



**Roque André Ciufó Poeys**

**Efeitos do Envelhecimento e Expectativa de Vida  
Útil em Cabos Ópticos Submarinos**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro  
Setembro de 2023



**Roque André Ciufó Poeys**

**Efeitos do Envelhecimento e Expectativa de Vida  
Útil em Cabos Ópticos Submarinos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

**Prof. Jean Pierre von der Weid**  
Orientador  
PUC-RIO

**Prof. Bismarck Costa Lima**  
PUC-RIO

**Prof. Walter Magullis**  
PUC-RIO

**Pedro Tovar**  
Universidade de Ottawa, Canada

**Prof. Claiton Pereira Colvero**  
Universidade Federal de Santa Maria

**Prof. Ricardo Marques Ribeiro**  
Universidade Federal Fluminense – UFF

Rio de Janeiro, 12 de Setembro de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Roque André Ciufó Poeys**

Graduou-se em Engenharia Elétrica, ênfase em Sistemas Eletrônicos, em julho de 1989, na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Trabalha como Profissional Master com ênfase em Telecomunicações na Petrobras desde março 2007. É Professor de Telecomunicações da Escola Técnica Estadual Ferreira Viana desde março de 1998. Em setembro de 2004, obteve o título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio na área de eletromagnetismo aplicado. Em agosto de 2018, iniciou no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu doutorado na área de eletromagnetismo aplicado na linha de pesquisa de optoeletrônica e instrumentação.

#### Ficha Catalográfica

Poeys Ciufó, Roque André

Efeitos de envelhecimento e Expectativa de Vida Útil em cabo ópticos submarinos/ Roque André Ciufó Poeys; orientador: Jean Pierre von der Weid. – 2023.

124 f: il. Color; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2023

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Cabos ópticos submarinos. 3. Envelhecimento. 4. Coeficiente de Atenuação. 5. Perdas nas emendas. 6. Vida útil. I. von der Weid, Jean Pierre. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III.

CDD: 621.3

Essa Tese é dedicada em primeiro lugar a Deus, depois a minha esposa Rita e a minha Filha Lívia porque sempre acreditaram em mim e me incentivaram para seguir em frente até o final.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador Professor Jean Pierre von der Weid pelo apoio, esclarecimentos, conhecimento, parceria, estímulo e dedicação durante todas as etapas deste trabalho, e aos meus professores do doutorado que contribuíram para o meu aprendizado e desenvolvimento durante o estudo.

Ao professor Luís Alencar Reis da Silva Mello, por ter me dado a oportunidade de retornar a PUC-Rio após 14 anos de conclusão do mestrado para realizar o doutorado.

Ao Eng. Washington Pimenta da Petrobras pela ajuda, incentivo e torcida sincera durante todo o período do trabalho, nos momentos de normalidade e nos momentos de dificuldades.

Aos gerentes da Petrobras com quem eu tive a oportunidade de trabalhar durante os anos de doutorado, pelo apoio e colaboração.

Aos meus amigos e colegas da Petrobras, da Escola Técnica Estadual Ferreira Viana e do CETUC, que de alguma forma contribuíram para o resultado, com apoio, colaboração e palavras de incentivo.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram a conseguir com muito esforço e dedicação concluir com êxito esse grande desafio.

À Petrobras e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho dificilmente poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Resumo

Poeys Ciufu, Roque André; von der Weid, Jean Pierre (Orientador). **Efeitos do Envelhecimento e Expectativa de Vida Útil em Cabos Ópticos Submarinos. Rio de Janeiro, 2023, 124p.** Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os cabos ópticos submarinos estão distribuídos por boa parte dos oceanos ao redor do globo terrestre. Esses cabos começaram a ser instalados com maior intensidade na década de 90, apesar de o primeiro cabo submarino óptico ter sido instalado em 1982 nas ilhas Canárias. Atualmente a importância dos cabos ópticos submarinos é de grande relevância para as comunicações mundiais e vem crescendo muito ao longo do tempo com a demanda por serviços de internet, liderada hoje pelas grandes empresas de tecnologia e de exploração de mídia social, tais como Google, Amazon, Meta, etc. Hoje cerca de 99% de todo o tráfego da comunicação mundial da internet passa pelos cabos submarinos. Os custos para implantação desses cabos são muito altos e, portanto, prover alternativas para a ampliação da sua duração para um período maior do que a sua expectativa de vida útil representa um ganho considerável para todos. Considera-se atualmente pelos fabricantes e organismos de padronização internacional, como o ITU-T (União Internacional de Telecomunicações), uma expectativa média de vida útil de 25 anos. Esta expectativa de vida útil dada para os cabos ópticos foi a principal motivação para o desenvolvimento dessa pesquisa, cujos objetivos visam apresentar evidências que indiquem que a tendência de vida útil dos cabos ópticos submarinos pode superar os 25 anos previstos, e dessa forma contribuir para o atendimento da crescente demanda por transmissão de dados no mundo impulsionada pelos serviços de Internet. A metodologia adotada foi coletar dados de medições com o OTDR em cabos ópticos submarinos ao longo de 24 anos e avaliar a degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação em dB/km ao longo do tempo das fibras ópticas dos cabos em operação, e comparar com a degradação sofrida pelos cabos sobressalentes, e avaliar também a degradação das perdas nas emendas submarinas e a sua correlação com a profundidade de instalação no mesmo período. As análises foram realizadas através da avaliação das curvas em arquivos na extensão .Sor obtidas com as medições realizadas pelo OTDR. Os resultados obtidos demonstraram que os cabos ópticos em operação sofreram degradações compatíveis com os valores esperados e dados pelo ITU-T, mas também mostraram através da análise de curvas de tendência, que a degradação tem um comportamento logarítmico, e a projeção da curva de tendência para os próximos anos indicou que esses cabos poderão continuar em operação por muito mais anos do que os 25 anos, dados como limite anterior. Foi observado também que a penalidade de potência dada pela perda nas emendas é muito superior a degradação somente nas fibras ópticas, que existe uma correlação positiva entre a profundidade das caixas de emenda e a degradação na emenda e que os cabos sobressalentes degradam muito mais que os cabos em operação.

## Palavras-chave

Cabos Ópticos Submarinos; Envelhecimento; Coeficiente de Atenuação; Perdas nas Emendas; Vida Útil.

## Abstract

Poeys Ciufu, Roque André; von der Weid, Jean Pierre (Advisor). **Aging Effects and Lifetime Expectation of Submarine Optical Cables**. Rio de Janeiro, 2023, 124p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Submarine optical cables are distributed over most of the oceans around the globe. These cables were installed with greater intensity in the 1990s, despite the fact that the first optical submarine cable was installed in 1982 in the Canary Islands. Currently, the importance of submarine optical cables is very relevant for world communications and has been growing a lot over time with the demand for internet services, led today by large technology and social media companies such as Google, Amazon, Meta, etc. Today around 99% of all world internet communication goes through undersea cables. The costs for implanting these cables are very high and, therefore, to provide alternatives for optimizing their use by extending their duration for a period longer than their expected useful life, given by international standardization bodies, such as the ITU-T (International Telecommunications Union), and by the manufacturers, which currently is 25 years, is a huge gain for everyone. The life expectancy given for optical cables was the main motivation for the development of this research, whose objectives aim to present evidence that indicates that the useful life trend of submarine optical cables can reach much more than the 25 years predicted and in this way contribute to meeting the growing demand for data transmission in the world, driven by Internet services. The adopted methodology was to collect measurement data with the OTDR in submarine optical cables over 24 years and to evaluate the degradation suffered by the attenuation coefficient in dB/Km over time of the optical fibers of the cables in operation and to compare with the degradation suffered by the spare cables, and also evaluate the degradation of the losses in the underwater splices and its correlation with the depth of installation in the same period. The analyzes were carried out by evaluating the .Sor curves obtained with the measurements performed by the OTDR. The conclusions showed that the optical cables in operation suffered degradations compatible with the expected values and given by the ITU-T, but also showed through the analysis of trend curves, that the degradation has a logarithmic behavior, and the projection of the trend curve for the coming years indicated that these cables could continue to operate for many more years than the 25 years given as the previous limit. It was also observed that the power penalty given by the loss in the splices is much higher than the degradation in the optical fibers alone, that there is a positive correlation between the depth of the splice boxes and the degradation in the splice, and that the spare cables degrade much more than the cables in operation.

## Keywords

Submarine Optical Cables; Aging; Attenuation Coefficient; Losses in Splices; Lifetime.

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Histórico cabos submarinos .....	16
1.2. Importância dos cabos ópticos submarinos.....	17
1.3. Vida útil dos cabos ópticos submarinos.....	21
1.4. Objetivo da Tese .....	23
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	26
2.1. Atenuação em Fibras Ópticas .....	26
2.1.1. Hidrogênio .....	28
2.1.2. Espalhamento Rayleigh.....	29
2.1.2.1. Funcionamento do OTDR.....	31
2.1.3. Macro e Microcurvaturas .....	37
2.1.3.1. Macrocurvatura .....	37
2.1.3.2. Microcurvatura.....	40
2.2. Estado da Arte.....	45
3. METODOLOGIA ADOTADA .....	49
3.1. Levantamento e aquisição de dados .....	50
3.2. Estruturação dos dados.....	51
3.3. Análise dos dados .....	51
4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
4.1. Cabo Submarino A .....	55
4.1.1. Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo em operação .....	60
4.1.2. Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo sobressalente.....	63
4.1.3. Análise da variação das perdas nas emendas nas caixas de emenda submarinas (CEs) .....	65
4.2. Cabo Submarino B .....	67
4.2.1. Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/Km nas fibras ópticas do cabo em operação .....	70
4.2.2. Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo sobressalente .....	71
4.2.3. Análise da variação das perdas nas emendas nas caixas de emenda submarinas (CEs) .....	73
4.3. Cabo Submarino C .....	75
4.3.1. Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo em operação.....	77
4.3.2. Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo sobressalente .....	81
4.3.3. Análise da variação das perdas nas emendas nas caixas de emenda submarinas (CEs) .....	83
4.3.4. Análise da sensibilidade dos cabos A e C a microcurvatura e macrocurvatura .....	86



5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	89
BIBLIOGRAFIA.....	96
ANEXOS.....	98
ANEXO A.....	98
ANEXO B.....	109
ANEXO C.....	115

## Lista de Figuras

Figura 1.1. Reportes recentes sobre a capacidade e distância de transmissão alcançados com o uso de fibras SM-SCF e fibras SM-MCF.....	18
Figura 1.2. Evolução da capacidade de transmissão nas fibras ópticas SM-SCF como evidências do estado da arte observado em demonstrações realizadas em laboratório.....	19
Figura 1.3. Crescimento Internacional da utilização de largura de banda por Região do Globo. ....	20
Figura 2.1. Espectro de atenuação para uma fibra monomodo produzida em 1979.....	27
Figura 2.2. Diagrama em blocos de um OTDR padrão. ....	32
Figura 2.3. Formato dos principais eventos identificados e registrados na curva do OTDR. ....	33
Figura 2.4. Diagrama esquemático da Macrocurvatura.....	37
Figura 2.5. Perfil de índice de refração efetivo para uma fibra índice de grau dobrada com dois diferentes raios de curvatura, $R_2 < R_1$ .....	38
Figura 2.6. Efeitos do MFD e comprimento de onda com a macrocurvatura .....	39
Figura 2.7. Efeito da macrocurvatura em fibras ópticas Rec.ITU-T G657 com o raio de curvatura e com o comprimento de onda. ....	39
Figura 2.8. Variação das perdas por microcurvatura e macrocurvatura (30mm diâmetro) para fibras ITU-T Rec. G.652. ....	41
Figura 2.9. Variação da perda por microcurvatura com a diminuição do valor do módulo elástico do material (E) do revestimento primário interno da fibra. ....	43
Figura 2.10. Variação da atenuação em 1550nm devido a microcurvatura em relação ao valor do MAC, para fibras ITU-T Rec. G.652.D, G.657.A e G.657.B3.....	44
Figura 2.11. Mudanças da atenuação (dB/km) para 1310 nm e 1550 nm após 1034 dias de testes por calor úmido [26]. ....	46

Figura 2.12. Mudanças da atenuação (dB/km) para 1310 nm e 1550 nm após 1436 dias de testes por imersão em água deionizada [26].	47
Figura 4.1. Área de localização dos três cabos ópticos submarinos (A, B e C) e da caixa de emenda do segmento 4, cujas medidas com o OTDR foram realizadas.	54
Figura 4.2. Cabo A, linha vermelha contínua, Cabo B. linha vermelha tracejada, cabo C, linha vermelha pontilhada. Linha verde representa o segmento 4 no qual foi medida a perda em uma caixa de emenda a 387m de profundidade.	55
Figura 4.3. Cabo Óptico Submarino Simples Armado (SA).	57
Figura 4.4. Cabo Duplo Armado TYCO SL 12.	58
Figura 4.5. Estrutura característica do cabo duplo armado TYCO SL12.	58
Figura 4.6. Variação do Coeficiente de Atenuação para todas as sessões entre 2012 e 2022.	61
Figura 4.7. Histograma do $\Delta\alpha$ em dB/km para todas as fibras sem o trecho raso entre CE3 e CE4.	62
Figura 4.8. Curva de tendência da penalidade média observada para o coeficiente de atenuação.	63
Figura 4.9. $\Delta\alpha$ no cabo instalado no trecho S4 no leito marinho e o cabo sobressalente no almoxarifado.	64
Figura 4.10. Histograma da variação das perdas nas caixas de emendas.	66
Figura 4.11. Variação das perdas nas emendas com a profundidade.	66
Figura 4.12. Cabo Submarino Simples Armado TYCO SL12.	68
Figura 4.13. Estrutura característica do cabo TYCO SL12.	68
Figura 4.14. Histograma de $\Delta\alpha$ para todas as fibras em duas sessões do cabo B ente 1998 e 2021.	70
Figura 4.15. Curva de tendência para penalidade de potência média devido a degradação da atenuação de uma fibra ao longo de 23 anos em operação.	71
Figura 4.16. $\Delta\alpha$ nos trechos S4&S5 no Cabo B em operação no leito do oceano e no cabo sobressalente.	72

Figura 4.17. Histograma da variação das perdas nas caixas de emenda para o cabo B. ....	74
Figura 4.18. Penalidade de Potência em dB por década para o conjunto de dados obtidos para o cabo A e B com a profundidade. As barras de erro são o desvio padrão da degradação a cada intervalo de 50m de profundidade. ....	74
Figura 4.19. Cabo Duplo Armado TYCO DA SI 12. ....	76
Figura 4.20. Cabo Simples Armado TYCO SA SI 12. ....	76
Figura 4.21. Variação do coeficiente de atenuação [dB/km] para o cabo “C” entre 2000 e 2020. ....	78
Figura 4.22. Curva de tendência para penalidade de potência média devido a degradação da atenuação das fibras ópticas ao longo de 20 anos em operação. ....	80
Figura 4.23. Curva de tendência para penalidade de potência média devido a degradação da atenuação de uma fibra ao longo de 23 anos em operação. ....	81
Figura 4.24. Degradação de $\alpha$ [dB/km] do cabo sobressalente do cabo “C” devido ao envelhecimento. ....	82
Figura 4.25. $\Delta\alpha$ [dB/km] nos trechos do Cabo C em operação no leito do oceano e no cabo sobressalente. ....	82
Figura 4.26. Histograma da variação das perdas nas caixas de emenda para o cabo C. ....	84
Figura 4.27. Penalidade de Potência em dB por década para o conjunto de dados obtidos. ....	85

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Largura de pulso e correspondente distância na fibra óptica.....	35
Tabela 4.1. Valores típicos dos parâmetros da fibra ITU-T G.655 fornecida pela TYCO (SubCom) em 2011.....	57
Tabela 4.2. Média aritmética dos resultados das medidas de fábrica realizadas em 2010 para o coeficiente de atenuação em dB/km nas bobinas dos cabos ópticos implantados no Segmento W em 2012. ....	59
Tabela 4.3. Valores típicos dos parâmetros da fibra ITU-T G.652 fornecida pela TYCO em 1998.....	69
Tabela 4.4. Valores típicos dos parâmetros da fibra ITU-T Rec. G.653 fornecida pela TYCO em 1998. ....	77

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**CE** – Caixa de Emenda Submarina

**CLS** – *Cable Land Station*

**CAGR** - *Compound Annual Growth Rate*

**DA** – Cabo Óptico Submarino *Duplo Armado*

**DR** – *Dynamic Range*

**DS** – *Dispersion Shifted*

**DSP** – *Digital Signal Processing*

**DWDM** – *Dense Wavelength Division Multiplexing*

**EDFA** – *Erbium Doped Fiber Amplifier*

**FEC** - *Forward Error Correction*

**FTTH** - *Fiber to the Home*

**FWM** – *Four Wave Mixing*

**IA** – Inteligência Artificial

**ICPC** - *International Cable Protection Committee*

**IEC** – *International Electrotechnical Commission*

**IoT** – *Internet das Coisas*

**ITU** – *International Telecommunication Union*

**ITU-T** – Setor de Padronização do ITU

**IR** – *Infrared*

**MCF** – *Multi Core Fiber (Fibra com vários núcleos)*

**MFD** – *Mode Field Diameter*

**NZDSF** – *Non Zero Dispersion Shifted Fiber*

**OTDR** – *Optical Time Domain Reflectometer (Refletômetro Óptico no Domínio do Tempo)*

**PMD** – Dispersão dos Modos de Polarização

**SA** – Cabo Óptico Submarino Simples Armado

**SM- SCF** – Fibra Monomodo – Mononúcleo Padrão

**STD – RXB** –Fibra Monomodo Padrão Dopada a Germânio

**UEP** – Unidade Estacionária de Produção

**UV** – Ultra Violeta

**SNR** – *Signal to Noise Ratio*

**WDM** – Wavelength Division Multiplexing

*“Há verdadeiramente duas coisas diferentes: saber e crer que se sabe.  
A ciência consiste em saber; em crer que se sabe reside a ignorância.”*

**Hipócrates**

# 1

## Introdução

O presente trabalho de tese de doutorado está estruturado em 5 capítulos e 3 anexos, conforme a sequência:

Capítulo 1. Introdução;

Capítulo 2. Fundamentação

Capítulo 3. Metodologia Adotada;

Capítulo 4. Experimentos, Resultados e Discussões;

Capítulo 5. Conclusão e Considerações Finais;

Anexo 1. Detalha como os dados foram trabalhados;

Anexos 2 e 3. Referentes a artigos publicados, sendo que o anexo 2 foi apresentado em congresso e o anexo 3 publicado em revista.

### 1.1

#### Histórico cabos submarinos

Os primeiros cabos submarinos foram implantados na década de 1850 para o tráfego de telegrafia. Posteriormente vieram os cabos de telefonia e desde a década de 1980 passaram a ser utilizados os cabos de fibras ópticas.

Apesar do alto custo para a implantação de um sistema óptico submarino, cujo cabo é o principal componente, em fevereiro de 2023 existiam cerca de 529 sistemas de cabos ópticos submarinos no mundo [1] que estão distribuídos por boa parte dos oceanos ao redor do globo terrestre. Esses cabos começaram a ser instalados com maior intensidade na década de 90, apesar de o primeiro cabo submarino óptico ter sido instalado em 1982 nas ilhas Canárias.

Atualmente com a evolução da tecnologia e com a demanda crescente por serviços de dados, internet mundial, os cabos ópticos são essenciais para garantir a prestação dos serviços com qualidade, baixíssima latência, e altas taxas de transmissão, características exigidas pela maioria dos serviços prestado e pelos usuários dos serviços de *streaming* e acesso à internet.



Portanto, hoje não é possível imaginar um mundo globalizado sem os cabos ópticos submarinos que é por onde passa cerca de 99% de toda a comunicação mundial da internet, ficando em segundo lugar os sistemas satélites com apenas 1%. [2].

Assim considerando-se a importância dos cabos ópticos submarinos no cenário global, buscou-se desenvolver um trabalho de pesquisa para avaliar a expectativa de vida útil das fibras ópticas dos cabos submarinos, comparar o desempenho de cabos em operação no leito marinho com seus sobressalentes em armazéns e avaliar o comportamento das perdas nas emendas submarinas, ao longo 24 anos.

## 1.2

### **Importância dos cabos ópticos submarinos**

Nos últimos anos verificou-se um crescimento do tráfego na internet estimado em 10 vezes a cada 4 anos ou 100 vezes a cada 8 anos. Por outro lado, o crescimento da capacidade de transmissão das fibras convencionais, monomodo com um único núcleo – SM-SCF, tem crescido exponencialmente nas últimas décadas devido ao avanço de várias tecnologias, incluindo a expansão das bandas das janelas de transmissão e o aumento da eficiência espectral.

Novas tecnologias como IoT (Internet das Coisas), Automação de Processos Industriais, Realidade Aumentada, Digital Twins, Machine Learning, Inteligência Artificial (IA), 5G e etc, demandam de um meio de transmissão com as características das fibras ópticas para funcionarem adequadamente devido a todas essas novas tecnologias exigirem a transferência de uma grande quantidade de dados, com altas taxas de transmissão e com baixa latência.

Empresas de tecnologia como o Google, Facebook, Amazon e Microsoft surgiram em razão da internet e consomem a maior parte da capacidade de banda atual [3]. Em 2018 estas empresas se tornaram as usuárias dominantes da largura de banda internacional, e em 2019 ocuparam 64% de toda a capacidade internacional utilizada.

Sistemas recentes de transmissão com fibras monomodo padrão com um único núcleo (SM-SCF), atingiram capacidades de transmissão de cerca de 100 Tb/s

e o produto capacidade – distância acima de 100 Pb/s x km, conforme demonstrado na Figura 1.1 publicado no [4] que compara o desempenho dessas fibras convencionais com um novo tipo de fibra ainda em fase de desenvolvimento, denominada de fibras monomodo multinúcleos (MCF).

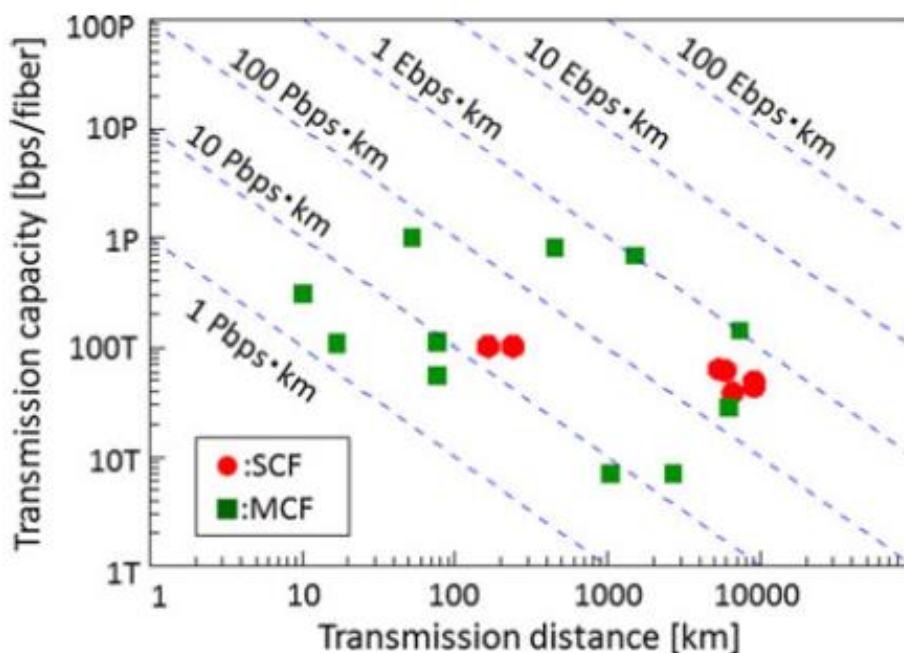


Figura 1.1. Reportes recentes sobre a capacidade e distância de transmissão alcançados com o uso de fibras SM-SCF e fibras SM-MCF.

A Figura 1.2 [5] demonstra a capacidade estimada limite de transmissão de 100 Tbps para as fibras monomodo padrão com um único núcleo, considerando as tecnologias atuais existentes, e mostra que ao longo do tempo estão sendo descobertas novas tecnologias que possibilitaram o aumento obtido nas taxas de transmissão para os sistemas ópticos.

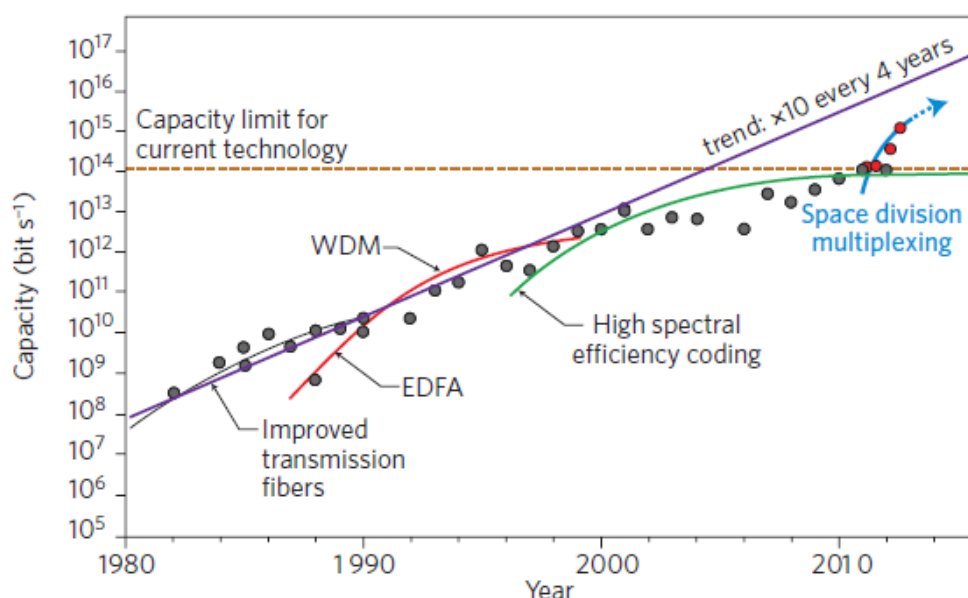


Figura 1.2. Evolução da capacidade de transmissão nas fibras ópticas SM-SCF como evidências do estado da arte observado em demonstrações realizadas em laboratório.

Portanto, cabos ópticos em operação que não tenham sofrido uma perda de qualidade ao longo do tempo, com a aplicação de novas tecnologias, como os sistemas coerentes, representam uma excelente opção e um ativo valioso para atender as necessidades atuais e futuras para determinadas demandas por serviços e usuários diversos como, por exemplo, a indústria de exploração e produção de óleo e gás ao redor do mundo.

Outro fator que reforça a importância de podermos utilizar os cabos ópticos submarinos por um tempo muito maior do que os 25 anos declarados, são as expectativas de crescimento para o tráfego na internet global, e para poder acompanhar essa demanda crescente, a capacidade de tráfego nas principais rotas de cabos ópticos submarinos continua aumentando a cada ano.

Um relatório de 2021 [6] “The State of the Network” mostrou que a demanda por largura de banda internacional está mais do que dobrando a cada dois anos, tendo atingido entre 2017 e 2019 1,492 Tbps. Esse crescimento foi impulsionado pelas restrições impostas pela pandemia de Covid-19 que impôs que as pessoas ficassem em casa e aumentassem o uso da internet substancialmente nesse período. Isso acabou motivando um grande investimento para atender o crescimento da demanda realizado pelas principais empresas desse mercado em redes existentes e em novas infraestruturas.

Com fim da pandemia de Covid-19 o crescimento da demanda retornou ao nível “normal” atingindo em 2021 786 Tbps de largura de banda internacional, e segundo o novo relatório de 2022 [7] atualização do relatório anteriormente mencionado, o crescimento da demanda tem sido mais forte em links conectados à África, que apresentou uma taxa de crescimento anual composta de 45% entre 2017 e 2021. Como pode ser observado na Figura 1.3, que mostra a taxa de crescimento anual composta (CAGR - Compound Annual Growth Rate) mundial do tráfego, a maioria das regiões do globo experimentou um grande crescimento, acima de 40% na utilização do tráfego, ficando a Ásia, Europa, Oceania e os Estados Unidos e Canadá com um crescimento muito próximo do verificado na África.

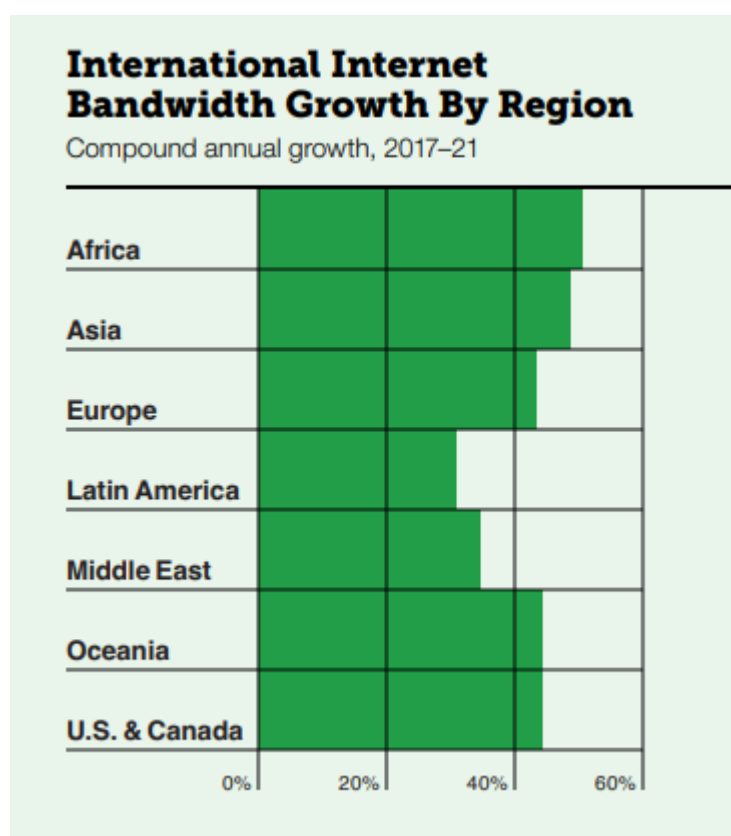


Figura 1.3. Crescimento Internacional da utilização de largura de banda por Região do Globo.

Globalmente, a largura de banda internacional usada pelas operadoras de rede quase dobrou de 2020 a 2022 e agora em 2023 atingiu 3,9 Pbps [8].

### 1.3

#### Vida útil dos cabos ópticos submarinos

Inicialmente é necessário apresentar o conceito de vida útil de uma fibra óptica.

Pode-se definir a vida útil de uma fibra óptica como o tempo máximo que uma fibra leva para atingir um determinado desempenho que passa a limitar as opções de atualizações tecnológicas sobre essa fibra, devido ao seu envelhecimento que causa a degradação do seu coeficiente de atenuação em dB/km ( $\alpha$ ), quando as ações simples de manutenção não são suficientes para restabelecer a sua capacidade de absorver novas tecnologias e taxas mais elevadas de transmissão.

Deve ficar claro que nesse estudo para fins de vida útil de uma fibra óptica, foi considerado a análise da variação do coeficiente de atenuação dos cabos implantados, em operação, nos pontos intermediários entre as caixas de emenda submarinas, a uma distância segura para que as degradações nas emendas não influenciassem no resultado da análise do efeito do envelhecimento no coeficiente de atenuação.

Uma outra abordagem foi realizada com os dados obtidos das medidas nos cabos implantados para a análise individual das degradações das perdas nas emendas submarinas, cujos resultados não foram considerados na avaliação da vida útil das fibras ópticas, mas são muito importantes para conhecer as contribuições na penalidade de potência sobre o enlace óptico e nortear ações de manutenção preventiva e corretiva ao longo da operação do sistema óptico.

Cabe ressaltar que o sistema óptico sofre ao longo do tempo ações externas que irão influenciar na sua capacidade operacional, mas que podem e devem ser controladas ou mitigadas, como as falhas que ocorrem no cabo submarino devido a rupturas por tensão/stress e corrosão, manuseio e emendas inadequados, que causam um aumento nas perdas do enlace, obsolescência da tecnologia eletrônica e na dispersão dos modos de polarização (PMD).

Todo esse conjunto somado vai afetar a vida operacional do sistema óptico e é influenciado pelo ambiente de instalação, pelo método de fabricação, pelos materiais empregados na fabricação dos cabos ópticos, pela qualidade da

manutenção e por agentes externos atuando no cabo óptico ao longo da sua vida operacional.

O estudo está direcionado para o envelhecimento das fibras ópticas e o seu impacto no coeficiente de atenuação em dB/km, nos cabos implantados no fundo do mar e nos cabos sobressalentes armazenados nos depósitos terrestres, bem como levantar dados sobre como evolui a degradação das perdas nas emendas nas fibras submarinas. A principal motivação para esse estudo é a ausência de informações que possam ratificar que os limites teóricos definidos pelos fabricantes são “prazo fatal” e devem ser aplicados na prática como tempo máximo de vida útil para todas as fibras ópticas nos cabos ópticos submarinos e terrestres instalados e em operação atualmente nos backbones.

Na literatura pesquisada não foi encontrada nenhuma forma ou método científico para estimar o prazo teórico da vida útil das fibras ópticas. Não foi identificado na indústria de fibras ópticas nenhum mecanismo aceito e divulgado pelos fabricantes de fibras ópticas ou por órgão de padronização, em particular o ITU-T (International Telecommunications Union), que possa efetivamente possibilitar de forma científica indicar com boa exatidão o esgotamento de uma fibra óptica, através do acompanhamento do seu desempenho ao longo da sua operação.

A grande dificuldade para isso é que não existe nenhuma reação físico – química satisfatória que pode ser utilizada com boa resposta para realizar um teste acelerado de envelhecimento da fibra óptica a fim de predizer o mecanismo de falha e sua corresponde taxa de reação a falha, que ocorre diretamente nas fibras ópticas ao longo do tempo. Portanto como não há uma maneira efetiva para se chegar de forma científica a um prazo mais assertivo para determinar e expectativa da vida útil de uma fibra óptica, não há nenhuma razão determinante para acreditar que todos os cabos de fibra óptica devidamente projetados, manufaturados e instalados não vão durar mais que 25 anos. Essa afirmativa é corroborada pelo fato de que atualmente existem vários cabos ópticos instalados em diversos ambientes terrestres em operação no mundo a mais tempo do que os 25 anos, funcionando perfeitamente.

Segundo [9] é comum os clientes relatarem que cabos ópticos de teste instalados no final dos anos 1970 ou no início dos anos 1980 ainda estão em uso

atualmente. Segundo [10], a expectativa de vida útil dos cabos ópticos é de mais de 30 anos e segundo [11] podem chegar a 50 anos.

Na prática os cabos de fibra óptica de boa qualidade estão em operação comercial a mais de 30 anos e não há nenhuma previsão de substituição ou desativação desses cabos que foram instalados nos primeiros anos da indústria de fibras ópticas e que poderão continuar em operação por muitos anos ainda.

Portanto, como aparentemente não se tem disponível entre os fabricantes e operadores de cabos ópticos um método difundido e aceito por todos ou pela maioria que possa confirmar que esses cabos não continuarão tendo um bom desempenho nos próximos anos, entende-se que a possibilidade de ter mais evidências e curvas de tendência para cabos submarinos com fibras diversas, com perfis de índices diferentes, seria muito útil. O uso desses dados possibilitaria estimar com mais exatidão e confiança o tempo de vida útil das fibras ópticas dos cabos atualmente instalados e em operação, estabelecendo limites maiores que os atuais. Esse conhecimento certamente seria de grande utilidade para os operadores e proprietários desses cabos ópticos e mercado em geral, e para as demandas atuais crescentes por meios de comunicação submarinos e terrestres, com alta capacidade e qualidade de transmissão adequados as demandas atuais e futuras.

## 1.4

### **Objetivo da Tese**

Esse estudo se propõe a realizar a análise de dados de medidas nas fibras ópticas e das caixas de emenda dos cabos ópticos submarinos do anel óptico instalado na região da Bacia Sedimentar de Campos, em três (3) de seus segmentos, e em cabos sobressalentes, para o período de 1998 a 2022. A maioria dos cabos e segmentos analisados estão em operação a cerca de 25 anos e atendem diretamente a 8 Unidades Estacionárias de Produção (UEPs) marítimas (Plataformas de Petróleo) que estão em operação na área de produção de Petróleo da Bacia Sedimentar de Campos.

O estudo apresenta o efeito do envelhecimento na degradação observada desse parâmetro ao longo do tempo e dessa forma obter curvas de tendência que possam estimar as degradações futuras, visando estabelecer limites práticos mais

assertivos para estimar o tempo de vida útil mais provável dessas fibras nos ambientes em que estão em operação, além de apresentar uma proposta de manutenção direcionada a estender ainda mais o tempo de utilização dos enlaces ópticos em função das perdas nas caixas de emendas ópticas, e propor orientações e cuidados com a armazenagem dos cabos sobressalentes, visando a diminuição da sua degradação ao longo do tempo, possibilitando a sua utilização nos reparos futuros.

Portanto, considerando o exposto e sabendo da grande necessidade de meios de comunicação com alta capacidade e qualidade de transmissão de dados nos dias atuais, cuja a tendência de crescimento dessa demanda é de alta para os próximos anos ou décadas, entende-se que a apresentação de um estudo com curvas de tendência e estimativa de longevidade de cabos ópticos atuais e em operação, mostrando de forma científica e prática que a vida útil desses cabos podem ir além dos 25 anos, limite teórico, serão importantes em diversas áreas e setores do mundo globalizado. Os benefício podem ser apontados tanto em termos de atendimento as necessidades das demandas de tráfego das novas tecnologias e dos novos serviços para a população em geral, como por fatores econômicos com os ganhos financeiros que o aumento da vida útil dos cabos irá proporcionar aos prestadores de serviços por internet e aos proprietários e operadores desses ativos de telecomunicações.

Assim sendo, adotou-se a seguinte estratégia para a elaboração do estudo:

- 1) Levantamento e aquisição de dados
- 2) Análise Exploratória de dados
- 3) Estruturação dos dados
- 4) Análise dos dados
- 5) Resultados Finais
- 6) Discussões e Conclusões

De forma sucinta, o trabalho analisou o comportamento das fibras ópticas em termos do seu coeficiente de atenuação e das perdas pontuais nas caixas de emendas submarinas ao longo do tempo na maior quantidade de cabos ópticos e emendas com dados disponíveis, que estão em operação no leito marinho por até 25 anos. Também foi avaliado o efeito do envelhecimento no coeficiente de atenuação em cabos submarinos sobressalentes, que estão armazenados nos



depósitos do proprietário, e comparado o seu envelhecimento com os cabos de mesmo tipo e fornecimento, que estão em operação no leito do mar.

No desenvolvimento da pesquisa buscou-se avaliar o comportamento e a evolução dessas perdas, comparar os resultados observados com as estimativas divulgadas nos artigos científicos e pesquisas diversas publicadas [12, 13, 14] , no ITU-T, Setor de Padronização do ITU, e no IEC (International Electrotechnical Commission), apresentar as convergências ou divergências identificadas e levantar tendências para a degradação e para a vida útil dessas fibras.

Foram analisados cabos ópticos submarinos com estrutura simples armado e duplo armado (SA/DA) contendo na maior parte 12 fibras ópticas monomodo cada, sendo um segmento com fibras ópticas padrão (STD RXB - G.652), um com fibras tipo dispersão deslocada (DS – G.653) e um com dispersão não nula (NZDSF – G.655), contendo diversos trechos e caixas de emendas por cada segmento de cabo analisado.

Um quarto segmento foi utilizado apenas para obter medidas de degradação da perda na emenda em uma caixa de emenda submarina a uma profundidade média intermediária, para permitir melhor avaliação da tendência da degradação junto as emendas realizadas nos três segmentos anteriores, com caixas de emendas em trechos rasos e profundos.

## 2

### Fundamentação

Para avaliar o envelhecimento que ocorre nas fibras ópticas ao longo do tempo, em primeiro lugar foi necessário verificar qual parâmetro da fibra óptica é realmente afetado. Para isso buscou-se na literatura trabalhos publicados que levantaram esse efeito, por experimentos em laboratório e no campo e verificou-se que o parâmetro alvo seria a degradação do coeficiente de atenuação em dB/km.

Dessa forma foi analisado como ocorre a atenuação nas fibras ópticas, considerando os efeitos do Hidrogênio, espalhamento Rayleigh e microcurvatura como principais fatores.

#### 2.1

#### Atenuação em Fibras Ópticas

Como qualquer meio material, as fibras ópticas também atenuam a luz que se propaga ao longo da fibra, e o coeficiente de atenuação em dB/km é calculado conforme a Equação 2.1. [15].

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \log \left[ \frac{P_o}{P(L)} \right] \text{ dB/km.} \quad (2.1)$$

Onde:

L é a distância em km percorrida pela Luz na fibra óptica

P<sub>o</sub> é a potência da Luz inserida no início da fibra óptica

P<sub>(L)</sub> é a potência da Luz medida na distância L

A atenuação na fibra óptica é provocada por fatores como absorção (intrínseca e extrínseca), espalhamento e radiação.

A Figura 2.1 [16] mostra a atenuação espectral típica em uma fibra óptica produzida em 1979, considerando os efeitos de atenuação ultravioleta, atenuação Rayleigh, atenuação infravermelho e picos devido a absorção extrínseca por impurezas de vapor de água em contato com a sílica produzindo íons OH<sup>-</sup>.

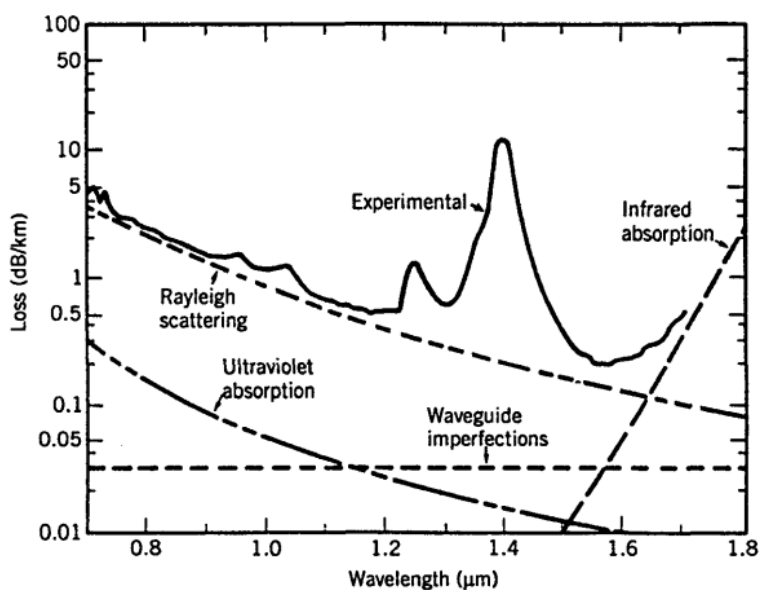


Figura 2.1. Espectro de atenuação para uma fibra monomodo produzida em 1979.

Nas últimas décadas, as perdas por absorção extrínsecas provocadas por impurezas como Fe, Cu, Co, Ni, Mn, Cr e por vapor de água, gerando íon  $\text{OH}^-$ , e por defeitos na estrutura da fibra óptica foram muito reduzidas com a melhoria dos processos de fabricação. Entretanto a absorção intrínseca pelas moléculas da sílica nas regiões de comprimento de onda ultravioleta (UV) e infravermelho (IR) e o espalhamento Rayleigh ainda são os responsáveis pela perda nas fibras ópticas a base de sílica na faixa de comprimentos de onda entre 800nm e 1800nm

Qualquer material absorve parte da energia devido a ressonâncias eletrônicas e vibracionais, de acordo com o comprimento de onda. Para a molécula da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) ressonâncias eletrônicas ocorrem na região de absorção do UV enquanto as ressonâncias vibracionais ocorrem na banda de absorção na região do IR e as suas caudas se estendem para dentro da banda da região visível [16].

Atualmente para o comprimento de onda de 1550nm o coeficiente de atenuação das fibras ópticas monomodo a base de sílica, padrão [17], fabricadas pelas grandes empresas do ramo, fica em torno de 0,25dB/km.

Outros fatores que provocam a atenuação nos enlaces de fibras ópticas são as perdas nos conectores e nas emendas durante a instalação e são relacionadas a perdas nos cabos ópticos.

Considerando o comprimento de onda de 1550nm, os valores típicos esperados atualmente para as perdas nas emendas por fusão, emendas mecânicas e nos conectores de um enlace óptico são[18]:

- 0,05dB – 0,10 dB para perda nas emendas por fusão
- 0,3dB para perda em emendas por conectorização
- 0,5dB para a perda em um par de conectores
- 3,5dB – 1dB para dois divisores

Entretanto para esse estudo que avalia a degradação do coeficiente de atenuação ( $\alpha$  em dB/km) ao longo do tempo devido ao envelhecimento das fibras ópticas de cabos submarinos deve-se considerar como fatores dominantes para a degradação os efeitos provocados pelo Hidrogênio, que possa penetrar ou ser produzido ao longo do tempo no interior dos cabos submarinos, o espalhamento Rayleigh e as curvaturas, principalmente as microcurvaturas.

### 2.1.1

#### Hidrogênio

Segundo [19, 20] o principal fator que pode provocar o aumento da perda ou atenuação em dB/km ( $\alpha$ ) das fibras ópticas do cabo seria a absorção de Hidrogênio ( $H_2$ ) do ambiente, e nesse caso o ambiente e as condições em que os cabos ópticos e as caixas de emendas ópticas estão instalados oferece um grande peso sobre esse fenômeno, ou devido a absorção de  $H_2$  produzido pelos próprios materiais utilizados na construção do cabo e pelos materiais das caixas de emenda, e devido aos métodos de execução e vedação das caixas de emendas.

Esse efeito afeta tanto as fibras no cabo óptico conectado as caixas de emendas, quanto a porção de fibras interna as caixas de emendas ópticas.

O aumento relacionado ao hidrogênio na perda óptica na região do comprimento de onda de 1550nm, objeto do estudo, é devido à reação química do núcleo das fibras baseado em sílica com gás hidrogênio, e é devido a dois fatores:

- Moléculas de hidrogênio dissolvido nos interstícios da fibra e
- Formação do grupo hidroxila ( $OH^-$ ).

O grau de intensidade que esse processo ocorre vai depender de diversos fatores: tipos de fibras, projeto do cabo óptico, processo de fabricação, materiais utilizados, caixas de emendas, etc.

Perda induzida pelo gás hidrogênio tem sido determinante para a confiabilidade a longo prazo de sistemas ópticos submarinos desde o início dos sistemas submarinos ópticos.

Para a especificação da margem de envelhecimento do sistema é levado em consideração a atenuação resultante dos efeitos do hidrogênio numa fibra adequadamente protegida.

Segundo [21], a atenuação na fibra óptica aumentará lentamente devido aos efeitos físicos relacionados ao meio ambiente. Dois deles são geralmente levados para conta:

- Efeitos do hidrogênio na fibra: a degradação é geralmente aproximada por uma perda adicional após 25 anos de cerca de 0,003 dB/km.
- Efeitos da radiação: as fibras ópticas são sensíveis à perda de radiação de alta energia (raios gama) cujo as origens podem estar relacionadas a sedimentos, água do mar ou fontes artificiais (depósito de lixo). A perda adicional, o aumento é estimado em menos de 0,002 dB/km após 25 anos.

Assim, segundo [20], geralmente uma margem de 0,003 a 0,005 dB/km é usada para o envelhecimento da fibra óptica em que os efeitos do hidrogênio desempenham o papel principal, após 25 anos de vida útil do cabo óptico.

### 2.1.2

#### **Espalhamento Rayleigh**

O espalhamento Rayleigh é um processo através do qual um material causa uma mudança de direção de um fóton incidente de forma a ocorrer uma interação com conservação de energia, logo o fóton espalhado tem a mesma energia do incidente. Ocorre em gases, líquidos e sólidos.

Trata-se de um efeito linear [16], logo é independente da potência da luz incidente e é o mais importante que ocorre nas fibras ópticas sendo causado por flutuações submicroscópicas na composição e densidade do material, que surgem

durante o processo de fabricação da fibra ou em função de defeitos próprios na estrutura molecular do vidro. As flutuações na densidade levam a flutuações randômicas do índice de refração em uma escala muito menor do que o comprimento de onda da luz na fibra óptica

As dimensões físicas e a separação dessas irregularidades são muito menores que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da luz no meio (da ordem de 10% ou menor). O resultado é uma flutuação no valor do índice de refração do material ao longo da fibra.

Pode ser efetuado o controle de parte das imperfeições pela melhoria dos processos de fabricação, mas as originadas por diferenças de densidade do material são intrínsecas ao vidro e não podem ser evitadas, existindo sempre na fibra por melhor que ela seja purificada.

O limite mínimo teórico possível para a perda na fibra óptica é proporcional a aproximadamente  $1/\lambda^4$ , e independe da amplitude do sinal e o nível de perda intrínseca é estimada por:  $\alpha_R = C/\lambda^4$ , onde C é uma constante e varia entre 0,7 – 0,9 {(dB/km). $\mu\text{m}^4$ } dependendo dos materiais constituintes do núcleo da fibra.

Com esses valores de C a atenuação por espalhamento Rayleigh ( $\alpha_R$ ) fica entre 0,12 a 0,16 dB/km em  $\lambda=1550\text{nm}$  indicando que as perdas nas fibras de sílica são dominadas pelo espalhamento Rayleigh, perto desse comprimento de onda ( $\lambda$ ).

O espalhamento Rayleigh provoca o espalhamento da luz em todas as direções. A luz retroespalhada retorna no sentido do início da fibra e é utilizada para a determinação de perdas de potência ao longo da fibra, na localização de pontos de ruptura, na análise da qualidade das emendas, etc. O instrumento Refletômetro Óptico no Domínio do Tempo (OTDR) pode medir níveis de luz retroespalhada com muita precisão e pode medir pequenas variações nas características da fibra em qualquer ponto ao longo de seu comprimento.

A intensidade do retroespalhamento produzido no espalhamento Rayleigh [18] vai depender da potência do pulso de luz lançado na fibra,  $P_0(W)$ , da largura do pulso  $\Delta t$  (s), do coeficiente de retroespalhamento  $K$  ( $s^{-1}$ ), da distância  $d$  (m) e da atenuação na fibra  $\alpha$  (dB/km) e é dado pela Equação 2.2.

$$\text{Retroespalhamento} = P_0 \Delta t K 10^{-\alpha d/5} \quad (2.2)$$

O coeficiente de retroespalhamento é a razão entre a potência retroespalhada e a energia lançada na fibra. Valores típicos para coeficiente de retroespalhamento (K) para fibras monomodo padrão para um pulso com duração de 1ns são:

- -79dB para  $\lambda = 1310\text{nm}$
- -81dB para  $\lambda = 1550\text{nm}$
- -82dB para  $\lambda = 1625\text{nm}$

Enquanto o espalhamento Rayleigh é uniforme ao longo do comprimento da fibra óptica, a magnitude do espalhamento Rayleigh varia significativamente com o comprimento de onda e com o tipo de fibra.

O (OTDR) é um instrumento capaz de medir níveis muito baixos de sinal, como os gerados pelo retroespalhamento, de forma muito precisa, além de medir pequenas variações que ocorrem com a luz devido as características da fibra óptica em qualquer ponto ao longo do enlace óptico e, portanto, deve-se entender como é o seu funcionamento.

### 2.1.2.1

#### Funcionamento do OTDR

O Refletômetro Óptico no Domínio do Tempo (OTDR) é o instrumento que foi utilizado para coletar os dados dos enlaces ópticos submarinos estudados durante a pesquisa do doutorado.

Basicamente [18] o OTDR possui uma fonte Laser ou um Gerador de Pulsos que injeta Luz na fibra. Uma parcela da luz que retorna da fibra por espalhamento Raleigh, luz retro espalhada, é separada da luz injetada utilizando um acoplador e é enviada ao fotodiodo detector. O sinal óptico é convertido num sinal elétrico, amplificado, amostrado e mostrado em uma tela onde o eixo horizontal mostra a distância dos eventos detectados em quilômetros e o eixo vertical a atenuação da luz a cada distância em dB.

A Figura 2.2 mostra o diagrama em blocos do OTDR.

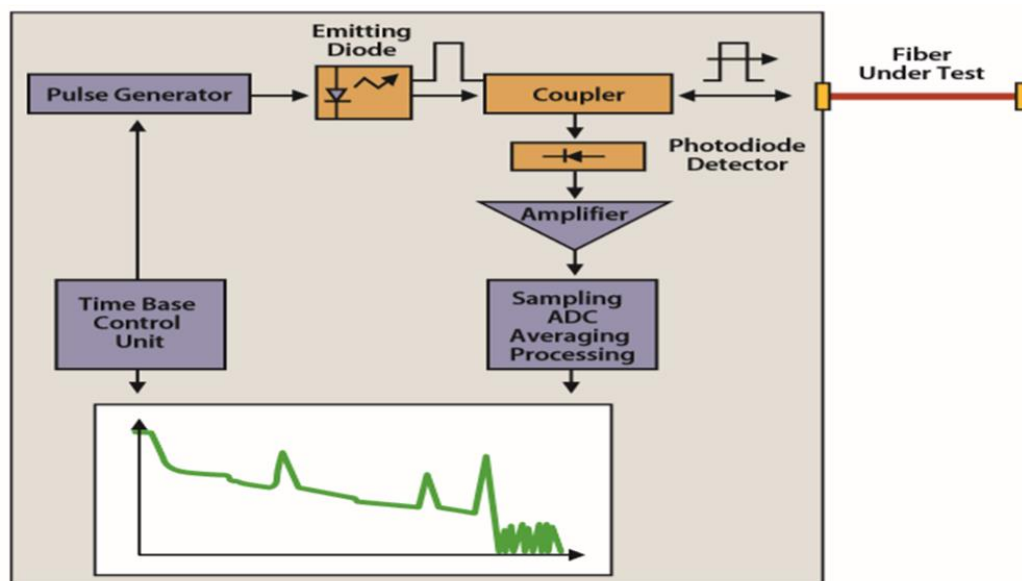


Figura 2.2. Diagrama em blocos de um OTDR padrão.

Através da luz retro espalhada que retorna ao início da fibra, correspondendo a parte da luz espalhada por Rayleigh e por Fresnel, o OTDR calcula a perda total na fibra em dB, a perda em dB/km entre os pontos escolhidos pelo operador com a colocação dos cursores ao longo do trecho investigado, a perda na emendas, conexões e curvaturas, o final de fibra e rupturas no cabo óptico, com as respectivas distâncias em que ocorreram.

A distância dos eventos é calculada pelo OTDR pela medida do tempo total de ida e volta da luz ( $2xd$ ). O cálculo é mostrado nas equações 2.3 e 2.4:

$$V_f = 2.d/t \quad (2.3)$$

$$V_f = c/n \quad (2.4)$$

Onde:

$V_f$  é a velocidade de propagação da luz na fibra óptica

$d$  é a distância percorrida pela luz

$t$  é o tempo de propagação da luz, ida e volta.

$c$  é a velocidade da luz no vácuo

$n$  é o índice de refração da fibra no comprimento de onda da luz.



Logo:

$$d = V_f \cdot t/2 = c \cdot t / 2 \cdot n \approx 10^8 \cdot t \text{ (m)} \quad (2.5)$$

Portanto, é muito importante informar o valor correto do índice de refração antes de realizar a medida com o OTDR. Se o valor informado não for o correto para o comprimento de onda do pulso, o resultado da distância do evento indicado na curva do OTDR vai estar com erro.

Através da análise e comparação entre os níveis de luz injetada na fibra e da luz que retorna o OTDR traça a curva de assinatura do retro espalhamento da fibra sobre teste, e cujo formato padrão com vários eventos está mostrado na Figura 2.3.

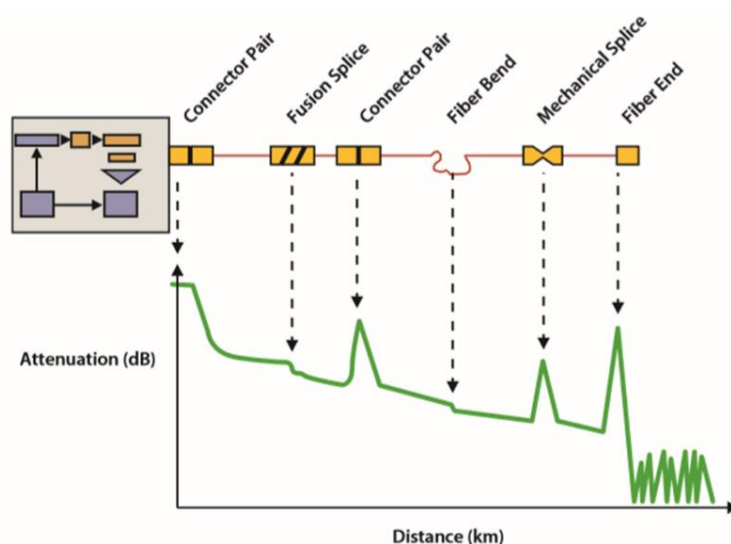


Figura 2.3. Formato dos principais eventos identificados e registrados na curva do OTDR.

Portanto na Figura 2.3 no início da curva tem-se a reflexão no conector de início da fibra óptica (pig tail), seguido de um degrau, queda abrupta na potência da luz devido a perda na primeira emenda por fusão, seguido de uma reflexão devido a um conector mecânico, seguido de uma perda na fibra óptica por macrocurvatura, depois outra evento de reflexão por emenda mecânica, chegando ao final da fibra óptica com um pulso elevado de evento de reflexão seguido de queda acentuada e um trecho final, que indica o fim da fibra.

O OTDR possui algumas características que explicam o seu funcionamento e são importantes para o seu entendimento e para a sua adequada utilização, e estão listadas abaixo:

- Faixa Dinâmica (DR): Determina o comprimento máximo que pode ser observado em uma fibra.
- Zona Morta (Dead Zone): É o comprimento de fibra que não pode ser caracterizado totalmente pelo OTDR na fibra para a medida devido a saturação do fotodiodo.
- Resolução: Existem duas especificações para resolução: atenuação (nível), e espaço (distância).
- Exatidão: É a capacidade da medida realizada ser comparada como uma medida de referência. Existem a exatidão da atenuação medida e a exatidão da distância.
- Comprimento de Onda: O OTDR utiliza os seguintes comprimentos de onda:
  - 850nm e 1310nm – Medidas em Fibras Multimodo
  - 1310nm, 1550nm e 1625nm – Medidas em Fibras Monomodo
  - 1224nm e 1388nm para medidas de atenuação ao redor do pico de absorção de fibras
  - 1490nm para sistemas FTTH
  - 1420nm, 1450nm e 1480nm para sistemas com amplificador Raman.
- Largura do Pulso Óptico: A largura do pulso óptico que irá se propagar pela fibra é que determina a distância mínima entre dois eventos que permite a identificação isolada de cada evento pelo OTDR, além de determinar a distância máxima que a medida pode ser realizada sem ser deteriorada pelo efeito do ruído. Logo para medidas de eventos a distância curta devem ser usados pulsos curtos e para distâncias longas, pulsos largos.

A duração do pulso é normalmente apresentada em nano segundo (ns), mas pode ser estimada em metros, pois  $d = V_f \cdot t/2$ . (Eq. 2.5). A Tabela 2.1 compara a duração do pulso com a distância medida na fibra. Para dois eventos consecutivos, espaçados em metros, deve-se escolher o pulso adequado.

Tabela 2.1. Largura de pulso e correspondente distância na fibra óptica.

Duração ou Largura do pulso	5ns	10ns	100ns	1μs	10μs	20μs
Distância ou Comprimento Fibra	0,5m	1m	10m	100m	1 km	2 km

- Tempo de Aquisição: Significa o tempo em que as medições são realizadas ao longo da fibra pelo OTDR que é equivalente ao número de amostras que serão consideradas para obter a média das medidas. Quanto maior o tempo de aquisição maior a quantidade de medidas realizadas e melhor a qualidade dos resultados. O OTDR vai fazer uma média das medidas para melhorar a SNR e chegar a um resultado mais próximo do valor correto. Assim é possível realizar medidas mais distantes com boa precisão e com o traço mais limpo da curva medida que será mostrado no OTDR em condições de ruído randômico, causado pelo movimento randômico dos portadores na fibra óptica. A relação entre o tempo de aquisição (número de médias) e a melhora obtida na Relação Sinal/Ruído (SNR) é expressa pela Equação 2.6:

$$\Delta \text{SNR} = 5 \log \sqrt{N} . \quad (2.6)$$

Onde N é a razão entre o tempo de aquisição em minutos de duas medidas dado pela SNR elétrica cuja raiz quadrada é a SNR óptica.

Assim para uma medida realizada com um tempo de aquisição de 3 minutos vai ocorrer uma melhora no range dinâmico de 1,2 dB em relação a uma medida com tempo de aquisição de 1 minuto.

O processo de fazer a média das medidas realizadas através da escolha do tempo de aquisição melhora a relação sinal/ruído pelo aumento do número de aquisições de cada ponto, mas o tempo que se leva para realizar a média das medidas também aumenta o tempo para gerar a curva de caracterização do trecho com o OTDR.

Entretanto, não há vantagem em aumentar o tempo da medida acima de um certo de tempo porque existe um limite máximo além do qual não haverá mais ganho na medida.

Finalizando, para realizar uma boa medida com o OTDR deve-se:

- Informar o valor correto do índice de refração da fibra;

- Utilizar o comprimento de onda adequado ao tipo de medida que está sendo realizada e ao comprimento de onda do sistema óptico em operação;
- Para medir perdas nas emendas e conectores de forma adequada é necessário realizar as medidas sempre nas duas direções para uma correta medida das perdas, pois existem condições em que existem fibras diferentes conectadas no enlace óptico ou mesmo fibras do mesmo tipo, mas de lotes e fabricações diferentes ou trechos na mesma fibra com pequenas diferenças, sem uniformidade em todo o trecho, com coeficientes de retroespalhamento (K) diferentes. Nestes casos tem-se uma indicação de perda num sentido e de ganho no sentido contrário, e a perda real na fibra naquele ponto é a média aritmética das medidas realizadas em cada sentido.
  - Quando a medida é feita do maior coeficiente para o menor, na transição vai voltar menos luz devido a atenuação na emenda e devido ao menor coeficiente de captura de luz retroespalhada capturar menos luz que o maior coeficiente, e nesse caso tem-se uma indicação de perda maior que a real.
  - Quando a medida é feita do menor coeficiente para o maior, na transição vai ter a perda na emenda mas vai voltar mais luz do que o correto devido ao maior coeficiente de captura de luz retroespalhada capturar mais luz que o menor coeficiente, e nesse caso tem-se uma indicação de perda menor que a real.
  - Dessa forma a média aritmética das medidas é necessária para se obter a perda real na emenda.

Entretanto cabe destacar que a variação da atenuação da fibra ou variação da perda de emenda é a mesma em qualquer direção usada porque todos os fatores que contribuem nessa degradação relativos aos coeficientes de captura de retroespalhamento de Rayleigh se anulam quando a diferença entre as medições realizadas em dois tempos diferentes é calculada. Este procedimento pressupõe que o perfil geométrico e de índice de refração das fibras permaneça inalterado ao longo dos anos. Diante disso, os traçados dos dados originais em uma única direção foram utilizados para avaliar a variação das perdas ao longo do tempo, e foi escolhida aquela direção que devido a menor distância da fonte de luz apresentava a melhor

relação sinal/ruído, mantendo, é claro, a mesma direção ao longo de todas as medições.

### 2.1.3

#### Macro e Microcurvaturas

Tanto a macro como a microcurvatura são situações indesejadas que provocam um aumento na atenuação das fibras ópticas nos cabos ópticos nas fases de armazenagem, transporte e instalação.

#### 2.1.3.1

##### Macrocurvatura

Na macrocurvatura a luz no interior do cabo pode vazar para fora da fibra quando a fibra é dobrada e quanto mais aguda essa dobra mais luz escapa da fibra [22]. A Figura 2.4 ilustra esse efeito.

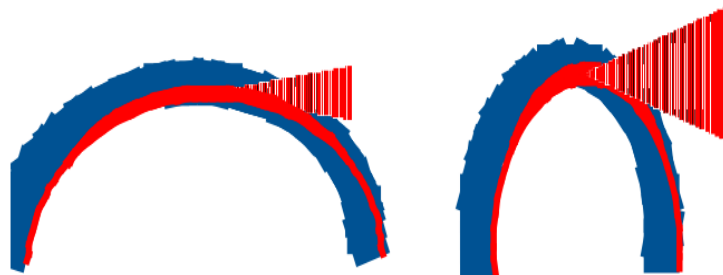


Figura 2.4. Diagrama esquemático da Macrocurvatura.

A macrocurvatura pode ser modelada como uma inclinação do perfil de índice de refração em função do raio de curvatura dado pela Equação 2.7:

$$n_c^2(r, \theta) = n^2(r) + \frac{2n_1^2}{R} r \cos \theta \quad (2.7)$$

Onde  $n_c^2(r, \theta)$  é o índice de refração local modificado sobre o raio de curvatura da fibra,  $R$  é o raio de curvatura e  $\theta$  é o ângulo de inclinação do perfil de índice de refração

Os demais parâmetros,  $n$ ,  $r$  e  $n_1$ , são respectivamente, índice de refração na posição  $r$  afastada do centro do núcleo,  $r$  é a posição radial a partir do centro axial do núcleo e  $n_1$  é o índice de refração no centro do núcleo.

A Figura 2.5 ilustra o efeito de diferentes raios de curvatura no perfil de índice da fibra com perfil de degrau. Quanto maior o decréscimo no raio de curvatura, a inclinação efetiva do perfil do índice de refração aumenta.

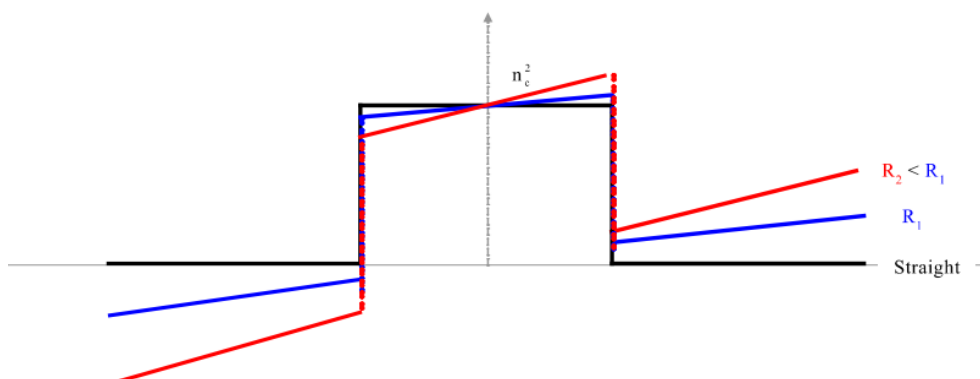


Figura 2.5. Perfil de índice de refração efetivo para uma fibra índice degrau dobrada com dois diferentes raios de curvatura,  $R_2 < R_1$ .

Para uma fibra óptica a atenuação aumenta com a diminuição do raio de curvatura, com a quantidade de curvaturas e com o comprimento de onda do sinal. A Figura 2.6 mostra como esse efeito ocorre em dois tipos de fibras ópticas, padrão ITU-T Rec G.652.D e G.657.A1 que foram enroladas em um tambor com um diâmetro de curvatura de 20mm e mostra que abaixo de um comprimento de onda limite não há nenhum aumento na atenuação e acima desse limite a atenuação aumenta exponencialmente e essa resposta diminui para diâmetros de campo modal (MFD) menores.

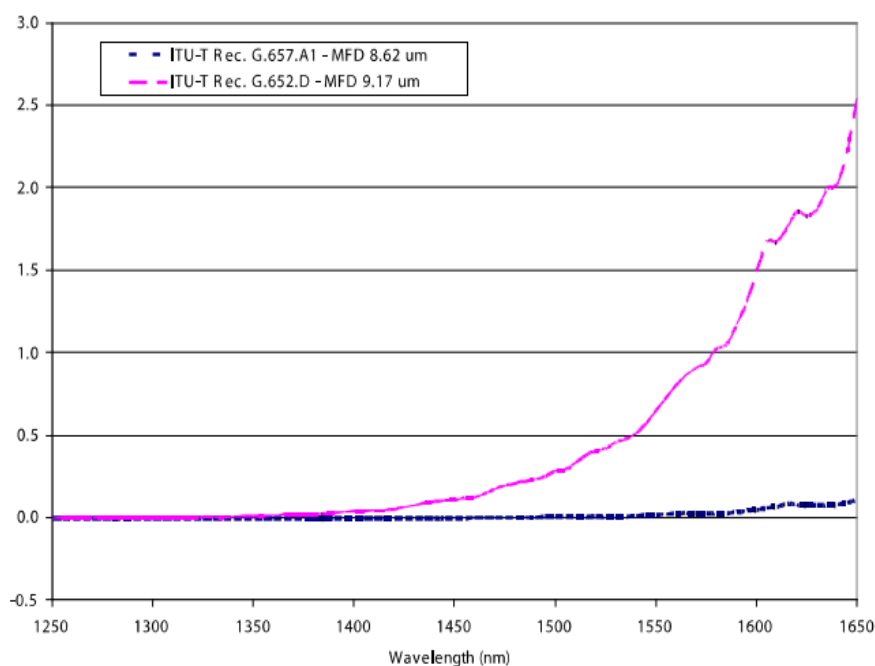


Figura 2.6. Efeitos do MFD e comprimento de onda com a macrocurvatura

O efeito da macrocurvatura em função do raio de curvatura é ilustrado na Figura 2.7 que mostra como a atenuação aumenta com a diminuição do raio de curvatura  $R$  e com o aumento do comprimento de onda da luz na fibra. [23]

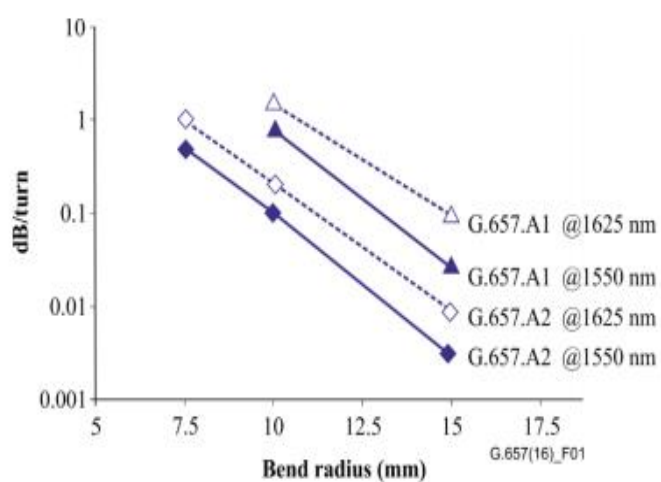


Figura 2.7. Efeito da macrocurvatura em fibras ópticas Rec.ITU-T G657 com o raio de curvatura e com o comprimento de onda.

Para reduzir o efeito da macrocurvatura o que mais comumente se faz no projeto de uma fibra óptica é diminuir o diâmetro do campo modal (MFD). Quando se aumenta o MFD, aumenta também um parâmetro denominado “número MAC” que é a razão entre o MFD e a frequência de corte da fibra, e isso provoca uma maior sensibilidade a macrocurvatura. Portanto fibras com grandes MFD são mais sensíveis a atenuação por macrocurvatura.

### 2.1.3.2

#### Microcurvatura

A microcurvatura é um efeito que afeta a atenuação nas fibras óticas que ocorre durante as fases de instalação dos cabos no terreno sobre superfícies rugosas, seja um leito marinho ou terrestre, em função do tipo de solo e do formato do solo em que o cabo foi depositado ou enterrado. A microcurvatura [22] provoca um aumento na atenuação causada por perturbações longitudinais muito pequenas que se repetem com alta frequência na fibra óptica no interior do cabo, cuja causa é geralmente devido ao contato lateral da fibra com superfícies do cabo óptico, ou outros estímulos que ocorrem durante a implantação, como torção.

Essas perturbações são consideradas como um conjunto de várias dobras com raios muito pequenos no núcleo da fibra, menores que 1mm, randomicamente distribuídos em termos de espaçamento e amplitude, e para fibras monomodos, essas perturbações acoplam a potência do modo fundamental  $HE_{11}$  (ou  $LP_{01}$ ) para modos de alta ordem por onde a potência é dissipada através de perdas normais e espalhamento ou por refração no revestimento de acrilato da fibra.

Longos períodos de perturbação, maiores que 1mm, não fornecem a ressonância correta para acoplar a luz aos modos no revestimento da casca via microcurvatura mas podem levar a macrocurvatura. Para a maioria das fibras trechos com rugosidade na superfície variando entre 0,2 e 1mm são os mais críticos para microcurvatura porque podem prover a interação requerida para os modos no revestimento da casca e produzir uma significativa deformação do núcleo óptico, estando portanto de acordo com a teoria de acoplamento de modos que estabelece que o comprimento de correlação para acoplar a luz entre dois modos deve ser



aproximadamente a razão entre o comprimento de onda da luz e a diferença dos índices de refração do núcleo e da casca.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n_{core} - n_{casca}} \quad (2.8)$$

Onde:

$\lambda$  é o comprimento de onda da luz no núcleo da fibra óptica;

$n_{core}$  é o índice de refração do núcleo da fibra óptica, e;

$n_{casca}$  é o índice de refração da casca da fibra óptica.

Logo para 1550nm o comprimento de correlação ( $\Lambda$ ) é 119 $\mu$ m.

A Figura 2.9 mostra que a sensibilidade a macrocurvatura como a microcurvatura variam com o comprimento de onda, sendo que na macrocurvatura essa sensibilidade é muito maior.

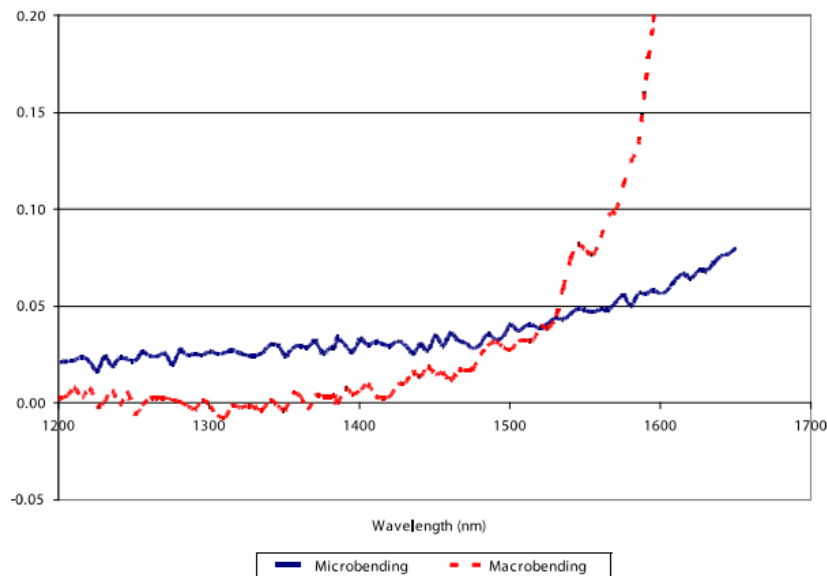


Figura 2.8. Variação das perdas por microcurvatura e macrocurvatura (30mm diâmetro) para fibras ITU-T Rec. G.652.

Existem algumas opções de projeto para que os fabricantes de fibras ópticas possam melhorar resistência da fibra a microcurvatura. Algumas ações mais comuns estão ligadas a atuar no raio do núcleo (a), no diâmetro total da fibra (b) e na diferença entre os índices de refração ( $\Delta$ ), que tem forte efeito na sensibilidade da fibra a microcurvatura, conforme mostrado na Equação (2.9) [22].

$$\gamma = N < h^2 > \frac{a^4}{b^6 \Delta^3} \left( \frac{E}{E_f} \right)^{3/2}. \quad (2.9)$$

Onde:

$\gamma$  é o aumento da atenuação induzida pela microcurvatura;

$N$  é o número de saliências da altura média  $h$  por unidade de comprimento;

$b$  é o diâmetro total da fibra;

$a$  é o raio do núcleo;

$\Delta$  é a diferença entre os índices de refração da fibra;

$E_f$  e  $E$  são o módulo elástico da fibra e do material ao redor da fibra (revestimento).

Portanto, diminuir o raio do núcleo, aumentar  $\Delta$  e aumentar  $b$ , são ações de projeto que irão melhorar a performance da fibra para microcurvatura. Entretanto existem limites para alterar o raio do núcleo e  $\Delta$ , pois esses parâmetros determinam as propriedades ópticas do projeto da fibra, tais como dispersão, comprimento de onda de corte e diâmetro do campo modal, tanto para fibras monomodo como multimodo. Também existem limitações da indústria para aumentar o diâmetro externo da fibra acima de 250 $\mu$ m, que é o padrão adotado pela indústria, e pequenas desvios ao redor desse valor não afetam a sensibilidade para microcurvatura.

Segundo [16] para fibras monomodo perdas por microcurvatura são mitigadas através da escolha do parâmetro  $V$ , denominado de frequência normalizada e é quem determina o número de modos suportados por uma fibra óptica. O valor do parâmetro  $V$  (ver Equação 2.10) deve ficar mais perto possível do valor de corte de 2,405, e dessa forma novamente se estaria atuando no raio do núcleo ( $a$ ) e na diferença entre os índices de refração da fibra, conforme comentado no parágrafo anterior.

Na prática os valores de  $V$  ficam entre 2,0 – 2,4 e dessa forma a energia do modo estará confinada principalmente no interior do núcleo.

$$V \approx \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) a n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (2.10)$$

Para fibras monomodo, quando apenas um modo se propaga na fibra, tem-se  $V < 2,405$  e somente o modo fundamental será suportado pela fibra.

A próxima oportunidade para melhorar a microcurvatura da fibra é atuar no valor do módulo elástico do material ( $E$ ) do revestimento primário interno da fibra, reduzindo o seu valor e consequentemente a atenuação por microcurvatura, conforme mostrado na Figura 2.10.

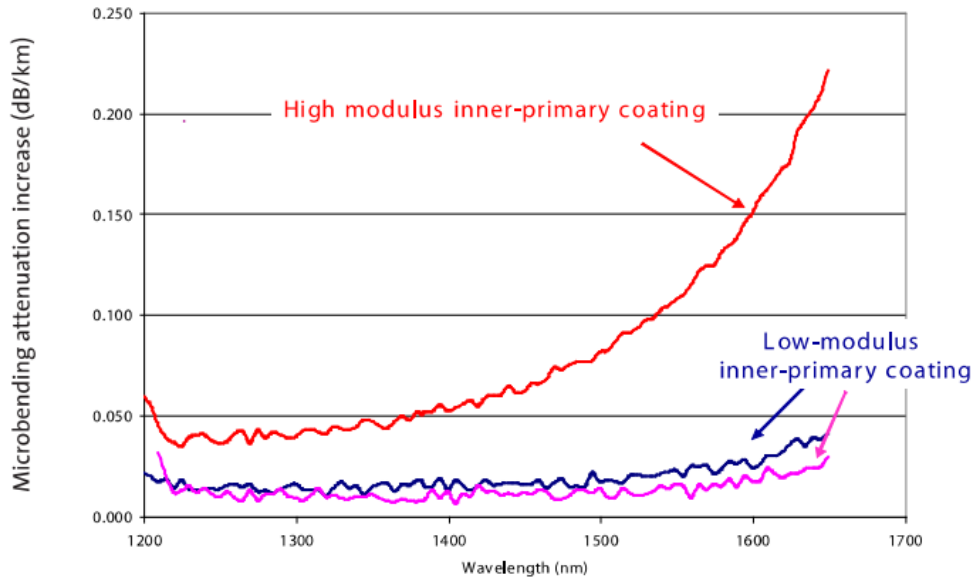


Figura 2.9. Variação da perda por microcurvatura com a diminuição do valor do módulo elástico do material ( $E$ ) do revestimento primário interno da fibra.

Outra alternativa [24] usada para mitigar perdas por microcurvatura é colocar as fibras dentro de estruturas com tubo loose nos cabos ópticos. As perdas por microcurvatura são quase eliminadas nesta construção de tubo loose, uma vez que a fibra tem espaço e pode se ajustar dentro do tubo quando sofrer os esforços externos.

Estudos realizados por [25] mostraram que o parâmetro mais adequado para descrever a sensibilidade de uma fibra a microcurvatura é o MAC, cuja definição já foi dada no item 2.1.3.1, e é expresso conforme a Equação (2.11).

$$MAC = \frac{MFD}{\lambda_c} \quad (2.11)$$

A aplicação da teoria do acoplamento dos modos permitiu que a perda por microcurvatura de fibras monomodo pudesse ser calculada como uma função do MFD,  $\lambda_c$  e MAC.

A teoria e os experimentos mostraram que há uma diminuição da atenuação devido a microcurvatura com a diminuição do MFD, aumento de  $\lambda_c$  e consequentemente com a diminuição do valor do MAC. A Figura 2.11 mostra esse

resultado para medidas realizadas por [22] utilizando o teste com enrolamento da fibra ao redor de uma bobina, em fibras ITU-T Rec. G.652.D, G.657.A e G.657.B3, com diferentes revestimentos, confirmando que a diminuição do MAC diminui a atenuação por microcurvatura.

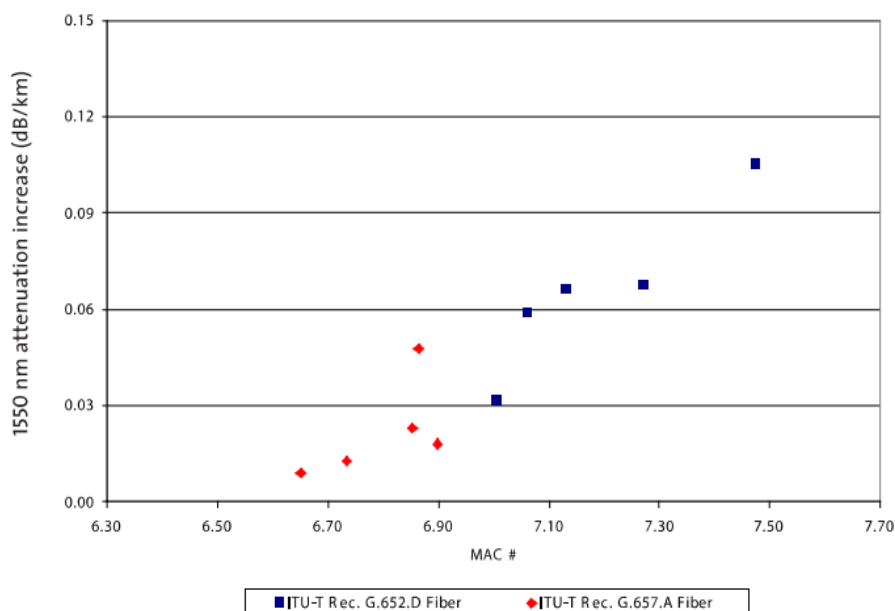


Figura 2.10. Variação da atenuação em 1550nm devido a microcurvatura em relação ao valor do MAC, para fibras ITU-T Rec. G.652.D, G.657.A e G.657.B3.

Portanto, uma pequena sensibilidade a microcurvatura pode ser obtida pela seleção de fibras com pequeno valor de MAC e com um revestimento interno o mais fino possível, sempre considerando o perfil de índice, ou tipo de fibra adotado.

Para as fibras utilizadas na elaboração da tese, pode-se esperar perdas por microcurvaturas e macrocurvaturas maiores no cabo B, segmento com uma fibra ITU-T Rec G.652 do que para as medidas realizadas no cabo C, segmento com uma fibra IUT-T Rec G.653, e no cabo A, segmento com fibras ITU-T Rec G.655.

Cabe destacar que se o cabo não sofrer esforços ao longo do tempo não é esperado alteração relevante da atenuação por microcurvatura, permanecendo praticamente inalterado ao longo do tempo, mas se ocorrerem alterações nas condições de fundo, como mudanças geológicas naturais ou por ação de terceiros sob ou sobre o cabo óptico submarino, esse efeito poderá ser maior, e vai também depender novamente principalmente do perfil de índice da fibra e do diâmetro do núcleo.

Durante a instalação do cabo óptico em muitas situações as fibras são prensadas contra uma superfície que não é normalmente macia, provocando uma distorção axial randômica nas fibras ópticas, e gerando perdas por microcurvatura, podendo provocar perdas excessivas se não forem tomadas certas precauções para minimizar esse efeito[24].

Portanto, cuidados especiais durante o levantamento do local em que os cabos serão lançados no leito marinho ou terrestre, como inspeções e vistorias antes e depois no trecho em que os cabos serão lançados, são importantes para mitigar as perdas por microcurvatura.

## 1.6

### Estado da Arte

Conforme comentado no início desse capítulo, a pesquisa na literatura apontou estudos que mostram que o parâmetro significativo a ser considerado no envelhecimento das fibras ópticas é a degradação do seu coeficiente de atenuação em dB/km.

Nesse sentido foram analisados estudos realizados [26], em que foram utilizados processos de envelhecimento acelerado em fibras ópticas de sílica monomodo.

Esses estudos utilizaram orientações e normas padronizadas do IEC ((International Electrotechnical Commission) para desempenho de fibras ópticas, em 2 cabos ópticos tipo loose com aproximadamente 2 km com revestimentos diferentes de diferentes fornecedores, padrão G.652-D.

Foram considerados como referências os dois padrões abaixo do IEC:

IEC standard 60793-1-50, “Measurement methods and test procedures – Damp heat (steady state)”, First Edition.

IEC standard 60793-1-53, “Measurement methods and test procedures – water immersion”, First Edition.

O período sugerido no padrão para teste de envelhecimento das fibras pelo IEC para atingir os requisitos mínimos de performance da fibra é tipicamente de 30

dias. O limite dado pelo IEC para a máxima mudança na atenuação em ambos os comprimentos de onda, 1310 nm e 1550nm, é de 0,05 dB/km, para os dois testes, calor úmido e imersão em água.

As medidas do coeficiente de atenuação nas fibras ópticas dos cabos foram realizadas com um OTDR nos comprimentos de onda de 1310 nm e 1550 nm a cada dois dias durante um prazo muito superior ao dados pelo IEC, 1034 dias e 1436 dias, para calor úmido e para imersão em água.

Os resultados no final do teste mostrados na Figura 2.12 para a fibra com revestimento B, apresentam uma variação para o comprimento de onda de 1310 nm de cerca de 0,005dB/km e para 1550nm em 0,015dB/km para o teste de calor úmido.

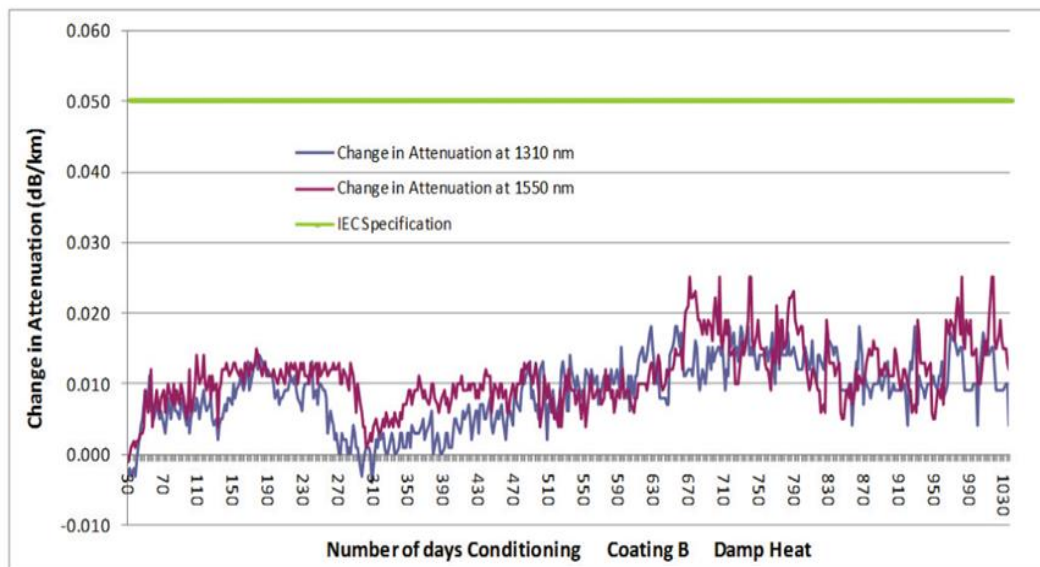


Figura 2.11. Mudanças da atenuação (dB/km) para 1310 nm e 1550 nm após 1034 dias de testes por calor úmido [26].

Para o teste de imersão em água, verifica-se na Figura 2.13 que ao final do teste de 1436 dias a variação da atenuação em dB/km para o comprimento de onda de 1550 nm ficou em cerca de 0,005 e para 1310nm em 0,021.

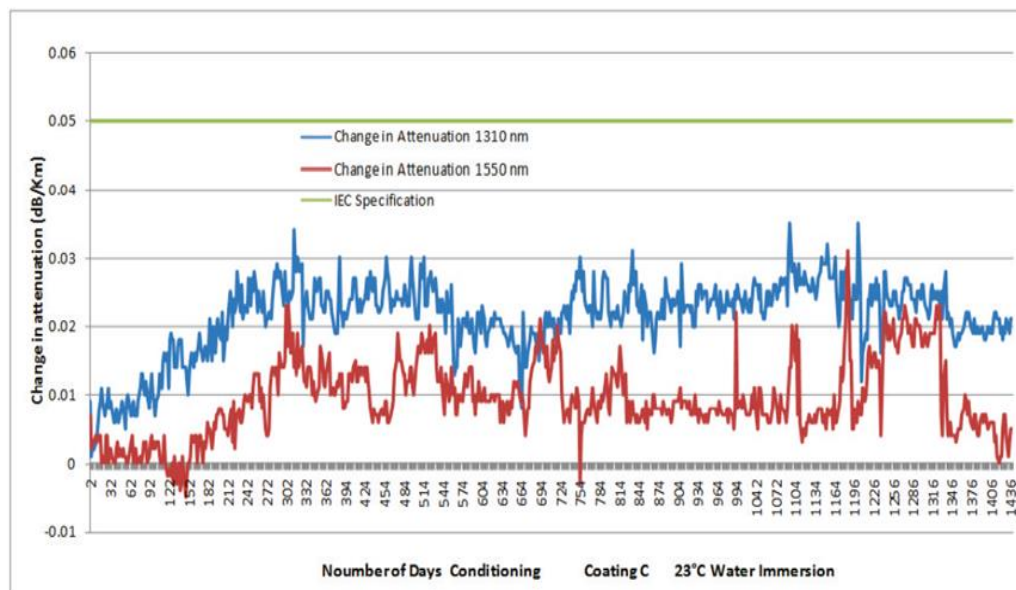


Figura 2.12. Mudanças da atenuação (dB/km) para 1310 nm e 1550 nm após 1436 dias de testes por imersão em água deionizada [26].

As tendências de perda medidas durante a exposição a que as fibras foram submetidas nos testes anteriormente descritos são menores do que a especificação do IEC e o seu comportamento é típico de variação aleatória observada durante as medições por exposição de longo prazo.

Para o teste de calor úmido observa-se uma maior amplitude de variações do coeficiente de atenuação em dB/km para o comprimento de onda de 1550 nm e para o teste de imersão em água o comprimento de onda de 1310 nm apresentou uma maior amplitude de variações do coeficiente de atenuação em dB/km.

Após os estudos a conclusão obtida pela Sterlite Tech [26] foi que nenhuma falha ou mudança significativa na atenuação foi observada e os resultados de teste de envelhecimento ambiental estendido forneceram uma maior confiança no desempenho dessas fibras nesses ambientes.

Não foi informado se o tipo de cabo utilizado era terrestre ou submarino e nem as características dos revestimentos dos cabos.

Analisando também o resultado de outro estudo realizado em dois cabos ópticos em operação por 16 anos na região da Bosnia Herzegovina entre 2003 e 2019, e publicado em 2020 [12] no qual foram analisados um trecho de cerca de 33 km com 21 enlaces e 18 emendas ao longo do backbone terrestre utilizando um cabo de fibra típico padrão ITU-T G. 652 B com 24 fibras, que utiliza como medida de proteção contra a penetração de água nas fibras um gel tixotrópico e um segundo

trecho terrestre de cerca de 42 km em N.Travnik—G. Vakuf, no mesmo período ambos para os comprimentos de onda de 1310 nm e 1550nm.

O estudo baseou-se em testes com OTDRs nas fibras ópticas em ambos os trechos.

A conclusão do estudo foi que a análise do coeficiente de atenuação em dB/km entre as emendas mostrou que não houve variação significativa entre os valores medidos em 2003 e 2019 para 1550nm.

Entretanto, as medições do ano de 2019 mostram que houve um aumento significativo na perda em cada uma das emendas, principalmente para o  $\lambda = 1310\text{nm}$ .

Como pode ser observado parte dos estudos apresentados foram realizados através de métodos de aceleração do envelhecimento das fibras em laboratórios por Temperatura e imersão em água (pressão) para períodos de 1800 dias e os resultados apresentados não ficaram próximos das recomendações apresentadas no manual do ITU-T de 2009 e nem do IEC.

Por outro lado, o trabalho realizado na Bosnia Herzegovina utilizou a análise de cabos ópticos em operação por um período de 16 anos, e se baseou em dados de medidas com o OTDR e o Power Meter, e ficou restrito a apenas dois cabos ópticos terrestres com distâncias de 33km e 42 km e 24 fibras, cada.



### 3

#### Metodologia Adotada

Na pesquisa para elaboração desta Tese de Doutorado estão sendo analisados os dados das curvas de arquivos produzidos através de medições com o OTDR com extensões .Sor e .Dat obtidas com as medidas realizadas para 3 cabos ópticos submarinos por período máximo de 24 anos.

As medidas foram realizadas com o OTDR em anos diferentes e em quantidades diferentes para cada cabo em 1998, 2000, 2002, 2003, 2005, 2011, 2012, 2013, 2018, 2020 e 2022.

A análise das curvas obtidas foram realizadas utilizando dois emuladores de OTDR, o Anritsu Trace View 5.0 e o Anritsu MX907600A, para avaliar as curvas de caracterização extraídas dos enlaces ópticos e permitir a análise da degradação do coeficiente de atenuação em dB/km nos trechos entre os pontos de perdas pontuais (emendas ópticas, conectores, dobras, etc), e para permitir a análise da degradação nas perdas pontuais ao longo do enlace, devido as emendas ópticas.

Esses dados foram levantados, avaliados, selecionados, tabulados e estruturados em planilhas para permitir a sua análise, utilizando softwares como Excel, Qtiplot e Origin para gerar curvas de tendências para previsibilidade futura utilizando o valor médio da degradação do coeficiente de atenuação obtida do conjunto de fibras analisadas, em todos os trechos, para cada ano de medição, e o desvio padrão dos parâmetros obtidos. Com esses resultados foi possível entender melhor o comportamento das fibras ao longo do tempo e das perdas provocadas nas caixas de emenda ópticas e obter resultados que permitiram entender melhor como esse processo atua ao longo do tempo nas fibras óticas.

A análise baseou-se na comparação dos valores medidos para o coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) em dB/km para os trechos em que haviam dados disponíveis buscando levantar tendências para a degradação desse coeficiente em função do envelhecimento das fibras e avaliar o comportamento das perdas ópticas no interior das caixas de emenda ópticas ao longo das rotas ópticas. Foi realizada também uma análise de três trechos de cabos ópticos sobressalentes que estão armazenados em depósito terrestre por períodos similares aos cabos em operação, para verificar o

comportamento da degradação do coeficiente de atenuação em cabos sobressalentes do mesmo tipo e fornecedor dos cabos em operação, e dessa forma identificar semelhanças e diferenças entre as amostras, em razão do local, do ambiente e do manuseio ao longo do tempo.

Assim entende-se que o estudo proposto é muito mais abrangente em termos de quantidades de trechos, distância dos enlaces, quantidades de fibras, tipo de ambiente (Marinho), tipos de cabos, tipos de fibras, etc., do que as referências consultadas, podendo trazer conclusões novas e mais detalhadas, além do fato de ser inédito para cabos submarinos, no mínimo em relação aos locais estudados e quanto a longevidade dos cabos analisados, que atendem ao segmento de óleo e gás, com grande perspectiva de atrair o interesse da indústria de Exploração e Produção de Petróleo em alto mar, como é o caso das produções nas Bacias de campos e Santos (Pré-Sal) no Brasil e em outras partes do mundo como o Golfo do México e o Mar do Norte, entre outras.

O estudo também pretende apresentar uma proposta de manutenção direcionada a estender ainda mais o tempo de utilização das fibras ópticas, através de monitoramento da degradação das emendas ópticas submarinas e a aplicação de técnicas de manutenção preventiva e corretiva, quando a degradação atingir limites previamente determinados que possam colocar em risco o bom desempenho do sistema óptico submarino.

Para atingir os objetivos propostos na pesquisa adota-se a seguinte metodologia para a elaboração do estudo.

### **3.1**

#### **Levantamento e aquisição de dados**

- Levantamento de dados de medições realizadas com OTDR em fibras ópticas em alguns trechos da Malha óptica Submarina da Bacia de Campos ao longo dos 24 anos de operação.
- Análise exploratória dos dados obtidos com a seleção e separação do que é dado útil e válido daquilo que é dado inútil ou falso e, portanto, descartável.

- Maximização da relação sinal ruído (SNR) nos trechos livres de fibras avaliados

### 3.2

#### Estruturação dos dados

- Manuseio e tratamento das diversas fontes selecionadas e validadas de dados;
- Tabulação e consolidação dos dados em formato adequado;
- Conversão dos dados tabelados em um formato único adequado a sua análise;
- Aplicação de softwares próprios para análise de dados.

### 3.3

#### Análise dos dados

a) Planilhas em Excel obtidas de caracterizações realizadas com o OTDR durante a instalação, reparos e manutenções preventivas nos cabos ópticos ao longo de 24 anos coletados

- Criação de planilhas no Excel com os dados consolidados por fibra x ano de medição do coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) em dB/km;
- Elaboração de gráficos XY com a variação por período analisado do coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) em dB/km ao longo dos últimos 24 anos, durante os períodos de coleta disponíveis por enlace;
- Identificação da variação absoluta de coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) em dB/km no período máximo em anos de acordo com o trecho analisado;
- Utilização de um grande número de fibras por cabo para esta análise e calcular as médias e o desvio padrão das medidas;
- Determinação de linhas de tendência de melhor ajuste no gráfico pela análise de regressão linear simples usando o método de mínimos quadrados para previsibilidade futura de vida útil estimada do cabo óptico submarino;
- Elaboração de hipótese de prazo para vida útil das fibras ópticas dos cabos ópticos analisados considerando uma degradação máxima

aceitável até o limite estabelecido nos padrões do ITU-T para a fabricação de fibras ópticas que garante a capacidade dessas fibras continuarem em operação de forma satisfatória com os sistemas ópticos atualmente disponíveis no mercado.

b) Curvas de Medidas com OTDR realizadas durante a implantação da Malha Óptica e nos reparos dos cabos ópticos submarinos ao longo de 24 anos

- Levantamento dos enlaces com curvas de OTDR disponíveis para análise;
- Identificação dos trechos e fibras com curvas válidas;
- Identificação dos sentidos dos trechos com fibras válidas;
- Visualização das curvas com a utilização de softwares emuladores de OTDR (Anritsu Trace View 5.0);
- Análise da degradação do parâmetro coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) em dB/km nos trechos livres entre as caixas de emendas ópticas dos cabos ópticos em operação, comparando o desempenho observado para os anos medidos, por período e inicial e final
- Traçar curvas de tendência com os dados das degradações levantadas e estimar a vida útil mais provável dos cabos em função da degradação dada pelo ITU-T para 25 anos de vida útil
- Comparar a degradação sofrida nos cabos no almoxarifado com os cabos em operação similares e por igual período
- Utilização de um grande número de fibras por cabo para esta análise, calculando as médias e o desvio padrão das medidas;
- Análise da contribuição da degradação nas perdas nas caixas de emenda ao longo do tempo nos períodos de medição
- Análise da taxa de degradação ocorrida na atenuação das caixas de emendas ao longo do período de avaliação em função da profundidade de instalação das caixas de emenda no leito marinho.
- Comparar os valores de degradação obtidos nas medidas com os limites definidos pelas recomendações do ITU-T e publicações científicas;
- Verificar a penalidade na potência dos enlaces ópticos em função das degradações nas emendas e devido ao envelhecimento das fibras ópticas nos trechos livres entre as caixas e comparar os resultados.

- Calcular o desvio padrão em torno das medidas efetuadas nas fibras ópticas nos trechos livres entre as caixas e nas emendas nas caixas de emendas;
- Propor uma metodologia de manutenção preventiva e corretiva nos enlaces submarinos com atuação nas caixas de emendas para diminuir as perdas nas emendas e na taxa de degradação com o tempo, e com isso aumentar a vida útil da fibra óptica, além de obter para os enlaces analisados ao longo do tempo um restabelecimento ou um aumento na qualidade da relação sinal/ruído da rota.

Todos os dados coletados poderão ser utilizados nos processos de manutenção, para tomadas de ações imediatas e programadas, e ficarão armazenados para análise e estudos futuros pelos profissionais de operação, manutenção e suporte da rede óptica.

## Experimentos, Resultados e Discussões

Foram realizadas medidas em três segmentos de cabos ópticos submarinos e numa caixa de emenda isolada de um cabo óptico submarino no segmento 4, na região da Bacia Sedimentar de Campos, em frente ao estado do Rio de Janeiro, Brasil, na área de exploração e produção de petróleo, mostrada na Figura 4.1 pela região com círculo em vermelho.



Figura 4.1. Área de localização dos três cabos ópticos submarinos (A, B e C) e da caixa de emenda do segmento 4, cujas medidas com o OTDR foram realizadas.

Para cada trecho foram realizadas medições do coeficiente de atenuação em dB/km em cabos ópticos submarinos em operação no leito marinho nos trechos livres de fibras ópticas, entre as caixas de emenda submarinas, em cabos submarinos similares ou do mesmo tipo dos cabos em operação armazenados nos depósitos em

terra e nas emendas das fibras no interior das caixas de emenda instaladas no fundo do mar. Os três cabos estão destacados na Figura 4.2 com linhas na cor vermelha e a linha verde representa o segmento 4 no qual foi medida a perda em uma caixa de emenda a 387m de profundidade.

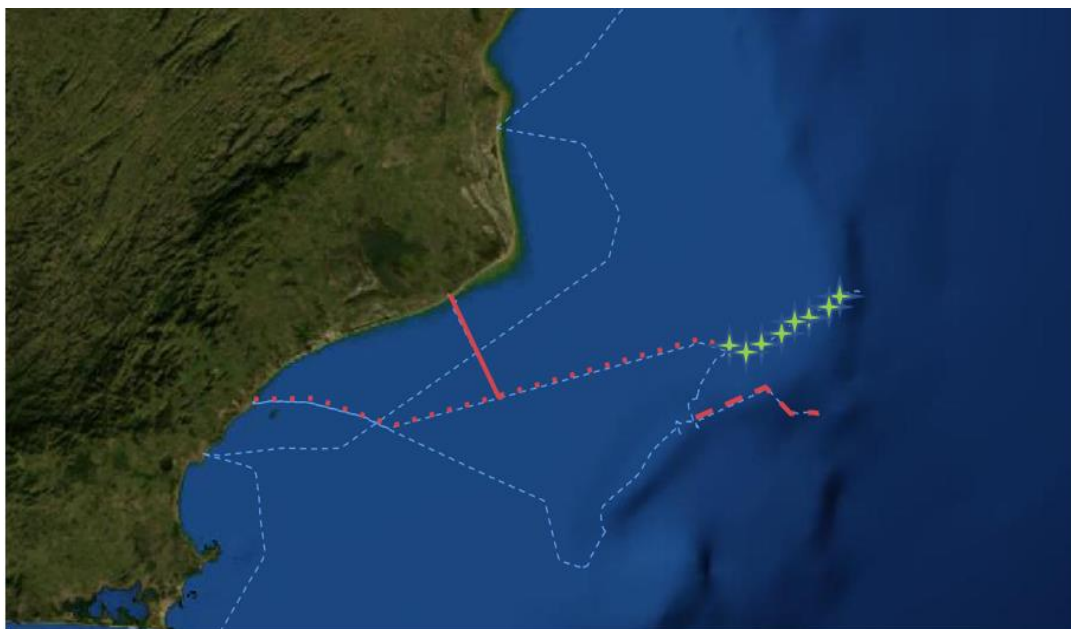


Figura 4.2. Cabo A, linha vermelha contínua, Cabo B, linha vermelha tracejada, cabo C, linha vermelha pontilhada. Linha verde representa o segmento 4 no qual foi medida a perda em uma caixa de emenda a 387m de profundidade.

Os resultados obtidos serão apresentados e detalhados nos próximos itens.

## 4.1

### Cabo Submarino A

O primeiro estudo foi realizado nas fibras do cabo submarino denominado “Cabo A” no qual buscou-se avaliar o comportamento da degradação sofrida em fibras ópticas monomodo padrão ITU-T Rec. G.655 NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber), em termos do coeficiente de atenuação em dB/km, em um trecho de 36 km de um link com extensão de 118 km de cabos ópticos submarinos, denominados Segmento W, implantados em área de exploração da Indústria de Petróleo e Gás na Bacia Sedimentar de Campos.

Para isso, os dados das medições da perda com o OTDR realizado na fábrica antes da instalação foram comparados com medições realizadas ao longo de 10 anos

de operação do cabo óptico submarino instalado em 2012, apenas num sentido, para diminuir o efeito do ruído observado em pontos mais distantes. Dessa forma foi possível verificar seu comportamento em função do envelhecimento, buscando identificar o padrão de como esse envelhecimento se manifesta no coeficiente de atenuação e consequentemente na vida útil das fibras ópticas para avaliar se essas fibras poderiam permanecer em operação por um período muito maior do que 25 anos, padrão dados pelos fabricantes.

Também foi verificado o comportamento das atenuações nas emendas ópticas das fibras nas caixas de emendas submarinas (CEs) ao longo do período em função da variação da perda nas emendas.

Além disso, também foram realizadas medições e análises de resultados para identificar como a variação do coeficiente de atenuação se manifesta nas bobinas de cabos sobressalentes armazenadas no armazém, para permitir a comparação dos resultados com os cabos em operação no fundo do mar. Os resultados obtidos também foram comparados com os valores apontados pelo ITU-T.

Inicialmente levantaram-se os dados do cabo óptico submarino simples armado (SA) modelo SL 12L da TYCO Submarine Systems Ltda (atual SubCom) com 18 fibras ópticas, e das fibras ópticas fornecidos em 2011, cujas características estão sendo demonstradas na Figura 4.3 e na Tabela 4.1:



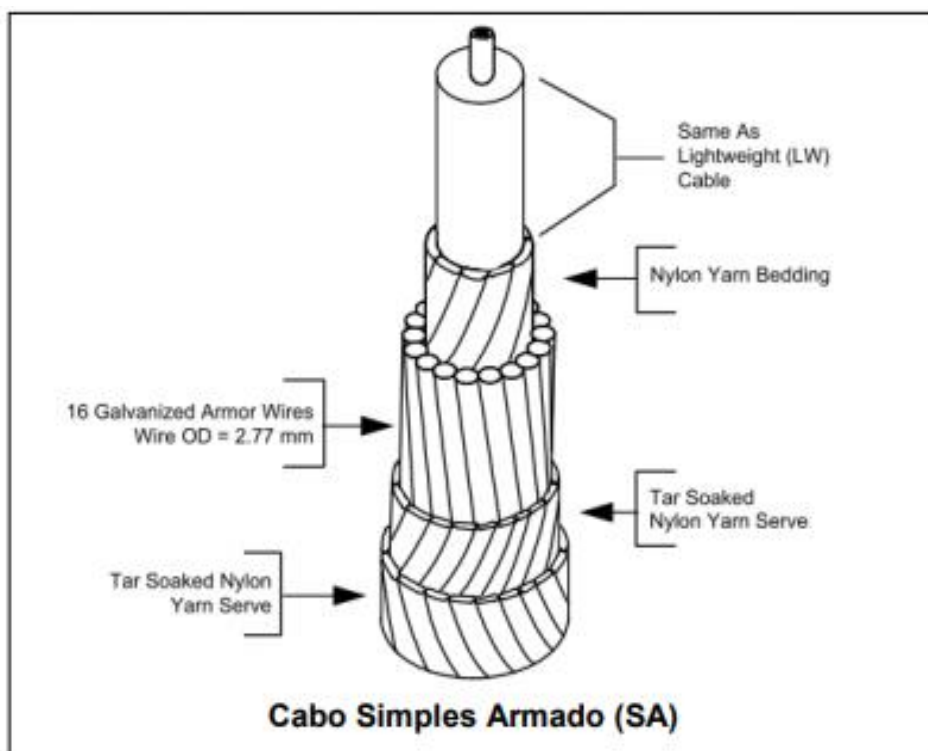


Figura 4.3. Cabo Óptico Submarino Simples Armado (SA).

Tabela 4.1. Valores típicos dos parâmetros da fibra ITU-T G.655 fornecida pela TYCO (SubCom) em 2011.

Fiber Parameters	Typical Values	Units
Effective refractive index	1.471	-
Cabled attenuation at 1550 nm	0.215	dB/km
Zero dispersion wavelength	1580	nm
Chromatic dispersion at 1550 nm	-2.85	ps/nm-km
Chromatic dispersion slope at 1550 nm	< 0.085	ps/nm <sup>2</sup> -km
Polarization mode dispersion at 1550 nm	< 0.07	ps/km <sup>1/2</sup>
Cable cut-off wavelength	< 1400	nm
Mode field diameter at 1550 nm	8.5	μm
Effective area	50	μm <sup>2</sup>
Core to cladding eccentricity	< 0.4	μm
Glass outer diameter	125	μm
Coating outer diameter (with color)	265	μm

Também foram obtidos dados do cabo duplo armado utilizado no trecho raso, cujas características são similares, e a principal diferença está numa segunda camada externa de armadura, com 24 fios de aço galvanizados, conferindo uma maior robustez ao cabo em caso de agressão externa. As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram esse tipo de cabo.

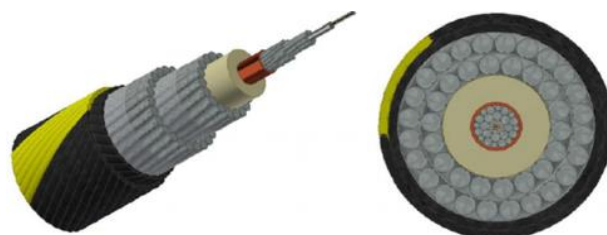


Figura 4.4. Cabo Duplo Armado TYCO SL 12

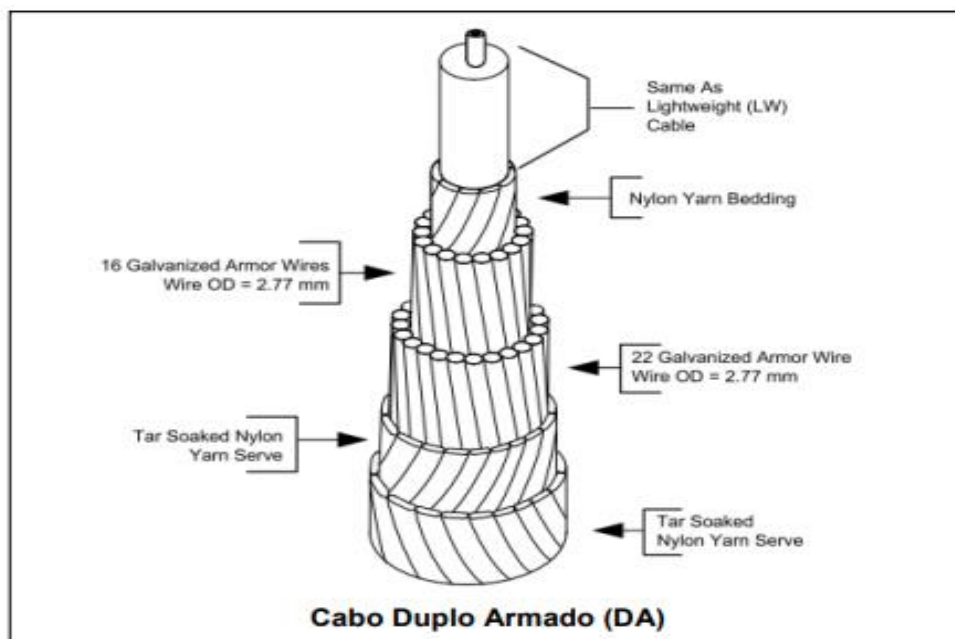


Figura 4.5. Estrutura característica do cabo duplo armado TYCO SL12.

Cabe destacar que as fibras utilizadas em ambos os cabos são do mesmo tipo, cujas características estão ilustradas na Tabela 4.1.

Com essas informações foi possível obter os resultados das medições do coeficiente de atenuação em dB/km efetuadas durante a entrega do cabo óptico submarino pelo fornecedor que estavam disponíveis em relatórios em pdf, para início dos estudos. Esses valores foram registrados em tabelas por trecho de cabo implantado entre as CEs, 3/4, 4/5, 5/6, 6/7, designados trechos S4, S5, S6 e S7, respectivamente, e foram utilizados para avaliação do envelhecimento da fibra considerando a degradação sofrida ao longo do tempo do coeficiente de atenuação em dB/km.

A Tabela 4.2 consolida os resultados extraídos das planilhas de testes que foram realizados na fábrica em 2010 para as fibras 7 a 12. Somente essas fibras foram consideradas porque após a implantação do cabo no leito marinho só foi possível realizar novas medições com o OTDR nesse grupo de fibras. Os resultados apresentados são a média aritmética calculada por fibra/bobina.

Tabela 4.2. Média aritmética dos resultados das medidas de fábrica realizadas em 2010 para o coeficiente de atenuação em dB/km nas bobinas dos cabos ópticos implantados no Segmento W em 2012.

Coeficiente de atenuação em dB/km por cabo recibo em 2010 - Testes de Fábrica				
FIBRAS	Cabo DA - 18F Bobina 5.025m CEs 3/4	Cabo SA - 18F Bobina 11.155m CEs 4/5	Cabo SA - 18F Bobina 8.798m CEs 5/6	Cabo SA - 18F Bobina 10.050m CEs 6/7
7	0,200	0,195	0,200	0,210
8	0,200	0,195	0,200	0,200
9	0,200	0,200	0,195	0,210
10	0,200	0,190	0,190	0,205
11	0,195	0,200	0,200	0,205
12	0,195	0,200	0,195	0,215
Média	0,198	0,197	0,197	0,208
Máximo	0,200	0,200	0,200	0,215
Mínimo	0,195	0,190	0,190	0,200
Mediana	0,200	0,198	0,198	0,208
Desvio Padrão	0,003	0,004	0,004	0,005

Pelos dados apresentados na Tabela 4.2 pode-se observar que todos os cabos atenderam a meta exigida na especificação técnica do cabo óptico para um coeficiente de atenuação menor ou igual a 0,215 dB/km.

Posteriormente, foram obtidas medidas realizadas com OTDR utilizando o comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 1550nm com largura de pulso de 10 $\mu$ s, nas 6 fibras (7 a 12) em um único sentido, nos anos de 2012, 2013, 2018 e 2022.

As medidas foram analisadas e os resultados foram armazenados em formatos de curvas em arquivos com extensão .dat e .sor para permitir as análises dos valores dos coeficientes de atenuação em dB/km LSA (Least Squares Analysis – Análise dos Mínimos Quadrados) nos trechos livres, sem caixas de emendas ou perdas pontuais.

Para as análises das curvas medidas com OTDRs foram utilizados os emuladores de OTDR da Anritsu já informados para visualizar as perdas em dB/km entre as CEs 3 e 4, 4 e 5, 5 e 6, e entre as CEs 6 e 7, respeitando a distância necessária das caixas para evitar erros na medida do coeficiente de atenuação em dB/km ocasionados por perdas adicionais originadas nas próprias CEs e difundidas longitudinalmente para o trecho de fibra óptica próximo da caixa de emenda.

Através das curvas do OTDR foi possível também avaliar as perdas pontuais, isoladas, nas caixas de emenda, CEs 4, 5, 6 e 7, em todos anos e consolidar os resultados em um conjunto de planilhas no Excel.

Os resultados foram tabulados, sumarizados e consolidados em tabelas para a degradação do coeficiente de atenuação em dB/km e para as perdas nas CEs, respectivamente, para o período compreendido entre 2011 e 2022.

Com as medições realizadas com o OTDR nos anos de 2012, 2013, 2018 e 2022, foi possível analisar os resultados e produzir um conjunto de dados estatísticos para identificar o comportamento da degradação do coeficiente de atenuação em função do envelhecimento das fibras ópticas do cabo óptico submarino em operação e nos cabos sobressalentes, e também observar com boa qualidade como esse processo ocorreu em relação a variação das perdas nas caixas de emenda, ao longo dos 10 anos de operação do cabo óptico.

Para isso dividiu-se a discussão em três partes:

- Parte 1 – Degradação do coeficiente de atenuação nas fibras ópticas do cabo em operação
- Parte 2 – Degradação do coeficiente de atenuação nas fibras ópticas do cabo sobressalente
- Parte 3 – Variação das perdas nas emendas nas caixas de emenda submarinas (CEs)

#### **4.1.1**

##### **Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo em operação**

Com os dados consolidados obtidos nas medições com o OTDR realizados em 2012 e 2022, foi possível construir um histograma com os valores das variações, degradações sofridas pelo coeficiente de atenuação ( $\Delta\alpha$ ) para todos os trechos e em todas as fibras, mostrado na Figura 4.6.

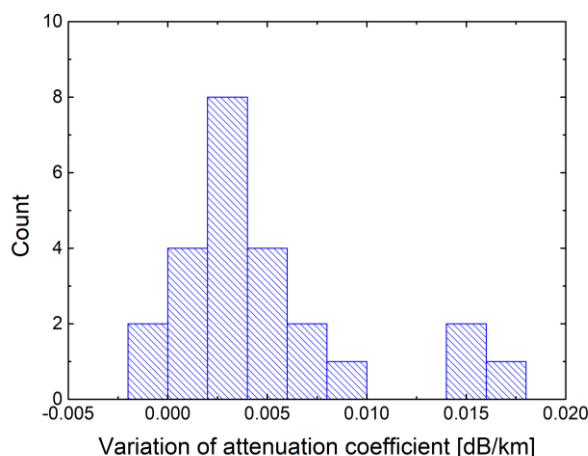


Figura 4.6. Variação do Coeficiente de Atenuação para todas as sessões entre 2012 e 2022.

Esta distribuição apresenta claramente dois comportamentos diferentes, algumas fibras degradando-se muito mais do que outras, na ordem de 10 vezes. De fato, as maiores variações foram observadas em fibras do mesmo trecho (S4), correspondendo ao cabo blindado duplo implantado em águas rasas próximo da praia e sujeito a mais movimentação de ondas, cruzamento sobre dutos submarinos, e em local com maior movimentação de embarcações menores, inclusive pesqueiras. A variação média foi de 0,004 dB/km em 10 anos, consideravelmente próxima do limite ITU-T de 0,005 em 25 anos. Esse resultado mostra que nesse trecho houve uma maior degradação (aumento) do coeficiente de atenuação das fibras ópticas, que foi agravado em função do ambiente em que ficou exposto, e que a penalidade da atenuação devido ao envelhecimento da fibra no cabo nesse trecho de 27,6 km, entre as CEs 4 e 7, é de 0,11 dB. O trecho de 27,6 km foi selecionado para evitar que a medida obtida do coeficiente de atenuação das fibras, tivesse influência da perda interna nas CEs 4 e 7.

A Figura 4.7 mostra o histograma das medidas das variações dos coeficientes de atenuação para todas as fibras dos demais trechos, sem o trecho raso S4, e nesse caso a variação média foi de 0,003 dB/km em 10 anos, abaixo do limite ITU-T de 0,005dB/km em 25 anos.

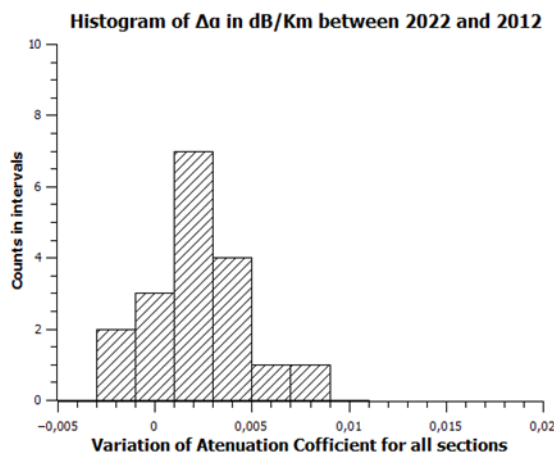


Figura 4.7. Histograma do  $\Delta\alpha$  em dB/km para todas as fibras sem o trecho raso entre CE3 e CE4.

A próxima análise utilizou novamente os dados das medidas com o OTDR realizados entre 2012 e 2022 para todos os trechos do cabo A, para levantar uma curva de tendência que mostrasse o efeito do envelhecimento das fibras ópticas na degradação do coeficiente de atenuação em dB/km durante os períodos medidos entre 2022 e 2012.

Para isso calculou-se a média das degradações sofridas nas seis fibras para todos os trechos entre 2012 a 2013, 2012 a 2018 e 2012 a 2022, mostrando o efeito do envelhecimento através do comportamento da degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação em dB/km, e dessa forma obter a tendência de como irá se comportar essa degradação ao longo do tempo, para permitir estimar com maior certeza um período que caracterizasse a vida útil dessas fibras.

Após a instalação do link em 2012, o coeficiente médio de atenuação das fibras implantadas foi quase igual ao valor médio nas instalações da fábrica em 2010, o que significa que o efeito do manuseio e transporte foi insignificante. A Figura 4.8 mostra a curva de tendência com pontos intermediários medidos das variações nos coeficientes de atenuação ( $\Delta\alpha$ ) para o conjunto de fibras medidas durante o período em operação entre 2012 e 2022. Usando uma tendência logarítmica para descrever os efeitos do envelhecimento, conforme mostrado na Fig. 4.8, os dados médios observados ainda são compatíveis com as expectativas do ITU-T com um coeficiente de determinação  $R^2 > 0,90$ , que é o quadrado da correlação, e informa o quanto a linha se ajusta bem aos dados e quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste. A curva de tendência obtida mostra que

eventualmente os valores de  $\Delta\alpha$  atingirão o valor limite em um tempo muito mais longo do que o esperado. Vale ressaltar que, embora o cabo de trecho raso seja duplamente blindado, sofreu variações muito maiores do que os cabos blindados simples mais profundos e conforme já comentado a proximidade da ponta da costa, pesca e tráfego de pequenas embarcações poderiam explicar essa diferença.

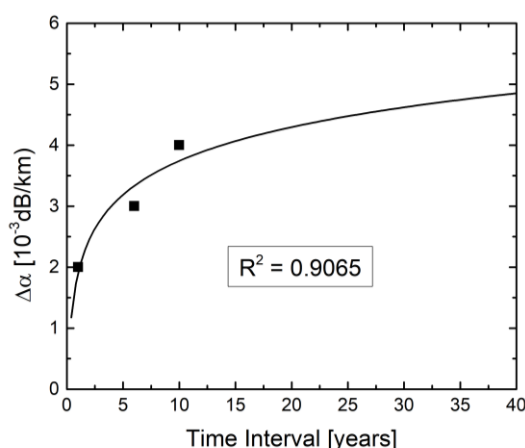


Figura 4.8. Curva de tendência da penalidade média observada para o coeficiente de atenuação.

#### 4.1.2

##### **Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo sobressalente**

Para essa análise comparam-se os valores dos testes de fábrica do cabo DA SL 12L de 18 fibras padrão ITU-T G.655, correspondente a bobina 1, fornecido em 2010, e implantada no trecho S4 em 2012, com os resultados dos testes de medida do coeficiente de atenuação em dB/km no cabo sobressalente em 2021, realizado no almoxarifado.

É interessante comparar a degradação das fibras do cabo ópticos em operação no trecho raso com a degradação das fibras ópticas do único cabo sobressalente blindado no armazém, do mesmo tipo e em guarda por período similar.

A Figura 4.9 mostra a distribuição de variação dos coeficientes de atenuação das fibras em ambos os cabos.

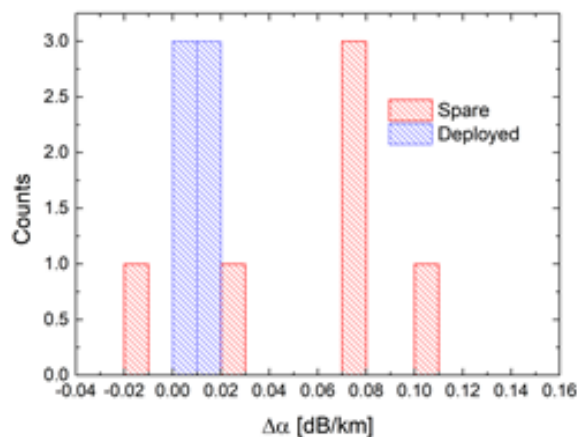


Figura 4.9.  $\Delta\alpha$  no cabo instalado no trecho S4 no leito marinho e o cabo sobressalente no almoxarifado.

De fato, uma distribuição muito mais ampla afetou o cabo sobressalente, com aumentos de dez vezes na degradação no mesmo período. Enquanto o cabo sobressalente era armazenado em um container com temperatura não controlada, o ambiente submarino do cabo implantado era muito mais estável.

Portanto, foi observado que nas fibras ópticas do cabo sobressalente houve ao longo do tempo uma maior degradação do que nas fibras do cabo em operação, reforçando a necessidade dos cabos sobressalentes serem armazenados de forma correta, seguindo as melhores práticas e orientações dos fornecedores para conseguir o melhor resultado, e a degradação mínima possível ao longo do tempo nesses ambientes, como armazenar em ambiente com temperatura controlada, dentro dos limites de temperatura máxima e mínima, e sem a incidência direta da luz do sol sobre os cabos. É claro que as condições de armazenamento são de suma importância para a confiabilidade das peças de reposição em instalações de cabos ópticos com longa vida operacional.



### 4.1.3

#### **Análise da variação das perdas nas emendas nas caixas de emenda submarinas (CEs)**

Para essa análise foram consideradas as medidas das perdas nas emendas dentro das caixas de emenda submarinas implantadas durante a instalação do cabo óptico submarino.

As perdas foram medidas com o OTDR entre 2012 e 2022. Os valores das perdas foram obtidos das curvas dos OTDRs e só foram consideradas as perdas em um sentido pois o objetivo do estudo é analisar a variação dessa perda ao longo do tempo e buscar um valor médio estimado anual para o crescimento da perda por emenda.

O valor médio da perda considerando as perdas em todas as fibras e em todas as CEs, ficou em 0,054dB com um desvio padrão de 0,047dB para todas as perdas, demonstrando a grande variação das perdas por fibra em todas as CEs.

Com esses dados foi verificado que as perdas ocorridas individualmente por fibra em todas as CEs ficaram abaixo da variação esperada para a perda em dB num período de 10 anos por emenda submarina, considerando [14] que apontam para um crescimento anual das perdas nas CEs da ordem de 0,026dB por ano. Todas as perdas tiveram um crescimento acumulado após 10 anos inferior a 0,26dB, sendo o crescimento observado do valor médio de todas as perdas em todas as CEs por ano de 0,0054dB, correspondendo a um valor muito menor do estimado anteriormente por [14].

Outro ponto interessante de destaque é o valor médio das perdas nas CEs que mostra uma menor perda média nas emendas da CE3, trecho raso, com valores mais altos nas demais CEs, destacando a perda na CE6, que está numa maior profundidade em cerca de 42m, com um valor de 2,85 vezes a perda média nas fibras da CE3, indicando que quanto maior a profundidade de instalação da CE maior a possibilidade de crescimento na perda por emenda ao longo do tempo, estando coerente com a influência que o meio ambiente do local de instalação exerce ao cabo óptico.

Essa constatação direciona a buscar materiais de melhor qualidade para as CEs submarinas, melhores práticas e expertise durante as emendas, e melhor

qualidade no lançamento e acomodação das CEs no leito marinho, escolha da melhor rota, de forma a mitigar as perdas ao longo do tempo nas CEs, conforme [10, 11, 27, 28].

As variações das perdas nas caixas de emenda foram medidas nos mesmos traços utilizados para os coeficientes de atenuação, portanto nos mesmos anos. A Figura 4.10 mostra a variação das perdas nas emendas e a Figura 4.11, a influência da profundidade de instalação das caixas de emenda na perda nas emendas, verificadas entre 2012 a 2022.

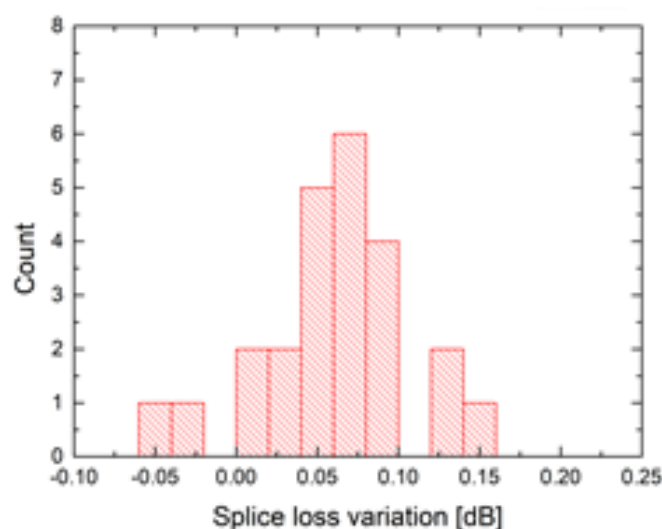


Figura 4.10. Histograma da variação das perdas nas caixas de emendas.

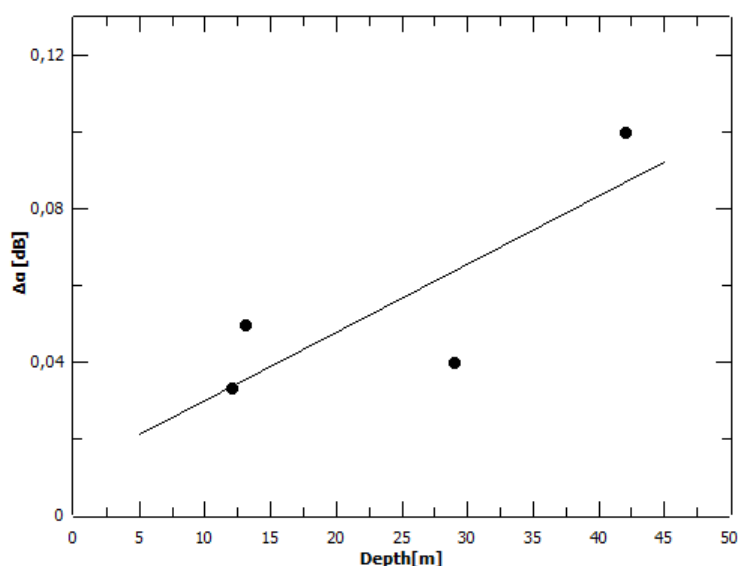


Figura 4.11. Variação das perdas nas emendas com a profundidade.

Considerando que várias emendas são instaladas em um enlace submarino, o impacto geral das emendas pode comprometer fortemente as margens de potência

do enlace ao longo dos anos. A penalidade de energia dos 10 anos de envelhecimento das quatro caixas de emenda no link parcial de 27,6 km, que é a distância dos trechos entre a CE4 e a CE7, é de 0,22 dB, enquanto a penalidade da atenuação devido ao envelhecimento da fibra no cabo de 27,6 km é de 0,11 dB, revelando um impacto de envelhecimento duas vezes maior das emendas do que da atenuação da fibra. Isso significa que materiais de melhor qualidade para caixas de emenda subaquáticas, melhores práticas e experiência durante a emenda, escolha da melhor rota e melhor qualidade no lançamento e acomodação das caixas de emenda no fundo do mar são necessários para mitigar as perdas por envelhecimento.

## 4.2

### **Cabo Submarino B**

O segundo estudo foi realizado nas fibras do cabo submarino denominado “Cabo B” que foi instalado na região da Bacia de Campos em 1998, estando em operação em perfeitas condições até os dias atuais, próximo a completar 25 anos de funcionamento ininterrupto. O estudo seguiu o mesmo método utilizado no estudo do cabo “A”, cujos resultados foram apresentados no parágrafo anterior.

Neste estudo também buscou-se avaliar o comportamento da degradação sofrida em fibras ópticas monomodo, nesse caso com perfil de índice padrão ITU-T Rec. G.652, em termos do coeficiente de atenuação em dB/km, em um trecho de 50 km que conecta duas plataformas de Petróleo na Bacia de Campos em profundidades variando de 158m a 925m com cabos ópticos submarinos simples armados (SA), também de fabricação da TYCO, com diâmetro externo de 23mm e cujas características são mostradas nas Figuras 4.12 e 4.13.



Figura 4.12. Cabo Submarino Simples Armado TYCO SL12.

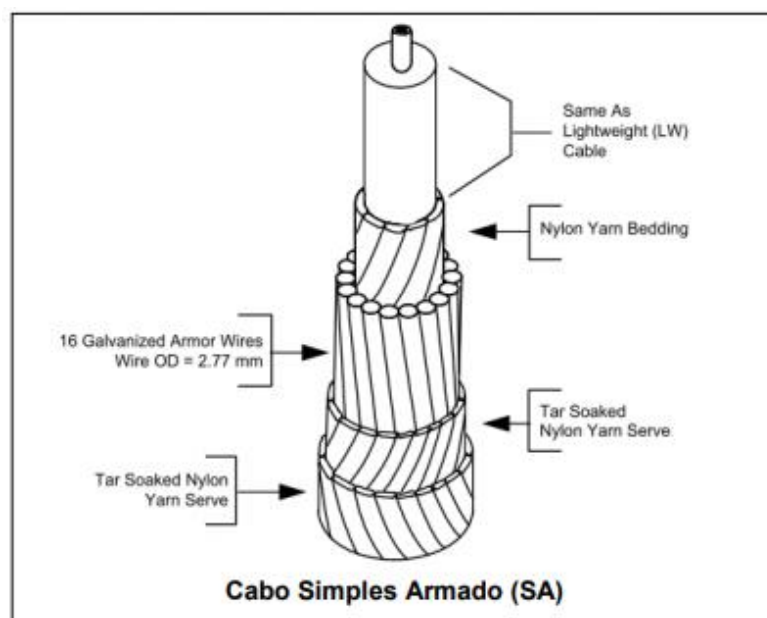


Figura 4.13. Estrutura característica do cabo TYCO SL12.

A Tabela 4.3 mostra as características da fibra utilizada no cabo “B”.

Tabela 4.3. Valores típicos dos parâmetros da fibra ITU-T G.652 fornecida pela TYCO em 1998.

Fiber Parameters	Typical Value	
Attenuation @1558 nm	0.19	dB/km
Zero Dispersion Wavelength	1310	nm
Dispersion Slope	0.086	ps/nm <sup>2</sup> -km
Chromatic Dispersion @1558 nm	+ 17.5	ps/nm-km
Calculated Dispersion @ 1300	- 0.87	ps/nm-km
Calculated Dispersion @ 1550	16.32	ps/nm-km
Fiber Cut-off Wavelength @ 1300 nm	< 1270	nm
Cabled Cut-off Wavelength	< 1270	nm
Mode Field Diameter	9.3	μm
Effective Area	80	μm <sup>2</sup>
Core / Cladding Concentricity Error	< 1.0	μm
Cladding Noncircularity	< 2.0	%
Fiber Glass Outer Diameter	125 ± 2	μm
Fiber Coating Outer Diameter	245 ± 15	μm
Fiber Proof Strain	up to 2	%
Fiber Bending Loss (100 turns @ 37.5 mm radius)	< 0.5	dB

Conforme já comentado, o cabo B foi totalmente instalado em 1998 na mesma área de exploração do cabo A. Medições bidirecionais completas de OTDR em 4 das 12 fibras dos cabos foram realizadas em 1998 e 2021 com caracterização completa das fibras e perdas nas emendas. Dos 50 km completos, foram escolhidos dois trechos (S4 e S5) seguindo o mesmo critério de comprimento mínimo do Cabo A, totalizando 36,1 km de extensão. Dados de perda em quatro caixas de emenda (SB3/4, SB4/5, SB5/6 e SB6/7) também foram selecionados.

Todas as medições com o OTDR foram realizadas em ambas as direções para fornecer tabelas de atenuação de fibra e perda de emenda ao longo do tempo.

De fato, este procedimento é usual na inspeção de cabos, principalmente porque as medições de perda de emenda entre diferentes fibras dependem da direção e o valor médio deve ser usado. No entanto, a variação da atenuação da fibra ou perda de emenda é a mesma em qualquer direção usada porque todos os fatores relativos aos coeficientes de captura de retroespalhamento de Rayleigh se anulam quando a diferença entre as medições realizadas em dois tempos diferentes é calculada. Este procedimento pressupõe que o perfil geométrico e de índice de refração das fibras permaneça inalterado ao longo dos anos. Diante disso, os traçados dos dados originais em uma única direção foram utilizados para avaliar a

variação das perdas ao longo do tempo, aquela que apresenta a melhor relação sinal/ruído, mantendo, é claro, a mesma direção ao longo de todas as medições.

#### 4.2.1

##### **Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/Km nas fibras ópticas do cabo em operação**

As medições foram realizadas no Cabo B imediatamente após a instalação em 1998 e em 2021, após 23 anos de operação. A Figura 4.14 mostra a distribuição das variações dos coeficientes de atenuação ( $\Delta\alpha$ ) para o conjunto de fibras medidas entre o estado implantado em 1998 e 2021. A distribuição foi muito semelhante à observada para os trechos blindados simples do Cabo A com uma depreciação média de 0,004 dB/km durante o período de 23 anos.

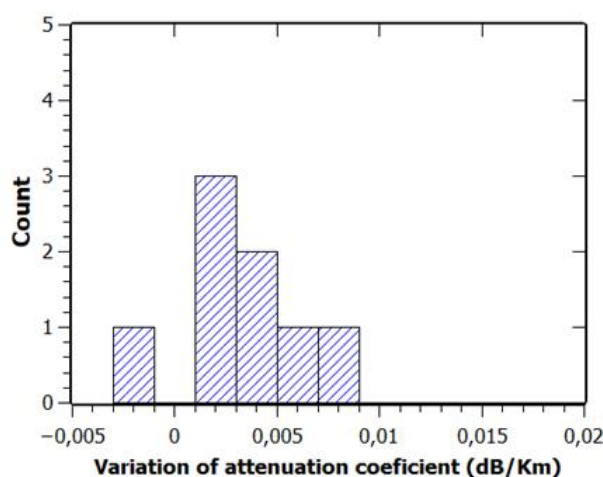


Figura 4.14. Histograma de  $\Delta\alpha$  para todas as fibras em duas sessões do cabo B entre 1998 e 2021.

As medições no cabo B, juntamente com as medições intermediárias no cabo A realizadas de 2012 a 2022 e mostradas no item 4.1, permitiram construir um quadro mais completo da tendência de envelhecimento. A Figura 4.15 mostra a variação dos coeficientes de atenuação da fibra em todos os cabos simples blindados no intervalo de tempo completo de 23 anos. Os dados do trecho DA do Cabo A (S4) foram excluídos, pois correspondem a um cabo diferente submetido a condições operacionais muito distintas. Assumindo que a dispersão cromática e o perfil do índice não são os principais parâmetros envolvidos nos efeitos do envelhecimento

da fibra, uma curva de tendência logarítmica para descrever os efeitos do envelhecimento em um período de 23 anos pode ser traçada, considerando a evolução das fibras G-655 de Cabo A até 10 anos de idade e adicionando o ponto aos 23 anos correspondente às fibras G-652 do Cabo B. A curva de tendência apenas das medições de 12 anos do cabo A fornece uma imagem mais otimista, mas a adição dos dados do cabo B melhorou o coeficiente de determinação e forneceu uma cobertura de tempo mais realista. A Figura 4.15 ilustra esse comportamento.

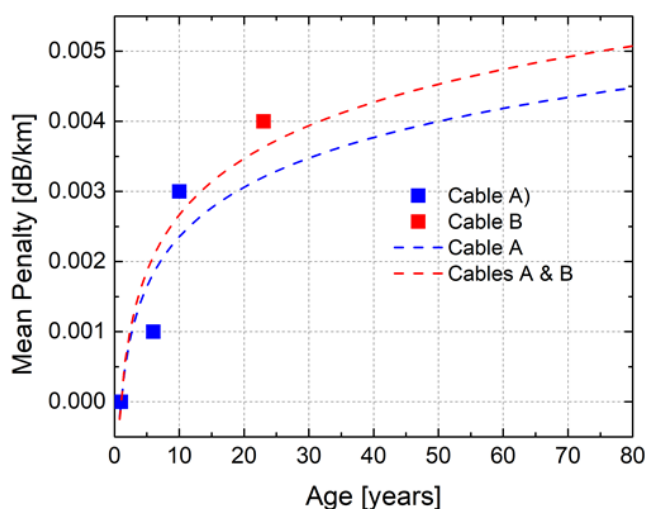


Figura 4.15. Curva de tendência para penalidade de potência média devido a degradação da atenuação de uma fibra ao longo de 23 anos em operação.

É claro que os dados médios observados ainda são compatíveis com as expectativas do ITU-T com um coeficiente de determinação  $R^2 > 0,80$  seja para as fibras G-655 ou independentemente do perfil da fibra e eventualmente atingirão o valor limite do ITU-T 0,005 dB em um tempo muito maior do que os 25 anos esperados.

#### 4.2.2

##### **Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo sobressalente**

Assim como no estudo do cabo A, realizou-se a comparação da degradação do coeficiente de atenuação das fibras no cabo sobressalente no depósito com o cabo que foi instalado em 1998 e está em operação.

A Figura 4.16 mostra a comparação da variação dos coeficientes de atenuação das fibras do Cabo B e do cabo sobressalente. As medições do cabo sobressalente simples armado único foram realizadas em armazém em 2003 e 2021, num período de 18 anos, enquanto as medições no cabo implantado foram realizadas em 1998 e 2021, num período de 23 anos.

As medições foram realizadas nos trechos S4 e S5, cabos simples armados, e os valores apresentados são a média de cada fibra. Novamente, o cabo sobressalente mostrou um impacto de envelhecimento muito maior do que o cabo implantado, com uma degradação média maior e uma distribuição muito mais ampla. Observe que, embora o intervalo de tempo para a avaliação do cabo sobressalente (18 anos) tenha sido menor do que o intervalo para o cabo implantado (23 anos), os efeitos do envelhecimento foram mais severos para o cabo sobressalente.

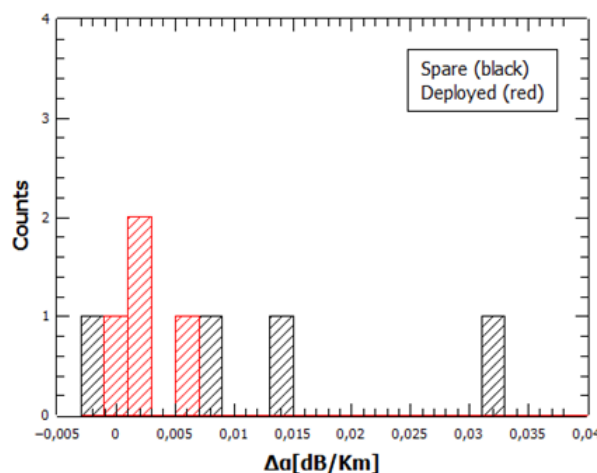


Figura 4.16.  $\Delta\alpha$  nos trechos S4&S5 no Cabo B em operação no leito do oceano e no cabo sobressalente.

Essas medições indicam claramente que as condições de armazenamento do cabo sobressalente são de suma importância para sua confiabilidade e vida útil. De fato, uma distribuição muito mais ampla afetou o cabo sobressalente para os cabos A e B, com um aumento de até dez vezes na degradação quando comparado aos cabos implantados. Embora o cabo sobressalente tenha sido armazenado em um contêiner sem temperatura controlada, o ambiente submarino do cabo implantado é muito mais estável.

Também está claro que, embora o intervalo de tempo para a comparação entre os cabos A e B implantados e sobressalentes seja muito diferente, a



degradação média no Cabo A sobressalente, aproximadamente 6 vezes maior que o cabo implantado, em um intervalo de tempo menor foi maior do que a média do Cabo B sobressalente que correspondeu a aproximadamente 4 vezes maior que o cabo implantado.

De fato, o cabo sobressalente A foi manipulado pelo menos sete vezes para reparos de cabos de campo, enquanto o cabo sobressalente B foi mantido no depósito sem nenhuma manipulação.

Portanto, a movimentação e o transporte do cabo A para um navio de reparo de cabos submarinos, a utilização de trechos do cabo sobressalentes para a realização da substituição dos trechos de cabo avariado no fundo do mar, a realização das emendas nas duas pontas rompidas do cabo, e posterior retorno da parte do cabo sobressalente não utilizada no reparo para o armazém teve fortes efeitos na degradação da fibra.

#### **4.2.3**

##### **Análise da variação das perdas nas emendas nas caixas de emenda submarinas (CEs)**

Da mesma forma que no cabo A, as variações das perdas nas caixas de emenda foram medidas nos mesmos traços OTDR usados para coeficientes de atenuação, portanto nos mesmos anos, 1998 e 2021.

Conforme comentado no item 4.1.3, a variação nas perdas de emenda para todas as caixas de emenda no cabo A, em 10 anos foi de 0,054 dB.

A Figura 4.17 apresenta a variação nas perdas de emenda do cabo B, mostrando que a média de degradação por emenda em 10 anos foi de 0,051 dB, quase a mesma que foi obtida no cabo A no mesmo período e bem menor que os 0,26 dB anteriormente reportados [14].

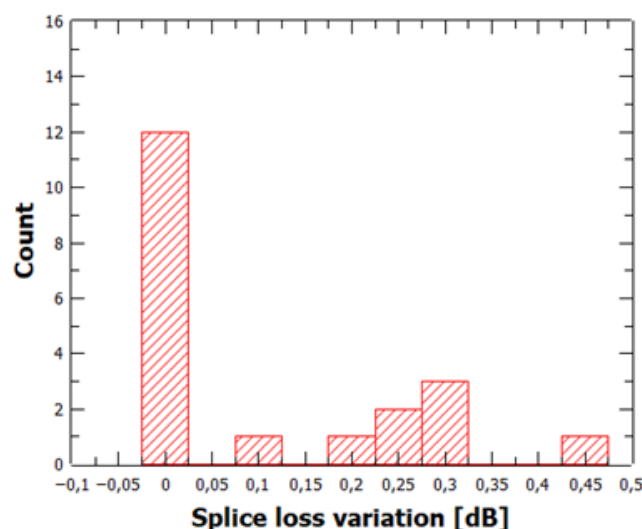


Figura 4.17. Histograma da variação das perdas nas caixas de emenda para o cabo B.

Também é interessante considerar a correlação entre a degradação da perda e a profundidade da caixa de emenda em ambos os cabos. É claro que se observa um aumento da degradação à medida que as caixas são instaladas em águas mais profundas. O conjunto de caixas de junção foi dividido em grupos dentro do alcance de 50 m e a estatística de penalidades de potência foi calculada considerando esses grupos. O resultado é uma clara correlação positiva entre penalidades e profundidade conforme mostrado na Figura 4.18, onde a penalidade por década de envelhecimento aumenta de 0,05 dB/década em águas rasas para 0,15 dB/década próximo a 1.000 m. A penalidade de degradação de profundidade em caixas de emendas submarinas é, portanto, aproximadamente 0,10 dB/década por 1.000 m.

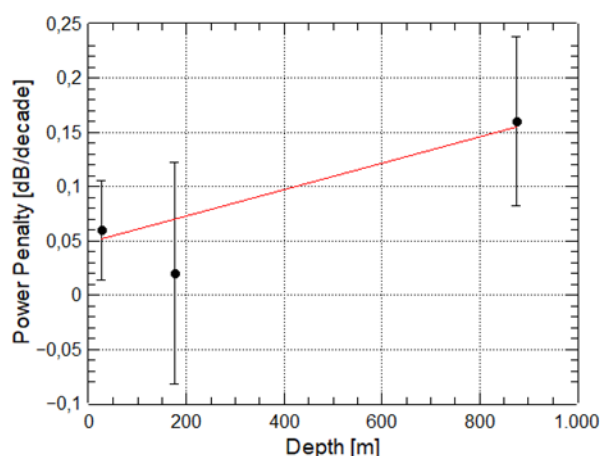


Figura 4.18. Penalidade de Potência em dB por década para o conjunto de dados obtidos para o cabo A e B com a profundidade. As barras de erro são o desvio padrão da degradação a cada intervalo de 50m de profundidade.

Considerando que várias emendas são instaladas em um enlace submarino, o impacto geral das emendas pode comprometer fortemente as margens de potência do enlace ao longo dos anos.

Conforme comentado no item 4.1.3, para o cabo A, a penalidade de potência dos 10 anos de envelhecimento das quatro caixas de junção no link parcial de 22,7 km foi de 0,22 dB, enquanto a penalidade da atenuação da fibra no cabo de 27,6 km foi de 0,11 dB, revelando que o impacto do envelhecimento das emendas é 2,4 vezes maior do que a atenuação da fibra.

Em relação ao cabo B, a penalidade de potência dos 23 anos de envelhecimento das três caixas de emenda no link parcial de 36,1 km foi de 0,37 dB, enquanto a penalidade de potência devido a atenuação da fibra no cabo de 36,1 km foi de 0,14 dB, novamente revelando um impacto do envelhecimento da emenda com perdas 2,7 vezes maiores do que na atenuação da fibra.

Observe que, em ambos os casos, as perdas na emenda mostraram penalidade de envelhecimento médio semelhante por emenda: 0,054 dB/década no cabo A e 0,051 dB/década no cabo B. Isso significa que materiais de melhor qualidade para caixas de emenda submarinas, melhores práticas e experiência da equipe técnica de manutenção durante a execução das emendas, a escolha da melhor rota para lançamento do cabo, e melhor qualidade no lançamento e acomodação das caixas de junção no fundo do mar são características necessárias para mitigar as perdas por envelhecimento e garantir um melhor desempenho dos sistemas ópticos submarinos e uma maior longevidade ao longo da sua vida útil.

### **4.3**

#### **Cabo Submarino C**

O terceiro estudo foi realizado nas fibras do cabo submarino denominado “Cabo C” que foi instalado na região da Bacia de Campos também em 1998, estando em operação em perfeitas condições até os dias atuais, estando para completar 25 anos de funcionamento ininterrupto. O estudo seguiu o mesmo método utilizado no estudo dos cabos anteriores, cujos resultados foram apresentados nos itens 4.1 e 4.2.

Neste estudo também buscou-se avaliar o comportamento da degradação sofrida em fibras ópticas monomodo, nesse caso com perfil de índice padrão ITU-T Rec. G.653, em termos do coeficiente de atenuação em dB/km, em um trecho muito maior que os anterior, com cerca de 155 km que conecta a estação de telecomunicações terrena (CLS - Cable Land Station) em Macaé a uma Plataforma de Petróleo na Bacia de Campos em profundidades variando de 10m a 90m com cabos ópticos submarinos duplo e simples armados (DA/SA), também de fabricação da TYCO, com diâmetro externo de 28 e 23mm, respectivamente, e cujas características são mostradas nas Figuras 4.19 e 4.20.

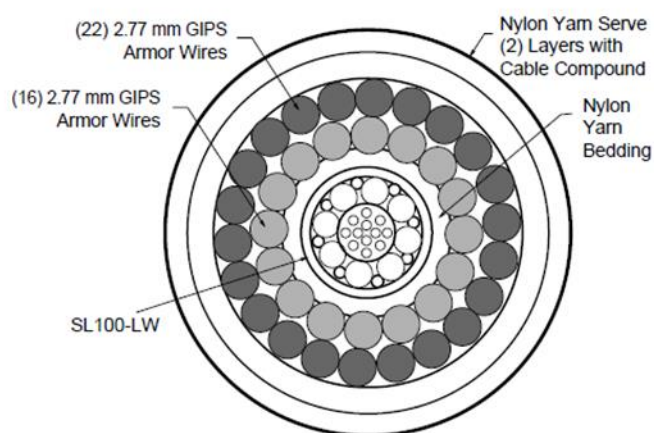


Figura 4.19. Cabo Duplo Armado TYCO DA SI 12.

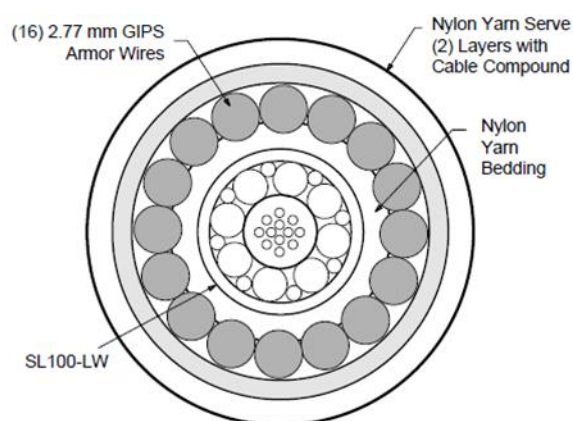


Figura 4.20. Cabo Simples Armado TYCO SA SI 12.

A Tabela 4.4 mostra as características da fibra utilizada no cabo “C”.

Tabela 4.4. Valores típicos dos parâmetros da fibra ITU-T Rec. G.653 fornecida pela TYCO em 1998.

Fiber Parameters	Typical Value
attenuation @1558 nm	0.20 dB/km
zero dispersion wavelength	1561 nm
dispersion slope	0.075 ps/nm <sup>2</sup> -km
chromatic dispersion @ 1558 nm	-0.23 ps/nm-km
calculated dispersion @ 1300 nm	-19 ps/nm-km
calculated dispersion @ 1550 nm	-0.83 ps/nm-km
fiber cut-off wavelength @ 1550 nm	<1450 nm
cabled cut-off wavelength	<1270 nm
mode field diameter	8.3 $\mu\text{m}$
effective area	50 $\mu\text{m}^2$
core/cladding concentricity error	<1.0 $\mu\text{m}$
cladding noncircularity	<2.0 %
fiber-glass outer diameter	125 $\mu\text{m}$
fiber coating outer diameter	245 $\mu\text{m}$
fiber proof strain (1-second duration)	2 %
fiber bending loss (100 turns @ 37.5 mm radius)	<0.5 dB

Como já comentado para esse estudo foram seguidas as mesmas premissas e os mesmos métodos adotados nos estudos anteriores, ou seja, medidas realizadas com o OTDR em ambos os sentidos sendo utilizados os resultados apenas em um sentido para melhorar a relação sinal/ruído, a mesma direção ao longo de todas as medições, perdas nas emendas em um único sentido, etc.

Os resultados serão discutidos nos próximos itens.

#### 4.3.1

##### **Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo em operação**

As medições foram realizadas no Cabo “C” após a instalação em 1998 nos anos de 2000, 2002, 2003, 2005, 2011, 2012, 2013 e 2020, nos trechos desde a Plataforma até cerca de 92km de distância em direção ao continente, na CE4, ou seja, em trechos com profundidade variando de 90m a 50m e totalizando 91,7km de cabos submarinos. Nestes trechos os cabos utilizados são simples armados. A Figura 4.21 mostra a distribuição das variações dos coeficientes de atenuação ( $\Delta\alpha$ ) para o conjunto de fibras medidas entre os anos de 2000 e 2020. A média de todas as medidas da degradação observada para os trechos simples armados do Cabo C

ficou em 0,005 dB/km durante o período de 20 anos, contra uma degradação média de 0,003dB/km para o cabo “A” em 10 anos, considerando somente os trechos simples armados, e de 0,004dB/km para o cabo B, em 23 anos. Novamente a degradação observada para 20 anos ficou consideravelmente próxima do limite ITU-T de 0,005 em 25 anos.

Esse resultado mostra que nos 91,7km medidos houve uma penalidade da atenuação devido ao envelhecimento da fibra no cabo de 0,45dB.

Para um trecho de 10km a degradação seria de 0,05dB/10km no cabo C, 0,03dB/10km no cabo A, para os trechos simples armado, e 0,04dB/10km no cabo B. Esses resultados mostram a proximidade dos valores e, portanto, das penalidades da atenuação devido ao envelhecimento da fibra para os três cabos.

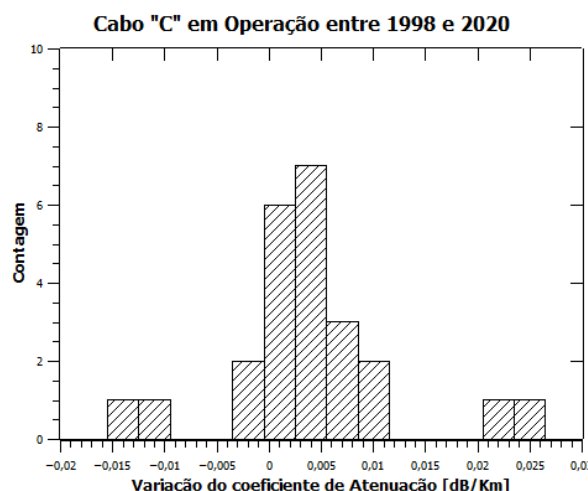


Figura 4.21. Variação do coeficiente de atenuação [dB/km] para o cabo “C” entre 2000 e 2020.

Para esse cabo os valores extremos à direita e a à esquerda não se concentraram em nenhum trecho específico, como no caso do cabo “A” mas estiveram distribuídos em todos os trechos. Cabe destacar que esse cabo sofreu muitas intervenções para reparos ao longo dos 25 anos em operação no seu trecho raso e por isso essas medidas não foram consideradas.

Importante destacar que a maior parte dos valores observados para a degradação do coeficiente de atenuação em dB/km ficaram concentrados entre - 0,005dB/km e 0,010dB/km, da mesma forma de como foi observado no cabo “A”.

A próxima análise utilizou novamente os dados das medidas com o OTDR realizados entre 2000 e 2020 para todos os trechos anteriores, para levantar uma

curva de tendência que mostrasse o efeito do envelhecimento das fibras ópticas na degradação do coeficiente de atenuação em dB/km durante os períodos medidos entre 2000 e 2020.

Para isso calculou-se a média das degradações sofridas nas seis fibras para todos os trechos entre 2000 e os anos posteriores em que foram realizadas medições, 2002, 2003, 2005, 2011, 2012, 2013 e 2020, mostrando o efeito do envelhecimento através do comportamento da degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação em dB/km, e dessa forma obter a tendência de como irá se comportar essa degradação ao longo do tempo, para permitir estimar com maior certeza um período que caracterizasse a vida útil dessas fibras.

A Figura 4.22 mostra a curva de tendência com pontos intermediários medidos das variações nos coeficientes de atenuação ( $\Delta\alpha$ ), para o conjunto de fibras medidas entre o ano 2000 e 2020. Usando uma tendência logarítmica para descrever os efeitos do envelhecimento, conforme mostrado na Figura 4.8, os dados médios observados ainda são compatíveis com as expectativas do ITU-T e a curva mostra uma boa aproximação pois novamente o coeficiente de determinação  $R^2$  ficou acima de 0,70.

A curva de tendência logarítmica traçada considerando todas as medidas realizadas em trechos com cabos simples armados para descrever os efeitos do envelhecimento com os dados médios, mostra que a degradação do coeficiente de atenuação atingiu o valor limite dado pelo ITU-T com 12 e 13 anos, oscilando para baixo na última medição realizada com 20 anos. Esse comportamento mostra que o crescimento da degradação de  $\Delta\alpha$  em dB/km diminuiu nos últimos anos e com isso observa-se uma tendência a uma diminuição no crescimento da curva desse período em diante, indicando que só deverá atingir um valor superior a 0,006dB/km após 50 anos de operação, mostrando que a vida útil desse cabo também deverá ser muito superior aos 25 anos esperado, conforme observado nos cabos “A” e “B”.

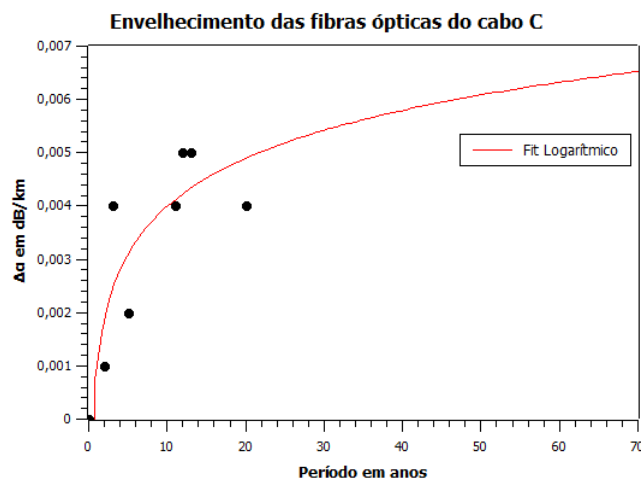


Figura 4.22. Curva de tendência para penalidade de potência média devido a degradação da atenuação das fibras ópticas ao longo de 20 anos em operação.

Seguindo a mesma análise realizada no item 4.2.1, quando foram adicionados os resultados dos cabos A e B para avaliar o envelhecimento da fibra de forma independente do seu perfil de índice, foi elaborado um quadro mais completo da tendência de envelhecimento para todos os cabos. A Fig. 4.23 mostra a variação dos coeficientes de atenuação da fibra em todos os cabos simples blindados no intervalo de tempo completo de 23 anos.

Da mesma forma que na análise anterior, os dados do trecho DA do Cabo A (S4) foram excluídos, pois correspondem a um cabo diferente submetido a condições operacionais muito distintas e assumiu-se novamente que a dispersão cromática e o perfil do índice não são os principais parâmetros envolvidos nos efeitos do envelhecimento da fibra.

A curva de tendência logarítmica construída para descrever os efeitos do envelhecimento em um período de 23 anos foi traçada, considerando a evolução das fibras G-655 de Cabo A até 10 anos de idade, adicionando o ponto aos 23 anos correspondente às fibras G-652 do Cabo B e adicionando os dados do cabo C, obtidos com as medidas realizadas entre 2000 e 2021, ou seja, em 20 anos.

A Figura 4.23 ilustra o resultado consolidado para os três cabos.



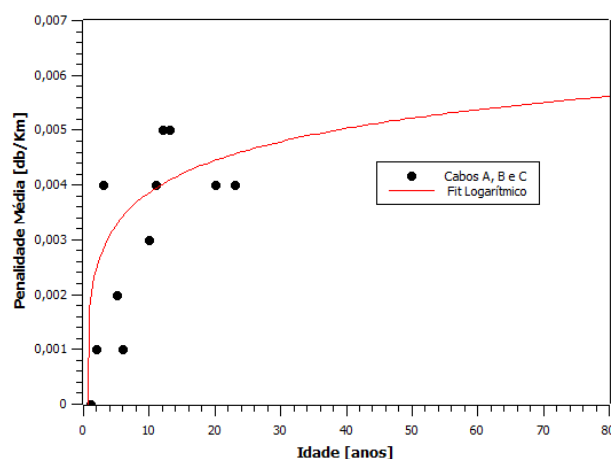


Figura 4.23. Curva de tendência para penalidade de potência média devido a degradação da atenuação de uma fibra ao longo de 23 anos em operação.

A curva de tendência com as medições de todos os cabos, independente do perfil de índice, fornece uma imagem mais otimista do que a mostrada somente com o cabo C, indicando que a degradação ficaria um pouco acima de 0,005dB/km e abaixo de 0,006dB/km em 80 anos, mas a adição de todos os dados dos cabos A e B piora ligeiramente o coeficiente de determinação obtido anteriormente para a curva com apenas os dados do cabo C, ficando em cerca de 0,6, que ainda dá uma boa aproximação.

#### 4.3.2

##### **Análise da Degradação do $\alpha$ em dB/km nas fibras ópticas do cabo sobressalente**

Assim como no estudo dos cabos “A” e “B”, realizou-se a comparação da degradação do coeficiente de atenuação das fibras no cabo sobressalente no depósito com o cabo “C” que foi instalado em 1998 e está em operação até os dias atuais.

A Figura 4.24 mostra a comparação da variação dos coeficientes de atenuação das fibras do cabo sobressalente mais adequado ao Cabo “C”. As medições do cabo sobressalente simples armado único foram realizadas em armazém em 2003 e 2021, num período de 18 anos.

Novamente, o cabo sobressalente mostrou um impacto de envelhecimento muito elevado, com uma distribuição muito ampla entre os valores individuais das

12 fibras medidas e os efeitos do envelhecimento foram mais severos para o cabo sobressalente, confirmando essa tendência já observada nos cabos anteriores.

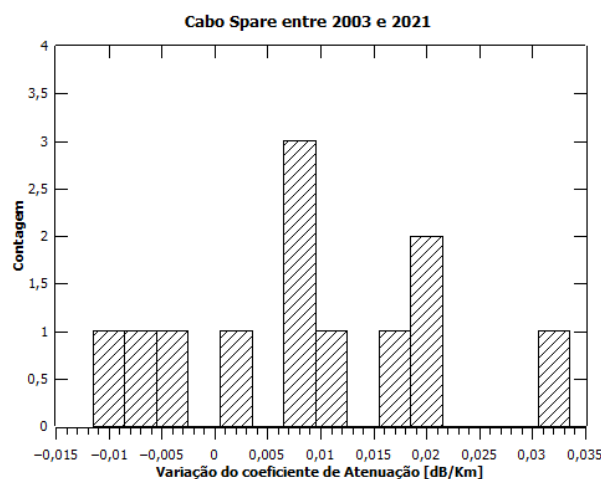


Figura 4.24. Degradação de  $\alpha$ [dB/km] do cabo sobressalente do cabo "C" devido ao envelhecimento.

A Figura 4.25 mostra a comparação da variação dos coeficientes de atenuação das fibras do Cabo "C", barras em vermelho, e do cabo sobressalente, barras em preto, somente para as 6 fibras disponíveis para medições no cabo em operação, ou seja, fibras de 1 a 6. Para o cabo sobressalente o período avaliado foi de 18 anos, 2003 a 2021, e para o cabo "C" em operação de 20 anos, 2000 a 2022.

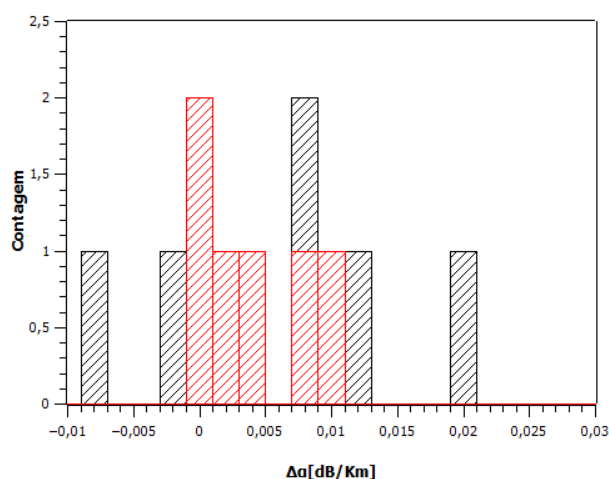


Figura 4.25.  $\Delta\alpha$ [dB/km] nos trechos do Cabo C em operação no leito do oceano e no cabo sobressalente.

As medições no cabo em operação foram realizadas nos trechos entre a Plataforma e CE4, cabos simples armados, e os valores apresentados são a média de cada fibra. Novamente, o cabo sobressalente mostrou um impacto de

envelhecimento muito maior do que o cabo implantado, neste caso de até duas vezes mais, com uma distribuição apresentando uma variação muito mais ampla. Observa-se que, embora o intervalo de tempo para a avaliação do cabo sobressalente (18 anos) tenha sido menor do que o intervalo para o cabo implantado (20 anos), os efeitos do envelhecimento foram mais severos para o cabo sobressalente.

Esses resultados reforçam o observado nos cabos anteriores sobre a importância das condições de armazenagem dos cabos sobressalentes atenderem aos requisitos dados pelos fabricantes para a garantia de qualidade desses cabos e vida útil ao longo do tempo.

#### **4.3.3**

##### **Análise da variação das perdas nas emendas nas caixas de emenda submarinas (CEs)**

Da mesma forma que nos cabos A e B, as variações das perdas nas caixas de emenda para o cabo C foram medidas nos mesmos traços OTDR usados para coeficientes de atenuação, portanto nos mesmos anos, 2000 e 2020.

Conforme comentado no item 4.1.3, a variação nas perdas de emenda para todas as caixas de emenda no cabo A, em 10 anos foi de 0,054 dB e no item 4.2.3 de 0,051dB para as perdas medidas nas caixas de emenda do cabo B, por igual período.

A Figura 4.26 mostra a variação nas perdas de emenda do cabo C, medida em sete (7) caixas de emendas por cerca de 130 km, no período de 1998 a 2020.

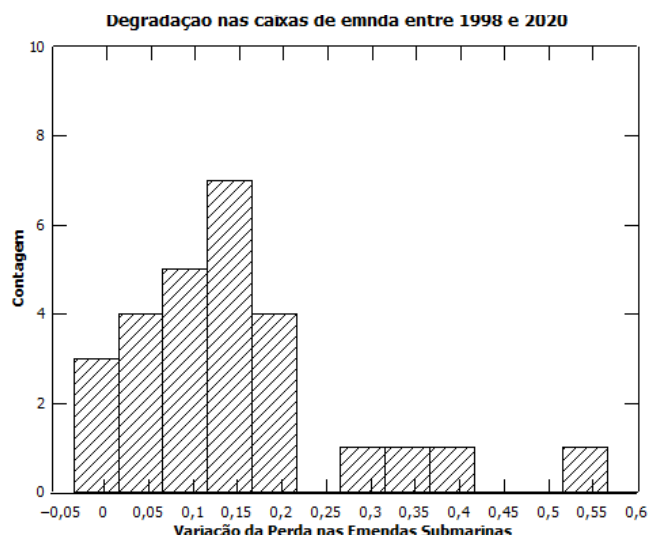


Figura 4.26. Histograma da variação das perdas nas caixas de emenda para o cabo C.

Com esses dados foi calculada a média de degradação por emenda em 10 anos cujo valor ficou em 0,049 dB, quase a mesma degradação que foi obtida no cabo A e no cabo B no mesmo período, confirmando que os valores são bem menores do que os 0,26 dB dados anteriormente e reportados por [14].

Da mesma forma que no item 4.2.3, foi avaliada a correlação entre a degradação da perda e a profundidade da caixa de emenda em todos os 3 cabos. Os resultados reforçam a tese de que há um aumento da degradação à medida que as caixas são instaladas em águas mais profundas.

O conjunto de caixas de junção foi dividido em grupos dentro do alcance de 50 m e para eliminar a ausência de dados de medida entre 200m e 885m, para dar maior coerência na análise, foi inserida a perda medida em uma caixa de emenda a cerca de 387m de profundidade de um outro enlace submarino na mesma região. Todas as perdas foram referenciadas a um período de 10 anos para uniformidade da análise.

A Figura 4.27 mostra o resultado das medidas consolidado para todos os cabos A, B e C e o trecho submarino adicional em 387m de profundidade. As barras de erro são o desvio padrão da degradação a cada intervalo de 50m de profundidade.

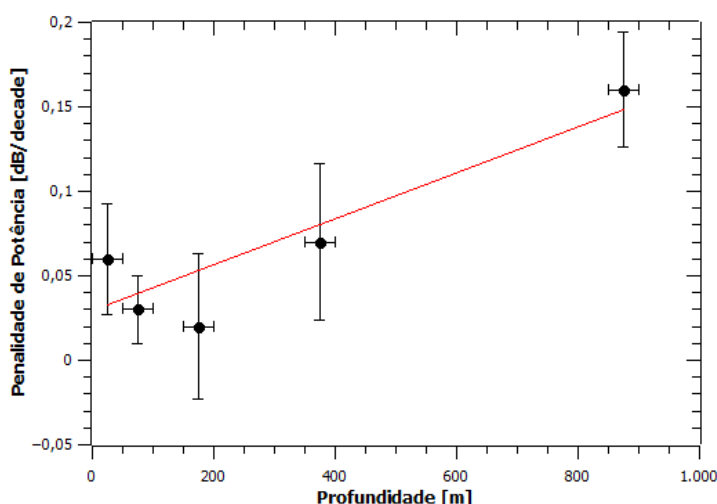


Figura 4.27. Penalidade de Potência em dB por década para o conjunto de dados obtidos.

A estatística de penalidades de potência foi calculada considerando esses grupos. O resultado é uma clara correlação positiva entre penalidades e profundidade conforme mostrado na Figura 4.27, onde a penalidade por década de envelhecimento aumenta de 0,04 dB/década em águas rasas, até 200m de profundidade, para 0,07 dB/década próximo a 400m e para aproximadamente 0,16dB/década no entorno de 1000m. A penalidade de degradação de profundidade em caixas de emendas submarinas é, portanto, aproximadamente 0,10 dB/década por 1.000 m, conforme previsto no item 4.2.3.

Conforme comentado nos itens 4.1.3 e 4.2.3, várias emendas são instaladas em um enlace submarino, e o impacto geral das emendas pode impactar fortemente as margens de potência do enlace ao longo dos anos.

Para o cabo A, a penalidade de energia dos 10 anos de envelhecimento das quatro caixas de junção no link parcial de 22,7 km foi de 0,22 dB, enquanto a penalidade da atenuação da fibra no cabo de 27,6 km foi de 0,11 dB, revelando que o impacto do envelhecimento das emendas para mesma distância é 2,4 vezes maior do que a atenuação da fibra.

No cabo B, a penalidade de energia dos 23 anos de envelhecimento das três caixas de emenda no link parcial de 36,1 km foi de 0,37 dB, enquanto a penalidade da atenuação da fibra no cabo de 36,1 km foi de 0,14 dB, novamente revelando um impacto do envelhecimento da emenda através de perdas 2,7 vezes maiores do que na atenuação da fibra.

Para o cabo C, a penalidade de energia dos 22 anos de envelhecimento das sete caixas de emenda no link parcial de 91,7km foi de 0,76dB, enquanto a penalidade da atenuação da fibra no cabo de 91,7km foi de 0,45dB, para 20 anos.

Novamente observou-se um impacto do envelhecimento da emenda com perdas maiores do que na atenuação da fibra, apesar de no cabo C o impacto ter sido menor com perdas em 1,7 vezes maiores.

Observa-se que, em todos os cabos, as perdas na emenda mostraram penalidade de envelhecimento média semelhante por emenda: 0,054 dB/década no cabo A e 0,051 dB/década no cabo B e 0,049dB/década no cabo C.

Isso reforça os comentários do item 4.2.3, sobre a importância da qualidade dos materiais das caixas de emenda submarinas, da manutenção durante a execução das emendas, da rota para lançamento do cabo, e do lançamento e acomodação das caixas de junção no fundo do mar que são primordiais para mitigar as perdas por envelhecimento e garantir um melhor desempenho dos sistemas ópticos submarinos e uma maior longevidade ao longo da sua vida útil

#### **4.3.4**

#### **Análise da sensibilidade dos cabos A e C a microcurvatura e macrocurvatura**

Os cabos A e C possuem perfis de índices similares e foram implantados em épocas diferentes.

O cabo C foi o primeiro cabo a ser implantado em 1998 quando as fibras do tipo Dispersão Deslocada (DS) eram consideradas uma boa escolha para obter o mínimo de atenuação e dispersão no comprimento de onda de 1550nm.

Entretanto, com o advento da tecnologia DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) no final dos anos 1990 e início dos anos 2000, essas fibras foram perdendo a atratividade porque favoreciam o aparecimento de efeitos não lineares, principalmente FWM (Four Wave Mixing), que é um fenômeno que ocorre quando várias portadoras dentro da fibra óptica se combinam (intermodulação) formando novas portadoras que, dependendo da combinação, poderão interferir (diafonia intercanal) com portadoras existentes (mesmo comprimento de onda) além de levar a uma diminuição da potência das portadoras originais [16].

FWM gera uma nova portadora na frequência  $W_{ijk} = W_i + W_j - W_k$  (exemplo para o caso de três ondas se propagando nas frequências  $W_i$ ,  $W_j$  e  $W_k$ ) e é considerado o principal fator limitante de sistemas WDM/DWDM.

FWM é extremamente prejudicial sempre que o espaçamento entre os canais e a dispersão da fibra são pequenos o bastante para satisfazer as condições adequadas. Nos sistemas WDM não coerentes, FWM torna-se muito preocupante quando os comprimentos de onda dos canais WDM estão próximos do comprimento de onda de dispersão zero da fibra. Este é o caso dos sistemas que operam na janela do  $\lambda = 1550\text{nm}$  que utilizam fibras com dispersão deslocada (fibras DS).

Pelos motivos expostos acima as fibras DS deixaram ser utilizadas e como uma boa opção para substituir essas fibras por outras com características similares foram introduzidas as fibras Rec. ITU-T G.655 NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber), que possuem uma dispersão baixa, mas não nula no entorno do  $\lambda = 1550\text{nm}$ , dessa forma não apresentam as mesmas penalidades para FWM observadas nas fibras Rec. ITU-T G.653 DS (Dispersion Shifted).

Assim quando foi projetada a ampliação da Malha Óptica em 2010, que foi implantada em 2012, foram escolhidas as fibras NZDSF para conexão do novo trecho ao trecho implantado em 1998 com fibras DS.

Conforme discutido no item 2.1.3, macro e microcurvatura, algumas fibras são mais sensíveis aos efeitos da macro e da microcurvatura do que outras.

Um bom parâmetro para caracterizar se uma fibra é mais sensível a micro e macrocurvatura do que outras é o seu número MAC.

Quanto maior o diâmetro do campo modal da fibra e quanto menor o comprimento de onda de corte da fibra maior será o seu número MAC, e ela será mais sensível a macro e a microcurvatura.

Conforme mostrado no item 4.1 a fibra do cabo A é uma fibra NZDSF com um diâmetro de campo modal (MFD) em 1550nm de  $8,5\mu\text{m}$  e um comprimento de onda de corte ( $\lambda_c$ )  $< 1400\text{nm}$  e, portanto, tem um número MAC = 6,07

A fibra do cabo C, apresentada no item 4.3, é uma fibra DS com um diâmetro de campo modal (MFD) em 1550nm de  $8,3\mu\text{m}$  e um comprimento de onda de corte ( $\lambda_c$ )  $< 1400\text{nm}$  e, portanto, tem um número MAC = 6,53.

O número MAC da fibra do cabo C é maior que da fibra do cabo A, logo o cabo C deverá ser mais sensível e sofre mais atenuação por micro e macrocurvatura que o cabo A.

Com os dados obtidos ao longo das medidas realizadas entre 2000 e 2020, foi possível comprovar essa afirmativa que mostrou para o cabo A uma degradação do coeficiente de atenuação ( $\Delta\alpha$ ) de 0,003dB/Km em 10 anos e para o cabo C de 0,004dB/km no mesmo período.

Como pode ser observado, é possível que a microcurvatura introduzida nestes cabos tenha tido um papel importante na degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação ao longo tempo, principalmente nos primeiros anos imediatamente após a sua instalação, dado que o comportamento logarítmico e o número MAC são consistentes com a microcurvatura.

Nos primeiros anos após a instalação o cabo está em acomodação no leito marinho e a perda por microcurvatura estaria associada ao envelhecimento nesse período, além disso o efeito da microcurvatura também é consistente com o que foi observado nos cabos sobressalentes que foram muito mais movimentados ao longo do tempo que os cabos submarinos em operação no fundo do mar, e portanto foram mais atingidos pela degradação do coeficiente de atenuação ao longo tempo.

Essa hipótese precisa de mais dados e estudos para ser confirmada, mas o comportamento observado até o momento já é um indicativo de que a microcurvatura que ocorre normalmente durante a instalação dos cabos pode ter sido responsável pelo aumento logarítmico observado logo após a implantação de todos os cabos, que tende a uma estabilização após os primeiros anos de operação no fundo do mar, quando não ocorrem mais movimentações nos cabos que ficam em repouso, de forma estática no fundo mar, não ocorrendo portanto mais ações que possam ocasionar novas ou intensificar as microcurvaturas nos cabos.

Não foi possível comprovar esse efeito na fibra do cabo B, Rec. ITU-T G.652D, cujo o valor do número MAC é o maior de todos os cabos,  $MAC = 8,45$ , porque só existe disponível uma medida no lançamento do cabo em 1998 e outra em 2021, ficando uma quantidade muito pequena de dados para permitir uma comparação de períodos idênticos entre as amostras dos cabos o que garantiria uma avaliação mais assertiva sobre como foi a degradação no cabo B.



## Conclusões e Considerações Finais

Neste trabalho, os efeitos do envelhecimento na atenuação da fibra e nas perdas nas emendas foram avaliados em três cabos instalados ao longo de 12, 20 e 23 anos.

O cabo mais novo A, testado na fábrica em 2010 e instalado em 2012, tem uma de suas pontas com chegada na praia e a outra ponta no mar, é composto por dois tipos de armadura; duplo armado (DA), com duas camadas de arames para proteção contra agressões externas, utilizado em águas rasas, e simples armado (SA) com uma camada de arame para proteção, para águas profundas.

O cabo B, instalado em 1998 e com 23 anos de operação em 2021, utiliza apenas uma camada de armadura, pois está instalado em águas profundas, conectando duas Plataformas de Petróleo em alto mar, numa região com pouco risco de ações de terceiros, como barcos de pesca, ou fundeio de navios, que poderiam danificar o cabo.

E o cabo C, também instalado em 1998, e com 22 anos de operação em 2020, com uma ponta com chegada na praia e a outra na Plataforma de Petróleo em alto mar, foi analisado apenas nos trechos mais profundos, que só possui cabos simples armados, pelas razões semelhantes ao exposto para o cabo B.

Analizando o comportamento do trecho raso do cabo A, foi possível verificar que as seções de cabos DA, utilizadas em águas rasas próximas da costa degradaram muito mais, possuindo uma degradação média 3,7 vezes maior do que a média das medidas das seções de cabos SA, utilizadas em águas profundas. Esta dissimilaridade no comportamento dos dois tipos de armaduras deve-se provavelmente mais à intervenção ambiental e humana do que à qualidade do próprio cabo. Ainda que cabos DA sejam projetados para terem maior proteção contra abrasão em locais com solo rochoso e ação pesqueira, sendo, portanto, indicados para aplicação em águas rasas, esses cabos estão sujeitos a mais agressões devido à proximidade da costa, movimento das ondas, ação de pescadores e, nesse trecho específico, a travessia de dutos submarinos existentes no local.

Portanto, a fim de melhorar a análise estatística dos dados para o coeficiente de atenuação em dB/km e para a perda nas emendas, apenas trechos de cabos SA individuais foram considerados para a avaliação de tendência, em todos os três cabos analisados.

A penalidade de envelhecimento média verificada nos três cabos proveniente de perdas em emendas submarinas foi 2,3 vezes maior do que a penalidade de envelhecimento do coeficiente de atenuação da fibra. Também foi observada uma correlação positiva entre os efeitos do envelhecimento e a profundidade da caixa de emendas UQJ (Universal Quick Joint) implantada nos três cabos, que são do mesmo tipo, estando homologadas pelo UJ Consortium para operação em profundidades de até 6.000m.

Esse crescimento maior das perdas nas emendas está provavelmente associada a absorção de  $H_2$  que tende a crescer com a profundidade de instalação das caixas de emenda no leito marinho, conforme observado, devido a penetração de água do mar no interior das caixas e/ou pela corrosão dos materiais metálicos em contato com a água do mar.

A análise dos dados consolidados dessas perdas obtidas nas medidas realizadas nos três cabos, mostrou que a penalidade por década de envelhecimento aumenta de 0,04 dB/década em águas rasas, até 200m de profundidade, para 0,07 dB/década próximo a 400m e para aproximadamente 0,16dB/década no entorno de 1000m. Dessa forma, a penalidade média de degradação de profundidade em caixas de emendas submarinas tem um coeficiente de penalidade adicional de aproximadamente 0,10 dB/1000m por década entre 0m e 1000m de profundidade.

Importante destacar que as perdas médias na emenda para todos os cabos mostraram penalidade de envelhecimento semelhante por emenda: 0,054 dB/década no cabo A, 0,051 dB/década no cabo B e 0,049dB/década no cabo C, e o valor médio considerando todas as emendas do conjunto dos três cabos foi de aproximadamente 0,051 dB/década.

Portanto, a qualidade dos materiais das caixas de emenda submarinas, da manutenção durante a execução das emendas, da rota para lançamento do cabo, e do lançamento e acomodação das caixas de junção no fundo do mar são primordiais para mitigar as perdas por envelhecimento, para garantir um melhor desempenho

dos sistemas ópticos submarinos, e uma maior longevidade ao longo da sua vida útil.

A análise também mostrou que o envelhecimento da fibra óptica demonstrado na degradação do seu coeficiente de atenuação,  $\Delta\alpha$  em dB/km, segue um comportamento logarítmico e é compatível com as expectativas do ITU-T. A curva de tendência, para estimativa futura, considerando as degradações observadas em todos os cabos, indica que os dados médios observados ainda são compatíveis com as expectativas do ITU-T com um coeficiente de determinação  $R^2 > 0,60$ , independentemente do perfil da fibra. O resultado fornece uma imagem otimista indicando que eventualmente a degradação ficaria um pouco acima de 0,005dB/km e abaixo de 0,006dB/km em 80 anos.

De fato, quando se analisa a curva de tendência plotada somente para o cabo A, sem as medidas dos cabos B e C, tem-se uma boa indicação de que cabos mais novos ou recém-instalados devem durar 70 anos ou mais antes de atingir o limite ITU-T de penalidade de 0,005 dB/km.

Para o cabo C, instalado a muito mais tempo e com atualmente 25 anos de operação, e que já passou por diversas intervenções, a curva de tendência individual desse cabo mostra que esse limite foi atingido com cerca de 12 anos, mas nos anos seguintes observa-se uma estabilidade na curva, não havendo crescimento da degradação na medida realizada com 20 anos de operação.

Pela análise da curva de degradação com dados consolidados de todos os cabos, A, B e C, observa-se nitidamente uma degradação mais intensa nos primeiros 10 anos e depois uma diminuição dessa taxa de degradação, mostrando uma taxa bem mais lenta de degradação nos anos seguintes.

O levantamento e a análise do número MAC dos cabos permitiram avaliar se o efeito da microcurvatura teve um papel importante na degradação do coeficiente de atenuação dos cabos nos anos iniciais imediatamente após a instalação.

A constatação de que o número MAC da fibra do cabo C é maior que da fibra do cabo A, mostrou que o cabo C é mais sensível e sofre mais atenuação por micro e macrocurvatura que o cabo A. Portanto, é possível que a microcurvatura introduzida nestes cabos seja a principal causa do desempenho pior observado no cabo C, em relação ao cabo A, nos primeiros anos de instalação.

Além disso é importante considerar que a microcurvatura que ocorre nos cabos submarinos em operação durante e logo após a instalação exerce um papel importante na degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação ao longo do tempo, principalmente nos primeiros anos e imediatamente após a sua instalação e também na maior degradação observada nos cabos sobressalentes, que sofrem muito mais movimentações do que os cabos implantados.

Entretanto, essa hipótese precisa de mais dados e estudos para ter um maior grau de confiança, mas o resultado acima já é um indicativo de que a microcurvatura que ocorre normalmente durante a instalação dos cabos pode ter sido responsável pelo aumento logarítmico observado logo após a implantação de todos os cabos, que tende a uma estabilização após os primeiros anos de operação no fundo do mar, quando não ocorrem mais movimentações nos cabos que ficam em repouso, não ocorrendo portanto mais ações que possam ocasionar novas ou intensificar as microcurvaturas nos cabos.

Isso reforça a hipótese de que um cabo bem instalado, independente do seu perfil de índice, deve sofrer menos ações que possam provocar micro e macrocurvaturas e com isso deverá haver um menor efeito no coeficiente de atenuação, e isso também pode contribuir para uma vida útil maior dos cabos ópticos submarinos.

Os benefícios do aumento da vida útil para o proprietário dos sistemas ópticos submarinos (backbones) estão na oportunidade de maximizar os lucros, evitando perdas desnecessárias com novos investimentos desnecessários e permitindo um melhor planejamento para o futuro e maior valorização dos ativos ópticos devido à garantia do desempenho dessas fibras por muito mais tempo.

Vale ressaltar que emendas bem-feitas tendem a se deteriorar menos do que emendas malfeitas. Considerando que o tempo de vida do enlace é primordial, mesmo que as emendas sofram maiores efeitos de envelhecimento, elas sempre podem ser reparadas com uma intervenção pontual, enquanto a atenuação da fibra é um efeito distribuído que só pode ser reparado com a substituição completa do cabo.

Por fim, as medições nos cabos sobressalentes armazenados no armazém mostraram que, para todos os cabos, os efeitos do envelhecimento podem eventualmente ser até dez vezes maiores do que os efeitos do envelhecimento nos

cabos implantados, reforçando a necessidade de condições de armazenamento estáveis, sem exposição à luz solar direta, controlando a temperatura de armazenamento para evitar flutuações e realizando as movimentações desses sobressalentes com cuidado para evitar danos e curvaturas (micro e macrocurvatura).

Como contribuições operacionais desse trabalho entende-se que é de extrema importância estabelecer modelos de manutenção adequados durante a vida operacional dos cabos ópticos submarinos, com ações de manutenção preventiva nos cabos ópticos que vão além de somente monitorar o coeficiente de atenuação dos enlaces fim a fim, mas passando por um monitoramento periódico e contínuo da degradação das perdas nas emendas das fibras ópticas internas nas caixas de emendas submarinas. Assim seria possível realizar um planejamento antecipado de ações de manutenção corretiva pontuais direcionado para eliminar pontos de degradação que estejam diminuindo as margens dos enlaces e afetando a duração da vida útil operacional dos cabos ópticos, buscando estender ainda mais o tempo de utilização da fibra óptica do cabo submarino nos ambientes em que estão em operação, com o prolongamento da sua vida útil e do seu tempo em operação com os sistemas de transmissão. Cabe ressaltar que essa proposta pode ser aplicada tanto nos enlaces submarinos como nos backbones terrestres.

Como contribuições financeiras destaca-se a possibilidade de se obter uma estimativa sobre o tempo de vida útil mais provável real de fibras ópticas com características similares de construção e instalação, mostrando que pode ser muito superior aos 25 anos dado pelos fabricantes como prazo de vida útil teórico. Isso cria condições para que os proprietários dos backbones ópticos tenham uma maior confiança quanto ao tempo mais provável de utilização dessas infraestruturas nos seus modelos operacionais e de negócios, evitando perdas desnecessárias, e permitindo um melhor planejamento do futuro.

Além disso, a capacidade de determinar com maior assertividade o tempo para a vida útil operacional desses cabos, além de eventualmente estender esse tempo com a adoção de ações de manutenção adequadas, vão permitir que essas infraestruturas de alto custo sejam utilizadas na sua plenitude, evitando também custos relevantes em ações de descomissionamentos, antecipadamente e recorrentes. A modernização periódica dos sistemas permitirá uma maior qualidade

e capacidade de tráfego sobre o mesmo meio de transmissão, através da evolução da tecnologia eletrônica dos equipamentos de telecomunicações com a aplicação da modulação coerente, do processamento digital de sinais (DSP) e dos códigos corretores de erros mais eficientes (FECs). Essas ações em conjunto com a extensão da vida útil desses cabos submarinos, criam condições para atender a essa alta demanda atual por tráfego, cuja tendência é de crescimento para os próximos anos, das empresas operadoras prestadoras de serviços de telecomunicações, e das empresas de tecnologia e de exploração de mídia social (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft, Netflix, etc.), surgidas nas últimas décadas, que usam a internet como meio de prestação de serviços diversos aos usuários, e que dominam o mercado digital.

Como consequência, cria-se condições para oportunizar o replanejamento de novos investimentos em prazos mais longos, evitando custos extras desnecessários, como os descomissionamentos antes do tempo, e uma valoração maior dos ativos ópticos para os proprietários dessas redes ópticas em função da manutenção da sua qualidade e aumento de vida útil.

Finalizando, como possibilidades de continuação e intensificação desse estudo está sendo sugerido ampliar a coleta de dados em uma maior quantidade de cabos ópticos submarinos e ampliar esse escopo para os cabos terrestres. Um maior volume de dados, com uma quantidade maior de cabos ópticos sendo estudados, com a ampliação do escopo submarino para também o escopo terrestre e com a busca por cabos com maior tempo de operação, proporcionará condições de melhorar a qualidade das análises e obter resultados com mais confiança, permitindo aumentar a previsão sobre o tempo de vida útil das fibras ópticas e dos fatores que contribuem diretamente nesse processo. Além disso, no futuro avaliar a evolução das perdas nas emendas ao longo do tempo para obter curvas de tendência, como foi feito para os cabos ópticos submarinos, e dessa forma descobrir como é o seu comportamento, se a evolução é linear ou logarítmica ou de outro formato.

Como outra oportunidade de continuidade para estudo dos cabos ópticos submarinos, já que agora existe uma boa expectativa de que tenham uma vida útil muito superior aos 25 anos propagados, poderá ser avaliada a possibilidade de utilização desses cabos ópticos submarinos em outras áreas além das telecomunicações, como fibras ópticas como sensores submarinos no

monitoramento de parâmetros diversos relacionados a exploração e produção de Petróleo para Indústria de Óleo e Gás, na detecção de vibração no solo marinho, para alarmes de terremotos e tsunamis, na medição da temperatura dos oceanos, para avaliar a qualidade de vida dos oceanos e mudanças climáticas, e na detecção de sinais acústicos emitidos por cetáceos, com a tecnologia de Sensores Acústicos Distribuídos (DAS – Distributed Acoustic Sensors), contribuindo para o conhecimento da vida marinha nos oceanos.

## Bibliografia

- [1] <https://submarine-cable-map-2023.telegeography.com/>
- [2] <https://blog.telegeography.com/2023-mythbusting-part-3>
- [3] <https://www2.telegeography.com/hubfs/LP-Assets/Ebooks/state-of-the-network-2022.pdf>
- [4] Kunimasa Saitoh, “Multicore Fiber Technology,” J.Lightw Technol., vol. 34, no.1, Jan. 1 2016
- [5] D.J. Richardson, “Space – division multiplexing in optical fibers,” “Nature Photonics.” 29 de Abril de 2013, DOI:10.1038/NPHOTON.2013.94
- [6] <https://www2.telegeography.com/hubfs/assets/Ebooks/state-of-the-network-2021.pdf>
- [7] TeleGeography /The state-of-the-network-2022 Edition
- [8] <https://blog.telegeography.com/feast-your-eyes-on-the-2023-submarine-cable-map>
- [9] Corning Incorporated – 1 Corning - Fiber reliability - White Paper – WP 5082 – April 2016. [ww.corning.com/optical\\_fiber](http://ww.corning.com/optical_fiber).
- [10] ITU-T G-series Recommendations - Supplement 59 - 02/2018
- [11] Europacable-Guide-Expected-Life-Time-of-Passive-Optical-Infrastructure-21-Oct-2020
- [12] Anis Maslo, Mujo Hodzic, Edvin Skaljo & Aljo Mujcic , “Aging and Degradation of Optical Fiber Parameters in a 16-Year-Long Period of Usage”. FIBER AND INTEGRATED OPTICS 2020, VOL. 39, NO.1, 39–52.
- [13] Sudipta Bhaumik, Andrew McGrath,” Optical Fiber extended environmental aging studies” – White Paper – Aug 2014.
- [14] Hopland S, Sikora E, Investigation of Hydrogen induced losses in installed fiber optic submarine cable systems with submerged splice housings. Proceedings IWCS 1995.
- [15] Rongqing Hui, Maurice O`Sullivan, “Fiber Optic Measurement Techniques”, Copyright # 2009, Elsevier Inc. All rights reserved.
- [16] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, 4ª Edição, Copyright © 2010 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.
- [17] ITU-T G-series Recommendations – G.652 - 11/2009



- [18] J. Laferrière, G. Lietaert, R. Taws, S. Wolszczak, “ Reference Guide to Fiber Optic Testing.” Volume 1. Copyright 2007, JDS Uniphase Corporation.
- [19] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 41 – 02/2018
- [20] Jean-Fraçois Libert, Gary Waterworth, “Cable technology”, Undesea Fiber communications Systems, Copyright 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [21] ITU-T Manual 2009. “Optical fibres, cables and systems”, Annex C
- [22] John A. Jay, “ An Overview of Macrobending and Microbending of Optical Fibers” White Paper - WP1212. Dec. 2010. [www.corning.com/optical fiber](http://www.corning.com/optical_fiber)
- [23] ITU-T G-series Recommendations – G.657 - 11/2016
- [24] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, “Fundamental of Photonics”, 2ª Edição, Copyright 2007 by John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.
- [25] Clemens Unger, Waldemar Stocklein, “ Investigation of the Microbending Sensitivity of Fibers”, J.Lightw Technol., vol. 12, no.4, April 1994.
- [26] Sterlite Tech - Optical fiber extended environmental aging studies - August 2014.pdf
- [27] Umberto Rossi, Reliability of fibre optic transmission lines.
- [28] Recommendation ITU-T G.971 - General features of optical fibre submarine cable systems.

## **Anexos**

### **Anexo A**

Descreve como foram obtidos os dados das curvas de caracterização dos enlaces ópticos realizadas com medições com o OTDR com a utilização do emulador de OTDR Anritsu Trace View 5.0.

Mostra o aprendizado que foi obtido ao longo do trabalho com constante evolução ao longo do tempo sobre como realizar as medições e como analisar os dados até o atingimento da maturidade e o conhecimento necessários para a pesquisa.

Foram realizadas análises dos trechos submarinos dos cabos A, B e C, com comprimentos de 36 km, 50km e 155km, respectivamente, através das curvas salvas em arquivos com a extensão .Sor geradas pelos OTDRs durante as medições no enlace considerando a degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação e das perdas pontuais, principalmente nas caixas de emendas.

As Figuras seguintes mostram exemplos de dados obtidos pela análise das curvas .Sor do OTDR com os emuladores utilizados.

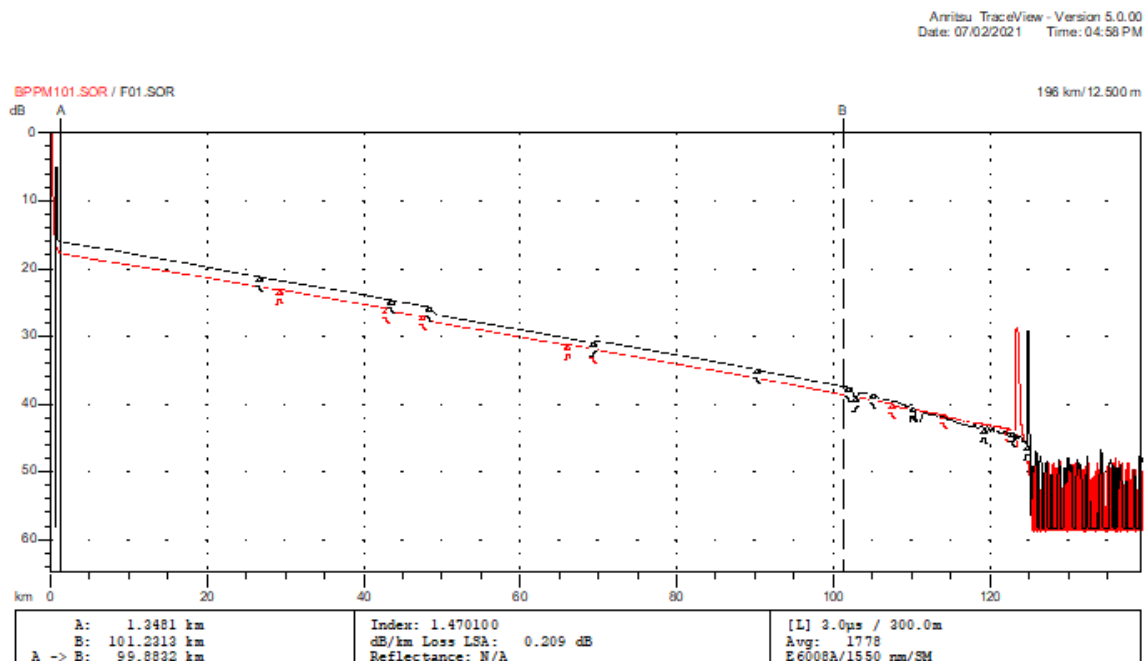


Figura 1: Curvas de caracterização do trecho submarino medidas com OTDR em 1998 (curva vermelha) e em 2020 (curva preta) na fibra 01.

Primary Trace: BPPM101.SOR				Overlay Trace: F01.SOR			
Date: 07/31/98	Range: 196 km	Resolution: 12.500 m		Date: 09/17/20	Range: 200 km	Resolution: 10.007 m	
Time: 03:43 PM		Pulse Width: 3000 ns		Time: 02:21 PM		Pulse Width: 2000 ns	
Product Type: E6000A	Index: 1.470100			Product Type: MT9083B-05	Index: 1.470100		
Opt. Module: E6008A	WaveLength: 1550 nm			Opt. Module:	WaveLength: 1550 nm		
Fiber Type: Singlemode	Hors. Shift: 0.0000 km			Fiber Type: Singlemode	Hors. Shift: 0.6349 km		
FAS Thresholds:	Loss: 0.00 dB	Vert. Shift: 0.00 dB		FAS Thresholds:	Loss: 0.01 dB	Vert. Shift: 0.00 dB	
Reflectance: 0.00 dB	No. Averages: 1778			Reflectance: -60.00 dB	No. Averages: 37120		
Fiber Break: 3.00 dB				Fiber Break: 3.00 dB			
Backscatter: -100.00	Trace Type: GR196			Backscatter: -80.44	Trace Type: Anr SR4731		
Trace Flags: Analysis				Trace Flags: Analysis			
ORL: N/A				ORL: N/A			

Figura 2: Parâmetros de configuração e dados dos OTDRs utilizados em 1998 e em 2020.

A Figura 3 mostra o resultado visto no emulador do OTDR utilizado (Anritsu Trace View 5.0) para um trecho de cerca de 100 km entre a ponta A e ponta B para medições realizadas na fibra 01, em que a curva vermelha é para a medição de 1998 e a curva verde para a medição realizada em 2020.

A mesma referência de cores vale para as Figuras de 4 a 8, ou seja, curva vermelha referente a medição em 1998 e curva verde em 2020.

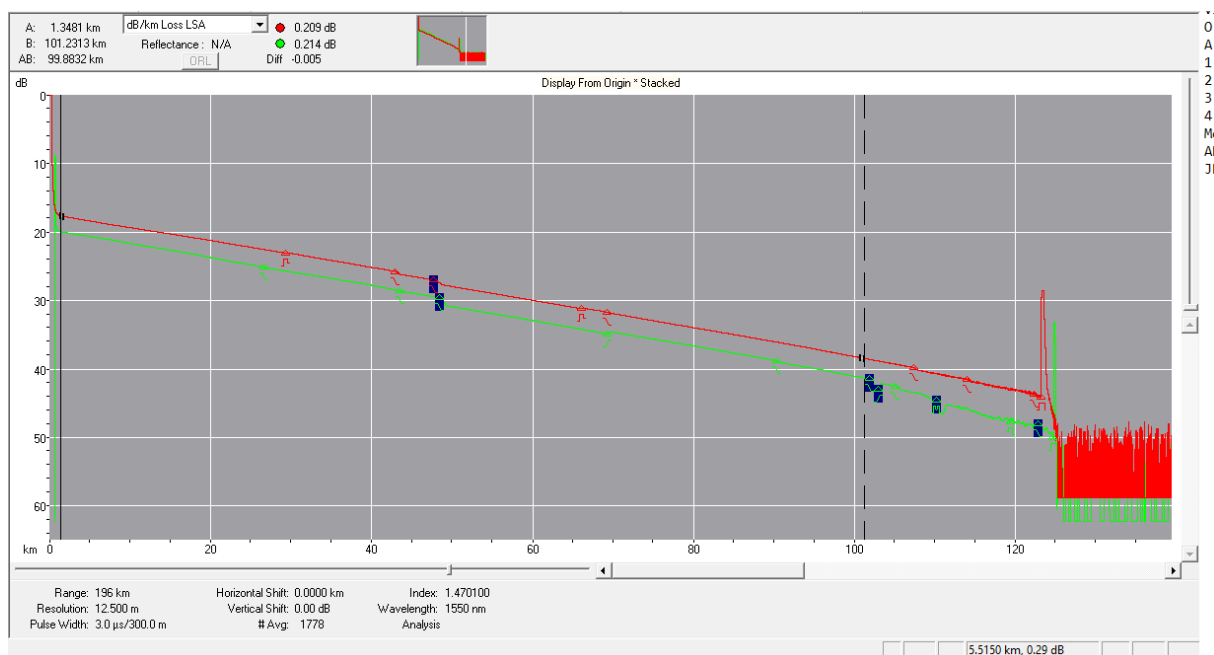


Figura 3: Trecho submarino de 100 km das curvas do OTDR da fibra 01 com medições realizadas em 1998 e 2020.

Como pode ser observado o valor do coeficiente de atenuação total do trecho de 100 km em 1998 foi de 0,209 dB e em 2020 foi de 0,214. A degradação no trecho total dessa forma considera as contribuições das emendas e não é adequado para avaliação do envelhecimento do coeficiente de atenuação da fibra.

Para verificar o comportamento do coeficiente de atenuação somente devido a sua degradação por envelhecimento das características da fibra óptica, foram realizadas algumas medições dos trechos entre eventos pontuais, entre as caixas de emendas, e foram obtidos registros conforme os exemplos mostrados nas Figuras de 4 a 8.

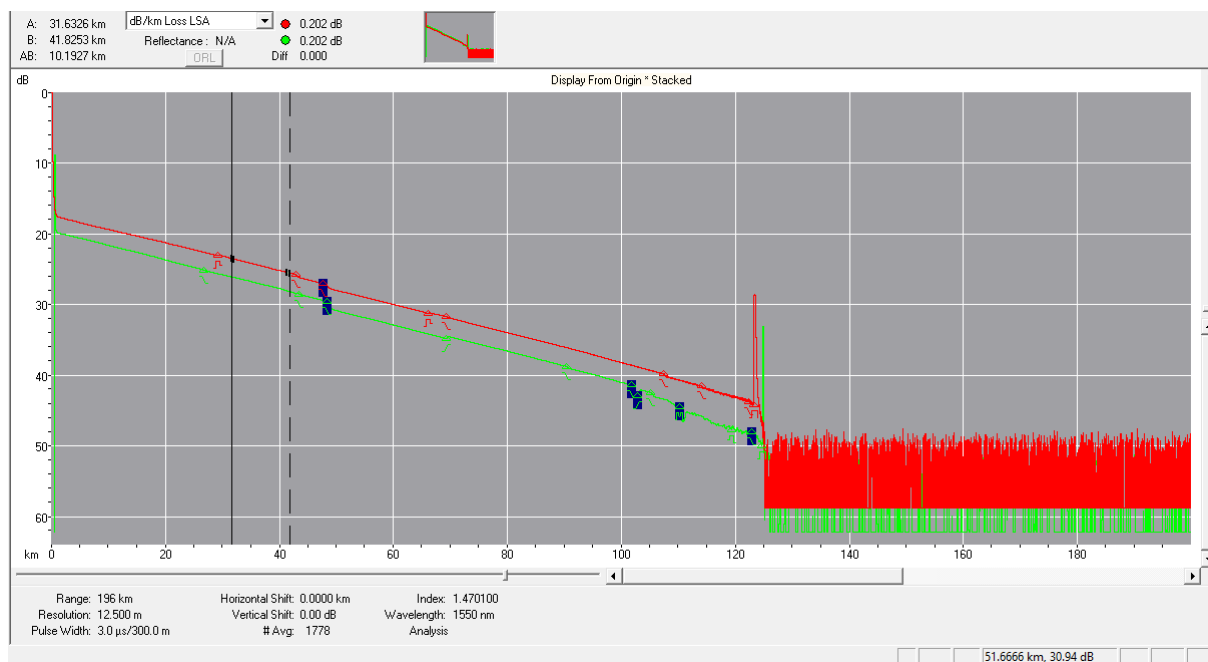


Figura 4: Trecho1 inicial entre eventos pontuais de atenuação mostrando a degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação entre 1998 e 2020.

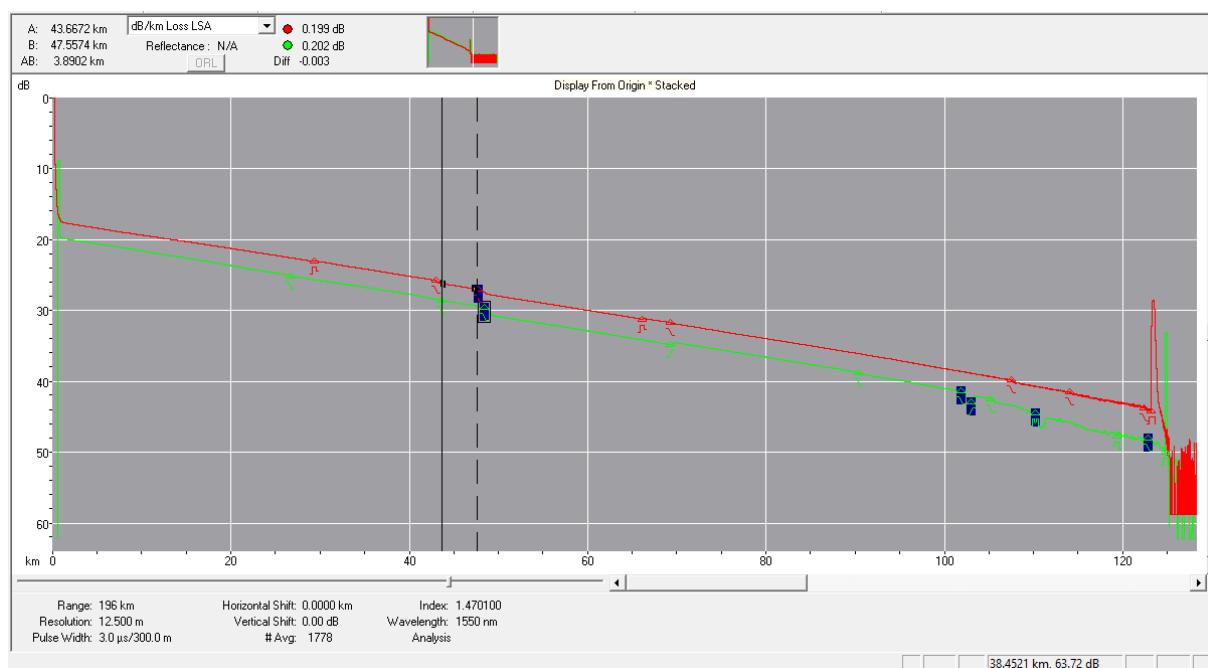


Figura 5: Trecho 2 entre eventos pontuais de atenuação mostrando a degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação entre 1998 e 2020.

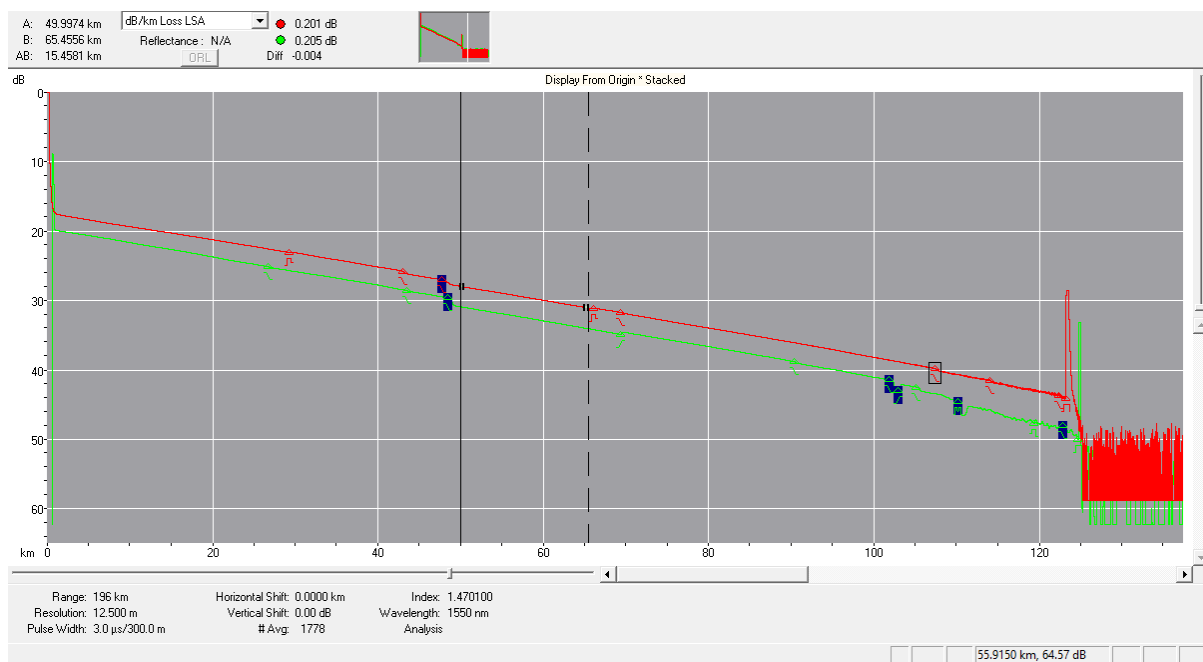


Figura 6: Trecho 3 intermediário entre eventos pontuais de atenuação mostrando a degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação entre 1998 e 2020.

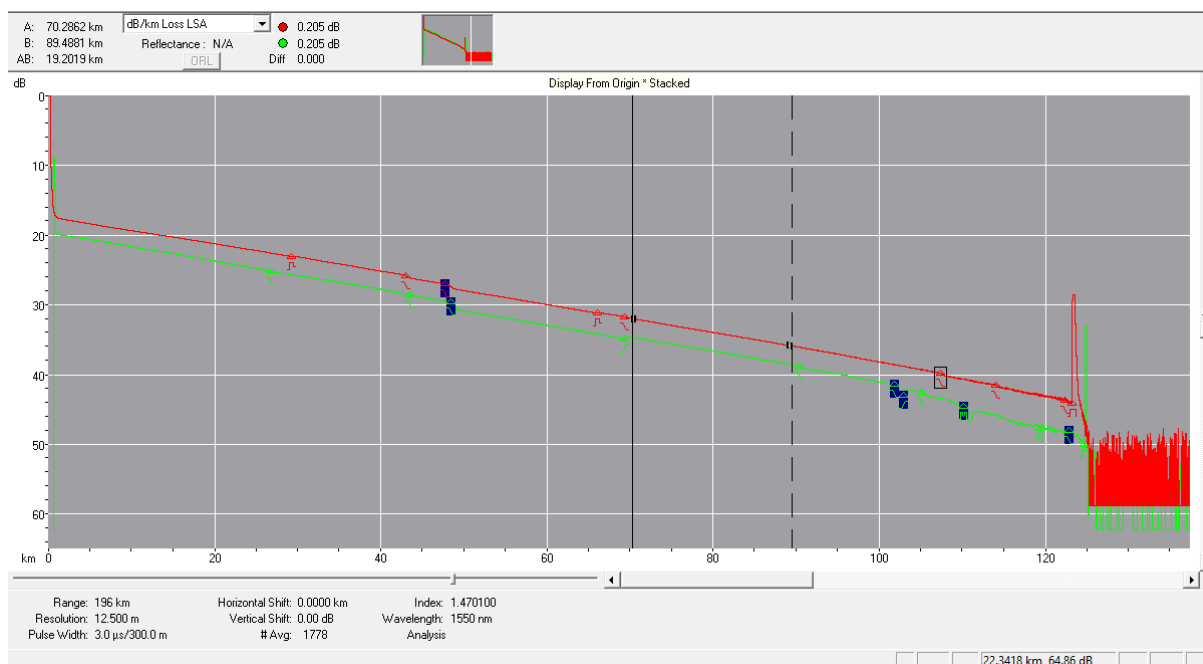


Figura 7: Trecho 4 intermediário entre eventos pontuais de atenuação mostrando a degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação entre 1998 e 2020.

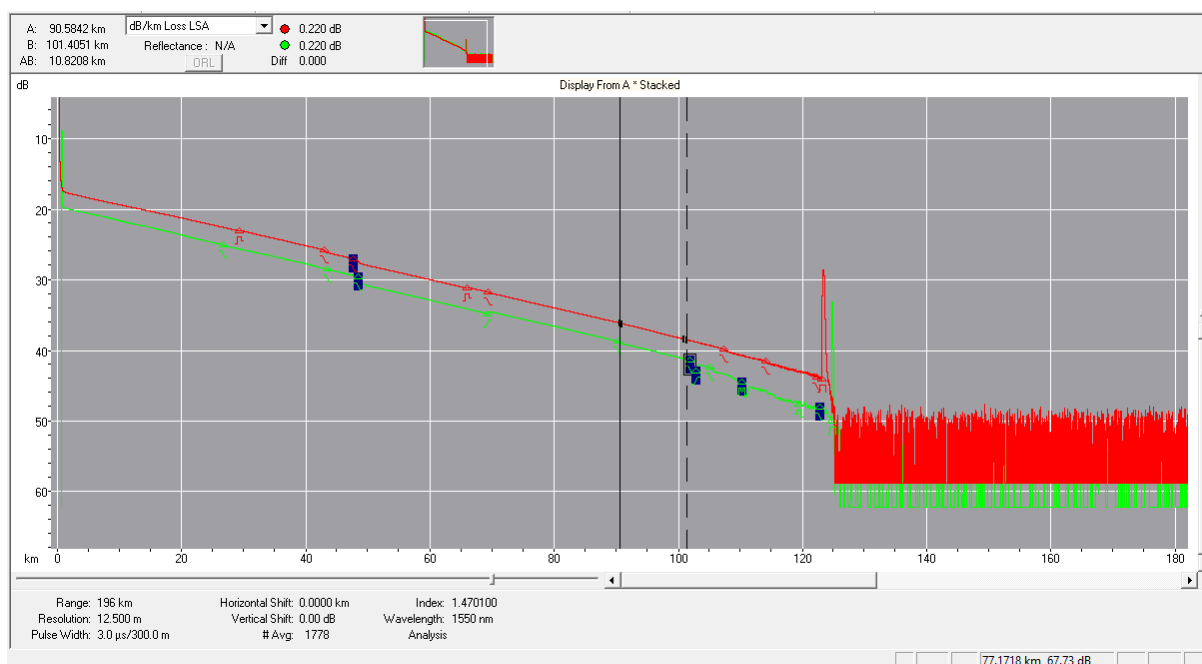


Figura 8: Trecho 5 final entre eventos pontuais de atenuação mostrando a degradação sofrida pelo coeficiente de atenuação entre 1998 e 2020.

#### Análise das perdas pontuais na atenuação:

Para essa análise verificaram-se as perdas pontuais nas caixas de emenda submarinas (CEs) destacadas nos eventos das curvas com o OTDR e realizou-se a comparação dos resultados desde a primeira medição até a última obtida, buscando a identificação da degradação nas emendas das fibras nas caixas de emendas submarinas.

Cabe destacar que todas as caixas de emenda, para todos os trechos e para todos os cabos A, B e C, empregados na pesquisa, utilizam o mesmo tipo de caixa UQJ (Universal Quick Joint), homologadas pelo UJ Consortium e qualificadas para aplicação até 6.000m de profundidade. A Figura 9 mostra uma UQJ típica, como as utilizadas na malha óptica submarina da Bacia de Campos.



Figura 9: Caixa de emenda submarina UQJ.

A Figura 10 foi extraída do emulador de OTDR utilizado para a análise das curvas.

Analysis Results -- BPFM101.SOR						Analysis Results -- F01.SOR					
Feature #/Type	Location (km)	Event-Event (dB) (dB/Km)	Loss (dB)	Refl (dB)		Feature #/Type	Location (km)	Event-Event (dB) (dB/Km)	Loss (dB)	Refl (dB)	
1/R	29.3399	5.66 0.193	-0.09	N/A		1/N	26.7148	5.36 0.205	0.05		
2/N	42.0158	2.78 0.202	0.21			2/N	42.5606	2.37 0.200	0.08		
3/N	47.7316	0.93 0.198	0.50			3/N	48.4378	0.96 0.196	0.98		
4/R	66.0977	3.70 0.202	-0.12	N/A		4/N	69.3343	4.29 0.205	-0.39		
5/N	69.3478	0.63 0.193	0.06			5/N	90.3533	4.31 0.205	0.18		
6/N	107.4693	8.02 0.210	0.29			6/N	101.8934	2.44 0.211	1.30		
7/N	114.0969	1.41 0.213	0.21			7/N	102.9545	0.25 0.233	-0.91		
8/N	122.3815	1.87 0.226	0.21			8/N	105.0972	0.43 0.201	0.48		
9/E	123.2099	0.34 0.409	>2.00	-24.13		9/G	110.2499	1.54 0.298	0.50 (2F)		
Overall (End-to-End) Loss: 26.72 dB							111.5356				
						10/R	119.3922	2.72 0.298	0.05	-53.38	
						11/N	122.8613	0.31 0.089	0.50 (2F)		
						12/E	124.7489	1.44 0.764	>3.00	-13.83	
						Overall (End-to-End) Loss: 30.22 dB					

Figura 10: Localização das perdas pontuais no enlace óptico medido em 1998 com 9 eventos e medido em 2020 com 12 eventos.

Como já comentado, a medição de 1998 apresentou 9 eventos de perdas pontuais, sendo o nono evento o final da fibra. Já a medição de 2020 apresentou 12 eventos de perdas pontuais, sendo o décimo segundo o final da fibra.

Esse aumento de eventos já mostra uma piora nas perdas ao longo dos anos, porque alguns pontos de perdas em emendas prioritariamente, que não foram identificadas em 1998 porque provavelmente tinham valores desprezíveis, cresceram e puderam ser identificadas nas medidas de 2020.



Escolhendo os pontos coincidentes de perdas identificados no gráfico e analisando individualmente uma dessas perdas identificada em ambas as curvas por evento 3 na Figura 11, tem-se os seguintes resultados:

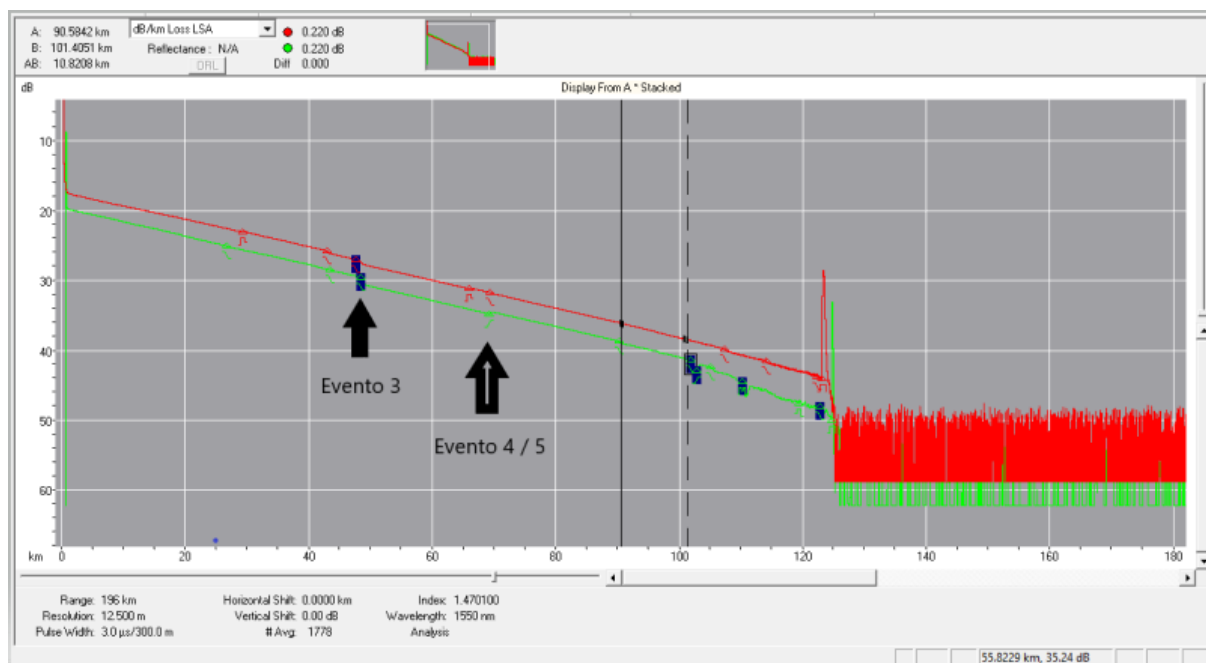


Figura 11: Perdas nos pontos identificados como evento 3 e evento 4 / 5 em ambas as curvas e mostradas pelo emulador de OTDR.

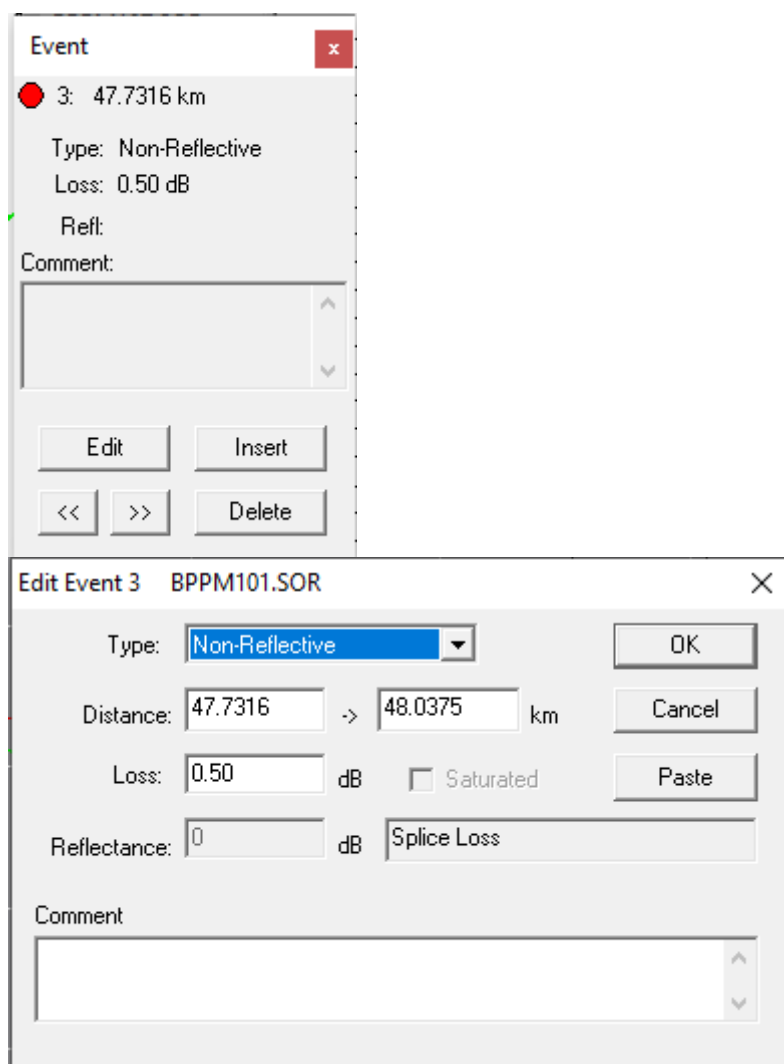


Figura 11a: Perda no ponto identificado como evento 3 na curva medida em 1998.

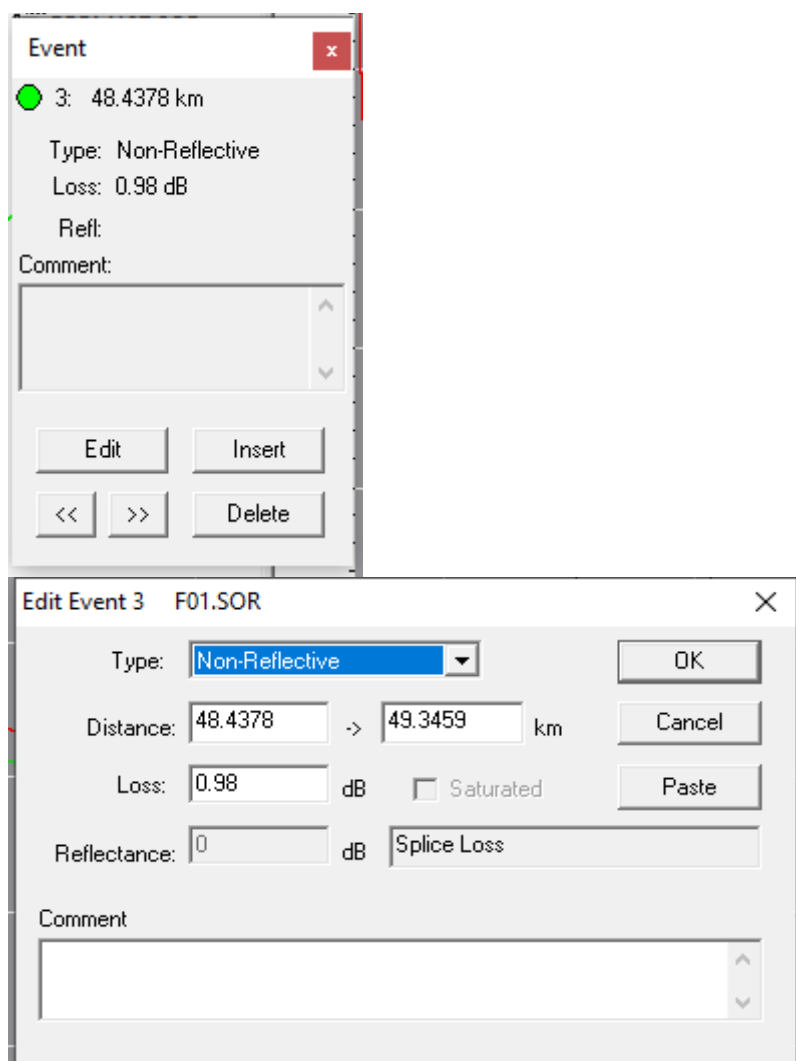


Figura 11b: Perda no ponto identificado como evento 3 na curvas medida em 2020.

Como pode ser observado em 1998 a perda foi de 0,50dB e em 2020 aumentou para 0,98dB, significando um aumento de 0,48dB em 22 anos ou 0,22dB/Década para essa emenda. Os valores individuais das perdas são muito dispersos e por isso a análise trabalhou com valores médios de um conjunto de medidas.

Essa diferença considerável entre as perdas nas emendas mostra a característica aleatória e imprevisível da maneira como o fenômeno ocorre nas perdas pontuais, normalmente localizadas em caixas de emendas ópticas, mas mostra também que elas crescem ao longo do tempo contribuindo para o aumento da perda total do enlace óptico.

As prováveis causas dessa aleatoriedade podem ser devido aos diferentes materiais utilizados na fabricação e vedação das caixas de emenda, métodos de

manuseio e instalação, qualidade da instalação e características dos locais em que as caixas de emendas ópticas foram posicionadas no ambiente.

## **Anexo B**

Artigo W2A.9 OFC 2023 © Optica Publishing Group 2023

# Aging effects on the attenuation coefficient and splice losses in installed submarine optical cables

**R. A. Ciufo Poeys, and J. P. von der Weid**

*Center for Telecommunications Studies - Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil  
roquecp@yahoo.com.br, vdweid@opto.cetuc.puc-rio.br*

**Abstract:** Aging effects in submarine optical cables were evaluated with OTDR measurements along 12 years. Penalties from splice losses were twofold higher than those from fiber attenuation. Cables are expected to last more than 25 years. © 2022 The Authors

## 1. Introduction

For many years and even nowadays, it is generally agreed in the optical cable market that the operational lifetime of properly designed and constructed fiber optic cables with the best quality processes is around 20 to 25 years. This statement is given by manufacturers and international standardization bodies in the area of Telecommunication such as the ITU-T (International Telecommunication Union) [1]. On the other hand, technical publications state that optical cables can remain operational for more than 25 years, reaching 40 years or more [2,3]. However, there is no easy and simple way to estimate with a high degree of certainty the operational lifetime of optical cables. Measurements in terrestrial cables during 16 years showed that there was little significant degradation of the attenuation coefficient, but relevant degradations for the punctual attenuations in the splice boxes [4]. Few aging studies were performed in submarine cables, where the operation conditions are quite different in term of pressure, temperature and third-party interventions. Losses in 1550 nm in submarine cable splices were reported to vary 0.026 dB per splice per year and were associated to hydrogen induced losses [5]. This work present results on the aging of installed submarine cables and warehouse stocked spare cables between 2010 and 2022.

## 2. Experimental Methods

The submarine optical cables were supplied in 2010, together with complete specifications data tables for all G-655 standard fibers in the eight cable stretches of the link. The first four stretches (S1 to S4) were double armored cables whereas the four others (S5 to S8) were single armored cables. The link was completely installed in 2012 in an exploration area of the oil & gas industry in the Brazilian offshore Campos Sedimentary Basin. Complete bidirectional OTDR measurements in 6 of the 18 fibers of the cables were performed in 2012, 2013, 2018 and 2022 with full characterization of fibers and splice losses. From the full 36-km link four stretches (S4 to S7) were chosen according to the minimum length required to provide accurate OTDR measurements of attenuation coefficients without interference of splice losses, totalizing a length of 27.6 km. Loss data from four splice boxes (SB3/4, SB4/5, SB5/6 and SB6/7) were also selected.

All OTDR measurements were performed in both directions to provide fiber attenuation and splice loss tables along the time. Indeed, this procedure is usual in cable inspection, mainly because measurements of splice loss between different fibers depend on the direction and the mean value should be used. However, the variation of the fiber or splice loss is the same whichever direction is used because all factors regarding the Rayleigh backscattering capture coefficients cancel out. Hence, the original data traces in a single direction were used to evaluate the variation of losses along time, the ones providing the best signal-to-noise ratio, keeping, of course, the same direction along all measurements.

### 3. Results and Discussions

After the link installation in 2012 the average attenuation coefficient of the deployed fibers was almost the same as the average value at the factory premises in 2010, meaning that the effect of the handling and transport was negligible. Fig. 1 (left) displays the distribution of the variations in attenuation coefficients ( $\Delta\alpha$ ) for the ensemble of measured fibers between the deployed state in 2012 and 2022, with the trend curve with measured intermediate points shown in the righthand side. This distribution clearly present two different behaviors, certain fibers degrading much more than others. Indeed, the greater variations were observed in fibers from the same stretch (S4), corresponding to the double armored cable deployed in shallow waters. The mean variation was 0,004 dB/km within 10 years, which is considerably close to the ITU-T limit of 0,005 within 25 years. Using a logarithmic trend to describe the aging effects as shown in Fig. 1 (right), the observed mean data are still compatible with the ITU-T expectations with a determination coefficient  $R^2 > 0,90$  and eventually will reach the limit value in a time much longer than expected. It is worth noting that even though the shallow stretch cable is double armored it suffered much greater variations than the deeper single armored ones. The proximity of shore end, fishing and traffic of small boats could explain this difference.

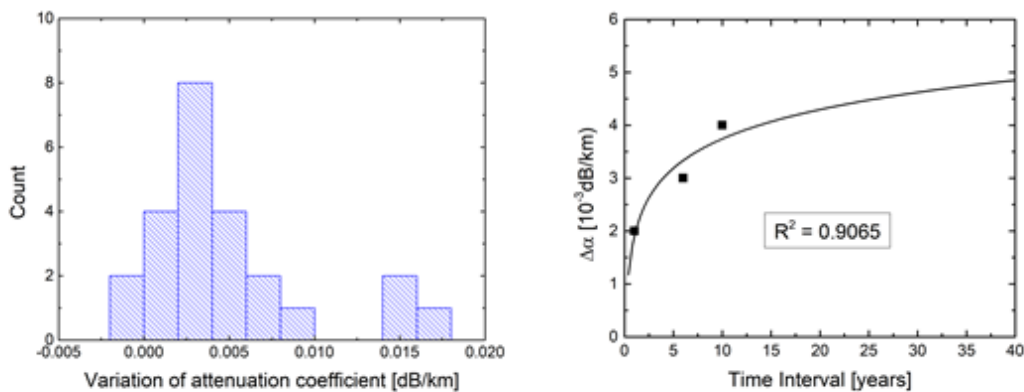


Fig. 1: (Left) Histogram of  $\Delta\alpha$  for all fibers in all sections between 2012 and 2022. (right) Trend curve for the mean penalty.

It is interesting to compare the degradation of the shallow stretch with the degradation of the single armored spare cable in the warehouse. Fig. 2 displays the distribution of variation of attenuation coefficients of fibers in both cables. Indeed, a much broader distribution impacted the spare cable, with eventually tenfold increases in the degradation for the same period. While the spare cable was stored

in a container with uncontrolled temperature, the deployed cable submarine environment was much more stable. It is clear that the storage conditions are of paramount importance for the reliability of the spare parts in long life cables installations.

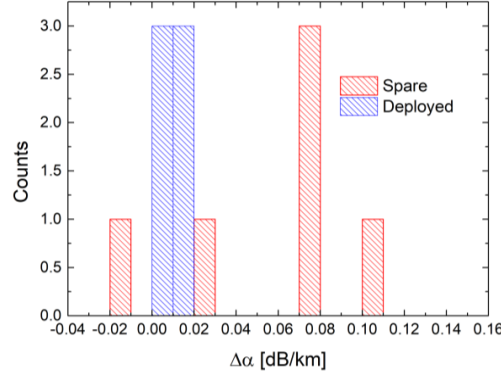


Fig. 2:  $\Delta\alpha$  in the S4 cable on the seabed and in the spare cable

The variations of the losses in splice boxes were measured in the same traces as used for attenuation coefficients, hence in the same years. Fig. 3 (left) displays the variation in splice losses from 2012 to 2022, showing that the mean degradation per splice in 10 years was 0.054 dB, much smaller than the 0.26 dB previously reported data [5]. It is also interesting to consider the correlation between the loss degradation and the depth of the splice box. It is clear that an increase in degradation is observed as the boxes are installed in deeper waters.

Considering that several splices are installed in a submarine link, the overall impact of the splices may heavily impact the power margins of the link along the years. The power penalty from the 10 years aging of the four splice boxes in the 27.6-km partial link is 0.22 dB whereas the penalty from fiber attenuation in the 27.6-km cable is 0.11 dB, revealing a twofold greater aging impact from the splices than from the fiber attenuation. This means that better quality materials for underwater splice boxes, best practices and expertise during splicing, choice of the best route, and better quality in launching and accommodating splice boxes on the seabed are needed in order to mitigate aging losses.



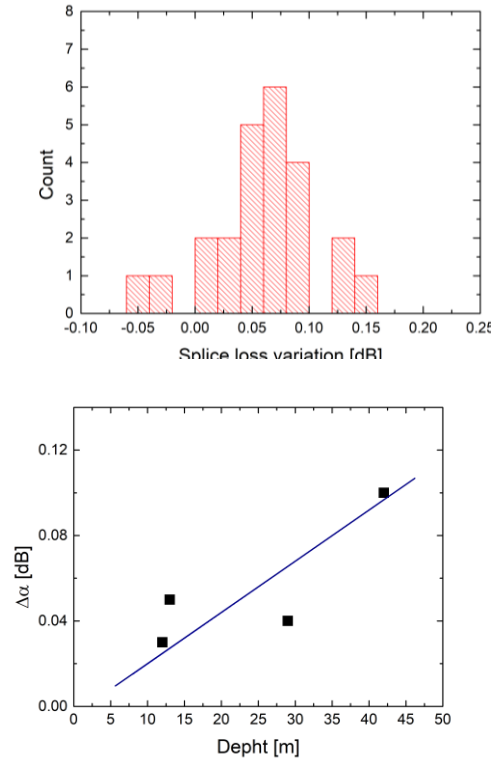


Fig.3: Histogram of the variation of losses in splice boxes (left) and variation of the losses with depth (right)

#### 4. Conclusion

In this work, aging effects on the fiber attenuation and splice losses were evaluated from factory to field along 12 years. Immediately after the cable was deployed no significant degradation of the attenuation coefficient was observed, when comparing deployed cable data with data measured in the factory coils. Then, a fast degradation was observed in the first year from the deployment, which continued to grow afterwards, but at a slower rate over the subsequent 10 years of observation. It was also observed that the optical fibers from deeper sections presented a smaller degradation than those from the shallower sections. This is consistent with the fact that even though double armored cables were used in those shallow waters they are subject to more aggressions due to the proximity of the coast, the movement of waves or action of fishermen and crossing of existing submarine pipelines in the place.

Aging penalty coming from the average variation of the losses in the subsea splices was found to be twofold higher than what was verified for the variation of the degradation in the attenuation coefficient. It was also observed that there was a positive correlation between the aging effects and the depth of the deployed splice box. Therefore, one must be very careful with the quality of the materials as well as the quality of the installation procedures and maintenance of the splice boxes.

The analysis also showed that the aging is compatible with the ITU-T expectations and trend curves indicate that lifetimes to reach the ITU-T limits may be even longer than the 25-year standard. In fact, the trend curve indicates a stabilization of the aging power penalty coming from the attenuation coefficient, which means that an installed cable may be an asset with a lifetime much longer than that expected in the past. Benefits from the increased useful life for the backbone owner are maximizing profits, avoiding unnecessary investment losses upfront and allowing better planning for the future and greater appreciation of

optical assets due to the guarantee of the performance of these fibers for much longer. It is worth mentioning that even though splices may suffer greater aging effects, they can always be repaired by a punctual intervention, whereas the fiber attenuation is a distributed effect that can only be repaired by a full cable replacement.

Finally, measurements in the warehouse stored spare cable showed that aging effects can be tenfold worse than aging effects in deployed cables, reinforcing the need for the spare cables to be properly stored, without direct sun light exposure and controlling the room temperature to avoid fluctuations.

## 5. References

[1] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 41 – 2018

[2] Corning Incorporated – 1 Corning - Fiber reliability - White Paper – WP 5082 – April 2016. [www.corning.com/optical\\_fiber](http://www.corning.com/optical_fiber).

[3] ITU-T G-series Recommendations - Supplement 59 02/2018

[4] Anis Maslo, Mujo Hodzic, Edvin Skaljo & Aljo Mujcic , Aging and Degradation of Optical Fiber Parameters in a 16-Year-Long Period of Usage. FIBER AND INTEGRATED OPTICS 2020, VOL. 39, NO.1, 39–52.

[5] Hopland S, Sikora E, Investigation of Hydrogen induced losses in installed fiber optic submarine cable systems with submerged splice housings. Proceedings IWCS 1995.

## **Anexo C**

Artigo IEEE Photonics Technology Letters - ISSN: 1041-1135 – DOI:  
10.1109/LPT.2023.3273190

# Aging effects on installed submarine optical cables

R. A. Ciufo Poeys, and J. P. von der Weid

*Center for Telecommunications Studies - Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil  
roquecp@yahoo.com.br, vdweid@opto.cetuc.puc-rio.br*

**Abstract:** Aging effects in submarine optical cables were evaluated with OTDR measurements along 24 years. Penalties from splice losses were twofold higher than those from fiber attenuation. Cables are expected to last more than 25 years. © 2023 The Authors

## 1. Introduction

For many years and even nowadays, it is generally agreed in the optical cable market that the operational lifetime of properly designed and constructed fiber optic cables with the best quality processes is around 20 to 25 years. This statement is given by manufacturers and international standardization bodies in the area of Telecommunication such as the ITU-T (International Telecommunication Union) [1]. On the other hand, technical publications state that optical cables can remain operational for more than 25 years, reaching 40 years or more [2,3]. However, there is no easy and simple way to estimate with high degree of certainty the operational lifetime of optical cables. Measurements in terrestrial cables over 16 years showed that there was little significant degradation of the attenuation coefficient, but relevant degradations for the punctual attenuations in splice boxes [4]. Few aging studies were performed in submarine cables, where the operation conditions are quite different in terms of pressure, temperature and third-party interventions. Losses at 1550 nm in submarine cable splices were reported to vary 0.026 dB per splice per year and were associated to hydrogen induced losses [5]. Given the economic importance of the lifetime of submarine optical cables, a thorough study of aging effects on the relevant parameters affecting the communications channel are of paramount importance and still lacking in the literature. Two classes of parameters are relevant in this study. The first one is the distributed loss along the fiber, measured by its attenuation coefficient in dB/km, which may be due to a general degradation of the optical cable defining its end of life. The second are localized point losses due to splice degradation or new splices installed during cable repairs. This class of degradation can be recovered by a repair operation and can hardly be related to the cable lifetime. Degradation of the attenuation coefficient due to localized effects such as water leakage are rather related to the cable manufacturing or third parties intervention and are classified in the second class. This work present results on the aging of installed submarine cables within a 24-

years time span. Attenuation coefficients and splice losses were measured between 1998 and 2022 as well as warehouse spare cables, allowing for a comparison between the degradation in different environmental conditions.

## 2. Experimental Methods

The study was carried out in two different submarine links which were installed in 1998 and 2012 and are operating until now. The shorter submarine optical cable (Cable A), supplied in 2010, used G-655 standard fibers, whereas the longer submarine optical cable (Cable B) was supplied in 1998 and used G.652 standard fibers. Complete specifications data tables for all fibers in the installed cable stretches were provided by the suppliers. According to project specifications, deep waters stretches were single armored (SA) optical cables while the shallow stretches were double armored (DA).

Cable A was completely installed in 2012 in an exploration area of the oil & gas industry in the Brazilian offshore Campos Sedimentary Basin. Bidirectional OTDR measurements in 6 of the 18 fibers of the cables were performed in 2012, 2013, 2018 and 2022 with full characterization of fibers and splice losses. From the full 36-km link, four stretches (S4 to S7) were chosen according to the minimum length required to provide accurate OTDR measurements of attenuation coefficients without interference of splice losses, totaling a length of 27.6 km. Loss data from four splice boxes (SB3/4, SB4/5, SB5/6 and SB6/7) were also selected.

Cable B was completely installed in 1998 in the same exploration area. Complete bidirectional OTDR measurements in 4 of the 12 fibers of the cables were performed in 1998 and 2021 with full characterization of fibers and splice losses. From its full 50-km length, two stretches (S4 and S5) were chosen according to the same minimum length criteria as in Cable A, totaling a length of 36.1 km. Loss data from four splice boxes (SB3/4, SB4/5, SB5/6 and SB6/7) were also selected.

All OTDR measurements were performed in both directions to provide fiber attenuation and splice loss tables along the time. Indeed, this procedure is usual in cable inspection, mainly because measurements of splice loss between different fibers depend on the direction and the mean value should be used. However, the variation of the fiber attenuation or splice loss is the same whichever direction is used because all factors regarding the Rayleigh backscattering capture coefficients cancel out when the difference between measurements performed in two different times is calculated. This procedure presumes that the geometrical and refractive index profile of the fibers remains unchanged along the years. Considering this, the original data traces in a single direction were used to evaluate the variation of losses along time, the one providing the best signal-to-noise ratio, keeping, of course, the same direction along all measurements.

## 3. Results and Discussions

### A. Fiber attenuation coefficients

Factory measurements prior to delivery of Cable A were available, so that it was possible to compare data measurements in freshly deployed cables to factory data. It was observed that after the link installation in 2012 the average attenuation coefficient of the deployed fibers was almost the same as the average value at the factory premises in 2010, meaning that the effect of handling and transport was negligible. Fig. 1 displays the distribution of the variations in attenuation coefficients ( $\Delta\alpha$ ) for the ensemble of measured fibers between the deployed state in

2012 and 2022. The distribution clearly presents two distinct behaviors, certain fibers degrading much more than others. In this case, the greatest variations were observed in the fibers of a single section (S4), corresponding to the double armored cable deployed in shallow waters, at about 12m depth. While the mean variation in SA cables was 0,003 dB/km within 10 years, the shallow water installed DA cable average degradation was 0,009 dB/km. Even though the shallow stretch cable is double armored it suffered much greater variations than the deeper single armored ones. It is probable that the proximity of shore end, fishing and traffic of small boats could explain this difference, rather than the impact of double armoring on the aging of the cabled fibers.

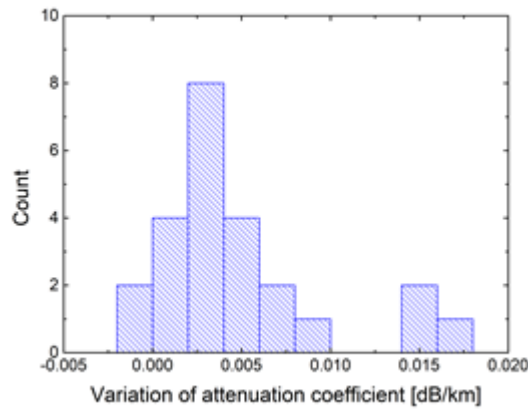


Fig. 1: (Left) Histogram of  $\Delta\alpha$  for all fibers in all sections between 2012 and 2022.

Measurements were performed in Cable B immediately after the installation in 1998 and in 2021, after 23 years in operation. Fig. 2 displays the distribution of the variations in attenuation coefficients ( $\Delta\alpha$ ) for the ensemble of measured fibers between the deployed state in 1998 and 2021. The distribution was very similar to the one observed for the single armored stretches of Cable A with an average degradation of 0.004 dB/km during the 23-year time span.

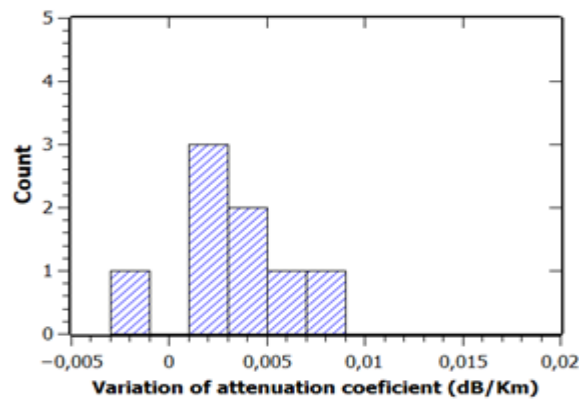


Fig. 2: Histogram of  $\Delta\alpha$  for all fibers in two sections of Cable B between 1998 and 2021

The measurements in cable B, together with intermediary measurements in Cable A, performed from 2012 to 2022 allowed to build a more complete picture of the aging trend. Fig. 3 displays the variation of the fiber attenuation coefficients in all single armored cables in the full 23-year time span. Data from the DA stretch of Cable A (S4) were excluded, as they correspond to a different cable submitted to very different operational conditions. Assuming that the chromatic dispersion and index profile are not the main parameters involved in the fiber aging effects, a logarithmic trend curve to describe the aging effects within a 23 years' time span can be traced, considering the evolution of the G-655 fibers of Cable A up to 10-years age and adding the point at 23 years corresponding to the G-652 fibers of Cable B. The trend curve from just the 12 years measurements of cable A give a more optimistic picture, but the addition of the data from cable B improved the determination coefficient and provided a more realistic time coverage. It is clear that the observed mean data are still compatible with the ITU-T expectations with a determination coefficient  $R^2 > 0,80$  either for the G-655 fibers or regardless the fiber's profile and eventually will reach the ITU-T 0.005 dB limit value in a time much longer than the 25 years expected.

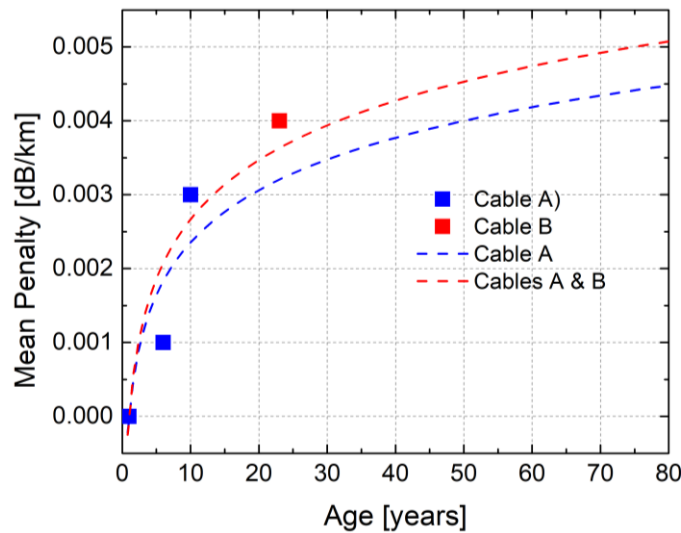


Fig. 3: Trend curve for the mean power penalty from fiber attenuation along 23 years

For both cables deployed in 1998 and 2010, it is interesting to compare the degradation of the attenuation coefficients of fibers in the spare cable in the warehouse with those in the deployed cables. Fig 4 shows the variation of attenuation coefficients of fibers of the shallow stretch S4 of cable A, a double armored cable, with the degradation of the double armored spare cable in the warehouse. For deployed cable, the measurements were performed in 2012 and 2022 whereas for the spare cable measurements were performed in 2010 and 2021, corresponding to a 10-year interval for the deployed cable and 11 years for the spare cable. Even though the deployed DA cable suffered a higher degradation than the other installed cables, the spare DA cables degraded much more, with a greater mean degradation and a broader distribution of values.

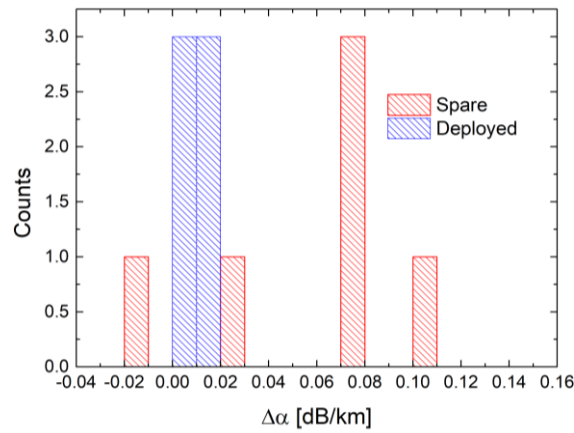


Fig. 4:  $\Delta\alpha$  in the DA S4 stretch of cable A on the seabed and in the DA spare cable

Fig 5. shows the comparison of the variation of attenuation coefficients of fibers of Cable B and the spare cable. The measurements on the single armored spare cable were performed in warehouse in 2003 and 2021, in an 18-years' time span, whereas the measurements on the deployed cable were performed in 1998 and 2021, in a 23-years span. The measurements were performed in the stretches S4 and S5, single armored cables, and the values showed are the average of each fiber. Again, the spare cable showed a much greater aging impact than the deployed cable, with a greater mean degradation and a much broader distribution. Note that even though the time span for the spare cable evaluation (18 years) was smaller than the span for the deployed cable (23 years) the aging effects were more severe for the spare cable.

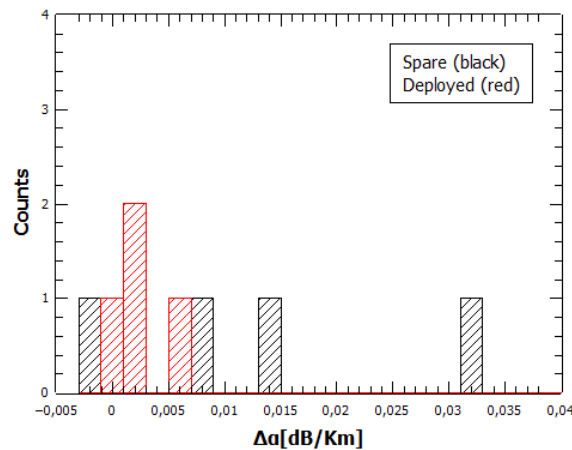


Fig. 5:  $\Delta\alpha$  in S4&S5 stretches in Cable B on the seabed and in the spare cable

These measurements clearly indicate that the storage conditions of the spare cable are of paramount importance for its reliability and lifetime. Indeed, a much wider distribution affected the spare cable for both the cables A and B, with



eventually tenfold increases in degradation when compared to deployed cables. While the spare cable was stored in a non-temperature-controlled container, the subsea environment of the deployed cable is much more stable.

It is also clear that even though the time span for the comparison between deployed and spare cables A and B are very different, the degradation in the spare Cable A (~6 fold greater than deployed cable) in a smaller time span was greater than in the spare Cable B (~4 fold greater than deployed cable). In fact, the spare cable A was manipulated at least seven times for field cable repairs, whereas the spare cable B was kept in the warehouse without any manipulation. Indeed, the cable movement to a repairing ship, splicing, deploying part of it and back to the warehouse had strong effects in fiber degradation.

### B. Splice losses

The variations of the losses in splice boxes were measured in the same OTDR traces as used for attenuation coefficients, hence in the same years. Fig. 6 (left) displays the variation in splice losses for all splice boxes in cable A, showing that the mean degradation per splice in 10 years was 0.054 dB and Fig. 6 (right) displays the variation in splice losses from cable B, showing that the mean degradation per splice in 10 years was 0.051 dB, almost the same for both cables in the same period and much smaller than the 0.26 dB previously reported data [5].

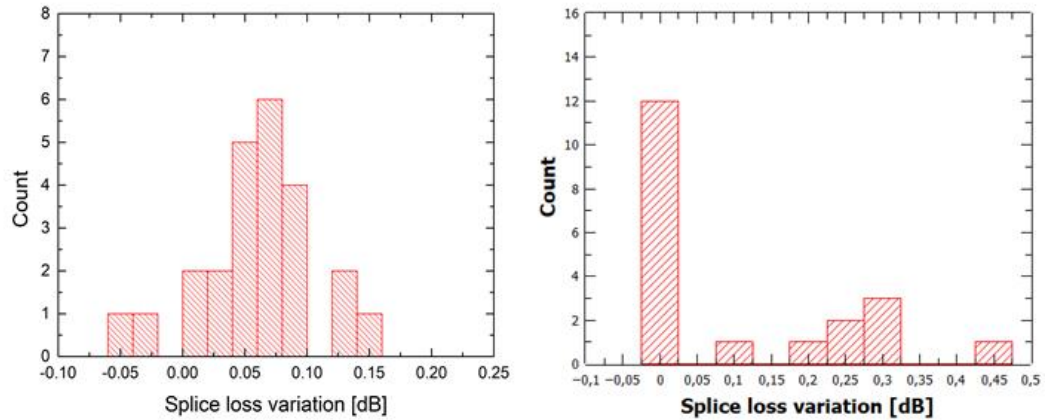


Fig.6: Histogram of the variation of losses in splice boxes for cable A (left) for cable B (right)

It is also interesting to consider the correlation between the loss degradation and the depth of the splice box in both cables. It is clear that an increase in degradation is observed as the boxes are installed in deeper waters. The ensemble of splice boxes was divided in groups within 50 m range and the statistics of power penalties was calculated considering these groups. The result is a clear positive correlation between penalties and depth as shown in Fig. 7 where the penalty per decade of aging increases from 0.05 dB/decade in shallow waters to 0.15 dB/decade near

1,000 m. The depth degradation penalty in submarine splice boxes is therefore  $\sim 0.10$  dB/decade per 1,000 m.

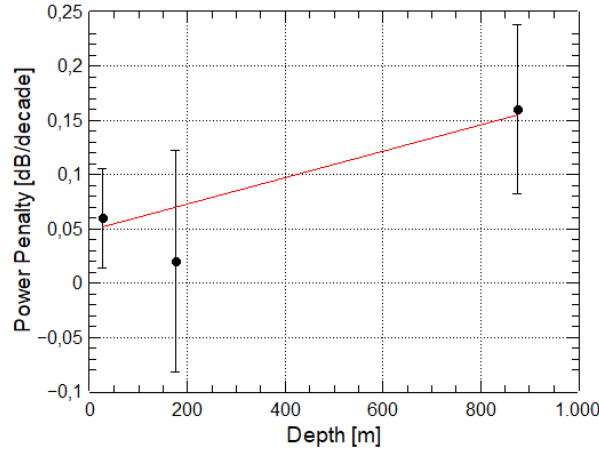


Fig.7: Power penalty in dB per decade for cables A and B with depth. Error bars are the standard deviation of the degradation at each 50-m depth range.

Considering that several splices are installed in a submarine link, the overall impact of the splices may heavily impact the power margins of the link along the years. For cable A, the power penalty from the 10 years aging of the four splice boxes in the 22.7-km partial link was 0.22 dB whereas the penalty from fiber attenuation in the 27.6-km cable was 0.11 dB, revealing that the aging impact from splices is 2.4 times greater than from fiber attenuation. Regarding cable B, the power penalty from the 23 years aging of the three splice boxes in the 36.1-km partial link was 0.37 dB whereas the penalty from fiber attenuation in the 36.1-km cable was 0.14 dB, again revealing an aging impact from splice losses 2.7 times greater than from fiber attenuation. Note that in both cases, the splice losses showed similar average aging penalty per splice: 0.054 dB/decade in cable A and 0.051 dB/decade in cable B. This means that better quality materials for underwater splice boxes, best practices and expertise during splicing, choice of the best route, and better quality in launching and accommodating splice boxes on the seabed are needed in order to mitigate aging losses.

#### 4. Conclusion

In this work, aging effects on the fiber attenuation and splice losses were evaluated from factory to field in two installed cables along 12 and 23 years. The younger cable, with shore end, was composed of two types of armoring; double armoring for shallow waters and single armoring for deeper waters, whereas the older cable used only single armoring, as it was fully installed in deeper waters. The first observation was that the shallow waters and shore end double armored sections degraded much more than the deeper waters single armored cable sections. This

dissimilarity in the behavior of the two types of armoring is probably more due to the environmental and human intervention than to the quality of the cable itself. Even though double armored cables were used in shallow waters cables are subject to more aggressions due to the proximity of the coast, the movement of waves, action of fishermen and crossing of existing submarine pipelines in the place. In order to improve the statistical analysis only single armored cables were considered for the trend evaluation.

The average aging penalty coming from losses in subsea splices was found to be 2,5 times higher than aging penalty from the fiber attenuation coefficient. It was also observed a positive correlation between the aging effects and the depth of the deployed splice box, with an additional penalty coefficient of  $\sim 0.10$  dB/1000 per decade. Therefore, the quality of the material as well as the installation procedures and maintenance of the splice boxes are of paramount importance for durability of submarine optical cable installations.

The analysis also showed that the aging is compatible with the ITU-T expectations and trend curves considering both cables indicate that the observed mean data are still compatible with the ITU-T expectations with a determination coefficient  $R^2 > 0,80$  either for the G-655 fibers or regardless the fiber's profile and eventually will reach the ITU-T 0.005 dB limit value in a time much longer than the expected 25 years. In fact, the trend curve plotted considering both cables indicates that newly installed cables are expected to last 70 years before reaching the ITU-T limit of 0.005 dB/km penalty. This means that an installed cable may be an asset with a lifetime much longer than that expected in the past. Benefits from the increased useful life for the backbone owner are maximizing profits, avoiding unnecessary investment losses upfront and allowing better planning for the future and greater appreciation of optical assets due to the guarantee of the performance of these fibers for much longer. It is worth mentioning that well-made splices tend to deteriorate less than poorly made splices. Considering the link lifetime, even though splices may suffer greater aging effects, they can always be repaired by a punctual intervention, whereas the fiber attenuation is a distributed effect that can only be repaired by a full cable replacement.

Finally, measurements in the warehouse stored spare cables showed that for both cables aging effects can eventually be tenfold greater than aging effects in deployed cables, reinforcing the need of stable storage conditions, without exposure to direct sunlight and controlling the storage temperature to avoid fluctuations.

## 5. References

- [1] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 41 – 2018.
- [2] Corning Incorporated – 1 Corning - Fiber reliability - White Paper – WP 5082 – April 2016. [ww.corning.com/optical\\_fiber](http://ww.corning.com/optical_fiber).
- [3] ITU-T G-series Recommendations - Supplement 59 02/2018.
- [4] Anis Maslo, Mujo Hodzic, Edvin Skaljic & Aljo Mujcic , Aging and Degradation of Optical Fiber Parameters in a 16-Year-Long Period of Usage. FIBER AND INTEGRATED OPTICS 2020, VOL. 39, NO.1, 39–52.

- [5] Hopland S, Sikora E, Investigation of Hydrogen induced losses in installed fiber optic submarine cable systems with submerged splice housings. Proceedings IWCS 1995.