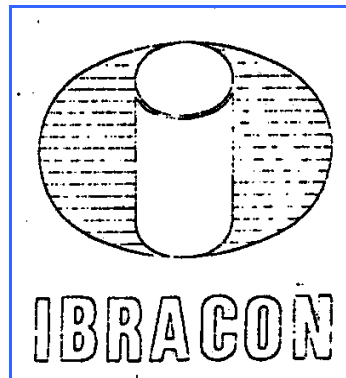




Corrosão do Concreto e “Stress Corrosion” no Aço de Protensão

Prof. Fernando Lobo Carneiro

1974



I N S T I T U T O B R A S I L E I R O D O C O N C R E T O

MESA REDONDA "CORROSÃO DO CONCRETO"

Rio de Janeiro, maio de 1974

"A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA DAS ADUTORAS DO RIO DE JANEIRO"

Engº Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro



A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA DAS ADUTORAS DO RIO DE JANEIRO

(*) Eng^o Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro

Histórico e causa fundamental do insucesso da 2a. Adutora do Ribeirão das Lajes ao Rio de Janeiro

Em 1938, a fim de reforçar o abastecimento de água da cidade do Rio de Janeiro, iniciou-se a construção do sistema adutor do Ribeirão das Lajes, compreendendo duas linhas de tubos, paralelas, com aproximadamente 70 quilômetros de comprimento cada uma, e capacidade total de 450.000 m³ por dia.

A primeira adutora do Ribeirão das Lajes, terminada em janeiro de 1940, foi executada em tubos de concreto armado comum, isto é, sem protensão, com 1,50m e 1,75m de diâmetro, sistema Bonna, com camisa vedante de aço. Uma exposição completa sobre a fabricação dos tubos, e sua montagem, se encontra na obra "Os tubos de concreto armado na construção da adutora em Ribeirão das Lajes", de autoria do engenheiro Adhemar Fonseca, editada em 1946. Até hoje, após 19 anos de funcionamento contínuo, não se registrou nenhuma ruptura de tubos ou acidentes importantes nessa primeira adutora.

As sucessivas e graves ocorrências de ruptura de tubos, que descreveremos mais adiante, verificaram-se na segunda adutora do Ribeirão das Lajes, construída em 1949. Anexamos a este trabalho o boletim do Instituto Nacional de Tecnologia, intitulado "Os acidentes da 2a. adutora de Ribeirão das Lajes", de autoria do químico A.M. da Silveira Feijó e colaboradores, editado em 1953, e que contém os resultados dos exames efetuados por ocasião das primeiras rupturas de tubos da referida adutora.

A segunda adutora de Ribeirão das Lajes foi executada com tubos de concreto armado com núcleo precomprimido e camisa de aço vedante, sistema "lock-joint", marca "Tetracap". O núcleo, de concreto vibrado, é envolvido por uma camisa vedante de aço de pequena espessura, 1,6mm (1/16 de polegada), a qual funciona, durante a fabricação, como molde externo. Depois de um período de cura, o núcleo é precomprimido por meio de uma armadura helicoidal, enrolada diretamente sobre a camisa de aço, e constituída de arame de aço com 4,9mm de diâmetro, limite

(*) Professor Titular da COPPE - UFRJ

Diretor da Seção Regional do IBRACON - Rio de Janeiro



de escoamento convencional (0,2%) de 115 kg/mm^2 , e limite de resistência de 144 kg/mm^2 . A tensão inicial dessa armadura é de 10.000 kg/cm^2 . A camada protetora externa, constituída por uma camada de argamassa com 19mm de espessura, é executada posteriormente e não é precomprimida, como é fácil de concluir da descrição do próprio processo de fabricação.

A 31 de outubro de 1952, isto é, após um período de funcionamento de menos de 4 anos, deu-se a primeira ruptura de um dos tubos da 2ª adutora, no quilômetro 47. Essa ruptura foi seguida de mais 3, no ano de 1953, sendo 2 no quilômetro 37 e uma no quilômetro 32, todas elas citadas no boletim do Instituto Nacional de Tecnologia, já referido. Depois disso os jornais noticiaram mais 3 rupturas em 1954. Em 1955 verificaram-se mais 2 rupturas com intervalo inferior a uma semana, quando já se encontrava em construção uma terceira adutora, conhecida como adutora do Guandú. Essas sete rupturas primeiras da segunda adutora causaram transtornos consideráveis à vida da cidade do Rio de Janeiro, pois cada uma delas obrigou a uma interrupção total, durante vários dias, da referida linha de tubos, que deveria contribuir, nessa época, com mais de uma terça parte do abastecimento. A essa altura já não era mais possível alimentar ilusões sobre o futuro da segunda adutora, e o problema transformou-se em verdadeiro escândalo, emocionando fortemente a opinião pública. Novas rupturas se verificaram, e continuam se dando, e a situação só não se tornou desesperadora em virtude da entrada em funcionamento, há aproximadamente 3 anos, da terceira adutora, não estando no entanto, até hoje, resolvido o problema do abastecimento de água no Rio de Janeiro, cujas deficiências são notórias.

A causa fundamental desse verdadeiro desastre técnico foi descoberta, logo após a primeira ruptura, pelo saudoso cientista brasileiro Ernesto Lopes da Fonseca Costa, fundador e primeiro diretor do Instituto Nacional de Tecnologia, que, pouco antes de morrer, ao verificar a existência intensa de "stress-corrosion" nos arames de aço da armadura helicoidal dos tubos, previu a sucessão interminável de novas rupturas, que realmente se verificaram mais tarde.

O boletim já citado do Instituto Nacional de Tecnologia concluía em 1953 (pag. 30) que concorreram para a possibilidade de desenvolvimento de tal tipo de corrosão, além das elevadas tensões aplicadas ao aço especial dos arames da armadura helicoidal, "a permeabilidade do revestimento externo de argamassa, protetor dos tubos, que permitiu à penetração de umidade contendo matérias minerais em dissolução, apta portanto a condução de corrente elétrica".



Sendo inerente ao sistema de tubos de concreto armado pretendido a existência de elevadas tensões mecânicas na armadura helicoidal, o único meio de defesa contra a "stress-corrosion" seria, ainda de acordo com o boletim do I.N.T. (pag. 28), "impedir ou reduzir ao mínimo, a permeabilidade da camada protetora da argamassa". "Esta seria a medida mais efetiva a tomar, pois combateria o mal na sua origem, mas receiamos que na prática tal remédio não seja tão simples de aplicar". (pag. 30). "Outros recursos terão efeito apenas paliativo" (pag. 30).

Ora, uma análise mais aprofundada do sistema adotado nos tubos da 2ª adutora de Ribeirão das Lajes ao Rio de Janeiro, como a que aqui apresentamos, demonstra que não sendo precomprimida a camada protetora externa, torna-se inevitável a fissuração da mesma, quando atua a pressão interna da água, desaparecendo assim a impermeabilidade necessária, única defesa eficaz contra a "stress-corrosion". É justamente nesse aspecto que reside a superioridade dos tubos com camada externa precomprimida, e portanto não fissurável.

Alguns Pormenores Técnicos

Para maior clareza, transcreveremos a seguir algumas conclusões importantes do boletim citado do Instituto Nacional de Tecnologia, intitulado "Os acidentes da 2ª adutora de Ribeirão das Lajes".

As macrofotografias e microfotografias de cortes longitudinais dos arames da armadura helicoidal, contidas nas páginas finais desse boletim, documentam de forma impressionante a "stress-corrosion", corrosão penetrante e extremamente rápida que, partindo da superfície externa dos arames, se dirige para o interior, sob a forma de fissuras finas, frequentemente bifurcadas.

Trata-se de fenômeno estritamente localizado, que difere completamente das outras formas de corrosão.

Uma das teorias mais aceitas para explicá-lo, classifica-o como processo eletro-químico que teria origem nas forças eletromotriizes criadas por "diferença de tensão mecânica entre áreas contíguas da mesma massa metálica". Essas áreas contíguas, muito próximas, seriam por exemplo, as bordas e o fundo de uma microfissura ou defeito inicialmente existente na superfície do arame. Havendo um meio condutor (água com sais em dissolução), dá-se uma corrosão eletro-química, cuja tendência é prolongar a microfissura para o interior do arame, com velocidade crescente. Essa teoria é descrita nas pags. 25 a 27 do boletim, e parece ser corroborada por algumas experiências realizadas no



Instituto Nacional de Tecnologia, em 1952.

Embora haja indicações de que "o fenômeno é mais veloz quando se trata de arame temperado", sendo "perfeitamente razoável admitir-se a ocorrência de micro-fissuras de têmpera" (pag. 27), o I.N.T. opinou que "o uso de arame de aço não temperado, mas apenas encruado por trefilação, embora possa concorrer até certo ponto para atenuar a marcha da corrosão, já pela ausência de fissuras decorrentes da têmpera, já pela eliminação de uma das parcelas da tensão total (tensão de têmpera), não a evitará todavia, pois estarão de pé os defeitos superficiais originados do encruamento exagerado necessário para suprir a falta de têmpera" (pag. 29).

"É bem verdade que o pouco que se conhece a respeito deste detalhe dá a entender uma progressão mais veloz nos casos de arames temperados, o que fez com que a própria "Look-joint" retirasse, há mais de dois anos, de suas especificações, os arames temperados". "Entretanto, por outro lado, o "Symposium on Stress Corrosion cracking of metals", publicação da A.S.T.M. e A.I.M.E. menciona casos de fratura por "stress-corrosion" ocorridos em arames da ponte de Portsmouth trabalhados a frio" (pag. 29). Por essas razões, nas "conclusões" (pag. 30), "os tratamentos térmicos sofridos pelos arames de aço empregados (têmpera e revenido)" aparecem apenas como "coadjuvantes" que "parecem ter concorrido para acelerar a marcha da corrosão" e não como causas fundamentais, que são a corrosão sob-tensões elevadas - "stress-corrosion" e a "permeabilidade do revestimento externo" que "permitiu a penetração de umidade contendo matérias minerais em dissolução, apta portanto à condução de corrente elétrica", e sem a qual a "stress-corrosion" não se teria processado (pag. 30).

Ainda como "coadjuvantes", o I.N.T. apresenta "o pH em geral bastante baixo, denotando considerável acidez, apresentado pelo solo nos locais dos acidentes", e "a presença de pequenas quantidades dos anions NO_3 e S^{2-} ", (nitratos e sulfetos) (pags. 30 e 31).

Os exames realizados pelo I.N.T. revelaram também que "nenhuma relação havia entre as corrosões dos arames - causa indiscutível das rupturas dos tubos - e as chapas de aço das camisas" (pag. 32). "A aplicação direta do arame de aço sobre a chapa que constitui a camisa dos tubos não teve a menor influência no fenômeno de "stress-corrosion" dos arames; do contrário as corrosões seriam flagrantes nos pontos de contato entre os arames e as chapas, o que não aconteceu na prática" (pag. 31).



Esta conclusão mostra ser inteiramente inútil e destituída de fundamento técnico a modificação, sugerida para a 3ª adutora (adutora do Guandú), e que consistiu em colocar uma nova camada de concreto por fora da camisa vedante de aço, evitando assim o contato direto desta última com os arames da armadura helicoidal. A única solução consiste, insistimos, em "impedir ou reduzir ao mínimo a permeabilidade da camada protetora" (pag. 26), e isso só se pode conseguir "em tubos totalmente precomprimidos", isto é, nos quais não apenas o núcleo, mas também a camada externa sejam precomprimidos. Não existindo assim possibilidade de fissuração, nem interna, nem externa, a camisa vedante de aço é inteiramente supérflua e dispensável, e até mesmo prejudicial, por introduzir descontinuidade e maior heterogeneidade no tubo.

Quanto à "proteção catódica", concluiu o I.N.T., que esta só seria viável em relação às camisas vedantes de aço, visando garantir sua maior duração, mas que não impediria a "stress-corrosion" dos arames da armadura helicoidal. "Nenhum dos métodos conhecidos de proteção contra a corrosão poderá ser adotado com sucesso para sustar o progresso da "stress-corrosion" no arame do tubo "da 2ª adutora" (pag.32). Somente a efetiva impermeabilidade da camada protetora externa teria evitado o desastre da 2ª adutora, essa é a evidente conclusão dos estudos do I.N.T. E isso é impossível de obter-se com tubos do tipo adotado nessa adutora, em que a camada externa fissura, quando atua a pressão interna da água, por não ser precomprimida.

Na 3ª adutora (adutora do Guandú), adotou-se solução paliativa, sobre cujos resultados ainda não existe a necessária experiência, pois só está em funcionamento há cerca de 3 anos. Além da modificação da posição da camisa vedante de aço, a que já nos referimos, e do emprego de arames de aço não temperados, foi aumentada a espessura total da parede dos tubos, e foi dada especial atenção à qualidade da camada protetora externa, executada em concreto de resistência elevada, fortemente vibrado, e cuidadosamente curado. Os fabricantes desses tubos esperam que, graças à deformação lenta do núcleo, surjam gradativamente tensões de compressão na camada externa. Examinamos esta hipótese neste trabalho, como se pode ver nos esquemas de funcionamento dos dois tipos de tubos: tubos PREMO e tubos sem pré-compressão na camada externa. Essas tensões de compressão na camada externa só poderão no entanto, impedir a fissuração se o tubo entrar em carga com idade bastante avançada. Se o tubo entrar em carga em poucos meses apenas após a fabricação, não terá havido tempo para o aparecimento dessas tensões de compressão. A solução é artificial, paliativa e não oferece segurança.



Só a pré-compressão tanto do núcleo como da camada externa, como se dá nos tubos PREMO, pode assegurar a não fissuração, condição primeira da impermeabilidade da camada externa, única defesa contra a "stress-corrosion".

A experiência do Brasil e de outros países, e ensinamentos decorrentes

Não foi somente no Brasil que se verificaram acidentes em adutoras com tubos nos quais a camada externa não é pré-comprimida.

A esse respeito transcrevemos o seguinte trecho (pag. 27) do boletim do I.N.T.: "Consta que na Venezuela ocorreram acidentes idênticos, e mais recentemente ainda a revista norte-americana "Engineering News Record" publicou em seu número de 19 de fevereiro do corrente ano, (1953), um artigo dando notícia de um caso de corrosão semelhante ao da 2ª adutora, ocorrido numa linha de tubos em concreto protendido em construção em Regina, no Canadá".

Consta também, embora não tenhamos obtido confirmação, que se verificaram também acidentes análogos no norte da África.

A "tradição" dos tubos de concreto armado com núcleo pré-comprimido e camada protetora externa sem pré-compressão já pode portanto ser considerada suficientemente negativa, não só em consequência da de sastrosa experiência brasileira da 2ª adutora de Ribeirão das Lajes ao Rio de Janeiro, como também em consequência de insucessos verificados em outros países. A lição a tirar é a adoção obrigatória de um sistema de fabricação de tubos que assegure a efetiva impermeabilidade da camada protetora externa. A possibilidade de obter-se essa impermeabilidade só pode existir nos tubos em que toda a espessura da parede, e não apenas o núcleo interno, é pré-comprimida; caso em que se enquadram inteiramente os tubos em que a camada protetora é executada com o tubo solicitado pela pressão interna máxima de serviço.

"A lição a tirar é a adoção obrigatória de um sistema de fabricação de tubos que assegure a efetiva impermeabilidade protetora externa. A possibilidade de obter-se essa impermeabilidade só pode existir nos tubos em que toda a espessura da parede, e não apenas o núcleo interno, é pré-comprimida ; caso em que se enquadram inteiramente os tubos em que a camada protetora é executada com o tubo solicitado pela pressão interna máxima de serviço."



O Prof. Fernando Lobo Carneiro comentou várias partes do relatório abaixo transcrito. Saliou uma característica da ruptura por Stress Corrosion : não há estricção do fio de protensão ao romper.

MINISTÉRIO DO TRABALHO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO
INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA
Diretor: SYLVIO FRÓES ABREU

Os Acidentes da 2ª Adutora de Ribeirão das Lages

Pelo químico
A. H. DA SILVEIRA FEIJÓ
com a colaboração de
Maria Carolina M. da Silva
Antonieta de Larmo Cantição
Ennio Goulart de Andrade
Hugo Lodewijk Radino

STRESS CORROSION NO AÇO DE PROTENSÃO



RIO DE JANEIRO
1953



Havendo o Exmo.º Sr. Prefeito do Distrito Federal nomeado uma comissão de engenheiros para apurar as causas dos acidentes que vinham ocorrendo na 2.ª adutora de Ribeirão das Lages, solicitou logo após, através do ofício G.P.— 4.886/52, a colaboração do Instituto Nacional de Tecnologia, para os indispensáveis estudos tecnológicos, que deveriam servir de subsídios para o pronunciamento final daquela comissão.

Em complemento daquele pedido de ordem geral do sr. Prefeito, e ao mesmo tempo, visando melhor objetivar a colaboração já requerida ao INT, houve por bem o sr. Secretário Geral de Viação e Obras, indicar por intermédio do seu ofício S.G.-819/52, os principais pontos em que se deveria concretizar a colaboração solicitada.

Dada a importância dos trabalhos a encetar e por outro lado, a sedução com que acenavam as primeiras observações feitas em pequenas amostras de arames provenientes da armadura do tubo rompido no km 47 da linha, chegadas às mãos do nosso saudoso Diretor Geral — Dr. Ernesto Lopes da Fonseca Costa — que previu naqueles sérios acidentes sucessivos, a primeira manifestação de vulto no Brasil, do fenômeno particular de corrosão, denominado pelos norte-americanos de “stress-corrosion”, fêz questão o nosso insigne mestre, não obstante o seu já delicado estado de saúde, de colaborar diretamente conosco nos trabalhos a realizar. Chegamos mesmo a traçar os primeiros planos em conjunto e como a tarefa inicial era exaustiva — exame dos tubos nos locais dos vários acidentes, para coleta das indispensáveis amostras — não pôde o Dr. Fonseca Costa dela compartilhar, incumbindo-me de fazê-lo, na esperança de poder dedicar-se ativamente aos trabalhos de laboratório, sem dúvida menos sujeitos a can-



saços físicos, tendo ficado inclusive combinado que o relatório final seria redigido em duas partes, cabendo uma a cada um de nós.

Hoje, entretanto, compelido pelas exigências incontornáveis do destino, redijo-o eu sozinho, e por isto mesmo não terá êle, infelizmente o cunho que caracterizava as obras do eminente Dr. Fonseca Costa, não obstante ter sido dêle a orientação inicial dos trabalhos ora apresentados e quanto à sua execução, pelo menos no que tange ao primeiro acidente verificado no km 47, êle teve ainda oportunidade de apreciar seus resultados, havendo aprovado inteiramente as conclusões que dêles aduzimos e que sem sombra de dúvida, corroboraram a hipótese por êle formulada de início — a “STRESS-CORROSION”.

Não quizemos deixar de focalizar êste pequeno histórico, antes de dar início ao relatório propriamente dito, para que ficasse bem patente o grande interêsse que despertou ao Dr. Fonseca Costa, particularmente êste caso, cujo esclarecimento ficou tão intimamente ligado ao fim da vida do maior entusiasta da pesquisa aplicada, do Rio de Janeiro e quiçá do Brasil, a quem rendo nesta oportunidade, mais uma vez minhas homenagens, como seu modesto discípulo e colaborador que fui durante vinte anos.

* * *

Visitamos detidamente a linha acidentada, nos quatro pontos diferentes em que ocorreram as ruturas, isto é, nos km 47, 37 e 32 (no km 37, houve duas ruturas, separadas entre si, de algumas dezenas de metros apenas).

Em cada ponto acidentado da 2.^a adutora, foram colhidas abundantes amostras de arames de aço, de chapas de aço, de argamassa e de concreto, além das do solo local. No km 37, em que havia água no terreno, esta também foi colhida.

A inspeção das superfícies de rutura naturais dos arames de aço, quase sempre sem o menor indício de estrição e afetando muitas vêzes, aspecto de ação corrosiva local penetrante, chamou-nos particularmente a atenção, em virtude de serem estas características, as que geralmente apresentam as



ruturas decorrentes do fenômeno de “stress-corrosion”, tanto mais plausível no caso em foco, quando sabemos que o método de fabricação dos tubos, exigindo o emprêgo de tais arames enrolados helicoidalmente sob tensão, estaria a favorecer mais um argumento em abono daquela hipótese inicial.

Tal hipótese, considerada como a provável causa primária dos acidentes verificados, ganhou mais corpo ainda, ao constatarmos em certos pedaços de arame, colhidos no acidente do km 47, a extrema fragilidade que apresentavam, rompendo-se em muitos casos, pelo mais leve esforço de deformação manual, confirmando dêste modo, a absoluta falta de coesão que apresentavam determinadas regiões suas, verdadeiras falhas de continuidade metálica do material.

Dado o considerável interêsse que já agora se apresentava como imperativo, de confirmar ou não definitivamente a hipótese formulada, promovemos incontinentemente, com prejuízo até certo ponto, para o desenvolvimento metódico do estudo, os exames macrográficos de cortes longitudinais dos arames, nas regiões visivelmente afetadas, ensaios êstes que, aliados aos fatores já mencionados militando no sentido da “stress-corrosion”, seriam decisivos. E o foram efetivamente, como se poderá constatar pela observação das macrofotografias apresentadas nas folhas anexas, onde estão perfeitamente documentadas as penetrações locais, típicas, em sentido transversal à direção dos esforços sofridos, da forma particular de corrosão conhecida como “stress-corrosion”, fenômeno não registrado anteriormente no Brasil, pelo menos em obras de tal envergadura.

Estabelecida assim, com tôda a segurança, a caracterização do fenômeno, pelo menos como responsável pelo acidente do km 47, impunha-se reencetar os trabalhos de pesquisa, seguindo uma orientação mais metódica, que deveria iniciar-se por um estudo mais aprimorado do que já se conhece a respeito de tal fenômeno, pois assim seria possível relacionar os ensaios a realizar no material colhido, de modo a tirar dêles o máximo partido, reduzindo-se em consequência, o tempo necessário à obtenção de subsídios mais imediatos a serem for-



hecidos à Prefeitura do D.F., pois o assunto abordado é realmente de magna importância e como está ainda muito pouco estudado, prestar-se-ia a longas especulações científicas e tecnológicas, que fazem parte do nosso programa no INT, mas que evidentemente estariam fora do objetivo principal da colaboração a nós solicitada. Assim, resolvemos limitar o atual trabalho, às determinações das principais características dos materiais colhidos "in loco", tanto as dimensionais, como físicas, químicas, mecânicas e metalográficas, para de posse de tais elementos, e comparando-os de um lado com as características especificadas e aprovadas para a construção da 2.^a adutora, e de outro lado relacionando-os aos principais fatores ora conhecidos como responsáveis pelos fenômenos do tipo observado, trazer alguma luz pelo menos, sobre o que deverá ser evitado em futuras obras do gênero, como por exemplo, a adutora do GUANDÚ, já iniciada, para evitar ou pelo menos reduzir a velocidade de marcha do fenômeno a um ponto tal, que não resulte involuntariamente embora, em prejuízos tão vultosos como imediatos para a cidade, transformando-se deste modo, uma obra que deveria ser de alta relevância para a higiene e conforto do Rio de Janeiro, em fonte de dissipação sem proveito, das escassas verbas destinadas a obras municipais.

Para que melhor sejam apreciadas no final, as conclusões a que nos levaram os resultados colhidos nos exames realizados, entendemos que seria de utilidade passar preliminarmente em revista, o método de fabricação dos tubos empregados na instalação da 2.^a adutora, bem como as especificações a que obedeceram, inclusive os materiais metálicos nêles empregados (arame e chapa).

FABRICAÇÃO DOS TUBOS

De acordo com as informações da SOCIEDADE INDUSTRIAL TETRACAP LTDA., representante no Brasil da Lock Joint Pipe Company, a fabricação dos tubos poderá ser descrita sumariamente, da seguinte maneira:



a) Fabricação da alma em chapa de aço n. 16 — U.S. Standards (1,59 mm de espessura), Mayari R., com limite de elasticidade de 35 kg/mm², soldada elêtricamente e controlada à pressão interna de 1760 kg/cm².

b) Fundição do tubo interno de concreto, mediante a colocação de um macho devidamente centrado em relação ao núcleo ou camisa de chapa de aço, com as dimensões necessárias à obtenção da espessura de parede do tubo de concreto, de 87,3 mm ($3 \frac{7''}{16}$).

c) Após o período adequado de cura, o cilindro é enrolado ou envolvido helicoidalmente por um arame de aço, sob a tensão de cêrca de 1800 kg, devendo tal arame obedecer às seguintes especificações:

Diâmetro mínimo	4,87 mm
Limite de elasticidade	115 kg/mm ²
Carga de rutura	144 kg/mm ²

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

(ASTM — A-229-41)

	Tipo A	Tipo B
Carbono	0,55 — 0,75 %	0,55 — 0,75 %
Silício	0,10 — 0,30 %	0,10 — 0,30 %
Manganês	0,80 — 1,20 %	0,60 — 0,90 %
Fósforo (máx.) .. .	0,045 %	0,045 %
Enxofre (máx.) .. .	0,050 %	0,050 %

d) O conjunto de aço (chapa e arame), é protegido contra a corrosão, por uma camada de 19 mm ($3/4''$) de espessura de argamassa.

Algumas amostras do arame importado da América do Norte, remanescentes da fabricação dos tubos empregados na 2.^a adutora, foram remetidas ao INT, pela SOCIEDADE INDUSTRIAL TETRACAP LTDA. Embora apresentassem intensa corrosão superficial, em virtude de haverem ficado



abandonadas às intempéries durante bastante tempo, foi tal material por nós examinado, apurando-se estar sua composição química perfeitamente enquadrada nas especificações tomadas por base, como se poderá constatar comparando-as com o respectivo laudo de análise constante do anexo.

As estruturas metalográficas observadas, ora sorbíticas, ora martensíticas é que não denotam homogeneidade de tratamento térmico.

Submetidos alguns corpos de prova a ensaio de tração, forneceram os seguintes resultados:

Corpo de prova n.º	Carga de rutura kg/mm ²	Lim. elast. kg/mm ²	Along. %
1	142	123	8,2
2	142	123	8,2
3	136	118	—
4	135	120	—

A determinação do limite de elasticidade foi realizada pelo método das medidas diretas das deformações com cargas crescentes.



CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS COLHIDOS NOS LOCAIS DOS ACIDENTES

Dimensões

Espessura da parede dos tubos de concreto — variou de 70 mm (km 37) a 95 mm (km 32).

Espessura da camada protetora de argamassa — variou de 14 mm (km 47) a 20 mm (km 32).

Espessura da chapa de aço — variou de 1,5 a 1,7 mm.

Diâmetro do arame de aço — 4,87 mm.

1) EXAME DO MATERIAL NÃO METÁLICO

Considerando que o próprio exame local dos tubos acidentados não trouxe a menor suspeita de qualquer possibilidade de ação corrosiva de importante reflexo nos acidentes, originária de vasamentos dos tubos internos de concreto e também por não ser esta Divisão especializada em construção, deixamos de examinar as amostras de concreto colhidas, que não obstante, estarão à disposição da Divisão de Indústrias de Construção, caso deseje proceder a algum ensaio.

Os únicos materiais não metálicos, que mereceram maior atenção de nossa parte, foram: a camada de argamassa que reveste externamente os tubos, o solo e a água, nos locais acidentados. Assim mesmo, tendo em vista que o principal escopo de nossas investigações, era a corrosão do material metálico e particularmente dos arames que constituíam a armadura dos tubos, preocupou-nos apenas a determinação da taxa de



absorção de água da camada de argamassa, como um índice bastante exato de sua porosidade e portanto, permeabilidade à água. Foram também objeto de nossas preocupações, a determinação do pH do solo, e da água do sub-solo, além da pesquisa e dosagem dos anions nitrato e sulfeto, no solo, na água e na argamassa de revestimento dos tubos. Como se vê, cingimo-nos, especialmente no caso de materiais não metálicos, às determinações únicas que poderiam ter relação direta com a criação de um meio adequado ao desenvolvimento do fenômeno estudado.

a) *Ensaios comparativos de absorção de água em argamassa.*

Amostra colhida em tubos do km 47 (1. ^a rut.)	...	8 %
" " " " " km 37 (2. ^a rut.)	...	6,9 %
" " " " " km 37 (3. ^a rut.)	...	6,7 %
" " " " " km 32 (4. ^a rut.)	...	10,4 %

Nestes ensaios comparativos, foi utilizado o método correntemente empregado nos ensaios de produtos cerâmicos.

b) *Medidas de pH no solo e na água.*

Amostra do km 37 (2. ^a rutura)	4,9
" " km 37 (3. ^a rutura)	3,9
" " km 32 (4. ^a rutura)	5,15
Amostra de água do sub-solo (km 37	6,75

c) *Análise química do solo, da argamassa e da água, visando a pesquisa e a determinação da ordem de grandeza das concentrações dos anions nitrato e sulfeto.*



ANION NITRATO ($\overline{\text{NO}}_3^-$)
(%)

<i>Local</i>	<i>Solo</i>	<i>Argamassa</i>	<i>Água</i>
km 47	—	0,000026	—
km 37 (2. ^a rut.)	0,00006	0,00004	} 0,0003
km 37 (3. ^a rut.)	0,00011	—	
km 32	0,00004	0,00011	

ANION SULFETO ($\overline{\text{S}}^-$)
(%)

<i>Local</i>	<i>Solo</i>	<i>Argamassa</i>	<i>Água</i>
km 47	—	< 0,00005	—
km 37 (2. ^a rut.)	< argamassa	< 0,00005	} nihil
km 37 (3. ^a rut.)	< argamassa	—	
km 32	nihil	< 0,00005	—

NOTAS: 1) Água permanente de sub-solo, só foi encontrada na excavação do km. 37.

2) Não foram determinados os teores de $\overline{\text{NO}}_3^-$ e $\overline{\text{S}}^-$ no solo do km 47 por não termos recebido a referida amostra, que não pudemos trazer no dia da inspeção à linha, por já se encontrar fechada a excavação e dada a necessidade de colher o material das camadas profundas por onde corria a tubulação avariada.

3) As determinações de $\overline{\text{NO}}_3^-$ e $\overline{\text{S}}^-$ foram procedidas comparativamente entre si e usando como padrões respectivamente, nitrato de potássio e sulfeto de ferro.



4) Para a dosagem do $\bar{N}O_3$ e do \bar{S} , escolheu-se de preferência, a argamassa mais contaminada por ferrugem. No caso do km 32, em que o teor de $\bar{N}O_3$ na argamassa é bem superior ao do solo, pode-se admitir tenha concorrido para êste fato, a maior corrosão superficial do arame e da própria chapa naquele local, o que por sua vez deverá estar ligado à maior porosidade da argamassa naquela região. Para esta concentração do anion nitrato na argamassa, em relação à existente no solo poderiam também ter colaborado as alternativas de molhagem e secagem (evaporação), às quais poderiam somar-se, inclusive, fenômenos de osmose e capilaridade desenvolvidos através da parede porosa da própria argamassa.

Do pouco que se conhece a respeito de influência específica de compostos químicos sôbre a "stress-corrosion", pode-se concluir que os nitratos e os sulfetos, são os que agem mais intensamente, ainda que em soluções relativamente diluídas. Não obstante, em face das concentrações existentes no solo, tomado ainda que seja como exemplo, o maior valor encontrado — 0,00011 g de $\bar{N}O_3$ por cento, seria necessário o exgotamento total de cêrca de 100 kg de solo e evaporação da sol. obtida ao vol. de 17 ml, para obter-se uma concentração da ordem de $\frac{N}{10}$. Portanto, a não ser que estudos futuros

venham a demonstrar a influência apreciável do $\bar{N}O_3$, em concentrações de ordens de grandeza consideravelmente menores, não poderemos admitir tenha havido influência daquele anion no caso dos acidentes da 2.^a adutora. Aliás, a prova mais evidente da não influência do $\bar{N}O_3$ nos acidentes ocorridos é o fato de se haver constatado maior concentração de $\bar{N}O_3$, justamente no km 32 onde não ficou comprovada a "stress-corrosion".

II) EXAME DO MATERIAL METALICO

Os materiais metálicos que entram na construção dos tubos, são como já vimos, os arames e as chapas de aço que



impõem ao tubo interno de concreto o pre-esforço ou protensão.

Durante a inspeção que fizemos na linha, pudemos verificar que em todos os tubos acidentados, o aspecto das ruturas das camisas era quase sempre o mesmo. Não há dúvida de que o rompimento das camisas foi uma decorrência lógica da rutura dos arames de reforçamento; não obstante, chamou-nos atenção o desgaste de corrosão que apresentavam as bordas dos lábios de suas ruturas, bem como a orientação preferencial no sentido do eixo dos tubos, daquela corrosão, que resultou afinal no enfraquecimento local das paredes e consequentemente, na concentração de esforços ao longo daquelas áreas, transformadas assim em pontos mais fracos (ver fotografias e macrofotografias no anexo).

Os ensaios realizados nestes dois materiais — arames e chapas — obedeceram à seguinte ordem: exame macrográfico, exame micrográfico, exame de composição química e exame das principais características mecânicas.

a) ARAME

EXAME MACROGRÁFICO — Os ensaios macrográficos realizados, visaram principalmente documentar as ruturas naturais ocorridas na linha adutora, mostrando ao mesmo tempo que o seu processamento, praticamente sem alongamento e estrição, só poderia ser atribuído a uma solução de continuidade do material metálico acarretada pela corrosão nos pontos rompidos, o que ficou mais positivado ainda, pela comparação entre tais ruturas e as realizadas no INT, em sobras do mesmo material não aplicado na obra e inclusive no próprio material colhido de tubos acidentados, quando ensaiados à tração em zona sã, isto é, não afetada pela corrosão.

A inspeção macrográfica de cortes longitudinais dos arames, foi por assim dizer, a chave da caracterização da “stress-corrosion”, que ficou bem positivada em três, dos quatro acidentes, mas que não pudemos constatar no material colhido



dos despojos da rutura ocorrida no km 32 (ver macrografias no anexo).

EXAME MICROGRÁFICO — A inspeção microscópica dos arames revelou, quase sempre, estrutura sorbítica, documentando os tratamentos térmicos por que passaram: têmpera e revenido.

Encontramos em alguns corpos de prova e principalmente nos arames que nos foram remetidos pela TETRACAP como sobra dos utilizados na obra, estruturas martensíticas finas e algumas vezes mesmo, a presença de troostita, o que afinal traduz a inconstância das condições em que foram realizados os tratamentos térmicos.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA — As análises químicas completas realizadas nos arames, revelaram sempre composições que satisfazem a especificação adotada — ASTM — A229-41 — como se poderá verificar pelo seu confronto com os resultados estampados nos laudos de análise.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ARAME

(Sobra das bobinas utilizadas na obra da 2.^a adutora de Ribeirão das Lages).

Resultado da Análise

Carbono	0,63 %
Silício	0,17 %
Manganês	0,95 %
Fósforo	0,006 %
Enxôfre	0,024 %
Níquel	traços espectrográficos
Cromo	traços espectrográficos
Cobre	0,15 %



COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ARAMES DAS TUBULAÇÕES ROMPIDAS NOS KM 47, 37 E 32

RESULTADOS DAS ANÁLISES

A M O S T R A S

<i>Elementos</i>	km 47 (1. ^a rutura)	km 37 (2. ^a rutura)	km 37 (3. ^a rutura)	km 32 (4. ^a rutura)
Carbono	0,66 %	0,67 %	0,69 %	0,72 %
Silício	0,19 %	0,23 %	0,18 %	0,14 %
Manganês	1,09 %	1,10 %	0,98 %	0,99 %
Fósforo	0,006%	0,015%	0,011%	0,016%
Enxofre	0,024%	0,024%	0,024%	0,024%
Cobre	0,15 %	0,20 %	0,14 %	0,17 %
Níquel	0,03 %	0,04 %	0,04 %	0,04 %
Cromo	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos
Alumínio	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos



Comentário E.C.S.Thomaz :

Segundo o *fib* Bulletin 15 / 2001 - B. GODART

fib = fédération internationale du béton

**Status of durability of post-tensioned tendons
in France**

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
Division Fonctionnement et Durabilité des Ouvrages d'Art
Paris, France.

“ ...

2.2 General remarks on corrosion

Corrosion of prestressing reinforcement can be divided into three main types:

- electrolytic corrosion (rust, small pits etc)
- stress corrosion
- hydrogen embrittlement corrosion.

The third form of corrosion has never been found in any of the surveys on French bridges. Likewise no fatigue fractures have so far been discovered in existing structures. Brittle fractures attributed to stress corrosion cracking have been found in some cases. After an investigation by J P Persy it appears that this only affects quenched hot rolled wires containing more than 0.1% of Cu. This type of prestressing steel was only used from 1950 to 1965.

...”

2.2 Comentários gerais sobre corrosão

Corrosão de armaduras de protensão pode ser dividida em três tipos principais:

1. Corrosão eletrolítica (ferrugem, pequenos furos “pit” , etc)
2. Stress corrosion
3. Corrosão por fragilização por hidrogênio

- A terceira forma de corrosão nunca foi encontrada em qualquer vistoria nas pontes da França.
- Do mesmo modo as fraturas por fadiga nunca foram identificadas em estruturas existentes.
- Rupturas frágeis atribuídas a *stress corrosion* têm sido encontradas em vários casos.
- Após uma investigação de J.P. Persy parece que esse tipo de corrosão só afeta fios de aço laminados a quente e temperados, contendo mais do que 0.1% de Cobre (0,1% Cu).
- Este tipo de aço de protensão só foi usado de 1950 a 1965.

O aço dos arames de protensão da Adutora do Ribeirão das Lages tinha teores de Cobre de 0,14% a 0,20%, bem maiores que o limite de 0.1 %, que seria o limite superior para que não ocorresse *stress corrosion*, segundo J. P. Persy.



ENSAIOS MECÂNICOS — Os ensaios mecânicos realizados, dada a estreita relação entre a solicitação à tração e o método de fabricação dos tubos em concreto protendido, não poderiam deixar de ser os de resistência à tração.

De início, submetemos uma série de arames colhidos do 1.º acidente (km 47), à tração, com o intuito exclusivo de apurar a existência de pontos de corrosão já avançados e também se os havia em diferentes estágios de progressão, hipóteses que confirmadas deveriam traduzir-se nos ensaios a realizar, por cargas de rutura inferiores à especificada e entre si diferentes, no caso de graus diversos de ataque. E de fato foram bastante expressivos os resultados colhidos, que a seguir transcrevemos:



ARAMES DO km 47 (1.ª RUTURA)		
<i>Corpo de prova</i> n.º	CARGA DE RUTURA	
	<i>Total</i> (kg)	<i>Unitária</i> (kg/mm ²)
1	1390	74,7
2	2700	145,0
3	1000	53,7
4	1230	66,1
5	1280	68,8
6	2030	109,1
7	2020	108,6

ARAMES DO km 37 (2.ª RUTURA)		
<i>Corpo de prova</i> n.º	CARGA DE RUTURA	
	<i>Total</i> (kg)	<i>Unitária</i> (kg/mm ²)
1	2670	143,5
2	2650	142,4
3	2280	122,5
4	2550	137,0
5	2545	136,8
6	2550	137,0
7	2530	136,0
8	2540	136,5
9	2520	135,4
10	2515	135,2
11	2515	135,2



ARAMES DO km 37 (3. ^a RUTURA)		
Corpo de prova n.º	CARGA DE RUTURA	
	Total (kg)	Unitária (kg/mm ²)
1	2490	133,8
2	2450	131,7
3	2450	131,7
4	2450	131,7
5	2450	131,7
6	2450	131,7
7	2310	124,1
8	2450	131,7
9	2450	131,7
10	2450	131,7
11	2450	131,7

ARAMES DO km 32 (4. ^a RUTURA)		
Corpo de prova n.º	CARGA DE RUTURA	
	Total (kg)	Unitária (kg/mm ²)
1	2275	122,3
2	2315	124,4
3	2450	131,7
4	2450	131,7
5	2450	131,7
6	2390	128,4
7	2400	129,0



ARAMES REMANESCENTES DAS BOBINAS UTILIZADAS NA OBRA DA 2.^a ADUTORA

(Material enviado ao INT pela TETRACAP)

Corpo de prova (n.º)	CARGA DE RUTURA		Limite de elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento total %
	Total (kg)	Unitária (kg/mm ²)		
1	2640	142,0	123	8,2
2	2650	142,4	123	8,2
3	2530	136,0	118	—
4	2515	135,0	120	—
5	2550	137,0	123,6	—

b) CHAPAS

EXAME MACROGRÁFICO — Os ensaios macrográficos procedidos nas chapas, visaram documentar a corrosão das bordas dos lábios de rutura, e principalmente o seu sentido de progressão, de fora para dentro.

EXAME MICROGRÁFICO — A inspeção microscópica realizada, obedeceu inicialmente ao desejo de apurar sua estrutura. Mais tarde, entretanto, quando conhecedores da composição química tôda especial das chapas, que continham inclusive teores de fósforo relativamente altos, ocorreu-nos a idéia de ligar a orientação preferencial tomada pelos rompimentos à possível existência de “ghost-lines” naquelas zonas. Daí a preocupação de examinar corpos de prova colhidos de regiões vizinhas às ruturas naturais dos acidentes, os quais na realidade, ostentaram sempre as faixas brancas características de zonas puramente ferríticas encrustadas na massa ferrito-perlítica, faixas estas justamente mais ricas em fósforo, o que traduz características mecânicas inferiores.



COMPOSIÇÃO QUÍMICA — Os exames químicos completos realizados nas chapas colhidas dos quatro tubos acidentados, revelaram uma composição tóda especial de aço, semelhante à dos aços conhecidos como de *baixa liga e alta resistência*, produtos que aliam a boas qualidades mecânicas, elevada resistência à corrosão atmosférica.

Segundo informações da TETRACAP, tais chapas deveriam ser de aço “MAYARI R”, material fabricado pela Bethlehem Steel Co., e que segundo Brady, “Materials Handbook”, ed. 1944, págs. 356, atende à carga de rutura de 49 kg/mm², possui um alongamento de 22 % e obedece à seguinte composição química:

Carbono	0,12 %
Manganês	0,50 a 1 %
Cromo	0,20 a 1 %
Níquel	0,25 a 0,75 %
Cobre	0,50 a 0,70 %
Silício	0,05 a 0,50 %

Como se poderá verificar pelo confronto destas especificações encontradas para as chapas examinadas, exceção feita do carbono, sempre acima do especificado, e do fósforo, também em teor muito acima do comum, o que não faz parte da especificação Mayari mencionada, os demais elementos presentes nas chapas da 2.^a adutora, enquadram-se dentro dos limites lá estabelecidos.



COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CHAPAS DAS TUBULAÇÕES ROMPIDAS NOS KM 47, 37 E 32

RESULTADOS DAS ANÁLISES

<i>Elementos</i>	km 47 (1. ^a rutura)	km 37 (2. ^a rutura)	km 37 (3. ^a rutura)	km 32 (4. ^a rutura)
Carbono	0,15 %	0,27 %	0,16 %	0,27 %
Silício	0,39 %	0,39 %	0,36 %	0,39 %
Manganês	0,64 %	0,64 %	0,64 %	0,69 %
Fósforo	0,11 %	0,08 %	0,11 %	0,08 %
Enxofre	0,012%	0,012%	0,020%	0,024%
Níquel	0,32 %	0,39 %	0,60 %	0,36 %
Cromo	0,50 %	0,55 %	0,45 %	0,55 %
Cobre	0,57 %	0,60 %	0,49 %	0,48 %
Molibdênio	0,03 %	0,04 %	0,04 %	0,04 %
Alumínio	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	traços espe- traços espe-
Estanho	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	traços espe- trográficos	trográficos trográficos

ENSAIOS MECÂNICOS — Havendo sido as caracterís-
ticas de resistência à tração, as únicas exigidas para as cha-
pas, pelas especificações a que obedeceu a proposta aceita
para a construção da 2.^a adutora, limitamos àqueles ensaios,
as pesquisas relacionadas a características mecânicas. Seguem-
se, resumidos em quadros, os valores colhidos nos ensaios rea-



lizados sobre o material de cada tubo rompido, em corpos de prova A.S.T.M.

Obs. — Considerando que as chapas de aço ensaiadas, já apresentavam corrosões apreciáveis, é evidente que os valores unitários que constam dos quadros, não são *a rigor*, a expressão da realidade, pois a área dos corpos de prova tomada para os cálculos, foi sempre 19,05 mm², o que só é verdade para espessuras de 1,5 mm. Adotamos este critério, propositadamente, para obter valores unitários correspondentes à pior das hipóteses, isto é, à que forneceria resultados mínimos.

CHAPA DO km 47 (1 - RUTURA)

Corpo de prova (n.º)	CARGA DE RUTURA		Limite de elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento total (%)
	Total (kg)	Unitária (kg/mm ²)		
1	1015	53,4	28,9	25,9
2	990	52,0	28,9	24
3	1060	55,7	28,9	24
4	1070	56,3	28,9	26

CHAPA DO km 37 (2.ª RUTURA)

Corpo de prova (n.º)	CARGA DE RUTURA		Limite de elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento total (%)
	Total (kg)	Unitária (kg/mm ²)		
1	1095	57,6	28,9	29,9
2	1085	57,1	—	24,0
3	880	46,8	—	18,0
4	885	46,8	28,9	18,0



CHAPA DO km 37 (3.^a RUTURA)

Corpo de prova (n.º)	CARGA DE RUTURA		Limite de elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento total (%)
	Total (kg)	Unitária (kg/mm ²)		
1	1080	56,8	28,9	25,9
2	1075	56,5	—	29,9
3	1085	56,9	28,9	24,0
4	1095	57,6	—	18,0

CHAPA DO km 32 (4.^a RUTURA)

Corpo de prova (n.º)	CARGA DE RUTURA		Limite de elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento total (%)
	Total (kg)	Unitária (kg/mm ²)		
1	905	47,6	28,9	20,0
2	905	47,6	—	18,0
3	810	42,6	21,0	10,2
4	810	42,6	—	10,2

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tècnicamente falando, o fenômeno conhecido como “corrosão”, manifesta-se sempre sob uma forma de destruição natural dos metais, podendo mesmo definir-se genèricamente, como a destruição dos metais, por meio de ação química ou eletro-química.

O produto resultante da destruição dos metais por tais ações, denominado na prática, como *produto de corrosão*, é um composto não metálico em que está sempre presente o oxi-



gênio e constitui uma confirmação viva da tendência dos produtos manufaturados, de voltarem à forma por que se encontravam inicialmente na natureza. Age portanto, a corrosão, como uma ação negativista ou contrária à conservação permanente de grandes conquistas industriais sôbre que repousa o progresso que caracteriza a atual civilização, pois a tanto equívale a destruição implacável, particularmente, dos metais ferrosos.

Mas, cingindo-nos embora nestas ligeiras considerações, à corrosão dos ferrosos, o que se poderá resumir na corrosão do ferro e dos aços, corremos ainda assim o risco de nos estender e divagar em demasia, afastando-nos da meta visada neste trabalho. Eis por que vamos ferir diretamente a corrosão, sob o aspecto que mais de perto nos interessa, e que constitui, por assim dizer, uma ativação do fenômeno, por influência de tensões, ou melhor dito, de diferenças de tensões entre regiões localizadas da mesma massa metálica. Os norte-americanos denominaram êste tipo particular de corrosão de “stress-corrosion”, expressão que poderíamos traduzir por *corrosão-esfôrço* ou *corrosão sob tensão*.

Os primeiros casos conhecidos de “stress-corrosion”, em aços-comuns, foram observados em pontes-pênseis nos Estados Unidos.

A teoria geralmente aceita para explicar o mecanismo do fenômeno, baseia-se em ação eletro-química. É fato conhecido que diferenças de tensão mecânica na mesma massa metálica, criam forças eletromotrizes diferentes e daí a formação de áreas catódicas e anódicas, com o conseqüente estabelecimento de corrente elétrica, desde que haja um meio condutor.

Êste pressuposto é verdadeiro, e foi inclusive demonstrado aqui no INT, quando da visita dos engenheiros norte-americanos e brasileiros interessados no assunto, da seguinte maneira:

Tomou-se um arame de ferro prèviamente recozido para desfazer totalmente as tensões de trabalho mecânico na fieira, de que era portador e depois de dividí-lo em duas partes, estabeleceu-se a ligação dos dois pedaços aos dois polos de um potenciômetro sensível, utilizando-se como meio condutor de



corrente, uma solução de NaCl. Observou-se absoluta igualdade de potencial traduzida pela permanência do ponteiro do potenciômetro no zero da escala. Entretanto, a simples aplicação de esforço de tração a um dos arames, foi suficiente para deslocar o ponteiro do potenciômetro até 60 milivolts.

Uma das características mais específicas da “stress-corrosion”, é a sua manifestação local, com profunda penetração, o que era explicado no caso dos arames das pontes metálicas, admitindo um núcleo inicial de corrosão transformado em zona catódica relativamente às áreas mais internas, mais fortemente tracionadas e portanto anódicas. A ~~tensão~~ tensão constantemente aplicada, teria a tendência de fazer caminhar a fissura resultante da corrosão, expondo dêste modo nova área à corrosão e daí a progressão do fenômeno.

No caso da 2.^a adutora de Ribeirão das Lages, sendo como é notório, o arame de aço utilizado previamente temperado, tornava-se perfeitamente razoável admitir-se a ocorrência de micro-fissuras de têmpera, não obstante não tenhamos conseguido até agora provar sua existência, nem mesmo com ensaios no magna-fluxo. Baseado nesta pre-suposição, formulou o Dr. Fonseca Costa uma hipótese, perfeitamente aceitável, de que a ocorrência de micro-fissuras superficiais nos arames, deveria servir, pelo menos, para aumentar a velocidade da “stress-corrosion”, o que parece coincidir com as observações de que o fenômeno é mais veloz, quando se trata de arame temperado.

Exposto em linhas gerais o mecanismo do fenômeno, já o podemos encarar mais particularmente, isto é, da maneira por que se apresentou no Brasil, em tubos de adução de água, construídos em concreto protendido. Consta que na Venezuela, ocorreram acidentes idênticos e mais recentemente ainda, a revista norte-americana “Engineering News-Record”, publicou em seu número de 19 de fevereiro do corrente ano, um artigo dando notícia de um caso de corrosão semelhante ao da 2.^a adutora, ocorrido numa linha de tubos em concreto protendido em construção em Regina, no Canadá.

Diante do exposto, parece fora de dúvida, que a “stress-corrosion” encontrou na construção de tubos em concreto pro-



tendido, um amplo laboratório para suas malignas manifestações, o que é tanto mais lamentável, quando se sabe que vem atravessando uma fase de grande difusão internacional, em suas mais variadas aplicações, aquêle método de construção em concreto.

Rebuscando na apoucada bibliografia especializada, os poucos esclarecimentos existentes sobre a "stress-corrosion" em aços comuns, cremos que os principais fatores que com ela se relacionam, fornecendo-lhe as condições propícias ao seu desenvolvimento, poderão ser resumidos ou condensados nos seguintes itens:

- 1) Diferença de tensão mecânica entre áreas contíguas da mesma massa metálica.
- 2) Presença de um eletrólito ou meio condutor de corrente.
- 3) Presença de anion nitrato no eletrólito.
- 4) Presença de anion sulfeto no eletrólito.

Para que se manifeste o fenômeno, torna-se indispensável a coexistência dos dois primeiros itens, ao passo que os dois últimos, embora dispensáveis, funcionam como coadjuvantes e aceleradores da ação corrosiva.

Ora, no caso de tubos semelhantes aos da 2.^a adutora, não sendo possível pela sua própria natureza, evitar o item 1, é óbvio que o meio de evitar ou pelo menos atenuar a "stress-corrosion", será impedir ou reduzir ao mínimo, a permeabilidade da camada protetora de argamassa.

Esta seria a medida mais efetiva a tomar, pois combateria o mal em sua origem, mas receiamos que na prática, tal remédio não seja tão simples de aplicar. Outros recursos, terão efeito apenas paliativo.

Assim, o uso de arame de aço não temperado, mas apenas encruado por trefilação, embora possa concorrer até certo ponto, para atenuar a marcha da corrosão, já pela ausência de fissuras decorrentes de têmpera, já pela eliminação de uma das parcelas da tensão total (tensão de têmpera), não a evitará todavia, pois estarão de pé os defeitos superficiais originários do encruamento exagerado necessário para suprir a



falta da têmpera, além das próprias tensões provenientes do trabalho mecânico a frio. É bem verdade que o pouco que se conhece a respeito dêste detalhe, dá a entender uma progressão mais veloz nos casos de arames temperados, o que fez com que a própria “Lock-Joint” retirasse, há mais de dois anos de suas especificações, os arames temperados. Entretanto, por outro lado, o “Symposium on Stress-corrosion cracking of metals”, publicação da A.S.T.M. e A.I.M.E., menciona casos de fratura por “stress-corrosion”, ocorridas em arames da ponte de Portsmouth, trabalhados a frio.



CONCLUSÕES

De tudo quanto foi exposto no presente relatório, resultaram as seguintes conclusões:

1.^a) A causa primária dos acidentes verificados na 2.^a adutora de Ribeirão das Lages, foi a rutura dos arames de aço que reforçavam os tubos.

2.^a) A causa da rutura dos arames de aço, foi por sua vêz, o fenômeno de "stress-corrosion", exceção feita do acidente do km 32, em que não se constatou aquêle fenômeno.

3.^a) Concorreram para a possibilidade de desenvolvimento de tal tipo de corrosão:

- a) as tensões aplicadas ao arame e portanto, o próprio sistema de fabricação dos tubos.
- b) a permeabilidade do revestimento externo de argamassa, protetor dos tubos, que permitiu a penetração de umidade contendo matérias minerais em dissolução, apta portanto, à condução de corrente elétrica.

4.^a) Parecem ter concorrido como coadjuvantes para acelerar a marcha da corrosão:

- a) os tratamentos térmicos sofridos pelos arames de aço empregados (têmpera e revenido).
- b) o pH, em geral bastante baixo, denotando considerável acidez, apresentado pelo solo, nos locais dos acidentes, o que justifica perfeitamente maior ataque da argamassa e portanto a formação de maior quantidade de sais, o que resulta afinal em eletrólito mais rico em sais minerais, obviamente melhor condutor de corrente.



- c) a presença de pequenas quantidades embora, porém verificadas com toda a segurança, dos anions $\bar{N}O_3$ e \bar{S} , dadas as possibilidades em princípio, de ter havido uma concentração local daqueles ions.

5.^a) A rutura do km. 32, foi a única em que não se constatou nas amostras colhidas, nenhum aspecto típico de “stress-corrosion”, mas foi também a única, em que os arames se apresentaram num estado de corrosão superficial tão intenso, o que deve ter alguma relação com a maior permeabilidade da argamassa naquele tubo.

6.^a) A aplicação direta dos arames de aço sobre a chapa que constitui a camisa dos tubos não teve a menor influência no fenômeno de “stress-corrosion” dos arames; do contrário, as corrosões seriam flagrantes nos pontos de contato entre os arames e as chapas, o que não aconteceu na prática.

7.^a) As ruturas observadas nas chapas representam uma consequência de sua sobrecarga ocasionada pela rutura dos arames. Naturalmente os rompimentos deram-se nas regiões mais fracas, que correspondiam exatamente às áreas mais consumidas por corrosão.

8.^a) A localização das corrosões nas chapas, orientadas em direção retilínea no sentido longitudinal dos tubos, obedeceu provavelmente ao comportamento anódico de “ghost-lines” presentes naqueles locais, ocorrendo as ruturas naturalmente, onde mais profundas foram as corrosões. Tal hipótese funda-se no fato de se haver constatado sempre, nas vizinhanças das ruturas, as estruturas alinhadas características de “ghost-lines”, ao passo que nas regiões mais distantes das zonas rompidas e menos atingidas pela corrosão, tais estruturas não foram observadas.

9.^a) Não obstante até à presente data, só tenham ocorrido as quatro ruturas de conhecimento geral na 2.^a adutora, não parece lícito admitir-se como hipótese remota, a repetição de acidentes daquele tipo. A natureza essencialmente localizada do fenômeno de “stress-corrosion”; o grande percurso da linha que constitui a 2.^a adutora; a possibilidade de inter-



venção de agentes coadjuvantes de corrosão diversos e até mesmo associados, conforme o local da adutora encarado; tudo isto, constitui um conjunto de fatores ponderáveis militando no sentido de se admitir como mais provável talvez, exatamente o contrário, isto é, a possibilidade de novos acidentes a intervalos de tempo variáveis e não determináveis, correspondendo a velocidades diferentes de progressão do fenômeno através do arame de aço.

10.º) Nenhum dos métodos conhecidos de proteção contra corrosão poderá ser adotado com sucesso, para sustar o progresso da “stress-corrosion” no arame dos tubos. A única medida do gênero, viável, seria a proteção catódica das camisas de aço, visando garantir sua maior duração.

Mas tal recurso, teria um valor duvidoso, já que deveria ser acompanhado de redução considerável na carga da linha, o que resultaria no grave inconveniente de redução no abastecimento de água, inconveniente êste que só poderia ser sanado por um oneroso sistema de bombeamento. Resta saber se o elevado custo de tais obras seria compensador.

Explanadas amplamente tôdas as questões relacionadas com os acidentes ocorridos na 2.ª adutora, tomando em consideração os elementos colhidos nos ensaios que se podiam enquadrar no âmbito da pesquisa tecnológica mais imediata, ficaram automaticamente atendidos, quase todos os quesitos formulados pelo Sr. Secretário Geral de Viação e Obras, tendo sido pois, prestada pelo INT, a honrosa colaboração solicitada pelo Exm.º Snr. Prefeito do Distrito Federal.

Os itens *f* e *g*, não foram atendidos, pelas duas razões que se seguem:

- 1.ª) Verificação de que nenhuma relação havia entre as corrosões dos arames — causa indiscutível das rupturas dos tubos — e as chapas de aço das camisas.
- 2.ª) Impossibilidade prática de colher os dados solicitados em prazo que se coadunasse com a finalidade a que se destinava o esclarecimento solicitado.



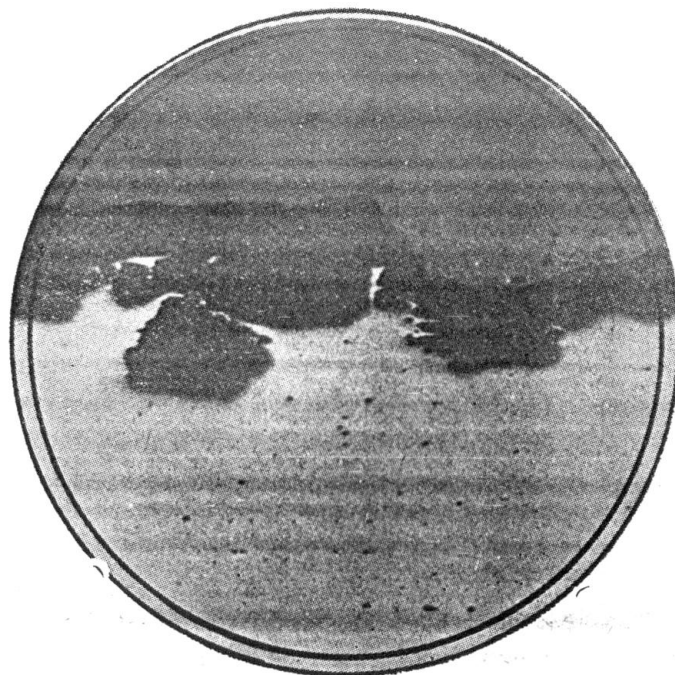
1.^a RUTURA (km 47)



Microfotografia focalizando a estrutura do arame remetido ao INT pela TETRACAP, como sobra do que foi utilizado na construção dos tubos da 2.^a adutora de Ribeirão das Lages: MARTENSITA relativamente grosseira.

Ataque nital

x 350



Microfotografia de um corte longitudinal do arame acima mostrando intensa corrosão superficial, porém ausência absoluta de "stress-corrosion".
A espessura da camada de ferrugem, na zona focalizada, varia de 0,14 a 0,40mm.

Sem ataque

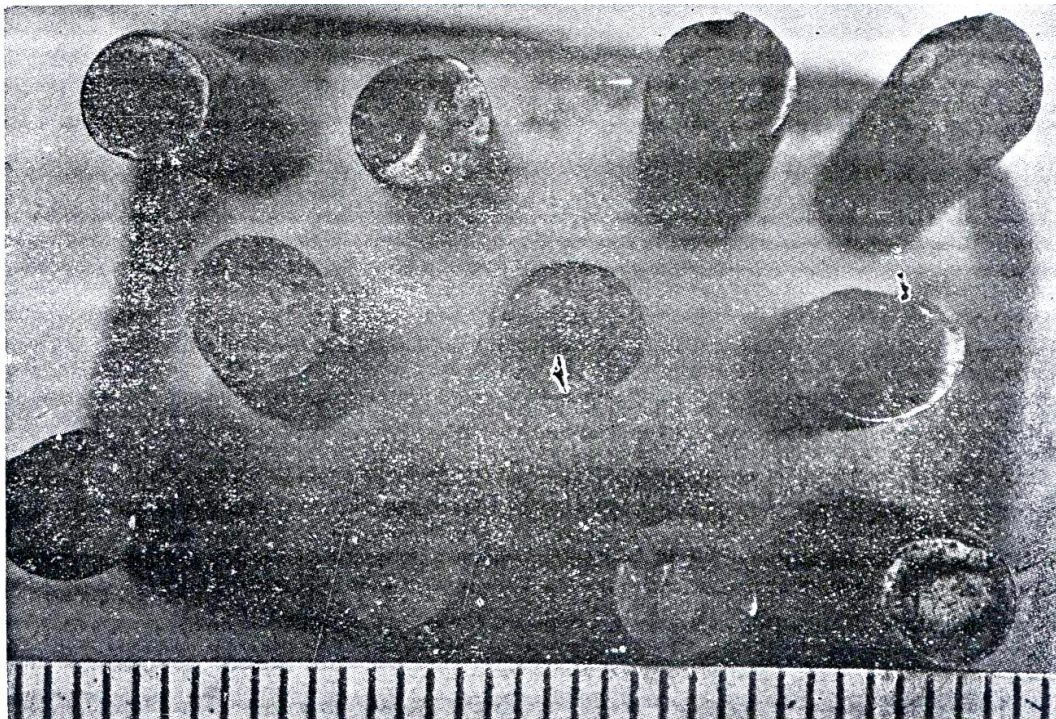
x 35



1.^a RUTURA (km 47)



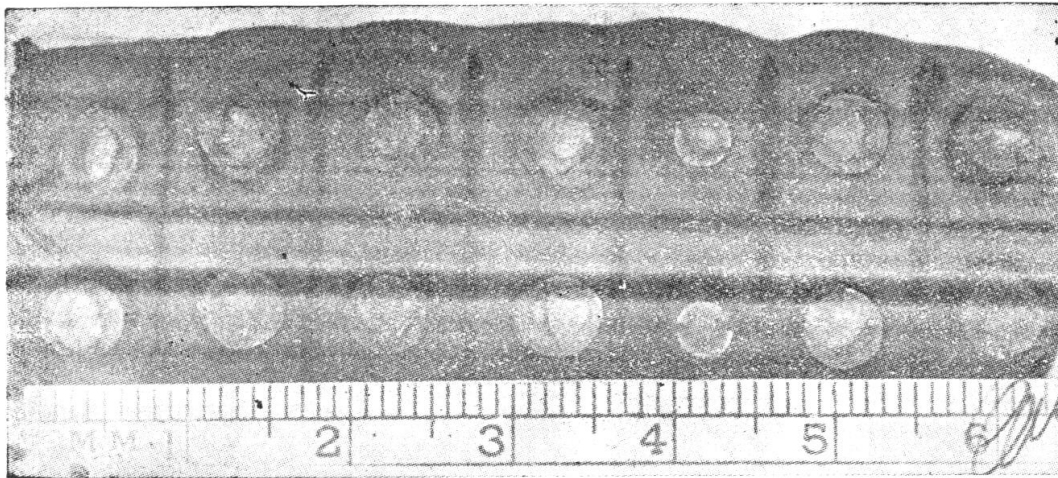
Macrofotografia focalizando as superfícies de fratura naturais, ocorridas no acidente do km 47, com exceção do arame central da direita, que foi colhido do km 37



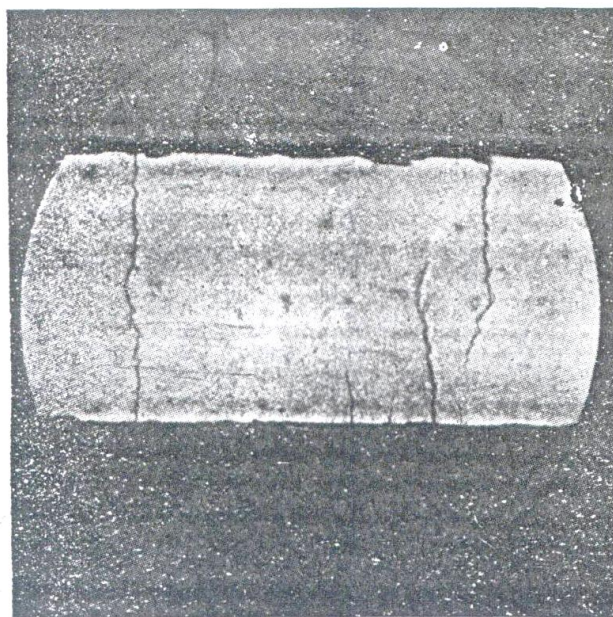
Macrofotografia focalizando de t^opo, as superfícies de fratura naturais dos arames colhidos no acidente do km 47, por onde se nota ausência de estrição, o que para aços do tipo, traduz descontinuidade da matéria metálica.



1.^a RUTURA (km 47)



Macrofotografia focalizando as superfícies de rutura obtidas em ensaios de tração realizados no INT, em corpos de prova colhidos do tubo acidentado no km 47 e que corresponderam, da esquerda para a direita, às seguintes cargas totais de rutura, em quilogramas: 2030, 1390, 2020, 1280, 2700, 1230 e 1000. Nota-se nitidamente, que apenas o arame correspondente à carga de rutura total de 2700 kg, ou seja, carga unitária de 144 kg/mm^2 , apresenta apreciável estrição e portanto, alongamento, o que constitui evidentemente, uma característica do arame especificado para a obra. Os demais, já sofreram influência, em graus variados, do fenômeno de "stress-corrosion", hajam vista de um lado, suas fraturas praticamente sem estrição e de outro, os valores da carga de rutura, consideravelmente baixos



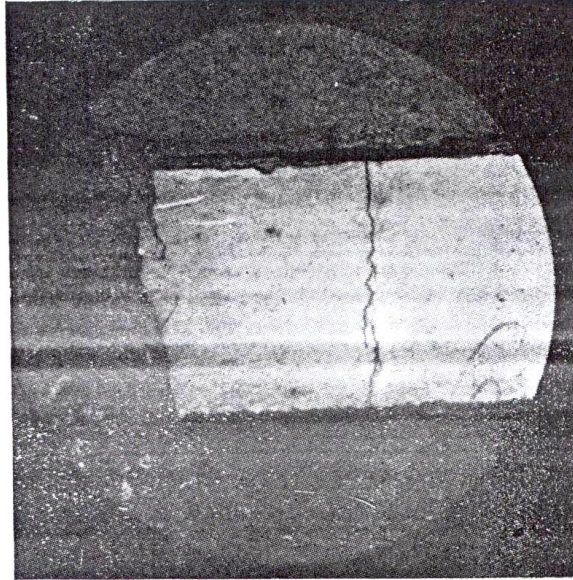
Macrofotografia de um corte longitudinal de um arame do tubo acidentado no km 47. Notam-se penetrações profundas de "stress-corrosion", vasando uma delas lado a lado, o arame.

Sem ataque.

x 10



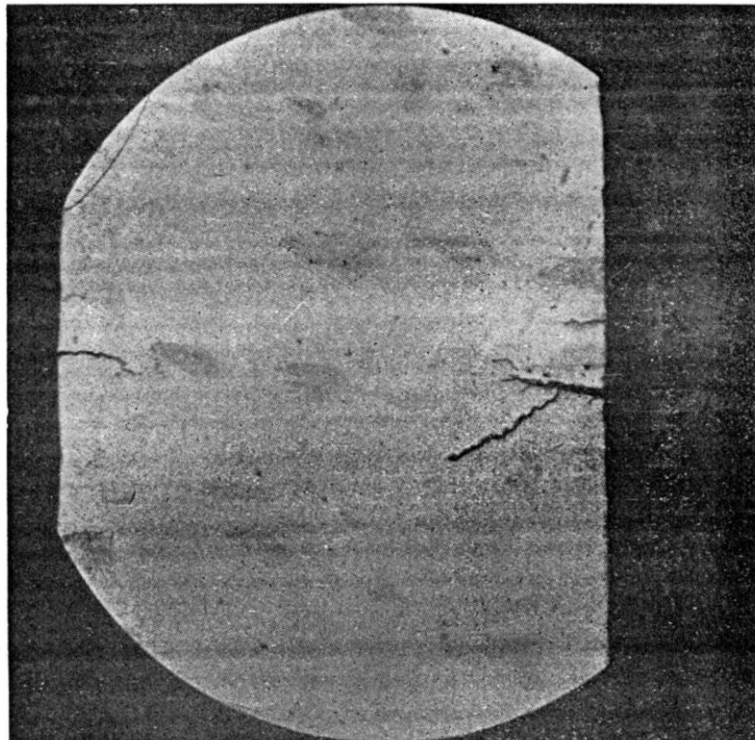
1.^a RUTURA (km 47)



Macrofotografia de outro corte longitudinal, interessando uma superfície de fratura natural ocorrida no km 47. Vê-se que a fratura acompanhou exatamente as fissuras de “stress-corrosion”.

Sem ataque.

x 10



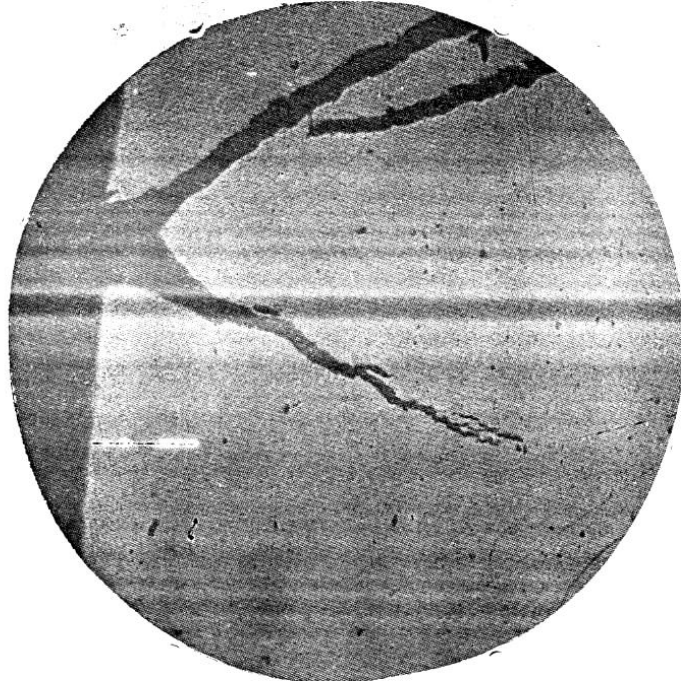
Macrofotografia de um corte longitudinal passando próximo de um diâmetro, em arame do tubo rompido no km 47. Outras fissuras de “stress-corrosion”.

Sem ataque.

x 15



1.^a RUTURA (km 47)



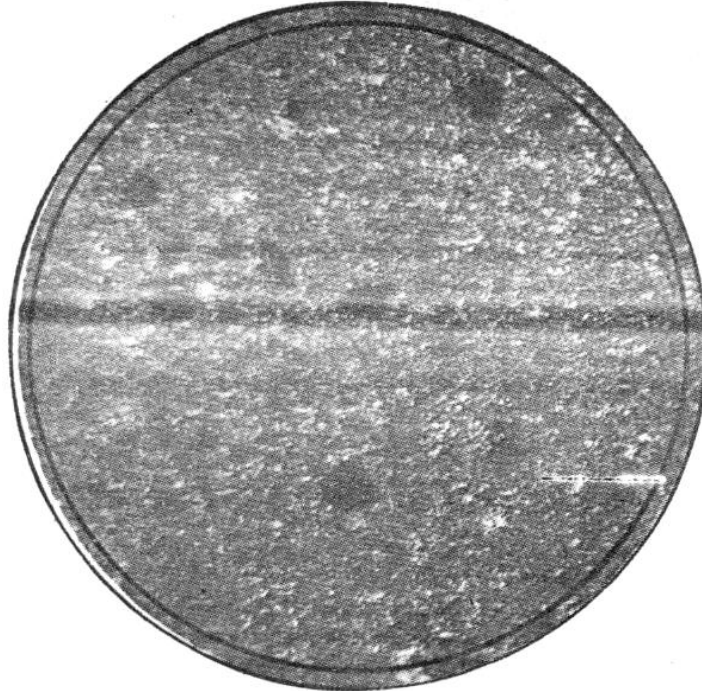
Microfotografia de um corte longitudinal, interessando fissuras de
"stress-corrosion", em arame do km 47.
Sem ataque. x 65



Microfotografia interessando um conjunto de fissuras de "stress-
corrosion" ainda em arame do acidente do km 47.
Ataque: nital. x 95



1.ª RUTURA (km 47)



Microfotografia focalizando a estrutura do aço de um corpo de prova de arame do km 47, tracionado no INT e rompido com 1280 kg.:
SORBITA com pouca TROOSTITA.

Ataque: nital

x 500



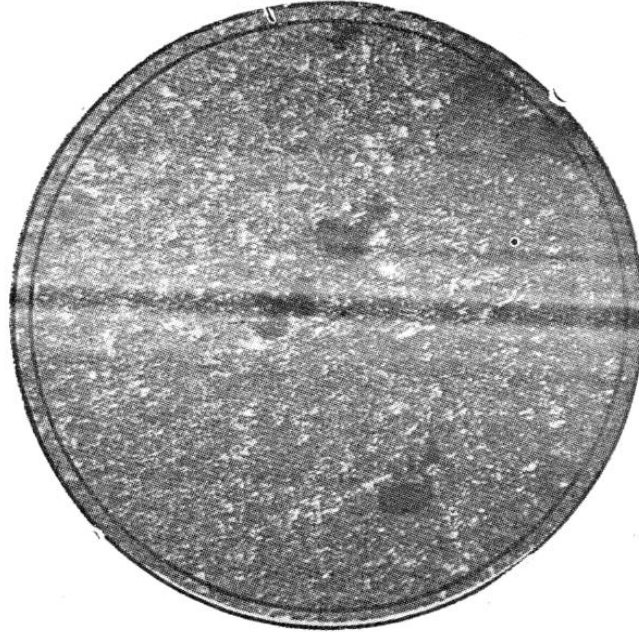
Microfotografia focalizando a estrutura do aço de um corpo de prova de arame do km 47, tracionado no INT e rompido com 1230 kg.:
SORBITA com abundante TROOSTITA.

Ataque: nital

x 500



1.^a RUTURA (km 47)



Microfotografia focalizando a estrutura do aço de um corpo de prova de arame do km 47, tracionado no INT e rompido com 1000 kg.:
SORBITA com pouca TROOSTITA.

Ataque: nital

x 500



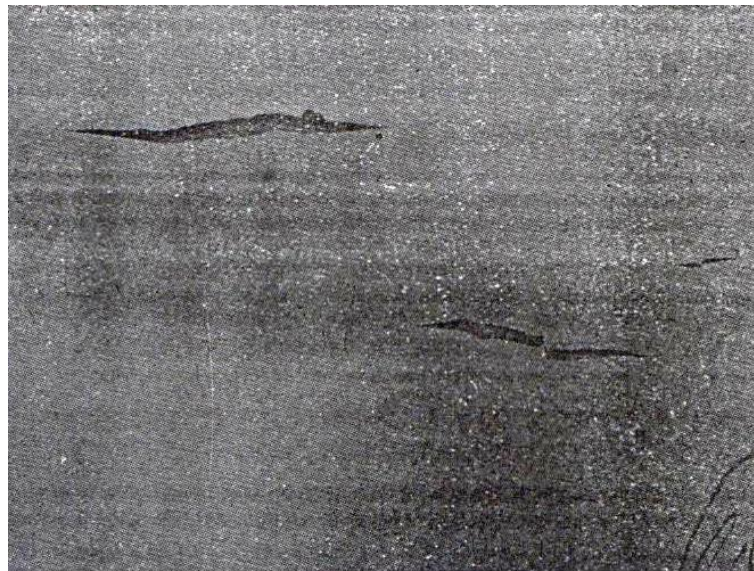
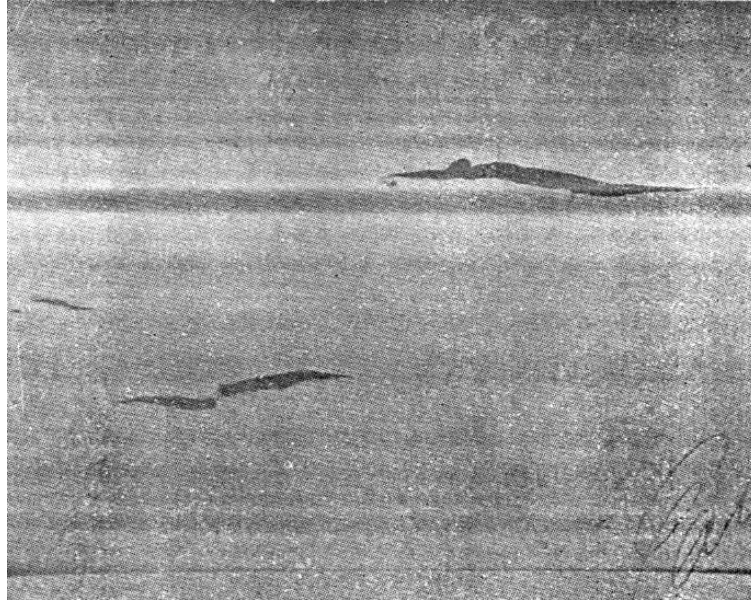
Microfotografia focalizando a estrutura de um arame proveniente do tubo acidentado no km 47, depois de submetido a recozimento: perlita com rara ferrita (título fictício 0,7% de carbono).

Ataque: nital.

x 350



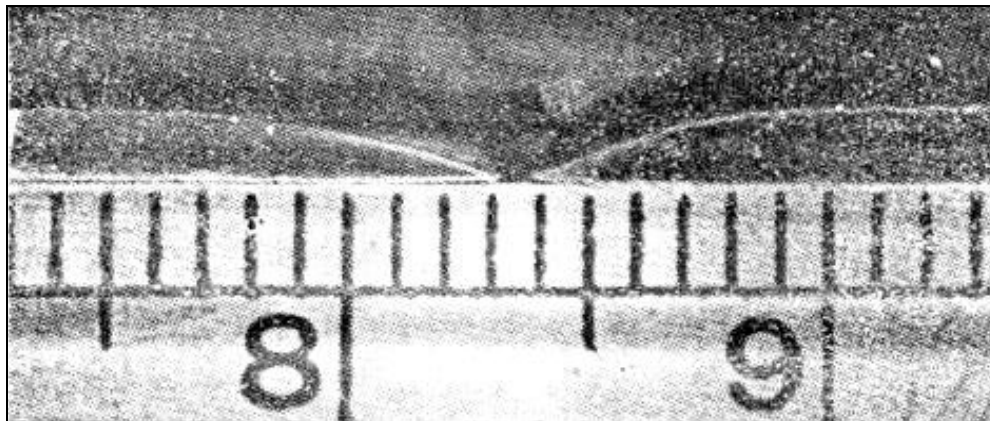
1.^a RUTURA (km 47)



Aspectos fotográficos das ruturas sofridas pela camisa de aço do tubo rompido no km 47. Em cima, aspecto tomado pela face em contato direto com os arames, cujas marcas são bem visíveis, em sentido normal ao eixo das ruturas. Em baixo, a mesma região, focalizada pela face oposta, isto é, a que estava em contato com o tubo de concreto.

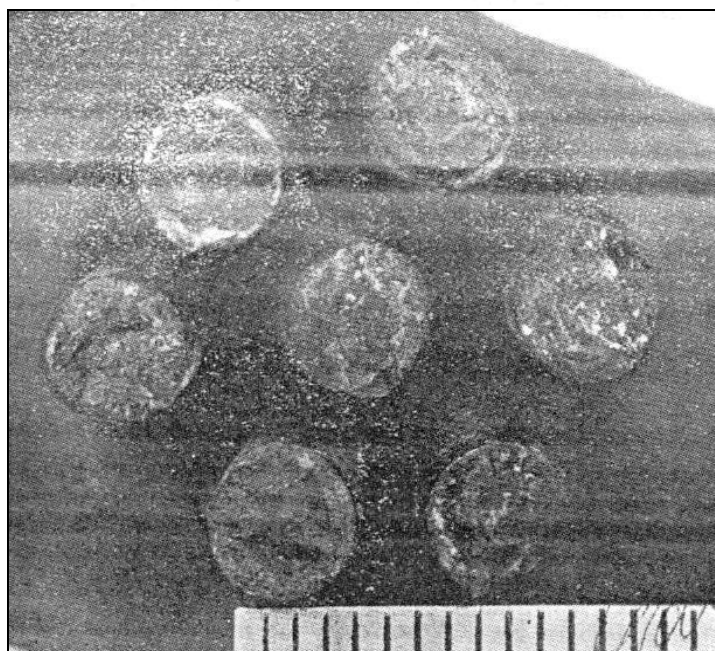


1.^a RUTURA (km 47)



Macrofotografia de dois cortes normais às ruturas da chapa do km 47, mostrando claramente, pela destruição acentuada do aço, o sentido da corrosão de fora para dentro.

2.^a RUTURA (km 37)



Macrofotografia focalizando, de t^opo, as superfícies de fraturas naturais, em arames colhidos no tubo acidentado no km 37 (2.^a rutura ocorrida na linha). Nota-se ausência de estrição, o que denota, para o tipo de aço que representam os arames, descontinuidade da matéria metálica (corrosão).

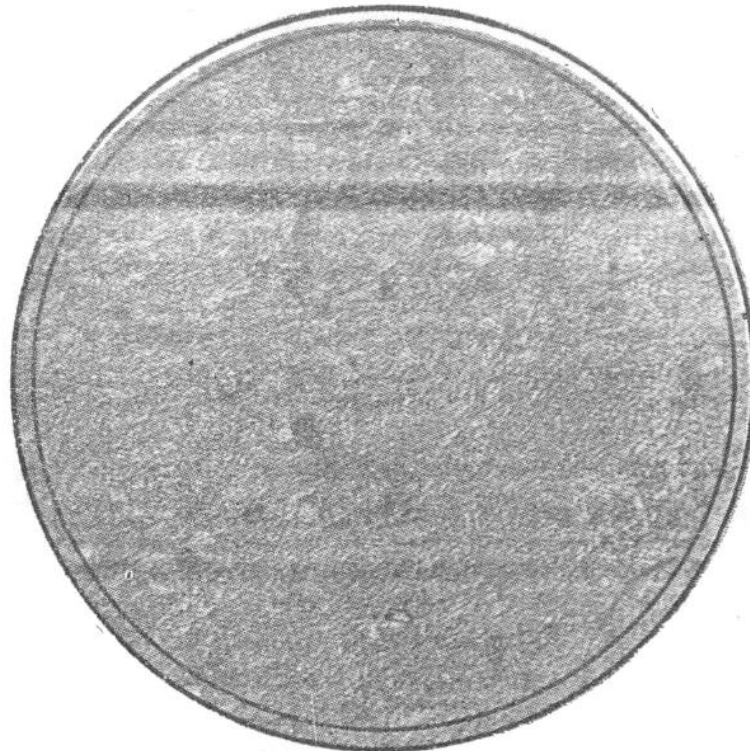


2.^a RUTURA (km 37)



Macrofotografia de um corte longitudinal de um arame do tubo acidentado no km 37 (2.^a rutura). Notam-se duas profundas penetrações de “stress-corrosion”, vasando lado a lado, o arame.
Sem ataque. x 10

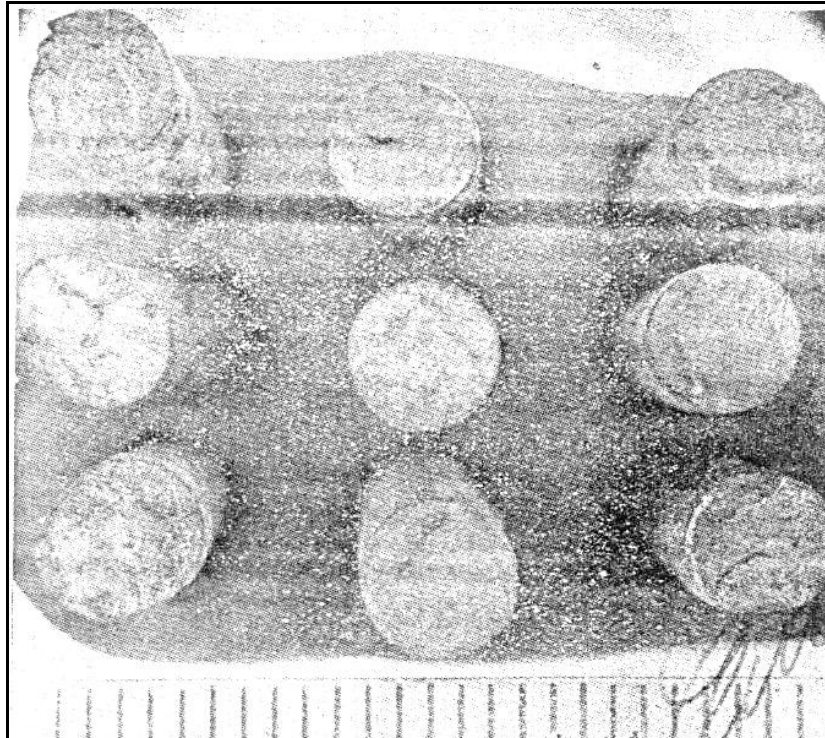
2.^a RUTURA (km 37)



Microfotografia focalizando a estrutura do aço de um arame colhido do tubo acidentado no km 37 (2.^a rutura): MARTENSITA FINÍSSIMA.
Ataque: nital x 500

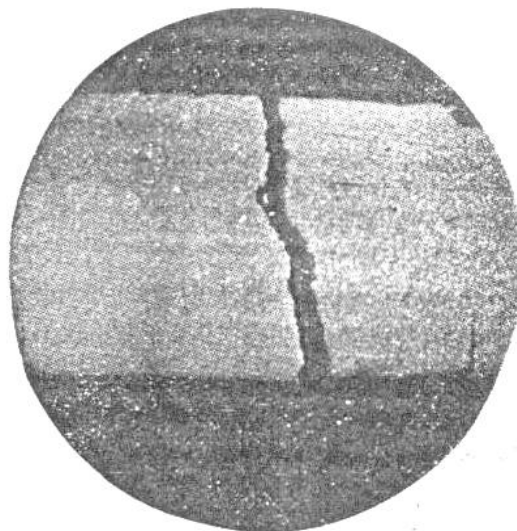


3.^a RUTURA (km 37)



Macrofotografia focalizando, de t^opo, as superfícies de fratura naturais, em arames colhidos do tubo acidentado no km 37 (3.^a rutura). Nota-se ausência de estrição, o que significa para o tipo de aço que representam os arames, descontinuidade de matéria metálica (corrosão).

x 10



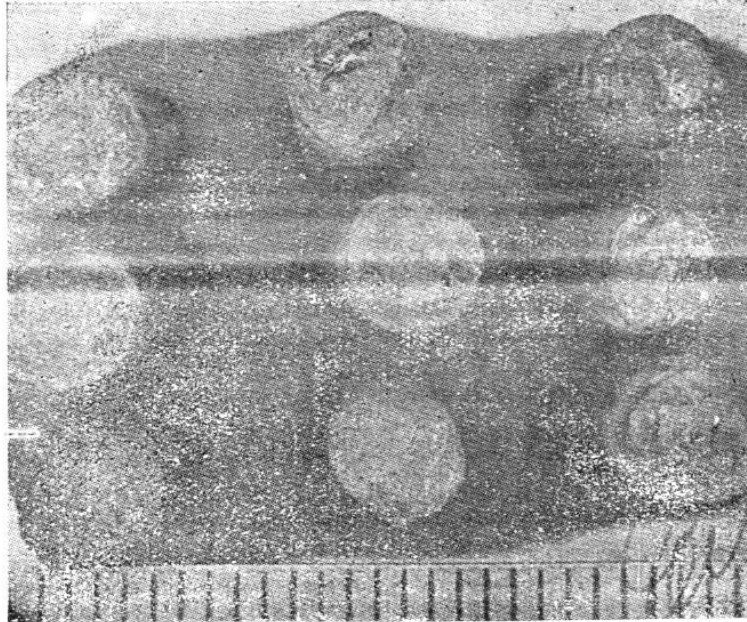
Macrofotografia de um corte longitudinal de um arame de tubo acidentado no km 37 (3.^a rutura). Nota-se profunda penetração de "stress-corrosion", vasando lado a lado, o arame.

Sem ataque.

x 10



4.^a RUTURA (km. 32)



Macrofotografia focalizando, de t^opo, as superfícies de fratura naturais, em arames colhidos no tubo acidentado no km. 32 (4.^a rutura ocorrida na linha). Nota-se ausência de estrição, o que traduz, para o tipo de aço que tais arames representam, descontinuidade da matéria metálica (corrosão).



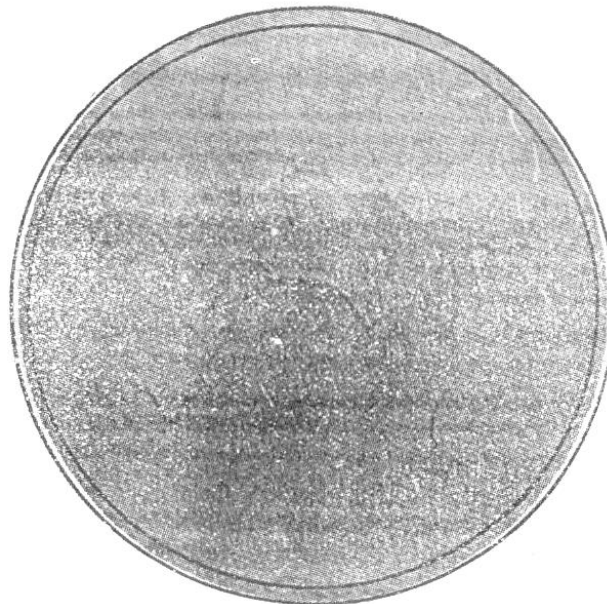
Microfotografia focalizando a estrutura do aço de um arame colhido do tubo acidentado no km. 32 (4.^a rutura): SORBITA.
Ataque: nital. x 500



4.^a RUTURA (km 32)



Aspecto fotográfico de uma rutura da camisa do tubo acidentado no km 32 (4.^a rutura). Vista tomada pela face externa da camisa. Pela destruição visível dos bordos dos lábios da rutura, torna-se evidente que houve um processo de corrosão desenvolvido de fora para dentro.



Microfotografia focalizando a estrutura do aço da camisa do tubo acidentado no km 32 (4.^a rutura): ferrita com rara perlita (título fictício de 0,1% de carbono).

Ataque: nital.

x 500



Comentário E.C.S. Thomaz : Com base nos conhecimentos adquiridos pelo INT nessa pesquisa das rupturas na Adutora de Ribeirão das Lages em 1949, o Prof. Lobo Carneiro fez sugestões ao projeto da Ponte Rio-Niterói em 1970.

Ver o livro de memórias :

ENGENHARIA DA TRANSPARÊNCIA

Vida e obra de Lobo Carneiro

...

...

Didático, explicou ponto por ponto:

“Concretagem da laje superior da ponte em duas camadas, sendo a segunda após a protensão:

Com esta técnica, o concreto da segunda camada da laje superior não fica inicialmente protendido, isto é, pré-comprimido. Somente ao fim de um período variável entre um e três anos, essa camada, graças à deformação lenta da camada subjacente, passaria a usufruir, de modo parcial e precário, dos benefícios da protensão. Desaparece assim, para essa segunda camada, uma das principais vantagens da protensão, que é a não-fissuração. E é justamente nessa segunda camada que ficarão embutidos os cabos de protensão, constituídos por cordas de aço com fios muito finos (4mm de diâmetro, apenas), altamente suscetíveis à corrosão.

O ambiente marinho é, como se sabe, altamente corrosivo, e isso tanto se aplica à face inferior como à face superior da ponte. A obra ficará quase sempre envolvida por atmosfera contendo gotículas de água salgada, sendo ainda possível a existência de emanações permanentes de decomposição de matérias orgânicas, etc. É evidentemente muito pior, do ponto de vista da corrosão, a situação de uma ponte sobre o mar ou sobre um mangue do que a situação de uma ponte sobre um rio.



O tráfego da ponte será intenso e pesado (caminhões de carga) a partir do próprio dia da inauguração, e não esperará por aquele período de um a três anos, findo o qual a segunda camada ficaria parcialmente protendida. A fissuração dessa segunda camada será assim altamente provável, tendo como consequência a corrosão dos cabos.”

Lembrando que esse sistema de construção já fora empregado no Brasil, “com péssimos resultados”, na segunda adutora de Ribeirão das Lajes, “tristemente célebre pela série de rupturas iniciadas quando a idade da obra atingiu quatro a cinco anos”, apontou acidentes semelhantes em adutoras do Canadá e da África do Norte e em tanques de petróleo nos Estados Unidos. “A causa foi sempre a mesma: a armadura de protensão não ficou embutida em concreto protendido, e sim em uma camada pseudoprotetora, executada após a protensão.”

...

...

A sugestão de executar a laje superior da ponte Rio–Niterói em uma só etapa foi adotada pelos construtores da obra.

+++