CIFIE 2010

CASO DE ESTUDO: ANÁLISE MECÂNICA E FRACTOGRÁFICA DE UM CABO DE AÇO PRÉ-ESFORÇADO

A. SOUSA E BRITO[(1)]*, T. L. M. MORGADO[(1,2)], C. M. BRANCO[(1)]

(1) ICEMS-IST-UTL – Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, Lisboa, Portugal
(2) DEM-ESTA-IPT - Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia de Abrantes do Instituto Politécnico de Tomar, Rua 17 de Agosto de 1808, 2200-240 Abrantes, Portugal
*aasousabrito@gmail.com

ABSTRACT: This paper presents results of a failure analysis study to characterize the damage phenomenon that occurred in prestressed steel cables of a suspension bridge. This study includes: material characterization using chemical, microestrutural and hardness analysis; fractographic analysis by scanning electron microscopy (SEM); mechanical tests of the material in static tension; fatigue tests (S-N curves). The fatigue tests were carried out in laboratory air only and in the laboratory air also but after previous exposure in tap water to simulate the working environment of the cables. Fractured surfaces for more than 50% of the rods were brittle failure type and the remains were ductile failure (cup-and cone type). Due to the characteristics of the work environment (close to a river) stress corrosion was also observed.

Keywords: prestressed cable, high carbon steel, fatigue tests, fractographic analysis.

RESUMO: Neste artigo apresenta-se o resultado do estudo das causas de dano ocorrido num dos cabos pré-esforçados de aço de uma ponte suspensa. O estudo iniciou-se com a caracterização química, mecânica e microestrutural do material. O comportamento à fadiga foi estudado através de ensaios de fadiga realizados em condições o mais similar às condições ambientais a que os cabos estavam sujeitos (com e sem contacto com água). Complementou-se este estudo com análise fractográfica por microscopia electrónica de varrimento (MEV), de provetes ensaiados e de amostras obtidas directamente dos cabos danificados. Verificou-se que as superfícies de fractura dos varões constituintes dos cabos apresentavam dois modos de falha: fractura frágil em mais de 50% dos varões e fractura dúctil "taça e cone" nos restantes. Devido às características ambientais em serviço, também foi observado corrosão sob tensão.

Palavras chave: cabo pré-esforçado, aço de alto teor de carbono, ensaios de fadiga, análise fractográfica.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho respeita ao estudo das causas de ruína de um cabo de suspensão de um dos lados de uma ponte, que atravessa o maior rio que nasce em Portugal.

O cabo era constituído por 84 varões, distribuídos por 12 enrolamentos de 6+1 varões. A parte acidentada do mesmo (sujeita a este estudo) correspondia ao interior da ancoragem, tendo o comprimento de 1950 mm.

Exceptuando-se cinco varões centrais dos enrolamentos, que não sofreram fractura, pois apresentavam-se com o comprimento original, todos os restantes apresentavam fracturas distribuídas de modos distintos, identificados macroscopicamente:

- 21 varões, correspondendo integralmente à totalidade dos varões de três cordões de enrolamento, apresentavam superfícies de fractura dúctil, tipo "*cone e taça*", sitas perto do início da ancoragem (entre 100 e 250 mm);
- 45 varões (ou sejam mais de 50%), fracturados a distância entre 600 e 900 mm do início da ancoragem e apresentando elevado estado de corrosão (Fig.1), exibiam fractura de

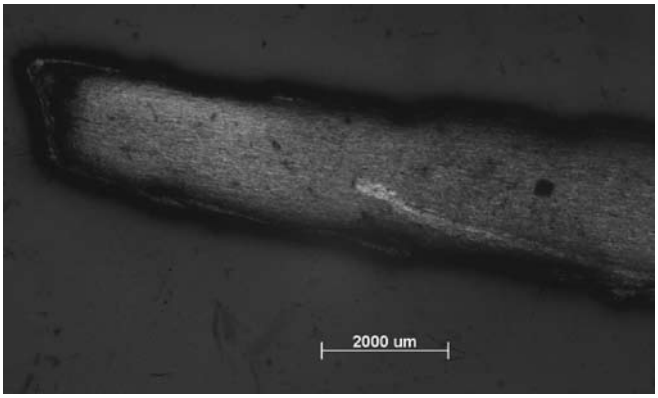


Fig. 1. Observação a baixa ampliação de um dos varões fracturados, verificando-se efeito de forte corrosão superficial muito irregular.

tipo frágil alguns dos quais com extremidades em "*ponta de lança*", desenvolvendo-se longitudinalmente em comprimentos variáveis, atingindo por vezes 50 mm (Fig.2);

- Os poucos varões remanescente fracturados a distância idênticas ao do caso anterior, mas apresentando superfícies de fractura de difícil identificação macroscópica devido a elevado grau de corrosão.

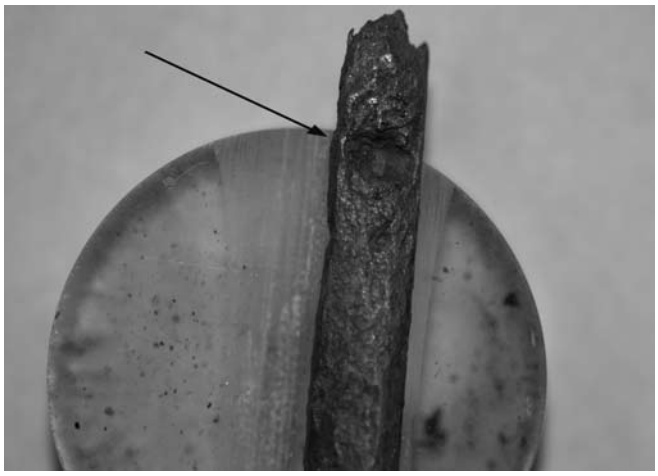


Fig. 2. Superfície de fractura de um varão fracturado segundo fácies de tipo frágil, em "ponta de lança" com elevado grau de corrosão, destacando-se a cavidade assinalada pela seta.

2. CARACTERIZAÇÃO QUIMICA, MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DO MATERIAL

A composição química do material consta da tabela 1, verificando tratar-se de um aço de alto teor em carbono (0,91%) de alta resistência e baixa ductilidade. Trata-se de um aço hipereutectóide (% C> 0,8%) ao manganês.

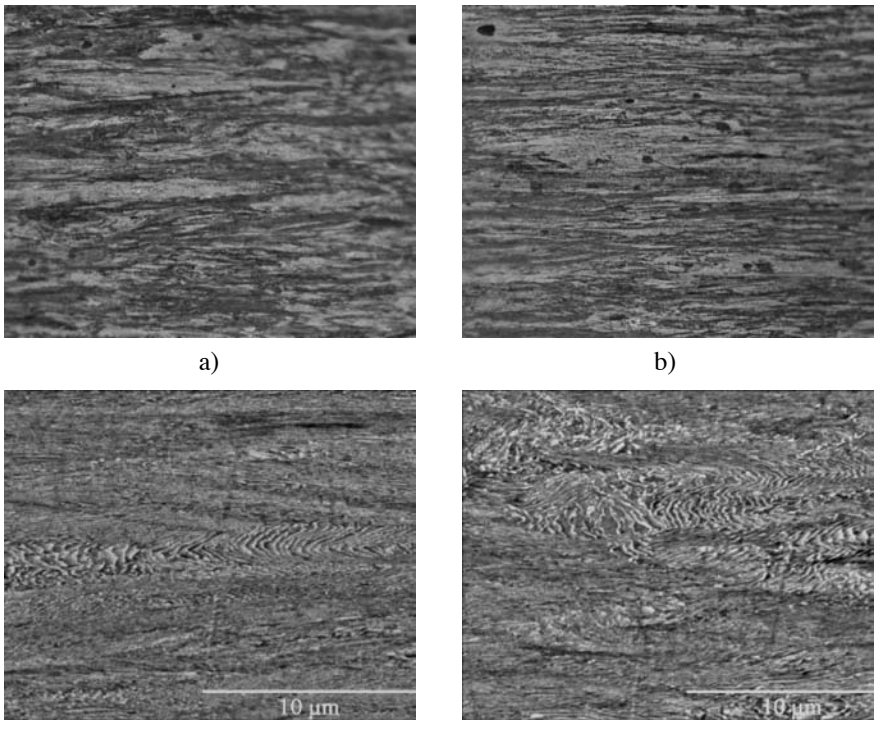
Tabela 1. Composição química do material

ELEMENTO	[%]
Carbono (C)	0,91
Manganês (Mn)	0,59
Fósforo (P)	0,02
Enxofre (S)	0,06
Silício (Si)	0,39
Cobre (Cu)	0,12
Níquel (Ni)	0,07
Crómio (Cr)	0,06
Molibdénio (Mo)	0,06

Os ensaios de tracção foram realizados em provetes cilíndricos segundo a norma ASTM E8-04 [1] com diâmetro de 4,6mm e comprimento de deformação L_0= 20mm.

Ensaios mecânicos de tracção e durometria apresentaram valores de tensão de rotura 1865 a 1932 MPa e valores de dureza 556 HV2, mostrando tratar-se de um aço duro e resistente [2]. O aço revelou-se do tipo frágil pois obtiveram-se valores do alongamento de rotura de 0,19.

A observação microestrutural de amostras obtidas em diversos varões e locais (perto e afastado da zona de fractura) apresentavam sistematicamente microestrutura muito fina, alinhada longitudinalmente, com presença de inclusões não metálicas (Fig. 3 a) e b)), tendo só com ampliações possíveis no microscópio electrónico de varrimento, sido identificadas zonas de *perlite fina* (Fig. 3 c) e d)).



a) b)

c) d)

Fig. 3. Microestruturas obtidas por microscopia óptica identificando a estrutura alinhada e, por microscopia electrónica de varrimento permitindo com maiores ampliações a identificação de perlite fina.

3. ENSAIOS DE FADIGA

Os ensaios de fadiga foram realizados em duas séries: uma série foi realizada apenas ao ar e a outra série foi realizada também ao ar mas com provetes submetidos a corrosão prévia em condições descritas a seguir.

3.1. Ensaios prévios de corrosão

Foram realizados previamente ensaios de corrosão numa amostra de doze provetes (fios) retirados da zona de estudo. Estes provetes foram imersos em água corrente com um caudal de 3 l/min num tempo de ensaio contínuo de 264 h (11 dias). Mediu-se o diâmetro dos fios antes e depois do banho assim como o peso. Neste ensaio fez-se uma avaliação dos efeitos das picagens e da dissolução causada pela água corrente. Destes ensaios concluiu-se que os provetes apresentavam um efeito significativo das picadas e da dissolução e oxidação causado pela acção da corrosão.

3.2. Ensaios de fadiga ao ar em provetes com e sem corrosão prévia

Foram ensaiados 10 provetes sem corrosão prévia e outros dez com corrosão prévia. O ciclo de fadiga aplicado consistiu numa onda sinusoidal a amplitude de tensão constante em tracção com R= 0,5 e frequência entre 5 e 16 Hz consoante o valor da carga.

Escolheu-se uma onda de carga com R= 0,5 para simular o efeito de uma pré-carga de tracção a que tirantes deste tipo estão normalmente sujeitos, no qual o ciclo de tensões é do tipo repetido consistindo numa solicitação alternada dinâmica, sobreposta a uma carga média de tracção devido ao peso próprio e (ou) pré-esforço e aos efeitos ambientais.

Os ensaios de fadiga foram realizados até à rotura ou até se atingir $6x10^6$ ciclos sem partir, consoante o que ocorrer primeiro, consistindo este valor de número de ciclos com o critério de vida infinita.

Os ensaios de fadiga obtidos nos provetes sem corrosão prévia, deram um elevado nível de dispersão de tal modo que não foi possível obter uma correlação válida entre a tensão máxima, σ_{max}, e o número de ciclos de rotura, N_r.

Para os provetes que foram ensaiados com corrosão prévia as condições de ensaio são mais uniformes, e a melhor correlação é obtida para a curva apresentada na Fig. 4, cuja equação é dada pela expressão (1):

$$\sigma_{max} = 3621 N_r^{0,0822} \quad (1)$$

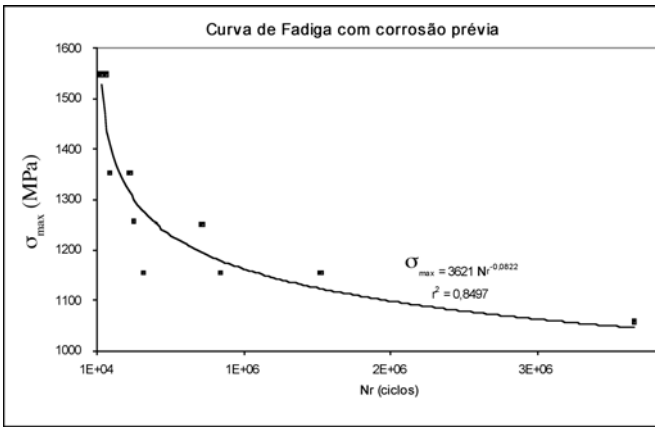


Fig. 4. Curva de fadiga obtida dos provetes com corrosão prévia.

4. ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

A análise fractográfica foi efectuada por microscopia electrónica de varrimento (MEV). Os exames foram dificultados pelo elevado grau de corrosão que grande parte das superfícies de fractura apresentava.

Seguiu-se o mesmo critério das observações macroscópicas referidas em 1. Deste modo observaram-se:

- Provetes com ***fracturas dúctil*** (tipo ***cone e taça***) nitidamente identificáveis a pequenas ampliações, apresentando fracturas secundárias geralmente radiais a partir duma zona central (Fig. 5 a)); maiores ampliações dessas zonas centrais permitiram a identificação de morfologias típicas deste modo de fractura, designada "***por coalescência de cavidades***" [3] (Fig 5 b)).

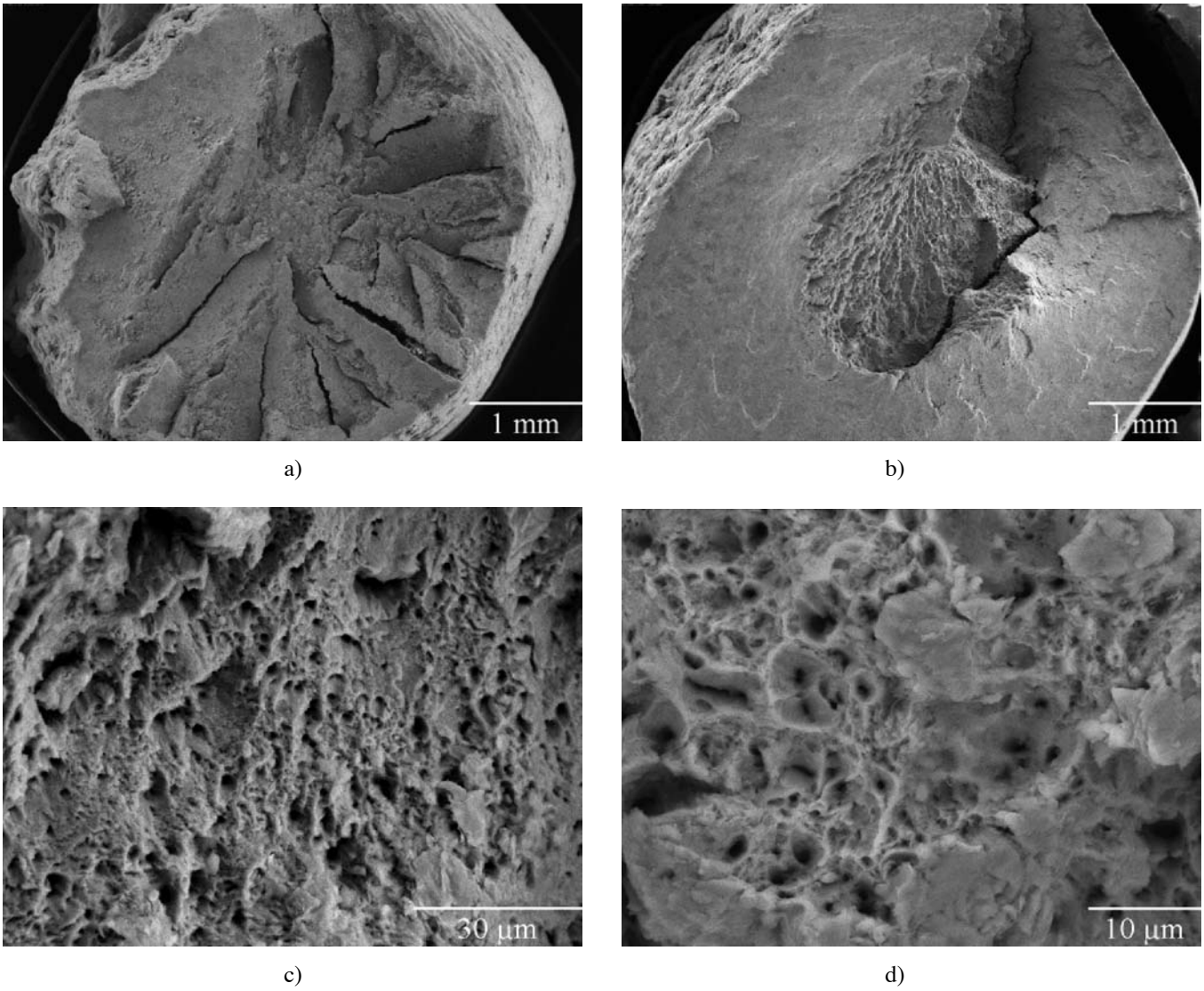
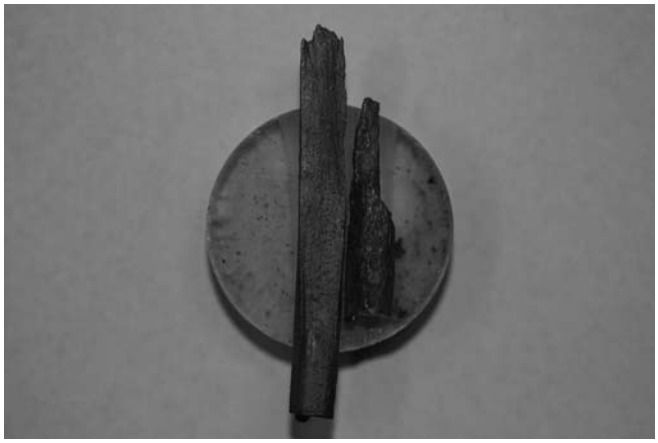


Fig. 5. Observação por MEV: a) e b) superfícies fracturadas de modo dúctil; c) e d) zona central da amostra apresentando morfologia de fractura por coalescência de cavidades.

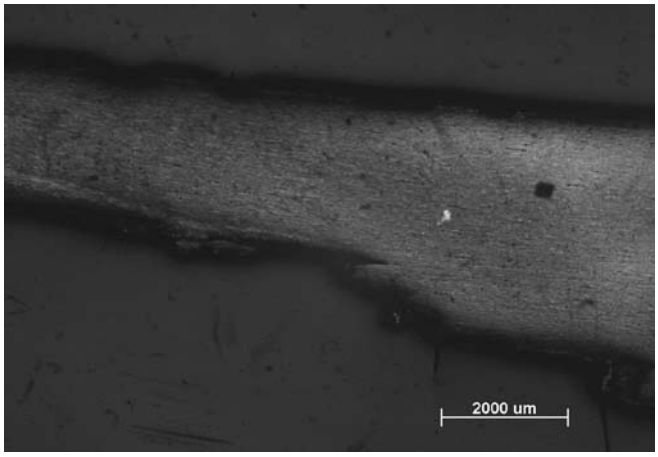
- Provetes com fractura tipo "ponta de lança": foram observados ao longo das superfícies longitudinais de fractura e nos casos possíveis nas superfícies transversais que ligam as primeiras ao varão integral (Fig. 6 a) e b)); a presença de intensa corrosão (Fig. 6 c) e d)) tornou difícil a observação, impedindo uma perfeita visualização das superfícies originais de fractura, mas permitindo por vezes evidenciar uma descoesão no interior do fio estirado (Fig. 6 e) e f)), denunciando uma possível separação de superfícies segundo trajectos longitudinais de baixa resistência; entre os múltiplos factores que poderiam promover este modo de fractura contam-se os factores ambientais que provocam corrosão sob tensão e fragilização por hidrogénio; as extremidades dessas pontas de lança também apresentam aspecto irregular e serrilhado confirmando as ilações tiradas (Fig. 6 d)).



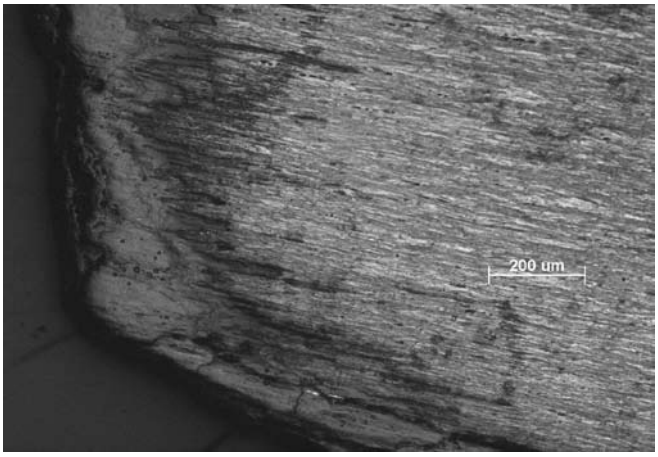
a)



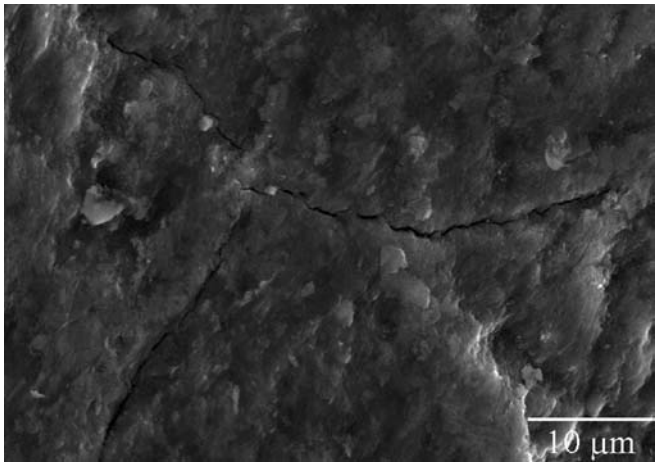
b)



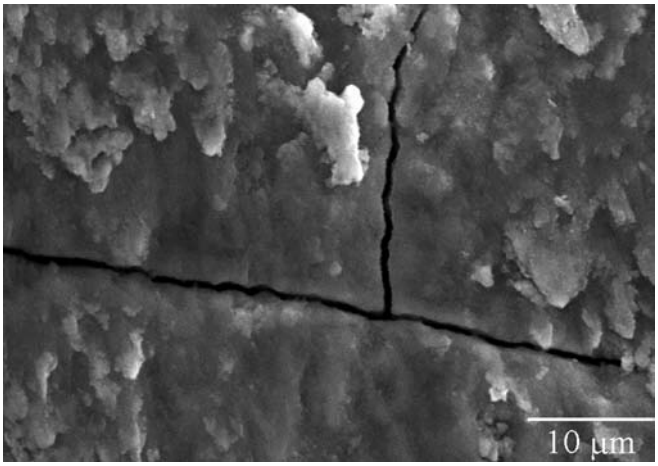
c)



d)



e)



f)

Fig. 6. Observações a diversas ampliações de provetes fracturados em "ponta de lança" mostrando as morfologias descritas no texto.

5. CONCLUSÕES

Através da análise microestrutural não foram detectadas diferenças sensíveis entre as microestruturas intrínsecas apresentadas por amostras tiradas de varões fracturados por diferentes mecanismos. Igualmente, não foi detectada evidência de contribuição de defeitos microestruturais originais, quer devidos ao material em si, quer ao processamento, como possíveis responsáveis pela ruína do cabo, que deverá então ser atribuída às condições mecânicas e ambientais durante o serviço do órgão.

Para as duas situações analisadas nos ensaios de fadiga (com ou sem corrosão prévia) verificou-se uma grande dependência entre a vida de fadiga e a tensão máxima do ciclo de fadiga i.e. uma pequena variação da tensão máxima causa uma grande variação da vida de fadiga.

Da análise fractográfica permite-se concluir que a fractura do cabo processou-se segundo duas fases sequenciais: na primeira os varões foram sendo atacados por corrosão sob tensão, que afectando de modo grave mais de 50% dos varões, levou-os progressivamente à fractura; quando o número de varões remanescentes deixou de satisfazer aos esforços aplicados, os mesmos romperam-se simultaneamente por fractura dúctil.

6. RERERÊNCIAS

[1] ASTM E8M-04, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric], Developed by Subcommittee: E28.04, Book of Standards Volume: 03.01, West Conshohocken, USA.

[2] C M. Branco e A. Sousa e Brito, Estudo Microestrutural, Fractográfico e de Comportamento Mecânico (tracção e fadiga) dos fios de pré-esforço dos tirantes da ponte suspensa, DEM - CEMUL/UTL, Lisboa, 2007.

[3] Hull Derek, Fractography Cambridge University Press, 1999.