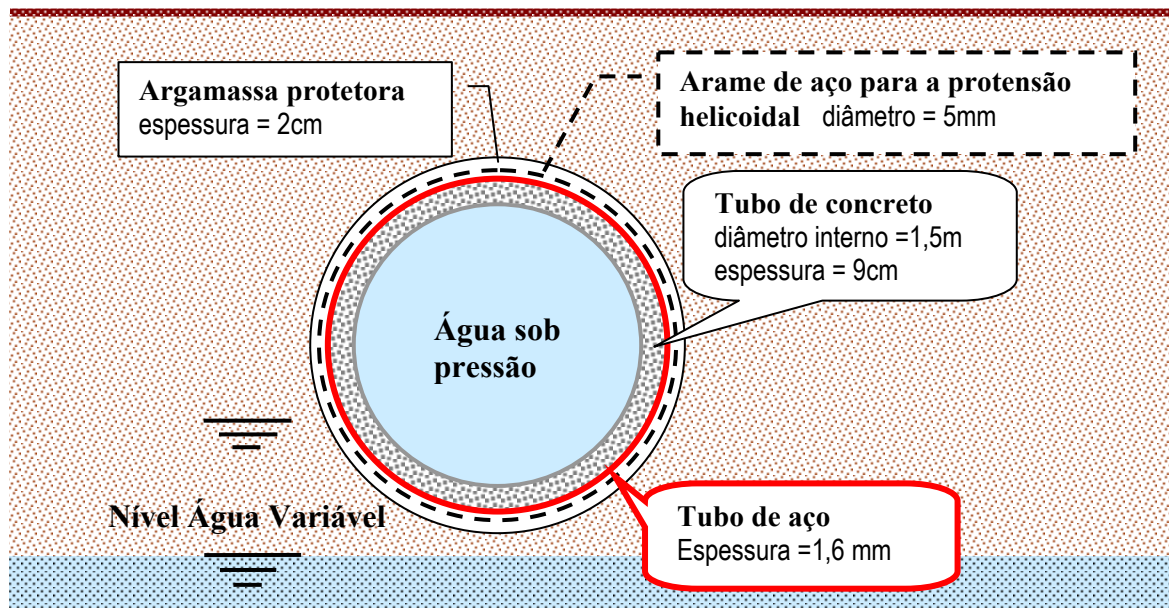


### EXEMPLO Nº 128 :

**ESTRUTURA:** Adutora enterrada, fabricada com tubos de concreto protendido. A protensão foi feita em forma helicoidal em torno de um tubo de concreto revestido de camisa de aço.

**DEGRADAÇÃO:** Ruptura total da adutora em vários pontos.

**ESQUEMA:**



### CAUSA DA RUPTURA TOTAL : Corrosão sob tensão, dos arames de protensão

Segundo Fonseca Costa e Silveira Feijó, em [89] :

- “A corrosão sob tensão é uma corrosão penetrante e extremamente rápida que, partindo da superfície externa dos arames, se dirige para o interior, sob a forma de fissuras finas, freqüentemente bifurcadas”.  
“Concorreram para a corrosão sob tensão, a elevada tensão de tração nos arames e a grande permeabilidade da argamassa de revestimento, que permitiu a penetração da água, contendo matérias minerais em dissolução, apta, portanto, à condução de corrente elétrica”.  
As medições feitas no solo e na água do solo mostraram a presença de sulfetos ( $S^{--}$ ) e de nitratos ( $NO_3^-$ ). O solo da obra tinha um **pH** baixo;  $3.9 < \text{pH} < 5.1$ . Era portanto ácido e muito agressivo.

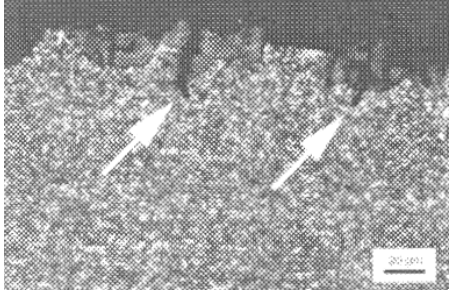

Segundo F.L.Lobo Carneiro [90] :

- “Não sendo pré-comprimida 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”.
- A corrosão sob tensão causou uma grande redução da resistência à tração no arame de protensão dessa obra. Os ensaios mostraram que a tensão de ruptura dos arames de aço remanescentes da fabricação dos tubos, portanto sem “stress corrosion”, era de 1400 MPa. A tensão de ruptura de alguns arames retirados da adutora rompida era de apenas 540 MPa.
- A fissuração na corrosão sob tensão, (“Stress Corrosion Cracking”), é causada pela ação simultânea de um meio ambiente agressivo e de elevadas tensões de tração no aço. Essas tensões são, em geral, devidas às forças externas aplicadas. Podem também ser tensões internas residuais, devidas ao processo de fabricação. Podem ainda ser a combinação de ambas
- Na corrosão sob tensão, não há a conhecida formação intensa de ferrugem, e sim a propagação das fissuras a partir da superfície das barras de aço.
- O aço de protensão, usado na adutora, era um aço temperado ASTM A229-41, com teor de carbono igual a  $C = 0,68\%$ . A têmpera desse aço é feita aquecendo o aço até  $\approx 800$  graus centígrados e a seguir resfriando bruscamente o aço em óleo.

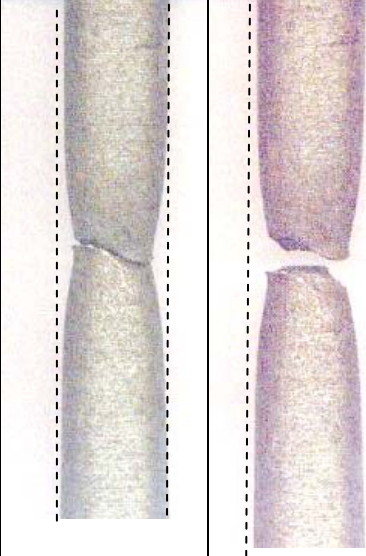
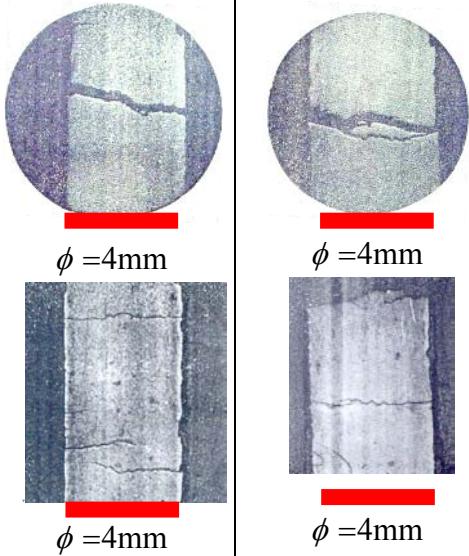

**EXEMPLO Nº 128 : ( CONTINUAÇÃO)**

**ESTRUTURA :** Adutora enterrada, fabricada com tubos de concreto protendido.

**OBSERVAÇÃO:** As cordoalhas, hoje usadas, não são encruadas pela têmpera e sim pela trefilação a frio. A trefilação, a frio, é um dos processos usados para aumentar a resistência dos arames de protensão. É realizada pela passagem do arame de aço, sob tração e a frio, através de vários orifícios com diâmetros decrescentes. Ver nas figuras abaixo as microestruturas dos aços temperados e dos aços trefilados.

	
Aço de protensão temperado com microfissuras na superfície. $f_{p0,2\%}=1450\text{MPa}$ e $f_p=1600\text{MPa}$ Micro-estrutura de martensita. Ver [93]. Largura da micrografia = 220 micrômetros	Cordoalha de aço de protensão trefilado a frio. $f_{p0,2\%}=1570\text{MPa}$ e $f_p=1770\text{MPa}$ Micro-estrutura em filetes. Ver [93]. Largura da micrografia=220 micrômetros

- Ensaios feitos por Krumbach, R. [93], mostram que o aços temperados têm baixa resistência à corrosão sob tensão e que os aços trefilados das cordoalhas usuais têm maior resistência à corrosão sob tensão.
- O ensaio de tração do aço, com corrosão sob tensão, é caracterizado pela ausência de patamar de escoamento. A ruptura ocorre sem estrição da seção da barra de aço. Ver figuras abaixo.

		
Ruptura dútil em arame de aço doce, com estrição da barra.	Rupturas frágeis no arame de protensão usado na adutora, com $\phi = 4\text{mm}$ e com “ <u>stress corrosion</u> ”. Nenhuma estrição do arame. Ver [89]	Microfotografia de fissuras de “ <u>stress-corrosion</u> ” em arame do acidente
Aço doce sem corrosão Teor de carbono = 0,20%	Aço Temperado, com “ <u>stress corrosion</u> ” Teor de Carbono = 0,68 %	Aço Temperado, com “ <u>stress corrosion</u> ”

**RECOMENDAÇÕES:** 1. Usar aço de protensão não sensível à “stress-corrosion”.

2. Fazer ensaio para medir essa sensibilidade do aço de protensão à “stress-corrosion”.

Os testes FIP [96] ou DIBt [95] são feitos em solução aquosa fortemente agressiva. No ensaio DIBt, o aço, tensionado com 80% da tensão de ruptura, deve resistir pelo menos 2000 horas.

3. Corrigir o pH do solo nos trechos da obra onde ele for ácido.

4. Projetar os tubos de concreto protendido com tensões baixas no aço de protensão.

5. O concreto do cobrimento deve ser impermeável Ver [84] e [98 a100].