

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE**  
**CAMPUS CASCAVEL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CARGAS NAS**  
**FUNDAÇÕES DE SILOS VERTICAIS CILÍNDRICOS DE BASE SEMI-V**

**MARIVONE ZANELLA FANK**

**CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL**

**Julho – 2010**

**MARIVONE ZANELLA FANK**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CARGAS NAS  
FUNDAÇÕES DE SILOS VERTICAIS CILÍNDRICOS DE BASE SEMI-V**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração **Engenharia de Sistemas Agroindustriais**.

Orientador: Prof. Dr. Divair Christ

Co-orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso

**CASCADEL – PARANÁ – BRASIL**

**Julho – 2010**

**Ficha catalográfica**  
**Elaborada pela Biblioteca Central do Campus de Cascavel - Unioeste**

F215d Fank, Marivone Zanella  
Determinação do coeficiente de transferência de cargas nas  
fundações de silos verticais cilíndricos de base semi-v / Marivone Zanella  
Fank— Cascavel, PR: UNIOESTE, 2010.  
65 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Divair Christ  
Co-orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do  
Paraná.  
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola,  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.  
Bibliografia.

1. Armazenagem agrícola. 2. Silos - Instrumentação. 3.  
Transferência de carga. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II.  
Título.

CDD 21 ed. 631.23

**Bibliotecária: Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362**

## MARIVONE ZANELLA FANK

“Determinação do coeficiente de transferência de cargas nas fundações de silos verticais cilíndricos de base semi-V”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação “Stricto Sensu” em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Divair Christ  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei  
Departamento de Engenharia Civil, UEM.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leila Cristina Meneghetti  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Prof<sup>a</sup>. Dra. Silvia Renata Machado Coelho  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Cascavel, 09 de julho de 2010.

## **BIOGRAFIA**

Marivone Zanella Fank, natural de Sulina – PR, nascida em 07/09/1981.

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – *Campus* Cascavel em março de 2007.

Atuou como Engenheira Civil na empresa Fungeo Fundações e Geologia Ltda durante o ano de 2007.

Ingressou no Mestrado em Engenharia Agrícola em 2008, orientada inicialmente pelo professor Antonio Gabriel Filho e posteriormente pelo professor Divair Christ. Foi bolsista CAPES durante o período de abril de 2008 a março de 2010.

"Nenhum trabalho de qualidade pode ser feito sem concentração e auto-sacrifício, esforço e dúvida."

Max Beerbohm

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e aos meus pais pela minha existência;

A toda a minha família pelo apoio e incentivo, em especial ao Fank, meu esposo, companheiro nesta caminhada, pela presença constante e fonte de incondicional apoio e amor;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná;

À CAPES pela concessão da bolsa, possibilitando melhores condições para a realização do Mestrado;

Aos Professores Dr. Antonio Gabriel Filho e Dr. Divair Christ, meus orientadores, agradeço imensamente pela confiança, amizade, estímulo e experiência transmitida;

Ao Professor Dr. Décio Lopes Cardoso pela amizade, pelo apoio sempre demonstrado, pela dedicação e sabedoria na orientação deste trabalho;

Ao Professor Msc. Fábio Luiz Willrich pela amizade, orientação, disposição e fundamental ajuda durante todas as etapas deste trabalho;

À Professora Dr<sup>a</sup>. Leila Cristina Meneghetti pelo apoio e contribuição com seus conhecimentos;

A todos os professores do Mestrado, pelo conhecimento que me proporcionaram e pelas valiosas contribuições que deram ao trabalho;

Agradeço ao Arquiteto Pacheco e a toda a diretoria da Cooperativa Agroindustrial C.Vale, parceira neste trabalho, por terem possibilitado o desenvolvimento da parte experimental em uma de suas unidades armazenadoras, pela atenção e solicitude com que possibilitaram o acesso aos dados;

Ao Geólogo Gerson Ângelo Lorenzi, representante da empresa Fungeo Fundações e Geologia Ltda, também parceira neste trabalho, pela aquisição de grande parte dos equipamentos e materiais para o experimento, bem como fornecimento de mão-de-obra para a implantação dos mesmos, e também, pela amizade demonstrada, pelo comprometimento e orientação prestada;

Ao Eng. Civil Lucas André Sartori, representante da empresa CONSILOS, pela doação de materiais, pelo incentivo e prestatividade;

Ao Eng. Civil Vinícius Lorenzi, parceiro neste trabalho, pela sua ajuda, seu comprometimento e amizade;

Aos colegas e amigos da turma de estudo, pela amizade, incentivo e colaboração que nunca deixaram de prestar;

A todas as pessoas que com sua amizade, apoio, compreensão e carinho, disponibilizaram sua atenção e seus conhecimentos para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

### DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CARGAS NAS FUNDAÇÕES DE SILOS VERTICAIS CILÍNDRICOS DE BASE SEMI-V

As estruturas de engenharia são projetadas em função dos esforços impostos. No caso de silos, não há uma norma brasileira que prescreva sobre seus projetos e ações. Tal limitação leva os projetistas a utilizarem as prescrições de normas estrangeiras, as quais, no entanto, apresentam divergências. Este trabalho mostra a evolução do conhecimento acerca do tema e tem como objetivo determinar experimentalmente a distribuição de cargas nas fundações de silos verticais cilíndricos, obtendo o coeficiente de transferência do carregamento para o fundo e anel do mesmo, com o intuito de contribuir para uma melhor compreensão da distribuição das cargas e para um melhor dimensionamento destas estruturas. Para a realização do trabalho foram instrumentadas por meio de células de pressão quatro estacas sob o anel de um silo protótipo, localizado no parque industrial da C. Vale – Cooperativa Agroindustrial Ltda, no município de Palotina, Paraná. As leituras das células foram realizadas por sistema automático de aquisição de dados durante as fases de carregamento, armazenamento e descarregamento dos grãos de milho. Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem as seguintes conclusões: existe uma divergência entre a carga transferida e o coeficiente de 30% usualmente utilizado em projetos. Este índice se apresentou coerente com as cargas médias nas estacas até o silo estar carregado com 50000 kN, o que corresponde a 64% do carregamento pleno. A partir daí o coeficiente de transferência apresentou-se superior, chegando a 50%. Ainda, as cargas observadas nas estacas instrumentadas, mostraram-se de forma desigual, ou seja, o carregamento nas estacas foi diferenciado, atingindo cargas máximas de 800, 845, 520 e 600 kN, correspondentes a coeficientes de 47, 50, 30 e 35%, respectivamente. As diferentes magnitudes das cargas nas estacas estão associadas aos valores dos recalques medidos, os quais foram elevados nas fundações localizadas no alinhamento do túnel, ultrapassando 40 mm. O comportamento individual de cada estaca identifica a necessidade de analisar com mais critério os coeficientes adotados em cálculos a fim de evitar problemas estruturais.

**Palavras-chave:** estruturas de armazenamento, instrumentação, índice de transferência de carga.



## ABSTRACT

### DETERMINATION OF LOAD TRANSFER COEFFICIENT ON SEMI-V VERTICAL BASE CYLINDER SILOS FOUNDATIONS

Engineering structures are designed according to the imposed stress. In the case of silos, there is not a Brazilian standard regulation to prescribe their projects and actions. This limitation leads designers to use the foreign standards requirements which, however, differ from one another. This paper shows the evolution of knowledge about the subject, and also aims to experimentally determine the load distribution on vertical cylindrical silos foundations, getting the load transfer coefficient to its bottom and ring, in order to contribute to a better understanding of load distribution for the improvement of these structures design. To conduct the study, four piles on a prototype silo ring located in the Industrial Park C. Vale - Cooperativa Agroindustrial Ltda in Palotina, Paraná, Brazil, were instrumented by using pressure cells. The cell readings were performed by automatic data acquisition during the phases of corn loading, unloading and storage. The results of this research allow the following conclusions: there is a difference between the transferred load and the 30% coefficient usually used in projects. This index showed consistent with the average loads in piles until the silo gets loaded with 50000 kN, which corresponds to 64% of full load. Thereafter, the transference coefficient raised, reaching 50%. Moreover, the observed loads on the instrumented piles were unevenly shown, in other words, the loading on the piles were different, reaching maximum loads of 800, 845, 520 and 600 kN, corresponding to coefficients of 47, 50, 30, and 35%, respectively. The different magnitudes of the loads on piles are associated with the measured values of the settlements, which were high in the foundations located on the tunnel alignment, exceeding 40 mm. Each individual pile behavior identifies the need for detailed coefficients analysis adopted in calculations to avoid structural problems.

**Keywords:** storage structures, instrumentation, load transfer index.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Silos .....	3
2.2 Pressões em silos .....	4
2.2.1 Parâmetro K.....	6
2.2.2 Teoria de Jansen .....	7
2.2.3 Teoria de Rankine.....	9
2.2.4 Normas internacionais .....	11
2.2.4.1 ENV (1995).....	11
2.2.4.2 AS 3774 (1996) .....	12
2.2.4.3 DIN 1055 (1987).....	13
2.2.5 Pesquisas atuais.....	14
2.3 Mecânica dos solos.....	16
2.3.1 Coeficiente de empuxo de terra .....	16
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 Características do silo .....	19
3.2 Processo de execução dos silos .....	21
3.3 Instrumentação.....	22
3.3.1 Célula de pressão .....	23
3.3.2 Sistema de aquisição de dados .....	23
3.3.3 Implantação da instrumentação .....	24
3.4 Ações nas fundações do silo .....	28
3.5 Caracterização geológico-geotécnica do maciço.....	29
3.5.1 Determinação da capacidade de carga das estacas .....	40
3.6 Recalque das fundações .....	41
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>43</b>
4.1 Carregamento do silo .....	44
4.2 Armazenamento .....	45
4.3 Descarregamento.....	46
4.4 Leitura das células .....	46
4.4.1 Célula 1 .....	47
4.4.2 Célula 2 .....	48
4.4.3 Célula 3 .....	50
4.4.4 Célula 4 .....	50
4.4.5 Análise conjunta das células.....	51
4.5 Capacidade de carga das estacas.....	54
4.6 Recalques .....	56
4.7 Cálculo da deformação da estaca .....	58
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>60</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>62</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação dos silos segundo a relação altura/diâmetro (h/d) (FREITAS, 2001) .	3
Tabela 2 Valores de $\kappa$ e $\alpha$ (Monteiro, 1997), apud VELLOSO e LOPES (2002).....	41
Tabela 3 Valores de F1 e F2 (Laprovitera, 1988; Benegas, 1993), apud Velloso e Lopes (2002) .....	41
Tabela 4 Quantidade de grãos armazenados diariamente.....	44
Tabela 5 Cargas observadas nas células durante o início, metade e final da fase de armazenamento.....	45
Tabela 6 Recalques observados no anel do silo.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Camada elementar adotada por Janssen (FREITAS, 2001).	8
Figura 2 Pressões em silos de fundo plano – Rankine (FREITAS, 2001).	9
Figura 3 Silos tremonha – Diagrama de pressão lateral – Rankine (GOMES, 2000).	10
Figura 4 Distribuição das pressões em silos com fundo plano – AS 3774 (FREITAS, 2001).	12
Figura 5 Pressões – Norma ENV (HEZEL, 2007).	14
Figura 6 Pressões – Norma ACI (HEZEL, 2007).	15
Figura 7 Pressões – Norma DIN (HEZEL, 2007).	15
Figura 8 Pressões – Norma AS (HEZEL, 2007).	15
Figura 9 Pressões – Norma BMHB (HEZEL, 2007).	16
Figura 10 Empuxos (a) Ativo, (b) Passivo (MOLITERNO, 1994).	18
Figura 11 Vista geral da implantação dos silos.	19
Figura 12 Vista geral da bateria E.	20
Figura 13 Detalhe do formato do fundo do silo (semi V).	20
Figura 14 Disposição das estacas sob o anel do silo.	21
Figura 15 Sequência executiva dos silos.	22
Figura 16 Células de pressão utilizadas no experimento.	23
Figura 17 Locação das estacas instrumentadas.	24
Figura 18 Nicho para posicionamento da célula de pressão.	25
Figura 19 Detalhe da posição da célula de carga e do acesso à mesma.	25
Figura 20 Instalação das chapas metálicas nos poços escavados.	26
Figura 21 Célula de pressão devidamente posicionada.	27
Figura 22 Localização do poço do elevador em relação ao silo E1.	27
Figura 23 Sistema de aquisição de dados montado.	27
Figura 24 Reconstituição da estaca.	28
Figura 25 Locação dos furos da sondagem tipo S.P.T.	29
Figura 26 Perfil S.P.T. 01.	30
Figura 27 Perfil S.P.T. 08.	31
Figura 28 Perfil de S.P.T. 09.	32
Figura 29 Locação dos furos da sondagem mista.	33
Figura 30 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 01.	34
Figura 31 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 02.	35
Figura 32 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 03.	36
Figura 33 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 04.	37
Figura 34 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 05.	38
Figura 35 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 06.	39
Figura 36 Locação dos pontos de nivelamento.	42
Figura 37 Carregamento diário do silo.	45
Figura 38 Curva carga-tempo para a célula 1.	47
Figura 39 Rompimento da base de regularização de suporte da célula de carga.	48
Figura 40 Curva carga-tempo para a célula 2.	49
Figura 41 Curva carga-tempo para a célula 3.	50
Figura 42 Curva carga-tempo para a célula 4.	51
Figura 43 Curvas carga-tempo para as células.	52
Figura 44 Greides da superfície do terreno e do impenetrável à percussão.	53
Figura 45 Capacidade de carga das estacas - SM 01.	54
Figura 46 Capacidade de carga das estacas - SM 02.	54
Figura 47 Capacidade de carga das estacas - SM 03.	55
Figura 48 Capacidade de carga das estacas - SM 04.	55
Figura 49 Capacidade de carga das estacas - SM 05.	55
Figura 50 Capacidade de carga das estacas - SM 06.	56
Figura 51 Comportamento do recalque em função do tempo.	57
Figura 52 Comportamento do recalque em função do carregamento e descarregamento do silo.	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

### LETRAS MINÚSCULAS

$\phi$	Ângulo de atrito
$\phi_e$	Ângulo de atrito efetivo
$\phi_i$	Ângulo de atrito interno
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo do solo
$\phi_r$	Ângulo de repouso do produto
$\phi_w$	Ângulo de atrito do produto com a parede
$\mu$	Coeficiente de atrito do produto com a parede
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\rho$	Densidade
$\gamma$	Peso específico do produto
$\tau$	Tensão de Cisalhamento
$\tau_p$	Tensão cisalhante passivo
$\tau_v$	Tensão cisalhante vertical
$\sigma$	Tensão Normal
$\sigma_x$	Tensão na direção “x”
$\sigma_y$	Tensão na direção “y”
$\sigma_v$	Tensão vertical
$\sigma_h$	Tensão horizontal
$\sigma_{\text{fundo}}$	Pressão na base plana de um modelo de silo alto
$a_0$	Distância genérica para cálculo da pressão
$c$	Coesão
$c'$	Coesão efetiva
$d$	Diâmetro do silo
$d_w$	Incremento infinitesimal da ordenada w
$d_{pv}$	Incremento infinitesimal da pressão vertical “p <sub>v</sub> ”
$d_z$	Incremento infinitesimal da ordenada z
$e$	Espessura da parede
$e_i$	Excentricidade de carregamento
$h$	Altura
$p$	Carga uniformemente distribuída
$p_a$	Pressões laterais ativas
$p_p$	Pressões laterais passivas

$\rho_h$	Pressão horizontal na parede vertical
$\rho_v$	Pressão vertical
$\rho_{vf}$	Pressão vertical atuando no fundo plano
$\rho_w$	Pressão de atrito na parede vertical
$r$	Raio do silo
$u$	Pressão neutra
$z$	Ordenada a partir do nível de referência
$z^*$	Profundidade local
$z'$	Ordenada a partir do vértice da tremonha

### LETRAS MAIÚSCULAS

$A$	Área da sessão transversal de um silo
$E$	Módulo de Elasticidade longitudinal do material
$E_0$	Empuxo em repouso
$E_a$	Empuxo ativo
$E_p$	Empuxo passivo
$K$	Razão entre as pressões horizontal e vertical
$K_a$	Coefficiente de empuxo ativo
$K_p$	Coefficiente de empuxo passivo
$K_0$	Coefficiente de empuxo em repouso
$N$	Força normal
$P_{v,w}$	Força de compressão devida ao atrito na base da parede
$P_w$	Força de compressão sobre a parede por unidade de perímetro
$U$	Perímetro da seção A

## LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANSI	American National Standard Institute
AS	Australian Standard
BMHB	British Materials Handling Board
CFBC	Canadian Farm Building Code
DIN	Deutsche Industrie Norm
EUROCODE	European Committee for Standardization
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Registrada

## 1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é o setor propulsor da economia brasileira. Dentre os produtos da agropecuária brasileira destacam-se os grãos, que têm alcançado recordes nas últimas safras graças ao uso de tecnologias de última geração. Por outro lado, a infraestrutura de armazenagem não mostra conexão com este desempenho e compromete a perenidade do agronegócio. Visando a industrialização do agronegócio é fundamental que os sistemas de armazenagem sejam eficazes, técnica e economicamente.

O sistema de armazenamento a granel propicia redução dos custos e tempo de operação devido à eliminação de sacaria e mecanização, tem maior facilidade na operação de controle de pragas, temperatura e umidade, maior facilidade no manuseio e menor custo de mão-de-obra. Atualmente, o silo cilíndrico é o modelo de estrutura de armazenagem agrícola a granel que apresenta maior tendência de popularização no meio industrial.

A análise do comportamento das estruturas dos silos tem se destacado nas diversas áreas de pesquisas relacionadas aos sistemas de armazenamento, uma vez que não existe uma padronização no que tange ao dimensionamento destas estruturas. Colapsos e ruínas em silos podem ser atribuídos ao fato de que muitos projetistas associam o cálculo estrutural destas estruturas ao mesmo princípio de reservatório de líquidos, não considerando, porém, o atrito do produto armazenado com a parede do silo.

Atualmente, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos em relação à determinação das pressões em silos. Contudo, no Brasil, os procedimentos de cálculo estrutural destes elementos não estão normatizados. Diferentes normas são utilizadas para os projetos, todas se baseiam em métodos teóricos e empíricos e a grande maioria utiliza a teoria de Janssen, que propõe equações baseadas nas características do produto armazenado (FREITAS, 2001).

Contudo, a heterogeneidade dos parâmetros dos produtos armazenados torna complexa a previsão das tensões atuantes e a forma de distribuição destas nas paredes e fundo dos silos, ocasionando divergência entre pesquisadores e as normas internacionais.

A distribuição das tensões nos silos depende do comportamento do produto, da interação entre o produto armazenado e a parede do silo e das propriedades de fluxo durante o processo de carregamento e descarregamento. Diferentes resultados são observados experimentalmente para as tensões horizontais, verticais e o parâmetro K, que é a relação entre elas. Isto tem levado diversos pesquisadores a formularem diferentes teorias sobre as tensões nos silos.

Em adição, constata-se que os silos são edificações que apresentam um alto índice de ruína devido aos recalques, os quais estão intimamente relacionados ao desempenho de suas fundações, que, por sua vez, são dimensionadas com base na distribuição das tensões entre o fundo e o anel do silo.



A instrumentação dos silos por meio de células de pressão permite o estudo das tensões relativas aos produtos armazenados tanto nas condições estáticas quanto dinâmicas. Com resultados de campo confiáveis, é possível minimizar aspectos limitantes ao dimensionamento de projetos, tornando-os mais adequados técnica e economicamente, contribuindo para a eliminação ou mitigação dos problemas referentes, tais como perda da estrutura ou necessidade de seu reforço.

Assim, este trabalho teve como objetivo a determinação experimental do coeficiente de transferência de cargas nas fundações de silos verticais cilíndricos de base semi-V, através da instrumentação por meio de células de carga de estacas localizadas sob o anel de um silo protótipo.

A pesquisa realizada pode contribuir para que se atinja um nível de conhecimento capaz de otimizar as dimensões dos elementos estruturais e proporcionar o desenvolvimento de uma tecnologia regional no que tange à otimização de projetos e execução de silos, podendo contribuir para a solução dos problemas de colapsos e disfunções observados em silos da região. Além disso, é um trabalho norteador de futuras pesquisas e pode auxiliar na elaboração de norma brasileira acerca de dimensionamento destas estruturas, possibilitando que sejam mais adequadas técnica e economicamente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Silos

Os silos são estruturas que armazenam grãos, farinhas e material sólido a granel, diferenciando-se dos reservatórios por estes armazenarem água, álcool e fluidos de maneira geral. Uma grande diferença entre reservatório e silos é o método de cálculo de cada um (HEZEL, 2007). Os reservatórios apresentam ações hidrostáticas e os silos apresentam pressões muito elevadas em relação aos reservatórios, devido ao atrito do produto com a parede.

Os silos são células individualizadas, geralmente cilíndricas, construídas em concreto, chapas metálicas ou alvenaria e, quando agrupadas, denominam-se baterias, podendo ou não ser dotadas de sistema de ventilação (BADIALE & SÁLES, 1999).

Os silos são divididos quanto ao material estrutural empregado, devido à construção em relação ao solo e pela sua forma geométrica (CALIL JR & CHEUNG, 2007), da seguinte forma:

- Quanto à construção em relação ao solo: silos aéreos ou elevados, silos subterrâneos e silos semi-subterrâneos;
- Quanto à geometria: silos esbeltos, silos baixos e silos horizontais;
- Quanto à entrada de ar: silos herméticos e silos não-herméticos.

Outros atributos geométricos também diferenciam os silos, como, por exemplo, o tipo de fundo, que pode se apresentar de forma cônica (ou com tremonha) ou plana.

Os silos cilíndricos são ditos verticais quando o diâmetro da base for menor que a altura e horizontais quando contrário, sendo que os verticais exigem menor investimento por quantidade unitária armazenada (BADIALE & SÁLES, 1999).

Segundo Palma (2005), quando a relação altura/diâmetro for maior ou igual a 1,5 os silos são classificados como esbeltos.

As normas internacionais diferem quanto à classificação do que seria uma célula baixa ou alta para silos, como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1** Classificação dos silos segundo a relação altura/diâmetro (h/d) (FREITAS, 2001)

NORMA	CLASSIFICAÇÃO		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
AUSTRALIANA AS 3774/1996	$h/d < 1$	$1 < h/d < 3$	$h/d > 3$
EUROCODE ENV 1991/1995	$h/d < 1,5$	-	$h/d \geq 1,5$
AMERICANA ACI 313/1991	$h/d \leq 2$	-	$h/d > 2$
ALEMÃ DIN 1055/1987	$h/d < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq h/d \leq 5\mu$	$h/d > 5\mu$
INGLESA BMHB - 1985	$h/d \leq 1,5$	-	$h/d > 1,5$
CANADENSE CFBC/1983	$h/d \leq 0,75$	-	$h/d > 0,75$
FRANCESA SBATI/1975	$h/d < 2,5$	-	$h/d \geq 2,5$
ISO 11697/1995	$h/d < 1,5$	-	$h/d > 1,5$
DIN 1055-6/ 2000	$h/d < 1,5$	-	$h/d > 1,5$

## 2.2 Pressões em silos

As solicitações em silos são de diferentes naturezas, podendo-se classificá-las como: ações permanentes, as quais são provocadas pelo peso próprio e cobertura; ações variáveis, que são causadas por pressão dos produtos, vento, recalques; e ações excepcionais, que são aquelas devidas a explosões e impactos.

A exata predição da distribuição de cargas no corpo do silo é um dos principais problemas no que tange ao quesito dimensionamento destas estruturas, uma vez que essas distribuições dependem do comportamento do produto, da interação entre o produto armazenado e da parede do silo e, ainda, das propriedades de fluxo durante o processo de carregamento e descarregamento (MARTINEZ et al., 2002).

De modo geral as normas internacionais adotam a teoria de Janssen e/ou de A & M. Reimbert para a previsão das pressões estáticas, considerando coeficientes de sobrepressão para a obtenção das pressões dinâmicas (FREITAS & CALIL JR, 2005).

O Brasil ainda não possui uma norma específica para a estimativa das cargas a serem utilizadas nos projeto de silos, motivo pelo qual o dimensionamento destas estruturas tem sido feito com base em prescrições de normas internacionais, as quais se baseiam em teorias de estimativa de cargas em silos (CALIL JR, 1990). Nessas teorias, o comportamento das pressões dos grãos é, em sua maioria, baseado na teoria de Rankine, desenvolvida na mecânica dos solos para dimensionamento de estruturas de contenção. Os parâmetros relevantes da teoria são as relações entre a pressão vertical e a pressão horizontal, os coeficientes de pressão ativa e passiva ( $K_a$  e  $K_p$ ) e o ângulo de atrito interno.

Contudo, o desenvolvimento de atrito dos grãos com a parede não permite a simples transposição da teoria de Rankine para aplicação em silos, sendo necessário considerar as forças de arraste nas paredes e as condições de carregamento e descarregamento (GAYLORD & GAYLORD, 1977<sup>1</sup> apud FREITAS, 2001).

No carregamento as pressões desenvolvidas são denominadas iniciais ou estáticas e, no descarregamento, pressões de fluxo ou dinâmicas. A sobrecarga resultante na parede na condição de descarregamento é elevada e torna a avaliação das solicitações ainda mais complexa (CALIL JR, 1990).

No descarregamento, pressões de fluxo de sólidos granulares em silos provocam grandes deslocamentos e perda de simetria, mesmo em silos idênticos armazenando mesmo material (NIELSEN, 1998).

Postula Reimbert (1979)<sup>2</sup> apud Hezel (2007) que no carregamento as pressões provocadas pelo empuxo podem ser matematicamente formuladas, tal a sua regularidade. Porém, no descarregamento as perturbações no equilíbrio dos grãos armazenados não

---

<sup>1</sup> GAYLORD JR, E.H.; GAYLORD, C.N. (1977). Granular material pressures in bins. *American Society of Agricultural Engineers*. Paper n. 77-4503.

<sup>2</sup> REIMBERT, M; REIMBERT, A. *Silos: teoria y practica*. Editorial Américalee SRL. Buenos Aires. 1979.

permitem o mesmo tratamento com acurácia. Segundo Molenda et al. (2007), recalques diferenciais perigosos podem ser provocados por carregamentos e descarregamentos excêntricos, imperfeições geométricas, e não-uniformidade das condições de atrito.

Ainda, segundo Jiang & Zheng (2008), em silos, para alguns materiais granulares, ocorre uma saturação das tensões no fundo, dado que, a partir desse ponto de saturação, acréscimo na altura da coluna armazenada não implica incrementos nessas tensões.

Resultados experimentais levaram diferentes pesquisadores a formularem diferentes teorias na abordagem desse tema. Segundo Calil Jr. (1997), tais pesquisadores podem ser agrupados em três categorias bem distintas: os que estudam as ações e deformações em silos reais e modelos reduzidos; os que se dedicam a melhorar os modelos do comportamento dos produtos (leis constitutivas dos produtos armazenados) e os que estudam os esforços estáticos e dinâmicos nas estruturas, normalmente com base no método dos elementos finitos.

Não há um modelo analítico para as pressões nas paredes do silo que inclua todos os parâmetros relevantes. Niedostatkiewicza et al. (2009) instrumentaram um silo modelo com equipamentos de grande sensibilidade e observaram pronunciada variação de volume nos grãos ensilados durante o fluxo, a qual dependia principalmente da densidade inicial do grão, nível de tensão, diâmetro médio do grão, tamanho do espécime e taxa de fluxo.

Aplicando o método dos elementos finitos e de elemento discreto, Rotter et al. (1998) concluíram que a comparação dos resultados de modelos computacionais com experimentais é, no mínimo, fraca. Medições das pressões em um silo retangular indicaram que a rigidez da parede e condições de contorno influencia significativamente o estado de tensões. As tensões medidas são muito diferentes das previstas pelas teorias tradicionais e normas existentes (JARRETT et al., 1995).

Segundo Nascimento (1996), as propriedades de fluxo dos produtos armazenados são essenciais para o processamento dos sistemas de armazenagem durante o carregamento e o descarregamento. Segundo o mesmo autor, com o conhecimento de tais propriedades ainda é possível a determinação e a predição das pressões que ocorrerão na estrutura e, principalmente, os tipos de fluxo, fatores muito importantes para o processamento.

Para a determinação das características geométricas de silos, tremonhas e dimensões do orifício de descarga, deve-se direcionar especial atenção ao ângulo de atrito com a parede, que representa o esforço de adesão entre o produto armazenado e a superfície do material da parede (LOPES NETO et al., 2007).

O conhecimento do ângulo de atrito com a parede ( $\phi_w$ ) é essencial para projetos estruturais e de estabilidade de silos nos quais devem ser garantidas descargas seguras e consistentes (IQBAL & FITZPATRICK, 2006).

No que se referem à estimativa das pressões em silos, as normas internacionais existentes são basicamente apoiadas em duas teorias: a teoria de Janssen, para as cargas iniciais ou de natureza estática, e a teoria de Rankine, em que a deformação produz uma condição de pressões.

### 2.2.1 Parâmetro K

Define-se o parâmetro K como a relação entre a pressão horizontal e a pressão vertical em um ponto de uma massa granular. Com o seu valor, calculam-se as pressões exercidas pelo produto nas paredes e na base do silo (CALIL JR, 1997). Dependendo dos deslocamentos relativos da parede, associam-se a K estados de tensão ativo ( $K_a$ ), passivo ( $K_p$ ) e em repouso ( $K_0$ ).

Janssen não definiu teoricamente o valor da relação entre a pressão horizontal e a vertical (parâmetro K), mas mediu indiretamente a pressão  $\sigma_{\text{fundo}}$  na base plana de um modelo de silo alto. Assumindo que a pressão vertical alcançou o valor assintótico, então a relação K pode ser determinada através da equação (1).

$$K = \frac{\gamma d}{\sigma_{\text{fundo}} \operatorname{tg} \phi_w} \quad (1)$$

Onde:

$\gamma$  = peso específico

$d$  = diâmetro

$\sigma_{\text{fundo}}$  = pressão na base

$\phi_w$  = ângulo de atrito do grão com a parede

O valor empírico para K expresso na equação (2).

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen} \phi_i}{1 + \operatorname{sen} \phi_i} = \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi_i}{2} \right) \quad (2)$$

Onde:

$\phi_i$  = ângulo de atrito interno

Assumido sempre como sendo parte da equação de Janssen, o parâmetro K foi de fato introduzido por Koenen em 1896, sendo determinado, com base no coeficiente de pressão ativa ( $K_a$ ) da teoria de Rankine para empuxos de terra (CALIL JR., 1997).

Existem tabelas para estimativas de K, bem como formulações para sua obtenção, para condições de carregamento e de descarregamento. Contudo, Freitas (2001), destaca que existem grandes variações nos valores de K se comparados os encontrados através de equações desenvolvidas por diferentes pesquisadores e os adotados por normas estrangeiras.

Em vários trabalhos de pesquisa e normas são sugeridas diferentes recomendações para calcular a relação de pressão (DINIZ & NASCIMENTO, 2006). Na maioria destas recomendações o parâmetro K é determinado somente com o conhecimento do ângulo de atrito interno.

Na maioria das diferentes recomendações existentes, pode ser notado que ainda há muita incerteza na determinação da relação de pressão. Experiências mostraram que os valores das pressões e do parâmetro K relacionado a elas dependem de quase quarenta fatores que podem se agrupar em seis grupos primários (KAMINSKI & WIRSKA, 1998):

- As propriedades físico-químicas do produto granular;
- A forma e dimensões do silo;
- O tipo de fluxo do produto durante o descarregamento do silo;
- As características das operações tecnológicas;
- O efeito de tempo e parâmetros térmicos e de umidade;
- A interação entre a estrutura de silo e o produto granular.

Segundo Haaker (1990)<sup>3</sup>, citado por Silva et al. (2003), o problema com todas as propostas para o parâmetro K é que elas foram obtidas somente das hipóteses que o material está em um estado de deslizamento e o atrito com a parede é mobilizado completamente. Estas hipóteses, segundo ele, não são necessariamente cumpridas na parede vertical da célula.

### 2.2.2 Teoria de Jansen

A teoria de Janssen foi desenvolvida somente para as condições estáticas. Sua contribuição para a teoria de pressões em silos de grãos e para o conhecimento do atrito interno no comportamento de produtos granulares é de grande significação. Até hoje, é a fórmula usada na maioria das normas sobre projeto de silos para o cálculo da pressão estática ou inicial no carregamento em silos de seções cilíndricas (DINIZ & NASCIMENTO, 2006).

As hipóteses em que esta teoria é baseada são:

- As pressões horizontais ( $p_h$ ) são constantes em superfícies horizontais;

---

<sup>3</sup> HAAKER, G.F.J.C.R. Progress in measuring bulk solid properties. In: *Chisa Conferation* 115. Prague, 1990. 10p.

- O valor de  $\phi_w$  (ângulo de atrito do produto com a parede) é constante;
- O peso específico ( $\gamma$ ) do produto é uniforme;
- As paredes do silo são totalmente rígidas;
- A relação entre as pressões horizontais e verticais ( $K$ ) é constante em toda a altura do silo.

Na formulação de Janssen, o equilíbrio de um elemento de altura ( $dz$ ) do produto de peso específico ( $\gamma$ ), fica estabelecido pelas pressões verticais ( $p_v$ ) e ( $p_v + dp_v$ ) e as pressões devidas ao atrito produzido pela força horizontal ( $p_h$ ) sobre as paredes. Deste modo, a pressão horizontal pode ser calculada com base na equação (03), conhecida como fórmula de Janssen para o cálculo teórico da pressão horizontal, conforme a Figura 1.

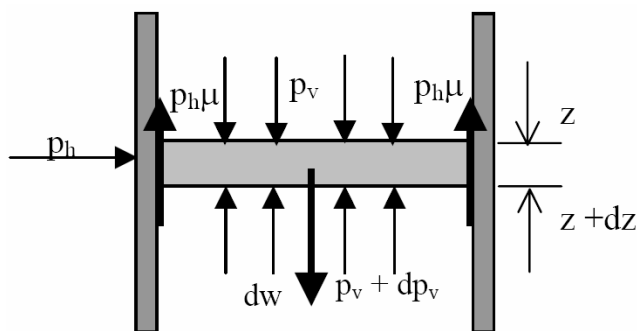
$$p_h = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot (1 - e^{-z \cdot K \cdot \mu \cdot \frac{U}{A}}) \quad (3)$$

Onde:

$A$  = área da seção transversal do silo

$U$  = perímetro do mesmo

$\mu$  = coeficiente de atrito



**Figura 1** Camada elementar adotada por Janssen (FREITAS, 2001).

A partir da equação (3) pode-se calcular o valor da pressão vertical, obtida por meio da equação (4).

$$p_v = \frac{p_h}{K} \quad (4)$$

A pressão de atrito na parede é definida pelo produto da pressão horizontal pelo coeficiente de atrito ( $\mu$ ) e pode ser expressa pela equação (5).

$$p_w = \mu \cdot p_h \quad (5)$$

Vanel & Clement (1999) estudaram as flutuações das pressões na base de uma coluna granular e apontaram para a limitação do modelo clássico de Janssen, além de discutirem os resultados experimentais à luz das abordagens teóricas propostas.

Por outro lado, Take & Valsangkar (2001) mostraram que as pressões laterais medidas em paredes de estruturas de contenção estão em concordância com a teoria de Janssen.

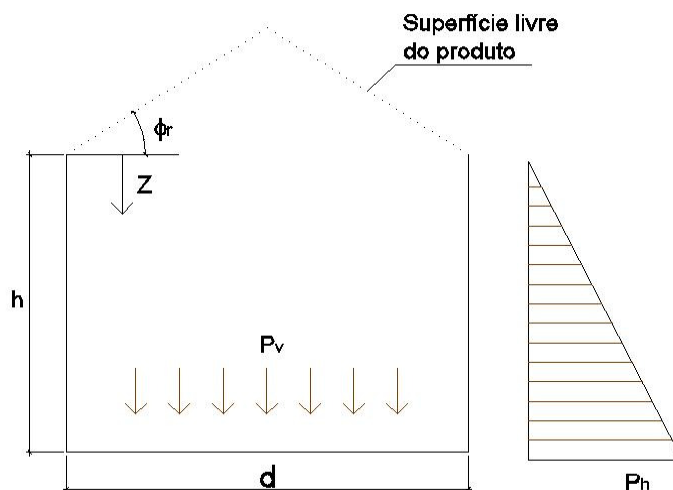
Segundo Gomes (2000), Jáky determinou uma correlação empírica entre o coeficiente de empuxo em repouso e o ângulo de atrito interno  $\phi_i$  para solos arenosos e argilas adensadas, conforme equação (6).

$$K_0 = 1 - \text{sen } \phi_i \quad (6)$$

Segundo Braeuer et al. (2006), em silos, o parâmetro K é constante conforme postulado por Janssen, e tem valor  $(1 - \text{sen } \phi)$ , de acordo com a fórmula de Jáky

### 2.2.3 Teoria de Rankine

A teoria de Rankine baseia-se na aplicação de um estado de tensão em um maciço granular, fofo, não-coesivo e semi-infinito. Esta teoria foi desenvolvida com base na hipótese que a deformação no maciço produz um estado ativo ou passivo de pressões, conforme a pressão vertical seja a maior ou a menor pressão principal (Figura 2).



**Figura 2** Pressões em silos de fundo plano – Rankine (FREITAS, 2001).

Rankine subdividiu as formulações para as pressões horizontais e verticais para dois casos distintos. No primeiro, considera-se que a superfície de topo do produto armazenado é horizontal. Neste caso a pressão horizontal ( $p_h$ ) estática na profundidade  $z$ , pode ser expressa pela equação (7).

$$p_h = K \cdot \gamma \cdot z \quad (7)$$



na qual o parâmetro  $K$  é definido pela equação (8).

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen}\phi_r}{1 + \operatorname{sen}\phi_r} \quad (8)$$

Onde:

$K$  = relação entre a pressão horizontal e a pressão vertical

$\phi_r$  = ângulo de repouso

A pressão vertical ( $p_v$ ) estática na profundidade  $z$ , abaixo da superfície, pode ser expressa pela equação (9).

$$p_v = \gamma \cdot z \quad (9)$$

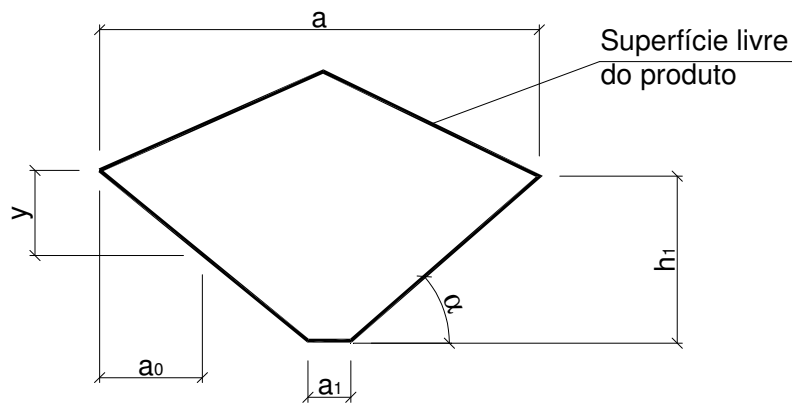
No segundo caso, Rankine considera a superfície do produto armazenado com inclinação igual ao ângulo de repouso ( $\phi_r$ ). Para esse caso, a pressão horizontal estática na profundidade  $z$  pode ser calculada com base na equação (10).

$$p_h = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \phi_r \quad (10)$$

Finalmente, a pressão vertical estática na profundidade  $z$  é definida pela equação (11).

$$p_v = \gamma \cdot (z + a_0 \cdot \operatorname{tg}\phi_r) \quad (11)$$

na qual o parâmetro  $a_0$  é definido como a distância genérica para cálculo da pressão, conforme Figura 3.



**Figura 3** Silos tremonha – Diagrama de pressão lateral – Rankine (GOMES, 2000).

## 2.2.4 Normas internacionais

Segundo Palma (2005), as normas internacionais mais importantes utilizadas em projetos de silos para a determinação das pressões exercidas pelos produtos armazenados sobre as paredes são: ISO 11697 (1995), EUROCODE (ENV) 1/Part 4 (1995), AS 3774 (1996) e DIN 1005-6 (2000).

Conforme as normas internacionais, os silos podem ser classificados de acordo com as seguintes características:

- Geometria do silo;
- Tipo de fluxo;
- Tipo de fundo (plano ou elevado).

Em relação à geometria, os silos são classificados segundo a relação entre a altura efetiva do produto armazenado e o maior diâmetro inscrito. No entanto, as normas internacionais não são unânimes em relação a essa classificação.

Estas normas adotam a formulação proposta por Janssen para o cálculo das pressões horizontais, pressões verticais e pressões de atrito com a parede, variando apenas o valor do coeficiente de majoração utilizado para a obtenção da pressão vertical na base em silos com fundo plano (inclinação  $\leq 20^\circ$ ).

### 2.2.4.1 ENV (1995)

A norma europeia adota a formulação de Janssen sem nenhuma alteração para o cálculo das pressões horizontais, equação (3), e de atrito na parede, equação (4). A pressão vertical ( $p_{vf}$ ) na base plana de silos de baixa relação altura/diâmetro é expressa pela equação (12).

$$p_{vf} = 1,2 \cdot \left\{ p_{v1} + (p_{v2} - p_{v3}) \frac{1,5 \cdot d - h}{1,5 \cdot d - h_1} \right\} \quad (12)$$

na qual  $p_{v1}$  é obtida da equação (4) com  $z$  igual à altura  $h$  e  $p_{v2}$  é definido pela equação (13),  $p_{v3}$  é obtida pela equação (4) com  $z$  igual a  $h_1$  (distância da superfície equivalente até o ponto de contato mais alto entre o produto e parede) e  $d$  o diâmetro do silo.

$$p_{v2} = \gamma \cdot h_2 \quad (13)$$

Onde:

$h_2$  = distância do ponto mais alto de contato entre o produto e a parede e a superfície livre do produto.

A norma introduz o parâmetro  $K$  na formulação de Janssen, o qual pode ser expresso pela equação (14).

$$K = 1,1 \cdot (1 - \text{sen}\phi_i) \quad (14)$$

Onde:

$\phi_i$  = ângulo de atrito interno.

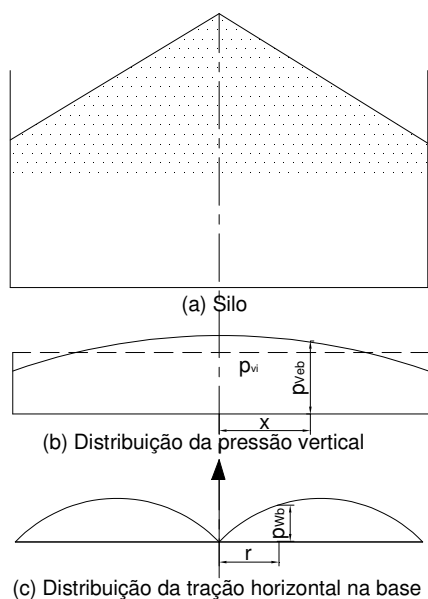
#### 2.2.4.2 AS 3774 (1996)

A norma australiana somente considera silo de baixa relação altura/diâmetro aquele em que  $h/d < 1$  e as pressões horizontais e de atrito têm as mesmas expressões que as de Janssen. A pressão vertical no fundo do silo ( $p_{vf(x)}$ ) é obtida variando segundo a coordenada radial no silo circular ( $x$ ), expressa pela equação (15) e conforme Figura 4.

$$p_{vf(x)} = 1,25 \cdot p_{v1} \cdot \left[ 1 - 1,6 \cdot \left( \frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (15)$$

na qual  $p_{v1}$  é calculada pela equação (16).

$$p_{v1} = \gamma \cdot h \quad (16)$$



**Figura 4** Distribuição das pressões em silos com fundo plano – AS 3774 (FREITAS, 2001).

Na formulação de Janssen (equação (3) e equação (4)), K é obtido através da equação (17).

$$K = \frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i - 2 \cdot \sqrt{(\operatorname{sen}^2 \phi_i - \mu \cdot \operatorname{cos}^2 \phi_i)}}{4 \cdot \mu^2 + \operatorname{cos}^2 \phi_i} \geq 0,35 \quad (17)$$

na qual o coeficiente de atrito do produto com a parede ( $\mu$ ) é calculada pela equação (18).

$$\mu = \operatorname{tg} \cdot \phi_w \quad (18)$$

Analisando-se a equação (17), observa-se que para valores elevados tanto de ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) quanto do coeficiente de atrito do produto com a parede ( $\mu$ ), obtém-se na raiz da equação valores negativos, chegando-se a uma indeterminação do valor K; assim, a norma estabelece o valor K maior ou igual a 0,35; garantindo o procedimento de cálculo, principalmente para o caso do parâmetro K não poder ser calculado.

#### 2.2.4.3 DIN 1055 (1987)

A norma alemã recomenda a utilização da teoria de Janssen para silos onde  $h/d > 0,8$ . Para essas relações, as pressões estáticas horizontais e de atrito são obtidas segundo as equações (3) e (5). Para os casos onde  $h/d \leq 0,8$  a norma recomenda utilizar teorias de empuxo de terra, sem especificar nenhuma. A pressão vertical no fundo plano ( $p_{vf}$ ) para  $0,8 < h/d < 1,5$  é obtida pela equação (19).

$$p_{vf} = c_b \cdot p_v \leq \gamma \cdot z^* \quad (19)$$

na qual  $p_v$  é obtido da formulação de Janssen pela equação (4),  $c_b$  é igual a 1,8 para produtos a granel que provoquem choques no fundo de silos com fluxo de funil e  $c_b$  igual a 1,5 para os demais produtos e, por fim,  $z^*$  é a profundidade local da sobrecarga.

A norma prevê pressões verticais diferenciadas junto à parede e no centro do silo, sendo que junto à parede deve-se usar  $z$  igual a altura  $h$  e no centro do silo  $z$  deve ser o produto de uma vez e meia o diâmetro do silo, expresso pela equação (20).

$$z = 1,5 \cdot d \quad (20)$$

Na formulação de Janssen (equações (3) e (4)), K deve ser obtida pela equação (21).

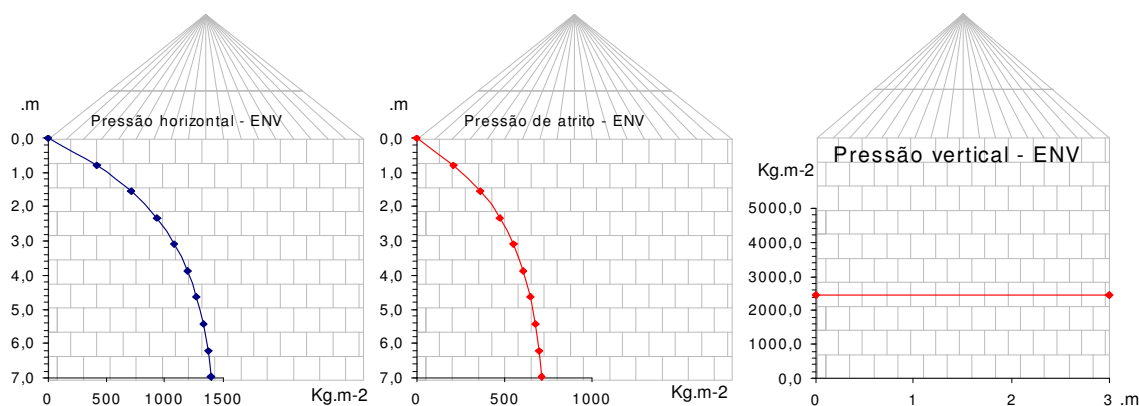
$$K = 1,2 \cdot (1 - \text{sen}\phi_i) \quad (21)$$

Os procedimentos da norma alemã foram aplicados com sucesso por Tixier et al. (2004) ao avaliar a influência do método de enchimento sobre a tensão vertical média na base do silo.

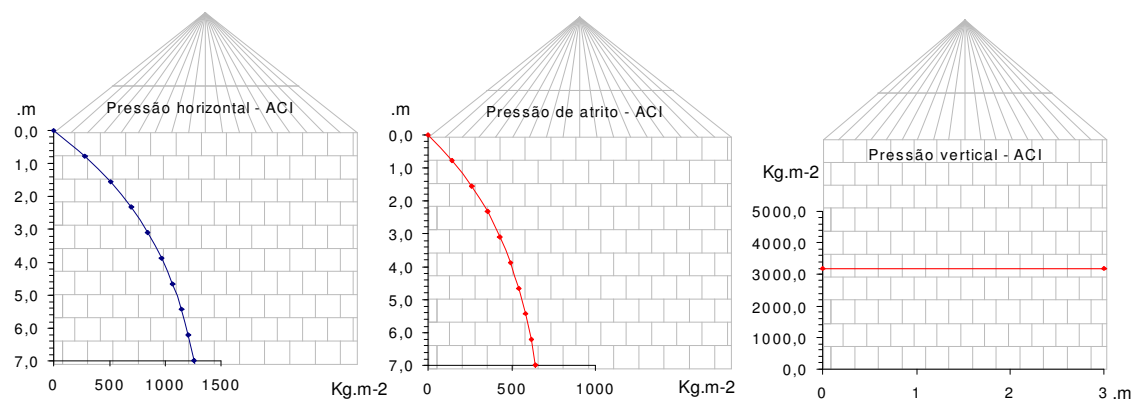
### 2.2.5 Pesquisas atuais

Atualmente, modelos computacionais, Método dos Elementos Finitos, por exemplo, estão sendo usados para obter novas informações com o propósito de desenvolver normas de projeto. Os parâmetros das modelagens variam com altura, dependem muito da rigidez relativa do grão armazenado e da parede (GOODEY et al. 2003).

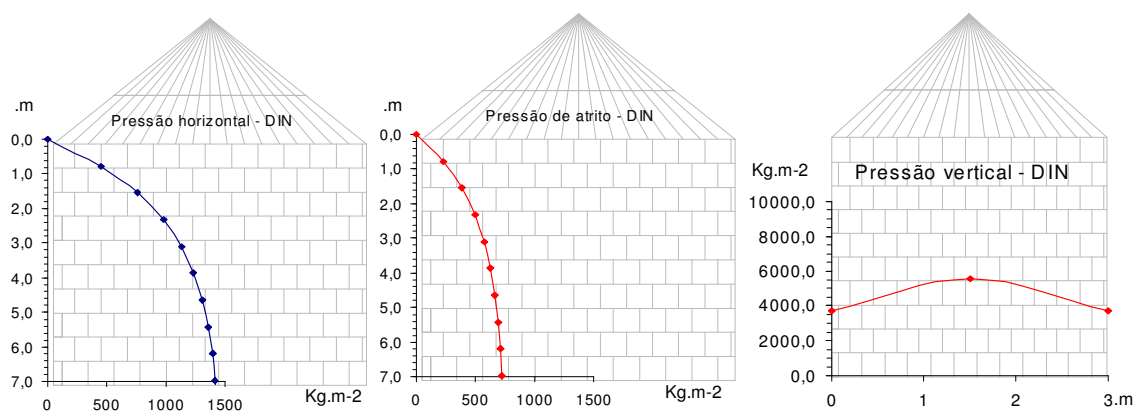
Hezel (2007) realizou uma investigação teórica e analisou os métodos de cálculo para a determinação das pressões exercidas por produtos armazenados em silos metálicos cilíndricos, bem como fez um comparativo entre os valores obtidos de acordo com as prescrições das normas internacionais. Nas Figuras 5A a 5E são apresentados os comportamentos das pressões nos silos conforme cada norma internacional avaliada em seu estudo.



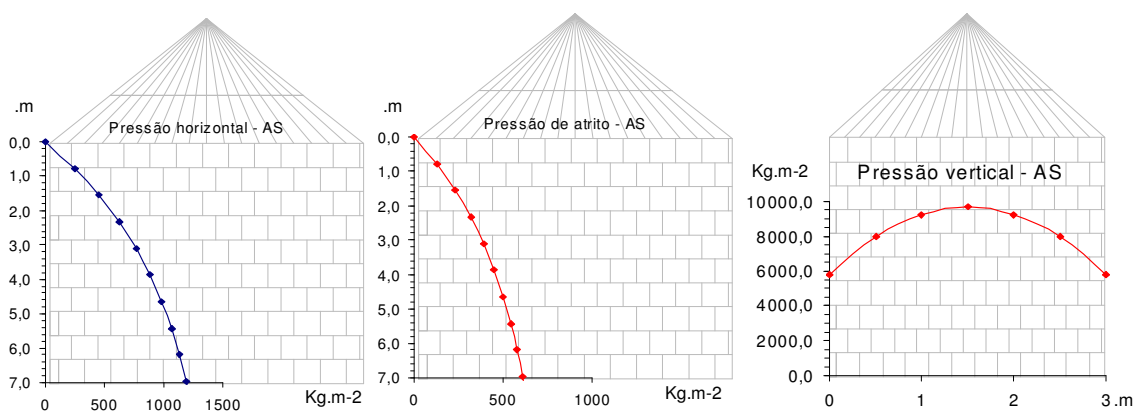
**Figura 5** Pressões – Norma ENV (HEZEL, 2007).



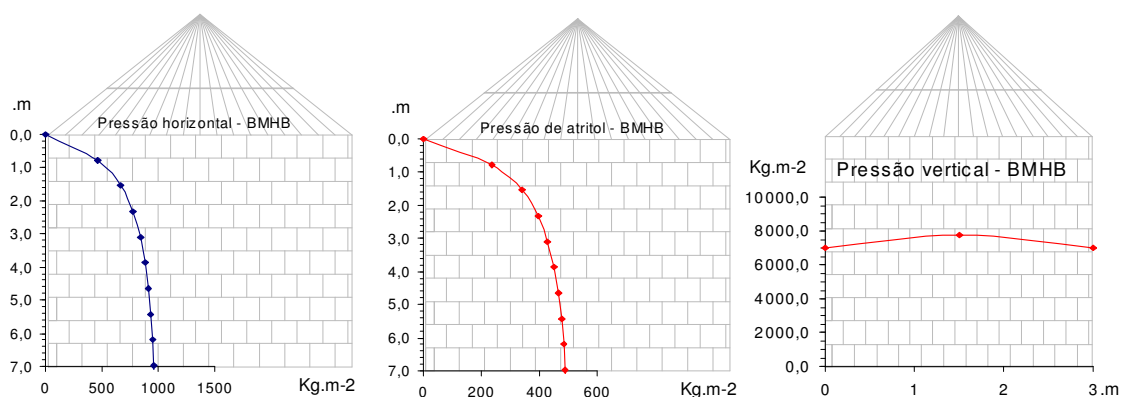
**Figura 6** Pressões – Norma ACI (HEZEL, 2007).



**Figura 7** Pressões – Norma DIN (HEZEL, 2007).



**Figura 8** Pressões – Norma AS (HEZEL, 2007).



**Figura 9** Pressões – Norma BMHB (HEZEL, 2007).

De acordo com as figuras, a pressão horizontal, a pressão de atrito e a pressão vertical apresentam comportamento diferente para cada norma analisada.

## 2.3 Mecânica dos solos

A mecânica dos solos teve significativa influência nas pesquisas feitas na área de pré-processamento dos produtos armazenados devido às similaridades existentes entre esses campos de estudo, permitindo, assim, a utilização de algumas teorias em aplicações comuns. Os primeiros pesquisadores a tratar das pressões em silos de células baixas foram Airy, em 1897, e Cain, em 1904, baseados nas teorias de Coulomb e Rankine da mecânica dos solos. Os irmãos Reimbert, em 1941, também baseados nas mesmas teorias, desenvolveram cálculos e citam a sua aplicação para silos horizontais (GOMES, 2000).

Tipicamente, o critério de Mohr-Coulomb é escolhido como condição de escoamento para materiais granulares, dada a simplicidade relativa de ser aplicado, mas também por prever tensões em boa concordância com observações experimentais (COX et al, 2008).

### 2.3.1 Coeficiente de empuxo de terra

O empuxo é a resultante das pressões laterais de um material, que atuam sobre uma estrutura de contenção (MONTEIRO, 2006).

Terzaghi, em 1943, construiu um modelo, utilizando areia pura, colocada atrás de um anteparo vertical, que podia sofrer movimentos de translação. A princípio mediu o valor da força necessária para manter o anteparo estático, a qual denominou de Empuxo em repouso ( $E_0$ ). A seguir, provocou translações no anteparo de forma a afastá-lo da areia, ao valor da força ele denominou de Empuxo ativo ( $E_a$ ). Com movimentos de translação contra a

massa de areia, ele mediu o Empuxo passivo ( $E_p$ ), no momento de ruptura do maciço (ALEXANDRE, 2006).

A relação entre a pressão lateral e vertical sobre um elemento de solo a uma profundidade qualquer, atuante sobre a face vertical e a face horizontal, é denominada de coeficiente de empuxo. As tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  em um elemento de solo a uma profundidade  $z$  são independentes e representam as tensões principais segundo equação (22):

$$\sigma_z = \gamma \cdot Z \quad (22)$$

onde  $\gamma$  é o peso específico do solo.

O coeficiente de empuxo em repouso ( $K_0$ ) é constante e determinado pela relação entre as tensões principais, conforme a equação (23).

$$\sigma_x / \sigma_y = \text{cte} = K_0 \quad (23)$$

Se sobre a superfície do maciço é aplicada uma carga uniformemente distribuída  $p$  têm-se as equações (24) e (25).

$$\sigma_z = \gamma \cdot Z + p \quad (24)$$

$$\sigma_x = K_0 \cdot \gamma \cdot Z + K_0 \cdot p \quad (25)$$

No caso do solo não sofrer expansão ou compressão lateral ( $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ), da teoria da elasticidade obtêm-se a equação (26).

$$\sigma_x = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_z \quad (26)$$

Sendo  $\nu$  o coeficiente de Poisson, logo  $K_0$  é obtido pela equação (27).

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (27)$$

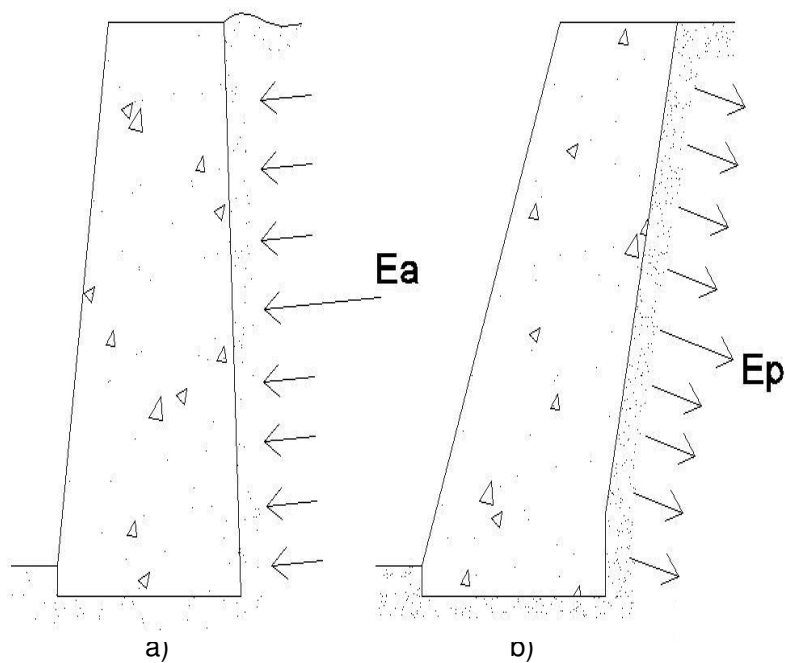
Segundo Machado & Machado (1997), os empuxos laterais de solo sobre uma estrutura de contenção são normalmente calculados por intermédio de um coeficiente, que é multiplicado pelo valor da tensão vertical efetiva naquele ponto. O valor deste coeficiente irá



dependem do processo de interação solo/estrutura. Estes coeficientes são denominados de coeficiente de empuxo do solo, que dependem da direção do movimento lateral imposto pela estrutura de contenção.

O empuxo de terra que atua sobre um suporte que resiste, mas cede certa quantidade e que depende de suas características estruturais, denomina-se empuxo de terra ativo ( $E_a$ ), ou seja, o solo está empurrando a estrutura. Quando a parede é que avança contra o solo tem-se então o empuxo passivo ( $E_p$ ), ou seja, a estrutura empurra o solo (Figura 10). As pressões correspondentes chamam-se ativa e passiva e os coeficientes de empuxo ativo,  $K_a$ , e passivo,  $K_p$  (CAPUTO, 1988).

Para a determinação dos empuxos ativo e passivo, podem ser utilizadas duas teorias: a de Rankine, que analisa as tensões em um elemento de solo no estado de equilíbrio plástico, com o auxílio da teoria de Mohr, e a de Coulomb, que analisa o equilíbrio de uma cunha de maciço, adjacente à estrutura de arrimo e determina a reação que a estrutura deve aplicar sobre a cunha, quando é mobilizada toda a resistência ao cisalhamento do maciço e o atrito na superfície de contato entre o muro e o terrapleno.



**Figura 10** Empuxos (a) Ativo, (b) Passivo (MOLITERNO, 1994).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

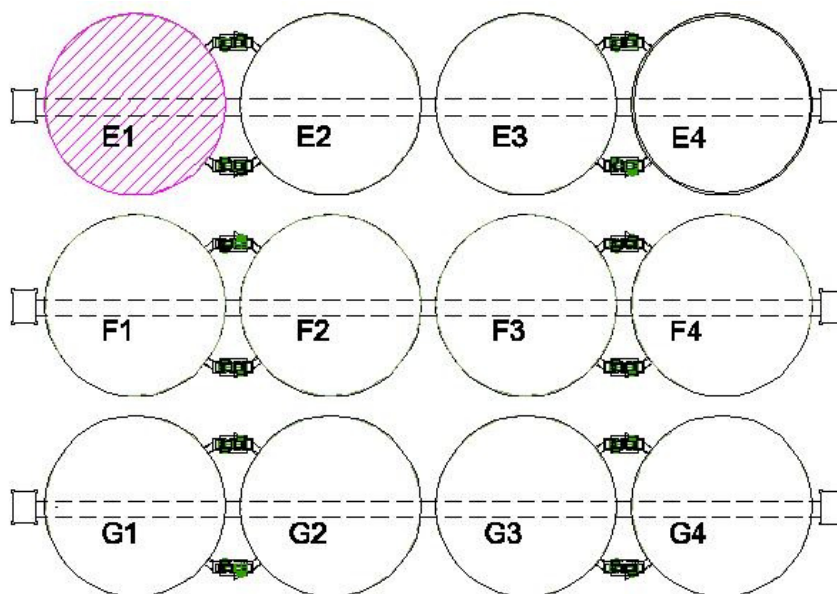
Para o desenvolvimento deste trabalho e atendimento dos objetivos propostos, foi utilizado como objeto de estudo um silo protótipo, no qual foram instrumentadas, por meio de células de pressão, quatro estacas, localizadas diametralmente opostas sob o anel do silo.

As cargas solicitantes na estacas foram registradas e coletadas durante as fases de carregamento, armazenamento e descarregamento do silo.

Para a interpretação dos dados coletados, foram considerados: características do silo, processo de execução do mesmo, instrumentação, ações solicitantes, propriedades do solo por meio de correlações com SPT e medições de recalques.

#### 3.1 Características do silo

O silo protótipo analisado foi construído no Parque Industrial da C. Vale – Cooperativa Agroindustrial Ltda, localizado no município de Palotina (PR). O mesmo faz parte de um conjunto de 12 silos, divididos em 03 baterias e, de acordo com a implantação mostrada na Figura 11, o silo analisado é o de número 01 da bateria E, denominado silo E1. A determinação de analisar o silo E1 foi devida principalmente ao processo e cronograma de execução dos silos e ao tempo necessário para que o silo fosse carregado e descarregado, aliado ao tempo máximo previsto para defesa do projeto e determinações impostas para o não-comprometimento dos trabalhos no canteiro de obra.



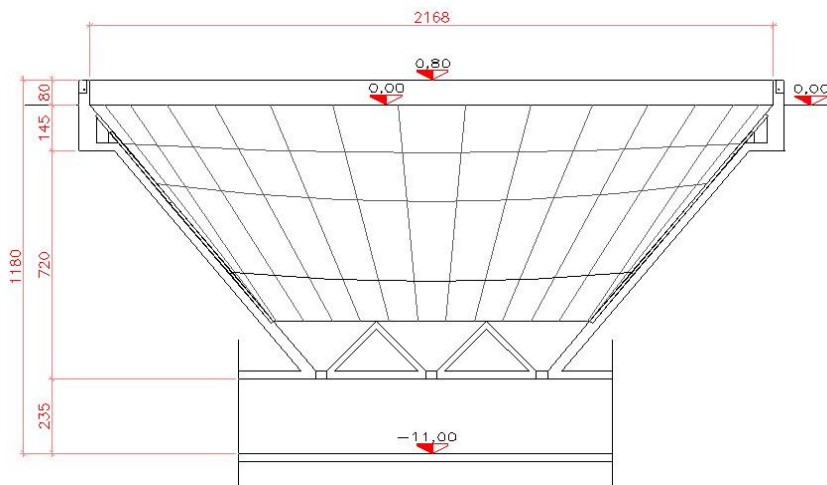
**Figura 11** Vista geral da implantação dos silos.

Segundo a indústria Kepler Weber™ S.A., fabricante do silo, o mesmo possui chapas laterais com perfil ondulado, manufaturadas com aço de alta resistência e revestidas nas faces com zinco com 99% de pureza em uma camada de 350 g/m<sup>2</sup>. Com diâmetro de 21,68 m e altura de 26,74 m, o silo possui capacidade de carga de 80000 kN de grãos. A Figura 12 apresenta uma vista geral dos silos da bateria E em fase final de implantação.

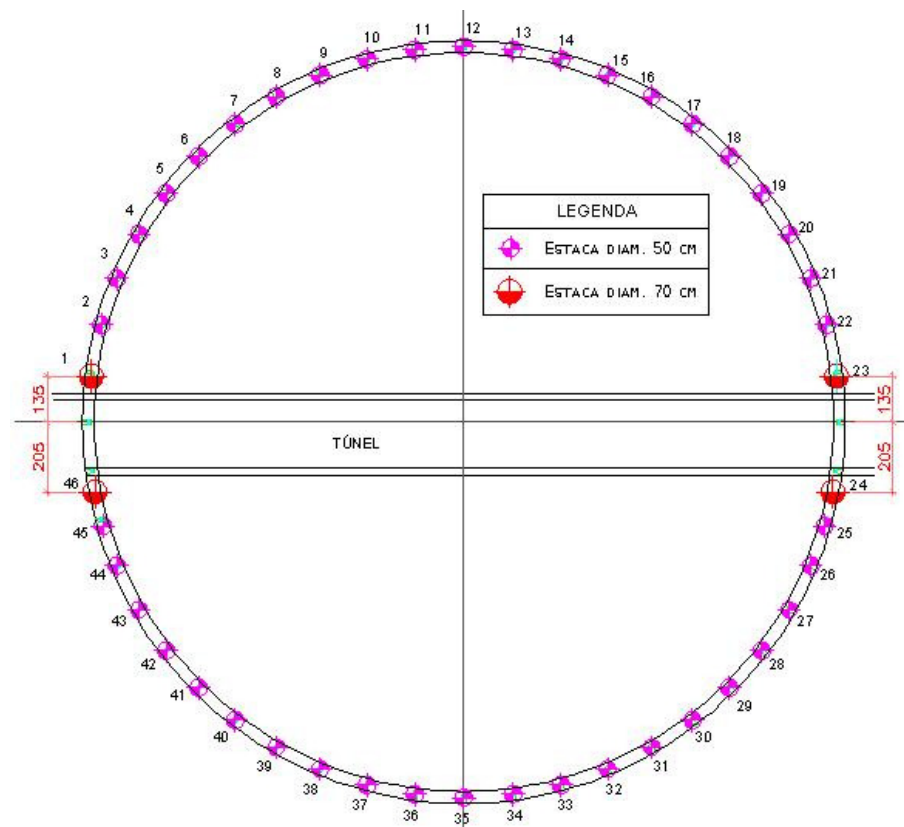


**Figura 12** Vista geral da bateria E.

O fundo do silo apresenta forma afunilada (tremonha) com formato semi V, conforme mostrado na Figura 13, e foi apoiado diretamente no solo, ao contrário do anel, onde foram executadas estacas escavadas com diâmetros de 50 e 70 cm e profundidade variando entre 9 e 10 m, de acordo com a resistência do solo encontrado. No total, foram executadas 46 estacas, destas, 42 com 50 cm de diâmetro e quatro com 70 cm de diâmetro, sendo que as estacas de 70 cm foram executadas próximas do túnel e as de 50 cm no eixo dos demais montantes, como mostrado na Figura 14.



**Figura 13** Detalhe do formato do fundo do silo (semi V).



**Figura 14** Disposição das estacas sob o anel do silo.

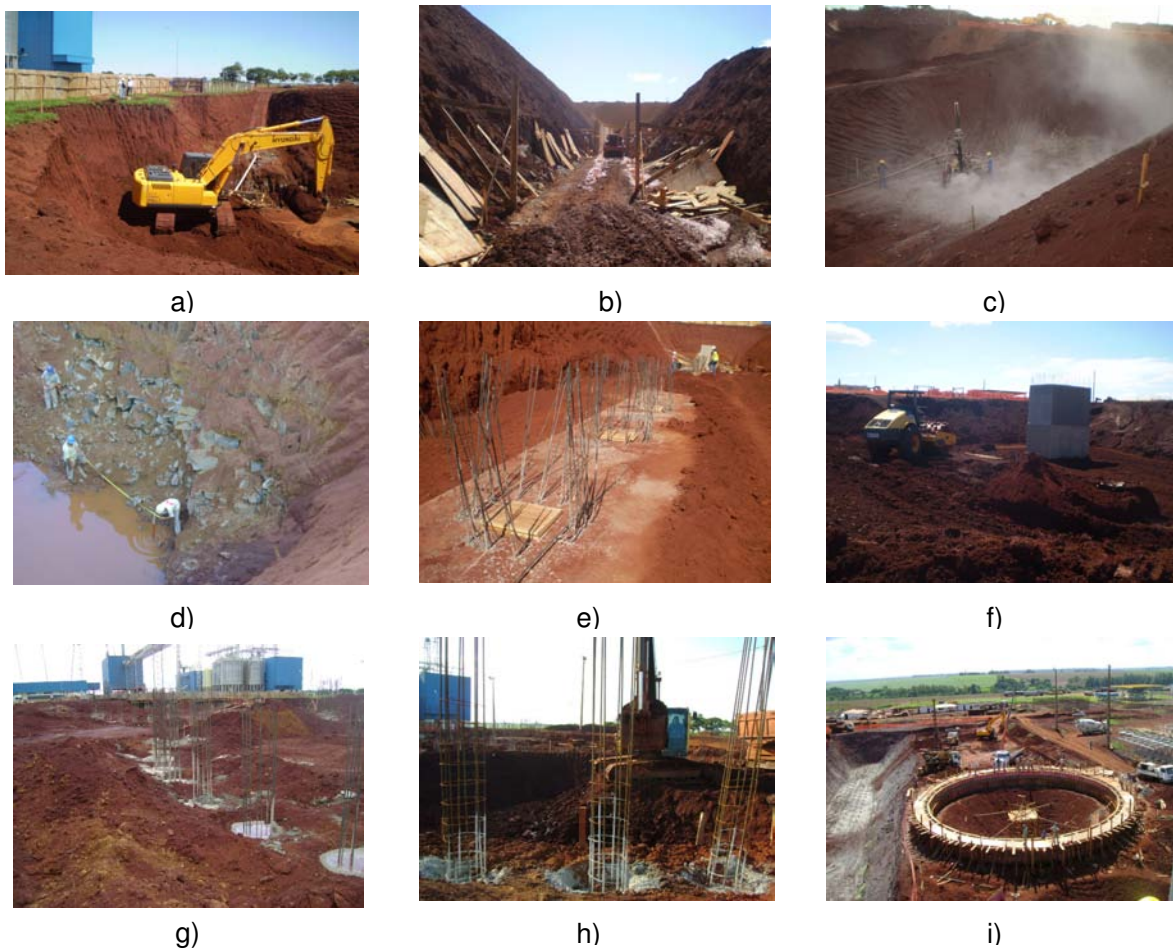
### 3.2 Processo de execução dos silos

No local onde a obra foi executada, à profundidade variando entre 9 e 12 m, de acordo com o laudo de sondagem, existe um maciço rochoso, o que impossibilitou o processo de execução usualmente adotado para este tipo de obra. Neste caso, foi necessária a utilização de desmonte de rocha para alcançar a profundidade desejada, visto que o túnel dos silos estava com cota de fundo situada a 11 m de profundidade.

Assim, resumidamente, a execução dos silos ocorreu de acordo com as etapas seguintes:

- Limpeza do terreno;
- Escavação mecânica da região central de cada bateria de silos (sentido paralelo ao túnel), até atingir a camada de rocha, como mostrado nas Figuras 15a e 15b;
- Detonação do maciço rochoso até a profundidade desejada, exibida na Figura 15c;
- Limpeza da região detonada, através da remoção do material desagregado como mostrado na Figura 15d;
- Construção do túnel, exibida na Figura 15e;

- Reaterro da região anteriormente escavada, com grau de compactação de 100% do Proctor Normal, controle de umidade  $\pm 2\%$  da umidade ótima, conforme Figura 15f;
- Execução das estacas escavadas do anel, mostrada na Figura 15g;
- Remoção do solo por meio de escavação mecânica da região do fundo do silo, exibida na Figura 15h;
- Execução do restante do silo: anel, cobertura, corpo, fundo e demais itens inerentes à obra, como mostrado na Figura 15i.



**Figura 15** Seqüência executiva dos silos.

### 3.3 Instrumentação

A instrumentação consistiu em quatro células de pressão, implantadas no contato anel-estaca, de maneira a garantir que as cargas solicitantes nas estacas instrumentadas fossem todas registradas pelas células, que estavam conectadas por meio de cabos elétricos a um sistema automático de aquisição de dados.

A escolha dos equipamentos baseou-se na análise das cargas solicitantes fornecidas pelo calculista/fabricante do silo, pela disponibilidade e custo de aquisição dos mesmos.

### 3.3.1 Célula de pressão

Para a medição das cargas solicitantes nas estacas, foi utilizado o modelo de célula MCC-2-60-TD10 (Figura 16), do fabricante Micro Sensores S/A, com capacidade de carga de 600 kN na compressão, com erro máximo de 0,05% em 600 kN, com sensores tipo *strain gages*, resistência nominal de 700 Ohms, ligados em ponte completa (4000  $\mu E$  correspondente a 2,000 mV/V).

O emprego deste tipo de célula foi devido à sua aplicabilidade, grandeza de carregamento informada pelo calculista e custo de aquisição, uma vez que as células foram adquiridas pela empresa Fungeo Fundações e Geologia Ltda, parceira no projeto de pesquisa, e cedidas por empréstimo para a realização do experimento.



**Figura 16** Células de pressão utilizadas no experimento.

### 3.3.2 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o de marca LINX (ADS0500), sistema integrado e compacto, composto por:

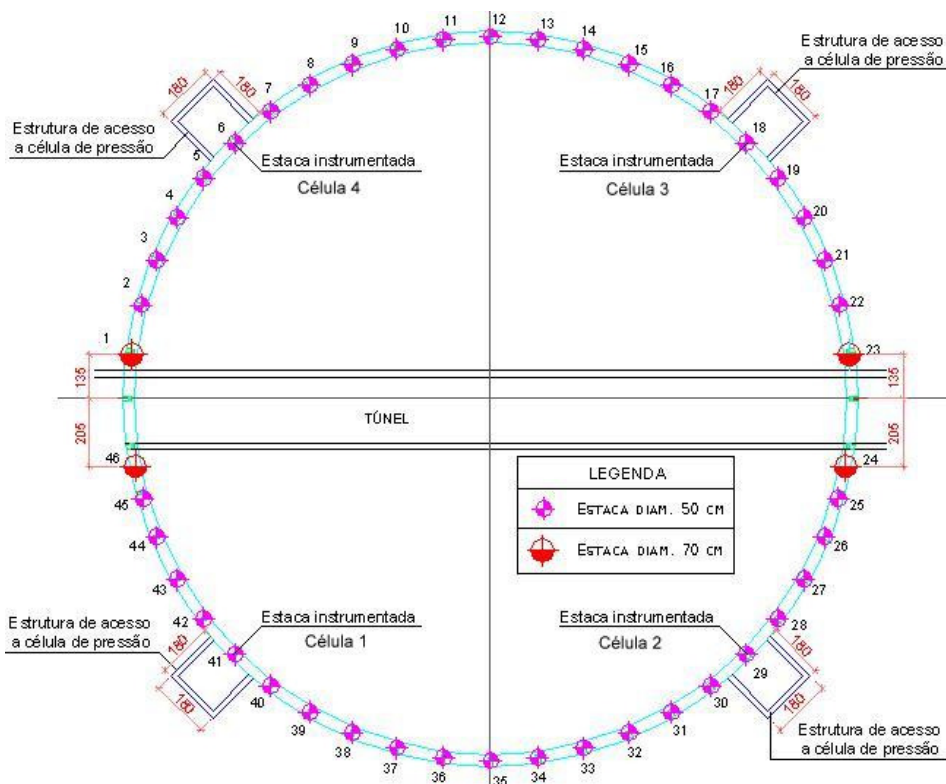
- 16 canais independentes para condicionamento de sinais com entradas para sinais analógicos de até  $\pm 10$  V que podem ser amplificados e lidos com resolução de 12 bits a uma taxa de amostragem máxima de 500 Hz por canal;
- 01 sensor de temperatura incorporado;

- 01 conversor analógico-digital com 16 canais multiplexados;
- 16 entradas e 16 saídas digitais;
- 01 contador de pulso;
- 02 conversores digitais-analógicos e
- 01 sistema de comunicação em rede ETHERNET-10 Base T, 10 Mbits/s.

A escolha pelo emprego deste sistema foi pela sua aplicabilidade em ensaios de carregamentos estáticos, bem como sua disponibilidade no Laboratório de Estruturas e Materiais da Engenharia (LEME) da Unioeste.

### 3.3.3 Implantação da instrumentação

Com o objetivo de verificar a ocorrência de simetria de carregamento nas estacas, as quatro estacas instrumentadas estão posicionadas diametralmente opostas no silo e, de acordo com a Figura 17, são as estacas de números 06, 18, 29 e 41 instrumentadas com as células 4, 3, 2 e 1 respectivamente.



**Figura 17** Locação das estacas instrumentadas.

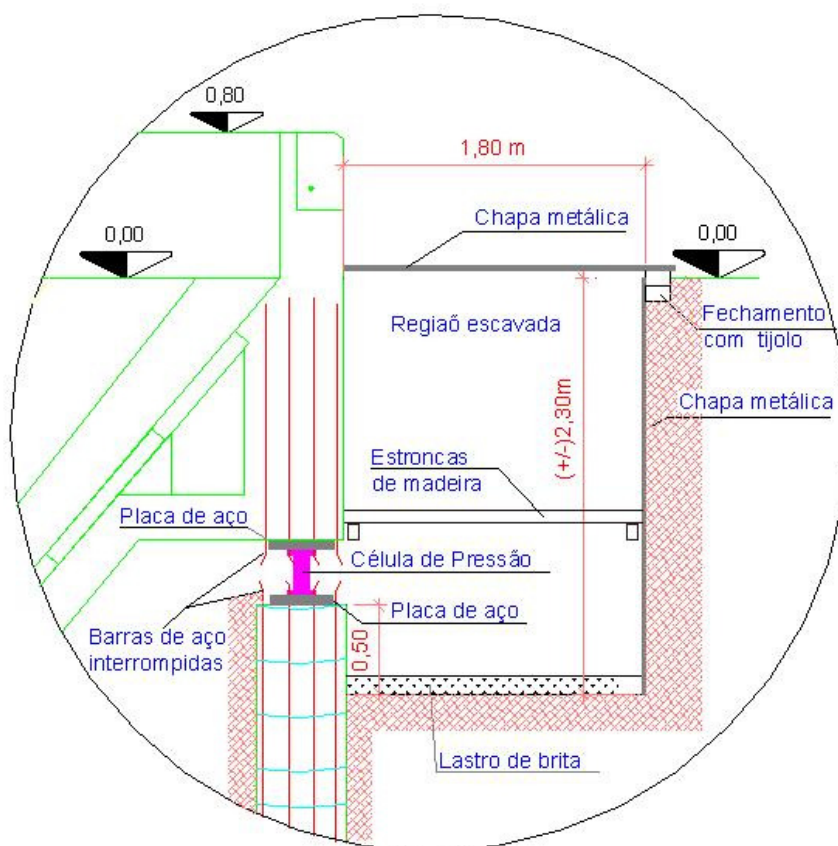
O processo de implantação da instrumentação começou durante a fase de execução das estacas. Para tanto, após a perfuração, durante o processo de concretagem das estacas, foi deixado um espaço vazio (nicho) entre a cabeça da estaca e o anel de coroamento, isto é, nas estacas a serem instrumentadas, a cota de arrasamento do concreto

ficou maior que nas demais estacas do silo, com valor aumentado em aproximadamente 0,40 m, o suficiente para o correto posicionamento da célula de pressão, como mostrado na Figura 18. O espaço vazio (nicho) entre a estaca e o anel foi devidamente protegido e preenchido com areia até que se pudesse proceder à instalação dos equipamentos, que foi realizada após a execução do silo e antes do carregamento do mesmo.



**Figura 18** Nicho para posicionamento da célula de pressão.

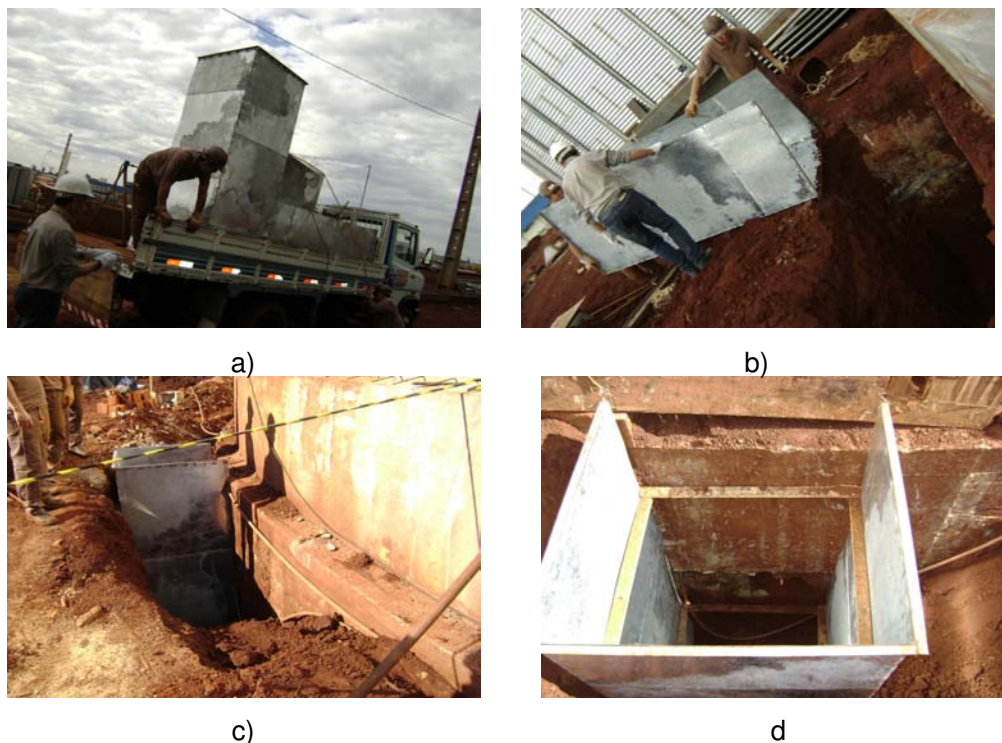
De acordo com o processo executivo dos silos, ao término da execução, todo o entorno da unidade de armazenamento era aterrado até o nível zero, sendo necessário a abertura de poços de inspeção/acesso às células, como exibido na Figura 19.



**Figura 19** Detalhe da posição da célula de carga e do acesso à mesma.



Os poços foram escavados e devidamente protegidos com o uso de chapas metálicas travadas com estroncas de madeira, garantindo a estabilidade do talude. Para o fechamento superior, também foi utilizado chapa metálica com sistemas de dobradiças, possibilitando posterior acesso à célula e o fechamento da região escavada, como mostrado nas Figuras 20a, 20b, 20c e 20d.



**Figura 20** Instalação das chapas metálicas nos poços escavados.

Depois de finalizados os poços de inspeção, foram adequados os nichos para o posicionamento das células, uma vez que os mesmos estavam, até o momento, preenchidos com areia, com a ferragem longitudinal das estacas ainda ligada ao anel e sem regularização do concreto que serviria de base de apoio às células.

Após a limpeza dos nichos, através da retirada da areia que estava preenchendo o espaço vazio, foram executadas bases de regularização em concreto, na parte superior da estaca e na parte inferior do anel (região de apoio às células); em seguida, foram colocadas chapas de aço, com espessura de 20 mm, tanto na parte inferior quanto na superior do nicho, para garantir o nivelamento, o correto posicionamento e funcionamento do equipamento. Ainda, para garantir que a carga solicitante na estaca fosse totalmente registrada pela célula, a ferragem longitudinal da mesma foi seccionada. Com os nichos devidamente preparados, procedeu-se à instalação das células de carga, mostrada na Figura 21.



**Figura 21** Célula de pressão devidamente posicionada.

Para que as células registrassem as cargas solicitantes nas estacas desde o início do carregamento, elas deveriam ficar totalmente presas entre a estaca e o anel do silo (sob pressão). Para tanto, fez-se necessário a utilização de macaco hidráulico e cunhamento para suspender o anel e posicionar a célula no espaço gerado.

As células de pressão foram conectadas por meio de cabos elétricos ao sistema de aquisição de dados instalado em plataforma metálica fixada em um dos poços de elevador, uma vez que a estrutura já estava pronta, a proteção do equipamento neste local não apresentava grandes dificuldades e estava localizado ao lado do silo em estudo, conforme Figuras 22 e 23.



**Figura 22** Localização do poço do elevador em relação ao silo E1.



**Figura 23** Sistema de aquisição de dados montado.

O sistema permaneceu instalado durante todo o período do experimento, realizando as leituras nas fases de carregamento, armazenamento e descarregamento.

Ao término da fase de descarregamento, os equipamentos foram recolhidos e foi realizado o processo de reconstituição do concreto das estacas instrumentadas e reposição das ferragens longitudinais seccionadas, conforme Figura 24, de forma a garantir a integridade da estaca e restabelecer a ligação anel/estaca.



**Figura 24** Reconstituição da estaca.

### 3.4 Ações nas fundações do silo

As ações solicitantes nas estacas foram avaliadas a partir dos valores de coeficiente de transferência usualmente aplicados pelos engenheiros calculistas e empresas executoras de sistemas de armazenamento e confrontadas com os valores obtidos nas células. De acordo com as especificações de projeto, os valores de carga nas estacas, usualmente adotados, variam entre 30 e 60% do carregamento total, sendo que, para o silo em questão, do tipo fundo/tremonha em formato semi-V, o valor de 30% é o mais utilizado.

Assim, de acordo com as especificações contidas nos projetos do silo protótipo (Kepler Weber™ Industrial S/A), cada estaca do anel seria solicitada por uma carga máxima de aproximadamente 500 kN, visto que o silo apresenta capacidade de oito mil toneladas e foram executadas 46 estacas, o coeficiente de transferência seria de 29%, conforme equação (28).

$$\text{Coef. Transf.} = \frac{Q_{med} \cdot N^{\circ} \text{ estacas}}{Q_{total}} \quad (28)$$

A estimativa do módulo de elasticidade longitudinal do concreto, para avaliação das tensões e deformações nas estacas foi feita a partir da equação 29, sugerida pela norma NBR 6118 (ABNT, 2003).

$$E = 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (29)$$

### 3.5 Caracterização geológico-geotécnica do maciço

As características geológico-geotécnicas do maciço foram determinadas por meio de correlações com os resultados dos ensaios de campo (sondagens), fornecidos pela C.Vale.

No terreno onde foi executada a obra, foram realizadas sondagens à percussão do tipo S.P.T. (Standard Penetration Test) e sondagem mista (S.P.T./Rotativa), sendo que a sondagem do tipo S.P.T. foi realizada antes do início da obra e a mista após a compactação do solo da região escavada.

A sondagem à percussão do tipo S.P.T. foi realizada conforme a norma NBR 6484 (ABNT, 2001), sendo realizados 12 furos, num total de 120 m perfurados. A Figura 25 apresenta a locação das sondagens S.P.T. Devido ao fato do silo em análise ser o denominado E1, as sondagens de interesse são as SPT01, SPT08 e SPT09, pois as mesmas permitem traçar as direções das camadas do subsolo e seus mergulhos em relação ao silo em estudo. Os perfis estão mostrados nas Figuras 26, 27 e 28.

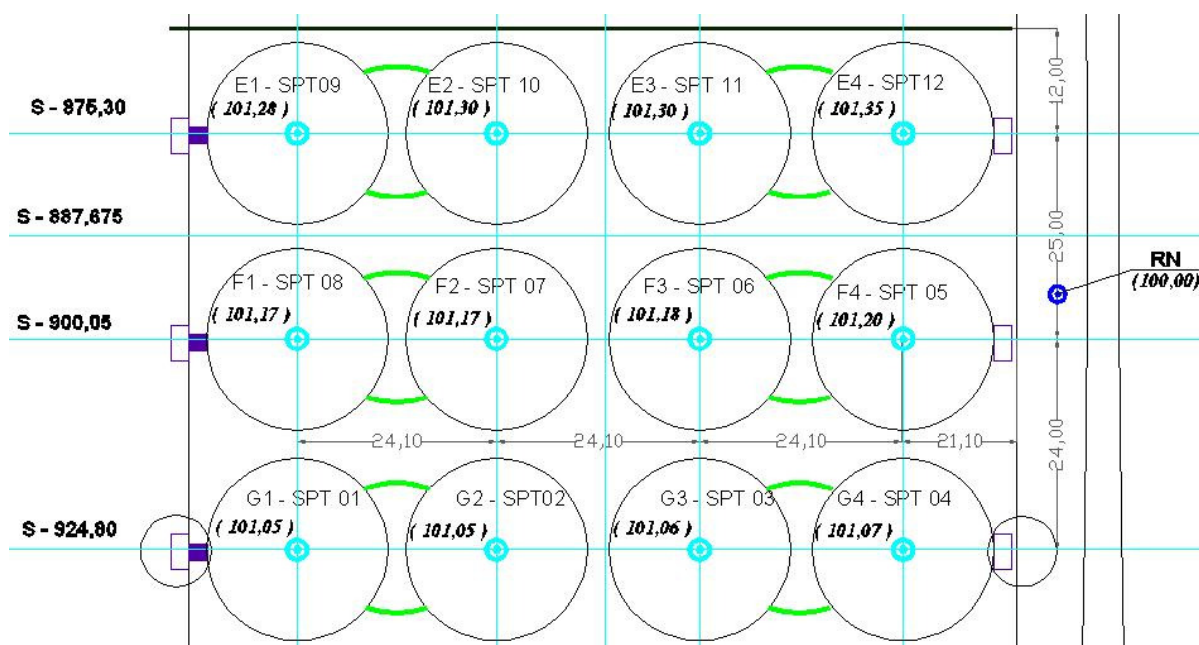


Figura 25 Locação dos furos da sondagem tipo S.P.T.

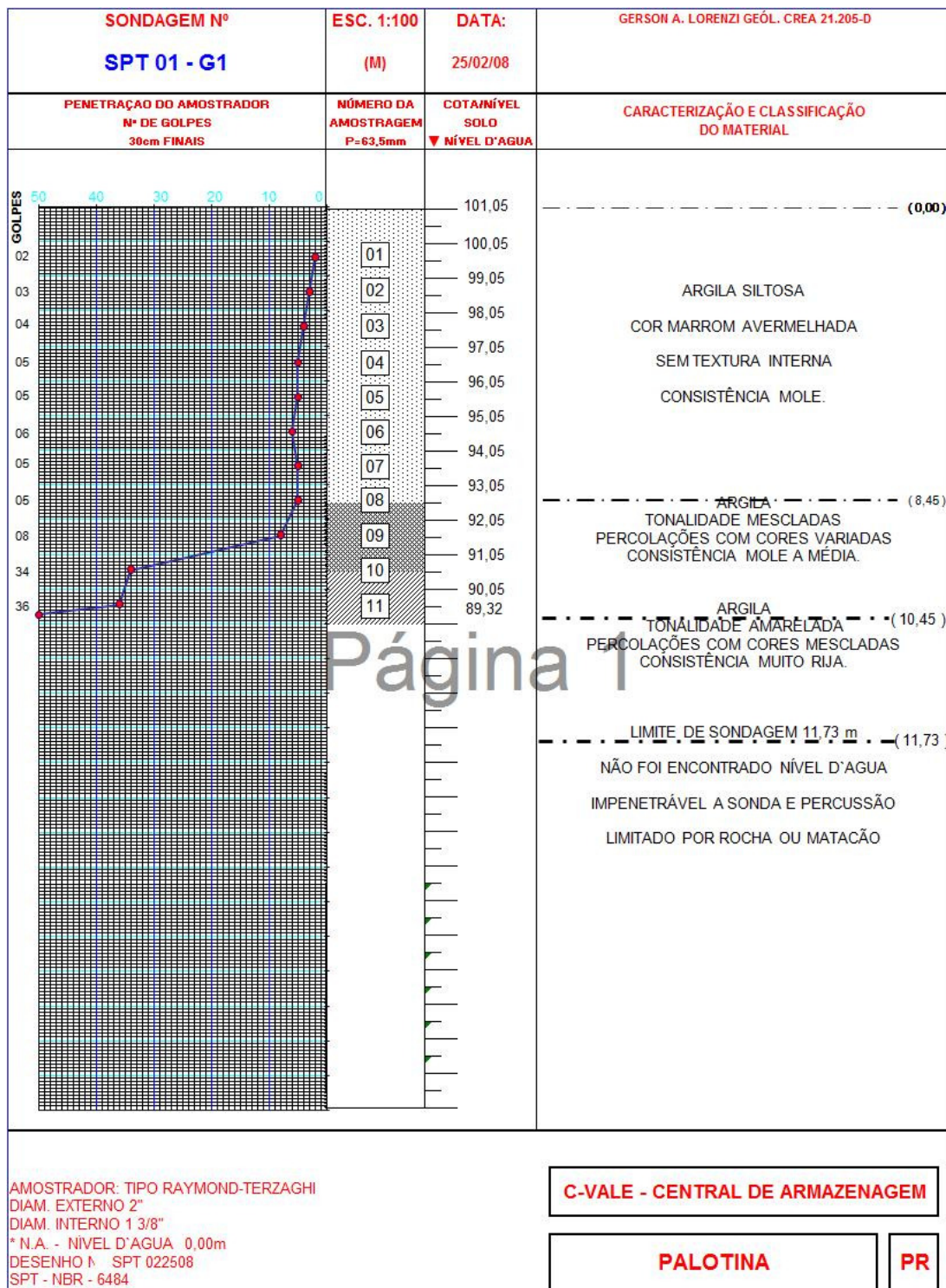


Figura 26 Perfil S.P.T. 01.

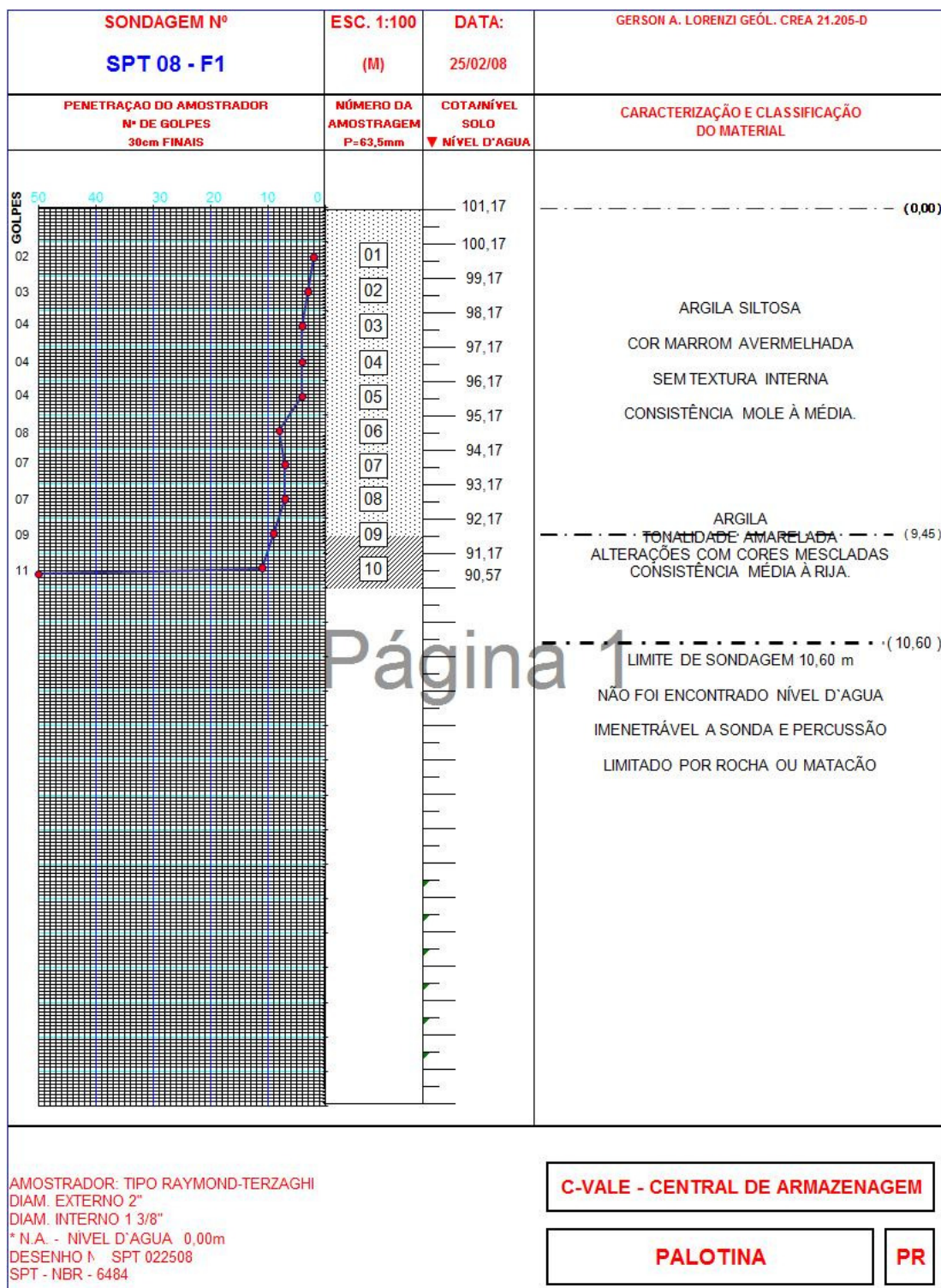


Figura 27 Perfil S.P.T. 08.

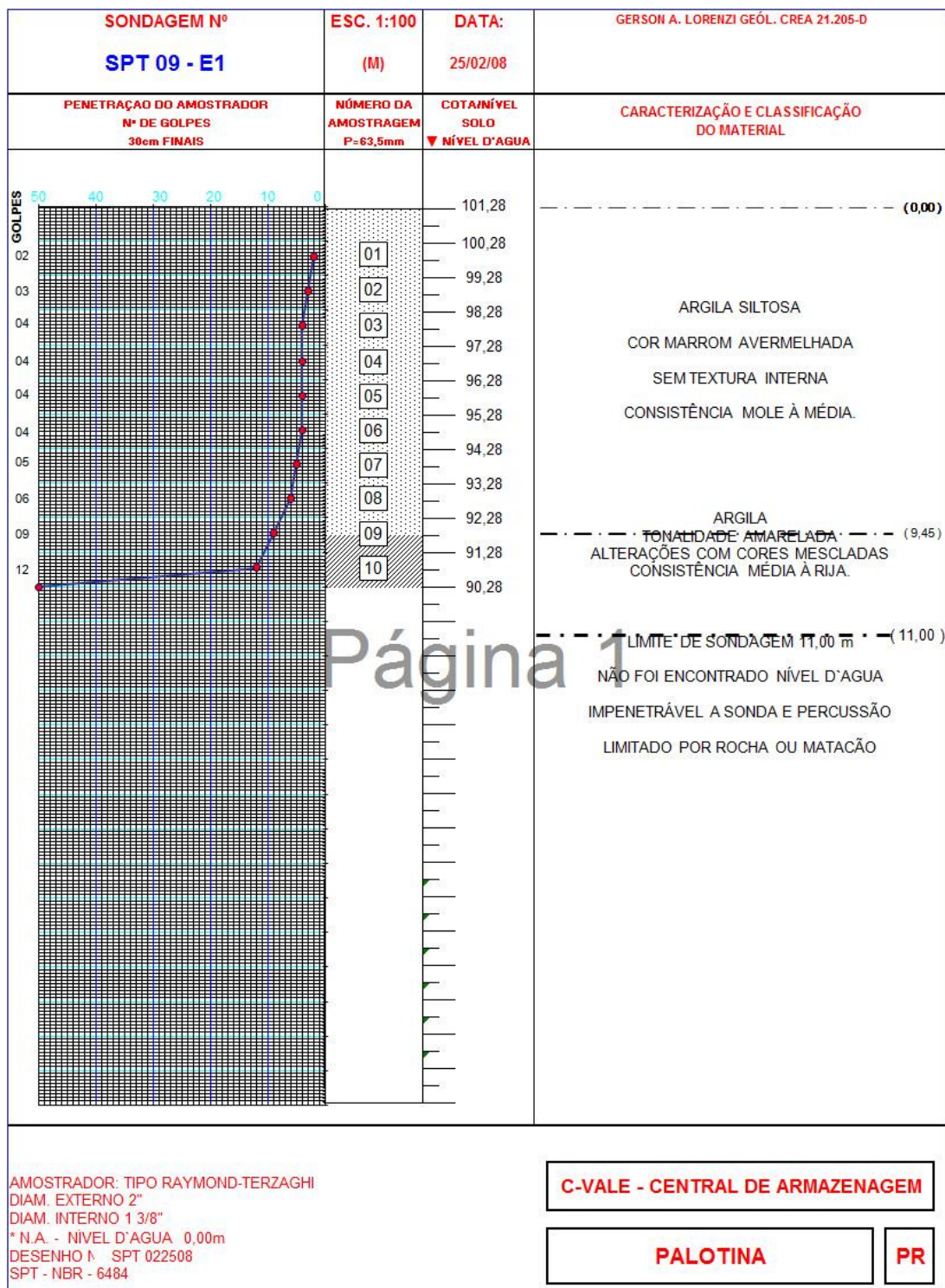
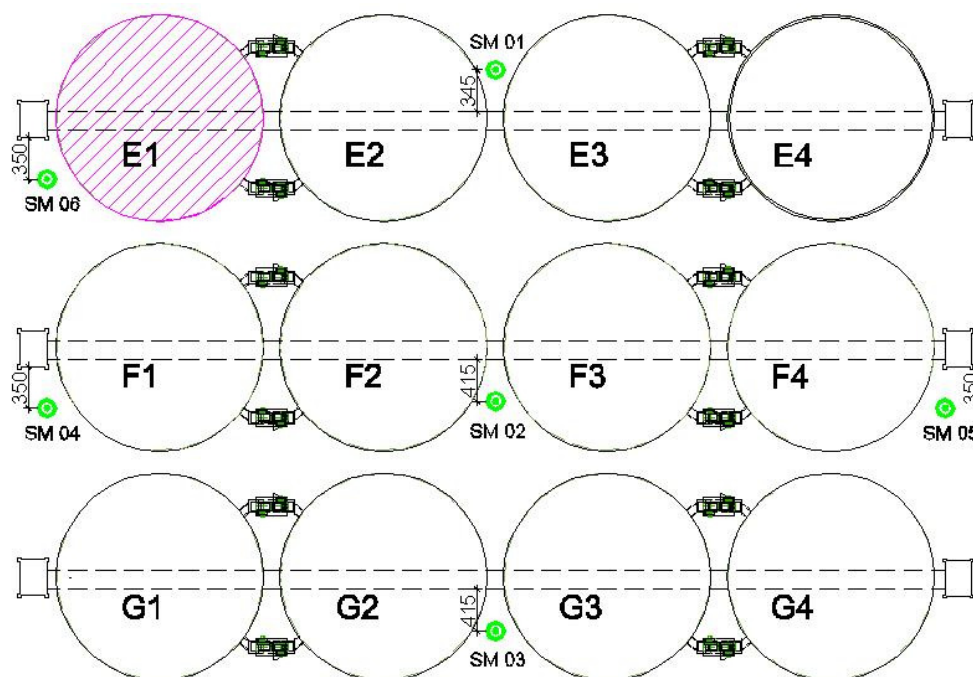


Figura 28 Perfil de S.P.T. 09.

A sondagem mista é a sondagem executada inicialmente à percussão no trecho penetrável e seguida por meio de sonda rotativa nos materiais impenetráveis à percussão. Tem como finalidade cortar rocha sã ou decomposta, permitindo obter amostras que se alojarão no interior do amostrador.

Assim como a sondagem à percussão, a mista foi executada sob o comando da C.Vale, a qual forneceu os perfis estratigráficos para que se pudesse fazer as análises pertinentes. Foram executados 06 furos de sondagens, com a profundidade do ensaio limitada entre 11 e 19 m. A Figura 29 apresenta a localização dos furos de sondagens e nas Figuras 30 a 35 estão apresentados os perfis estratigráficos de sondagens.



**Figura 29** Localização dos furos da sondagem mista.



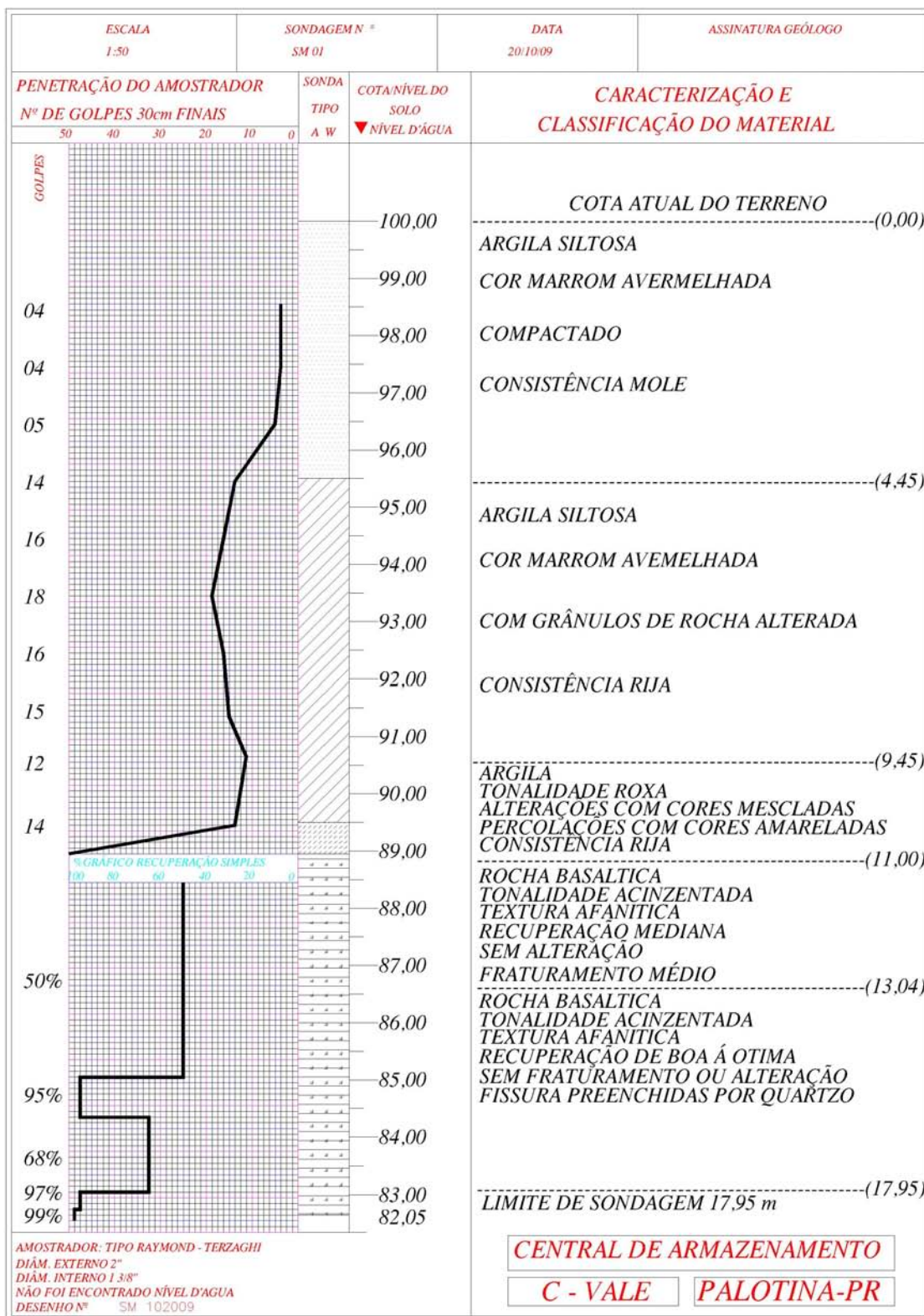


Figura 30 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 01.

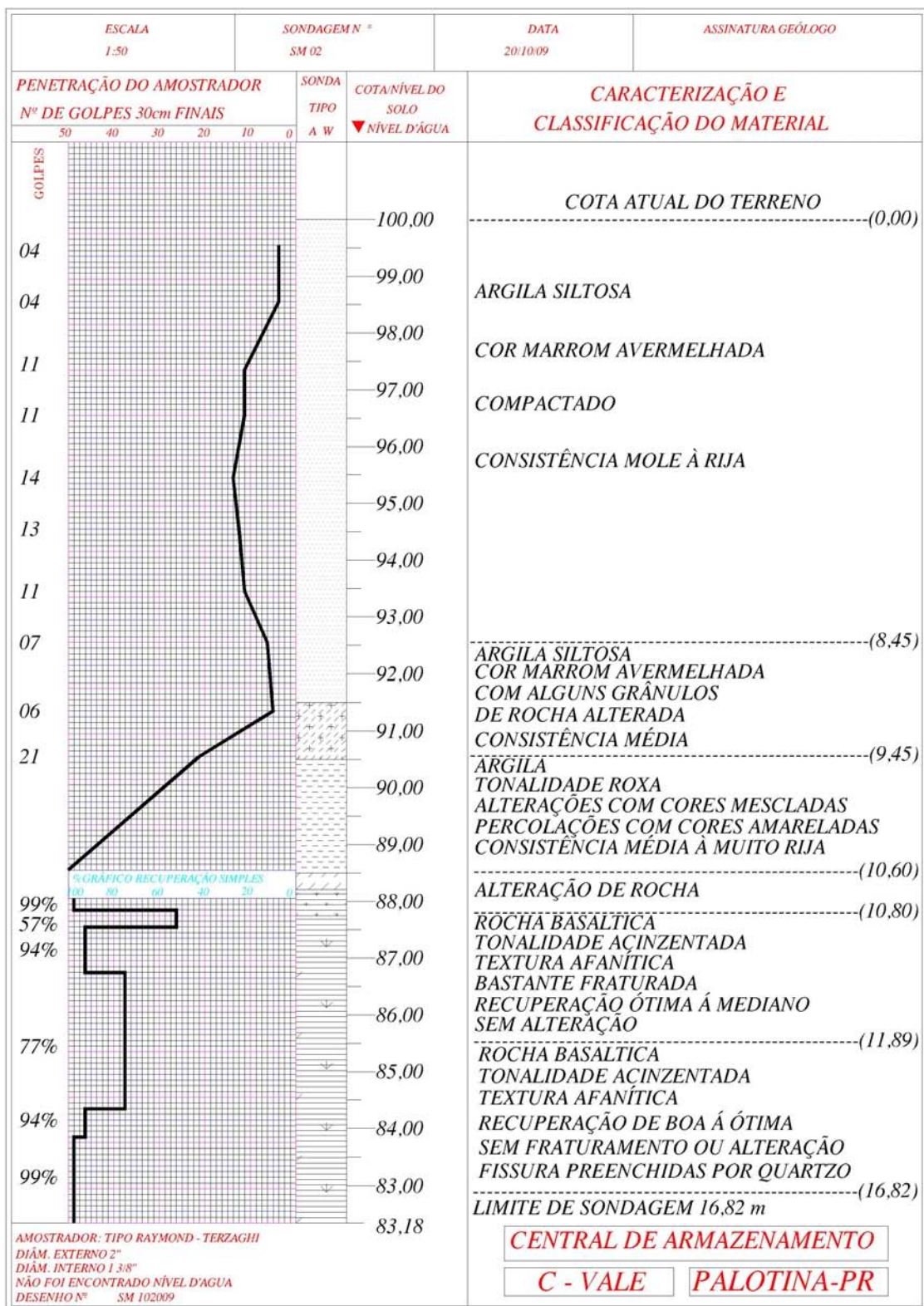


Figura 31 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 02.

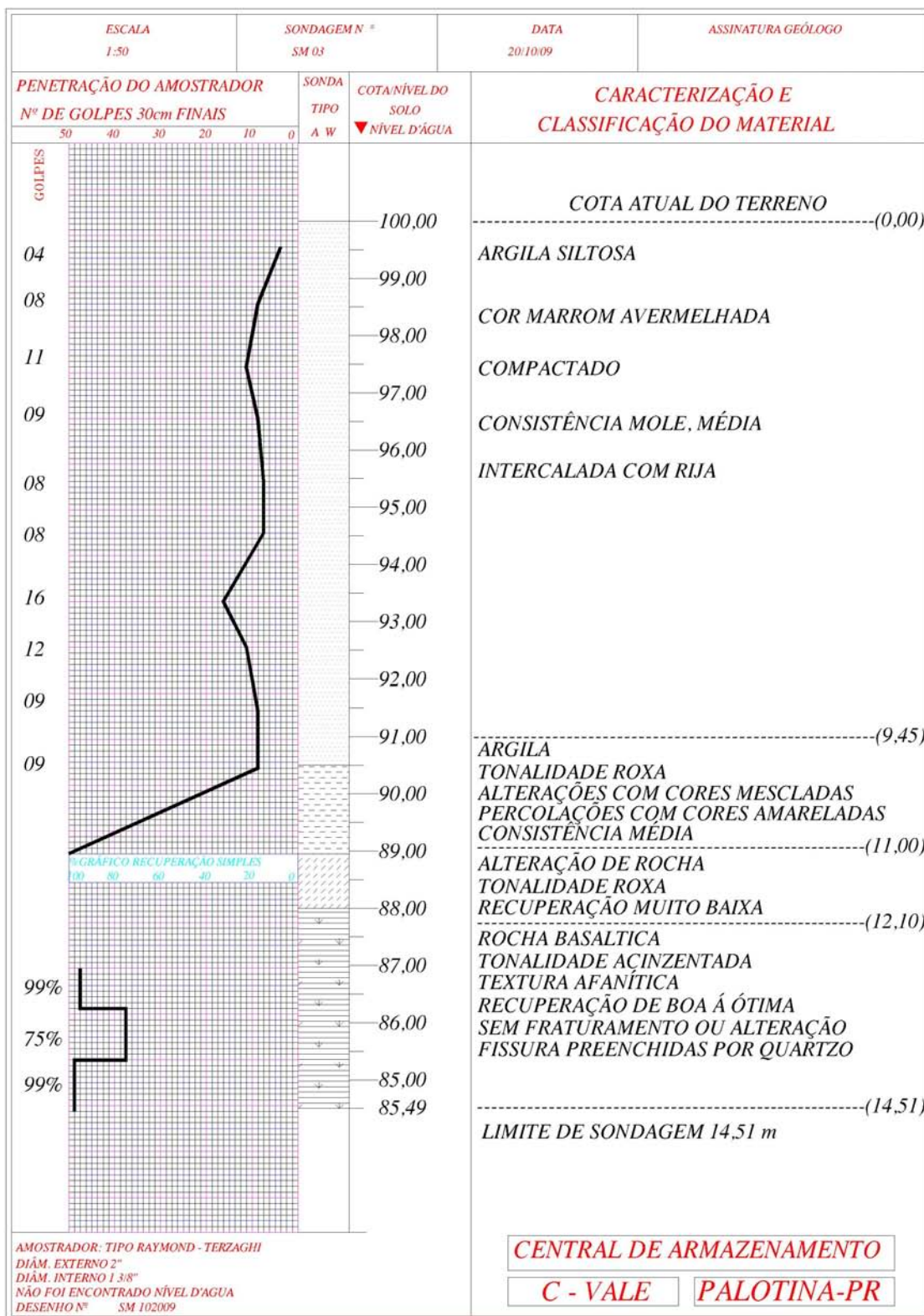


Figura 32 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 03.

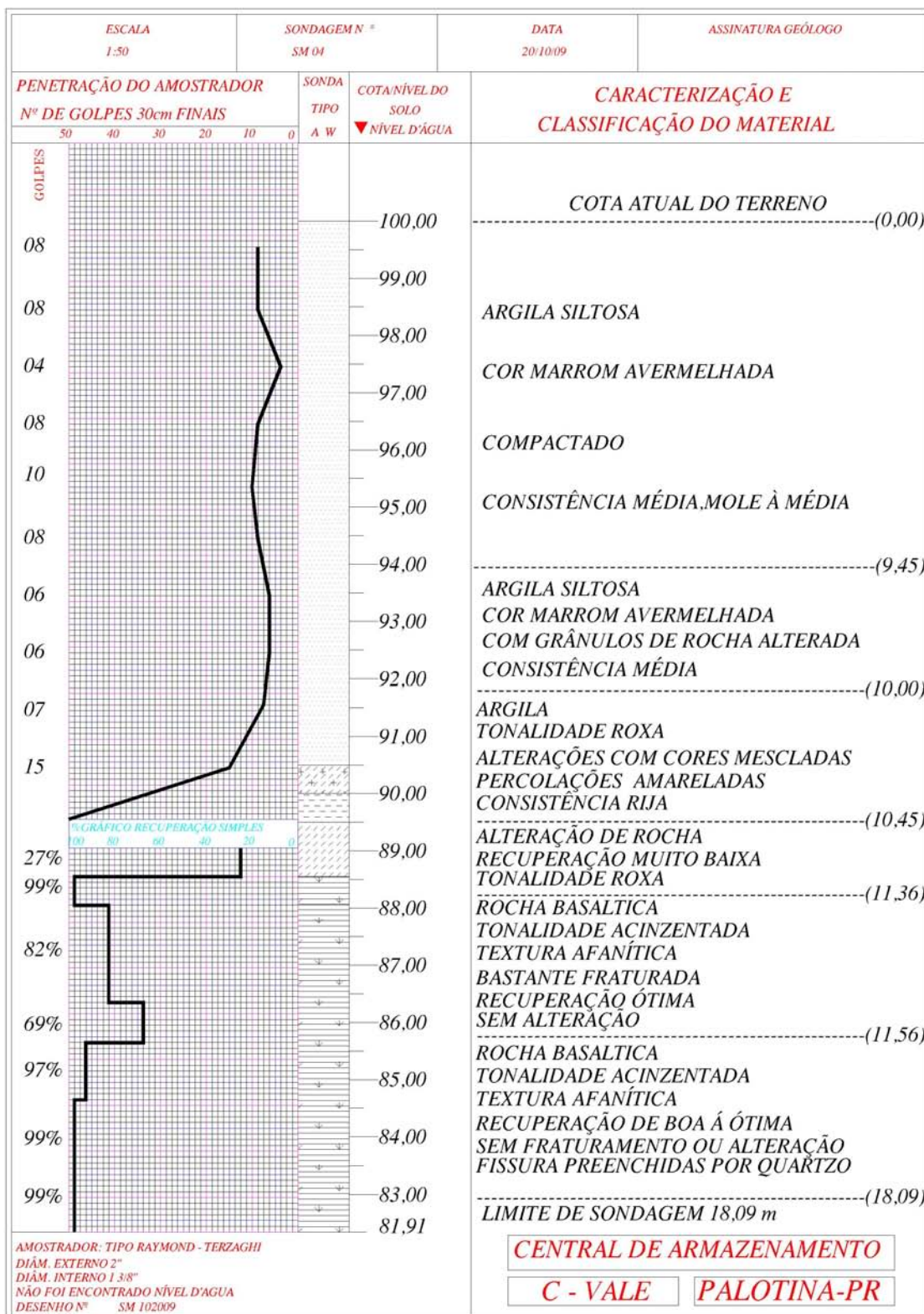


Figura 33 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 04.

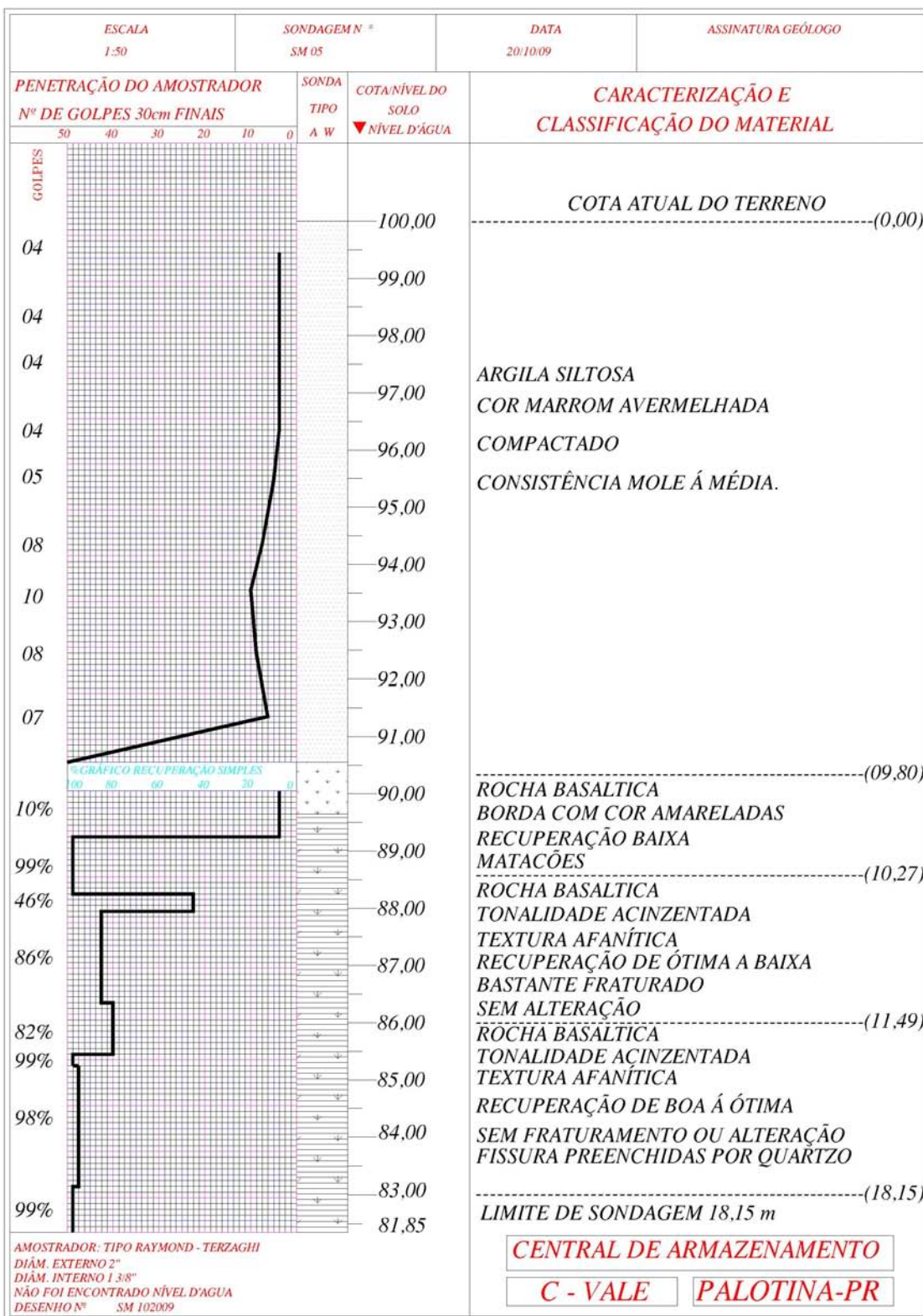


Figura 34 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 05.

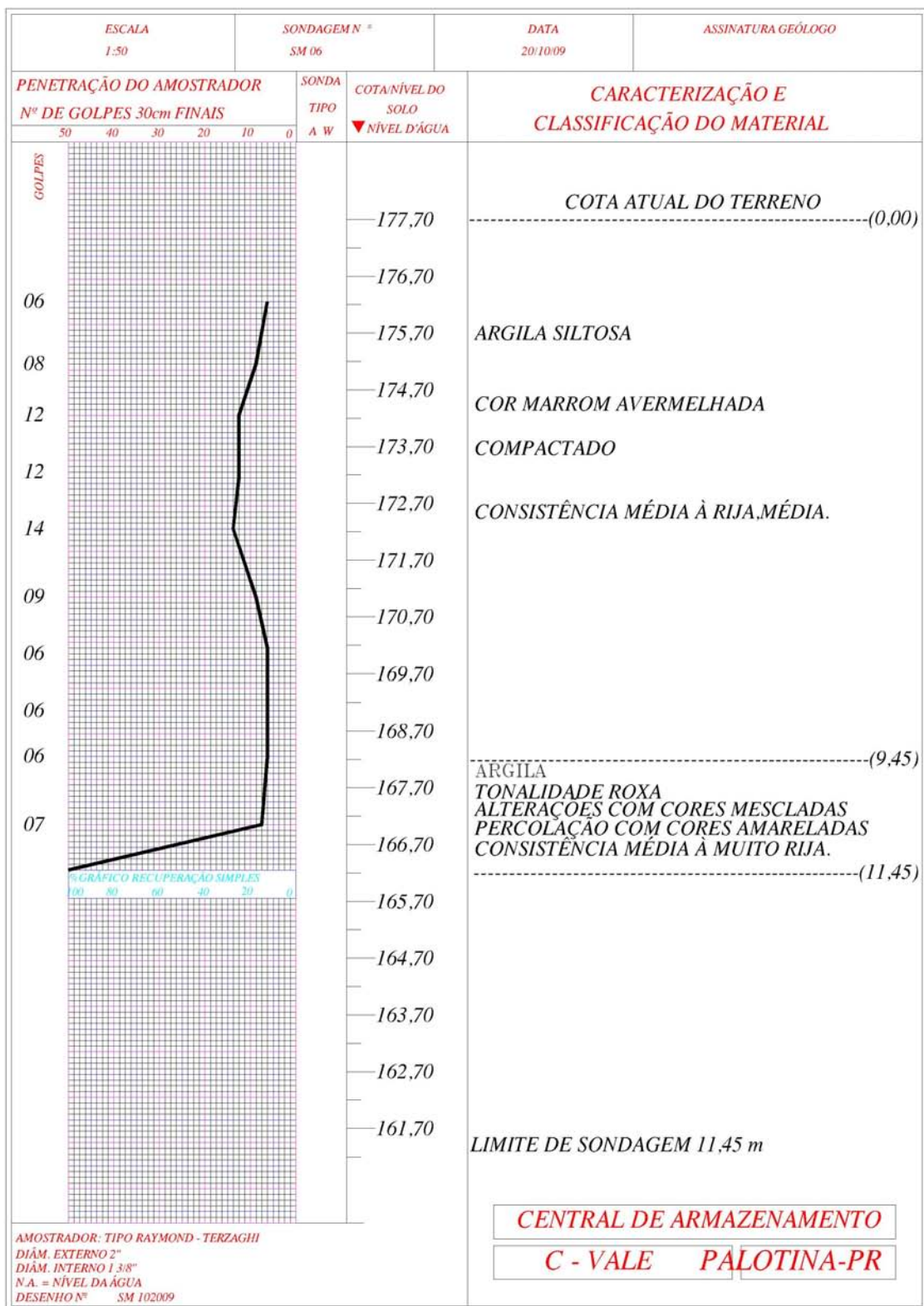


Figura 35 Perfil Sondagem Mista (SM) furo 06.

### 3.5.1 Determinação da capacidade de carga das estacas

A caracterização do perfil estratigráfico e o índice de resistência à penetração fornecida pela sondagem permitiram determinar a capacidade de carga e a variação das resistências de ponta e por atrito lateral ao longo do fuste das estacas.

Para a determinação das resistências de ponta e lateral das estacas foi adotado o método Aoki-Velloso para cálculo e dimensionamento de fundações profundas (AOKI & VELLOSO, 1975). A capacidade de carga das estacas foi determinada através da equação (30).

$$Q_R = \left( \frac{k \cdot N}{F1} \right) \cdot A_P + \left( \frac{\alpha \cdot k \cdot N}{F2} \right) \cdot A_L \quad (30)$$

Onde:

$Q_R$  = carga de ruptura

$N$  = índice de resistência a penetração

$\kappa$  = coeficiente da resistência específica de ponta

$\alpha$  = coeficiente da resistência específica lateral, caracteriza um percentual de transferência de atrito

$F1$  = coeficiente da resistência específica de ponta

$F2$  = coeficiente da resistência específica lateral

$A_P$  = área da seção transversal da ponta da estaca

$A_L$  = área lateral da estaca

A opção pelo método se apoia no fato de que o mesmo pode ser aplicado para qualquer tipo de solo. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\kappa$  do método são função do tipo de solo e foram tomados de Monteiro (1997)<sup>4</sup>, e os parâmetros  $F1$  e  $F2$  são função do tipo de estaca e foram obtidos de Laprovitera (1988)<sup>5</sup> e Benegas (1993)<sup>6</sup>, apud Velloso e Lopes (2002). Os dados geradores de tais parâmetros são mostrados nas Tabelas 2 e 3.

<sup>4</sup> MONTEIRO, P.F., 1997, *Capacidade de carga de estacas – Método Aoki-Velloso*, Relatório internode Estacas Franki Ltda.

<sup>5</sup> LAPROVITERA, H., 1988, *Reavaliação de método semi-empírico de previsão da capacidade de carga de estacas a partir de Banco de Dados*. Dissertação de Mestrado. COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.

<sup>6</sup> BENEGAS, H.Q., 1993, *Previsões para a curva carga-recalque de estacas a partir do SPT*, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.

**Tabela 2** Valores de  $\kappa$  e  $\alpha$  (Monteiro, 1997), apud VELLOSO e LOPES (2002)

<b>Tipo de solo</b>	<b><math>\kappa</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\alpha</math></b>
Areia	7,3	2,1
Areia siltosa	6,8	2,3
Areia silto-argilosa	6,3	2,4
Areia argilo-siltosa	5,7	2,9
Areia argilosa	5,4	2,8
Silte arenoso	5,0	3,0
Silte areno-argiloso	4,5	3,2
Silte	4,8	3,2
Silte argilo-arenoso	4,0	3,3
Silte argiloso	3,2	3,6
Argila arenosa	4,4	3,2
Argila areno-siltosa	3,0	3,8
Argila silto-arenosa	3,3	4,1
Argila siltosa	2,6	4,5
Argila	2,5	5,5

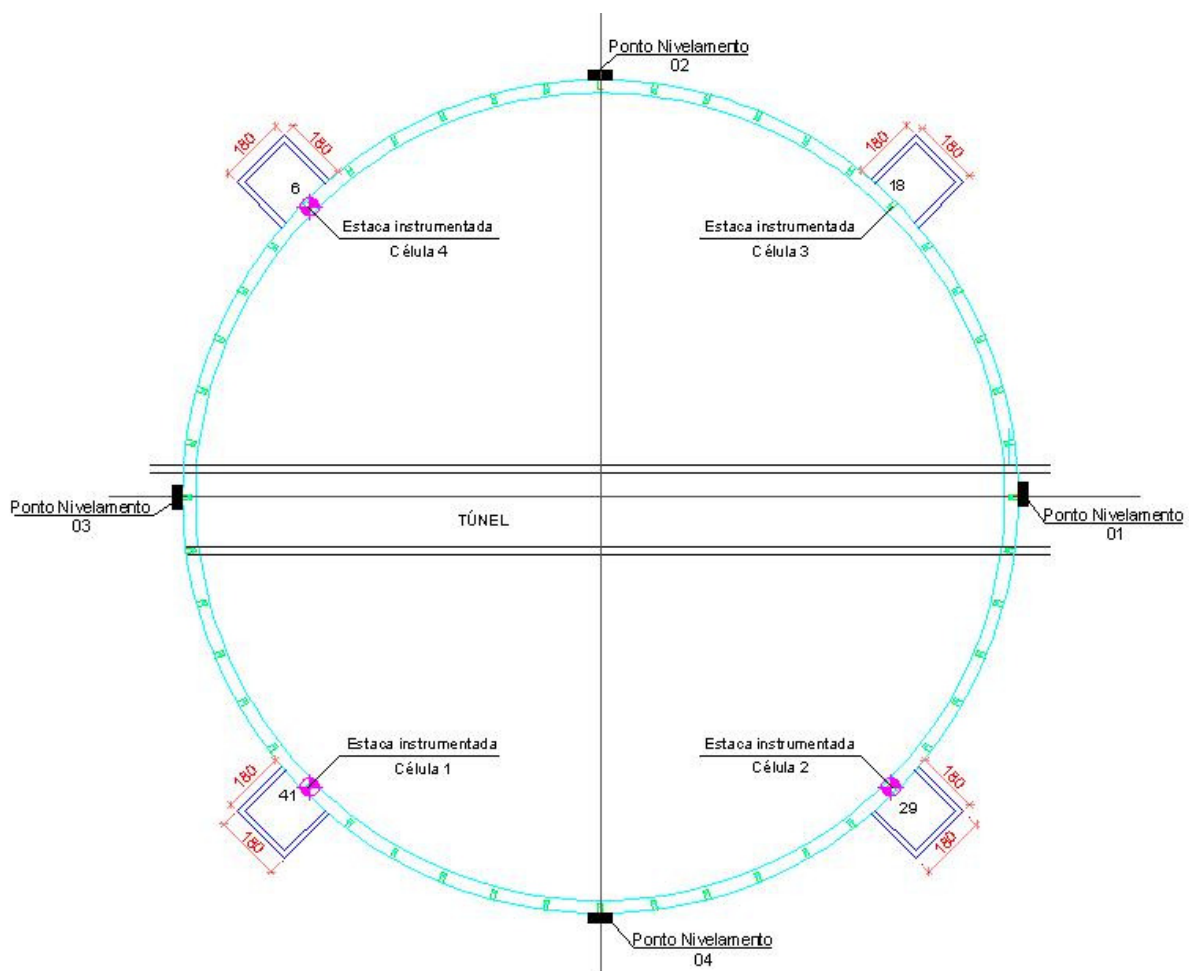
**Tabela 3** Valores de F1 e F2 (Laprovitera, 1988; Benegas, 1993), apud Velloso e Lopes (2002)

<b>Tipo de estaca</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>
Franki	2,5	3,0
Metálica	2,4	3,4
Pré-moldada de concreto	2,0	3,5
Escavada	4,5	4,5

### 3.6 Recalque das fundações

Os deslocamentos verticais (recalques) foram determinados por nivelamento com estação total, executado por empresa contratada pela Cooperativa C. Vale, sendo que não foi possível interferir na definição das locações dos pontos de nivelamento, nem nos dias de leitura dos mesmos. Foram feitas leituras em quatro pontos localizados no anel do silo, conforme mostrado na Figura 36. As medições tiveram início no dia 04/08/2009, anterior ao início da fase de carregamento, e término no dia 06/01/2010, posterior ao final do descarregamento. A precisão do equipamento de medição permitiu a obtenção dos valores de recalques em milímetros.





**Figura 36** Locação dos pontos de nivelamento.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho, realizou-se uma análise da distribuição de cargas nas fundações de um silo protótipo, tendo como objetivo principal obter o coeficiente de transferência das cargas para o anel e fundo do silo. Para tanto, foram instrumentadas, por meio de células de pressão, quatro estacas localizadas sob o anel do silo, permitindo a leitura das cargas solicitantes nas mesmas durante as fases de carregamento, armazenamento e descarregamento.

Atividades de pesquisa em escala real envolvem um grande número de variáveis intervenientes no processo, sobre as quais o pesquisador não tem controle. Durante a realização deste trabalho, algumas situações interferiram no planejamento e andamento das atividades, sendo necessário mencioná-las aqui, para uma melhor compreensão dos resultados.

Dentre as situações indesejadas que ocorreram, destaca-se a antecipação do início de carregamento do silo em estudo, devido a problemas técnicos apresentados pelo silo que seria carregado naquele momento. Em decorrência disto, foi necessária a montagem rápida da instrumentação, que até o momento não estava totalmente implantada. Assim, o concreto de regularização das bases de apoio às células foi solicitado antes de estar totalmente curado, ocasionando a ruptura da base da célula 1, comprometendo os valores obtidos por esta célula. Ainda, essa antecipação do carregamento do silo não permitiu as leituras das cargas referentes aos dois primeiros dias de carregamento.

Outra situação que dificultou a pesquisa foi o fato de o silo instrumentado ter apresentado patologias na sua estrutura durante a fase de carregamento. As patologias apresentadas foram na região do túnel e exigiram reforço estrutural do mesmo para que se pudesse fazer o descarregamento do silo. O tempo de execução do reforço prolongou a fase de armazenamento dos grãos no silo, retardando o descarregamento. Este fato comprometeu o planejamento da pesquisa, pois impediu que se fizesse a repetição do experimento (novo ciclo de carregamento, armazenamento e descarregamento), devido ao cumprimento de prazos pré-estabelecidos.

Ainda, na fase de carregamento, os dados referentes à quantidade de grãos que estava sendo armazenada no silo foram repassados de acordo com a chegada dos caminhões na balança, ou seja, a todo instante eram conhecidos o valor carregado no silo e o valor correspondente na estaca. Já na fase de descarregamento, isso não ocorreu, e as informações repassadas referentes à quantidade de grãos que estava sendo descarregada não são suficientes para que se possa tecer alguma análise em conjunto com os valores lidos nas células.

Apresentadas estas novas condições de contorno e feitas as devidas considerações, explorar-se-á os dados obtidos na pesquisa através da análise gráfica e dados tabelados.

#### 4.1 Carregamento do silo

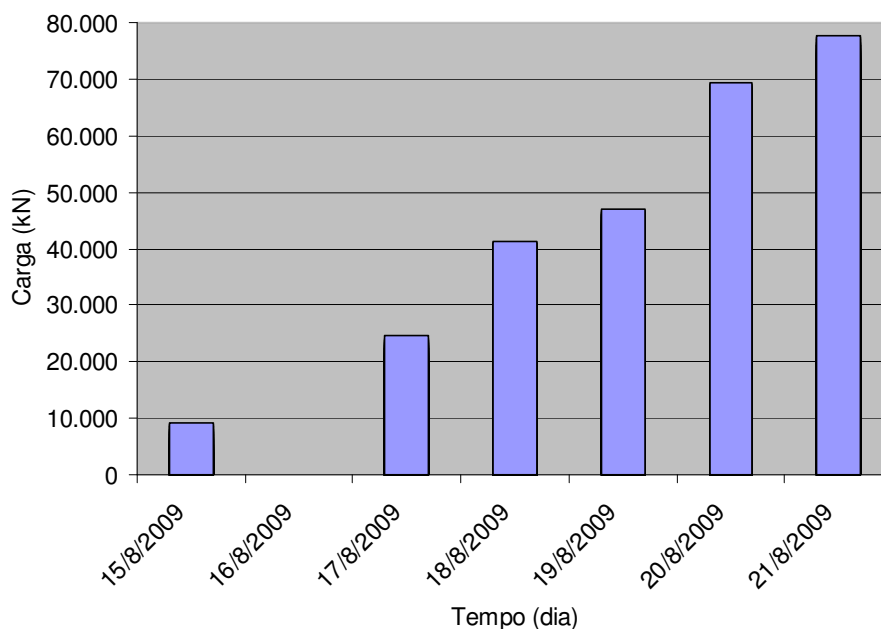
A fase de carregamento do silo teve duração de sete dias, sendo iniciada no dia 15/08/2009 e finalizada no dia 21/08/2009. Ao término do carregamento, o silo estava armazenando um total de 77.772,42 kN de grãos de milho.

Os valores referentes à quantidade de grãos armazenados foi fornecido pela Cooperativa C.Vale e faz referência aos valores coletados nas células de carga instaladas na balança de controle, que registrava a chegada dos grãos. A quantidade de grãos armazenados diariamente, acumulados de hora em hora, são apresentados na Tabela 4 e na Figura 37.

**Tabela 4** Quantidade de grãos armazenados diariamente

Hora	Quantidade de grãos armazenados acumulados diariamente (kN)					
	15/08/09	17/08/09	18/08/09	19/08/09	20/08/09	21/08/09
06:00	-	-	-	-	47.451,40	-
07:00	301,50	9.225,40	-	-	51.000,00	-
08:00	3.585,90	9.690,00	-	-	51.693,00	-
09:00	4.621,60	11.070,10	-	-	52.418,80	-
10:00	5.959,30	11.390,90	-	41.410,80	54.573,20	-
11:00	8.487,90	12.773,20	24.546,10	41.746,00	56.560,60	69.311,72
12:00	9.225,40	15.530,30	25.035,60	43.944,00	59.470,20	70.697,22
13:00	-	18.417,70	27.261,20	46.724,50	61.041,30	71.410,42
14:00	-	18.727,10	29.125,50	47.140,70	62.294,30	73.164,12
15:00	-	19.144,30	31.157,40	-	63.890,60	74.921,02
16:00	-	20.560,00	32.500,30	-	65.755,10	75.229,62
17:00	-	22.737,50	32.834,70	-	69.063,92	77.021,92
18:00	-	24.069,10	36.415,60	-	69.311,72	77.340,72
19:00	-	24.546,10	40.566,30	-	-	-
20:00	-	-	41.410,80	-	-	77.772,42

O carregamento não foi constante, isto é, a quantidade de grãos armazenados diariamente variou de forma aleatória, sendo realizado nos horários entre 06 e 20 horas.



**Figura 37** Carregamento diário do silo.

O carregamento pleno do silo atingiu 77.772,42 kN. Assumindo o coeficiente de transferência de 30%, cada uma das 46 estacas estaria submetida, teoricamente, a uma carga máxima de 507,21 kN.

## 4.2 Armazenamento

Os valores de carga transferida para as estacas sofreram alteração durante a fase de carregamento, crescendo de acordo com a quantidade de grão armazenado no silo. Já na fase de armazenamento, que teve início dia 22/08/09 e término dia 30/11/09, passaram a ser praticamente constante, como mostra a Tabela 5, onde são apresentados os valores das cargas lidas nas células de pressão nos dias 22/08/09, 04/10/09 e 30/11/09, que correspondem respectivamente ao início, metade e final da fase de armazenamento.

**Tabela 5** Cargas observadas nas células durante o início, metade e final da fase de armazenamento

Dia	$Q_{\text{célula1}}$ (kN)*	$Q_{\text{célula2}}$ (kN)**	$Q_{\text{célula3}}$ (kN)	$Q_{\text{célula4}}$ (kN)
22/08/09	183,23	844,44	578,89	523,32
04/10/09	173,58	844,44	586,93	514,36
30/11/09	194,59	844,44	595,00	525,44

\* Célula com a base de concreto rompida.

\*\* Célula com o limite de leitura do sistema de aquisição de dados ultrapassado.

Como o silo em estudo apresentou problemas estruturais durante a fase de carregamento, a fase de armazenamento foi prolongada para que se pudessem fazer os

reforços adequados antes do descarregamento, a fim de não comprometer o resto da estrutura. Assim, a fase de armazenamento em relação à fase de carregamento e descarregamento teve um período bem maior, o que acaba por mascarar os dados das outras fases do ciclo se adicionados aos gráficos, fato pelo qual esta fase não será abordada graficamente.

### **4.3 Descarregamento**

Durante a fase de descarregamento, foram realizadas as leituras das cargas transferidas às estacas como nas demais fases. Contudo, para poder tecer algum comentário, seria necessária a análise comparativa entre os valores observados nas células e a quantidade de grãos descarregados simultaneamente. Todavia, assim como na fase de carregamento, os dados referentes à quantidade de grãos que eram retirados do silo deveriam ser fornecidos pela C. Vale e, para esta fase, os dados repassados não permitiram fazer tais análises.

A descarga ocorreu entre os dias 02 e 19 de dezembro de 2009. A massa de grãos estocada foi de 77.772,42 kN. Desta, 13.000,00 kN foram deslocadas por caminhões e o restante, aproximadamente 65.000,00 kN foram transportadas via transportadores (de corrente e elevadores), com fluxo médio de 4.650,00 kN/dia e intensidade de 240 a 1200 kN/hora (informações cedidas pela C.Vale).

### **4.4 Leitura das células**

Como o início do carregamento do silo foi antecipado em uma semana em relação à data anteriormente programada, o cronograma das atividades de implantação dos equipamentos necessários à coleta de dados não ocorreu como planejado, visto que esta antecipação foi informada com um período de tempo muito curto.

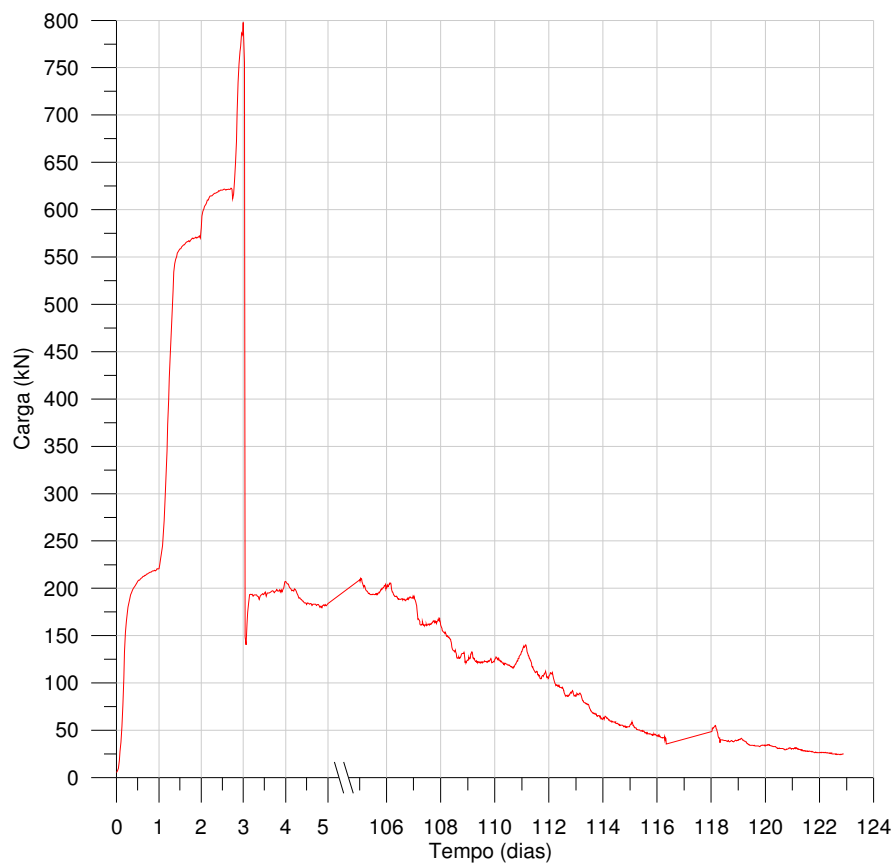
Desta forma, todo o processo de implantação dos equipamentos teve que ser acelerado e, até o momento do início do carregamento, não estava em sua totalidade concluído. Quando do início do carregamento, as células de carga já estavam devidamente posicionadas. Contudo, o equipamento de aquisição de dados precisava ser instalado e conectado as células, processo que só pode ser concluído dois dias após o início do carregamento.

No primeiro dia de carregamento (15/08/2009), os grãos armazenados preencheram a região da tremonha do silo, alcançando a altura do anel. No segundo dia (16/08/09), o carregamento foi interrompido e retomado no dia seguinte, 17 de agosto de 2009, data na qual se iniciou o monitoramento das estacas. No momento em que se iniciaram as leituras nas células, o silo estava armazenando 19.144,30 kN de milho, valor

registrado às 15 horas do dia 17/08/2009, instante em que ocorreu a primeira leitura no sistema.

#### 4.4.1 Célula 1

A Figura 38 mostra a curva carga-tempo para as fases de carregamento e descarregamento. O eixo da variável tempo foi seccionado a partir do quinto dia para permitir melhor distribuição e visualização dos dados. Com este procedimento, não se exibe a fase de armazenamento, a qual apresentou carga constante.



**Figura 38** Curva carga-tempo para a célula 1.

Pela curva, observa-se um comportamento anômalo a partir do terceiro dia de carregamento, fato devido à ruptura da base de regularização da célula de pressão, como pode ser visto na Figura 39.



**Figura 39** Rompimento da base de regularização de suporte da célula de carga.

O curto período de cura do concreto pode ter sido a causa desta ruptura, comprometendo as leituras subsequentes. Mesmo assim, pode-se considerar as leituras nos estágios iniciais do carregamento como satisfatórias, e pode-se notar cargas muito acima do valor 500 kN estipulado pelo calculista. No instante da ruptura da célula, ela estava registrando uma carga próxima a 800 kN, valor superior à capacidade máxima da célula de carga, que, segundo o fabricante, é de 600 kN.

Também, pode ser notado que após o término do carregamento, o valor registrado pela célula é diferente de zero, ou seja, a célula continuou registrando carga mesmo estando o silo vazio. Neste caso, o valor residual foi de aproximadamente 25 kN.

O valor residual, observado na célula1, ocorreu também para as outras três células, com valores diferentes para cada uma, contudo, relativo ao valor máximo registrado pela célula. Esta carga residual deve ser devida às deformações do anel, bem como aos recalques diferenciais observados. Como não houve recuperação total das deformações sofridas, as células continuaram a registrar as cargas residuais entre a ponta da estaca e o anel.

Após a remoção das células, elas foram devidamente aferidas no Laboratório de Estruturas e Materiais da Engenharia (LEME) da Unioeste, onde foi verificado que o valor residual não se apresentava mais, mostrando que a carga registrada após o término do descarregamento do silo, era carga gerada pelo silo, pois, caso contrário, se fosse algum problema nas células, a carga residual se manteria após a remoção das células.

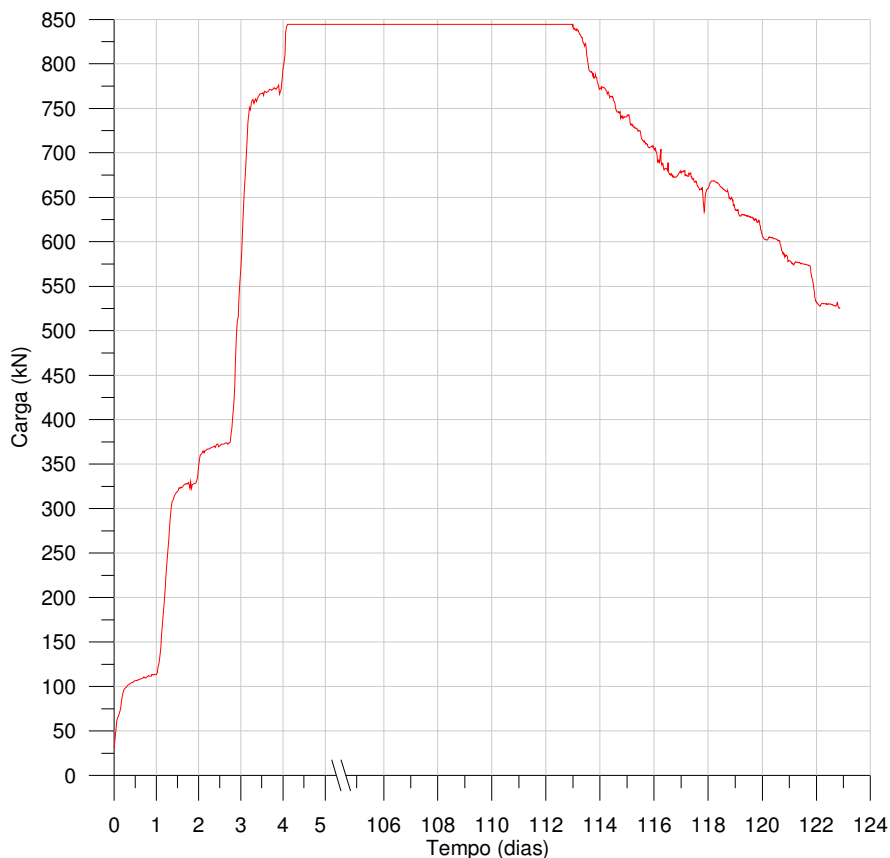
#### 4.4.2 Célula 2

Na Figura 40, o patamar observado sugere que a célula 2 atingiu o limite de leitura programado no sistema de aquisição de dados. O sistema estava calibrado para cargas variando de zero a 850 kN, sendo que, ao atingir o valor máximo de 850 kN, que

correspondia a 10 V, o sistema não efetuou as novas leituras, ficou estabilizado, mesmo a célula sendo ainda solicitada, pois o carregamento ainda ocorria no silo. A configuração da célula pode ser ajustada para melhor precisão, porém com faixa de registro mais estreita, ou com faixa mais ampla, porém com menor precisão. A calibração das células utilizadas na instrumentação foi feita de modo a proporcionar maior precisão, em detrimento da amplitude das leituras, o que pode explicar o ocorrido.

Também para esta figura, optou-se por seccionar o eixo da variável tempo, pelos mesmos motivos anteriormente expostos. Novamente, a capacidade máxima da célula e o valor do carregamento estipulado em projeto foram superados. Para esta estaca, a célula registrou carga máxima de aproximadamente 850 kN.

De acordo com o comportamento da célula, constata-se que apesar de não ser registrada, a carga máxima transferida à estaca em questão foi superior aos 850 kN, uma vez que, na fase de descarregamento, a célula passou a registrar novamente os valores, porém, após 6 dias de descarga, ou seja, foi necessário diminuir a carga até o limite de transferência de 850 kN para que o equipamento voltasse a fazer as leituras.



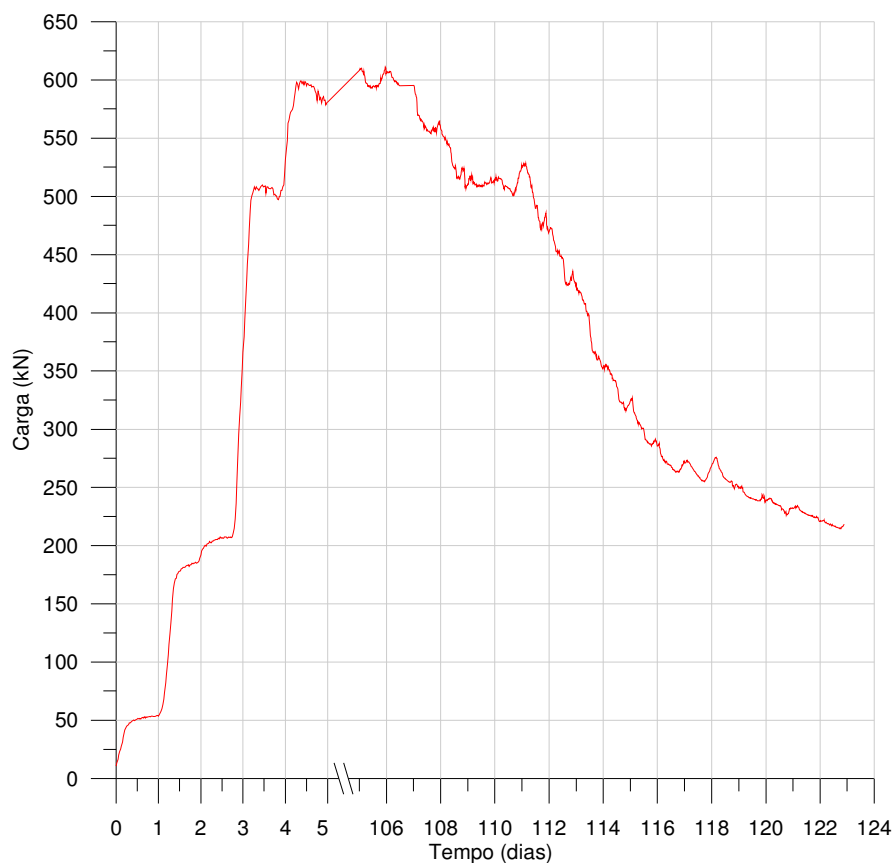
**Figura 40** Curva carga-tempo para a célula 2.

De acordo com a curva, a célula 2 se manteve com carga residual de aproximadamente 525 kN, também atribuída à não-recuperação total das deformações.



#### 4.4.3 Célula 3

A célula 3 registrou as leituras carga-tempo para todo o ciclo do silo, conforme mostrado nas Figuras 41. Para esta estaca, a carga máxima registrada pela célula foi de aproximadamente 600 kN, valor este superior ao especificado em projeto. O eixo da variável tempo foi seccionado como nas demais curvas carga-tempo e, após o descarregamento do silo, a célula registrava uma carga residual de aproximadamente 220 kN.

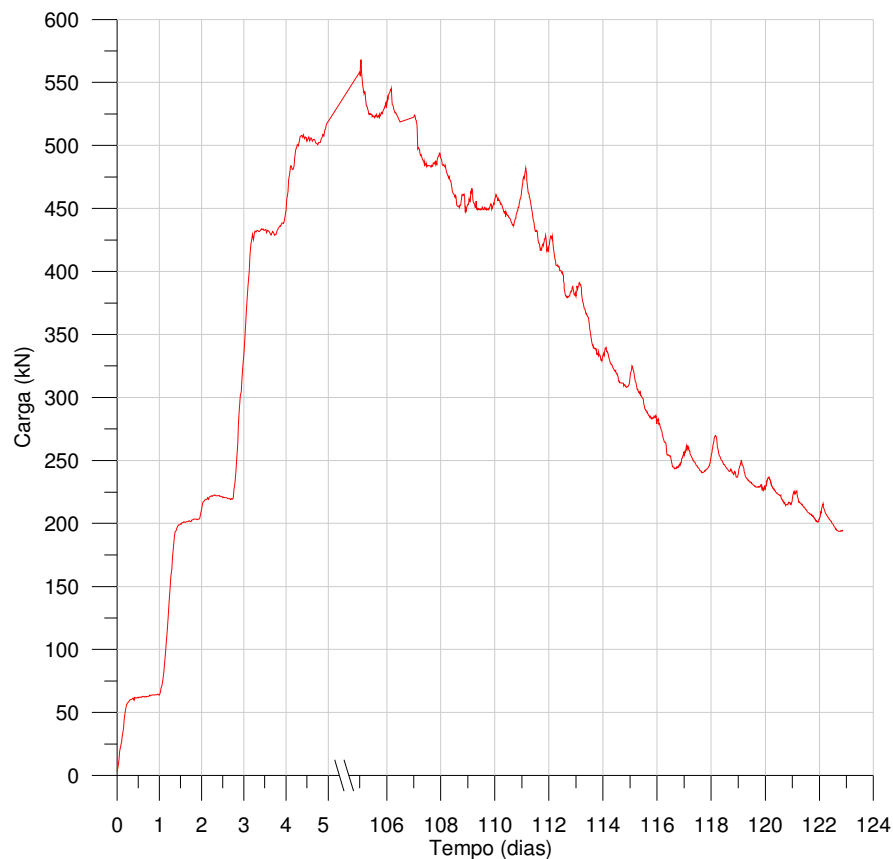


**Figura 41** Curva carga-tempo para a célula 3.

#### 4.4.4 Célula 4

Assim como a célula 3, a célula 4 registrou, sem problemas, durante as fases de carregamento, armazenamento e descarregamento, as leituras carga-tempo, conforme mostrado na Figura 42.

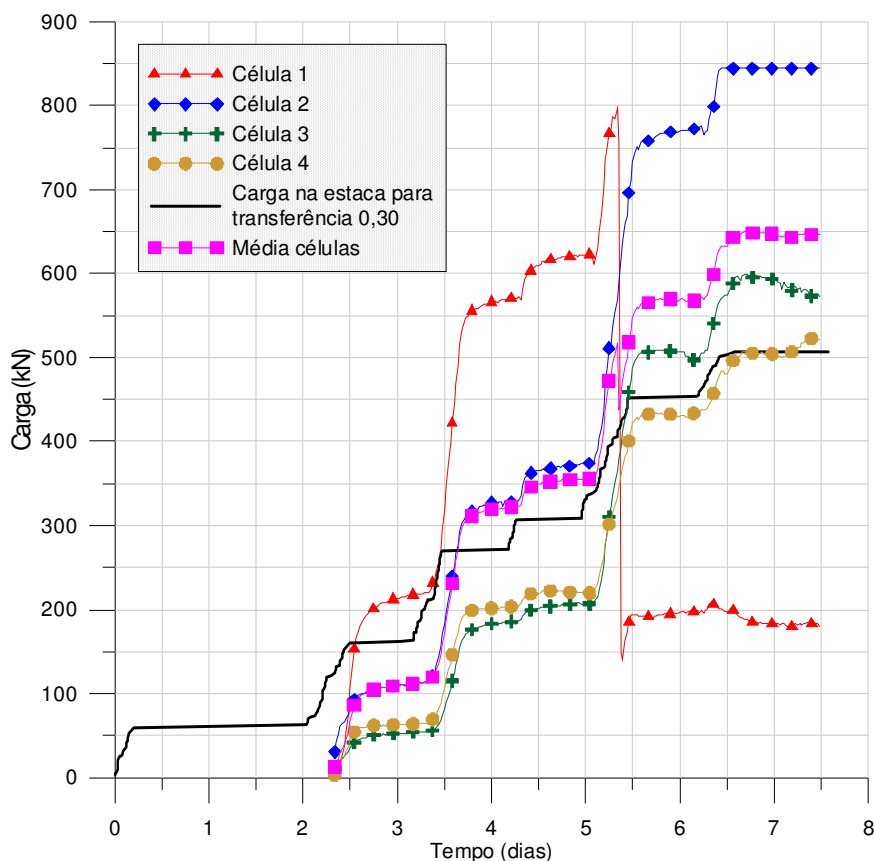
De acordo com a curva, a estaca foi solicitada por uma carga máxima de aproximadamente 550 kN e ao término do carregamento, a célula continuava registrando uma carga residual em torno de 200 kN.



**Figura 42** Curva carga-tempo para a célula 4.

#### 4.4.5 Análise conjunta das células

Na Figura 43 são apresentadas as curvas carga-tempo para todas as estacas instrumentadas, para a fase de carregamento, além da curva da carga estimada considerando o coeficiente de transferência 30% e da média das cargas registradas pelas células. A média das cargas após a ruptura da base da célula 1 foi calculada levando-se em conta somente as leituras das demais. A fase de descarregamento foi retirada da curva devido à falta de informações referentes à quantidade de grãos descarregados do silo, não sendo possível fazer as análises de descarga.



**Figura 43** Curvas carga-tempo para as células.

Uma análise conjunta das curvas sugere que a célula 1 teve seu desempenho prejudicado pela ruptura do concreto da base de regularização. As estacas sob as células 2 e 3 estiveram submetidas a uma sobrecarga em relação às demais, desde o início do carregamento do silo, sendo registradas cargas superiores a 800 kN, o que pode ser atribuído à possibilidade de sua ponta ter encontrado uma camada de solo muito mais rígida e, assim, elas não se deslocarem de modo a transferir carga ao solo por atrito lateral.

Com a ruptura do concreto na célula 1, pode ter ocorrido uma transferência de carga desta para as demais e, nesse estágio, as curvas de carregamento das células 2, 3 e 4 sofrem um incremento.

As células 3 e 4 apresentam curvas bastante similares, tanto na fase de carregamento quanto na fase de descarregamento. Provavelmente, as condições das camadas do subsolo de apoio das pontas e de embutimento dos fustes dessas estacas eram bastante homogêneas (uniformes).

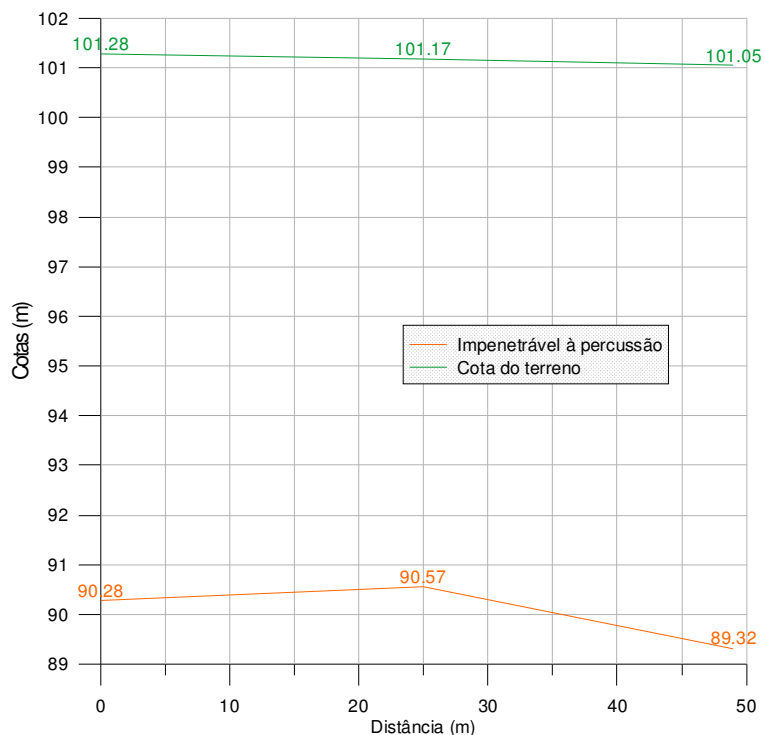
Também nesta figura apresenta-se a curva em função do tempo da carga estimada na estaca para um coeficiente de transferência de 30% para ser comparada à média das cargas nas estacas. Até o carregamento em torno de 500 kN, houve uma concordância razoavelmente próxima entre as duas curvas; a partir daí, o coeficiente 0,30 subestima a transferência de carga para as estacas. Portanto, é razoável assumir uma grande

concordância de comportamento entre esta curva estimada e as curvas experimentais até aquele nível de carregamento.

As explicações para a sobrecarga nas estacas das células 1 e 2 devem ser buscadas entre os possíveis fatores abaixo:

- assimetria geométrica;
- assimetria de carregamento;
- heterogeneidade do solo ao longo do fuste da estaca;
- heterogeneidade do maciço rochoso.

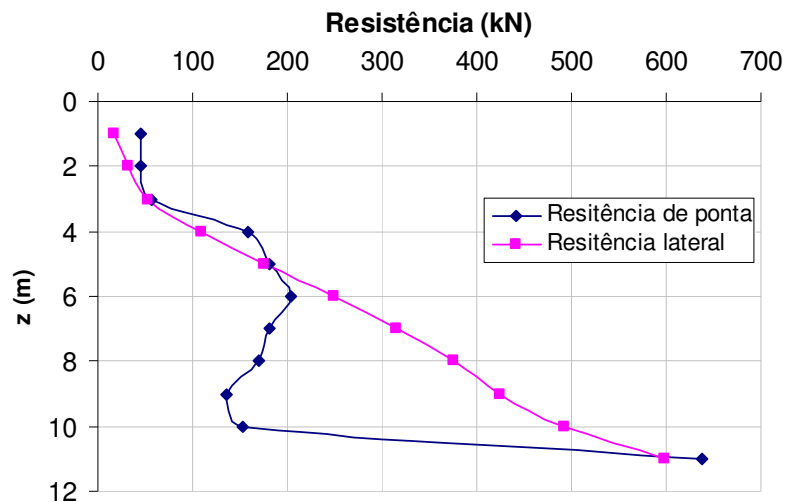
Dos fatores acima, o mais plausível é a heterogeneidade do maciço, no qual se apoiaram as pontas das estacas. Como o maciço foi alterado por explosões para desmonte de rochas, as pontas das estacas apoiaram-se em materiais de diferente rigidez. As estacas nas células 1 e 2 ficaram apoiadas em uma camada muito mais rígida e, quando carregadas, trabalharam como se fossem colunas biengastadas submetidas a compressão. Como a elevada rigidez do material não permitia deslocamento, os esforços reativos foram transferidos para as cabeças das estacas e conseqüentemente para as células 1 e 2. As estacas das células 3 e 4 apoiaram em camada menos rígida e, sob carregamento, puderam se deslocar e dessa forma transferir parte do carregamento para o solo na forma de atrito lateral. A Figura 44 justifica os argumentos acima expostos, visto que os greides mostrados foram construídos a partir dos dados de S.P.T..



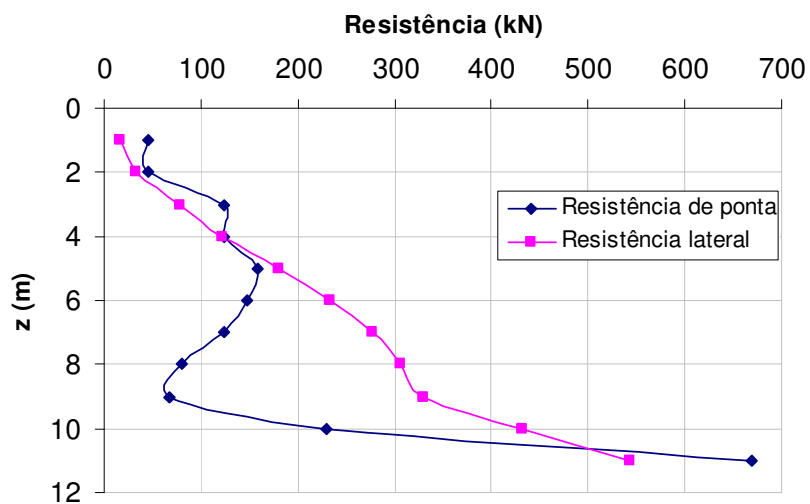
**Figura 44** Greides da superfície do terreno e do impenetrável à percussão.

#### 4.5 Capacidade de carga das estacas

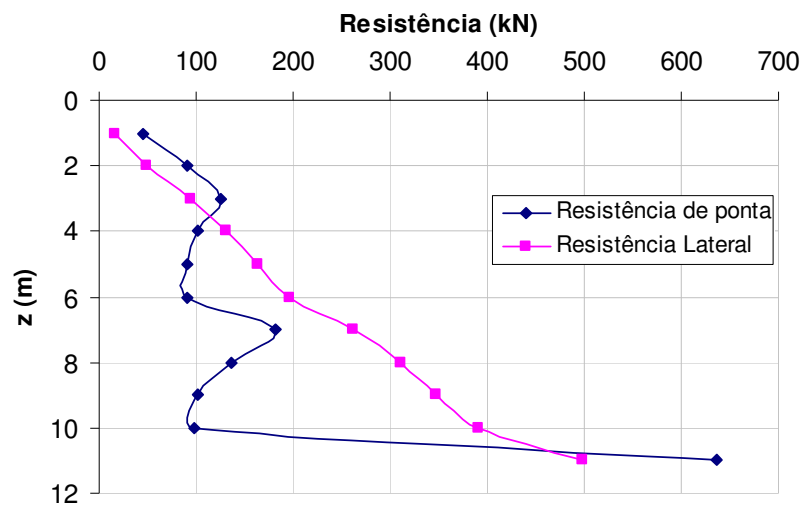
As Figuras 45 a 50 apresentam os perfis de resistência lateral e resistência de ponta obtida a partir dos dados das sondagens mistas (SM) executadas no terreno compactado.



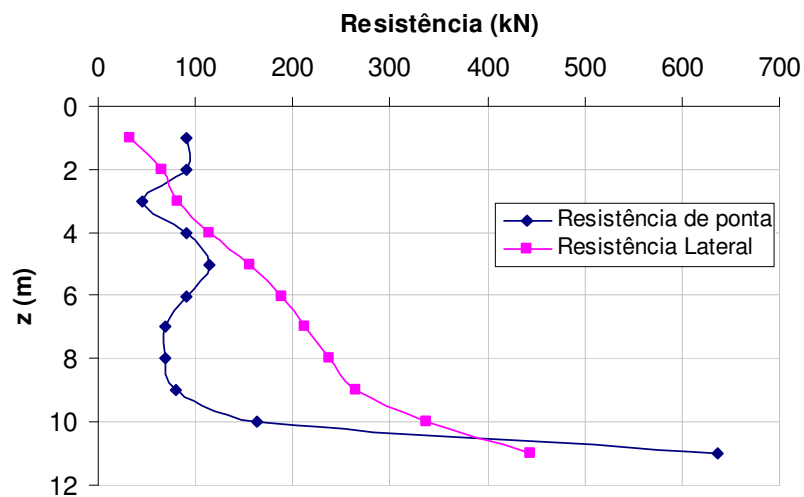
**Figura 45** Capacidade de carga das estacas - SM 01.



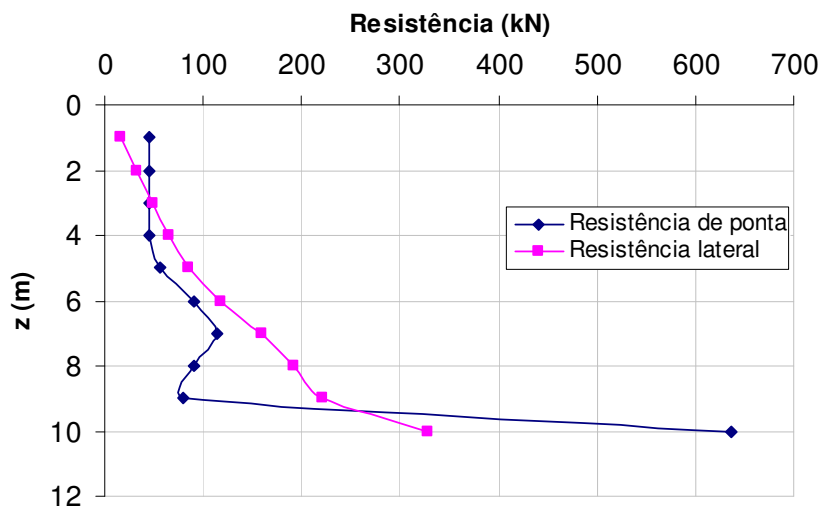
**Figura 46** Capacidade de carga das estacas - SM 02.



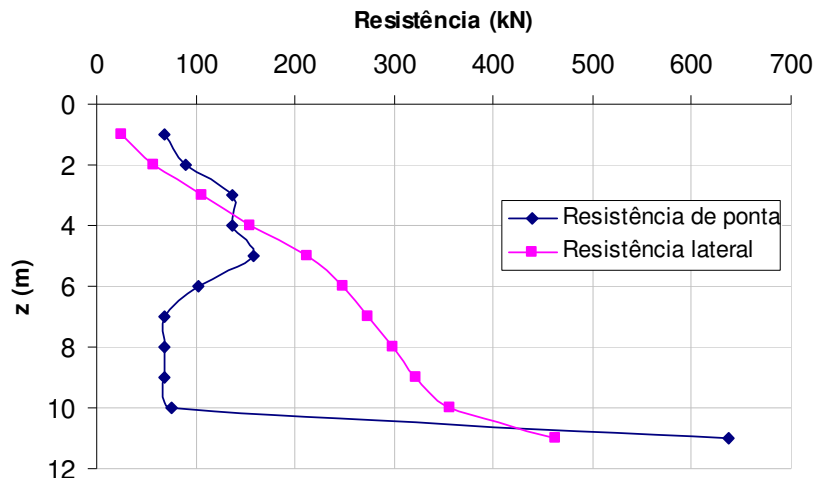
**Figura 47** Capacidade de carga das estacas - SM 03.



**Figura 48** Capacidade de carga das estacas - SM 04.



**Figura 49** Capacidade de carga das estacas - SM 05.



**Figura 50** Capacidade de carga das estacas - SM 06.

Os perfis exibidos apresentam elevadas resistências de ponta das estacas, todas elas apresentando resistência em torno de 650 kN. Se fossem eliminados os respectivos últimos pontos das curvas, observa-se que todas as estacas transfeririam carga por atrito lateral, principalmente. O fato de se ter apoiado as estacas na camada impenetrável forçou-as a transferirem suas cargas por resistência de ponta. O aspecto negativo é que a ponta da estaca tem que obrigatoriamente se apoiar na camada impenetrável, sob risco de sofrer grandes deslocamentos.

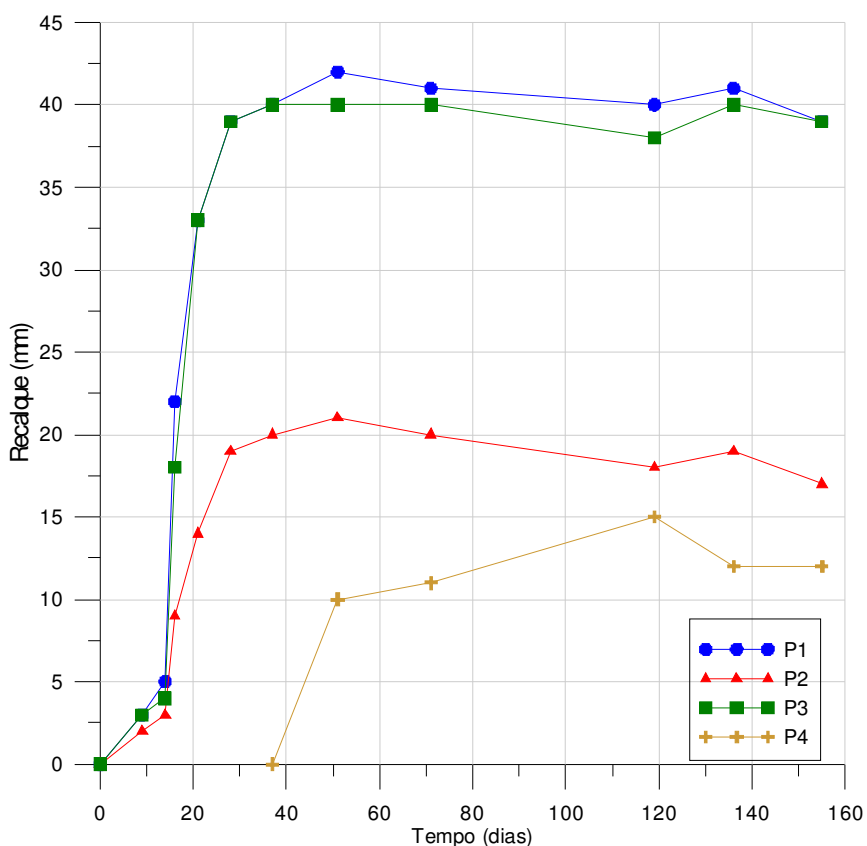
#### 4.6 Recalques

Os valores de recalques medidos no anel do silo, assim como os dias em que foram realizadas as medições são apresentados na Tabela 6 e na Figura 51 é apresentado o comportamento do recalque em função do tempo.

**Tabela 6** Recalques observados no anel do silo

Dia	Tempo (dias)	Recalque medido (mm)			
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
04/08/09	0	0	0	0	-
13/08/09	9	3	2	3	-
18/08/09	14	5	3	4	-
20/08/09	16	22	9	18	-
25/08/09	21	33	14	33	-
01/09/09	28	39	19	39	0
10/09/09	37	40	20	40	0
24/09/09	51	42	21	40	10
14/10/09	71	41	20	40	11
01/12/09	119	40	18	38	15
18/12/09	136	41	19	40	12
06/01/10	155	39	17	39	12

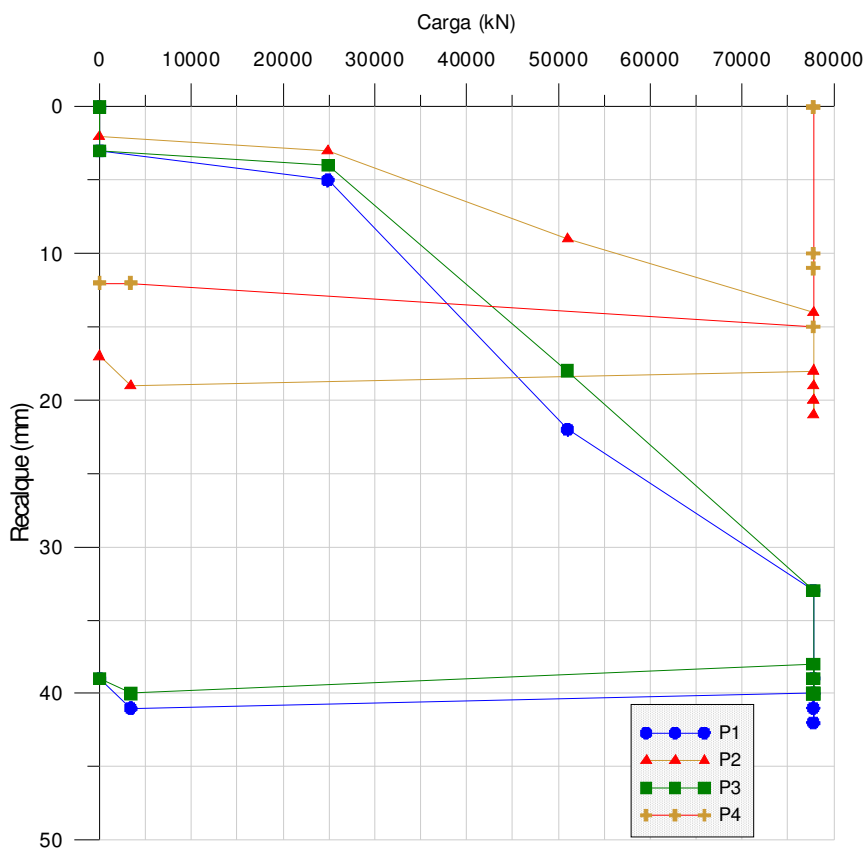
Os pontos de nivelamento P1 e P3 apresentaram recalques muito similares e acima de 40 mm. O fato determinante desse comportamento é que tais pontos de nivelamento encontram-se alinhados com o túnel. As explosões realizadas para desmonte das rochas no alinhamento do túnel provavelmente provocaram uma zona de fraqueza, expondo as fundações nessa região a maiores deslocamentos. Para os pontos P2 e P4, os recalques foram menores, aproximadamente a metade do medido em P1 e P3, provavelmente as fundações próximas a estes pontos ficaram apoiadas em material mais resistente e com isso, sofreram menor deslocamento. Observa-se ainda que o controle de nivelamento para o ponto P4 foi iniciado quando o silo estava com a fase de carregamento finalizada já que esta fase findou em 21/08/09 e o controle de nivelamento foi iniciado dia 01/09/09.



**Figura 51** Comportamento do recalque em função do tempo.

A Figura 52 exibe as curvas carga-recalque para os respectivos pontos de nivelamento.





**Figura 52** Comportamento do recalque em função do carregamento e descarregamento do silo.

Na fase armazenamento os recalques estão estabilizados e, na fase descarregamento, todos os pontos exibiram pequena recuperação das deformações sofridas, demonstrando que a deformação ocorrida por ocasião do carregamento foi plástica, não retornando em valores apreciáveis.

#### 4.7 Cálculo da deformação da estaca

A deformação ou encurtamento da estaca foi calculada pela equação (31).

$$\xi_e = \frac{Q.L}{A.E_c} \quad (31)$$

Onde:

$\xi_e$  = deformação elástica

Q = carga atuante na estaca, corresponde à resistência de ponta, por ser a sollicitação que provoca o encurtamento elástico da estaca

L = comprimento da estaca

$E_c$  = módulo de elasticidade longitudinal do concreto

A = área da seção transversal da estaca

Como o concreto usado nas estacas apresentava resistência de 15 MPa, o comprimento da estaca não foi superior a 10 m e seu diâmetro era de 50 cm e a resistência de ponta na estaca foi de aproximadamente 650 kN, através da equação acima, a deformação máxima da estaca é de 1,53 mm.

Comparando-se a deformação com os recalques máximos sofridos pelos pontos de nivelamento P1, P2, P3 e P4, de 42 mm, 21 mm, 40 mm e 15 mm, respectivamente, nota-se que os recalques ocorridos são realmente significativos e não podem ser atribuídos ao encurtamento elástico das estacas. Recalques usualmente observados em estacas bem executadas situam na ordem de 25 mm (VELLOSO & LOPES, 2002).

## 5 CONCLUSÕES

O coeficiente de transferência do carregamento para este estudo ocorreu de forma diferenciada em cada estaca instrumentada durante as fases de carregamento, armazenamento e descarregamento. As leituras máximas das cargas feitas nas células das quatro estacas instrumentadas foram: 800, 845, 520 e 600 kN, o que corresponde a coeficientes de 47, 50, 30 e 35% respectivamente.

A carga máxima lida nas células superou a carga prevista em projeto nas quatro estacas, visto que a carga máxima que deveria solicitar as estacas seria de 500 kN.

O coeficiente de transferência do carregamento para as estacas do anel não se altera durante a fase de armazenamento. Ele atinge o valor máximo quando o silo é carregado em sua totalidade e se mantém constante durante todo o período de armazenamento, sofrendo alteração na fase de descarregamento, quando o mesmo diminui de acordo com a quantidade de grãos descarregados, como esperado.

O coeficiente de transferência normalmente utilizado para este tipo de silo é da ordem de 30%, valor este superado em três estacas analisadas, sendo que, as estacas sob as células 1 e 2 apresentaram valor superior logo após o início do carregamento.

De acordo com o comportamento apresentado pelas cargas lidas nas células 3 e 4, o coeficiente de 30% parece bastante razoável. Ainda, ao se trabalhar com a média das cargas lidas nas quatro estacas, o coeficiente de 30% mostrou-se coerente até que o carregamento atingisse 64% do carregamento total, cerca de 50000 kN. Quando a carga ultrapassou este valor, o coeficiente ficou superior a 30%. Contudo, o resultado individual para cada estaca identifica a necessidade de analisar com mais critério os coeficientes adotados em cálculos a fim de evitar problemas estruturais.

A diferença de carregamento observada nas estacas pode ser atribuída às diferentes condições de apoio das pontas das estacas, o que possibilitou deslocamentos diferenciados.

O silo em análise apresentou recalques diferenciais de até 42 mm, podendo ser este o principal causador da diferença de cargas registradas nas células.

O fato de o silo ter apresentado problemas estruturais na região do túnel também deve ter colaborado com os resultados obtidos.

Com base nos valores de carregamento nas estacas, registrado pelas células, dos dados de nivelamento e analisando o processo construtivo do silo, pode-se perceber que os resultados obtidos retratam a região de apoio das fundações do silo dividida em três regiões distintas, uma localizada no alinhamento do túnel, e as outras externas a ele, uma à direita e a outra à esquerda do túnel, tendo como ponto de posicionamento o poço do elevador utilizado como abrigo do equipamento de aquisição de dados.

De acordo com o processo construtivo, na região à direita do túnel, as estacas ficaram com o fuste quase que totalmente em aterro, ao passo que às da esquerda ficaram com uma camada maior de terreno natural e a região do túnel foi a mais fragilizada, visto que esta região sofreu detonação para desmonte de rocha.

O fato de o túnel ter ficado em uma região frágil foi constatado pelas medidas de nivelamento, sendo que os dois pontos onde foram medidos os maiores recalques estão localizados no alinhamento do anel.

A não-uniformidade do maciço de apoio das estacas, os recalques ocorridos, junto com os problemas estruturais observados, são os principais contribuintes para o resultado obtido, isto é, do carregamento diferenciado entre as estacas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No intuito de uma melhor avaliação de resultados e com a finalidade de fomentar o estudo de silos, são apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas:

- buscar a contextualização/regionalização das pesquisas em dimensionamento de silos, visto que os solos e os grãos de diferentes regiões apresentam comportamentos mecânicos distintos;
- instrumentar as cascas metálicas cilíndricas nos contatos grãos-parede, de modo a obter o parâmetro K;
- realizar ensaios de cisalhamento direto, preferencialmente do tipo Jenike, para obter os parâmetros de fluxo nas fases de carregamento e descarregamento; e
- conduzir uma análise de interação solo-fundação-estrutura.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, G. F. **Contribuição ao entendimento da fluência não-drenada**. 2006. 167 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: solos: sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto e execução de estruturas de concreto armado: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5., 1975, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: ISSMGE, 1975. p. 116-127.
- BADIALE, R. C.; SÁLES, J. J. **Reservatórios metálicos elevados para aplicação na indústria sucro-alcooleira**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, n. 13, 1999. 30 p.
- BRAUER, K.; PFITZNER, M.; KRIMER, D.O.; MAYER, M.; JIANG, Y.M.; LIU, M. Granular elasticity: Stress distributions in silos and under point loads. **Physical Review E** . v. 74, 2006.
- CALIL JR., C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. 1990. 198 p. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1990.
- CALIL JR, C. A Relação K entre as Pressões Horizontais e Verticais em Silos. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1997, Paraíba. **Anais...Pb**. CD-ROM.
- CALIL JR, C.; CHEUNG, A. B. **Silos**: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: EESC/USP, 2007. 232p.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1 v.1988.
- COX, G.M.; THAMWATTANA, N.; MCCUE, S.W.; HILL, J.M. Coulomb-Mohr Granular Materials: Quasi-static Flows and the Highly Frictional Limit. **Applied Mechanics Reviews**. v. 61. 2008.
- DEUTSCHE NORM. **DIN 1055-6**: basis of design and actions on structures – Part 6: design loads for buildings and loads in silo bins. Berlin, Verlaz, 2000.
- DINIZ, M. J.; NASCIMENTO, J. W. B. Análise de pressões em silo vertical de alvenaria de tijolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n. 1, Campina Grande, 2006.
- EUROCODE 1. **ENV 1991-4 Part 4**: Actions on silos and tanks. Bruxelas, 1995.
- FREITAS, E. G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas, EESC/USP, São Carlos.

FREITAS, E. G. A.; CALIL JR. C. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v. 7, n. 24, p. 1-34, 2005.

GOMES, F. C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. 2000. 187 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GOODEY, R.J.; BROWN, C.J.; ROTTER, J.M. Verification of a 3-dimensional model for filling pressures in square thin-walled silos. **Engineering Structures**. V. 25, p. 1773-1783, 2003.

HEZEL, C.R.. **Avaliação das pressões em silos verticais conforme diferentes normas internacionais**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2007.

IQBAL, T.; FITZPATRICK, J. J. Effect of powder properties on the wall friction characteristics of three food powders. **Journal of Food Engineering**, Elsevier Science, n.72, p.273-280, 2006.

JARRETT, N.D.; BROWN, C.J.; MOORE, D.B. Pressure measurements in a rectangular silo. **Geotechnique**. v. 45, p. 95-104, 1995.

JIANG, Y.M.; ZHENG H.P. A silo of which the pressure on the bottom of granular matter does not go to saturation. **Acta Physica Sinica**. v. 57, p. 7360-7366, 2008.

KAMINSKI, M.; WIRSKA, E. Variation of pressures in flexible walled silo model. **Powder Handling & Processing**. v.10 n.4, p.349-355. 1998.

LOPES NETO, J.P.; NASCIMENTO, J. W. B. do; SILVA, V.R. da; LOPES, F.F.M. Propriedade de fluxo e características de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 31, n. 3, p. 851-859, 2007.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. Mecânica dos solos II: conceitos introdutórios. Salvador: DCTM/Universidade Federal da Bahia, 1997.

MARTINEZ, M. A.; ALFARO I.; DOBLARÉ, M. Simulation of axisymmetric discharging in metallic silos. Analysis of the induced pressure distribution and comparison with different standards. **Engineering Structures**. Zaragoza, v. 24, p.1561-1574, 2002.

MOLENDÁ, M.; MONTROSS, M. D.; HORABIK, J. Non-axial stress state in a model silo generated by eccentric filling and internal inserts. **Particle & Particle Systems Characterization**. v. 24, p. 291-295, 2007.

MOLITERNO, A. **Caderno de muros de arrimo**. São Paulo: Edgar Blücher, 1994.

MONTEIRO, V. M. C. **Obtenção de coeficientes de atrito solo/estrutura para um solo residual de basalto e sua importância no cálculo de estruturas de contenção**. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2006.

NASCIMENTO, J. W. B. do. **Estudos de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

NIEDOSTATKIEWICZA, M.; TEJCHMANA, J.; CHANIECKIB, Z.; GRUDZIE, K. Determination of bulk solid concentration changes during granular flow in a model silo with ECT sensors. **Chemical Engineering Science**. v.64, p. 20-30, 2009.

NIELSEN, J. Pressures from flowing granular solids in silos. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences**, v. 356, p. 2667-2684, 1998.

PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ( $h/d \geq 1,5$ )**. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ROTTER, J.M.; HOLST J.M.F.G.; OOI, J.Y.; SANAD, A.M. Silo pressure predictions using discrete-element and finite-element analyses. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences**. v. 356, p. 2685-2712, 1998.

SILVA, F. S. et al. Efeito do beneficiamento nas propriedades físicas e mecânicas dos grãos de arroz de distintas variedades. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.5, n.1, p.33-41, 2003.

TAKE W.A.; VALSANGKAR, A.J. Earth pressures on unyielding retaining walls of narrow backfill width. **Canadian Geotechnical Journal**. V. 38, p. 1220-1230, 2001.

TIXIER, M.; PITOIS, O.; MILLS, P. Experimental impact of the history of packing on the mean pressure in silos. **European Physical Journal E**. v. 14, p. 241-247, 2004.

VANEL, L.; CLEMENT, E. Pressure screening and fluctuations at the bottom of a granular. **European Physical Journal B**. v. 11, p. 525-533, 1999.

VELOSO, D.A.; LOPES, F.R. **Fundações**. v.2, 472p. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.