



**PARECER TÉCNICO SOBRE O COLAPSO  
ESTRUTURAL DE UM SILO DA EMPRESA**

Que fazem Moacyr Molinari,  
engenheiro civil, CREA 15.586-D/PR,  
e Antonio Edison Vaz de Siqueira,  
engenheiro de segurança, CREA 8541-  
D/PR, atendendo a solicitação do  
representante da empresa S.A.

Curitiba, abril de 2008

## ÍNDICE

<b>TÓPICO</b>	<b>Página</b>
1. MOTIVO DO PARECER	03
2. FONTES DE DADOS	03
3. DO SILO	06
4. SEQUÊNCIA CRONOLÓGICA DOS FATOS	11
4.1 – Início da Concretagem	11
4.2 – Final da Concretagem	11
4.3 – Primeiro Carregamento do Silo 1 – Primeiras Rachaduras	12
4.4 – Segundo Carregamento do Silo 1 – Novas Rachaduras	12
4.5 – Início do Descarregamento do Silo 1	18
4.6 – Véspera do Colapso do Silo 1	18
4.7 – Colapso do Silo 1	20
4.8 – Um Dia Após o Colapso do Silo 1	33
4.9 – Relatos dos Motoristas que Entregaram Concreto para o Silo 1	37
5 – MECANISMO DO COLAPSO DO SILO 1	39
5.1 – Resumo dos Fatos Antecessores	39
5.2 – Colapso Durante o Descarregamento do Silo 1 e com Nível da Carga na Rachadura Superior: Coincidência?	40
5.3 – Mecanismo Global do Colapso	41
6 – CAUSAS DAS RACHADURAS	48
6.1 – Observações Antes do Colapso	48
6.2 – Observações Após o Colapso	53
6.3 – Prescrições Normalizadas	58
6.4 – Pressão Aplicada pela Carga de Grãos de Milho	62
6.5 – Esforço Máximo nas Cordoalhas de Aço	63
6.6 – Tensão de Compressão Horizontal Máxima no Concreto	64
6.7 – Tensão de Compressão Vertical Máxima no Concreto	65
6.8 – Tensões Principais no Concreto	66
6.9 – Força Vertical sob Cordoalhas Aglutinadas sem Planicidade	68
6.10 – Mecanismo de Formação das Rachaduras	71
7- CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL APLICADO	78
8 – ANÁLISE DO PARECER DA CONSTRUTORA	80
9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
ANEXOS	91

## **1. MOTIVO DO PARECER**

O presente parecer técnico tem por objetivo o exame de documentação referente ao colapso de um silo graneleiro construído na cidade de \_\_\_\_\_, para a verificação da forma como o colapso ocorreu, prováveis causas, análise de dados construtivos, conseqüências e outros fatos pertinentes.

## **2. FONTES DE DADOS**

O presente parecer foi elaborado com a utilização de dados providos das seguintes fontes:

- 2.1** - Norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- 2.2** - Norma ABNT NBR 11162 - TB 374 - Silos Cilíndricos para Grãos Vegetais;
- 2.3** - Norma ABNT NBT 6120 - Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações;
- 2.4** - 153 tomadas fotográficas fornecidas pela contratante do parecer, sendo:
  - a)** 43 tomadas realizadas em \_\_\_\_\_ (antes do colapso) pelo engenheiro \_\_\_\_\_ (arquivos Silo 015.jpg a Silo 057.jpg);

### 3. DO SILO

O silo em estudo, daqui em diante denominado silo 1, foi construído pela empresa \_\_\_\_\_, com sede na rua \_\_\_\_\_, tendo como responsável o engenheiro civil \_\_\_\_\_, CREA \_\_\_\_\_, e como cotista \_\_\_\_\_. A mesma empresa construiu outro silo (silo 2), com altura de 45 metros e capacidade para 20 mil toneladas, próximo ao silo 1. A figura a seguir mostra os dois silos:



Figura 01: Silo 1 (à esquerda) na véspera do colapso e silo 2 (à direita).

As armaduras ativas eram constituídas por cordoalhas de aço, com pré-alongamento realizado após o endurecimento (cura) do concreto. Medições realizadas nas fotografias do silo 2 permitem, por analogia, estimar que as cordoalhas do silo 1 possuíam bitola (diâmetro) de aproximadamente 1,27 cm (1/2 polegada) e eram agrupadas quatro a quatro. Cada grupo era composto por quatro cordoalhas alinhadas verticalmente, com espaçamento entre cordoalhas de aproximadamente 5 cm. Portanto, cada grupo de cordoalhas tinha altura de  $3 \times 5 = 15$  cm. Entre os grupos de cordoalhas adjacentes, havia um espaço vertical de aproximadamente 10 cm, como é ilustrado a seguir:

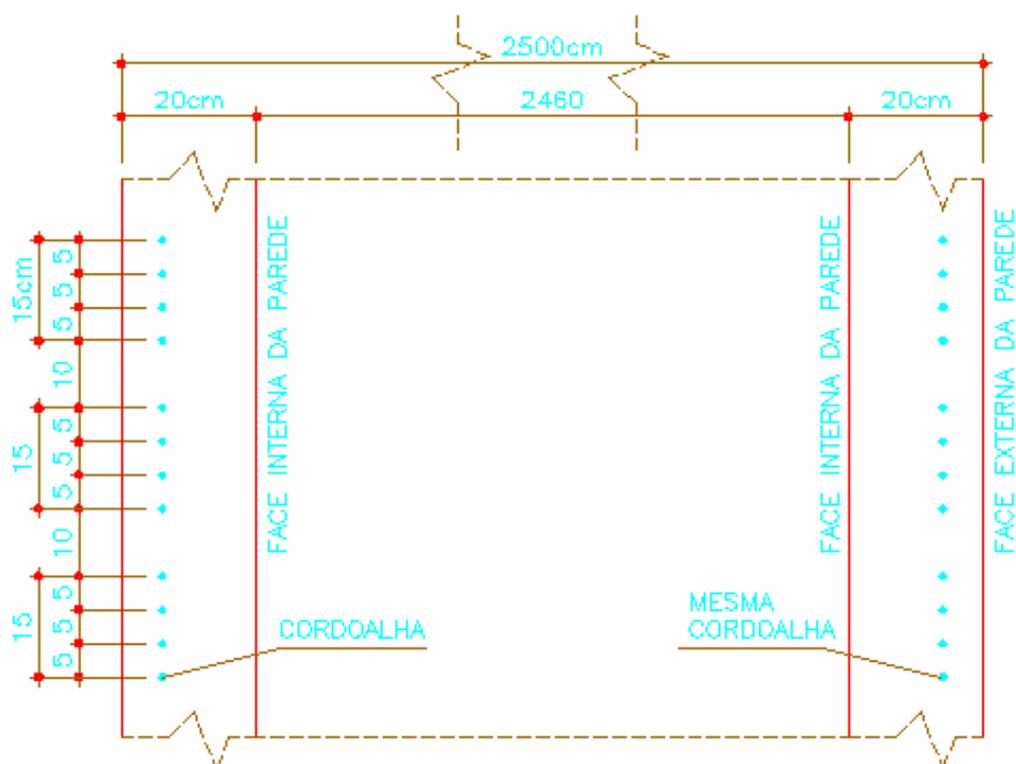


Figura 02: representação aproximada de uma seção vertical do silo 1, mostrando-se a disposição das cordoalhas em seção transversal.

Cada cordoalha deveria ser estendida ao longo e no interior da parede do silo 1, assumindo a formato de um anel contido em um plano horizontal. Portanto, os grupos de quatro cordoalhas deveriam ser grupos de quatro anéis horizontais, dispostos paralelamente, com distância de aproximadamente 5 cm entre anéis adjacentes.

As extremidades de cada cordoalha eram apoiadas em um pilar de ancoragem, em posição vertical. A configuração da ancoragem do silo 1 era semelhante à observada no silo 1, existente ao lado do silo 1 que sofreu colapso, mostrada na figura a seguir:

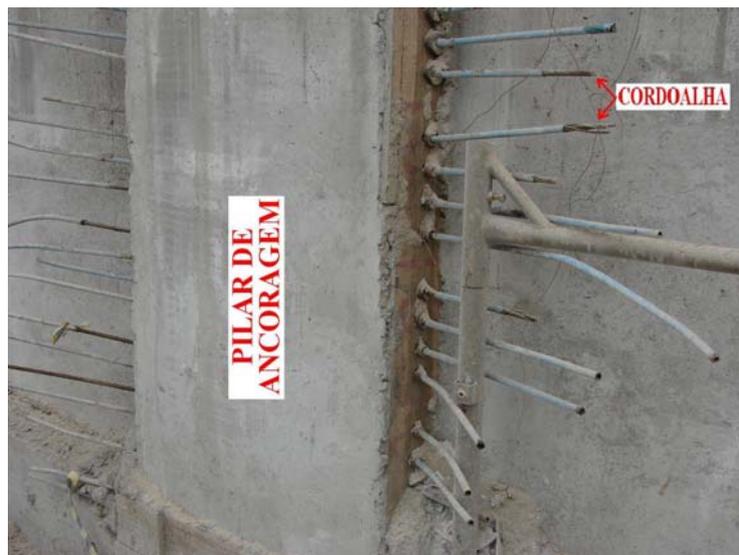


Figura 03: Pilar de ancoragem e cordoalhas do silo 2



Figura 04: Pilar de ancoragem e cordoalhas do silo 2

Portanto, a armadura ativa era ligada diretamente ao concreto apenas nas extremidades das cordoalhas. Durante o processo de protensão (após o endurecimento do concreto), uma extremidade de cada cordoalha é travada no pilar de ancoragem e a outra é tracionada com macaco hidráulico, antes de também ser travada na face oposta do mesmo pilar.

As paredes do silo 1 foram executadas com a utilização de formas deslizantes, transladadas verticalmente por macacos hidráulicos.

A fundação do silo 1 é constituída por estacas de concreto armado pré-fabricadas centrifugadas fornecidas e cravadas pela empresa

Durante a construção do silo 1, foram entregues 157 cargas de concreto usinado, transportadas por caminhões-betoneira conduzidos pelos motoristas \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ e \_\_\_\_\_.

## 4. SEQÜÊNCIA CRONOLÓGICA DOS FATOS

### 4.1 – Início da Concretagem

Em \_\_\_\_\_ ocorreu o início da concretagem do silo 1.

### 4.2 – Final da Concretagem

Em \_\_\_\_\_ ocorreu o final da concretagem do silo 1, mais de seis meses antes de seu primeiro teste de carregamento.

### 4.3 – Primeiro Carregamento do Silo 1 – Primeiras Rachaduras

Em \_\_\_\_\_ foi realizado o primeiro teste de carregamento do silo 1, com carregamento e descarregamento de aproximadamente 12 mil toneladas, correspondentes a 80% de sua capacidade, de acordo com um comunicado público da empresa \_\_\_\_\_, proprietária do silo 1, publicado por diversos meios de comunicação, como os citados no presente parecer nos itens 2.8 d) e 2.8 b) (a íntegra do comunicado está no anexo 1):

*“- Quando da entrega do primeiro silo, vistoriado pela construtora e liberado para uso de acordo com as normas internacionais de segurança, a \_\_\_\_\_ iniciou a fase de testes. Fez, então, uma carga de 12 mil toneladas de milho, que*

*foram armazenados e descarregados normalmente. Essa operação aconteceu em .”*

O comunicado da empresa não cita a ocorrência de rachaduras no silo 1 após o primeiro carregamento, mas há diversas evidências (vide figuras dos itens 4.6 e 4.8, adiante) de que tais rachaduras ocorreram e que houve uma tentativa de repará-las.

#### **4.4 – Segundo Carregamento do Silo 1 – Novas Rachaduras**

Na madrugada de , durante o segundo carregamento do silo 1, funcionários do constataram novas rachaduras. O fato foi comunicado à Defesa Civil e ao Corpo de Bombeiros, que delimitaram um perímetro de segurança em torno do silo 1, como noticiado no portal da - Rede de Comunicação na Internet (vide item **2.8 a** ). A matéria jornalística publicou uma imagem captada pelo fotógrafo , do jornal , mostrada a seguir:



Figura 05 – Tomada fotográfica de novas rachaduras, durante o segundo carregamento do silo 1.



Figura 09 – À esquerda, o silo 2, em construção. À direita, o silo 1, durante seu segundo carregamento, com duas novas rachaduras horizontais próximas à base (imagem da [imagem da](#) ). A rachadura mais alta dista cerca de 13,6 m do solo, de acordo com medições em escala realizadas sobre a imagem.



Figura 10 – Silo 1, durante seu segundo carregamento, com duas novas rachaduras horizontais próximas à base (imagem da [imagem da](#) ).

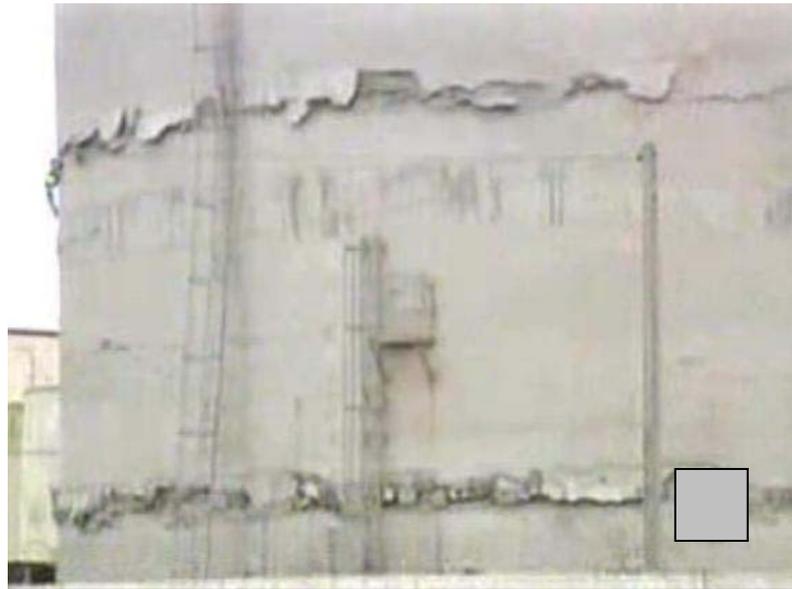


Figura 11 – Detalhe de duas novas rachaduras horizontais próximas à base do silo 1 (imagem da [imagem da](#) ).



Figura 12 – Detalhe da rachadura superior do silo 1, durante seu segundo carregamento (imagem da [imagem da](#) ).



Figura 23: Três segundos após, a região frontal (voltada para a rua) da porção superior do silo 1 (o da esquerda) desaba quase verticalmente e atinge o solo, onde se apóia. A porção superior passa a girar em torno do ponto de apoio no solo e se inclina em direção oposta à da câmara de vídeo. A porção superior se destaca da porção inferior em uma das novas rachaduras da região posterior, detectadas três dias antes. A porção inferior do silo 1, abaixo das rachaduras, permanece estável.



Figura 24: Dois segundos após, continua a rotação da porção superior do silo 1 (o da esquerda), em um movimento que quase tangencia o silo 2 (o da direita). Começa a se formar uma nuvem de pó de concreto na base do silo 1. Já é possível ver o interior do silo 1, através da abertura entre a porção superior e a porção inferior do mesmo, na região posterior.



Figura 25: Dois segundos após, o topo da porção superior do silo 1 (o da esquerda) também atinge o solo. A superfície da parede, antes cilíndrica, se abaula, de modo que o contorno visível passa a ter um aspecto elipsóidico. Pode-se ver o interior do silo 1, ainda contendo uma grande quantidade de milho (região amarela da imagem). Aumenta a nuvem de pó de concreto na base do silo 1.



Figura 26: Cinco segundos após, a parede da porção superior do silo 1 colide contra o solo (não é mais visível, devido à nuvem de pó) e passa a sofrer ruptura por esmagamento. A nuvem de pó de concreto se alastra, impedindo que se veja a porção inferior do silo 1. Após a colisão com o chão e a rua em frente, alguns destroços do silo 1 se deslocam sobre o solo e atingem a base de um andaime metálico alto que se apoiava no silo 2 (o da direita). O citado andaime (seta vermelha) ruiu em sentido oposto (seta curva azul).



Figura 27: Vista da rua, após o colapso. À esquerda, vê-se o silo 2 (em construção, sem cobertura). Em frente ao silo 2, são visíveis os destroços da cobertura do silo 1. À direita do silo 2, no centro da imagem, vê-se a porção inferior do silo 1. Em primeiro plano, uma das telhas da cobertura do silo 1.

O colapso do silo 1 foi filmado de outro ponto de vista, a partir da rua, por um cinegrafista amador, de nome \_\_\_\_\_, que disponibilizou o arquivo de vídeo no sítio da Internet Youtube, no endereço <http://www.youtube.com/watch?> \_\_\_\_\_, como citado no item 2.7 . Algumas imagens desse arquivo de vídeo, em que o silo 1 é visto de uma posição intermediária entre “de frente” e “de lado”, são mostradas a seguir:



Figura 28: À esquerda, o silo 2, em construção, sem cobertura e ainda apoiando um andaime metálico alto, o qual será derrubado segundos após, por destroços do silo 1. À direita, o silo 1, no instante em que se inicia o colapso: começa a cair pó (provavelmente de concreto moído) da rachadura horizontal e a porção do silo acima dessa rachadura se apresenta com uma pequena inclinação para a frente.



Figura 29: À esquerda, o silo 2. À direita, o silo 1: aumenta a quantidade de pó que cai da rachadura horizontal e a porção superior do silo apresenta uma inclinação em relação à porção inferior um pouco maior.



Figura 30: À esquerda, o silo 2. À direita, o silo 1: a região frontal da porção superior do silo 1 desaba quase verticalmente, por fora da porção inferior, até se apoiar no solo. A porção superior começa a girar em torno do ponto de apoio no solo e se inclina em direção à rua. A porção superior começa a se separar da porção inferior em uma das novas rachaduras da região posterior, detectadas três dias antes (vide figuras 22 e 23). A porção inferior do silo 1, abaixo das rachaduras, permanece estável. Uma nuvem de pó começa a se formar na cobertura do silo 1.



Figura 31: À esquerda, o silo 2. À direita, o silo 1: toda a porção superior continua sua rotação em torno do ponto de apoio no solo, aumenta a inclinação da porção superior em relação à porção inferior, e se expande a nuvem de pó que emana da cobertura.



Figura 32: À esquerda, o silo 2. À direita, o silo 1: toda a porção superior continua sua rotação em torno da região que se apóia e se esmaga no solo (ou nele penetra), aumenta a inclinação da porção superior em relação à porção inferior e se expande a nuvem de pó que emana da cobertura. Em primeiro plano, observa-se a barreira que estabelece a área de isolamento anteriormente delimitada pelo Corpo de Bombeiros.



Figura 33: À esquerda, o silo 2. À direita, o silo 1: continua a rotação da porção superior do silo 1 em torno de sua região frontal, que se apóia no solo; o movimento quase tangencia o silo 2 ; a parede do silo 1 deixa de ser cilíndrica (a seção transversal se deforma para um elipsóide – vide figuras 24 e 25) ; aumenta a nuvem de pó que emana da cobertura.



Figura 34: À esquerda, o silo 2. À direita, o silo 1: a cobertura se solta do topo do silo 1 e atinge o solo antes ; aumenta a nuvem de pó que emana da cobertura.



Figura 35: À esquerda, o silo 2. À direita, o silo 1: a cobertura colide com o solo e se deforma (vide figura 26); a nuvem de pó não permite ver o corpo do silo 1, cuja porção superior também colide e se rompe por esmagamento contra o solo.



Figura 36: A nuvem de pó não permite ver a cobertura e o corpo do silo 1.



Figura 37: Destroços do silo 1 são projetados em consequência de sua colisão contra o solo. A nuvem de pó quase impede a visão do silo 2.



Figura 38: Destroços do silo 1 são projetados em direção ao cinegrafista. A nuvem de pó praticamente impede a visão do silo 2.



Figura 39: Dissipada a nuvem de pó, vê-se à esquerda o silo 2 e à direita, a parte inferior remanescente do silo 1 e parte de seus destroços resultantes do colapso.

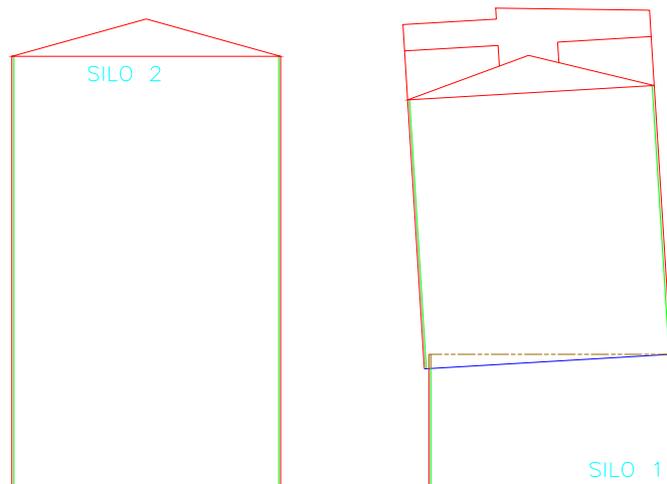


Figura 43: A porção superior do silo 1 teve um pequeno deslocamento horizontal no sentido para a rua, perdeu o apoio e iniciou a queda por fora da porção inferior.

Devido ao próprio peso, a porção superior continuou sua queda, com a região frontal descendo por fora da porção inferior do silo 1. Como consequência, aumentou a inclinação da porção superior, como esquematizado a seguir (as linhas tracejadas representam partes não visíveis devido à sobreposição):

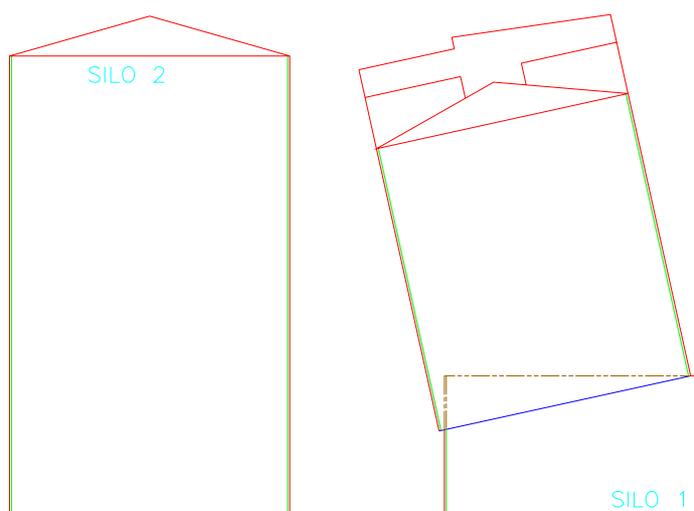


Figura 44: A região frontal (voltada para a rua) da porção superior do silo 1 continuou sua queda por fora da porção inferior, aumentando a inclinação.

Sob a ação do peso próprio, continuou a queda da região frontal da porção superior, por fora da porção inferior. Em consequência, aumentou a inclinação da porção superior. Na região posterior, abriu-se uma fenda entre as porções superior e inferior, através da qual a câmara do sistema de segurança registrou a imagem dos grãos de milho remanescentes (vide figura abaixo e figura 25).

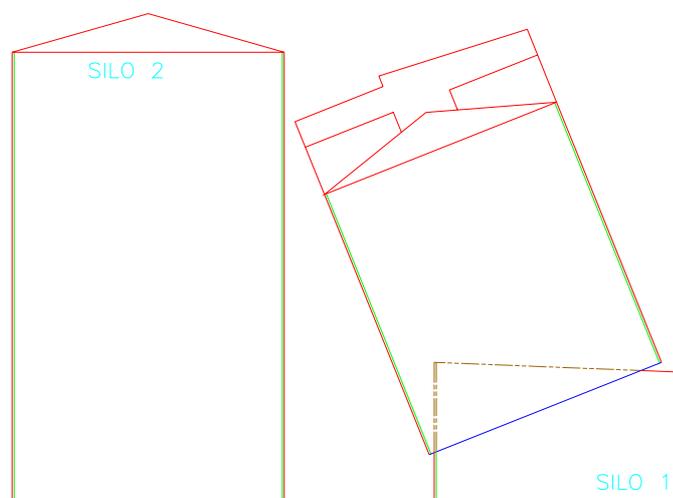


Figura 45: Continuou a queda da região frontal da porção superior, com aumento de sua inclinação. Na região posterior, abriu-se uma fenda entre as porções superior e inferior.

A queda da região frontal da porção superior terminou quando a mesma atingiu o solo. Devido à inércia (tendência de manutenção de estado de repouso ou de estado de movimento), a rotação da porção superior fê-la continuar girando até que seu centro de gravidade ultrapassou a direção vertical passante pelo ponto de apoio, como esquematizado nas duas figuras a seguir (o silo 2 não foi atingido):

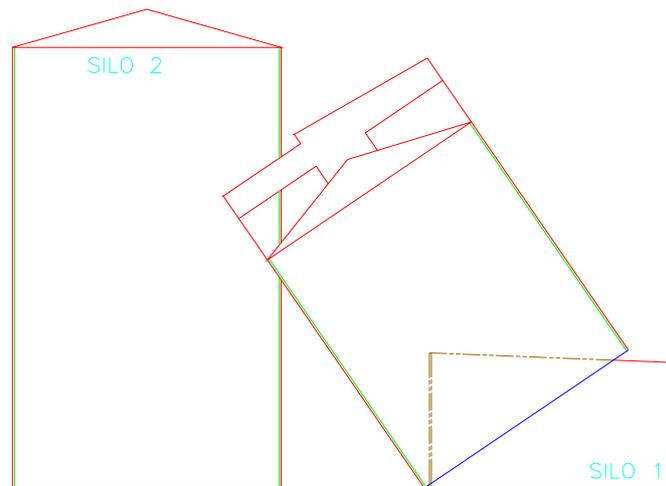


Figura 46: A região frontal da porção superior atingiu o solo. Devido à inércia, a rotação da porção superior continuou, agora em torno do ponto de apoio.

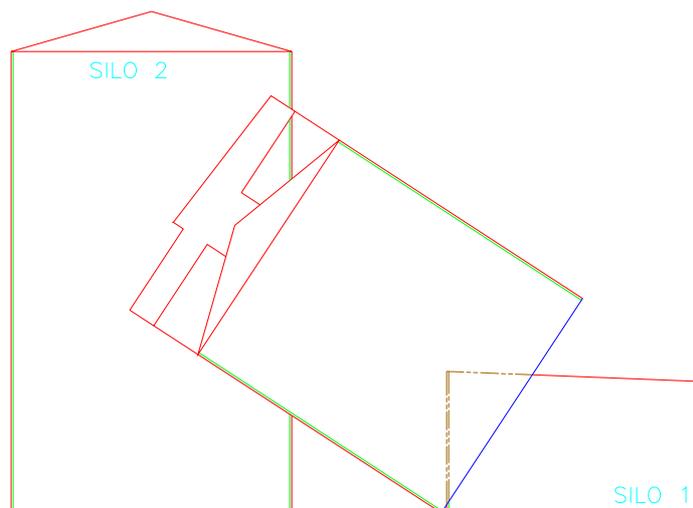


Figura 47: A porção superior do silo continuou a girar em torno do ponto de apoio no solo.

Com o aumento da inclinação, a cobertura do silo se desprendeu e atingiu antes o solo. O desprendimento da cobertura sugere que a mesma não estava suficientemente chumbada na parede do silo. O peso próprio deformou a parede da porção superior do silo, que deixou de ter seção transversal circular e passou a ter seção elipsóidica (vide figura a seguir).

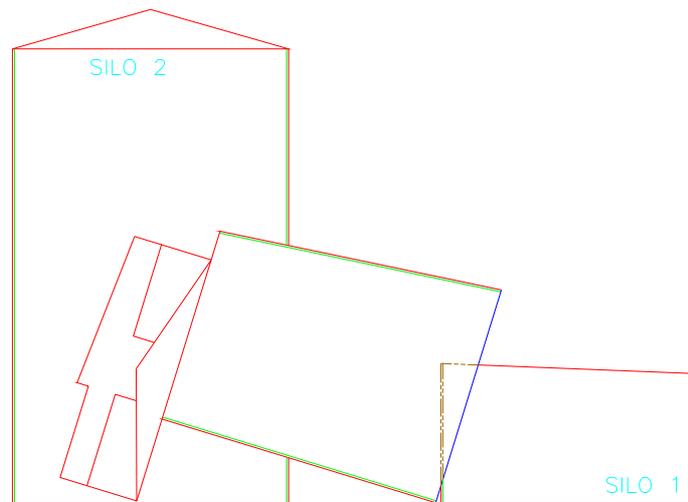


Figura 48: A cobertura se desprende e atinge antes o solo. A parede do silo se deforma.

Devido à colisão com o solo, a cobertura se deformou acentuadamente. A parede da porção superior do silo 1 também colidiu com o solo, produzindo ruptura generalizada. Parte dessa parede produziu danos na borda superior da porção inferior do silo 1, como esquematizado nas duas figuras a seguir.

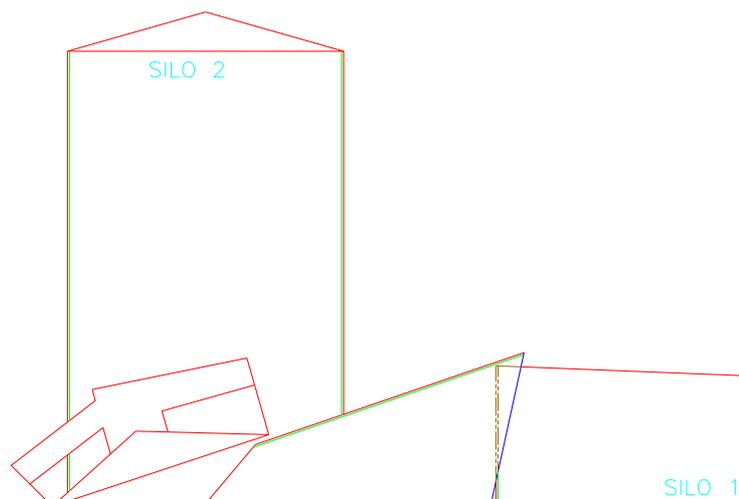


Figura 49: A porção superior atingiu o solo e se deformou devido à colisão.

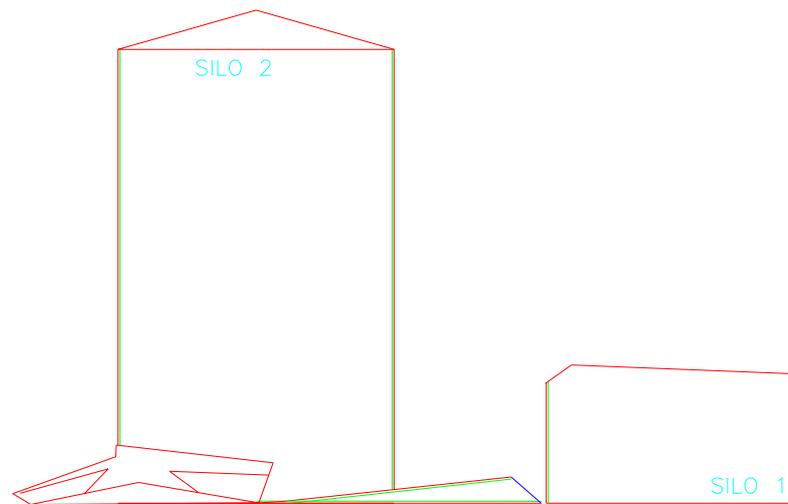


Figura 50: Os escombros da porção superior do silo 1 se espalharam pelo terreno e sobre a rua. A porção inferior sofreu avarias durante o movimento da porção superior.

O movimento de rotação e queda da porção superior do silo 1 quase tangenciou o silo 2. Os escombros do silo 1, ao se espalharem sobre o solo, atingiram e derrubaram um andaime metálico alto que se apoiava no silo 2, como pode ser visto na figura a seguir:



Figura 51: À esquerda, o silo 2 e seu pilar de ancoragem de cordoalhas de protensão. As setas azuis indicam os restos do andaime metálico alto que se apoiava no silo 2 e que foi atingido e derrubado pelos escombros do silo 1. As setas vermelhas indicam o que restou da parede da porção superior posterior do silo 1 (bordo no qual se apoiava a cobertura, que estava a 42 m de altura antes do colapso).

## 6 – CAUSAS DAS RACHADURAS

As causas do aparecimento de rachaduras foram determinadas levando em conta as evidências encontradas nas tomadas fotográficas e em cálculos descritos na seqüência.

### 6.1 – Observações Antes do Colapso

Nas tomadas fotográficas realizadas na véspera do colapso do silo 1, são visíveis rachaduras que permitem observar a disposição geométrica das cordoalhas de protensão:



Figura 52: À direita, o silo 2 em construção. À esquerda, o silo 1, apresentando novas e severas rachaduras na véspera do colapso. As elipses azul, verde e vermelha, indicam as posições dos detalhes 1, 2 e 3, respectivamente.

Nas quatro figuras a seguir, as elipses coloridas indicam trechos de rachaduras no silo 1, na véspera do colapso. Tais trechos serão detalhados oportunamente, com os nomes de Detalhe 1 (elipse azul), Detalhe 2 (elipse verde) e Detalhe 3 (elipse vermelha).



Figura 53: Vista parcial do silo 1, apresentando novas e severas rachaduras na véspera do colapso. As elipses azul, verde e vermelha, indicam as posições dos detalhes 1, 2 e 3, respectivamente.



Figura 54: Vista parcial do silo 1, apresentando novas e severas rachaduras na véspera do colapso. As elipses azul, verde e vermelha, indicam as posições dos detalhes 1, 2 e 3, respectivamente.

Com o colapso do silo, ficaram facilitadas algumas medições geométricas. Na figura a seguir, pode-se ver a medição da espessura de parte da parede (20 cm), após esta desabar sobre o solo.



Figura 65: Medição da espessura da parede do silo 1, um dia após o colapso. A seta vermelha indica o detalhe da medida (20 cm).

Na figura a seguir, pode-se ver a medição da bitola (diâmetro) de uma das cordoalhas de protensão, em um fragmento da parede do silo 1.



Figura 66: Medição da bitola de uma cordoalha de protensão da parede do silo 1, um dia após o colapso (12,5 mm).

### 6.3 – Prescrições Normalizadas

A seguir são citados alguns trechos da norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas, organismo normalizador brasileiro, ABNT NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (grifos e sublinhados nossos):

*“ 1 Objetivo*

*1.1 Esta Norma fixa os requisitos básicos exigíveis para projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, excluídas aquelas em que se empregam concreto leve, pesado ou outros especiais.*

...

*1.5 No caso de estruturas especiais, tais como de elementos pré-moldados, pontes e viadutos, obras hidráulicas, arcos, silos, chaminés, torres, estruturas off-shore, ou em que se utilizam técnicas construtivas não convencionais, tais como formas deslizantes, balanços sucessivos, lançamentos progressivos e concreto projetado, as condições desta Norma ainda*



**9.16 - O projeto estrutural fixava a utilização de concreto com resistência característica de 25,0 MPa. Os relatórios de ensaios de ruptura à compressão de corpos de prova moldados com concreto entregue na obra do silo 1, para amostras moldadas entre e , apresentaram resistências entre 25,5 MPa (mínima) e 33,1 MPa (máxima), para idades de 28 dias. O concreto entregue na obra do silo 1 sempre teve resistência superior à solicitada em projeto.**

São estas as declarações que tem este Perito a fazer em sua consciência, aqui lavradas em 90 (noventa) folhas de papel em formato A4, numeradas seqüencialmente (além de duas folhas finais com um currículo profissional resumido).

Curitiba, 29 de abril de 2008.

MOACYR MOLINARI