



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Estudo de Projeto de um Silo de Homogeneização em Concreto Armado de uma Fábrica de Cimento

Bruna Manica Lazzari¹, Rubem C. Schwingel², Américo Campos Filho³

¹ Mestranda, PPGEC/ UFRGS, bruna.ml@gmail.com

² Professor Adjunto, UFRGS, rubem@rs-engenharia.com

³ Professor Associado, PPGEC/ UFRGS, americo@ufrgs.br

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º. Andar, 90035-190, Porto Alegre – RS – Brasil

Resumo

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento dos projetos estrutural e de fundações de um silo de homogeneização em concreto armado de uma fábrica de cimento localizada no município de Cezarina, no estado de Goiás, Brasil. O silo em questão é uma estrutura enterrada não convencional cujo estudo global foi realizado por meio de comparações entre os fundamentos teóricos e os resultados obtidos pela análise em um programa em elementos finitos (SAP2000). Em primeiro lugar foi feito um estudo sobre o comportamento mecânico do solo local e assim foram definidos os seus parâmetros de resistência, baseados em dados obtidos a partir de um ensaio de campo. Em seguida, foram determinados os esforços resultantes sobre a estrutura, devido ao peso próprio, empuxos de água e terra, sobrecarga e uma combinação de carregamentos produzida pela máquina homogeneizadora apoiada sobre a estrutura. Tendo em vista que a região foi caracterizada pela presença de solos moles e de baixa resistência, foi realizado o cálculo global da estrutura para dois tipos de soluções possíveis para o projeto, considerando a análise da interação solo-estrutura. Por fim, foram adotadas fundações profundas, do tipo estacas hélice contínua, e foram determinadas as pressões de contato na interface estrutura-solo, bem como a real distribuição dos esforços internos na estrutura principal. A partir destes dados, foi feito o dimensionamento estrutural.

Palavras-chave

Estruturas de concreto armado; projeto de fundações; interação solo-estrutura.

1. Introdução

O cimento Portland é atualmente produzido em larga escala, necessitando de instalações industriais de grande porte, nas quais as matérias-primas passam por diferentes processos até a obtenção do produto final. Com o notável desenvolvimento do setor da construção civil nos últimos anos, motivado pelo crescimento da economia brasileira, o consumo de cimento em todo o País elevou-se, o que vem impulsionando a modernização, a ampliação e até mesmo a construção de novas fábricas de cimento no Brasil.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Durante a fabricação do cimento Portland, os silos de homogeneização são responsáveis pelo processo de pré-homogeneização do material. Por se tratar de uma estrutura não corrente, mas que é bastante utilizada em fábricas de cimento do mundo inteiro, surge a necessidade de um estudo mais aprofundado para o correto desenvolvimento de um projeto deste porte. Visando solucionar problemas teóricos e práticos envolvidos no seu dimensionamento, é apresentado, no presente trabalho, o projeto de uma estrutura como esta, pertencente à construção de uma nova linha de produção de uma fábrica de cimento na cidade de Cezarina.

A figura 1 apresenta uma vista superior e um corte transversal do silo. Este é caracterizado por um depósito circular coberto por uma estrutura de aço, onde ficam armazenados os materiais que serão misturados e transferidos para a estrutura de concreto armado enterrada. Esta, por sua vez, é constituída por uma caixa, conectada a dois túneis, sendo um de escape e o outro utilizado para conduzir o material pré-homogeneizado.

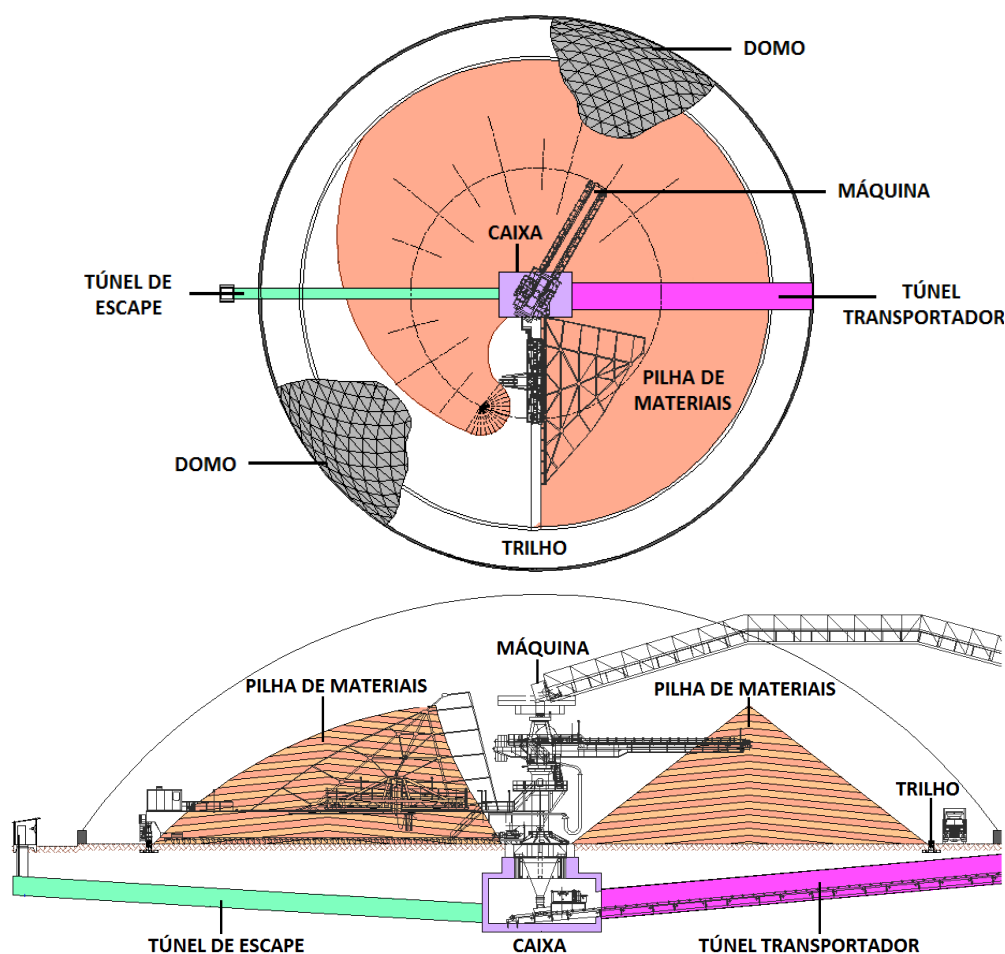


Figura 1 – Vista superior e corte transversal do silo de homogeneização.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



2. Estimativa dos parâmetros do solo

Os projetos de fundações e de estruturas confinadas por um maciço terroso, em geral, contemplam cargas aplicadas pela obra e uma resposta do solo a estas solicitações. Por serem muito distintos entre si, os solos respondem de maneira variável, e, por isto, o conhecimento das características e do tipo de solo existente torna-se pré-requisito para projetos seguros e econômicos. Somente com a execução de ensaios de campo ou laboratoriais é que é possível definir de maneira satisfatória a estratigrafia do subsolo e estimar as propriedades geomecânicas dos materiais envolvidos, informações indispensáveis à correta definição da solução a ser adotada para os mais variados tipos de projetos geotécnicos.

No Brasil, o ensaio de campo mais utilizado é o *Standard Penetration Test* (SPT), devido à simplicidade dos procedimentos e equipamentos e ao seu baixo custo de execução em comparação com os demais. Para o projeto do silo foi realizado um único furo de sondagem, posicionado na região central da estrutura. O relatório deste ensaio está apresentado na figura 2, cujos resultados foram considerados válidos para toda a superfície de projeto.

NA (m)	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	PERFIL GEOLÓGICO	COTAS (m)	N _{SPT}		
	De 0,00 a 2,00m - Solo Coluvionar. Argila Silto Arenosa. Consistência mole.		-1,00	4		
			-2,00	5		
	De 2,00 a 6,00m - Solo de Alteração Maduro. Silte pouco argiloso. Consistência de mole a dura.		-3,00	5		
			-4,00	15		
			-5,00	27		
			-6,00	17		
			-7,00	15		
			-8,00	12		
-8,20	De 6,00 a 16,04m - Solo Residual. Silte arenoso. Mediamente compacto a muito compacto.		-9,00	17		
-10,00			21			
-11,00			51			
-12,00			29			
-13,00			58			
-14,00			30/10			
-15,00			30/8			
-16,04			30/4			
			De 16,04 a 26,65m - Maciço Rochoso.		-17,00	
					-18,00	
	-19,00					
	-20,00					
	-21,00					
	-22,00					
	-23,00					
	-24,00					
	-25,00					
	-26,65					

Figura 2 – Sondagem SPT realizada no local do projeto.

Analisando a figura 2, nota-se que o perfil geotécnico da região é formado basicamente por argilas moles nos metros iniciais, seguida por camadas de outros materiais granulares de



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



reduzidas resistências. Sendo assim, foi analisada a hipótese de execução de estacas como solução para as fundações desta estrutura. Entre as diversas alternativas, preferiu-se a utilização de estacas escavadas do tipo hélice contínua, pois além de proporcionarem limpeza e organização à obra, possuem ótimo potencial de transposição de terrenos, elevada capacidade de carga e garantem mais agilidade ao processo construtivo.

O tratamento dos resultados do ensaio SPT visando à obtenção dos parâmetros constitutivos, representativos do comportamento do solo foi realizado segundo métodos indiretos. Desta forma, foi possível a utilização de formulações clássicas da Mecânica dos Solos para determinar o ângulo de atrito, peso específico, módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson do solo, parâmetros necessários para abordagens de projetos.

Para a adoção do ângulo de atrito de projeto, deve-se ter presente, em primeiro lugar, a granulometria dos solos analisados, para poder avaliar a viabilidade do uso das correlações empíricas. Solos moles e coesivos, que possuem índice de resistência à penetração (N_{SPT}) inferiores a cinco, são compressíveis e pouco resistentes e, portanto, não é recomendada a utilização destas relações. Já em solos granulares, é comum estabelecer correlações entre o N_{SPT} e o ângulo de atrito efetivo do solo, o que é possível, por exemplo, utilizando as proposições de *Godoy* (1983), *Teixeira* (1996) ou *Mello* (1971).

Para a determinação do peso específico, módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson do solo, não havendo a possibilidade de realização de um ensaio laboratorial, podem-se adotar valores aproximados estabelecidos por alguns autores conforme a consistência e o índice de resistência à penetração do SPT do material analisado. Para este trabalho adotaram-se valores de referência tabelados por *Teixeira e Godoy* (1998).

3. Tipos de carregamentos em estruturas enterradas

O carregamento atuante sobre qualquer estrutura enterrada é basicamente sempre o mesmo, e, em geral, é composto de três parcelas básicas de empuxos: os de terra, o devido a sobrecargas externas e o devido à água. O empuxo de terra é definido como uma ação produzida pelas pressões de contato entre o maciço terroso e uma estrutura enterrada. No caso deste silo, foi considerada apenas a influência do empuxo no repouso, que ocorre quando o deslocamento da



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



estrutura em relação à sua posição inicial é nulo ou desprezível, uma vez que a estrutura projetada é muito rígida e está totalmente confinada no maciço terroso.

O efeito da sobrecarga externa uniforme q atuante sobre o terreno foi considerado como uma altura equivalente de terra. Já a presença de água no solo, foi considerada adotando-se um valor padrão de 10 kN/m^3 para o peso específico da água, e calculando-se a pressão exercida pelo solo com um peso específico saturado.

4. Interação solo-estrutura

A análise da interação solo-estrutura tem por objetivo considerar a rigidez real das fundações no cálculo dos deslocamentos e esforços internos do conjunto estrutura principal e subestrutura. Estes esforços podem ser obtidos indiretamente, por meio das pressões de contato na interface estrutura-solo, que, por sua vez, são afetadas por fatores como a intensidade das cargas aplicadas, a rigidez relativa fundação-solo e as propriedades do solo.

A maior dificuldade para a consideração deste efeito refere-se, justamente, à definição da flexibilidade da fundação. Isto ocorre porque o equilíbrio estático dos elementos da subestrutura apresenta um elevado grau de hiperstaticidade, e, por esta razão, a consideração da interação entre estes elementos acaba sendo desprezada em projetos corriqueiros. Entretanto, dependendo do nível de deformação do solo e da rigidez da estrutura, a interação solo-estrutura pode modificar de forma acentuada o desempenho da edificação, visto que os recalques provocam uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais.

A análise da interação solo-estrutura pode ser feita com o auxílio de ferramentas computacionais, como alguns programas de cálculo em elementos finitos. Com este propósito, a estrutura é modelada com os pontos de contato com o solo representados por apoios elásticos, seguindo um dos modelos discretos de representação do solo. Este modelo, conhecido como Modelo de *Winkler*, admite válida a hipótese de que as pressões de contato são proporcionais aos deslocamentos. No caso de carregamento vertical de fundações, este modelo prevê que as pressões de contato Q , são proporcionais aos recalques w (figura 3). O coeficiente de reação vertical k , pode ser obtido com o auxílio de um ensaio de placa; através



da utilização de tabelas com valores típicos; ou pela relação entre a previsão da capacidade de carga e a estimativa de recalques para uma determinada fundação.

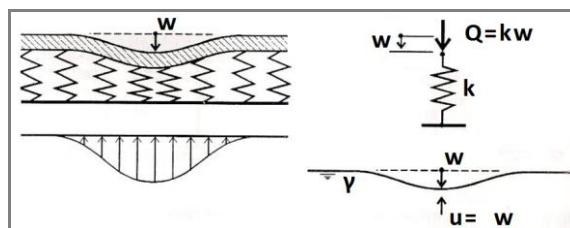


Figura 3 – Modelo de Winkler para representação do solo.

A determinação das pressões de contato pode ser realizada a partir de muitos modelos presentes na literatura. O surgimento do primeiro método semi-empírico para estimativa de transferência de carga de estacas, ocorreu no ano de 1975, com *Aoki e Velloso*. A partir deste modelo procedeu-se ao desenvolvimento de uma série de outros métodos baseados nesta mesma ideia, entre eles o de *Décourt e Quaresma* (1978), fundamentado exclusivamente em resultados obtidos através de ensaios SPT; e o de *Antunes e Cabral* (1996), específico para estacas do tipo hélice contínua. Essencialmente, esses métodos admitem que a capacidade de carga Q_U de uma estaca isolada, é igual à soma de duas parcelas: a parcela de carga resistida pelo solo da ponta da estaca, denominada carga de ponta Q_P ; e a parcela de carga resistida por atrito lateral ao longo do fuste da estaca, denominada carga de atrito lateral Q_L . A diferença fundamental entre esses métodos recai justamente na estimativa destes dois valores.

Para realizar o cálculo de recalques, foi utilizado neste trabalho o método de *Poulos e Davis*, baseado na teoria da elasticidade. O mesmo propõe analisar o comportamento individual de uma estaca cilíndrica, carregada axialmente e instalada em uma massa de solo de comportamento elástico semi-infinito, onde o deslizamento no contato entre a estaca e o solo é nulo e, portanto, há compatibilidade entre os movimentos da estaca e os deslocamentos do solo adjacente. A partir desta igualdade e por meio de um processo numérico que emprega a solução de *Mindlin*, o recalque da estaca foi calculado (RUSSO NETO, 2005).

5. Estudo global da estrutura

Para a criação do modelo estrutural do silo, foi utilizada a versão 15 do *software* SAP2000 (*Structural Analysis Program*), um programa para o cálculo de estruturas em geral, baseado no Método dos Elementos Finitos. As paredes e lajes das três estruturas foram modeladas



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



como elementos de área *shell-thin* (placa fina), disponíveis no *software* SAP2000. Foram utilizados elementos quadráticos e triangulares, totalizando 6075 elementos finitos cujas dimensões na superfície média da placa variaram entre 20 e 60 cm e as espessuras foram determinadas conforme os dados fornecidos inicialmente pelo projeto arquitetônico. Quanto ao material, foi definido concreto armado para todos estes elementos, possuindo como peso específico um valor de 25 kN/m^3 .

Para a definição do carregamento, com base no relatório de sondagem SPT apresentado na figura 2, a partir da cota de fundo da estrutura, dividiu-se o estrato terroso em quatro camadas principais. Por simplificação dos cálculos, o empuxo provocado pelo solo sobre a estrutura foi considerado como uma envoltória das cargas horizontais obtidas em cada camada de solo, gerando, assim, um carregamento triangular horizontal variando conforme a profundidade. O empuxo provocado pela sobrecarga externa de 225 kPa foi obtido multiplicando-se este valor pelo máximo valor de K_0 . Quanto ao empuxo provocado pela água, este foi influente apenas nas cotas mais profundas da estrutura. A figura 4 representa, de maneira esquemática, o carregamento devido a estes empuxos, os quais foram considerados atuantes em todas as paredes dos três elementos estruturais que compõem o silo.

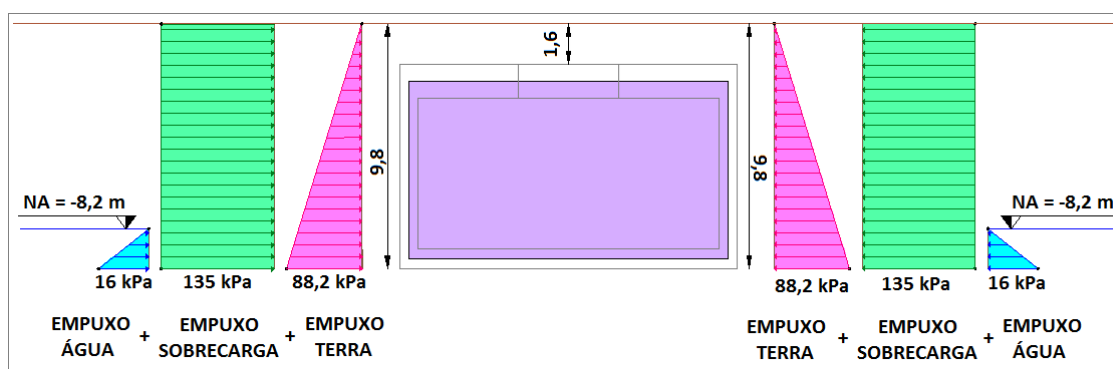


Figura 4 – Representação esquemática dos empuxos atuantes sobre a estrutura.

Além do carregamento horizontal, foi considerado ainda um carregamento vertical uniformemente distribuído ao longo de toda a superfície do silo, sendo aplicado nas lajes superiores das estruturas e equivalente a 225 kPa. Somado a isto, foi considerada também uma série de oito combinações de carga provocadas pela máquina. Estes carregamentos foram aplicados nos quatro pontos de apoio da máquina na laje superior da caixa e para cada situação analisada foi validado o pior caso.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



A primeira solução analisada, neste trabalho, refere-se à utilização de fundações profundas do tipo estacas hélice contínua, com 80 cm de diâmetro, na base dos três elementos do silo. Para a base da caixa, foram definidas 16 estacas, com espaçamentos entre eixos variando entre 2,4 m e 3,0 m. Para o túnel de escape e o túnel transportador, foram adotadas 22 e 20 estacas respectivamente. O espaçamento adotado entre estas foi de 5,0 m, sendo que nas proximidades da conexão com a caixa, devido ao seu grande carregamento, foi necessária uma redução deste valor para 2,5 m, como se pode observar na figura 5.

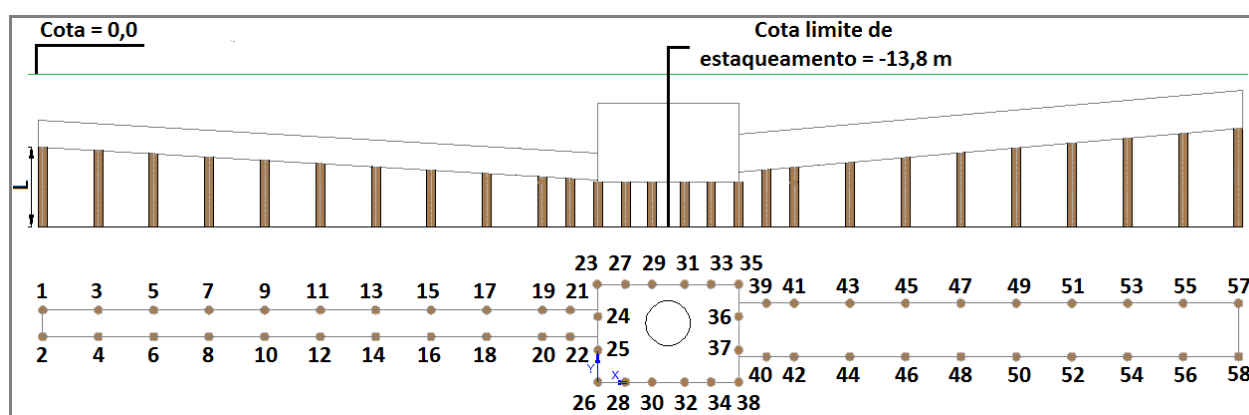


Figura 5 – Desenho esquemático da disposição das estacas.

É sabido que o solo encontrado nas laterais de cada estaca não é o mesmo, e, portanto, a capacidade de carga por atrito lateral de cada uma delas é função do solo atravessado. Sendo assim, para cada estaca foi calculada uma capacidade de carga admissível, adotando-se a média dos valores encontrados pelos métodos de *Aoki e Velloso (1975)*, *Décourt e Quaresma (1978)* e *Antunes e Cabral (1996)*. Os coeficientes de mola foram calculados a partir da capacidade de carga admissível e dos recalques previstos. Assim, as estacas foram simuladas no modelo computacional como apoios elásticos, com rigidez apenas em relação ao eixo z.

Analisando os resultados constatou-se que a estaca mais carregada era a de número 31, com carga igual a 128,67 toneladas, obtendo-se um coeficiente de segurança global igual a 2,06. Como o coeficiente de segurança mínimo previsto pela NBR 6122 para estacas sem prova de carga é de 2,00, é possível afirmar que a estrutura é segura e a solução pode ser adotada.

Apenas a título de estudo, foi proposta uma segunda alternativa de projeto. Neste caso, a estrutura foi analisada de forma a considerar a caixa apoiada diretamente sobre o terreno. Para



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



tanto, foi proposta a substituição de uma camada de dois metros deste solo por um material com melhores características. Assim, a estrutura contaria com dois tipos de fundações: as superficiais da caixa e as estacas mantidas da solução anterior, para os dois túneis.

O processo adotado para a representação do modelo estrutural desta solução foi semelhante ao anterior, salvo para os apoios da caixa. Neste caso, para cada nó dos elementos finitos da sua laje inferior, foi inserido um apoio elástico, com rigidez igual ao coeficiente de reação vertical do solo multiplicado pela área de influência deste nó. Após o cálculo, encontrou-se, para as fundações superficiais um coeficiente de segurança com valor de 4,72, sendo que o valor mínimo previsto pela NBR 6122 para este tipo de fundação é de 3,00. Já para as estacas desta mesma solução, o fator de segurança encontrado foi de 2,75, obtido na estaca de número 48.

Tendo em vista que a opção de adotar dois tipos de fundações em uma mesma estrutura possivelmente implicaria na ocorrência de recalques diferenciais, seria necessário um maior estudo do comportamento do conjunto como um todo para a utilização desta alternativa. Já a primeira solução, por adotar o mesmo tipo de fundação ao longo de toda a base da estrutura, torna-se mais simples de ser analisada. Além disso, não envolve o contratempo de realizar uma maior escavação durante a obra e facilita a execução contínua das estacas. Com base nestes aspectos, para este trabalho, a primeira solução apresentada foi eleita a mais adequada.

6. Análise dos resultados

Com a solução para o projeto definida, e a segurança global da estrutura garantida, pode-se prosseguir a análise dos resultados nos elementos da estrutura principal. Foi realizada, portanto, uma análise das solicitações internas dos elementos do silo, com as quais foi feito o dimensionamento da armadura das lajes e paredes.

Para o dimensionamento das fundações, utilizou-se como base a estaca mais carregada, que, conforme analisado previamente foi a de número 31, considerando apenas um carregamento axial atuando sobre ela. Segundo Alonso (1989), se a estaca estiver submetida apenas a cargas de compressão que lhe imponham tensões médias inferiores a 5 MPa, não haverá necessidade de armá-la. Como a tensão média atuante sobre esta estaca era de 2,56 MPa, não houve a necessidade de adotar armadura de compressão, apenas a armadura mínima.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Para o dimensionamento das lajes maciças e paredes da estrutura, foram utilizados os valores máximos dos momentos fletores positivos e negativos atuantes em cada direção, obtidos através do programa SAP2000. O cálculo da armadura foi realizado segundo o Estado Limite Último (ELU), conforme recomendações da NBR 6118. As armaduras das 6 lajes e 8 paredes do silo foram determinadas através do cálculo da flexão simples. Além disso, as 8 paredes que sustentam as lajes superiores da caixa e dos túneis foram também verificadas através do cálculo da flexo-compressão, já que estes elementos também apresentavam importantes esforços de compressão nas suas extremidades. Na região de apoio da máquina também foi previsto um reforço na armadura, devido à grande concentração de esforços nesta região. A análise completa dos resultados está apresentada integralmente em Lazzari (2012).

7. Conclusões

Através da análise estrutural de um silo de homogeneização em concreto armado, juntamente com suas fundações, procuraram-se utilizar recomendações práticas para a avaliação da interação solo-estrutura, de maneira a apresentar de uma forma simplificada a consideração deste efeito. O cálculo realizado pode ser considerado aproximado, uma vez que os modelos para a previsão da capacidade de carga e estimativa dos recalques das fundações possuem natureza empírica, e os métodos utilizados para a obtenção dos dados geotécnicos não reproduzem fielmente a realidade. Apesar disso, na falta de uma melhor investigação geotécnica, é comum a utilização destes modelos e correlações para obtenção de dados para o projeto. A partir da descrição das etapas de cálculo e dimensionamento do silo, pode-se constatar que os objetivos iniciais deste trabalho foram alcançados com sucesso.

Referências

- ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983 (reimpressão 1998).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- LAZZARI, B. M. **Projeto de um silo de homogeneização em concreto armado de uma fábrica de cimento localizada no município de Cezarina/GO**. 2012. 110 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- RUSSO NETO, L. **Interpretação de deformação e recalque na fase de montagem de estrutura de concreto com fundação em estaca cravada**. 2005. 272 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.