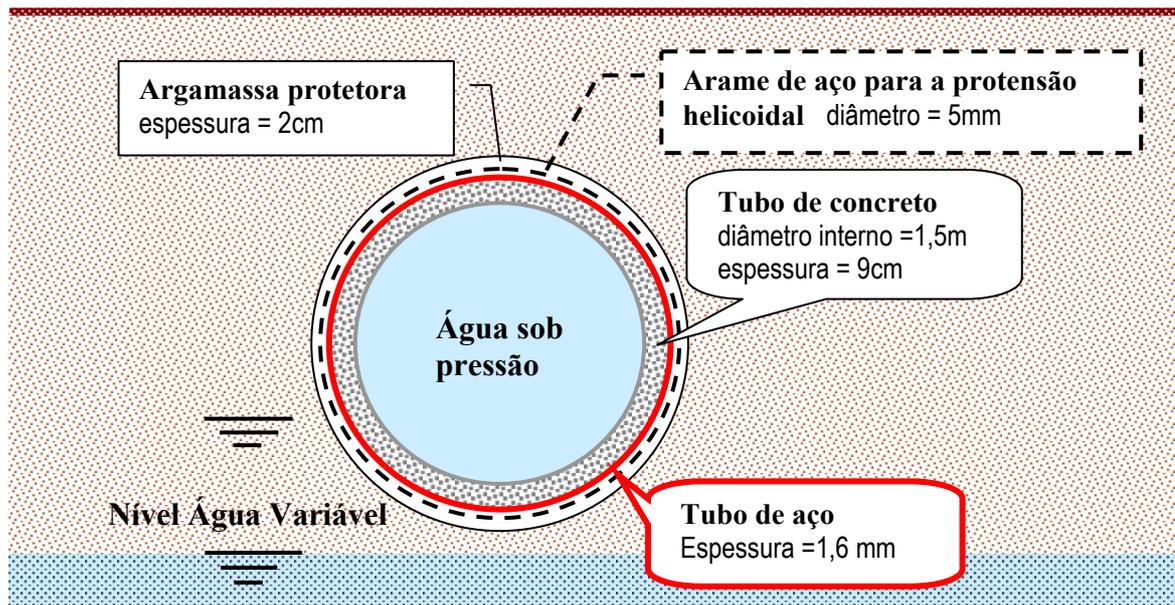


EXEMPLO Nº 128 :

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.

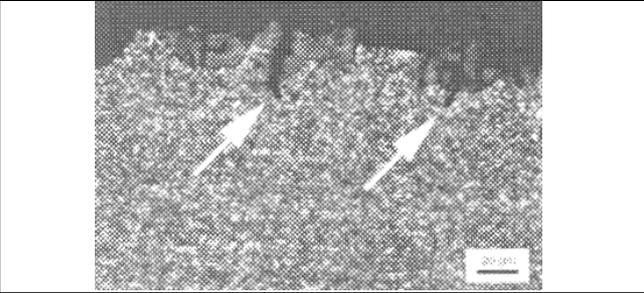
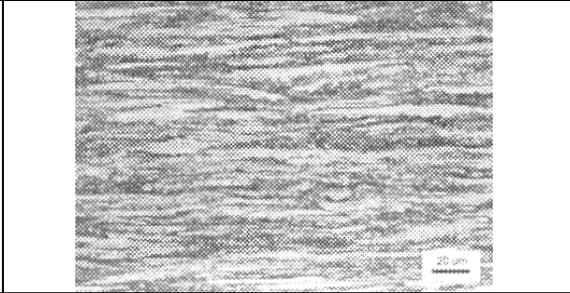
Segundo F.L.Lobo Carneiro [90] :

- “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 ≈ 800 graus centígrados e a seguir resfriando bruscamente o aço em óleo.

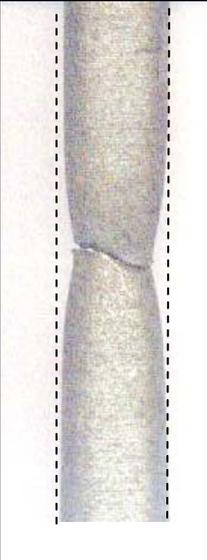
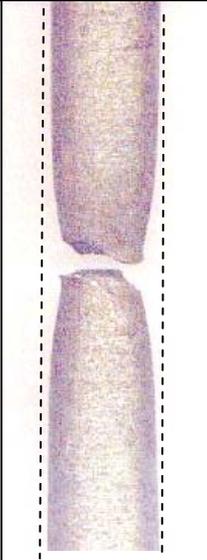
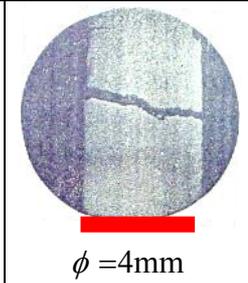
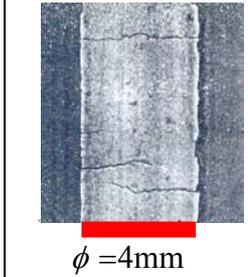
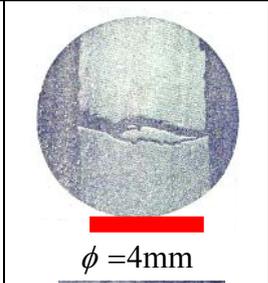
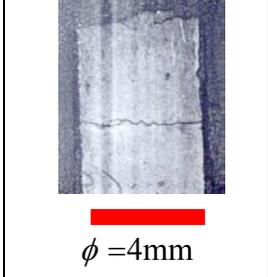
EXEMPLO Nº 128 : (CONTINUAÇÃO)

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.

	
<p>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</p>	<p>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</p>

- 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.

		 <p>$\phi = 4\text{mm}$</p>  <p>$\phi = 4\text{mm}$</p>	 <p>$\phi = 4\text{mm}$</p>  <p>$\phi = 4\text{mm}$</p>	 <p>Diâmetro do campo = 0,76 mm Ver [89].</p>
<p>Ruptura dútil em arame de aço doce, com estrição da barra.</p>	<p>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]</p>		<p>Microfotografia de fissuras de “<u>stress-corrosion</u>” em arame do acidente</p>	
<p>Aço doce sem corrosão Teor de carbono = 0,20%</p>	<p>Aço Temperado, com “<u>stress corrosion</u>” Teor de Carbono = 0,68 %</p>		<p>Aço Temperado, com “<u>stress corrosion</u>”</p>	

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].