

SUGESTÃO DE UM POSSÍVEL MECANISMO DE RUPTURA DO VIADUTO GENERAL OLYMPIO MOURÃO FILHO

Objetivo

Nosso único objetivo é colaborar com os colegas engenheiros que, muito oportunamente, estão participando da discussão técnica sobre as possíveis causas do desabamento de parte do tabuleiro do Ramo Sul do Viaduto General Olympio Mourão Filho (chamado oficialmente de Viaduto Batalha dos Guararapes), ocorrido no dia 3 de julho do corrente ano, na cidade de Belo Horizonte.

Este trabalho está baseado apenas nas informações obtidas na mídia (notícias de jornais e de televisão) e nos dados do projeto estrutural disponibilizados na Internet para consulta pública.

Descrição sucinta da estrutura no trecho acidentado

O trecho do tabuleiro acidentado (de P2 a P4) é constituído por dois vãos contínuos com 77,5m de comprimento cada um (ver figuras 1 e 2). O traçado em planta deste trecho é constituído por duas curvas ligadas por um segmento de reta. Em perfil longitudinal o vão P2-P3 é quase horizontal mas o vão P3-P4 constitui uma rampa muito acentuada, com inclinação de 13,7%. A seção transversal com largura de 8,80m é formada por um caixão fechado em concreto protendido ($f_{ck}=40$ MPa), de altura variável de 3,50m no apoio central (pilar P3) para 1,50m nos apoios extremos (pilares P2 e P4).

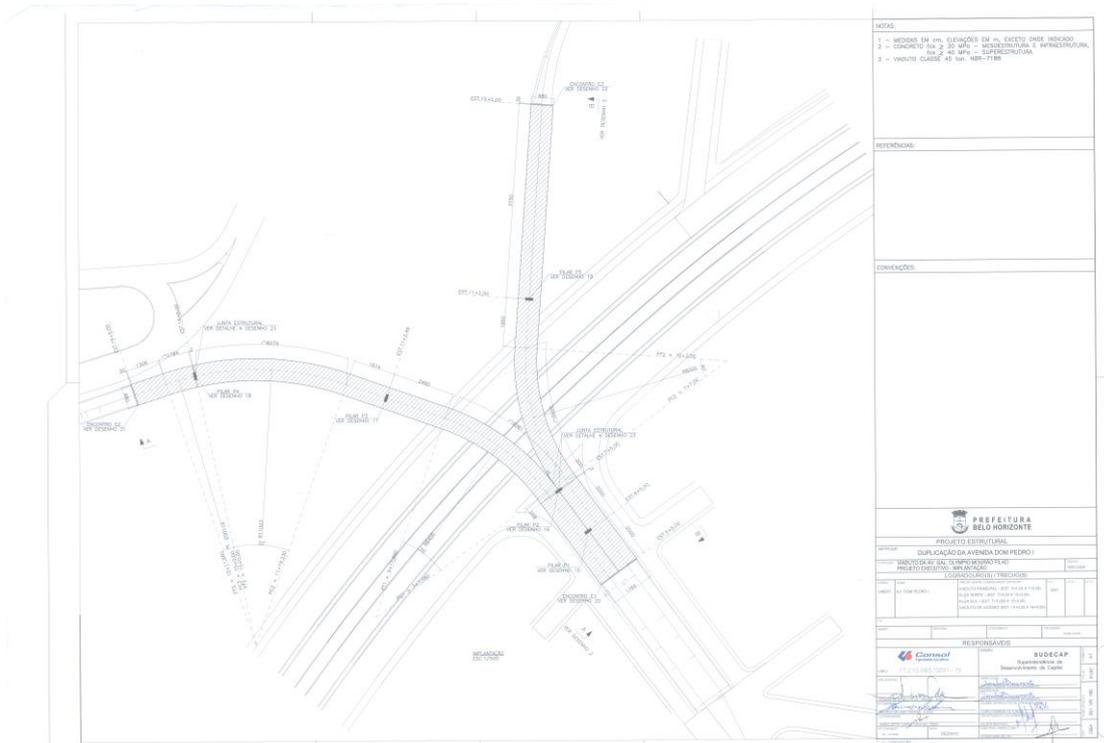


FIGURA 1- planta dos Ramos Norte e Sul do Viaduto General Olympio Mourão Filho

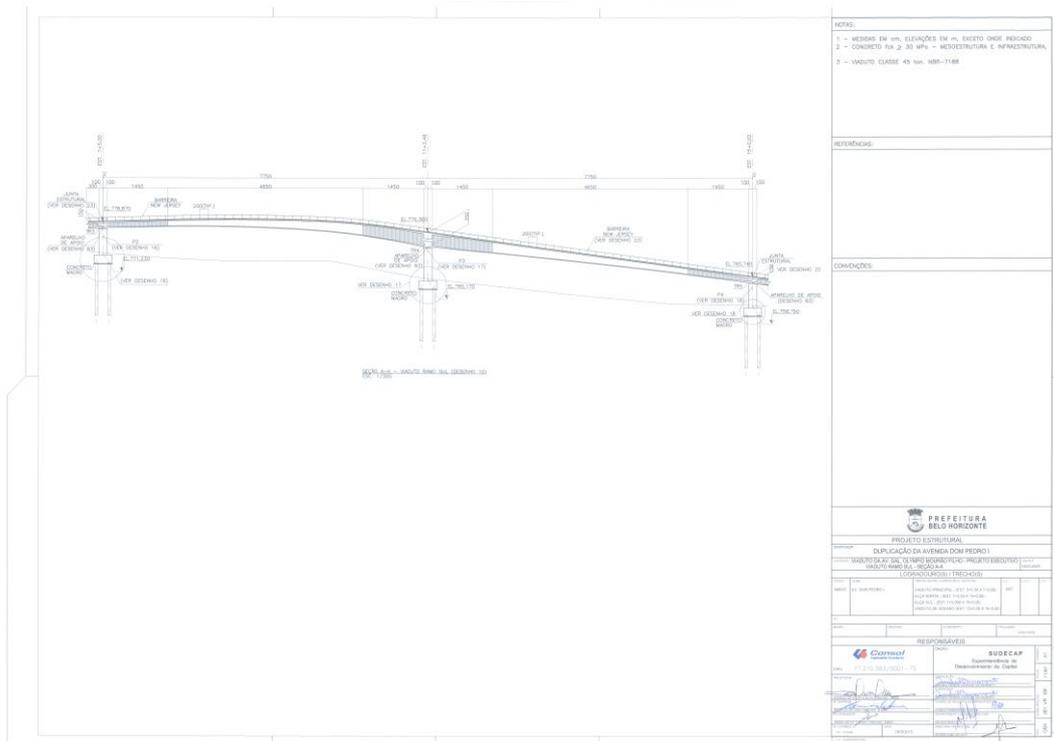


FIGURA 2 – elevação do Ramo Sul do Viaduto General Olympio Mourão Filho

O caixão (ver figura 3) tem duas nervuras verticais (com os cabos de protensão), duas paredes laterais inclinadas, a laje inferior e a laje superior, os quatro últimos elementos armados somente com aço CA50. Infelizmente

não conseguimos encontrar o desenho com os dados completos da forma do tabuleiro.

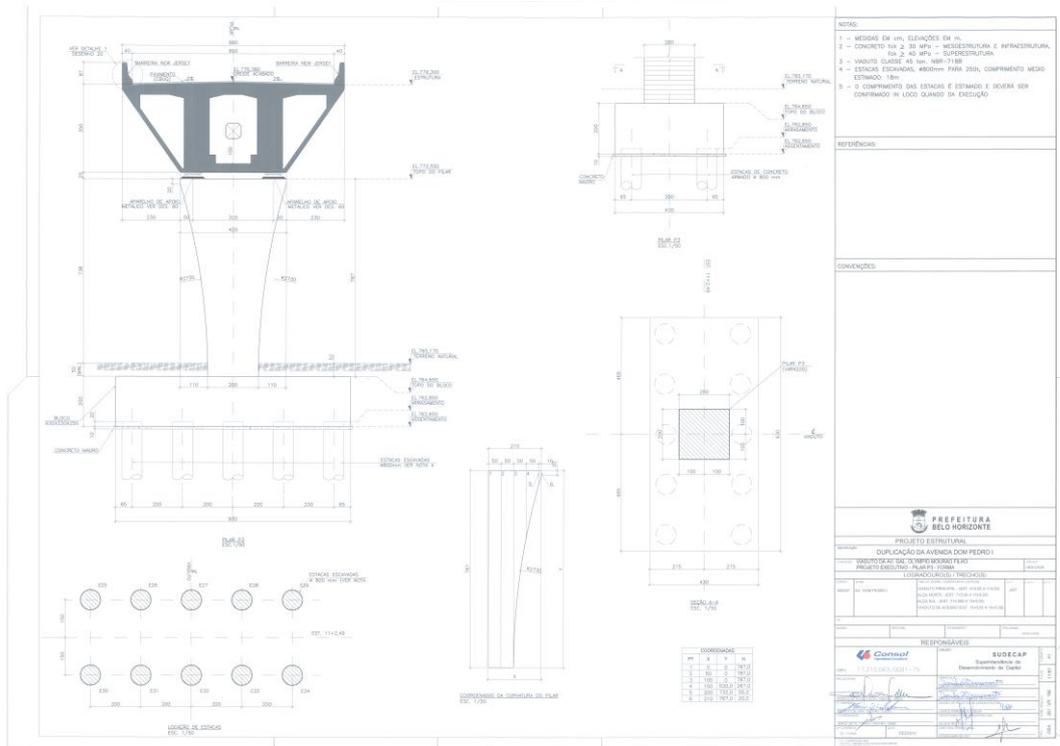


FIGURA 3 – formas do pilar e do bloco de estacas do pilar P3

A protensão longitudinal do tabuleiro é aplicada nas duas nervuras por meio de cabos de força muito elevada, da ordem do triplo ou do quádruplo dos valores considerados mais adequados para este tipo de estrutura. Estes cabos são de aço CP-190/RB, sendo 16 cabos com 27 cordoalhas de 15,2mm e 24 cabos com 19 cordoalhas de 15,2mm, com cargas da ordem de 540 tf e 380 tf respectivamente).

Os pilares e os blocos de estacas são em concreto armado com $f_{ck}=30\text{MPa}$. O pilar P3(ver figuras 3 e 4) do trecho desmoronado tem 7,87m de altura e seção transversal variável de 200cmx200cm na base para 200cmx420cm no topo.

O bloco de estacas do pilar P3 é formado por cinco pares de estacas de concreto armado, totalizando dez estacas, todas verticais. As estacas são do tipo estacas escavadas com diâmetro 800mm, previstas para carga de 250 tf, com comprimento médio estimado em 18m, a ser confirmado no local durante a execução da obra.

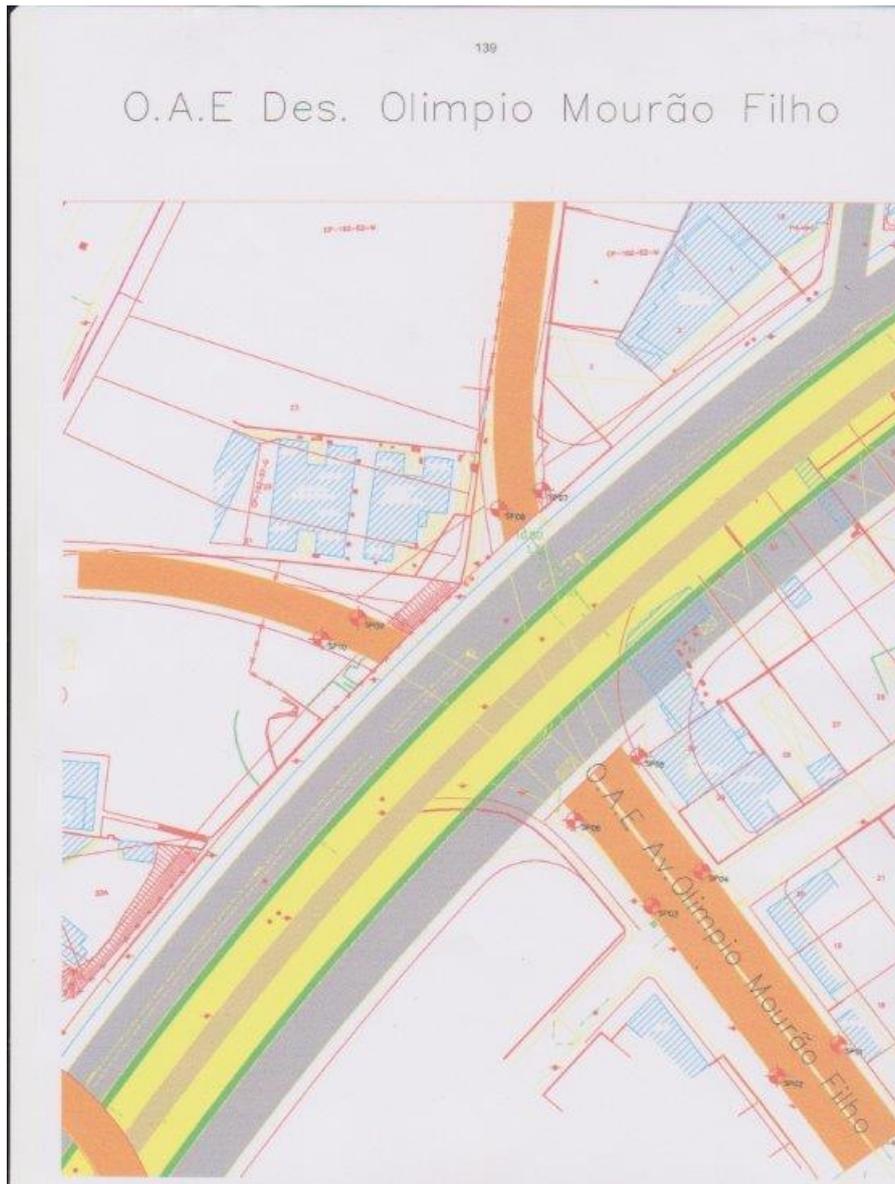


FIGURA 7 – locação das sondagens

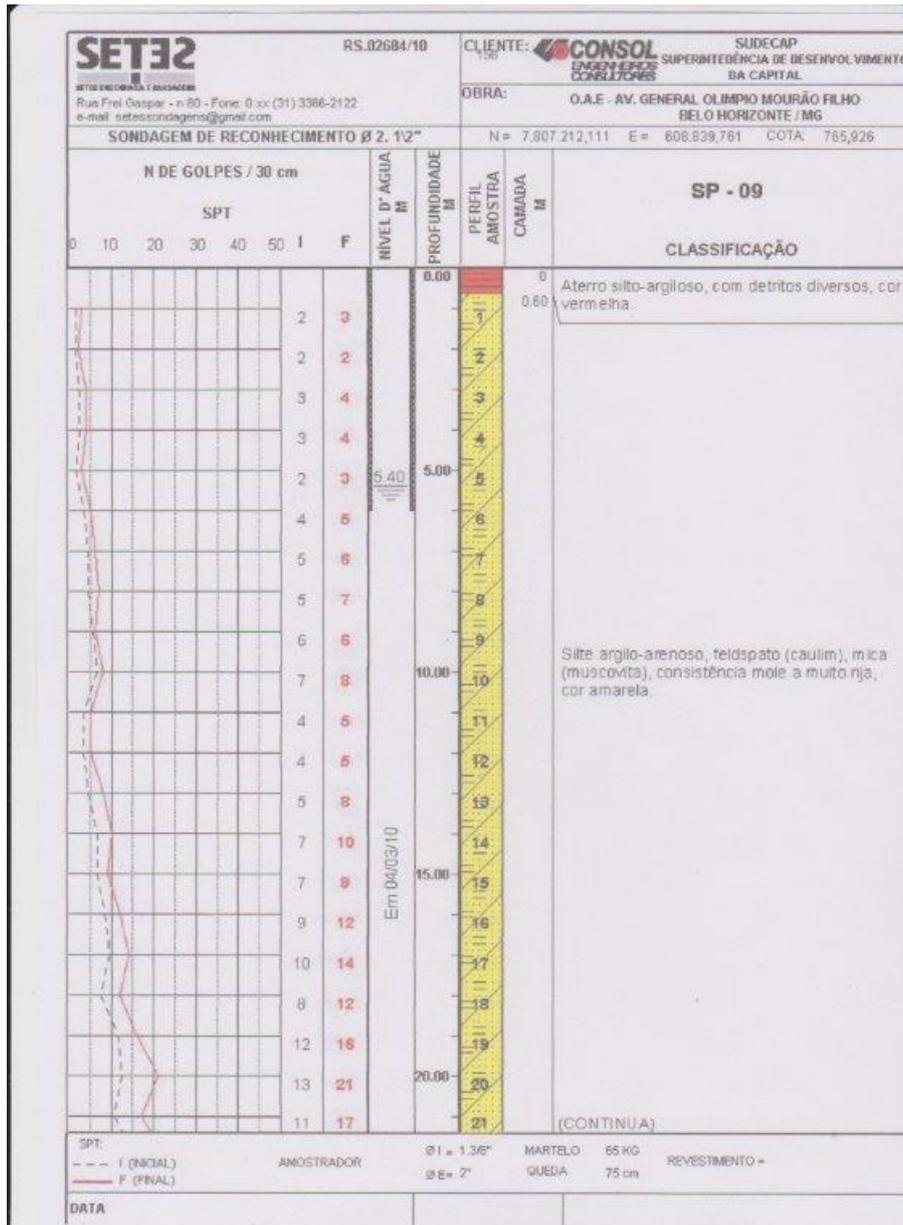


FIGURA 9 - furo SP 09, próximo ao pilar P3



Foto 1



Foto 2

Fotos 1 e 2 – Trecho desmoronado do tabuleiro no lado do pilar P4, que permaneceu inclinado após a ruína. A extremidade apoiada no chão, no lado oposto, corresponde à seção transversal que teria rompido por esmagamento a compressão da laje superior do caixão fechado.



Foto 3 – Vista do tabuleiro desmoronado, tomada na direção do pilar P2



Foto 4 – Vista de parte do tabuleiro desmoronado. Notar as aberturas deixadas provisoriamente na laje superior do caixão fechado que constitui o tabuleiro, para possibilitar a retirada das formas internas e a aplicação da protensão nos cabos ancorados no interior do caixão.



Foto 5 – Vista aérea do tabuleiro desmoronado, no trecho do pilar P3. Notar que as numerosas aberturas deixadas na laje superior têm dimensões variáveis e excessivas, além de estarem posicionadas de modo irregular ao longo do comprimento do tabuleiro, tanto nas zonas de momentos fletores positivos quanto negativos.



Foto 6 – Vista aérea dos tabuleiros do Ramo Sul (desmoronado) e do Ramo Norte. Notar em ambos os viadutos que as numerosas aberturas deixadas na laje superior têm dimensões variáveis e excessivas, além de estarem posicionadas de modo irregular ao longo do comprimento do tabuleiro, tanto nas zonas de momentos fletores positivos quanto negativos.



Foto 7 – Vista da laje superior de parte do trecho desmoronado. Notar que em alguns trechos há mais de uma abertura praticamente numa mesma seção transversal do tabuleiro.



Foto 8 – Pilar do tipo do pilar P3 na fase de construção, com o tabuleiro ainda escorado.

Os principais fatores que podem ter influenciado este tipo de ruptura são os seguintes:

1) **Aberturas provisórias** deixadas na laje superior para possibilitar o acesso ao interior do caixão, com o objetivo de aplicar a protensão nos cabos ancorados dentro do caixão e de retirar formas e escoramentos internos (ver a quantidade excessiva, o posicionamento irregular e as dimensões exageradas das aberturas nas fotos 4, 5, 6 e 7). Uma abertura na laje superior altera as características geométricas da seção transversal do tabuleiro, implicando no abaixamento do seu centro de gravidade, o que diminui o valor do Momento Fletor negativo devido à protensão dos cabos inferiores. Em consequência, as tensões de compressão na laje superior aumentam em seções submetidas a Momentos Fletores positivos (devidos às cargas atuantes: permanentes, variáveis e eventuais hiperestáticos de protensão). No caso de caixão fechado, em especial com cabos de protensão ancorados no seu interior, é obrigatório prever **aberturas definitivas** com abertura mínima (da ordem de 70cm x 70cm) , posicionadas na laje inferior e em locais adequados, em geral em zonas do tabuleiro submetidas a Momentos Fletores positivos (onde a laje inferior é tracionada).

- 2) Valor efetivo da resistência a compressão do concreto da laje superior na região do colapso (previsto no projeto $f_{ck}=40$ Mpa)
- 3) Valor da protensão efetivamente aplicada na seção de ruptura
- 4) Imprecisão ou erro de cálculo dos esforços considerados no dimensionamento da seção que rompeu.
- 5) Dimensionamento e funcionamento correto dos aparelhos de apoio, conforme previsto no cálculo dos esforços na seção de ruptura.
- 6) Ocorrência de recalque diferencial no pilar P3. Neste tipo de esquema estrutural (dois vãos contínuos, de grande inércia e em curva) um recalque no apoio central aumentaria de modo não desprezível os valores dos Momentos Fletores positivos na seção que rompeu.

Efeito da queda do tabuleiro no pilar P3

A ruptura brusca do tabuleiro em uma seção do vão P2-P3, situada próxima ao pilar P2, desequilibrou o vão, que tendeu a desabar totalmente. Neste processo o pilar P3 foi submetido bruscamente a esforços dinâmicos não previstos no projeto, tanto verticais quanto horizontais, capazes de levá-lo ao seu rompimento, seguido de tombamento ou esmagamento sob o peso do tabuleiro, que em consequência acabou por desmoronar totalmente.

O tipo de aparelho de apoio pode ter colaborado para facilitar o processo de rompimento do pilar porque há chumbadores prendendo o aparelho no fundo do tabuleiro.

Rio de Janeiro, 16 de julho de 2014.

Engenheiro *Nelson Araujo Lima*

***Nota:** este trabalho foi editado nos primeiros dias após o colapso do viaduto, quando, ainda, não havia dados consistentes sobre os prováveis mecanismos de ruptura. As fotos foram inseridas poucos dias depois, e ora estão complementadas por outras fornecidas pela Defesa Civil de BH.*

FOTOS COMPLEMENTARES





APARELHO DE APOIO







FOTO LIBERADA PELA DEFESA CIVIL DE BH EM 20/07/2014



FOTO LIBERADA PELA DEFESA CIVIL DE BH EM 20/07/2014



FOTO LIBERADA PELA DEFESA CIVIL DE BH EM 20/07/2014



FOTO LIBERADA PELA DEFESA CIVIL DE BH EM 20/07/2014



FOTO LIBERADA PELA DEFESA CIVIL DE BH EM 20/07/2014



FOTO LIBERADA PELA DEFESA CIVIL DE BH EM 20/07/2014

Considerações complementares sobre o desmoronamento do viaduto Batalha dos Guararapes

Estas considerações complementam o relatório “SUGESTÕES DE UM POSSÍVEL MECANISMO DE RUPTURA DO VIADUTO GENERAL OLYMPIO MOURÃO FILHO” e foram preparadas à medida que novas informações técnicas ficaram acessíveis para análise após o término da elaboração do referido relatório, que foi disponibilizado para consulta dos interessados no dia 16 de julho do corrente ano.

1) Mecanismo de ruptura

A seção de ruptura inicial do tabuleiro do Ramo Sul poderia ter ocorrido perto do P2, como eu tinha inicialmente escrito no texto do relatório. Quando percebi que nas fotos 1 e 2 consta um trecho de tabuleiro do lado de P4, que permaneceu inclinado, apoiado de um lado no topo do pilar P4 e do outro lado no chão, achei melhor supor que a ruptura do tabuleiro teria tido início nesta seção apoiada no terreno. Quando terminei o trabalho ainda não se falava da grande deficiência de armação do bloco de estacas do pilar P3. É possível imaginar também que o colapso tenha tido início no rompimento brusco deste bloco, quando o pilar foi “cravado” violentamente no solo. Após a queda total do tabuleiro, os escombros permaneceram sobre a superfície do terreno em posição aproximadamente horizontal, sem a formação de um “v” invertido no eixo do pilar P3. Como a extremidade do tabuleiro no lado do pilar P4 permaneceu parcialmente apoiada no topo do pilar, ocorreu a ruptura da seção transversal que está assente no chão (ver fotos 9 a 12).



Foto 9 – local do possível início de ruptura do tabuleiro do Ramo Sul, que teria ocorrido numa seção transversal do caixão situada próxima do pilar P4. Esta seção está assente no chão, enquanto a outra extremidade do trecho desmoronado (inclinado) continua apoiada precariamente no topo do pilar P4.



Foto 10



Foto 11



Foto 12

2) Características importantes do tabuleiro

Redigi o presente texto no mesmo dia em que foi divulgado o problema da insuficiência de armadura no bloco de estacas do pilar P3 do Ramo Sul do Viaduto Batalha dos Guararapes (inicialmente designado no projeto estrutural como Viaduto na General Olympio Mourão Filho). Examinei três fotos do trecho desmoronado (fotos 13,14 e 15), as quais considerei muito importantes (as aberturas provisórias na laje superior, as três células do caixão, a falta de pingadeiras e os cabos de protensão sem injeção de nata de cimento).



Foto 13 – Vista superior do tabuleiro desmoronado do Ramo Sul do Viaduto General Olympio Mourão Filho. Notar as numerosas aberturas provisórias deixadas na laje superior do caixão fechado do tabuleiro, de formatos e dimensões variados: são quadradas (a maioria) ou retangulares, com dimensões variando estimativamente de 1m a 2m. Nelas foram deixados ferros de espera, dobrados em posição vertical, para serem deitados na ocasião do fechamento das aberturas com concreto. Estas aberturas em geral não são previstas no projeto estrutural. Como não estão cobertas é possível que tenha ocorrido entrada de água pluvial no interior do caixão, aumentando as cargas atuantes. A presença das aberturas enfraqueceram de modo significativo a resistência do tabuleiro, tanto para os esforços de flexão como para os esforço de torção (traçado em planta é curvo). É provável que esta redução de resistência não tenha sido considerada no dimensionamento da superestrutura do viaduto.



Foto 14 – Seção transversal do tabuleiro do Ramo Sul do Viaduto Batalha dos Guararapes, em fase de demolição após o desmoronamento. O tabuleiro em caixão fechado é formado por três células , constituídas pelas duas nervuras principais (internas e verticais) por onde passam os cabos longitudinais de protensão, pelas duas paredes laterais (externas e inclinadas e) e pelas lajes superior e inferior. Notar que nas duas células laterais não há espaço disponível no fundo do caixão para acomodar as aberturas permanentes necessárias para possibilitar o acesso ao interior do caixão nas futuras inspeções , ao longo de toda a vida útil da estrutura. Na laje superior da célula central foram deixadas aberturas provisórias quadradas, durante a fase de construção, medindo cerca de 2m x 2m. Nos trechos das células laterais as aberturas provisórias medem cerca de 1m x 1m. Notar também que não há pingadeiras nos bordos superiores do caixão, dispositivo indispensável para proteger as faces laterais externas e o fundo do tabuleiro contra a ação deletéria das águas pluviais.



Foto 15 – 8 cabos de 19 cordoalhas diâmetro 15,2, situados no alto de uma seção transversal próxima do pilar P3. Notar que todas as bainhas estão sem qualquer sinal de injeção (de nata de cimento ou de graxa).

3) Sugestões para demolição do tabuleiro do Ramo Norte

Estou convencido de que o tabuleiro do viaduto do Ramo Norte, projetado e construído com as mesmas características estruturais do viaduto do Ramo Sul , que desmoronou no dia 3 de julho, pode entrar em colapso total a qualquer momento, sem aviso prévio. A título de colaboração sugiro dois esquemas possíveis, simples e baratos, para provocar a queda controlada do tabuleiro, de modo seguro para os técnicos e operários:

Sugestão A – demolir uma seção transversal do tabuleiro próxima de um dos apoios extremos (E3 ou P2), utilizando um equipamento de demolição posicionado de modo seguro, fora da área que será afetada pela queda dos escombros. Quando a seção escolhida romper, o pilar P5 será enterrado no solo, como ocorreu com o pilar P3, de acordo com o mesmo mecanismo observado no desmoronamento do Ramo Sul.

Sugestão B – encher gradativamente o caixão do tabuleiro com água, com despejo de água apenas do lado do apoio E3 (lado em rampa), até que o peso da água provoque a ruptura de uma seção transversal, seguida do mesmo mecanismo de colapso da Sugestão A. Durante todo o processo os técnicos e operários deverão ser mantidos fora da zona que será atingida pela queda dos escombros do tabuleiro.

Como se procede em caso de implosão, é recomendável manter afastados do local os moradores e transeuntes durante todo o tempo necessário para executar e concluir o processo de desmoronamento induzido.

Espero ter colaborado, mais uma vez, com o esforço que todos estão realizando para evitar o risco de ocorrência de mais vítimas.

Rio de Janeiro, 27 de julho de 2014.

Engenheiro Nelson Araujo Lima