FISSURAÇÃO EM VIADUTOS E PONTES DE CONCRETO ARMADO OU PROTENDIDO: ALGUNS CASOS E SUAS SOLUÇÕES

Thomaz, E. C. S.[1]; Carneiro, L. A. V.[2]

[1] Instituto Militar de Engenharia, Professor Emérito, e-mail: ecsthomaz@terra.com.br
[2] Instituto Militar de Engenharia, Professor D. Sc., e-mail: carneiro@ime.eb.br

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo apresentar alguns casos de manifestações patológicas relacionadas à fissuração do concreto em elementos estruturais de viadutos e pontes de concreto. São comentados 14 casos ocorridos em viadutos e pontes rodoviárias ou ferroviárias de concreto armado ou protendido, onde se relatam os problemas encontrados, as causas da fissuração e as possíveis soluções para estes casos. Há causas de fissuração do concreto relacionadas à corrosão das armaduras internas pela entrada de agentes agressivos no concreto ou pela corrente elétrica de fuga, e à insuficiência de armadura pela falha em projeto, detalhamento e dimensionamento ou em emenda das armaduras principais das longarinas. Verificou-se neste trabalho que a maioria das causas de fissuração se deve a falhas no projeto, detalhamento e dimensionamento dos elementos estruturais que compõem viadutos e pontes de concreto armado ou protendido rodoviários ou ferroviários.

Palavras chave: Casos; fissuração; concreto armado; concreto protendido; pontes.

ABSTRACT

This work aims at presenting some cases of pathological manifestations related to concrete cracking in structural elements of concrete bridges and overpasses. Fourteen cases from road or rail overpasses and bridges of reinforced or prestressed concrete are reported and its problems encountered, causes of cracking and possible solutions are discussed . There are causes of concrete cracking related to internal reinforcement corrosion by the entry of aggressive agents into the concrete or by leakage electrical current, and to lack of reinforcement by poor design and detailing or insufficient reinforcement anchorage inside of beams. It was found in this study that most causes of cracking is due to failures in design and detailing of structural elements of road or rail overpasses and bridges of reinforced or prestressed concrete.

Keywords: Cases; cracking; reinforced concrete; prestressed concrete; bridges.

1. INTRODUÇÃO

Cada tipo de fissuração em estruturas de concreto tem suas causas, que devem ser conhecidas para que se chegue a uma solução adequada para a recuperação destas estruturas.

Alguns desses tipos de fissuração são muito freqüentes e podem ser observados em grande número de obras semelhantes. Com a análise de diversos casos reais de fissuração, pode-se identificar alguns dos cuidados que devem ser tomados para bem projetar, detalhar, e executar estruturas de concreto armado e protendido.

Ao se projetar uma estrutura de concreto armado ou protendido, é usual fazer apenas a verificação da abertura das fissuras de flexão. Isso induz ao engenheiro projetista de estruturas utilizar simplesmente de algumas fórmulas rotineiras, sem analisar as causas da fissuração do concreto.

A conseqüência desse modo de projetar é a repetição, ao longo do tempo, de falhas em obras de concreto armado ou protendido. Algumas destas falhas, já observadas em obras antigas, não são, no entanto, citadas em livros, em revistas e em cursos de graduação de engenheiros.

Alguns casos reais de manifestações patológicas relacionadas à fissuração do concreto em viadutos e pontes de concreto rodoviárias ou ferroviárias de concreto armado ou protendido, vivenciados pelo primeiro autor ao longo de sua vida profissional, são apresentados neste trabalho. São comentados quatorze casos, onde se relatam os problemas encontrados, as causas da fissuração e as possíveis soluções para estes casos. Não foram colocadas as fotos destes casos reais para se evitar problemas associados à justiça, mas sim expostos desenhos.

2. FISSURAÇÃO DO CONCRETO

A seguir, de acordo com a localização das fissuras nos elementos estruturais de viadutos e pontes rodoviárias ou ferroviárias de concreto armado ou protendido, são listados os casos reais de fissuração do concreto.

2.1 Dentes Gerber

A Figura 1 mostra um caso sobre fissuração em viaduto ou ponte com dente Gerber. Fissuras inclinadas a 45^{o} em relação ao eixo longitudinal da longarina a partir do canto interno do dente Gerber foram causadas por armadura interna de suspensão insuficiente.

As armaduras de dentes Gerber devem ser calculadas com base em um modelo de treliça, semelhante ao sugerido por SCHLAICH (1984). Deste modelo, por exemplo, resulta que a força de tração Z_v na armadura de suspensão é maior do que a reação de apoio A, conforme mostra a Figura 2.

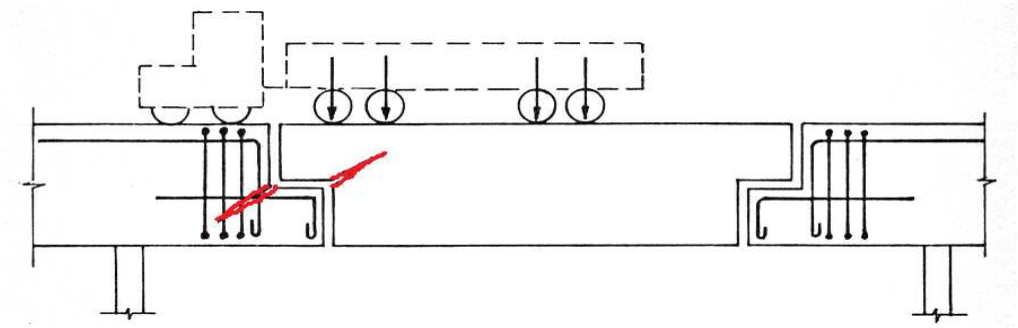


Figura 1: Fissuras inclinadas a 45º em dentes Gerber de longarina de viadutos ou pontes.

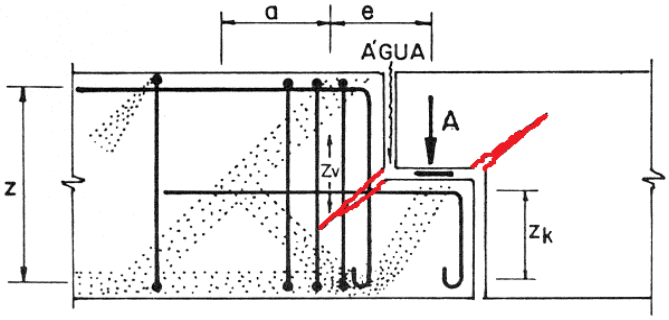


Figura 2: Esquema de modelo de treliça e distribuição de forças segundo SCHLAICH (1984).

A força de tração Z_v na armadura de suspensão, conforme a Figura 2, é função direta da reação de apoio A e dada por:

$$Z_v = A\left(1 + \frac{e}{a}\frac{z - z_k}{z}\right) \qquad (1)$$

A armadura de suspensão mal dimensionada conduz a fissuras com grandes aberturas. O correto dimensionamento e a adequada ancoragem da armadura longitudinal são importantes para não ocorrerem fissuras com grandes aberturas. Como solução, sugere-se o reforço dos dentes Gerber em função da quantidade insuficiente e do incorreto detalhamento das armaduras internas.

Há casos de corrosão das armaduras internas dos dentes Gerber pela entrada de água nas fissuras de grandes aberturas, o que leva à diminuição da capacidade resistente destes, podendo acarretar ruptura dos mesmos.

2.2 Cantos de Vigas

Devido à falta de armadura no canto de viga de pontes de concreto armado ou protendido para combater as grandes tensões de compressão no apoio, fissuras inclinadas a 45º, em relação ao

eixo longitudinal da viga, tangentes à armadura dobrada ou à placa de ancoragem dos cabos de protensão podem ser vistas na Figura 3.

Como solução, deve-se projetar o apoio com largura adequada de modo que o início da curva da barra de aço se dê além da extremidade da placa de apoio. No caso de concreto protendido, o cabo de protensão mais baixo deve ter uma posição tal que a placa de apoio fique além da cunha crítica.

Esse tipo de fissuração é muito freqüente, podendo ser considerado como uma falha grave de detalhamento das armaduras.

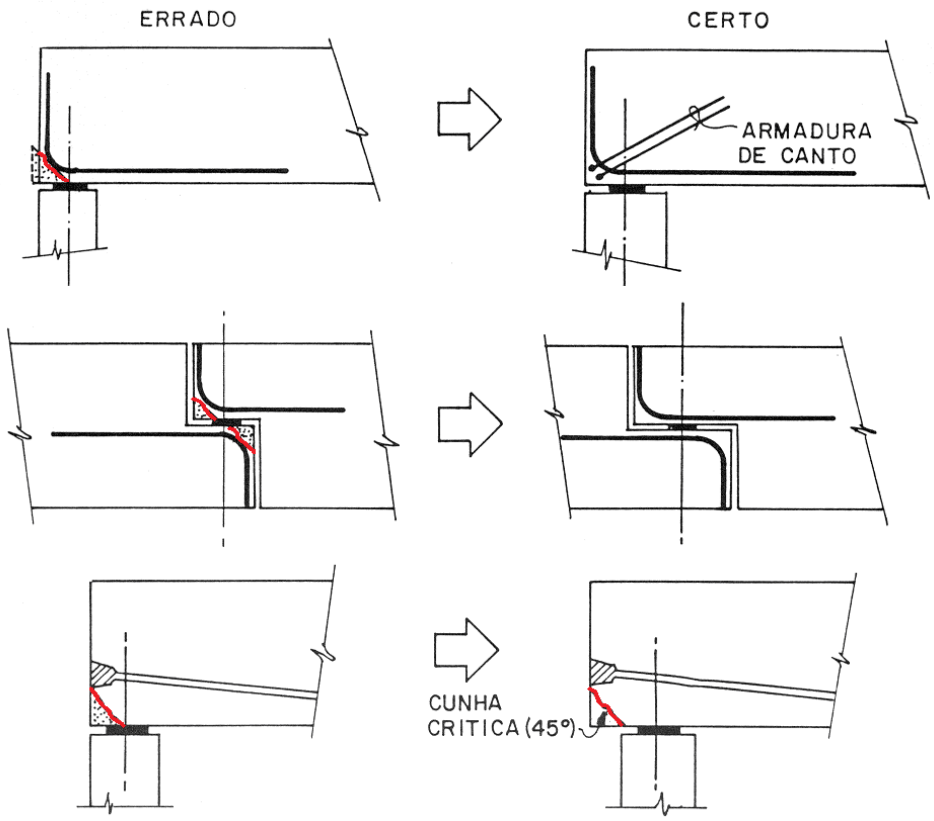


Figura 3: Fissuras inclinadas a 45º em canto de viga de pontes de concreto armado ou protendido.

2.3 Transversina sobre Apoios

A Figura 4 apresenta um caso de fissuração vertical ao longo da face da transversina sobre apoios de viadutos ou pontes de concreto protendido por conta da deformação excessiva do escoramento.

Na fase inicial de concretagem, o concreto da viga já endurecido e sem protensão é solicitado à flexão por parte da carga proveniente da concretagem da laje superior (fase 3 da concretagem).

Projetar alguns cabos de protensão que permitam uma protensão após o endurecimento do concreto da viga ou armadura comum de aço passivo colocada dentro da viga (fase 2 da concretagem) é uma possível solução para limitar a abertura dessas fissuras.

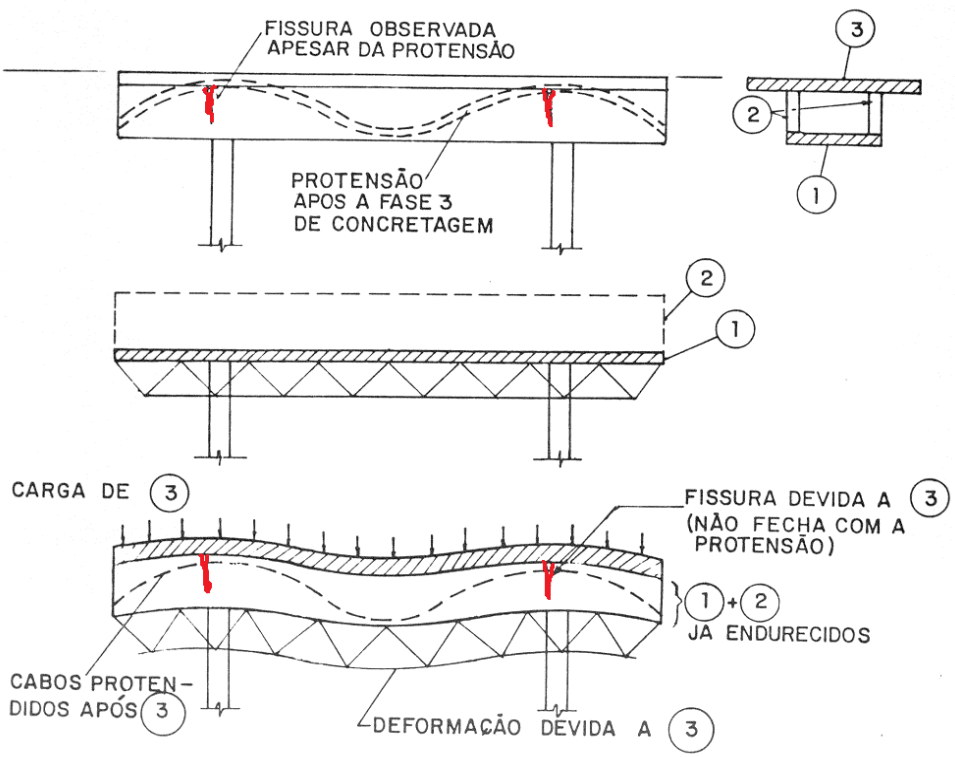


Figura 4: Fissuras verticais sobre apoios em viadutos ou pontes de concreto protendido.

2.4 Alma de Vigas

Fissuras verticais na região da meia altura de vigas de viadutos e pontes de concreto armado em função da insuficiência da armadura de pele (ferros de costela) podem ser visualizadas na Figura 5.

Segundo a norma ABNT NBR 6118: 2007 em cada face da alma da viga, sua armadura mínima de pele deve ser 0,10% da área da seção transversal da viga. A abertura dessas fissuras é variável ao longo da altura da viga. É praticamente nula junto à armadura principal de flexão, cresce sendo máxima na região de meia altura e decresce próxima à região da linha neutra, o que lhe confere uma forma de "lente convexa".

Uma solução é injetar material à base de epóxi nas fissuras. Para estruturas com grandes cargas variáveis em relação às cargas permanentes, as fissuras são ativas e sofrem grande variação. Neste caso, não basta apenas injetar material à base de epóxi nas fissuras, mas protender a estrutura.

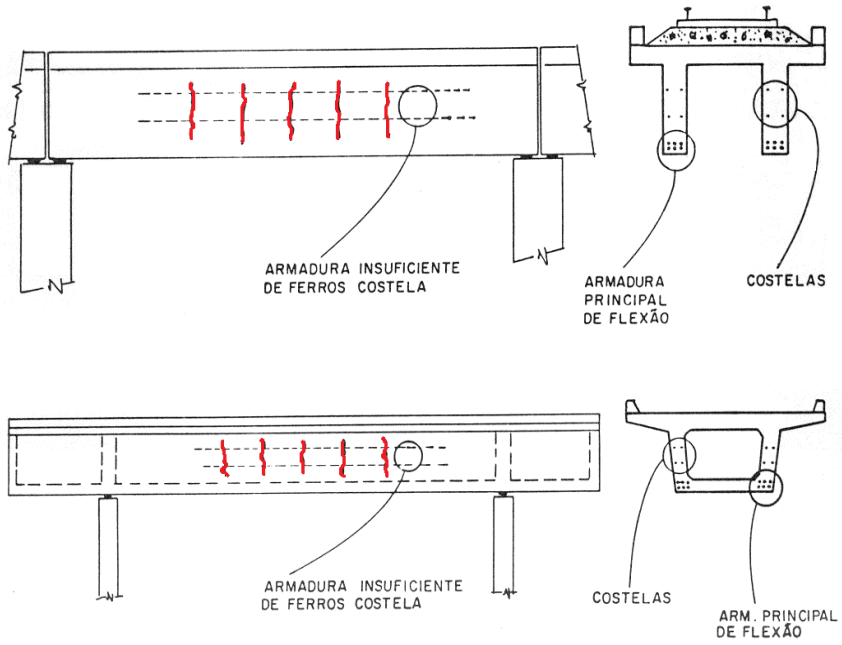


Figura 5: Fissuras verticais na região da meia altura de vigas de viadutos e pontes de concreto armado.

Outro caso de fissuras verticais é ilustrado na Figura 6. Ao ser concretada a laje superior (fase 3), o tirante da fôrma recebe um acréscimo de carga ΔP. Sendo o tirante pouco rígido, o resultado é um grande deslocamento Δl e uma rotação de todo o segmento já concretado, provocando o aparecimento das fissuras verticais.

O uso de tirante de grande seção transversal, ou seja, de elevada rigidez axial E.A e de armadura de pele (horizontal, ferros de costela) entre os segmentos é uma solução para diminuir o deslocamento Δl e, assim, evitar o aparecimento dessas fissuras.

Para o caso de fissuras já existentes, faz-se necessário preenchê-las para proteção dos cabos que atravessam a seção fissurada contra a corrosão e para garantia da transmissão da força cortante.

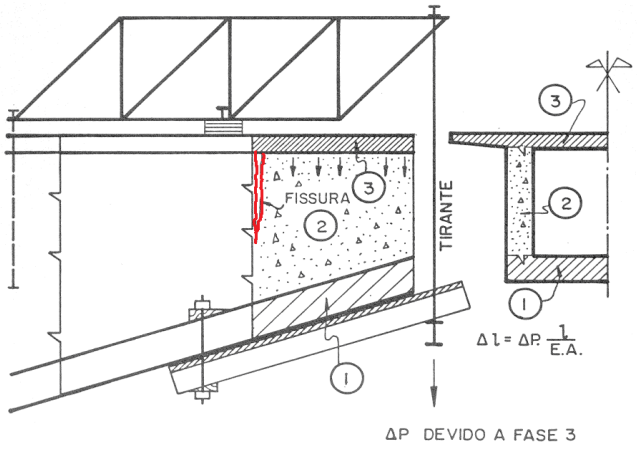


Figura 6: Fissuras verticais na alma de vigas de pontes em balanços sucessivos.

Fissuras e queda do cobrimento ao longo das barras longitudinais e ao longo dos estribos em viga de uma ponte ferroviária, após nove anos de uso, podem ser vistas na Figura 7.

A estrutura trata-se de um pórtico de concreto armado contínuo, com 220 m de comprimento, sem qualquer junta e com vãos de 10 m. A ponte servia de acesso aos trens, que transportavam as matérias primas para uma fábrica de cimento.

A causa dessas fissuras é devido a correntes de fuga. A corrente de retorno deveria passar pelos trilhos, mas as juntas dos trilhos tinham ligações elétricas de cobre, que foram roubadas. A corrente elétrica de retorno passou para a armadura da estrutura. As fissuras foram causadas pela corrosão eletrolítica das barras de aço e pelo conseqüente aumento de volume dos óxidos produzidos pela corrosão.

Segundo GENTIL (1996), as correntes de fuga que causam mais danos são as correntes contínuas e as correntes alternadas de baixa freqüência. Estima-se que uma corrente alternada de 60 Hz cause cerca de 1% do dano produzido por uma corrente contínua equivalente.

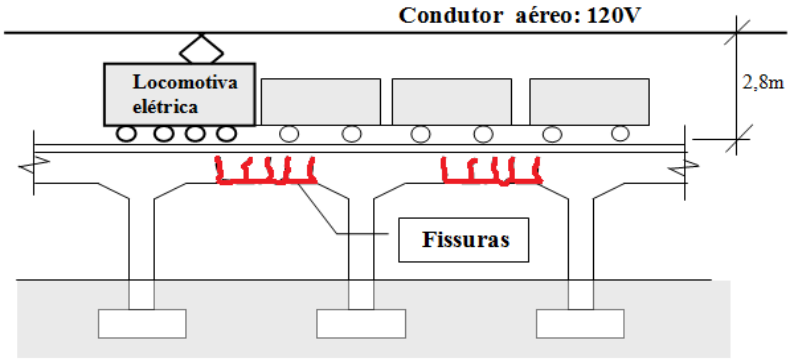


Figura 7: Fissuras e queda de cobrimento ao longo das barras na alma de viga de ponte ferroviária.

Na Figura 8 pode ser visto um esquema elétrico de como as correntes percorrem ao longo das armaduras da estrutura de concreto armado, em uma adaptação do esquema de GENTIL (1996) e DUTRA (1968) *apud* GENTIL (1996).

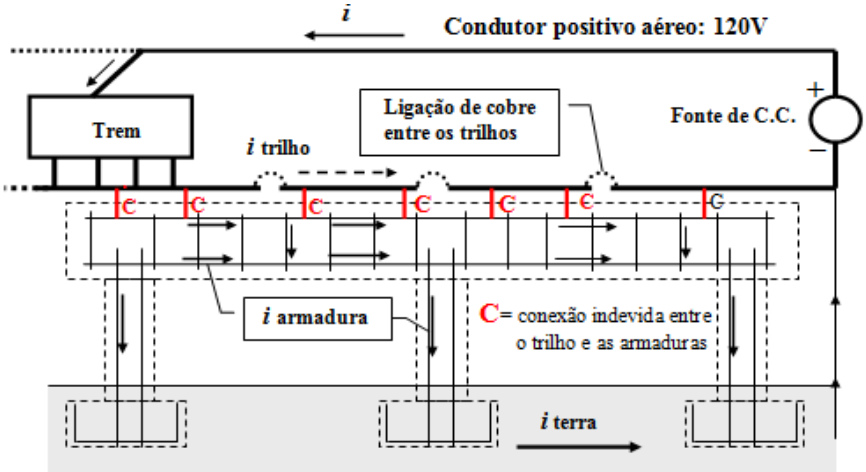


Figura 8: Esquema elétrico das correntes elétricas percorrendo na estrutura da ponte ferroviária.

Quando o trilho é contínuo, a corrente de retorno no trilho é grande e as correntes de retorno, na estrutura e na terra, são mínimas. Assim, não há danos à estrutura.

No caso dos trilhos possuírem juntas de dilatação, usam-se conexões elétricas de cobre entre os segmentos de trilho. Se essas ligações elétricas forem deficientes, forma-se uma grande seqüência de resistências elétricas em série. Isto causa uma redução da corrente de retorno nos trilhos e, em conseqüência, um aumento da corrente de retorno na estrutura e na terra.

Na obra da Figura 7, as ligações de cobre entre os trilhos foram roubadas. A corrente de retorno através dos trilhos ficou nula e toda a corrente de retorno se instalou nas barras de aço da armadura da estrutura. A corrosão eletrolítica se instalou na armadura da estrutura, o que gerou aumento de volume dos óxidos formados no anodo, levando ao destacamento do cobrimento de concreto. A armadura longitudinal de 30 mm de diâmetro tinha intensa corrosão nos pontos de contato com os estribos.

GRAF (1949) recomenda as seguintes medidas de proteção para as estruturas de concreto armado sujeitas a correntes elétricas:

- concreto sem qualquer armadura pode ser considerado como imune à ação da eletricidade. Concreto rico em cimento e mantido seco tem boa resistência à ação da eletricidade;

- antes de tudo, deve-se proteger o concreto contra a umidade. Nessas condições, a condutibilidade elétrica do concreto é baixa. Qualquer umidade aumenta a condutibilidade elétrica do concreto;

- não usar, no concreto, aditivos que tenham cloreto de sódio ou cloreto de cálcio, pois a condutibilidade elétrica aumenta muito. O risco de degradação da estrutura cresce muito se for adicionado 1% de cloreto de sódio ou de cloreto de cálcio;

- suportes de cabos elétricos, quando são fixados em estruturas de concreto, devem ser isolados eletricamente. Não é correto “aterrar” nas armaduras da estrutura de concreto armado, como muitos recomendam;

- ao projetar linhas férreas elétricas, que passem sobre pontes e viadutos, deve-se prever um bom revestimento isolante sobre a laje do tabuleiro. Pode-se usar, por exemplo, asfalto ou outro material betuminoso. Não fazer a colocação dos trilhos diretamente sobre o concreto armado.

A Figura 9 apresenta um caso de ocorrência de uma única fissura vertical no centro do vão isostático da viga de uma ponte ferroviária de concreto armado com estribos inclinados. A fissura, na forma de uma lente convexa, começava pouco acima da armadura principal de flexão e terminava embaixo da laje superior comprimida. Sua abertura máxima era de 0,6 mm, na região da meia altura da alma da viga, e podia ser vista por uma pessoa dentro de um carro na rodovia.

A causa dessa fissura deve-se a armadura de pele (ferro de costela) insuficiente, praticamente inexistente. Em vigas de seção transversal “T”, a linha neutra situa-se próxima da laje

comprimida. Assim, a alma da viga fica toda tracionada, sem uma armadura adequada. Na parte inferior da viga, a fissura é muito pequena e quase invisível a olho nu.

Na fase de projeto, deve-se usar armadura de pele em quantidade suficiente. Em obra já pronta, para este tipo de ponte ferroviária, a abertura da fissura aumenta durante a passagem do trem de carga, o que caracteriza a fissura como ativa. No meio do vão, o momento de flexão, devido à carga móvel, é grande e a fissura volta a abrir quando da passagem do trem de carga. A fissura, no entanto, não reduz a resistência ao momento de flexão. Em contrapartida, na seção meio do vão, a força cortante devido à carga móvel é muito pequena. A alma da viga, porém, com uma fissura de grande abertura, perde parte da sua capacidade de transmitir a força cortante.

Na obra em questão, optou-se por fazer uma injeção de resina epóxi e em seguida aplicar um revestimento elástico, sem função estrutural, com a finalidade de evitar a penetração de agentes agressivos provenientes da atmosfera e das descargas dos veículos da rodovia.

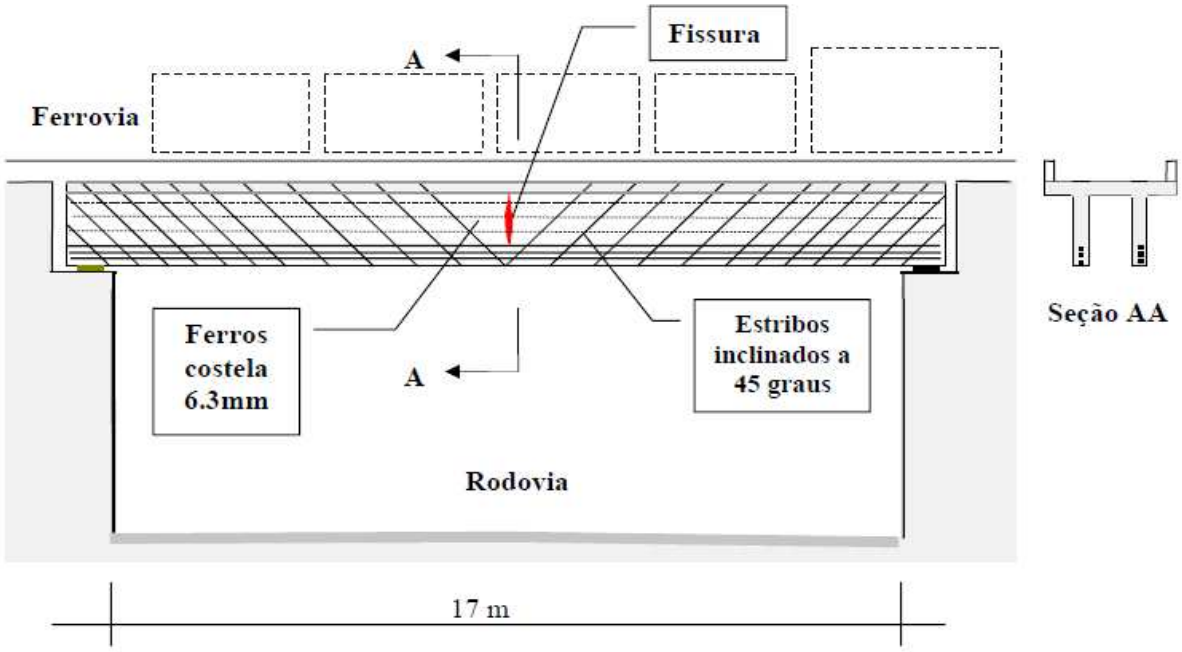


Figura 9: Fissura vertical em ponte ferroviária de concreto armado com estribos inclinados.

2.5 Laje Superior

A Figura 10 mostra um caso de fissuras transversais ao eixo longitudinal, no concreto *in situ* da laje superior, em pontes com vigas pré-moldadas em concreto protendido com duas fases de protensão.

As tensões de tração decorrentes da retração do concreto *in situ* adicionadas às causadas pela segunda fase de protensão podem atingir a resistência do concreto à tração. Como se usa, em geral, pouca armadura longitudinal na laje concretada *in situ*, surgem fissuras com grande abertura.

Assim, como sugestão para solução desse problema, sugere-se calcular as armaduras longitudinais da laje superior segundo o critério de FALKNER (1969).

Devido à falta de armadura longitudinal na laje superior em região de apoio de pontes de concreto armado, há o aparecimento de fissuras com grande abertura, como ilustra a Figura 11.

Essas fissuras ocorrem frequentemente em pontes ferroviárias, onde a carga variável é grande, ocasionando solicitações elevadas.

Recomenda-se distribuir armadura na laje superior obedecendo aos critérios de fissuração conforme FALKNER (1969).

Outro caso de ocorrência de fissuras longitudinais na extremidade da laje inferior de ponte ferroviária em concreto protendido com vigas invertidas é apresentado na Figura 12.

A introdução da força longitudinal de protensão gera uma força transversal similar à de uma viga parede. Deve ser detalhada uma armadura de viga parede segundo os critérios do CEB (1982), propostos pelo prof. Schlaich.

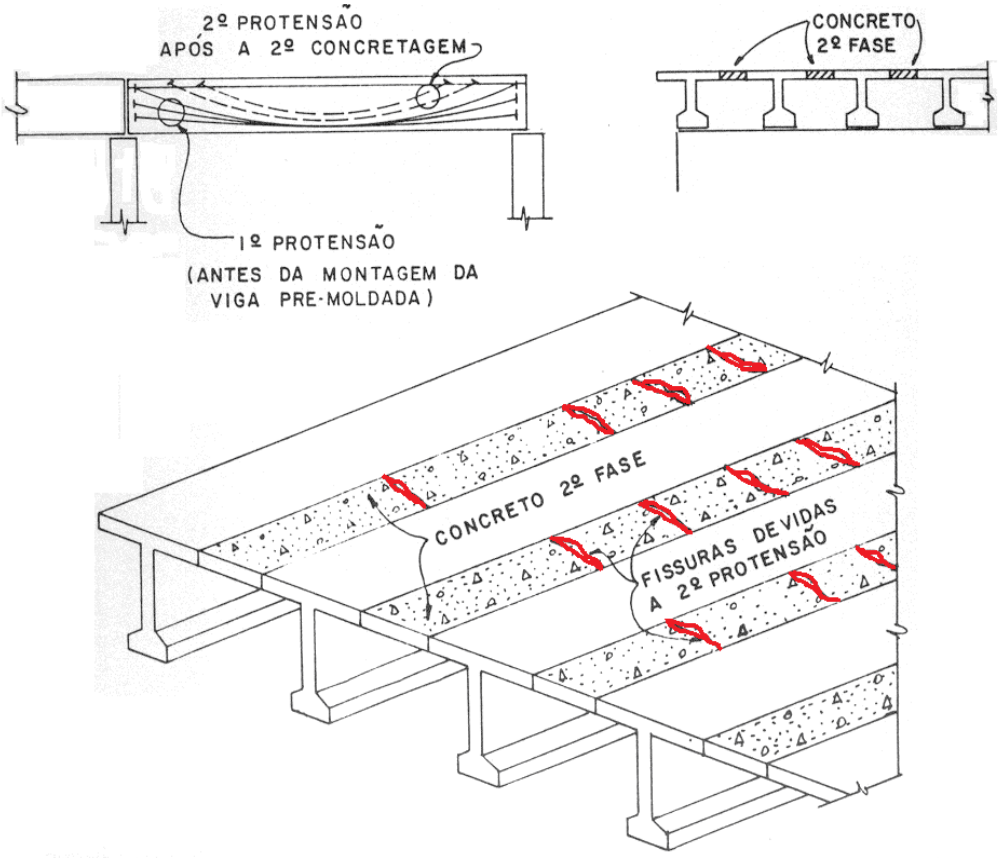


Figura 10: Fissuras na laje superior em pontes com vigas pré-moldadas em concreto protendido.

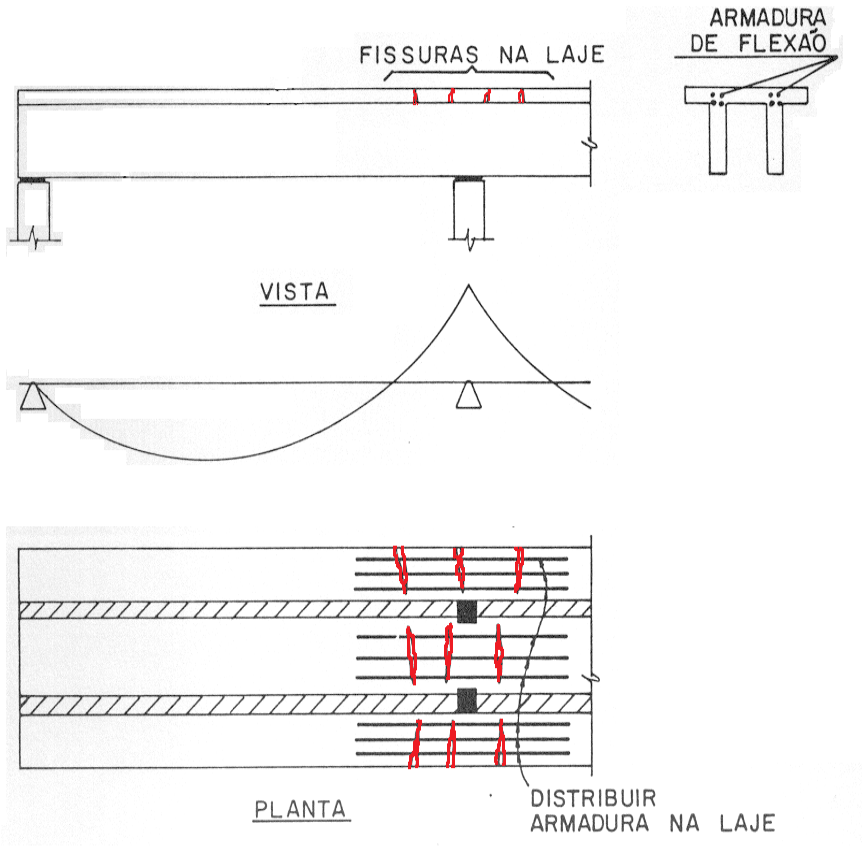


Figura 11: Fissuras na laje superior em região de apoios de pontes de concreto armado.

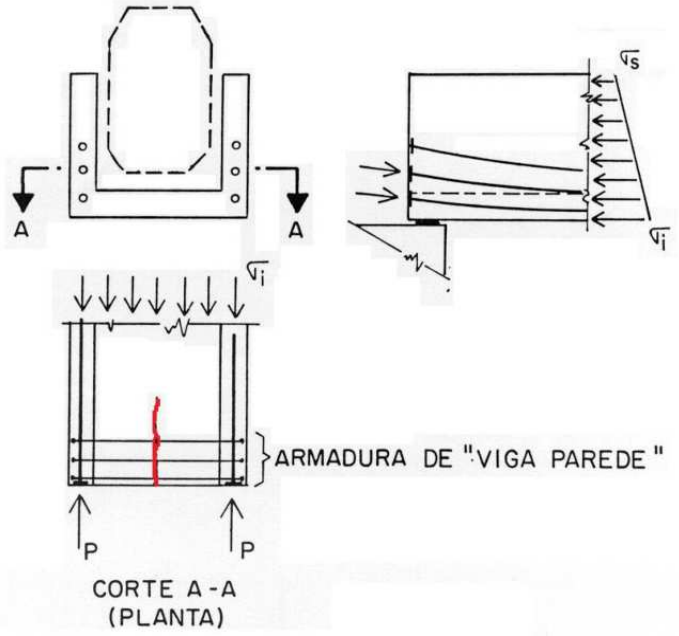


Figura 12: Fissuras longitudinais na laje inferior de ponte ferroviária em concreto protendido.

2.6 Pilares

A Figura 13 apresenta um caso de fissuras verticais próximas ao topo de pilares tipo parede com aparelhos de apoio em viadutos de concreto.

A causa do aparecimento dessas é a falta de armadura suficiente ao longo da altura do pilar tipo parede. As tensões de tração ao longo da altura do pilar são da mesma ordem de grandeza como se o pilar fosse uma viga parede. De modo a limitar a abertura de fissuras nesse tipo de elemento estrutural, deve-se prever adequado diâmetro e limitar as tensões nas barras de aço.

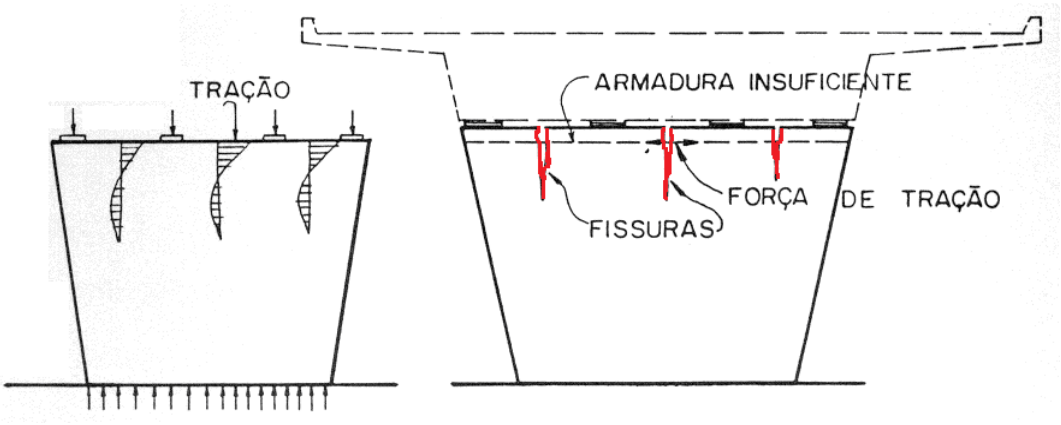


Figura 13: Fissuras verticais na próximas ao topo de pilares tipo parede em viadutos de concreto.

A Figura 14 ilustra outro caso de fissuras paralelas às arestas do pilar, a partir das juntas de concretagem, em viaduto de concreto protendido em encosta de difícil acesso próxima ao mar.

Devido à dificuldade de acesso, o concreto é lançado na fôrma em queda livre de grande altura. Isto resulta na segregação dos agregados graúdos, criando ninhos de concreto muito porosos que permitem o ataque rápido do meio ambiente salino agressivo às armaduras. As barras corroídas se expandem e rompem o concreto do cobrimento, acelerando ainda mais a corrosão de todas as barras da armadura.

O tratamento adequado das juntas de concretagem e o respeito ao limite de altura para lançamento em queda livre do concreto na forma são fundamentais para uma boa execução dos pilares. Considerando esta altura limite de dois metros, são indispensáveis janelas nas fôrmas para o lançamento e o adensamento adequados do concreto.

2.7 Ancoragens de Protensão

Por conta da falta de estribos, um caso de fissuras nas faces das caixas de saída dos cabos de protensão ancorados lateralmente em vigas ou lajes de viadutos ou pontes de concreto protendido pode ser visualizado na Figura 15.

Na ausência dos estribos, ocorre a ruptura do concreto por tração e retificação do cabo que "salta" da viga ou laje.

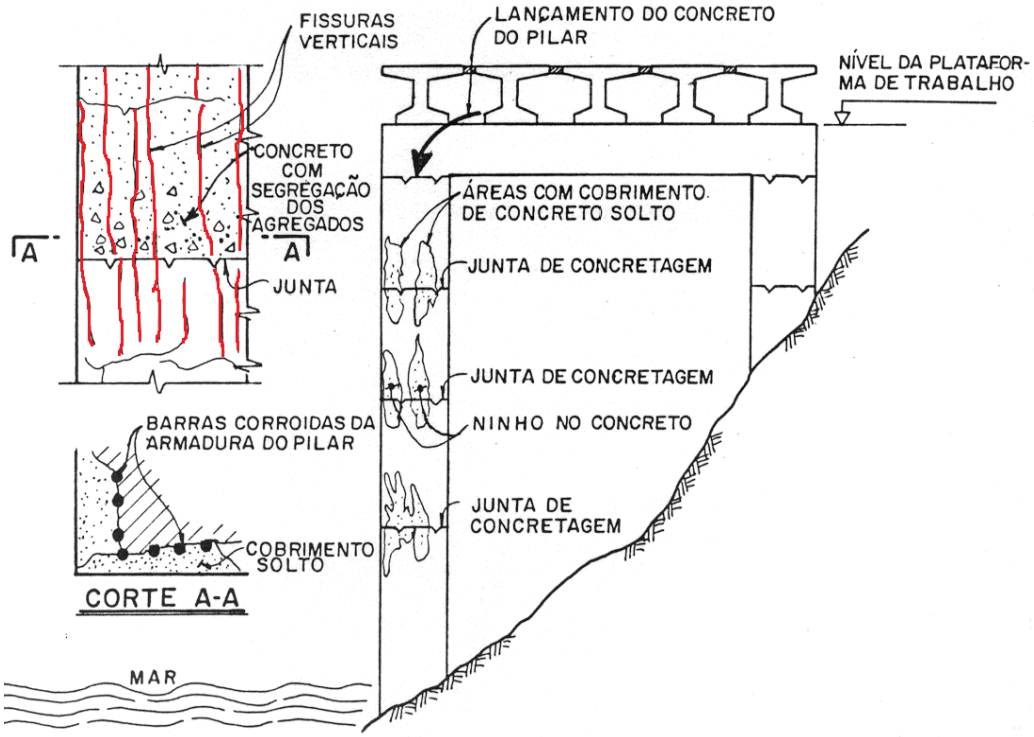


Figura 14: Fissuras paralelas às arestas do pilar em viadutos de concreto protendido.

A força por unidade de comprimento P (ver Figura 15) causada pela curvatura do cabo de protensão provoca tensões de tração no concreto, que atingem um valor acima da resistência do concreto à tração ocasionando a fissuração do concreto.

A armadura de estribos deve ser tal que resista à força por unidade de comprimento P, igual à relação entre a força de protensão no cabo F e o raio de curvatura do cabo R. Estes estribos devem "abraçar" o cabo de modo a suspender a força P para a face oposta da viga ou da laje.

Outro caso real trata de fissuração do concreto em região anterior (atrás) dos cabos de protensão ancorados lateralmente nas vigas e lajes de viadutos ou pontes em concreto protendido, segundo ilustra a Figura 16.

A causa dessa fissuração é atribuída às elevadas tensões de tração geradas pela introdução da força F no meio da placa atrás da ancoragem, conforme LEONHARDT e MÖNNIG (1978). A força atrás da ancoragem pode atingir até 60% do valor da força F.

A colocação de armadura dimensionada A_s para uma força 60% do valor da força F e ancorada em um comprimento cerca de $2l_b$ ($l_b = 60\phi$) evita a fissuração intensa atrás da ancoragem. A melhor solução é protender os demais cabos em uma seqüência tal que produzam na seção BB uma tensão de compressão elevada antes de ser protendido o cabo com saída lateral.

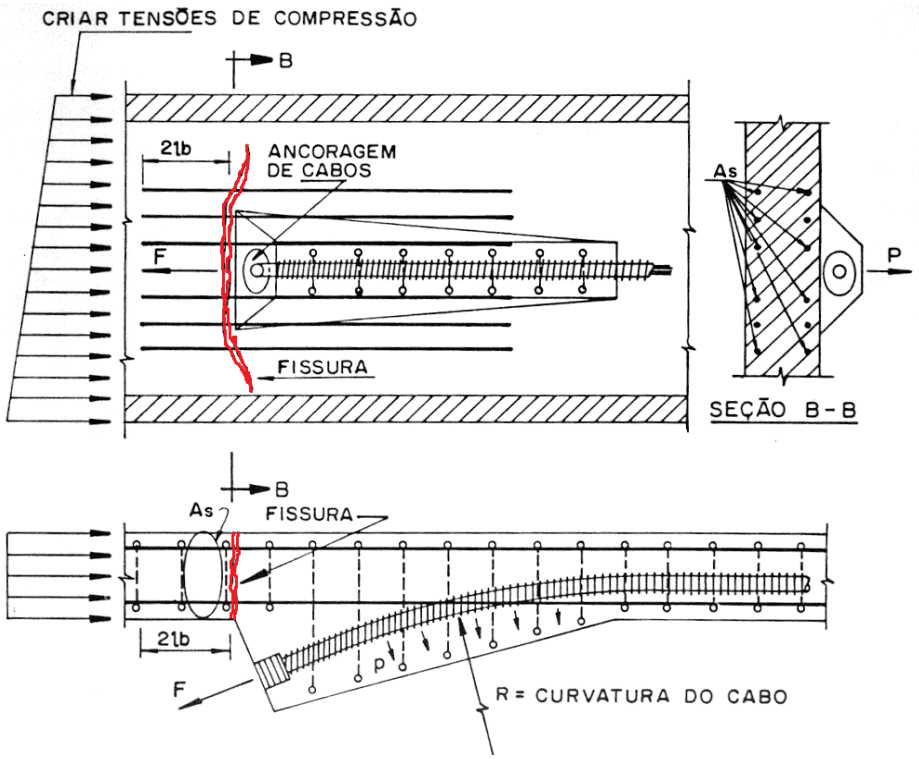


Figura 15: Fissuras em caixas de protensão em vigas ou lajes de viadutos ou pontes de concreto protendido.

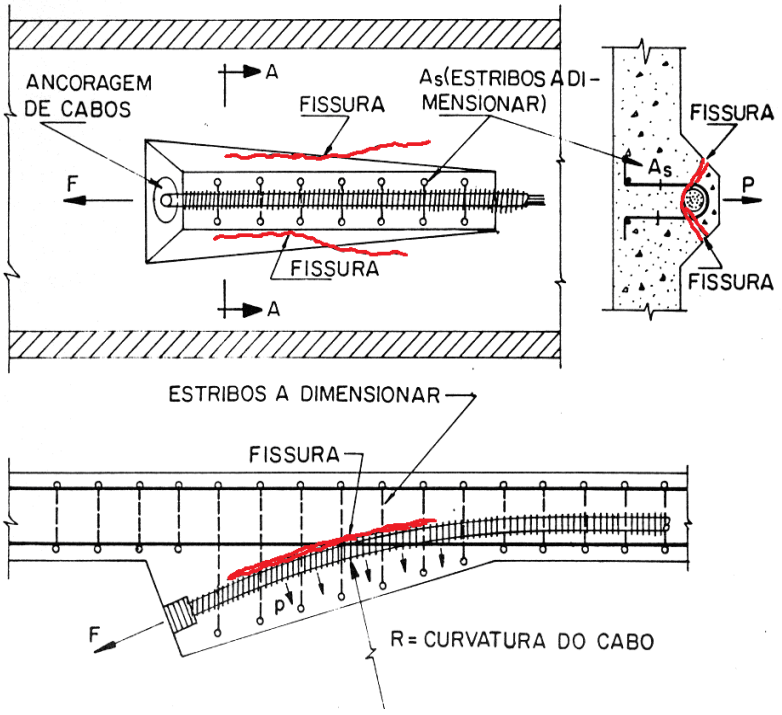


Figura 16: Fissuras em região anterior (atrás) dos cabos de protensão ancorados lateralmente nas vigas e lajes de viadutos ou pontes em concreto protendido.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tratou de quatorze casos reais de manifestações patológicas relacionadas à fissuração do concreto em elementos estruturais de viadutos e pontes de concreto, vivenciados pelo primeiro autor ao longo de sua vida profissional.

Os resultados das pesquisas de FALKNER (1969) muito contribuíram para um detalhamento correto das armaduras destinadas a limitar a fissuração.

Outra grande contribuição ao estudo da formação de fissuras em estruturas de concreto armado tem sido dada por SCHLAICH (1984), cujos trabalhos facilitam a compreensão do real comportamento das estruturas.

A falta de cuidados especiais no projeto e na construção de obras em ambientes agressivos ao concreto, como ambiente marinho, regiões com chuvas ácidas ou com sulfatos de origem industrial, tem gerado cada vez mais estruturas de concreto com armaduras corroídas.

Verificou-se neste trabalho que a maioria das causas de fissuração se deve a falhas no projeto, detalhamento e dimensionamento dos elementos estruturais que compõem viadutos e pontes de concreto armado ou protendido rodoviários ou ferroviários.

4. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**, Rio de Janeiro, 2007.

DUTRA , A. C.. Corrosão em oleodutos e sua prevenção, **Anais do V Seminário Técnico do IBP**, 1968.

FALKNER, H.. **Zur Frage der Rissbildung durch Eigen - und Zwaengspannungen infolge Temperatur in Stahlbetonbauteilen**, D.A.fStb - Cad.208, 1969.

GENTIL, V.. **Corrosão**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 3a edição, 1996.

GRAF, O.. **Die Baustoffe – Ihre Eigenschaften und ihre Beurteilung**, Ed. Konrad Wittwer, Stuttgart, 1949.

LEONHARDT, F., MÖNNIG, E.. **Construções de concreto - Casos Especiais de Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**, Volume 2, Editora Interciência Ltda., 1978.

SCHLAICH, J.. Konstruieren in Stahlbetonbau, **Beton kalender**, 1984.