

XVII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS - IBAPE/SC - 2013

Título: Perícia em Acidente nas Obras do Metrô de São Paulo

Autor: Clémenceau Chiabi Saliba Junior

Empresa: Clémenceau Chiabi & Associados – clemenceau@chiabi.com

Resumo

No dia 22/06/2012, durante a execução dos serviços de parede diafragma nas obras da estação Eucaliptos da linha 5 – Lilás do Metrô, na Zona Sul de São Paulo, após o lançamento do último módulo das armaduras, já travadas, dando início ao processo de preparação para concretagem de lamela, ocorreu um acidente na lança de um dos guindastes treliçados sobre esteiras utilizados na obra, trazendo consigo duas vítimas fatais. Vistoria *in loco* elencou quatro prováveis causas do acidente que foram minuciosamente abordadas neste trabalho. Detectou que a ruptura dos cabos de aço foram consequência e não causa do acidente. Comprovou-se que a lança avariada possuía características que permitiram determinar que esta não apresentou qualquer falha de fabricação que pudesse comprometer seu desempenho. Comprovou-se a não ruptura das soldas por fadiga, mas por cisalhamento, demonstrando que houve, necessariamente, componente de força horizontal, capaz de promover a ruptura dos elementos estruturais da lança treliçada. Concluiu-se pela existência de negligência e imprudência do operador ao promover giro do equipamento com o cabo de aço travado, aplicando uma carga inclinada, cuja componente horizontal dessa carga não era recomendável em qualquer manual de operação de guindastes.

Palavras-chave: **Perícia, Lança, Guindaste, Acidente, Metrô-SP**

XVII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS - IBAPE/SC - 2013

I – OBJETIVO E ESCLARECIMENTO

Objetiva o presente trabalho pericial a verificação das causas do acidente na lança do Guindaste sobre esteiras Baldwin LIMA Hamilton, durante a execução de obras da estação Eucaliptos da linha 5 – Lilás do Metrô de SP.

O laudo técnico pericial que deu origem a este trabalho foi elaborado com observância estrita aos princípios e diretrizes do Código de Ética Profissional do CONFEA - CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA e da norma técnica ABNT NBR 13.752:96 *Perícias de Engenharia na Construção Civil*.

II – INTRODUÇÃO

A cidade de São Paulo conta com metrô desde 14 de setembro de 1974. Atualmente, esse sistema de transporte público possui uma extensão de 74,3 quilômetros de linhas ferroviárias distribuídas em cinco linhas, ligadas por 64 estações (58 operadas pelo Metrô e 6 pela ViaQuatro). Compõem o sistema as linhas 1-Azul (Jabaquara - Tucuruvi), 2-Verde (Vila Prudente - Vila Madalena), 3-Vermelha (Corinthians-Itaquera - Palmeiras-Barra Funda), 4-Amarela (Luz-Butantã) e 5-Lilás (Capão Redondo - Largo Treze). Possui interligação com o sistema de trens urbanos, através de integração com linhas da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) nas estações Brás, Palmeiras-Barra Funda, Luz, Santo Amaro, Tamanduateí e Pinheiros, e em outros terminais de transporte intermodal na cidade de São Paulo. Diariamente o Metrô transporta 3,4 milhões de passageiros.

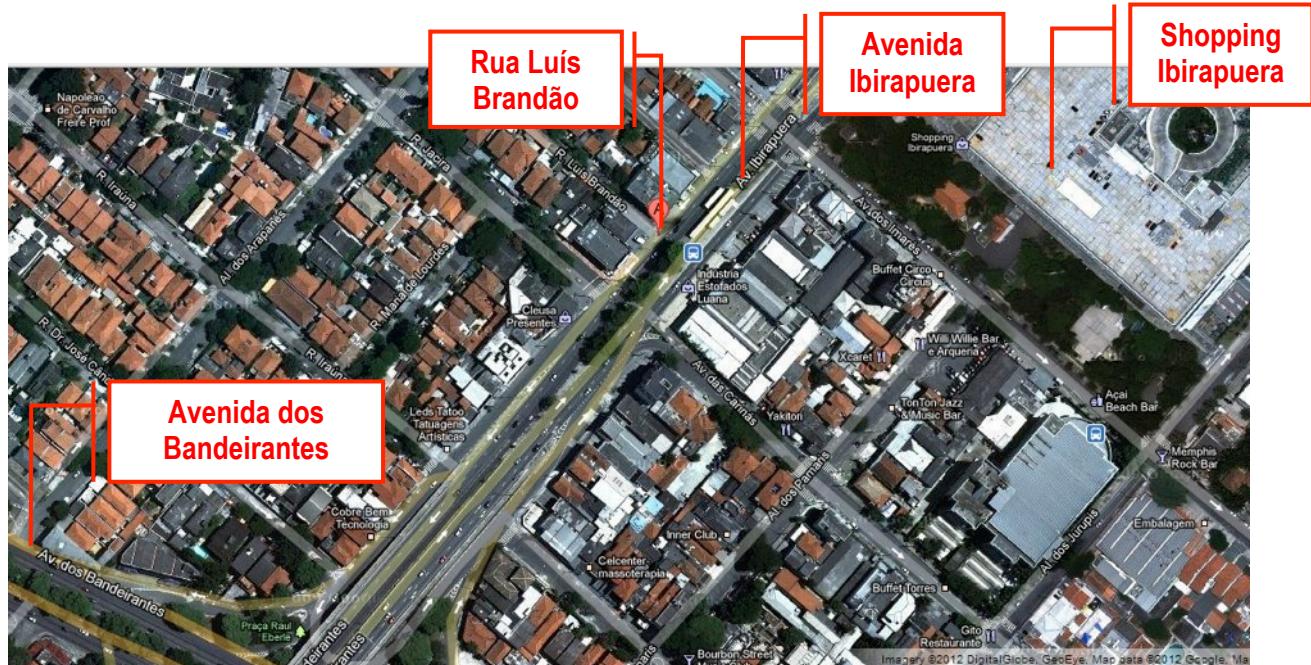
No dia 22/06/2012, durante a execução dos serviços de parede diafragma nas obras da estação Eucaliptos da linha 5 – Lilás do Metrô, de responsabilidade Consórcio [REDACTED], na Zona Sul de São Paulo, após o lançamento do último módulo das armaduras, já travadas, dando início ao processo de preparação para concretagem de lamela, ocorreu um acidente na lança de um dos guindastes treliçados sobre esteiras utilizados na obra, trazendo consigo duas vítimas fatais. Imediatamente após o ocorrido, o signatário desses trabalhos foi contatado pelo Engenheiro [REDACTED] (Diretor de Contrato) objetivando verificação das causas do acidente, razão pela qual foram encomendados os serviços periciais.

III - VISTORIAS

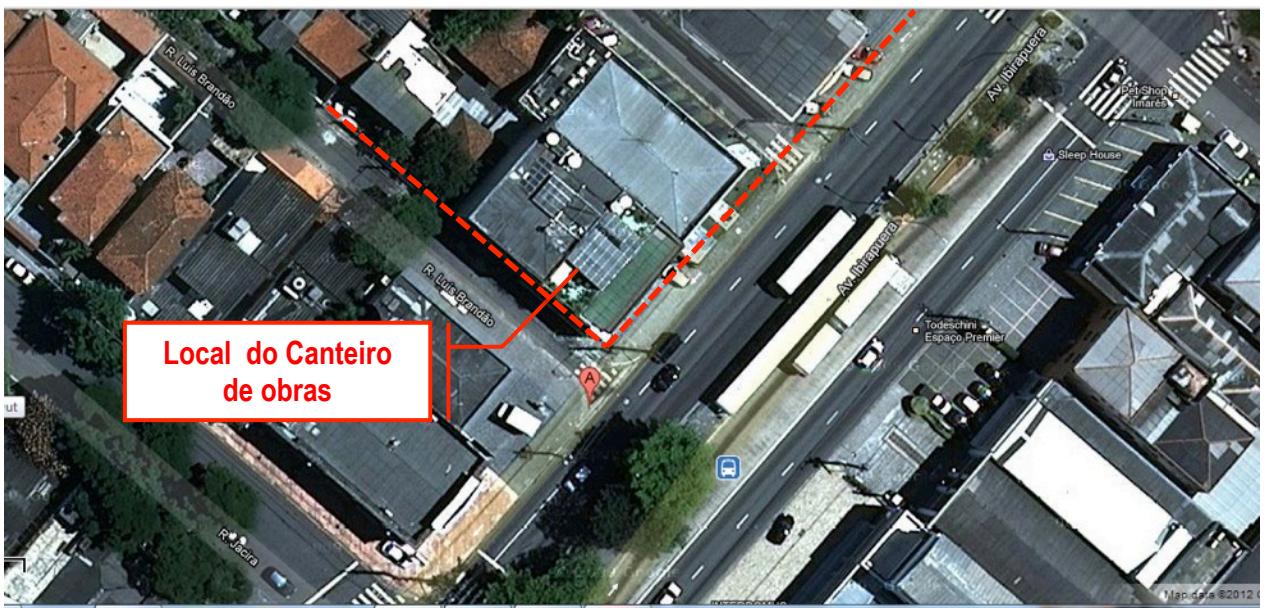
Realizadas nos dias [REDACTED], [REDACTED] e [REDACTED], na presença das partes interessadas, Sr. [REDACTED], representando a empresa requerente e Sr. [REDACTED] representando o Metrô-SP, as vistorias objetivaram conhecer o local onde ocorreram os sinistros, verificação visual das peças danificadas, tomadas de medições e distâncias, marcação e recolhimento de peças e amostras a serem ensaiadas e tomada de fotografias.

IV – LOCALIZAÇÃO

A obra de construção da futura Estação Eucaliptos da linha 5-lilás está localizada na Rua Luiz Brandão esquina com Avenida Ibirapuera, Bairro Moema, na Zona Sul de São Paulo.



Img. 1 – Mapa de macrolocalização (Fonte: Google Maps)



Img. 2 – Mapa acima ampliado, em foto antiga, já mostra o local onde hoje estão sendo executadas as obras da estação Eucaliptos da linha 5 – Lilás do Metrô SP (Fonte: Google Maps)

**V – METODOLOGIA CONSTRUTIVA DAS PAREDES DIAFRAGMA
CONFORME ET 5.00.00.00/3H1-001**

A obra acidentada consistia no desenvolvimento de metodologia de execução e projetos de engenharia para construção da Estação Eucaliptos onde irá passar a linha 5-lilás do metrô de São Paulo. Essa estação estava sendo construída através da execução de Paredes Diafragma, cujo procedimento executivo será detalhado nos subitens a seguir.

A – SERVIÇOS PRELIMINARES

Previamente ao início dos serviços de parede diafragma foi feita a limpeza do terreno, com a eventual remoção de fundações, pisos, e demais estruturas originalmente existentes na área.

Em seguida, fez-se a instalação da central de lama e dos tanques para as operações de escavação e concretagem das lamelas.

B – LOCAÇÃO TOPOGRÁFICA

A locação topográfica foi feita pela equipe topográfica do Consórcio e conferida pela equipe topográfica da Fiscalização do Metrô, dentro das Especificações da ET-5.00.00.00/3C2-001.

C – PREPARO E ESCAVAÇÃO DA ÁREA DAS PAREDES

As áreas previamente desapropriadas para a execução das Estações foram escavadas até as cotas de arrasamento definidas em projeto.

Foi previsto como equipamento de escavação, escavadeiras tipo Komatsu PC200 ou equivalentes, que atendam à demanda de produção. O transporte do material escavado até um dos locais selecionados como destino de bota-fora foi feito por caminhões tipo basculante, entre 12 e 15 m³ de capacidade. Previamente à saída dos caminhões, foram tomados os cuidados relativos à sinalização e manutenção da rua, evitando sempre a queda de material terroso ou outro sobre o leito carroçável na região lindeira às obras. Os caminhões foram lonados.

D – PAREDE GUIA

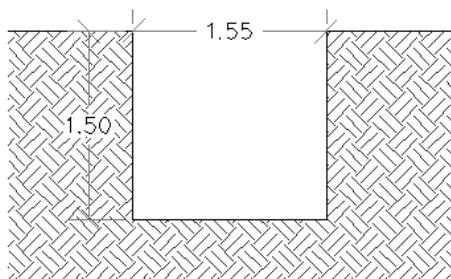
Para garantir a estabilidade do trecho superior da escavação e ainda servir como guia para o equipamento de escavação (*clamshell*), fez-se uso de paredes, usualmente em concreto, ao longo de todo o perímetro de execução da parede diafragma.

A distância entre as paredes paralelas é igual à da largura do equipamento de escavação (*clam shell*) acrescida de 5 cm, para garantir a folga para a descida do equipamento.

As paredes guia foram executadas nas dimensões previstas em projeto e tiveram as seguintes atividades principais: escavação da vala, colocação da forma e armação e concretagem.

a) Escavação da vala

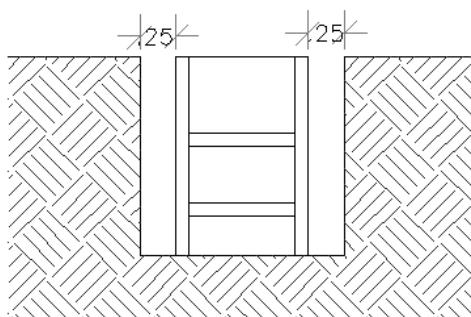
A vala para a implantação da parede guia, foi feita com as seguintes dimensões: 1,50 m de profundidade x 1,55 m de largura x a extensão da parede diafragma. Foi executada mediante o emprego de retro-escavadeira ou escavadeira hidráulica. O transporte do material escavado até um dos locais selecionados como destino de bota-fora foi feito por caminhões tipo basculante, entre 12 e 15 m³ de capacidade. Previamente à saída dos caminhões foram tomados os cuidados relativos à manutenção da rua, evitando sempre a queda de material terroso ou outro sobre o leito carroçável na região lindeira às obras.



Img. 3 – Escavação da vala

b) Forma de madeira

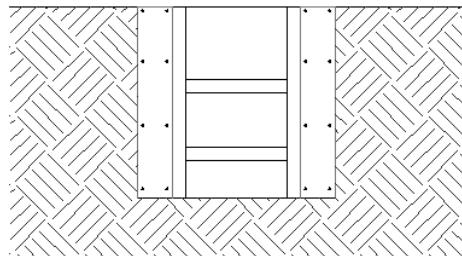
As faces internas da parede foram definidas mediante emprego de formas de madeira compensada, em lances de 20 m, devidamente escoradas no interior da vala para evitar seu fechamento durante a concretagem.



Img. 4 – Colocação da forma

c) Aço

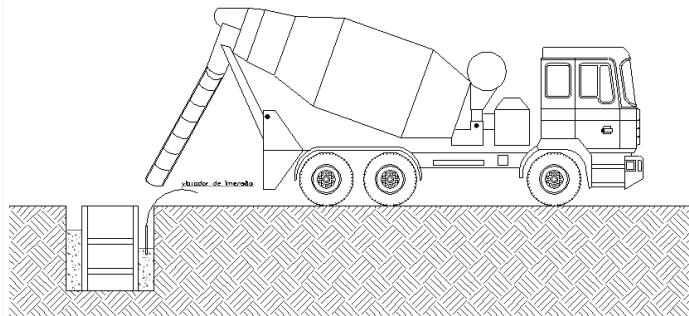
A armação das paredes guia foi feita usando-se barras de aço previamente cortadas e dobradas, as quais foram assentes às formas manualmente, ou com equipamento de apoio.



Img. 5 – Colocação da armadura

d) Concretagem

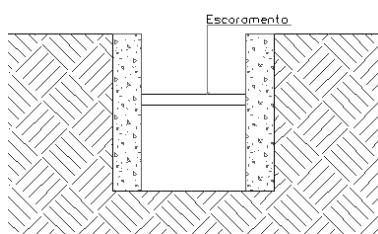
As formas foram limpas e impermeabilizadas antes do lançamento do concreto. Este veio dosado das centrais previamente aprovadas, atendendo às características de projeto, sendo lançado diretamente nas formas. A vibração do concreto seguiu os procedimentos padrão para esse tipo de tarefa.



Img. 6 – Concretagem

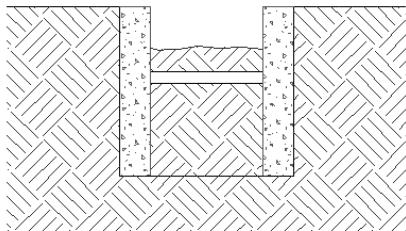
e) Cura do concreto

A cura das paredes guia se deu em período de 5 dias subsequentes à concretagem, seguida da desforma.



Img. 7 – Cura e desforma

Após a retirada das formas, procedeu-se ao escoramento e reaterro da vala, até o nível de arrasamento da parede.



Img. 8 – Escoramento e reaterro

E – PAREDE DIAFRAGMA

O processo executivo das paredes Diafragma é composto das seguintes atividades principais: preparo do fluido estabilizante, escavação com *clamshell*, desarenação, colocação da armadura e descida do tubo *tremie* e concretagem com bombeamento da bentonita para os tanques.

a) Preparo do fluido estabilizante (bentonita)

O processo de escavação de lamelas emprega lama bentonítica ou outro material com propriedades tixotrópicas, que garanta a estabilidade da escavação durante cada uma das etapas de execução dos painéis. A tixotropia é a propriedade que permite que o material, quando em repouso, adquira consistência rija e, quando agitado, volte a seu estado líquido.

A bentonita, que é uma argila da família das montmorilonitas, foi preparada previamente ao início da escavação das lamelas, e para tal, foi empregada uma central de lama dotada de laboratório para o controle dos materiais. A mistura e bentonita com água pura foi feita empregando misturadores de alta turbulência, em uma concentração de entre 30 kg/m³ e 70 kg/m³ de bentonita na água, dependendo da viscosidade e densidade pretendidas.

Após sua hidratação, ocorreu um acentuado aumento de volume (inchamento), surgindo a necessidade de um período de maturação de pelo menos 12 horas dessa lama, antes de sua aplicação.

Para melhor controle da qualidade, a lama foi ensaiada durante o preparo da suspensão, antes da escavação da lamela e de sua concretagem e após cada reaproveitamento. Foram obedecidos os seguintes parâmetros:

- Densidade entre 1,025 e 1,100 g/cm³, medida com a balança densimétrica

O densímetro é preenchido com fluido estabilizante até a superfície do copo com a tampa fechada, garantindo o preenchimento completo. Após sua colocação no suporte, regula-se o contrapeso, até a obtenção do equilíbrio da balança. Efetuase a leitura do valor indicado.

- Viscosidade entre 30 e 90 s, controlada com emprego do funil de Marsh

XVII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS - IBAPE/SC - 2013

Abastece-se o funil de Marsh com o fluido estabilizante até a tela, fechando-se o furo inferior e retendo o volume no funil. Inicia-se a cronometragem, simultaneamente à abertura do furo inferior, permitindo que o fluido escoe para o copo graduado. A leitura é encerrada quando 946 ml de lama tiverem preenchido o copo graduado

- pH entre 7 e 11, medido com o papel de Tornassol

Tiras de papel de Tornasol são imersas na amostra do fluido para a obtenção do valor do pH pela simples comparação entre a cor do papel e a escala de cores que acompanha a embalagem, indicadora do valor de pH da amostra.

- teor de areia entre 0 e 3 %, aferido mediante proveta tipo “Baroid Sand Content”

Preenche-se o frasco graduado com fluido até a marca inferior, completa-se com água até a marca superior e despeja-se sobre a peneira 200 todo o conteúdo. O material retido é então recuperado mediante lavagem da peneira, invertida sobre o pequeno funil e o frasco graduado. Mede-se o valor do material depositado no fundo do frasco após sua completa decantação.

Caso algum dos parâmetros não tenha sido atendido, procedeu-se à correção da lama para garantia de sua eficiência.

- b) Emprego de polímero em substituição à lama bentonítica

Estudamos a possibilidade de utilização de polímero como fluido estabilizante das paredes das lamelas.

- c) Equipamento de escavação (clamshell)

O *clamshell* é uma ferramenta de corte de formato retangular capaz de escavar os painéis (ou lamelas) nas dimensões de projeto. Trabalha livremente suspenso e tem o fechamento e suas mandíbulas (conchas) por acionamento mecânico através de cabos de aço e guinchos. O equipamento é montado em guindaste de esteiras com lança treliçada.

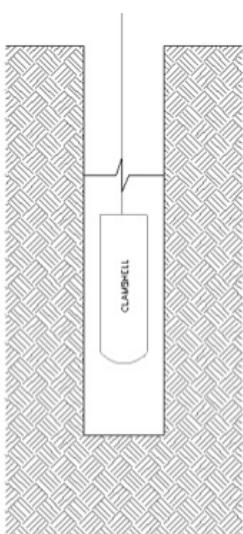
- d) Escavação

Concluídas a parede guia e a “cura” da bentonita, iniciou-se a escavação da lamela propriamente dita. Posicionou-se o *clamshell* sobre a parede guia no alinhamento da lamela a ser escavada e efetuou-se a primeira “mordida” no solo. A cada avanço da ferramenta no terreno, completou-se a vala com a bentonita, cuja função é manter a vala da escavação estável. Os primeiros avanços se deram pelo peso próprio da ferramenta. À medida que a escavação foi se aprofundando, fez-se necessária a operação com os cabos para que a concha pudesse se abrir e fechar, cortando, assim, o material.

À medida do avanço da escavação, foi conferida a verticalidade da mesma, através de dispositivo acoplado à lança do equipamento. Em caso de desaprumo maior que o tolerável, foi feita uma tentativa de reescavar os primeiros metros para correção. Quando não foi possível, o furo foi preenchido com argamassa ou outro material de preenchimento e reescavado. A profundidade foi conferida através de sonda, que se trata de um peso içado por cabo de aço graduado.

Um cuidado adicional que é tomado em trabalhos dessa natureza é a observação da eventual 'fuga' do fluido estabilizante, o que poderia indicar alguma anomalia subterrânea.

No caso de solo com grande resistência à escavação, pode ser feito uso de trépano (quando autorizado), fazendo-se a perfuração até atravessar a camada mais dura ou até atingir-se a cota de fundo da escavação.



Img. 9 – Escavação da lamela

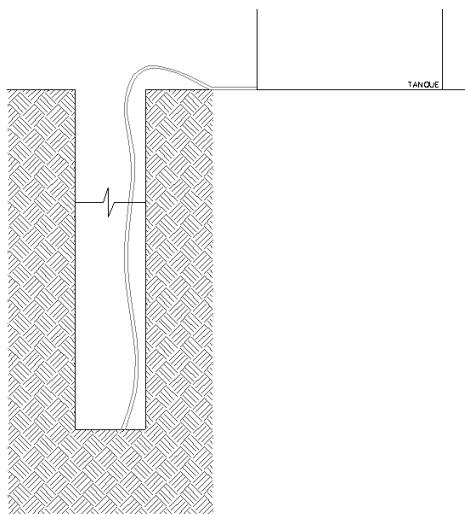
Após completa a concha, içá-se a mesma para descarga do material escavado e tem início novo ciclo, até atingir-se a cota de arrasamento prevista.

Novamente ensaia-se a lama para aferição de suas propriedades e eventualmente é feita a correção da mesma, através de desarenação ou sua substituição.

e) Desarenação

Durante a escavação, pode ocorrer de a lama bentonítica sofrer alterações em sua constituição, muitas vezes devidas à presença de areia e/ou finos em suspensão. Para corrigir essa anomalia, fez-se uso de hidrociclones para recircular a lama e promover sua "limpeza". Após a desarenação, conferiu-se novamente a profundidade total da escavação, sendo reescavado o trecho eventualmente "assoreado".

No caso de emprego de polímero em substituição à bentonita, não é necessária a etapa de desarenação.



Img. 10 – Desarenação

f) Colocação da chapa junta

Para garantir a geometria e devida estanqueidade entre lamelas contíguas, fez-se uso de chapas metálicas em formato trapezoidal. Estas chapas foram retiradas após o início do processo de pega do concreto.

g) Montagem da armadura

Toda a armadura das paredes guia e paredes diafragma foram executadas em uma central de armação industrializada. Os tamanhos de cada segmento obedeceram às dimensões comerciais, limitadas pelo comprimento das carretas de transporte.

Pré armação: Iniciou-se o processo de montagem de cada segmento de lamela, a partir do projeto executivo, formando-se uma linha de pontaletes de madeira apoiados sobre o piso nivelado, espaçados a cada 1,5 a 2,0 m, para suporte das barras longitudinais. Sob as barras longitudinais, instalaram-se os estribos espaçados de aproximadamente 1,5 m e montaram-se as barras longitudinais das extremidades, formando um gabarito para os demais estribos.



Img. 11 – Pré-armação

As barras longitudinais e os estribos foram montados e amarrados, completando toda a malha prevista em projeto. Montou-se a 1^a camada de barras longitudinais, seguida pela montagem da 2^a camada, devidamente espaçada.

Esse procedimento foi feito paralelamente para a armadura do lado da escavação e do lado do terreno, sendo depois unidas as duas partes. Completou-se o processo finalizando-se a colocação das barras, estribos, galgas, espaçadores, enrijecedores, alças de içamento, etc.



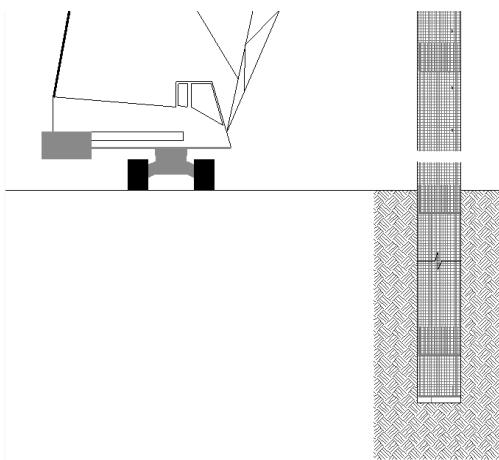
Img. 12 – Término da armação

h) Transporte da armadura

Cada segmento, após concluir, foi transportado até o local de aplicação para as devidas emendas locais.

i) Colocação da armadura

Concluída a etapa de escavação, foi feita a conferência da armação pronta com o projeto, incluindo seus elementos de içamento. Estando conforme, a armação foi erguida mediante emprego de um ou mais guindastes.



Img. 13 – Emenda da armação

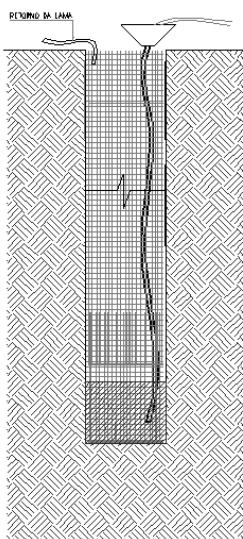
Quando houve necessidade de fazer emendas na armadura, a mesma foi mantida apoiada sobre a vala em cavaletes especialmente fabricados. Os cuidados referentes à rigidez da peça são primordiais para a segurança da operação, sendo feito um plano de *rigging* (içamento) para cada tipo de elemento.

O cobrimento da armadura foi garantido mediante o emprego de espaçadores plásticos, em concreto ou metálicos.

j) Concretagem

A concretagem das paredes diafragma foi submersa, ascendente e contínua, para garantir sua uniformidade. Através de um ou mais tubos metálicos cilíndricos (tubo *tremie*) instalados no centro ou de maneira simétrica, no caso de haver mais de um, e mediante emprego de tremonha de alimentação no nível de trabalho, procedeu-se ao lançamento do concreto.

Posicionou-se o tubo a 20 ou 30 cm do fundo da vala para o início da concretagem e o mesmo foi mantido embutido no concreto no mínimo 1,50 m e no máximo 7,0 m. À medida da evolução da concretagem, e de preferência no intervalo entre dois caminhões, sacou-se um lance do tubo *tremie*. Para evitar o refluxo de lama no interior do *tremie*, empregou-se um êmbolo ou válvula retentora.



Img. 14 – Concretagem

A perfeita concretagem foi garantida mantendo-se constante o ritmo do lançamento. Importante característica do concreto é seu *slump*, o qual deve variar entre 16 e 21 cm.

A exemplo da escavação, a profundidade da camada de concretagem foi aferida mediante o emprego da sonda. Os valores obtidos foram comparados aos dos volumes de cada caminhão, para efeito de análise do possível comportamento no interior da vala, especialmente no que se refere a possíveis deslocamentos havidos. O diagrama de consumo de concreto ajuda na interpretação de possíveis anomalias.

**XVII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE
AVALIAÇÕES E PERÍCIAS - IBAPE/SC - 2013**

k) Retirada da chapa junta

Tão logo foi finalizada a etapa de concretagem, e antes da pega do concreto, mediante pequenos movimentos consecutivos de subida e queda, iniciou-se a operação de retirada da chapa junta, para limpeza e posterior aproveitamento.

l) Sequencia Executiva

A sequencia de execução das lamelas na Estação Eucaliptos está indicada na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Sequência executiva das Lamelas

Equipe 1	Equipe 2
Lamela P14	Lamela P30
Lamela P47	Lamela S31
Lamela S14	Lamela S29
Lamela S47	Lamela S30
Lamela P13	Lamela P29
Lamela S46	Lamela P31
Lamela P15	Lamela S28
Lamela P48	Lamela P32
Lamela S12	Lamela S43
Lamela P46	Lamela S17
Lamela S15	Lamela P43
Lamela S48	Lamela P18
Lamela S45	Lamela S42
Lamela P12	Lamela S18
Lamela P16	Lamela P42
Lamela P49	Lamela P19
Lamela P45	Lamela S41
Lamela S11	Lamela S19
Lamela S16	Lamela P41
Lamela S49	Lamela P20
Lamela S44	Lamela S40
Lamela P11	Lamela S20
Lamela P17	Lamela P40
Lamela P50	Lamela P21
Lamela P44	Lamela S39
Lamela S10	Lamela S21
Lamela S50	Lamela P39
Lamela P10	Lamela P22
Lamela S09	Lamela S38
Lamela P51	Lamela S22
Lamela P09	Lamela P38
Lamela S51	Lamela P23

**XVII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE
AVALIAÇÕES E PERÍCIAS - IBAPE/SC - 2013**

Lamela S08	Lamela S37
Lamela F1	Lamela S23
Lamela P08	Lamela P37
Lamela P52	Lamela P24
Lamela F2	Lamela S36
Lamela S52	Lamela S24
Lamela S07	Lamela P36
Lamela P53	Lamela P25
Lamela P07	Lamela S35
Lamela S53	Lamela S25
Lamela S02	Lamela S63
Lamela P58	Lamela P61
Lamela P02	Lamela P65
Lamela S58	Lamela P60
Lamela S01	
Lamela P59	
Lamela P01	
Lamela S59	

m) Equipamentos Selecionados para a Estação Eucaliptos

Tabela 2 – Equipamentos selecionados

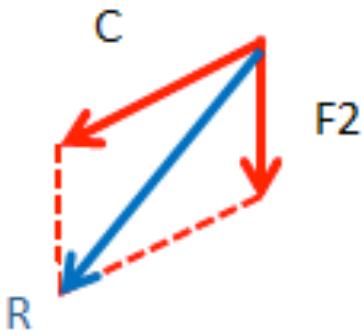
Tipo	Marca	Modelo	Ano de Fabricação	Capacidade (kg)
Perfuratriz hidráulica	MAIT	HR 260 CP	2011	---
Guindaste de esteiras	BUCYRUS Erie	71 B	1964	54.432
Guindaste de esteiras	BUCYRUS Erie	71 B	1982	54.432
Guindaste de esteiras	Baldwin LIMA Hamilton	703	1961	45.360

VI – CONHECENDO A OPERAÇÃO DE UM GUINDASTE TRELIÇADO

A – ESTRUTURA TRELIÇADA E OS ESFORÇOS ATUANTES

Denomina-se treliça o conjunto de elementos de construção (barras redondas, chatas, cantoneiras, seção I, U, C, H), interligados entre si nas juntas ou nós, sob forma geométrica triangular, através de pinos, soldas, rebites, parafusos, que visam formar uma estrutura rígida, com a finalidade de resistir aos esforços normais, ou seja, os membros individuais de uma treliça estão sujeitos somente a forças de tração e compressão e não a forças de flexão. Cada treliça é projetada para suportar as cargas que atuam em seu plano e, assim, pode ser tratada como uma estrutura bidimensional com todos os elementos do conjunto pertencendo a um único plano e todas as cargas devem ser aplicadas às várias juntas (nós) e não às barras em si.

O sistema treliçado é muito utilizado em lanças de guindastes, por permitir uma estrutura de baixo peso próprio, muito leve quando comparada às cargas possíveis de serem içadas, para possibilitar a esse equipamento elevar toneladas de carga através da decomposição das forças, função primordial das treliças. A decomposição das cargas e o exemplo de guindaste com lança treliçada estão mostradas nas figuras a seguir.



Img. 15 – Decomposição de forças
Gerando uma força resultante R



Img. 16 – Guindaste com
lança treliçada

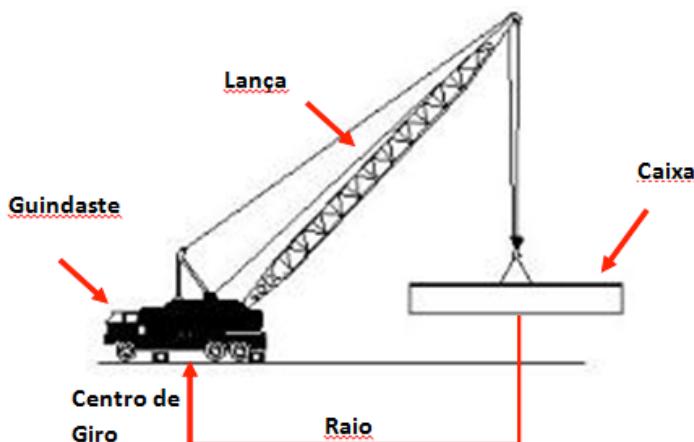
B – OPERAÇÃO DE UM GUINDASTE

Os guindastes móveis, tal qual o sinistrado, são equipamentos para movimentação vertical de cargas, podendo também posicioná-las no plano horizontal ao redor de si, além de transladá-las conforme o tipo específico de guindaste (sobre caminhões, locomotivas, esteiras, embarcados, ou sobre pneus para uso em terrenos acidentados, etc.).

Um ponto comum a todo guindaste móvel é o fato destes apresentarem um braço denominado “lança”, que é pivotado (ou seja, é fixado por pinos que permitem a rotação em torno destes) à base giratória da máquina chamada de

“superestrutura”, na qual encontramos os elementos mecânicos que compõe os sistemas de movimento para rotação e subida e descida da carga, compostos de guinchos de cabo de aço, freios e unidade de potência para o sistema (geralmente um motor de combustão interna de ciclo diesel).

A rotação desta “superestrutura” em torno do seu eixo vertical permite que o equipamento posicione as cargas no plano horizontal ao redor do guindaste ao longo de 360°, enquanto que a subida ou descida da carga é obtida seja a partir do movimento de basculamento da lança (rotação em torno do ponto de pivotamento), ou pela subida ou descida do gancho de carga, este controlado por um sistema de guincho de cabos de aço que utiliza a lança como guia para posicionamento. Quando utilizamos o basculamento da lança (mudança de sua inclinação em relação ao eixo vertical), além de subirmos ou descermos a carga, simultaneamente alteramos o raio de operação do guindaste (seu alcance horizontal). Para transladar o guindaste, cada tipo de equipamento dispõe de acionamento próprio que é independente dos movimentos da lança, do guincho de carga e do giro da superestrutura.



Img. 17 – Componentes de um guindaste

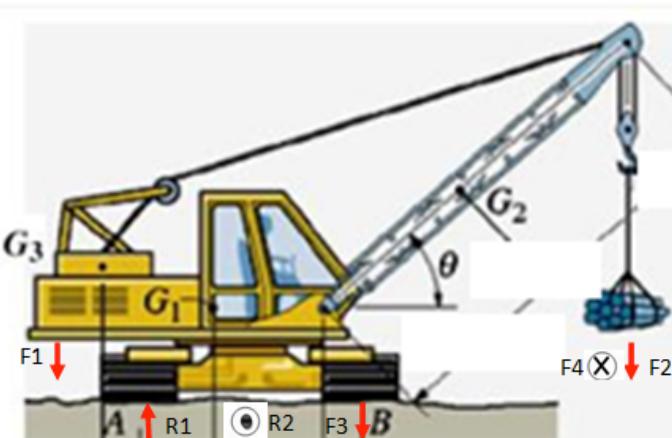
No tocante à capacidade de carga de um guindaste móvel, esta é governada tanto pelo equilíbrio estático (resistência ao tombamento) quanto pela resistência estrutural (capacidade de carga máxima das estruturas que compõe o guindaste, notadamente a lança), além da capacidade de tração do guincho de carga. Quanto mais horizontal a lança estiver, maior o alcance (ou raio de operação, que é a distância entre o eixo vertical de giro e a projeção da carga) e menor a capacidade de carga, que neste caso é governada pelo equilíbrio estático; ao contrário, quanto mais vertical estiver a lança, menor o alcance e maior a capacidade de içamento, então governada pela resistência estrutural. A capacidade de tração do guincho de carga geralmente é maior do que o necessário, não limitando o guindaste como os outros dois aspectos (equilíbrio estático e resistência estrutural).

Durante a operação dos guindastes, os seguintes cuidados básicos devem ser tomados:

- As cargas a serem içadas devem ser conhecidas, bem como as distâncias entre elas e o centro de giro do guindaste;

- As cargas içadas devem ter peso igual ou inferior à capacidade de carga do guindaste para aquele dado raio de operação.
- O operador do guindaste deve estar plenamente familiarizado e capacitado a operar aquele dado equipamento.
- Somente devem permanecer na área de influência dos guindastes, as pessoas devidamente autorizadas e envolvidas na operação;
- O guindaste deve ser posicionado de forma a permitir o maior ângulo possível da lança com a horizontal, melhorando os aspectos de estabilidade estática do sistema;
- O guindaste deve estar sempre nivelado, para evitar torções na lança.
- Em hipótese alguma o guindaste deve ser utilizado para arrastar cargas em qualquer direção, arrancar peças presas, nem são admitidas cargas fora do plano da lança, o que pode provocar carregamento lateral não permitidas ou admissíveis sobre a lança do equipamento.

Os esforços possíveis de ocorrer em um guindaste durante o içamento estão demonstrados na imagem abaixo:



Img. 18 – Esforços possíveis de ocorrer sobre o guindaste

No momento em que ocorre a movimentação e elevação de uma carga já içada e livre para movimentar-se, o esforço resultante sobre a lança é de compressão. A capacidade nominal de carga de um guindaste é obtida em tabela específica de cada máquina, sendo parte obrigatória de seu manual e depende, além das características construtivas, do tamanho da lança e do raio ou ângulo de operação Θ .

VII – ANÁLISE DAS PROVÁVEIS CAUSAS

Em busca da formação da convicção do perito, este esteve presente no local das obras no primeiro dia útil subsequente ao acidente, quando foram obtidas todas as informações possíveis, como inspeções visuais, tomada de fotos e medições. Buscou-se ainda a obtenção de toda documentação pertinente em poder da contratante. Para melhor fundamentar o presente trabalho, foi solicitado pelo perito realização de ensaios de caracterização do material e das soldas da lança avariada, realizados posteriormente pelo IPT (ANEXO 1 do Laudo Pericial), objetivando qualificar a tipologia da fratura observada. A identificação dos locais de coleta das peças pelo IPT para realização dos ensaios foi feita com acompanhamento desse perito, para melhor explanação dos objetivos e determinação dos ensaios laboratoriais a serem realizados.

Em posse das informações coletadas, como documentação e entrevistas e, especialmente pelo posicionamento espacial das peças das estruturas e danos observados após o acidente, realizamos um estudo das prováveis causas do acidente.

Desse modo, em função do local acidentado e da etapa da obra alcançada até a data do acidente, esse trabalho se concentrou em quatro vertentes principais como possíveis causas da queda da lança do guindaste:

- Rompimento do cabo de aço;
- Sobrecarga vertical;
- Integridade da lança;
- Falha de operação.

As quatro hipóteses serão discutidas a seguir.

A – DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

A obra em questão consistia no desenvolvimento de metodologia de execução e projetos de engenharia para construção da Estação Eucaliptos onde irá passar a linha 5-lilás do metrô de São Paulo. Essa estação estava sendo construída através da execução de Paredes Diafragma, principal item do escopo dos trabalhos. Para realização dos serviços de içamento dos segmentos de armação e concretagem das lamelas, estava sendo utilizado o Guindaste sobre esteiras Baldwin LIMA Hamilton com capacidade máxima de 45.360 Kg (ANEXO 2 do Laudo Pericial). A imagem abaixo tomada horas antes do acidente, mostra em uma visão geral, o canteiro de obras e o posicionamento do guindaste. Nela estão especificadas as principais estruturas que serão amplamente mencionadas no decorrer desse trabalho pericial de engenharia.



Img. 20
Principais
componentes do
canteiro de obras
relacionados ao
acidente

A imagem 21, a seguir, mostra a situação do local após o acidente. No dia 22/06/2012, após a execução do serviço de descida do último módulo da armação, já travada e antes do início da etapa de concretagem da lamela, a lança do guindaste retorceu em “L”, tombando dentro do canteiro de obras. Importante salientar que não houve violação do local do acidente, pois as imagens tomadas pelo perito mostram situação idêntica às imagens divulgadas pela imprensa logo após o ocorrido.



Img. 21
Canteiro de obras
após o acidente,
com a lança do
guindaste
danificada

**XVII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE
AVALIAÇÕES E PERÍCIAS - IBAPE/SC - 2013**

No primeiro dia útil após o acidente, percorremos o local e entrevistamos pessoas que estavam presentes, com destaque ao encarregado de obras Sr. [REDACTED] e o operador do Guindaste que o fazia até a colocação da armação naquele dia, ou seja antes do acidente - Sr. [REDACTED]. Após a colocação e travamento da armação, em função do horário do almoço, o Sr. [REDACTED] foi substituído pelo Sr. [REDACTED], cujos documentos de contratação e treinamento encontram-se no ANEXO 3 do Laudo Pericial, e era quem estava efetivamente operando o equipamento no momento do acidente.

As prováveis causas desse acidente serão analisadas na sequência.

B – HIPÓTESE 1: ROMPIMENTO DO CABO DE AÇO

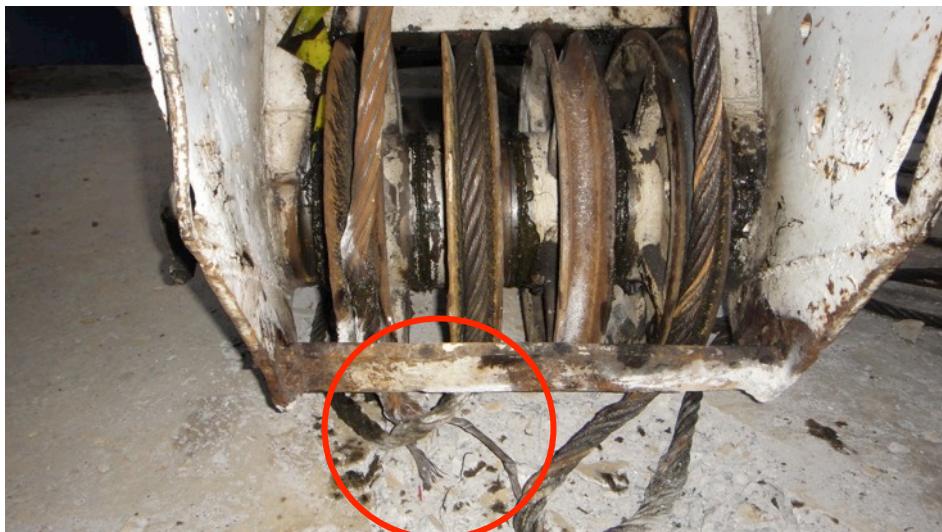
A primeira hipótese estudada é o rompimento do(s) cabo(s) de aço, seja por não estarem adequadamente dimensionados, seja pelo desgaste pelo uso, afinal durante a operação são aplicados esforços sobre o cabo de aço e esforços no sentido rotação da lança e/ou translação do veículo.

Pela curva de carga do guindaste (ANEXO 2 do Laudo Pericial), pode-se identificar sua capacidade nominal (que descarta todas as reservas de cálculo e fatores de segurança de projeto). Medimos o raio de operação, encontrando valor de 7,0 m (23 ft.) e tamanho da lança de 18,9 m (62 ft.), que nos infere, pelo curva de carga do equipamento, capacidade nominal de mais de 40.000 lbs. (18,14 ton), compatível com peso dos cinco segmentos de armação (17,28 ton). O operador ainda nos informou que este equipamento já havia aplicado nesta obra, cerca de 200 segmentos de armação praticamente idênticos.

Entretanto, pelas imagens 22 e 23 a seguir, tomadas pelo perito no dia subsequente ao do acidente, verifica-se que houve cisalhamento no cabo de aço causado por esmagamento, na ponta da lança, após sua queda. Os demais lances de cabos foram inspecionados visualmente não sendo encontrado qualquer desgaste promovido pelo uso excessivo. Foi ainda informado pelo operador – Sr. [REDACTED] – que todos os cabos de aço daquele equipamento haviam sido trocados há cerca de trinta dias.



Img. 22 – Rompimento do cabo de aço por cisalhamento causado por esmagamento

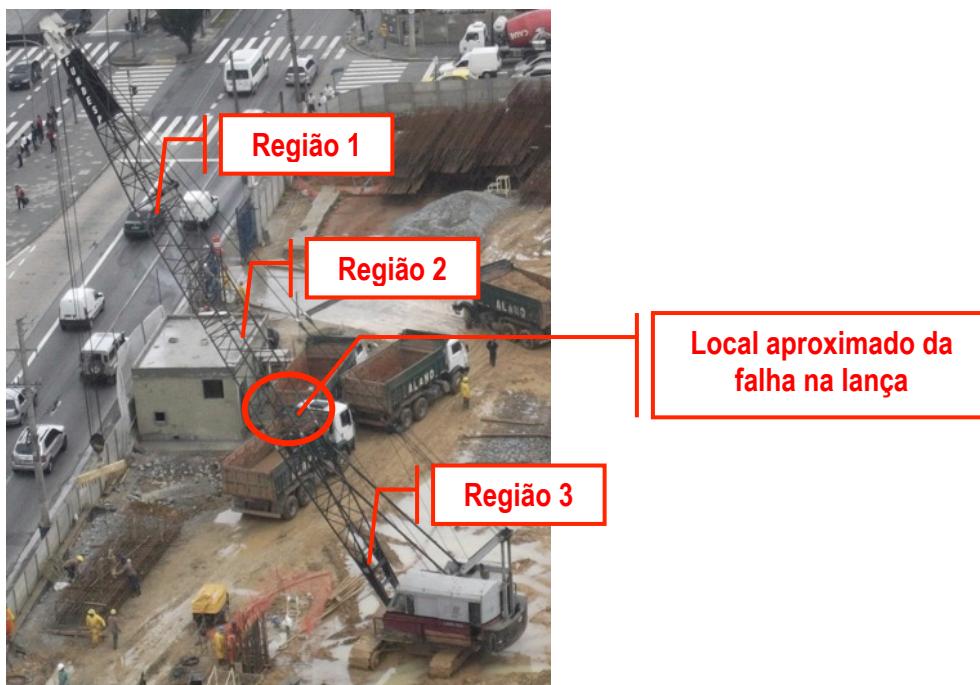


Img. 23 – Rompimento do cabo de aço por cisalhamento causado por esmagamento

Deste modo, concluímos com certeza que a única ruptura observada no cabo de aço se deu por cisalhamento causado por esmagamento no momento da queda, quando a ponta da lança bateu fortemente sobre o concreto do piso, conforme demonstrado nas fotos acima. Ou seja, trata-se de consequência do acidente e não causa deste, de sorte que o sinistro não teve como origem a ruptura de cabo(s) de aço do guindaste, sendo refutada esta hipótese.

C – HIPÓTESE 2: SOBRECARGA VERTICAL

Para correta análise da possibilidade de ocorrência de sobrecarga vertical na lança do guindaste, essa estrutura será analisada detalhadamente, através da figura a seguir.



Img. 24 – Divisão de regiões na lança do guindaste

A região 1 indica a estrutura de forma piramidal de base quadrada, a região 2 indica estrutura de forma prismática de seção quadrada constituída de dois segmentos e a região 3 indica estrutura de forma piramidal conectada à região 2 na parte superior e ao veículo de esteiras na extremidade inferior.

Repetindo fundamentação anterior, que se torna também importante nessa análise: Medimos o raio de operação, encontrando valor de 7,0 m (23 ft.) e tamanho da lança de 18,9 m (62 ft.), que nos infere, pelo curva de carga do equipamento, capacidade nominal (que descarta todas as reservas de cálculo e fatores de segurança de projeto) de mais de 40.000 lbs. (18,14 ton), compatível com peso dos cinco segmentos de armação (17,28 ton). O operador ainda nos informou que este equipamento já havia aplicado nesta obra, cerca de 200 segmentos de armação praticamente idênticos.

Tal fato sugere que a possibilidade de ruptura por sobrecarga vertical seria a existência de fratura por fadiga em seus elementos de ligação, fato descartado no relatório do IPT.

Entretanto, para melhor entendimento do acidente e da possível sobrecarga vertical, será realizada a reconstituição do ocorrido através das fotos enviadas ao perito.

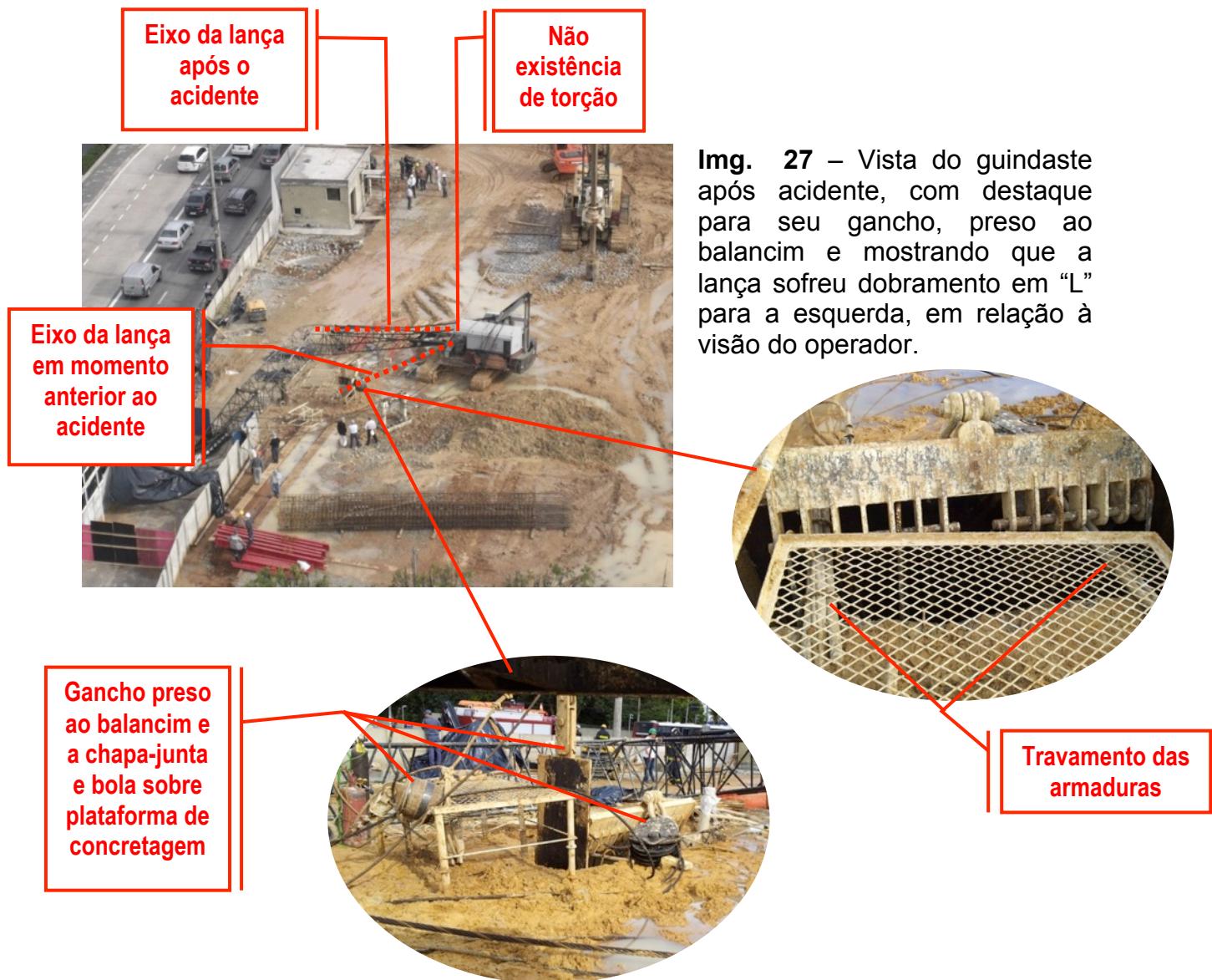


Img. 25 – Vista geral do canteiro de obras antes do acidente



Img. 26 – Execução da descida da armação da lamela da parede diafragma, antes do acidente

Nas fotos 27 e 28 a seguir, observamos a posição da lança avariada após o acidente. Pode-se nitidamente observar que esta está deslocada em relação ao eixo de trabalho, ou seja, o eixo da lamela, sugerindo deslocamento lateral durante operação. Observa-se ainda, no momento do acidente, que: (i) os cabos de aço estavam travados na chapa-junta e no balancim; (ii) havia travamento das armaduras, ou seja, sem esforço na lança, e (iii) a bola estava sobre plataforma utilizada nas concretagens. Tais observação nos evidenciam que a etapa de colocação das armaduras já havia sido encerrada e se iniciava a etapa da concretagem.



Img. 27 – Vista do guindaste após acidente, com destaque para seu gancho, preso ao balancim e mostrando que a lança sofreu dobramento em “L” para a esquerda, em relação à visão do operador.

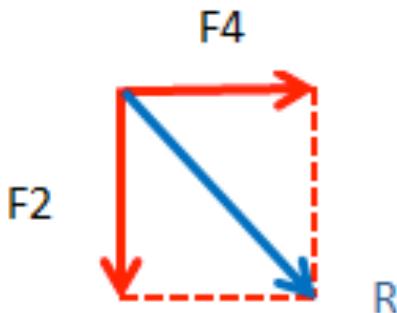


Img. 28 – Vista da lança na sua região de ruptura, após o acidente

Na hipótese da lança ter sofrido sobrecarga vertical no momento do acidente, pode-se afirmar não ter ocorrido espontaneamente o dobramento em “L” para a esquerda em relação ao operador do guindaste. Neste caso, provavelmente, no início do colapso, a lança dobraria em seu eixo vertical, para em seguida tombar para o lado, havendo, necessariamente, torção na região do encontro da lança com o corpo do guindaste, e/ou quebra de pinos de fixação desta com o corpo do guindaste, fato que definitivamente não ocorreu, como observado pelo perito em sua vistoria. Nessa hipótese, sem aplicação de um componente horizontal, seguramente a lança não teria se deslocado para direita em relação ao eixo de operação, como observado na imagem 27 acima.

Para que esse dobramento tenha acontecido, a sequência de eventos mais plausível é de que o cabo tenha sofrido uma força inclinada após o travamento da armadura, como mostra esquematicamente a imagem 29. A componente lateral dessa força inclinada provocou flexão na lança que aumentou a compressão de um dos lados da estrutura, possibilitando a flambagem dos tubos longitudinais que, por consequência, levou à ruptura por cisalhamento de soldas entre os tubos longitudinais e transversais, como comprovado pelo relatório do IPT, causando a instabilidade que culminou na queda da lança.

Durante a operação de um guindaste, a lança sofre as forças F2 (componente vertical da carga) e F4 (componente lateral da carga), que resultam em uma força R que é a força total aplicada sobre a lança, como mostrado na imagem 29 abaixo.



Img. 29 – Esforços atuantes sobre a lança no plano do papel

Portanto, pelas fundamentações acima, é certo afirmar que não houve ruptura da lança promovida apenas por sobrecarga vertical durante a operação. As configurações espaciais observadas, a falta de torção na ligação da lança com o corpo do guindaste e a não ruptura das soldas por fadiga, mas por cisalhamento, demonstram inequivocamente que houve, necessariamente, componente de força horizontal, capaz de promover a ruptura dos elementos estruturais da lança treliçada.

D – HIPÓTESE 3: NÃO ORIGINALIDADE DA LANÇA

Para verificar se os materiais utilizados na lança do Guindaste sobre esteiras Baldwin LIMA Hamilton eram originais, solicitamos ao IPT realização de ensaios nos materiais componentes da lança avariada. Técnicos do IPT realizaram duas visitas ao canteiro de obras, com nosso acompanhamento, nos dias 05/09/2012 para identificação das amostras e no dia 12/11/2012 para coleta. Em seu relatório (ANEXO 1 do Laudo Pericial), dentre outros, relatou-se:

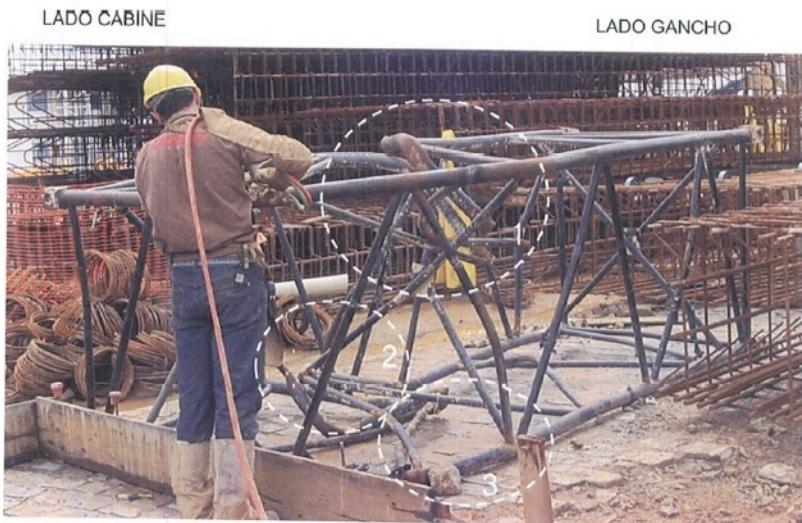
“constatou-se que a estrutura rompida é uma lança de treliça constituída de três partes, sendo as extremidades com forma piramidal de seção quadrada e a parte central prismática formada por dois segmentos também de seção quadrada. Cada face do quadrado é formada por dois tubos longitudinais de 73 mm de diâmetro externo unidos por solda a tubos de 42 mm de diâmetro em forma de treliça. Além das uniões soldadas nos tubos situados nos planos de cada face também havia soldas nos tubos situados nos planos perpendiculares ao eixo da lança em sentido diagonal; na intersecção entre os tubos diagonais havia uma placa soldada a ambos. A falha ocorreu na região prismática de seção quadrada, ou seja, na parte da lança que foi guardada na obra que apresentava rupturas e deformações resultantes do acidente.”

...

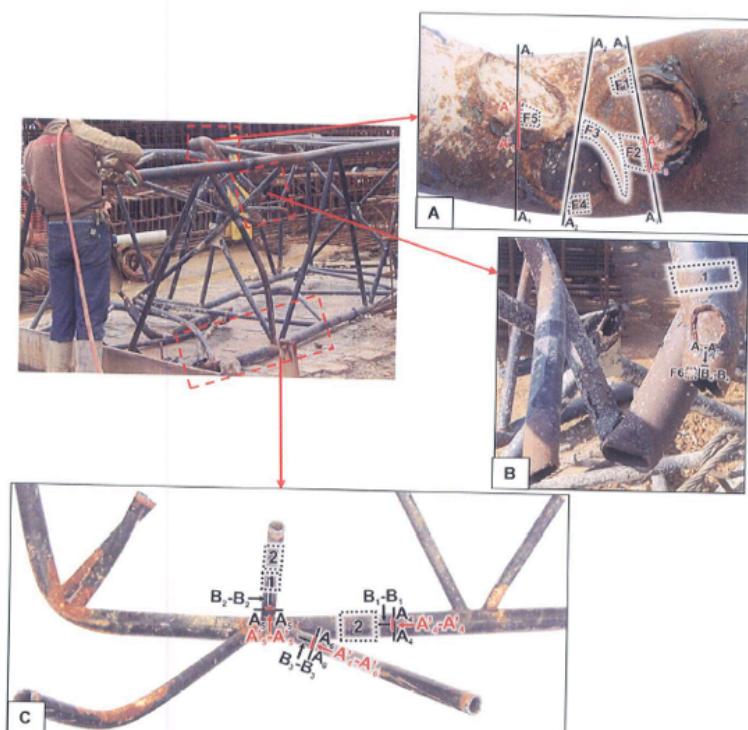
“foram realizados cortes por meio de maçarico. Como resultado dos cortes, foram removidos quatro pedaços maiores e um tubo solto, de modo que no total foram enviados cinco pedaços da lança ao IPT, conjuntamente denominados de Amostra 1. As análises realizadas permitiram concluir que o material usado na fabricação da lança não apresentou deficiências na composição química, resistência mecânica e microestrutura que pudessem comprometer o seu desempenho. As soldas rompidas apresentaram geometria e penetração similares às observadas em outras regiões sem ruptura.”

A metodologia utilizada pelo IPT se iniciou pela realização de exame visual, através das fotografias enviadas a eles e exame fractográfico da amostra conforme procedimento do ensaio fractográfico CINTEQ-LEME-PE-MT04, conforme imagens do referido relatório.

Na imagem 30 estão assinaladas, por círculos, três regiões, sendo que na região 1 houve dobramento e ruptura total do tubo longitudinal, na região 2 dobramento e ruptura parcial do tubo longitudinal e na região 3 o tubo longitudinal sofreu apenas dobramento.

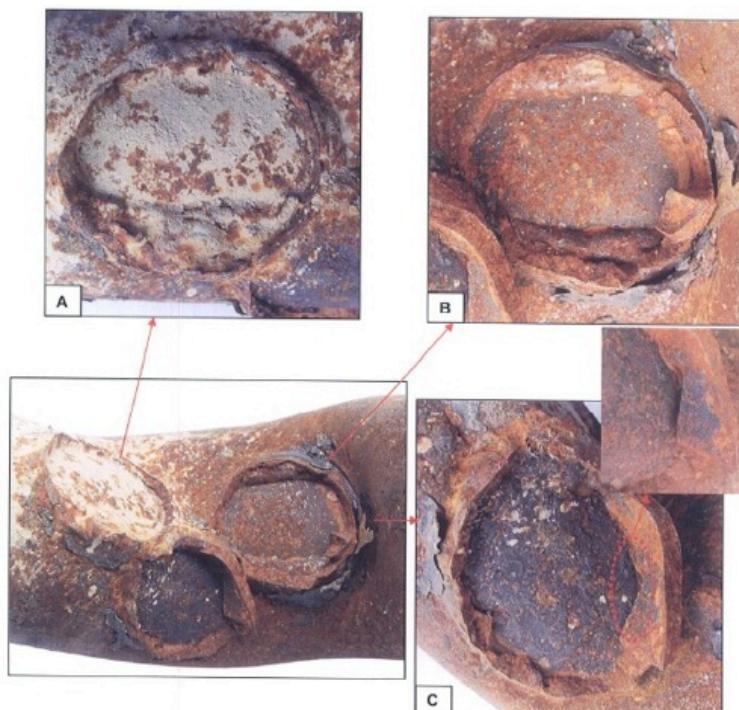


Img. 30 – Operação do corte efetuado no canteiro para retirada das amostras
(Fonte: laudo IPT)

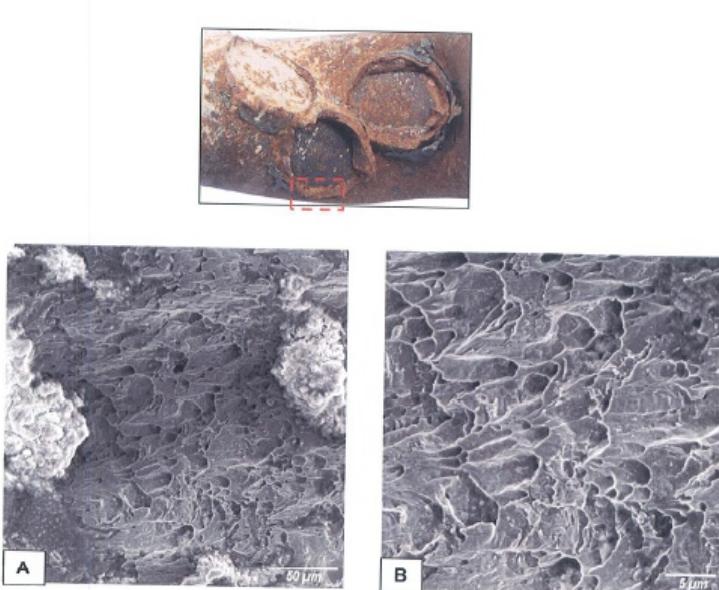


Img. 31 – Operação do corte efetuado no canteiro para retirada das amostras
(Fonte: laudo IPT)

Já a imagem 32 mostra fraturas ocorridas nos tubos transversais da lança, todas situadas no mesmo nó, próximo à ruptura do tubo longitudinal. A análise por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fraturas das regiões indicadas revelou em todos os corpos de prova a ocorrência de alvéolos, característica típica de fratura dúctil, como exemplifica a imagem 33.

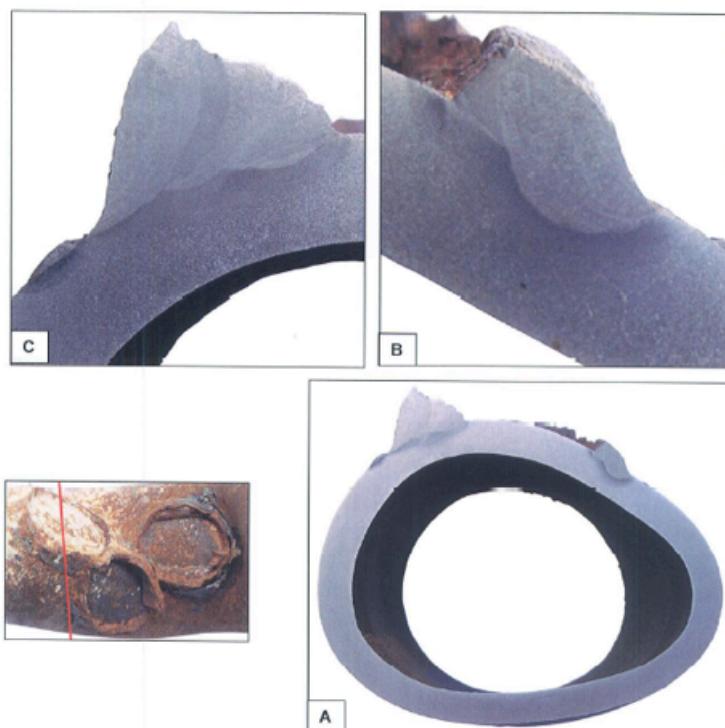


Img. 32 – Aspecto da superfície das fraturas ocorridas no nó na região em que a lança sofreu dobramento (Fonte: laudo IPT)



Img. 33 – Presença de alvéolos na estrutura (Fonte: laudo IPT)

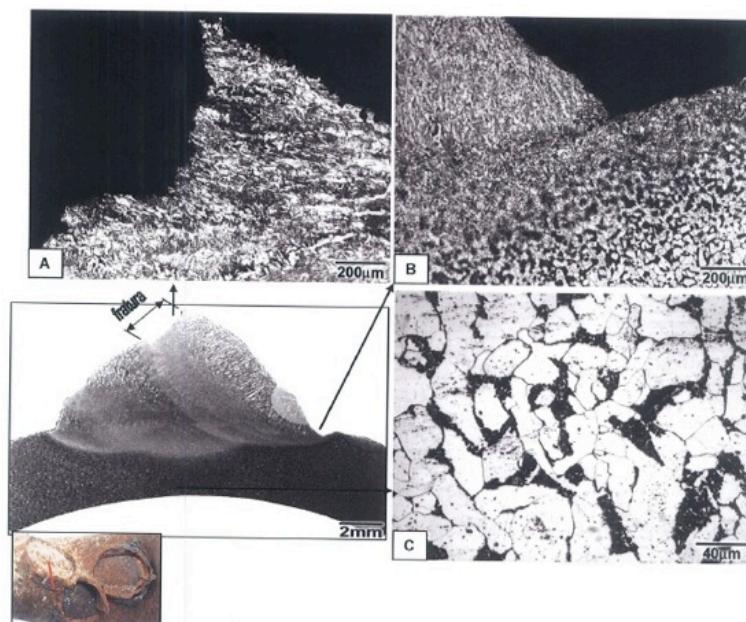
O IPT também realizou exames macrográfico e micrográfico para análise da amostra. A imagem 34 abaixo exemplifica o exame macrográfico realizado, onde é indicado o aspecto marcográfico de uma seção do tubo longitudinal abrangendo uma das soldas entre este e um tubo transversal. Observa-se o achatamento do tubo longitudinal, bem como que a fratura ocorreu na solda.



Img. 34 – Exame macrográfico (Fonte: laudo IPT)

Por outro lado, a análise micrográfica efetuada em regiões rompidas das soldas entre tubos transversais e o tubo longitudinal identificou, conforme figura 35, o seguinte:

- Estrutura característica de aço baixo carbono;
- Não foi observada a ocorrência de microconstituintes frágeis na zona termicamente afetada, na zona fundida nem no metal base.



Img. 35 – Exame micrográfico, que exemplifica a não ocorrência de microconstituintes frágeis (Fonte: laudo IPT)

XVII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS - IBAPE/SC - 2013

As etapas seguintes dos exames realizados pelo IPT foram a análise química dos constituintes e ensaios de tração nos mesmos corpos de prova. A comparação mostra compatibilidade entre os resultados obtidos no ensaio e os especificados para o aço tipo S, grau A da Norma ASTM A53.

Portanto, o trabalho efetuado pelo IPT é afirmativo em sua conclusão, demonstrando que a lança não apresentou qualquer falha de fabricação que pudesse comprometer seu desempenho. As análises realizadas pelo IPT permitem concluir que o material usado na fabricação da lança não apresentou deficiências na composição química, resistência mecânica e microestrutura que pudesse comprometer o seu desempenho. As soldas rompidas apresentaram geometria e penetração similares às observadas em outras regiões sem ruptura. As análises das soldas mostram que suas fraturas são típicas daquelas resultantes de cisalhamento, não mostrando existência de fadiga, indicando que a fratura ocorreu de maneira súbita.

E – HIPÓTESE 4: FALHA DE OPERAÇÃO

A quarta e última possibilidade estudada por esse perito é a falha de operação do guindaste, por meio de seu operador no hora do acidente, Sr. [REDACTED], profissional habilitado e treinado, cujos documentos encontram-se no ANEXO 3 do Laudo Pericial.

Nesse caso, pela configuração espacial observada, pelas exclusões e fundamentações analisadas pelo perito na HIPÓTESE 2 desse laudo, pode-se inferir que após o posicionamento e travamento da armadura, foi aplicada uma carga inclinada no cabo de aço do guindaste pelo seu operador, ou seja, a única hipótese explicável é que este girou o equipamento com o cabo de aço travado. A componente lateral dessa carga provocou flexão na lança, que aumentou a compressão de um de seus lados, possibilitando a flambagem dos tubos longitudinais que, por consequência, levaram à ruptura por cisalhamento das soldas entre os tubos longitudinais e transversais, causando a instabilidade que culminou com a queda da lança.

Portanto, não pode-se dizer que houve imperícia de um operador experiente, habilitado e treinado, sabedor das características e limitações de seu equipamento, mas entende-se ter havido negligência e imprudência quando este operador promoveu giro do equipamento com o cabo de aço travado, aplicando uma carga inclinada, cuja componente horizontal dessa carga não era recomendável em qualquer manual de operação de guindastes.

VIII – CONCLUSÕES

Após diligências, estudo de material fornecido pela contratante, oitiva de testemunhas, solicitação e análise de ensaios de materiais da lança avariada e simulações técnicas detalhadas dos acontecimentos, conforme demonstrado no desenvolvimento do presente trabalho técnico pericial, é certo afirmar que:

- i. a ruptura do(s) cabo(s) de aço observada não foi origem, mas causa do acidente. A única ruptura observada nos cabos de aço se deu por cisalhamento, no momento da queda quando a ponta da lança bateu fortemente sobre o concreto do piso;
- ii. não houve ruptura da lança promovida apenas por sobrecarga vertical durante a operação. As configurações espaciais observadas, a falta de torção na ligação da lança com o corpo do guindaste e a não ruptura das soldas por fadiga, mas por cisalhamento, demonstram inequivocamente que houve, necessariamente, componente de força horizontal, capaz de promover a ruptura dos elementos estruturais da lança treliçada;
- iii. a lança tinha características que permitiram determinar que esta não apresentou qualquer falha de fabricação que pudesse comprometer seu desempenho: as análises realizadas pelo IPT permitem concluir que o material usado na fabricação da lança não apresentou deficiências na composição química, resistência mecânica e microestrutura que pudessem comprometer o seu desempenho. As soldas rompidas apresentaram geometria e penetração similares às observadas em outras regiões sem ruptura. As análises das soldas mostram que suas fraturas são típicas daquelas resultantes de cisalhamento, não mostrando existência de fadiga, indicando que a fratura ocorreu de maneira súbita;
- iv. não pode-se dizer que houve imperícia de um operador experiente, habilitado e treinado, sabedor das características e limitações de seu equipamento, mas entende-se ter havido negligência e imprudência quando este operador promoveu giro do equipamento com o cabo de aço travado, aplicando uma carga inclinada, cuja componente horizontal dessa carga não era recomendável em qualquer manual de operação de guindastes.

IX – ANEXOS

Em razão da limitação de número de páginas do presente trabalho, que objetiva apresentação em congresso, os anexos mencionados no corpo deste não o compõem. Apenas cita-se como forma de auxiliar os leitores no entendimento da fundamentação adotada para formação da convicção do perito, cujos títulos se seguem:

- Relatório Técnico IPT - Análise de Falha de Lança de Guindaste
- Manual de Operação do Guindaste Baldwin LIMA Hamilton
- Documentação do Operador [REDACTED]
- Anotação de Responsabilidade Técnica do Perito

X - BIBLIOGRAFIA

ABNT, 1996, NBR 13.752, *Perícias de Engenharia na Construção Civil*.

ASTM, 2012, A53, *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*. USA.

ASTM, 2011, A370, *Standart Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, USA.

ASTM, 2008, E1019, *Standart Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Thequiniques*, USA.

ASTM, 2008, E1086, *Standart Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Stainless Stell by the Point-to-Plane Exitation Technique*, USA.