto, para a sapata corrida, não foi possível isolar o afastamento lateral (x), sendo assim, o cálculo é realizado em pares ordenados (x,z) e comparados com o limite de tensão solicitado pelo usuário.

Em uma análise entre os três gráficos obtidos, notamos que as Soluções de Boussinesq e de Melan possuem, aparentemente, o mesmo ponto de origem $(0,0)$ para iniciar o traçado gráfico, já a solução para Sapata Corrida inicia “aberto” partindo das extremidades da base da sapata até atingir a profundidade máxima, como apresentado na teoria; estes gráficos podem ser visualizados nos Apêndices A, B e C.

Como sugestão para trabalhos futuros, há a possibilidade de estender as soluções e o desenvolvimento gráfico a outros tipos de carregamentos e também a determinação das tensões horizontais e cisalhantes de cada carga.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. NBR 6118, ABNT, 2014, 238p.

BASTOS, César. **Mecânica dos Solos: Tensões nos solos**. Universidade Federal do Rio Grande. Departamento de Materiais e Construção, s.d.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Sapatas de fundação**. 2016. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto3/Sapatas.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

CERCAL, Elisete dos Santos. **Como era programar em 1985**. 2013. Disponível em: <<https://cercal.io/como-era-programar-em-1985/>>. Acesso em: 03 maio 2018.

COLARES, George Moura. **Programa para análise da interação solo - estrutura no projeto de edifícios**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CRAIG, Roberto F. **Mecânica dos Solos**. Tradução Amir Kurban. 7.^a ed. – [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.

DIAS, Marianna Silva. **Análise do comportamento de edifícios apoiados em fundação direta no bairro da ponta da praia na cidade de Santos**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

EIS, Diego. **O básico: O que é Html?**: Entenda o HTML básico, saiba o que significa tags do HTML e entenda como fazer.. 2011. Disponível em: <<https://tableless.com.br/o-que-html-basico/>>. Acesso em: 03 maio 2018.

FARIAS, João. **Os prédios tortos de Santos**. 2010. Disponível em: <<http://joaofarias03.blogspot.com.br/2010/07/os-predios-tortos-de-santos.html>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

HACHICH, Waldemar et al. **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. 755 p.

IGLESIA, Socrate Muñoz. **Interação solo estrutura e sua aplicação na análise de estruturas**. s.d.. Disponível em: <<http://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/interacao-solo-estrutura-e-sua-aplicacao-na-analise-de-estruturas/>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

IWAMOTO, Roberto Kunihiro. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo – estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

JORNAL DO ENGENHEIRO (São Paulo). Sindicato dos Engenheiros do Estado de São Paulo. **Realinhado primeiro prédio em santos**. 161. ed. São Paulo: Seesp, 2001. Disponível em: <<https://www.seesp.org.br/imprensa/161capa.htm>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

MACHADO, Sandro Lemos; MACHADO, Miriam de Fátima C.. **Mecânica dos solos I: Conceitos introdutórios**. Bahia: Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais (setor de Geotecnia), s.d.

MARANGON, Márcio. **Mecânica dos solos II**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/pagina-do-aluno/notas-de-aula/mecanica-dos-solos-ii/>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

NOGUEIRA, Jairo Furtado. **2. Tensão total, efetiva e intersticial**. s.d.

ORTIGÃO, J. A. R.. **Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.

PORTO, Thiago Bomjardim. **Estudo da Interação de Paredes de Alvenaria Estrutural com a Estrutura de Fundação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RHIZOME. **Oldweb.today**. 2015. Disponível em: <<http://oldweb.today>>. Acesso em: 03 maio 2018.

ROMANINI, Augusto. Tensões no solo: Tensões em uma massa de solo. Universidade do Estado de Mato Grosso, campus Sinop. Geotecnia I, 2017.

SILVA, E.L. **Análise dos modelos estruturais para determinação dos esforços resistentes em sapatas isoladas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 1998.

SILVA, Giancarlo. **O que é e como funciona a linguagem JavaScript?** 2015. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/internet/O-que-e-e-como-funciona-a-linguagem-JavaScript/>>. Acesso em: 04 maio 2018.

STUART, Guilherme. **Inclinacao.jpg**. 2000. Disponível em: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/estruturas/images/Conceito-desloc_apoios/inclinacao.jpg>. Acesso em: 31 mar. 2018.

VILAR, Benedito de Souza; BUENO, Orencio Monje. **Mecânica dos Solos, vol. 1**. 2003. Apostila. Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Geotecnia.

VITORETI, Moisés Maciel. **Análise da interação solo - estrutura em fundações de concreto armado pelo método dos elementos finitos.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

WILLIAM, David. **A história do Html.** 2012. Disponível em: <<http://www.frontendbrasil.com.br/artigos/a-historia-do-html/>>. Acesso em: 03 maio 2018.

YAHOO! **Página inicial.** Disponível em: <<https://br.yahoo.com/>> . Acesso em: 04 mai. 2018.

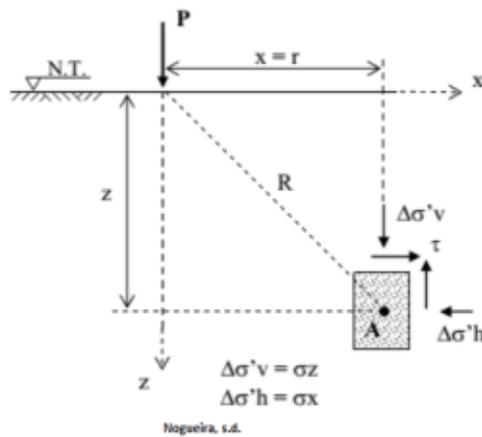
APÊNDICE A – EXEMPLO DO RELATÓRIO GERADO EM PDF: CARGA PONTUAL



NEVE: Núcleo de Engenharia Virtual e Experimental
Título: Tensões em Solos
Autora: Phamela C. Peres Ferreira Contadini
Orientadora: Ma. Cristiane Prado Marin
Tipo: Trabalho de Conclusão de Curso
Curso: Engenharia Civil

Carga Concentrada (BOUSSINESQ)

Ilustração do problema:



Equação para determinação das Tensões Verticais:

$$\Delta\sigma_v = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

Informações Iniciais:

Carga Concentrada: 10 kN

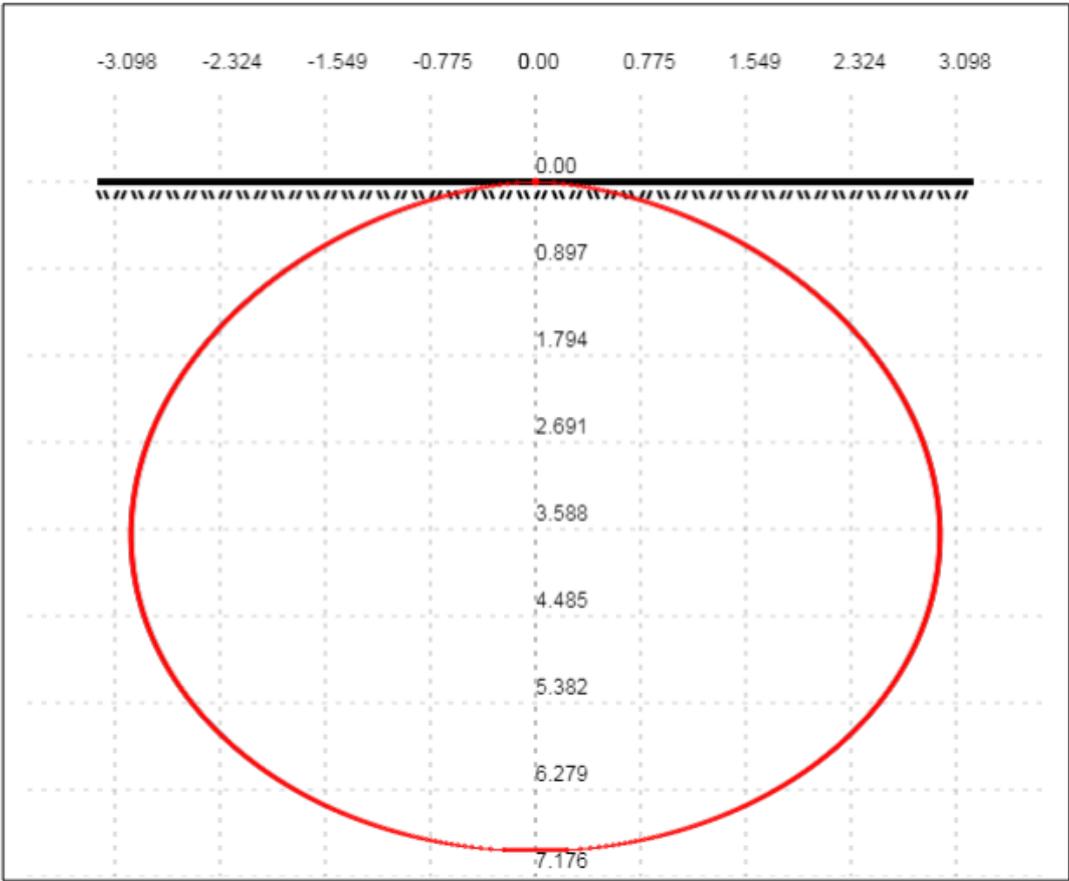
Tensão Limite: 0.1 kN/m²

Dados calculados pelo software:

Profundidade máxima atingida: 6.900 m

Afastamento horizontal máximo atingido: 2.979 m

Bulbo de tensões gerado:



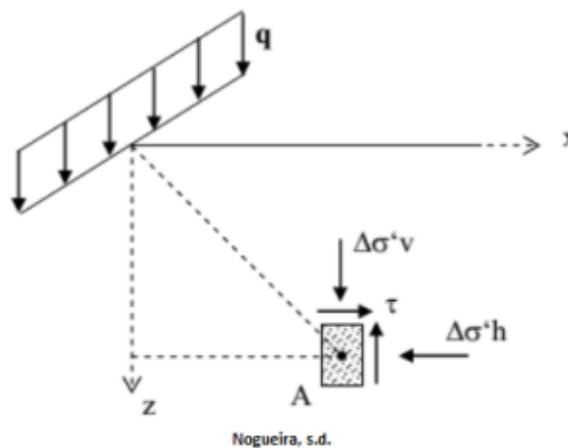
APÊNDICE B – EXEMPLO DO RELATÓRIO GERADO EM PDF: CARGA LINEAR



NEVE: Núcleo de Engenharia Virtual e Experimental
Título: Tensões em Solos
Autora: Phamela C. Peres Ferreira Contadini
Orientadora: Ma. Cristiane Prado Marin
Tipo: Trabalho de Conclusão de Curso
Curso: Engenharia Civil

Carga Linear (MELAN)

Ilustração do problema:



Equação para determinação das Tensões Verticais:

$$\Delta\sigma_v = \frac{2 \cdot q \cdot z^3}{\pi (z^2 + x^2)^2}$$

Informações Iniciais:

Carga Linear: 10 kN/m

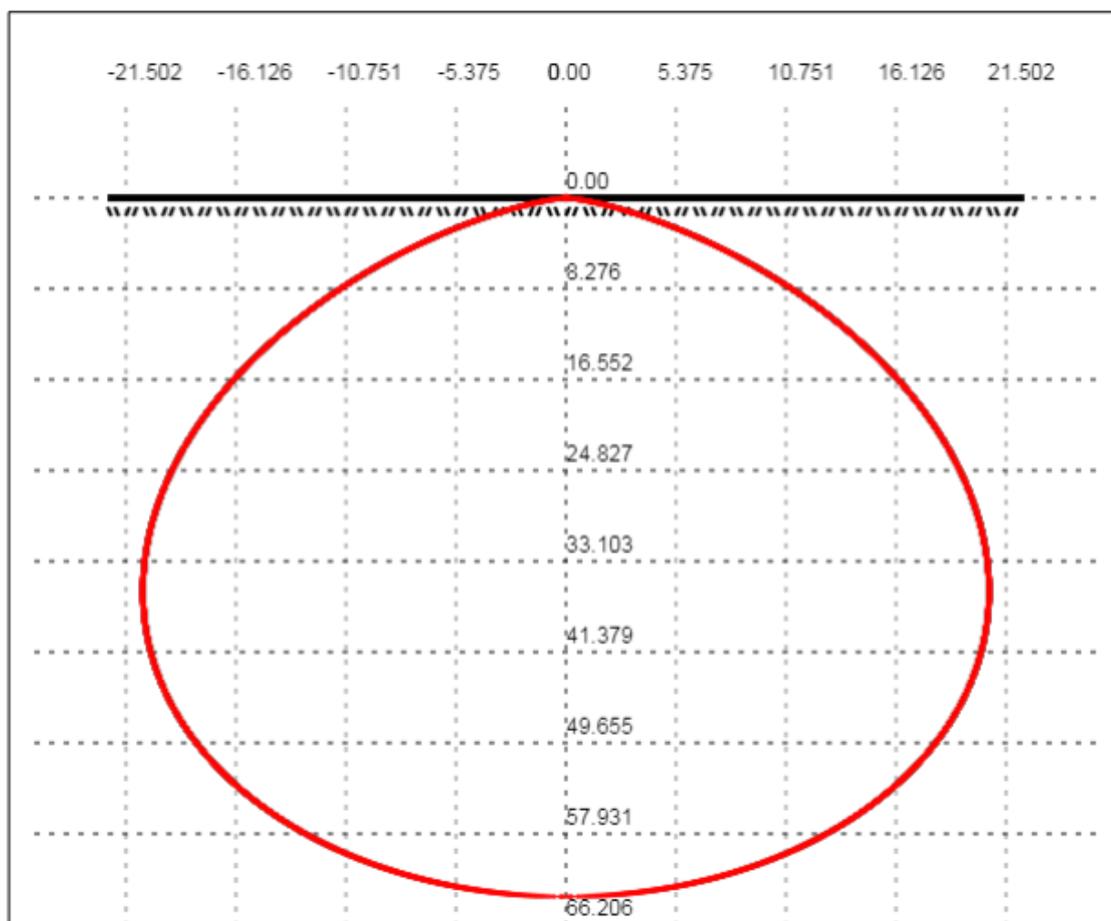
Tensão Limite: 0.1 kN/m²

Dados calculados pelo software:

Profundidade máxima atingida: 63.660 m

Afastamento horizontal máximo atingido: 20.675 m

Bulbo de tensões gerado:



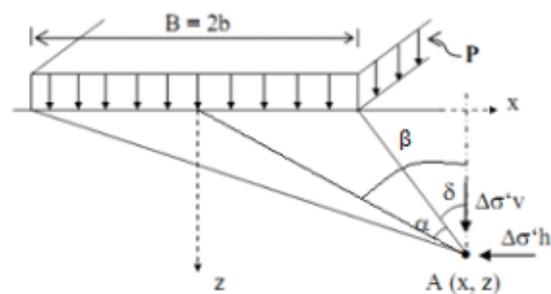
APÊNDICE C – EXEMPLO DO RELATÓRIO GERADO EM PDF: SAPATA CORRIDA



NEVE: Núcleo de Engenharia Virtual e Experimental
Título: Tensões em Solos
Autora: Phamela C. Peres Ferreira Contadini
Orientadora: Ma. Cristiane Prado Marin
Tipo: Trabalho de Conclusão de Curso
Curso: Engenharia Civil

Carga Distribuída Sobre Placa Retangular (Sapata Corrida)

Ilustração do problema:



Nogueira, s.d, adaptado

Equação para determinação das Tensões Verticais:

$$\Delta\sigma_v = \frac{p}{\pi} (2\alpha + \text{sen } 2\alpha \cdot \cos 2\beta)$$

Informações Iniciais:

Carregamento distribuído: 5 kN/m²

Tensão Limite: 0.1 kN/m²

Base da fundação: 5 m

Dados calculados pelo software:

Profundidade máxima atingida: 159.110 m

Afastamento horizontal máximo atingido: 52.250 m

Bulbo de tensões gerado:

