

## **REFORÇO DE PILARES DE ELEVADO DO METRÔ DE SÃO PAULO**

Carlos Alberto M. Fernandes

Luécio Scandiuzzi

Arnold Freedy Steiner

Lucy Inês Olivan

Luis Gonçalves Clemente

Lia Marina Knapp

Cia. do Metropolitano de São Paulo

Maubertec Engenharia e Projetos Ltda.

### **RESUMO**

Fissuras junto aos consolos de apoio dos pilares do elevado da Linha 1-Azul (Norte-Sul), no trecho entre as Estações Santana e Armênia do Metrô de São Paulo, apresentaram um comportamento não estabilizado, com aumento de abertura e extensão. Investigações complementares das fissuras mais críticas mostraram que estas eram passantes.

A verificação do projeto constatou insuficiência de armadura do tirante horizontal nos pilares entre os consolos de apoio das vigas. A análise do modelo em elementos finitos comprovou o diagnóstico da patologia e apontou para um quadro progressivo de evolução das fissuras, indicando provável ruptura de barras da armadura horizontal. A abertura de janelas na estrutura demonstrou a existência de barras rompidas, corroborando o modelo de cálculo.

O reforço preconizado consistiu em protensão externa não-aderente, atravessando os consolos de apoio das vigas do elevado.

### **1 – DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA ANALISADA**

O trecho das vias metroviárias entre as Estações Santana e Armênia, incluindo os trechos pouco além dessas estações, é elevado. A estrutura desse elevado é composta por dois tabuleiros protendidos transversalmente suportados por duas vigas longitudinais singulares de seção caixão em concreto protendido. Cada uma dessas vigas apoia-se em suas extremidades nos pilares por meio de consolos. A transmissão aos pilares das cargas provenientes das longarinas dá-se através de aparelhos de apoio de elastômero fretado. Cada viga longitudinal comporta uma via do Metrô. As duas vigas longitudinais são ligadas entre si por duas transversinas, localizadas junto aos pilares de apoio.

## 2 – GEOMETRIA DOS PILARES

Os pilares que dão sustentação às vigas longitudinais são em concreto armado, de seção maciça, com dimensões variando ao longo de suas alturas na direção transversal e longitudinal às vias metroviárias. Os croquis das Figuras 1, 2 e 3 mostram a geometria desses pilares.

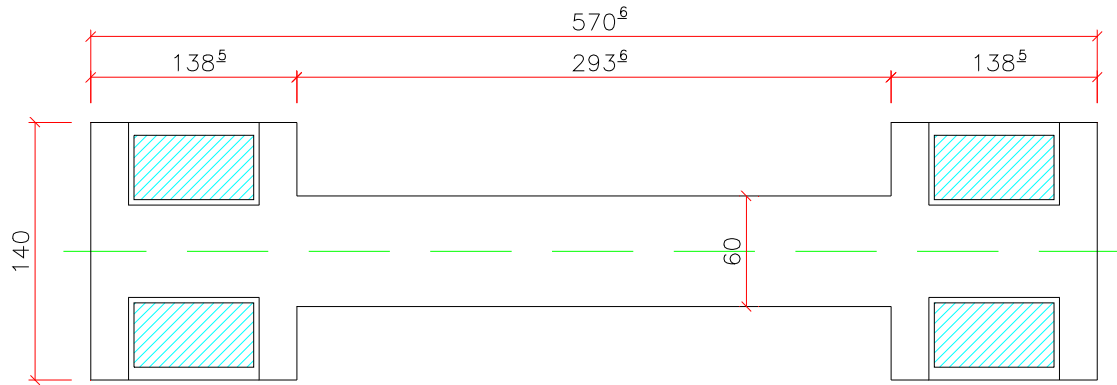


FIGURA 1 – Croqui do Pilar – Planta

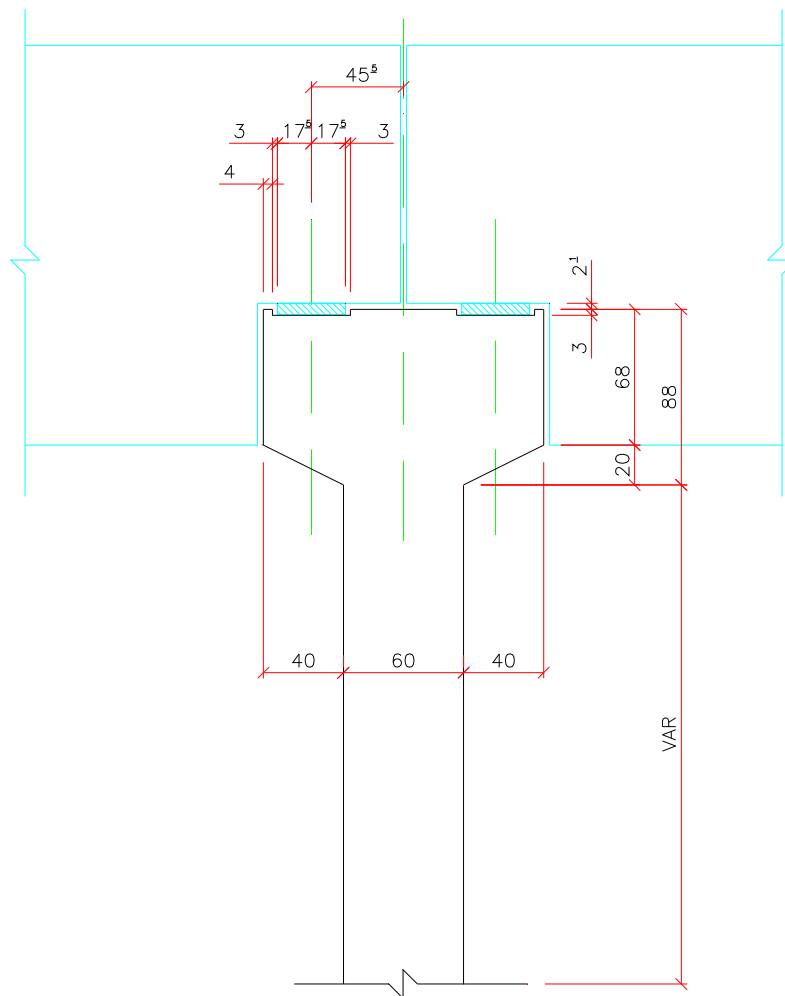
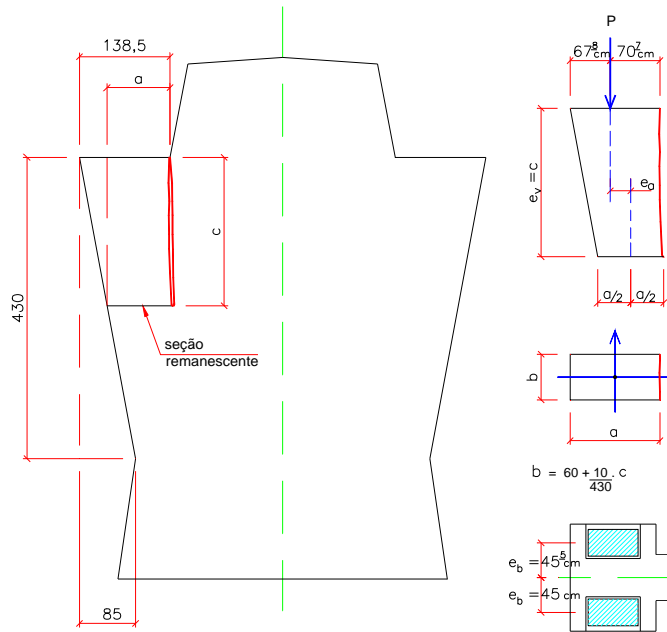


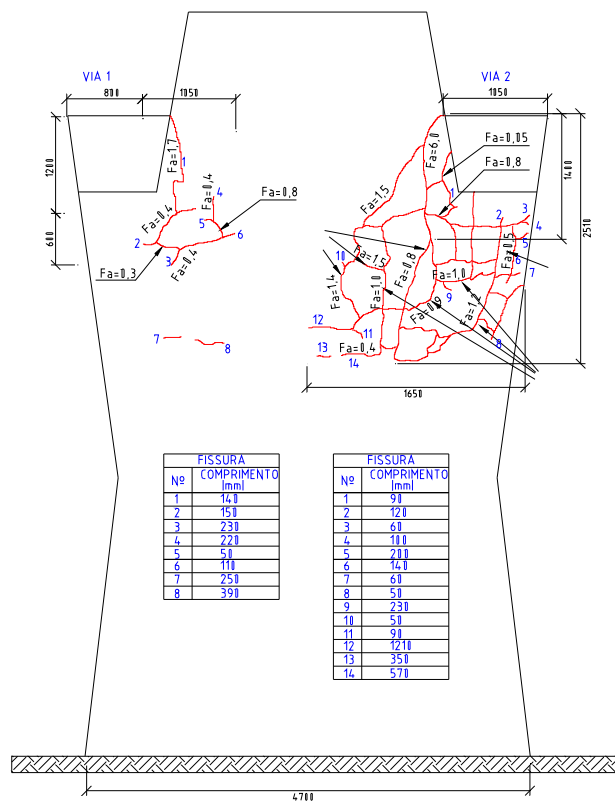
FIGURA 2 – Croqui do Pilar - Vista Lateral, Longitudinal às Vias





**FIGURA 4 – Configuração Típica das Fissuras Principais**

Após a constatação da existência sistemática destas fissuras principais, decidiu-se fazer uma “lavagem” com bomba de alta pressão das faces dos pilares para verificar o panorama geral da existência de fissuras secundárias em todos os pilares. A Figura 5 e a Foto 1 ilustram o resultado desta verificação comprovando a gravidade do problema.



**FIGURA 5 – Panorama de Fissuração principal e secundária na face norte do pilar P4**

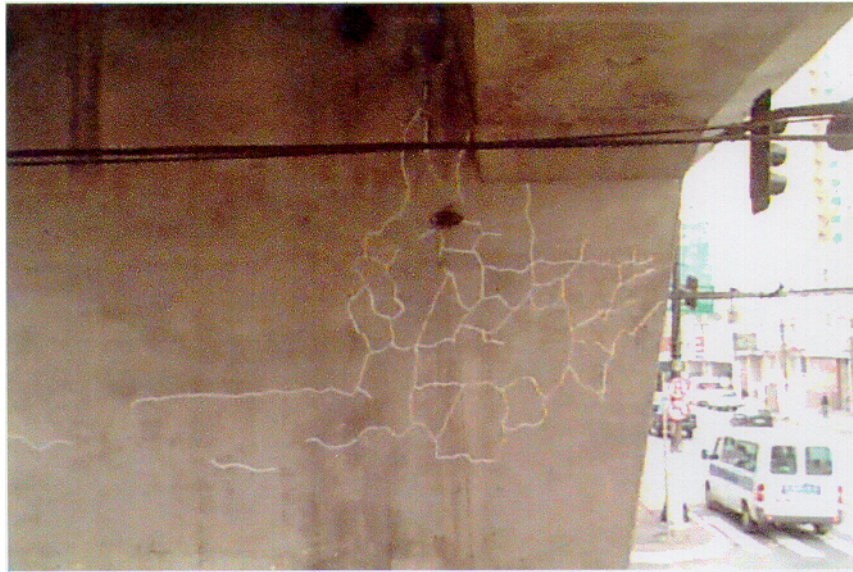


FOTO 1 – Fissuração principal e secundária do pilar P4, junto à Via 2

#### **4 – DESCRIÇÃO SUCINTA DO PROBLEMA ESTRUTURAL**

Analisando a geometria do pilar, constata-se que as fissuras, localizadas entre os consolos de apoio das vigas isostáticas da superestrutura e o corpo principal do pilar, ao serem passantes e de configuração aproximadamente vertical, podem levar à ruína o suporte das cargas do tabuleiro, caso ocorra a sua evolução.

A preocupação com a ruína do suporte do tabuleiro baseia-se no fato de que cada uma das fissuras, ao evoluir em comprimento, mantendo a configuração vertical e continuando a atravessar a seção transversal, secciona o pilar, reduzindo as dimensões em planta da seção resistente remanescente, pois as faces laterais dos pilares são inclinadas em direção ao seu centro como mostrado na Figura 4.

#### **5 - INVESTIGAÇÕES NOS PILARES**

Foram realizadas investigações de campo para verificar a movimentação das fissuras e verificações estruturais para identificar as causas das fissuras que se apresentam como sistemáticas nos pilares.

##### **5.1 – Investigações de Campo**

Como primeira investigação para o problema das fissuras, foram instalados relógios comparadores em dois pilares distintos: no segundo pilar a partir da Estação Carandiru em direção a Santana (Pilar P.21, em frente à entrada da Casa de Detenção na Av. Cruzeiro do Sul) e no quarto pilar a partir da Estação Santana em direção à Estação Carandiru (Pilar P.4, na esquina da Av. Cruzeiro do Sul com a R. Darzan).

No pilar próximo à Estação Carandiru, o defletômetro foi instalado na face sul do pilar, na fissura junto ao consolo do lado leste. Esta fissura pode ser considerada uma fissura de abertura média, dentre as fissuras observadas, isto é, com abertura da ordem de 0,7 mm.

No pilar próximo à Estação Santana, o defletômetro foi, por sua vez, instalado na face norte do pilar, na fissura junto ao consolo do lado oeste, que é aparentemente uma das fissuras mais críticas das que foram observadas e corresponde àquela que já foi acompanhada pelo Metrô.

As fissuras nos dois pilares foram acompanhadas durante uma hora com os defletômetros instalados. Durante esse período observou-se que a oscilação da agulha do relógio ocorrida quando da passagem dos trens metroviários, tanto pela via do lado do consolo quanto pela oposta, foi de aproximadamente 0,02mm no pilar próximo à Estação Carandiru e 0,04 mm no pilar próximo à Estação Santana.

Estas oscilações, além de pouco significativas, não podem ser consideradas necessariamente como uma movimentação da fissura, pois todo o pilar vibra quando da passagem dos trens, provocando, inclusive, a vibração do suporte do aparelho, e a leitura pode ser consequência da sensibilidade do relógio. Mas, de qualquer forma, a tendência apresentada nos dois pilares mostrou-se semelhante.

Complementares às medições descritas anteriormente, outras medições foram feitas na face Sul / Leste do P21 com o objetivo de se verificar deslocamentos relativos longitudinais das partes do pilar separadas pela fissura no plano vertical paralelo às vias do Metrô; outras duas medidas na face Leste/Sul foram feitas para se investigar o deslocamento relativo longitudinal entre as extremidades da longarina e do consolo do pilar.

Para as medições dos deslocamentos relativos longitudinais foram instalados relógios comparadores em quatro posições distintas.

As leituras indicaram deslocamentos relativos das bordas da fissura no plano paralelo às vias, quando da passagem do trem pela via 1, com amplitude de 0.11 mm. Essas medidas, se comparadas às de abertura da fissura, chegam a ser 5 vezes maiores, considerando-se as variações de abertura com valor aproximado de 0,02 mm.

No caso da investigação feita para verificar se as fissuras são passantes, foi empregado o método de injeção de água sob pressão. Para o pilar P.4, esta investigação foi feita junto à fissura do lado oeste.

O ensaio de injeção de água, feito para a fissura oeste da face norte do pilar P.4, indicou que esta é passante, devendo-se, portanto, proceder a uma análise mais profunda do problema em questão, já que as fissuras são sistemáticas no trecho em estudo.

## **5.2 – Verificações Estruturais**

A verificação estrutural do projeto dos pilares correntes teve por objetivo identificar as causas das fissuras e analisar o seu efeito no comportamento estrutural dos pilares.

Uma primeira avaliação das armaduras dos pilares levou à constatação de que a armadura horizontal dos pilares, na altura do nível superior dos consolos, aparentemente é insuficiente para cumprir a função de tirante entre os pontos de aplicação das cargas provenientes da superestrutura.

A verificação mais aprofundada do projeto estrutural baseou-se na obtenção do campo de tensões, considerando estado plano de tensões, através de um modelo estrutural plano pelo Método dos Elementos Finitos.

Foi utilizado o programa STRAP para essa análise estrutural, dentro de uma linha de modelos hierárquicos, partindo de um modelo mais simples para um modelo mais completo. Nesse panorama previa-se as análises de modelos elásticos lineares e em seguida a de modelos não-lineares – modelos visco-elásticos e elasto-plásticos – considerando o escoamento das barras das armaduras existentes.

Para as análises não-lineares poderiam ser utilizadas outras ferramentas computacionais que possibilitam tais análises como, por exemplo, o ANSYS, ADINA e NASTRAN. Porém não foram necessárias outras análises, pois os resultados dos processamentos elástico-lineares mostraram-se suficientes para a explicação das fissuras sistemáticas existentes nos pilares.

De forma qualitativa analisou-se também o problema pelo programa FRANC – FRacture ANalysis Code - considerando a progressão das fissuras pelo Método dos Elementos Finitos e pela Mecânica da Fratura.

Os resultados das análises estruturais foram posteriormente comprovadas por investigações de campo.

Outro estudo efetuado foi o de verificar a segurança, para diversos comprimentos de fissura, considerando a parte externa do pilar isolada pela fissura e analisando-a como uma peça linear isolada para resistir às solicitações de carregamento de projeto.

### **5.2.1 – Modelos Estruturais no STRAP**

A análise do projeto estrutural foi desenvolvida num modelo estrutural plano pelo Método dos Elementos Finitos para a obtenção do campo de tensões elástico-lineares considerando estado plano de tensões. Nessa análise pelo Método dos Elementos Finitos através do programa STRAP foram realizados 6 processamentos considerando o modelo estrutural com e sem abertura de fissuras e também a inclusão ou não de barras de armadura para

cada uma dessas considerações. A Tabela 1 mostra a seqüência de modelos efetuada para a análise estrutural.

<b>Modelos</b>	<b>Descrição do Modelo</b>
1	Sem fissura e sem a consideração das barras de armadura.
2	Sem fissura e com a consideração das barras de armadura.
3	Fissura com comprimento de 20 cm e com a consideração das barras de armadura (elementos das barras na fissura com 1 cm de comprimento).
4	Fissura com comprimento de 20 cm e com a consideração das barras de armadura (elementos das barras na fissura com 20 cm de comprimento).
5	Fissura com comprimento de 120 cm e com a consideração das barras de armadura (elementos das barras na fissura com 1 cm de comprimento).
6	Fissura com comprimento de 120 cm e com a consideração das barras de armadura (elementos das barras na fissura com 20 cm de comprimento).

**TABELA 1 – Modelos Estruturais no STRAP**

Os resultados dos modelos 1 e 2 – sem fissura – indicam um campo de tensões de tração não absorvido pela armadura do projeto executivo dos pilares.

Nos modelos com fissura e com armadura, os esforços de tração nas barras da armadura resultaram acima do limite de escoamento do aço, julgando-se desnecessário proceder a análises não-lineares, pois a ruptura que se prenunciava foi comprovada em campo posteriormente e julgou-se não ser necessário avançar hierarquicamente em termos de modelo estrutural.

Constatou-se um panorama progressivo de tensões nos modelos fissurados e a necessidade de ferramentas apropriadas para detectar a progressão das fissuras, pois o campo de tensões junto às fissuras apresenta singularidades próprias do modelo fissurado. Para isso foram realizadas as análises apresentadas nos itens seguintes: Modelo Qualitativo de Fraturamento e Verificação da Segurança com o Avanço da Fissura.

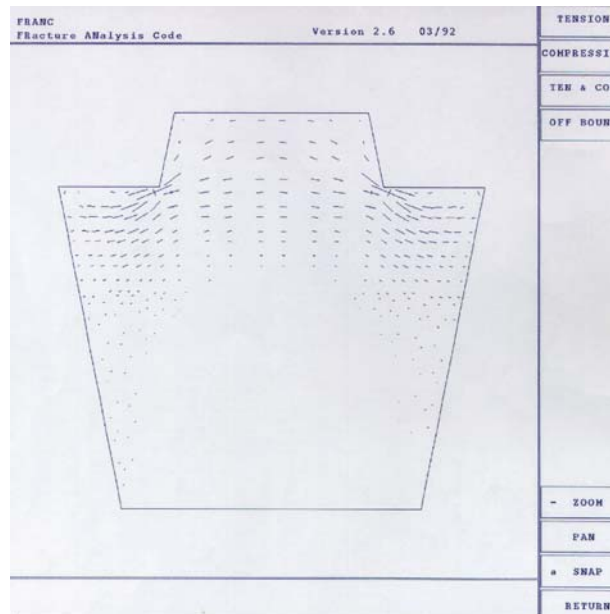
### **5.2.2 – Modelo Qualitativo de Fraturamento**

As fissuras mostram-se sistemáticas, e identificada a origem das mesmas pelo modelo estrutural no STRAP, procurou-se determinar o caminhamento dessas fissuras através de um modelo estrutural via Método dos Elementos Finitos considerando a Mecânica da Fratura. O programa FRANC – FRacture ANalysis Code – foi utilizado para tal análise.

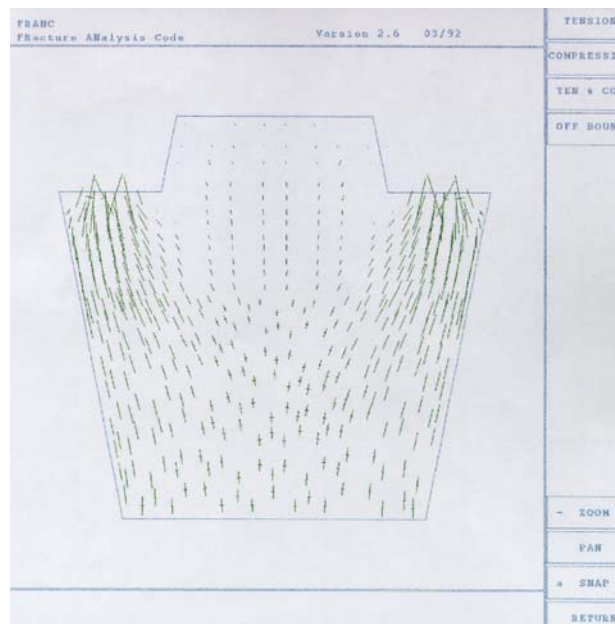
A análise, de forma qualitativa, mostrou uma evolução do quadro de fissuras com uma configuração muito semelhante à configuração das fissuras reais em estudo, detectadas na inspeção visual de campo.



As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, o caminhamento das tensões de tração e compressão no modelo estrutural dos pilares correntes. Na Figura 6 o caminhamento das tensões de tração mostram um arqueamento, previsto, dos esforços do consolo para a região central superior do pilar mostrando um pico de tensões que justifica o início da fissuração.



**FIGURA 6** – Tensões de Tração no Modelo Estrutural do FRANC

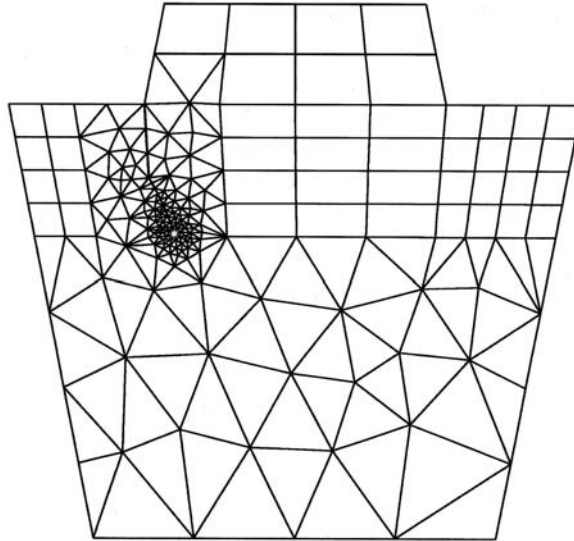


**FIGURA 7** – Tensões de Compressão no Modelo Estrutural do FRANC

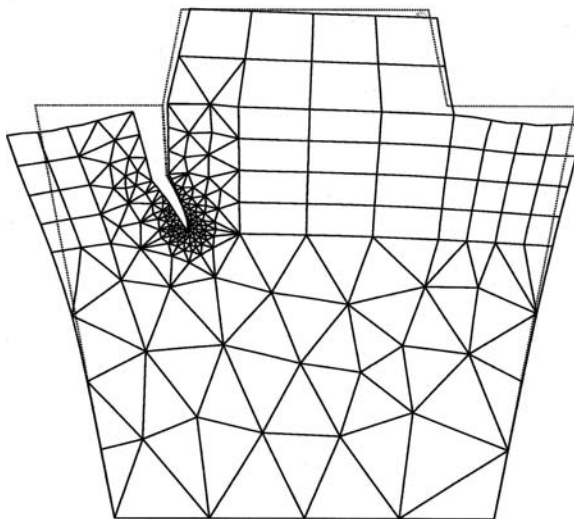
As Figuras 8 e 9 mostram a evolução das fissuras após a introdução de uma fissura vertical na região do consolo. O programa analisa, qualitativamente nesse processamento, a propagação da fissura considerando um modelo da Mecânica da Fratura. Mostra-se a tendência de caminhamento das fissuras em direção ao centro do pilar. Esse fenômeno,

previsto pelo modelo plano, representa a superposição dos efeitos dos modos de fraturamento I (flexão) e II (cisalhamento).

A análise apenas qualitativa, sem a determinação rigorosa de uma instabilidade na progressão das fissuras através do Fator de Intensidade de Tensão dos respectivos modos de fraturamento, justifica-se, pois caracteriza a fissura real e comprova as conclusões já obtidas, suficientes para a tomada de decisão quanto ao problema.



**FIGURA 8** – Evolução da Fissura no Modelo Estrutural do FRANC



**FIGURA 9** – Deformada do Modelo Evolutivo Fissurado do FRANC

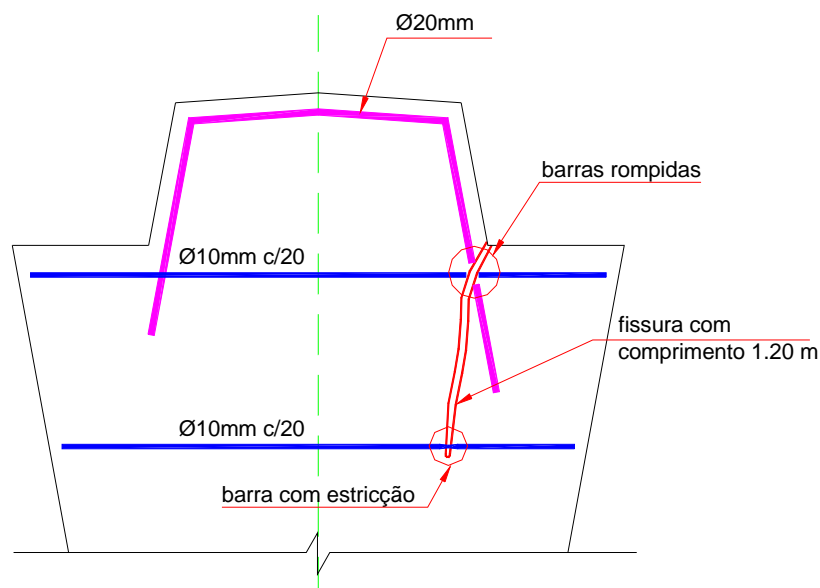
### **5.2.3 – Comprovação de Campo das Verificações Estruturais**

Pela constatação resultante do modelo estrutural de que os esforços de tração eram muito elevados junto ao início da fissura, decidiu-se pela abertura de janelas no topo e na extremidade inferior de uma das quatro fissuras dos pilares P4, P21 e P25. A escolha

desses pilares para averiguação objetivou investigar as fissuras mais críticas detectadas pela inspeção visual e que já haviam sido submetidas a outras análises de comportamento. Nessas investigações constatou-se a ruptura de algumas barras da armadura na região superior da fissura, conforme preconizado pelos resultados obtidos do modelo estrutural, em que os esforços de tração nas barras da armadura horizontal junto ao início da fissura levavam a tensões na armadura além da tensão de escoamento do aço.

Nos pilares P4 e P25 as janelas superiores mostram o rompimento da barra da armadura horizontal ( $\phi 10$  mm – CA50), Foto 2, sendo que no pilar P4 também a barra ( $\phi 20$  mm – CA50) paralela à face lateral do complemento superior do pilar se encontra rompida. No pilar P21 a barra superior ainda não se encontra rompida.

Nos três pilares, as janelas abertas na extremidade inferior das fissuras revelaram que as barras horizontais localizadas na extremidade das fissuras não se encontram rompidas, porém no pilar P4 já é evidente a estrição da mesma, como ilustrado no croqui da Figura 10.



**FIGURA 10** – Croqui das Barras Rompidas do P4



**FOTO 2** – Ruptura com Espaçamento de 5 mm na Barra Horizontal do P25.

#### **5.2.4 – Verificação da Segurança com o Avanço da Fissura**

Procurou-se avaliar, para diversos comprimentos de fissura, a segurança atual dos pilares, considerando-se a parte externa do pilar isolada pela fissura, como uma peça linear resistindo às solicitações do carregamento de projeto transmitidas pelas vigas longitudinais. A armadura vertical e as dimensões em planta foram consideradas conforme a geometria resultante da propagação vertical da fissura.

### **6 – CONCLUSÕES**

A ocorrência de fissuras verticais, localizadas entre os consolos de apoio das vigas longitudinais da superestrutura e o corpo principal do pilar, é sistemática nos pilares do Elevado Norte-Sul entre as Estações Santana e Tiradentes, ocorrendo com maior ou menor intensidade, tanto junto aos consolos do lado oeste como leste e tanto na face norte como sul dos pilares.

Essas fissuras são passantes e progressivas. Esse processo evolutivo compromete a segurança da estrutura e pode levar à ruína o suporte das cargas do tabuleiro. Essa ruína do suporte do tabuleiro baseia-se no fato de que cada uma das fissuras, mantendo a configuração aproximadamente vertical e sendo passante, secciona o pilar. A seção

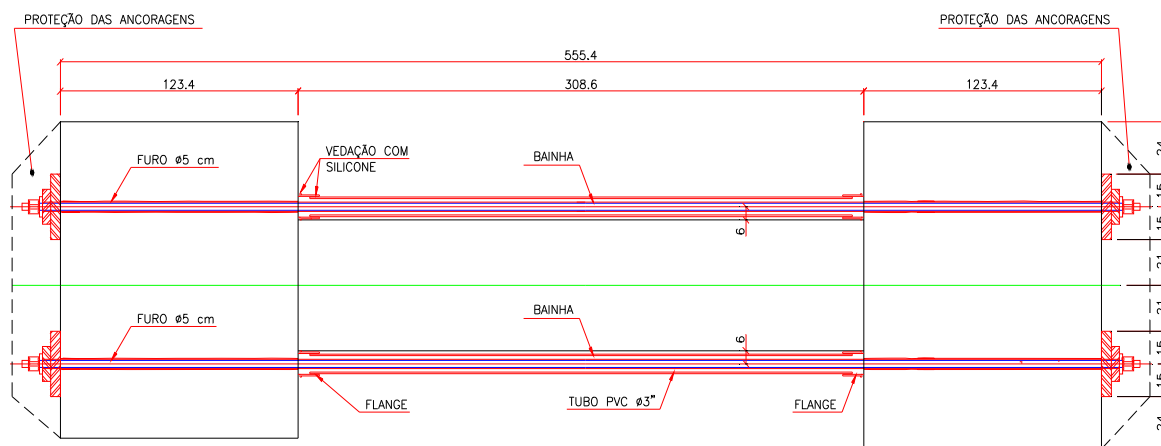
resistente remanescente, correspondente a cada uma das vias, passa a ser aquela delimitada pelas faces norte e sul, a face leste ou oeste e a fissura. Ao evoluir gradativamente em comprimento, as fissuras acarretam uma redução das dimensões em planta da seção resistente, pois as faces laterais dos pilares são inclinadas em direção ao seu centro, levando a uma diminuição da seção resistente remanescente e a um aumento progressivo dos esforços solicitantes decorrente do aumento da excentricidade das cargas em relação ao centro da seção resistente.

Face aos estudos, investigações e avaliações efetuadas, concluiu-se que é necessário reforçar estruturalmente os pilares do Elevado Norte-Sul entre as Estações Santana e Tiradentes, visto que no tipo de estrutura desse elevado não existe a possibilidade de um reequilíbrio estrutural.

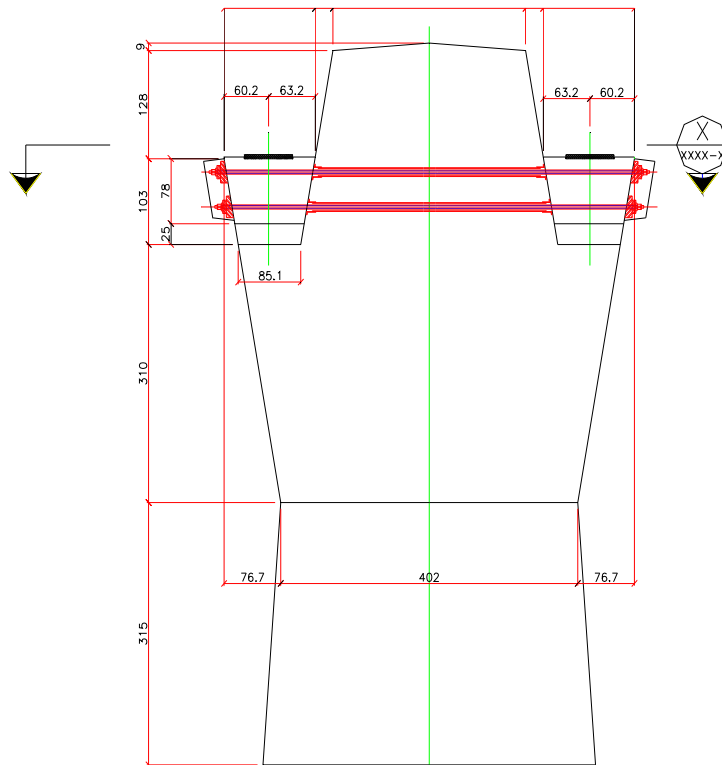
Durante o período de andamento das providências para execução do reforço nos pilares, as fissuras mais críticas localizadas nos pilares P4, P18, P21 e P25 estão sendo monitoradas para acompanhamento de sua evolução.

## 7 – SEQUÊNCIA BÁSICA DO PROJETO DE REFORÇO

A solução adotada para o reforço dos pilares foi realizar protensão externa utilizando 4 cabos de protensão ancorados nos consolos e externos aos pilares, conforme mostrado esquematicamente nas Figuras 11 e 12 a seguir.



**FIGURA 11 - Projeto de Reforço do Pilar - Planta**



**FIGURA 12 - Projeto de Reforço do Pilar - Elevação**

Basicamente os serviços de reforço dos pilares obedecerão à seqüência assim estabelecida:

- execução de injeção das fissuras dos pilares com aberturas superiores a 0,3 mm;
- escarificação das superfícies laterais dos consolos dos pilares para a execução de furos destinados à introdução das bainhas;
- execução de furos nos consolos dos pilares;
- instalação das bainhas e das chapas de ancoragem;
- instalação dos cabos;
- protensão;
- injeção das bainhas com calda de cimento;
- proteção das cabeças de ancoragem.