

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Matheus Franz

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES INDUZIDAS NOS FIOS DA ARMADURA DE
TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS DURANTE A MONTAGEM DE CONECTOR DO
TIPO FOLDLESS.**

Porto Alegre

2023

Matheus Franz

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES INDUZIDAS NOS FIOS DA ARMADURA DE
TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS DURANTE A MONTAGEM DE CONECTOR DO
TIPO FOLDLESS.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Marcelo Favaro Borges

Porto Alegre

2023

Franz, Matheus

Avaliação das tensões induzidas nos fios da armadura de tração de dutos flexíveis durante a montagem de conector do tipo foldless / Matheus Franz.

-- 2023.

118 f.

Orientador: Marcelo Favaro Borges.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Dutos flexíveis. 2. Conector foldless. 3. Armadura de tração. 4. Tensões residuais. 5. Fadiga.
I. Favaro Borges, Marcelo, orient. II. Título.

Matheus Franz

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES INDUZIDAS NOS FIOS DA ARMADURA DE
TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS DURANTE A MONTAGEM DE CONECTOR DO
TIPO FOLDLESS.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Marcelo Favaro Borges

Aprovado em: Porto Alegre, 01 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima

Prof. Dr. Antônio Fernando Burket Bueno

Prof. Dr. Flavio Galdino Xavier

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e vitalidade que me permitiram alcançar o objetivo.

À Petrobras, pela oportunidade e principalmente pelo amplo incentivo que presta a pesquisa e desenvolvimento no nosso país.

Aos colegas do LAMEF, em especial do grupo TS, pelo apoio, ajuda e cooperação que disponibilizaram na execução do trabalho, e também pelos momentos de descontração que foram essenciais.

Ao professor Marcelo, pela orientação e apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

A minha família, por todo o suporte e encorajamento ao longo de todo o processo.

Passo a passo. Não consigo pensar em nenhum outro modo de se realizar algo!

Michael Jordan.

RESUMO

A produção de petróleo e gás em alto mar é diretamente dependente do comportamento mecânico dos equipamentos que fazem parte dos sistemas de exploração e produção. Desta forma, a garantia de integridade de componentes críticos dessa cadeia de produção é de suma importância. Dentre os equipamentos críticos utilizados, os dutos flexíveis figuram como uma das principais alternativas para o escoamento da produção dos poços para as unidades flutuantes de produção. Estes, ainda, são a principal forma de transporte utilizada na extração de petróleo e gás em alto mar no território brasileiro, águas profundas e ultraprofundas. O acervo de estudos sobre *risers*, dutos flexíveis que são submetidos a carregamentos cíclicos durante operação, revelam a existência de uma região crítica de falha por fadiga destes equipamentos, a região de suas terminações. Tal criticidade pode ser explicada pela deformação plástica imposta aos fios das armaduras de tração dos dutos durante o processo de terminação destes em acessórios específicos. Baseado nessas condições conhecidas de dano, foram desenvolvidos diversos estudos relacionados e com objetivo em comum, de reduzir os efeitos deletérios oriundos do processo de montagem de conectores. Dentre os trabalhos de maiores relevâncias, o estudo que propôs um novo conceito de conector surgiu com o objetivo de reduzir os danos ocasionados pela deformação plástica por meio da eliminação da etapa de dobramento dos fios do processo de montagem. Seguindo essa linha, o presente trabalho avaliou de forma qualitativa e quantitativa o processo de montagem do conector do tipo *foldless*. Com duas abordagens, experimental e numérica, foram mapeadas as etapas e possíveis prejuízos a integridade dos fios causados pela manipulação destes (durante o processo de montagem dos conectores em suas extremidades), em diferentes condições. Os resultados obtidos demonstraram que apesar do modelo de conector ter um conceito com foco na melhoria de desempenho à fadiga, o processo de montagem é pouco robusto devido a seu caráter manual e com pouco controle, e por conta dessas limitações de processo a dobra dos fios não é totalmente eliminada. Ainda, o trabalho apresenta condições e melhorias de projeto e processo que convergem para um resultado menos agressivo aos fios das armaduras de tração visando um ganho na vida em fadiga destes equipamentos.

Palavras-chave: Dutos flexíveis; Conector *foldless*; Armadura de tração; Tensões residuais; Fadiga.

ABSTRACT

The oil and gas production is directly dependent on advances in the technology of the components that are part of the extraction system. Thus, ensuring the integrity and reducing damage of critical components is of paramount importance. Flexible pipelines, widely used in oil extraction in deep and ultra-deep waters, are critical components subject to losses in useful life rates, mainly because they need termination at their ends for connection with other pipelines or other components of the system. The collection of studies on risers, flexible pipelines that are subjected to cyclic loading during operation, reveal that there is a critical region of failure due to fatigue in these components, a criticality that can be explained by the plastic deformation submitted to the wires of the tensile armor of the pipelines during the process of terminating these in specific fittings, called connectors. Based on these known damage conditions, several related studies were developed with the common objective of reducing the negative effects on risers arising from the connector assembly process. Among the most relevant works, the study that proposed a new connector concept emerged with the objective of eliminating the damage caused by plastic deformation by eliminating the wire bending step of the assembly process. Following this line, the present work seeks to qualitatively evaluate the assembly process of the foldless connector. With two approaches, experimental and numerical, the steps and possible damages to the integrity of the wires caused by their manipulation, under different conditions, were mapped. The result shows that although the connector model has a concept focused on improving fatigue performance, the assembly process is not very robust because it is done manually and without control, and due to these process limitations, the bending of the wires is not completely eliminated. Finally, the work presents conditions and improvements for design and process that converge to a process that is less aggressive to the wires.

Keywords: Flexible pipes. Foldless connector. Tensile armor. Residual stresses. Fatigue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Unidade de produção, armazenagem e transferência (FPSO).	20
Figura 2 – Disposição de poços no leito submarino e conexões flexíveis.....	21
Figura 3 – Dutos flexível representado em camadas.	22
Figura 4 - Configurações de utilizações de risers.....	24
Figura 5 – Perfil da carcaça interna.....	26
Figura 6 – Perfis utilizados na armadura de pressão.	27
Figura 7 – Conector (<i>end fitting</i>) instalado em um trecho de duto flexível.....	30
Figura 8 – Conector convencional proposto pela norma API RP 17B.	31
Figura 9 - Etapa de dobramento dos fios das camadas de tração durante procedimento de montagem do conector.....	32
Figura 10 – Região afetada pela curvatura decorrente da dobra dos fios.	33
Figura 11 – Detalhamento do conector do tipo foldless.	35
Figura 12 – Modelo tridimensional do conector foldless montado no duto flexível....	36
Figura 13 – Bend stiffener sendo retirado de operação.	38
Figura 14 – Fios rompidos por fadiga na região do conector.	41
Figura 15 – Distâncias interplanares de grãos em um material isento de tensões residuais.....	44
Figura 16 – Distâncias interplanares de diferentes grãos de um corpo sob um campo de tensões. Distâncias sofrem alterações dependendo da posição relativa entre campo e grão.	44
Figura 17 – Equipamento portátil de medição de tensões residuais baseado na técnica de difração de raios X.	45
Figura 18 – Extensômetro (<i>strain gauge</i>) em seu modelo elementar padrão.....	46
Figura 19 – <i>Strain gauge</i> instalado sobre a superfície de fio da armadura de tração.	47
Figura 20 – Modelos de ancoragem utilizados no trabalho.	49
Figura 21 – Modelo de conector utilizado no ensaio experimental.....	50
Figura 22 – Bancada utilizada no ensaio experimental, onde: (1) Amostra de duto flexível de 2,5“ com conectores nas extremidades; (2) Bancada utilizada no ensaio; (3) Atuador hidráulico.	51
Figura 23 – Modelo que simula etapas de dobramento e desdobramento do fio durante processo de montagem do conector.	52

Figura 24 – Vista que mostra o perfil dos fios da armadura de tração dentro dos conectores do tipo convencional e <i>foldless</i> .	53
Figura 25 – Modelo tridimensional do projeto do conector <i>foldless</i> utilizado nos trechos de duto de 2,5”.	55
Figura 26 – Gabarito utilizado nos ensaios com o objetivo de suavizar a dobra dos fios, sendo: (1) Perspectiva do modelo do gabarito de dobra; (2) Perspectiva em corte do gabarito; (3) Vista em detalhe da seção transversal do gabarito.	57
Figura 27 – Árvore de amostragem do procedimento experimental.	58
Figura 28 – Desenho esquemático do perfil do duto flexível utilizado no trabalho mostrando a divisão em 6 partes idênticas (sextantes) e como foram nomeados em cada caso.	59
Figura 29 – Extremidade do duto flexível após etapa de inserção da cunha durante processo de montagem de conector.	60
Figura 30 – Identificação e instalação de extensômetros sobre os fios que serão monitorados.	60
Figura 31 – Difratometro de raios X realizando a leitura de tensões residuais nos fios da armadura de tração na etapa pré-montagem.	61
Figura 32 – Etapas do processo de montagem do conector <i>foldless</i> que implicam em na manipulação dos fios em níveis elevados: (1) Etapa que corresponde a limpeza dos arames da armadura de tração; (2) Etapa de retirada e limpeza das camadas mais internas; (3) Etapa de conformação das extremidades dos fios para sistema de ancoragem; (4) Acomodamento dos fios para fechamento da jaqueta.	62
Figura 33 – Medições de tensões residuais nos fios no cenário pós etapas da montagem do conector.	63
Figura 34 – Modelo numérico contemplando componentes e suas respectivas malhas.	64
Figura 35 - Árvore de amostragem do procedimento numérico.	66
Figura 36 – Modelo computacional representando a manipulação de fio durante a montagem do conector.	67
Figura 37 – Modelo numérico com o detalhe mostrando a região criada que representa o <i>gauge</i> virtual.	68
Figura 38 – Gráfico que representa o ensaio de tração no fio da armadura de tração.	71

Figura 39 – Gráfico que mostra a tensão máxima e mínima registrada em cada fio monitorado.	74
Figura 40 – Relação de pontos aquisitados que ultrapassaram o limite do escoamento do material.....	76
Figura 41 – Tensões residuais induzidas no sentido longitudinal dos fios da armadura de tração.	78
Figura 42 – Tensões residuais induzidas no sentido transversal dos fios da armadura de tração.	78
Figura 43 – Média das tensões residuais induzidas nos sentidos longitudinal e transversal dos fios por conectores.....	80
Figura 44 – Esquema mostrando a simulação 4 na condição deformada e o gráfico de tensões lidas pelo <i>gauge</i> virtual.	82
Figura 45 – Esquema mostrando a simulação 8 na condição deformada e o gráfico de tensões lidas pelo <i>gauge</i> virtual.	83
Figura 46 – Gráfico para comparação dos valores de tensão obtidos com os <i>gauges</i> no processo experimental e numérico nos casos que não utilizam o gabarito de dobra.	87
Figura 47 - Gráfico para comparação dos valores de tensão obtidos com os <i>gauges</i> no processo experimental e numérico nos casos que utilizam o gabarito de dobra..	88
Figura 48 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 1.1 e 2.1 no conector 1.....	98
Figura 49 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 3.1 e 4.1 no conector 1.....	99
Figura 50 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 5.1 e 6.1 no conector 1.....	100
Figura 51 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 7.1 e 8.1 no conector 2.....	101
Figura 52 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 9.1 e 10.1 no conector 2.....	102
Figura 53 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 11.1 e 12.1 no conector 2.....	103
Figura 54 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 13.1 e 14.1 no conector 3.....	104
Figura 55 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 15.1 e 16.1 no conector 3.....	105
Figura 56 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 17.1 e 18.1 no conector 3.....	106
Figura 57 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 19.1 e 20.1 no conector 4.....	107
Figura 58 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 21.1 e 22.1 no conector 4.....	108
Figura 59 - Dados aquisitados pelos <i>gauges</i> 23.1 e 24.1 no conector 4.....	109
Figura 60 - Versões finais das simulações nos níveis 20 e 30 mm dos parâmetros pré estabelecidos com uso de gabarito de dobra.	114

Figura 61 - Versões finais das simulações nos níveis 40 e 50 mm dos parâmetros pré estabelecidos com uso de gabarito de dobra.....	115
Figura 62 - Versões finais das simulações nos níveis 20 e 30 mm dos parâmetros pré estabelecidos sem uso de gabarito de dobra.....	116
Figura 63 - Versões finais das simulações nos níveis 40 e 50 mm dos parâmetros pré estabelecidos sem uso de gabarito de dobra.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados característicos do duto flexível de 2,5” utilizado nos experimentos.	55
Tabela 2 – Especificação dos <i>strain gauges</i> utilizados no modelo experimental	56
Tabela 3 – Especificação do difratômetro de raios X utilizado no modelo experimental.	56
Tabela 4 – Especificação de malha utilizada nos componentes do modelo numérico.	65
Tabela 5 – Resumo do teste de convergência de malha para definição do parâmetro do modelo numérico.....	69
Tabela 6 – Dados extraídos das amostragens dos ensaios de tração nos fios da armadura de tração.....	71
Tabela 7 – Tensões máximas e mínimas, e desvio padrão dos valores medidos durante a aquisição dos <i>strain gauges</i>	73
Tabela 8 – Comparativo de dados das leituras dos extensômetros entre parâmetros.	75
Tabela 9 – Comparativos de dados das medições com DRX entre parâmetros.	79
Tabela 10 – Resultados das simulações do modelo numérico.....	84
Tabela 11 – Comparativo de tensões máx. e mín. entre as simulações que utilizam ou não gabarito de dobra.	86
Tabela 12 - Dados das leituras de TR do conector 1.	110
Tabela 13 - Dados das leituras de TR do conector 2.	111
Tabela 14 - Dados das leituras de TR do conector 3.	112
Tabela 15 - Dados das leituras de TR do conector 4.	113

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS DO TRABALHO	18
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO BRUTO NO OCEANO	19
3.2 DUTOS FLEXÍVEIS.....	22
3.2.1 Configurações de utilização de risers	23
3.2.2 Estrutura do duto flexível	25
3.2.2.1 Carcaça interna (carcaça intertravada)	25
3.2.2.2 Barreira de vedação	26
3.2.2.3 Armadura de pressão	26
3.2.2.4 Armadura de tração.....	27
3.2.2.5 Fitas de alta resistência.....	27
3.2.2.6 Capa externa.....	28
3.2.2.7 Camadas adicionais	28
3.3 ACESSÓRIOS.....	29
3.3.1 O conector de duto flexível	29
3.3.1.1 Conector do tipo convencional	30
3.3.1.1.1 Pontos relevantes do conector convencional	33
3.3.1.2 Conector do tipo <i>foldless</i>	34
3.3.2 Enrijecedores à flexão (<i>Bend stiffeners</i>)	38
3.4 FALHAS EM DUTOS FLEXÍVEIS	39
3.4.1 Falha por fadiga	40
3.5 TENSÕES RESIDUAIS.....	42
3.5.1 Determinação de tensões residuais	43
3.5.1.1 Difração de raios X (DRX)	43
3.5.1.2 Extensometria (Strain Gauges)	46
3.6 TRABALHOS PUBLICADOS (ARTIGOS, TESES, DISSERTAÇÕES)	48
4 METODOLOGIA	54
4.1 MODELO EXPERIMENTAL	54
4.1.1 Amostra base	54

4.1.2 Recursos utilizados.....	56
4.1.3 Procedimento	58
4.2 MODELO NUMÉRICO	63
4.2.1 Geometria.....	64
4.2.2 Modelo.....	64
4.2.3 Procedimento	65
4.2.4 Teste de convergência de malha	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
5.1 AVALIAÇÃO GERAL DO PROCEDIMENTO DE MONTAGEM DO CONECTOR FOLDLESS.....	70
5.1.1 Método experimental.....	70
5.1.1.1 Medições de deformação	70
5.1.1.2 Medições de tensões residuais	77
5.1.2 Método numérico	81
5.1.3 Comparação nos resultados experimentais e numéricos	86
6 CONCLUSÃO	90
7 PROPOSTAS DE FUTUROS TRABALHOS	92
REFERÊNCIAS.....	93
APÊNDICE A – DADOS DE MONITORAMENTO DAS DEFORMAÇÕES PELOS STRAIN GAUGES	98
APÊNDICE B – DADOS DAS LEITURAS DE TENSÕES NAS SUPERFÍCIES DOS FIOS COM DRX.....	110
APÊNDICE C – IMAGENS DAS SIMULAÇÕES NOS DIFERENTES PATAMARES DE DESLOCAMENTO DO FIO E USO DE GABARITO DE DOBRA	114

1 INTRODUÇÃO

Mesmo com o horizonte indicando um futuro com matrizes energéticas renováveis ocupando cada vez mais espaço, o petróleo e o gás ainda projetam como protagonistas no cenário mundial por algumas décadas. No cenário nacional, a operação com petróleo representa uma fatia considerável da economia, podendo influenciar diretamente nos principais índices de mercado brasileiro (IEA, 2011).

Com o desenvolvimento tecnológico tornou-se possível o descobrimento de campos de petróleo localizados em maiores profundidades na costa brasileira. Diante da possibilidade de exploração destes campos, o Brasil tem aumentado os patamares de produção de petróleo e se tornado cada vez mais competitivo a nível mundial.

Com a crescente produção de petróleo oriunda de águas mais profundas e operações cada vez mais críticas, a utilização de dutos flexíveis no processo de extração vem se tornando uma prática cada vez mais comum. Isso se dá por conta de suas específicas propriedades que aliam flexibilidade e elevada rigidez ao conjunto, proporcionando facilidade de manuseio e instalação durante os processos (MARINHO et al., 2007).

Devido a larga escala de utilização desses componentes estruturais e seus respectivos acessórios, a demanda relacionada a pesquisa e desenvolvimento de melhorias de desempenho estruturais e operacionais desses componentes é fomentada. A possibilidade de aumento de vida útil dos componentes que integram o sistema de produção, principalmente os considerados críticos, como o duto flexível e o conector, são grandes motivadores de estudos direcionados, bem como o presente trabalho (NEGREIROS, 2016).

O duto flexível possui propriedades mecânicas altamente desejadas para sistemas de produção, e isso se deve por conta de sua estrutura que intercala camadas metálicas, que proporcionam resistência mecânica e suporte aos esforços de tração e pressão, e camadas poliméricas que por sua vez contribuem de forma a isolar o meio externo do material a ser transportado internamente nos dutos. Se analisadas de forma isoladas apresentam suas particularidades, em conjunto concedem ao componente alta durabilidade mesmo em condições adversas (NEGREIROS, 2016).

Como são componentes extremamente críticos no processo de extração de petróleo, pois uma eventual falha pode ocasionar danos catastróficos sob a ótica ambiental e econômica, os dutos flexíveis seguem um rigoroso processo de produção. Durante esse processo, a camada metálica responsável por suportar os esforços de tração passa por uma etapa de conformação mecânica, o que induz tensões residuais na parte estrutural desta (fios metálicos) de forma homogênea ao longo do duto (XAVIER, 2009).

Outro componente crítico, tão importante quanto o duto flexível, é o conector. Esses acessórios são conectados aos terminais de dutos para interligação com os demais componentes do sistema, ou ainda, com outro trecho de duto. O conector do tipo *foldless*, desenvolvido com o objetivo de evitar danos à armadura de tração (camada de fios de aço responsável por suportar esforços trativos) e consequentes falhas no conjunto duto / conector, contempla um processo de montagem mais suave, quando comparado aos outros tipos de conectores. Para isso, a etapa que contempla a dobra dos fios da armadura de tração, antes necessária em outros tipos de conectores, é sucumbida e os fios sofrem apenas pequenas conformações, e decorrentes tensões residuais induzidas, que são impostas devido ao manuseio desses para demais etapas de montagem (CAMPELLO, 2014).

Como objeto de estudo, o presente trabalho apresenta uma abordagem avaliativa da influência do dobramento dos fios durante o processo de montagem de um conector do tipo *foldless* na indução de tensões residuais indesejadas nestes que compõem a camada responsável por suportar os esforços de tração no conjunto dos dutos flexíveis. Como objetivo, o trabalho visa estabelecer um limite para a dobra dos fios durante a montagem utilizando métodos numérico e experimental.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O presente trabalho tem como objetivo principal determinar o nível de tensões que o processo de montagem do conector do tipo *foldless* induz nos fios da camada de tração do duto flexível a partir de ensaios experimentais, onde os ensaios são realizados utilizando amostras reais, e numéricos, com o recurso computacional simulando a condição real. De uma maneira geral, a ideia é estabelecer o efeito deletério do dobramento dos fios durante a montagem do conector, por meio da avaliação das tensões residuais induzidas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, pode-se salientar:

- Comparar resultados com os demais obtidos na literatura;
- Determinar o limite máximo de abertura dos fios durante o processo de montagem do conector para evitar a geração de tensões residuais acima de um limite considerável danoso para a integridade do componente;
- Utilizar o recurso numérico para obtenção de um modelo computacional simplificado e simulação da manipulação dos fios durante a montagem do conector;
- Propor soluções de dobra durante o processo de montagem do conector para evitar o assentamento do fio sobre o canto vivo da cunha, componente na qual fica em contato direto com o fio durante a montagem no atual modelo, com a ideia de reduzir o grau concentrador de tensão no fio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado um compilado de informações e conhecimentos presentes na literatura que servirão como base para o desenvolvimento do trabalho. A ideia é realizar uma abordagem geral, contemplando:

- O sistema de produção de petróleo como um todo, afunilando em componentes e elementos mais específicos que serão o foco do trabalho;
- Os métodos de falhas mais comuns em sistemas de extração e transporte de petróleo;
- Tensões residuais em materiais metálicos, e métodos e técnicas utilizados para determinação dessas tensões;
- Estudos de demais pesquisadores relacionados a melhoria de desempenho de dutos flexíveis e que evidenciam importantes resultados já alcançados.

Com a leitura do capítulo, será proporcionado ao leitor o embasamento necessário para compreender o desenvolvimento do trabalho, bem como os resultados e discussões, e conclusões alcançadas.

3.1 INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO BRUTO NO OCEANO

As instalações de produção de petróleo bruto no oceano (instalações *offshore*) são projetadas e construídas com o intuito de extrair petróleo no oceano, muito utilizadas em locais onde a profundidade da água é bastante elevada, e com as reservas de material bruto abundantes (O PETRÓLEO, 2017).

Partindo do ponto zero, a etapa inicial abrange a descoberta, identificação e mapeamento de poços. Com as instalações posicionadas e devidamente operando, o petróleo passa a ser produzido em campos localizados em níveis abaixo da superfície oceânica e é geralmente transportado até UEPs (Unidades estacionárias de produção) por meio de conjuntos que contemplam dutos flexíveis e demais acessórios (PETROBRAS, 2014).

As UEPs são basicamente estruturas que se destinam a exploração de petróleo no mar. Além de extrair a matéria-prima bruta, tem como demais funções a separação do produto extraído em óleo, água e gás e a destinação de cada uma das substâncias

distintas. São geralmente projetadas baseadas na produção esperada dos poços, a profundidade do local onde está instalada e o número de poços no qual irá atender.

Dentre os tipos de UEPs existentes, a mais representativa, por ter a maior parcela das unidades produzidas e instaladas no Brasil, é a FPSO (Unidade estacionária de produção, armazenagem e transferência). Na Figura 1 é mostrado uma FPSO em operação. Este tipo de unidade em geral é caracterizada como plataforma flutuante convertida a partir de um navio cargueiro. Apresenta bastante versatilidade e seu projeto e construção é considerada menos complexa e onerosa. Ainda, pode ser instalada em lâminas d'água com grandes elevações, característica bem quista pelas empresas responsáveis visando o futuro da extração (PETROBRAS, 2014).

Figura 1 – Unidade de produção, armazenagem e transferência (FPSO).

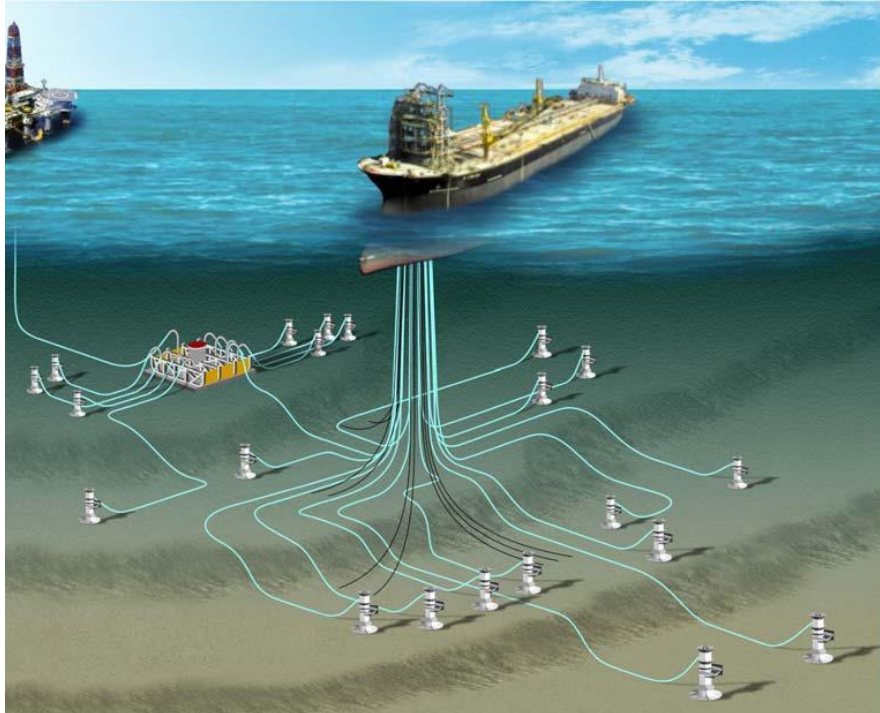


Fonte: Página da empresa Orwell offshore

Disponível em: <www.orwelloffshore.com>. Acesso em: 23 set. 2021.

A parcela do sistema que fica submersa, abaixo da superfície marítima, envolve componentes que fazem a ligação entre a UEP e o poço. Dentre os componentes, podemos citar os *manifolds*, cabos eletro-hidráulicos, dutos e respectivos acessórios. A Figura 2 esquematiza de forma superficial a arquitetura do sistema de extração de petróleo ligados a UEP (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Figura 2 – Disposição de poços no leito submarino e conexões flexíveis.



Fonte: Página do Diário do Pré-Sal

Disponível em: <www.diariodopresal.wordpress.com>. Acesso em: 23 set. 2021.

Os *manifolds* são equipamentos que tem a função de reunir e direcionar o fluxo do material bruto extraído de diferentes pontos em uma linha interligada a plataforma. Como geralmente são posicionados no fundo do mar e contemplam um sistema hidráulico que tem necessidade de ser controlado e monitorado da UEP, operam interligados por cabos eletro-hidráulicos (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Em sistemas *offshore* o petróleo produzido, que é originário dos poços localizados no fundo do oceano, é transporado até as Unidades estacionárias de produção por meio de dutos.

Dentre os tipos de dutos existentes, são basicamente utilizados os dutos rígidos e os flexíveis. Devido a uma combinação de flexibilidade e rigidez axial, que proporcionam facilidade de manipulação e custo reduzido de instalação, os dutos flexíveis vem conquistando cada vez mais espaço nos sistemas de produção no mar (CAMPELLO, 2014).

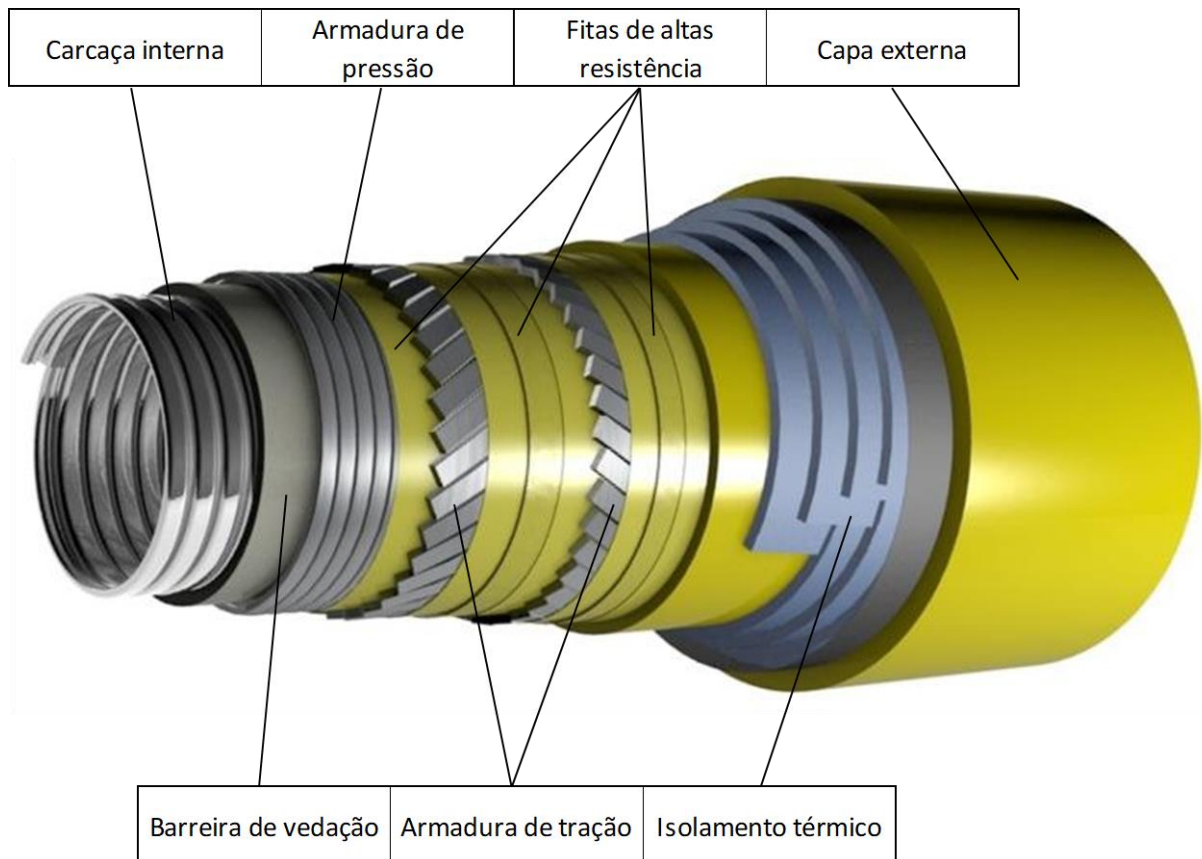
Por fim, ainda como partes integrantes do sistema, tem-se os acessórios. Estes são acoplados a linha, como o conector que faz a interligação entre dois trechos de dutos flexíveis, e o *bend-stiffener* que corresponde a um reforço nas extremidades dos

dutos a fim de aumentar a rigidez do conjunto e limitar as tensões de flexão e a curvatura (ABCO Subsea, 2019).

3.2 DUTOS FLEXÍVEIS

O duto flexível corresponde a uma estrutura complexa constituído por várias camadas de materiais, cada qual com sua particularidade de composição e função provida a estrutura. A Figura 3 mostra a ordenação típica de um duto flexível, com seus principais níveis estruturais (MONTENEGRO, 2012).

Figura 3 – Dutos flexível representado em camadas.



Fonte: Adaptado de Montenegro, 2012.

Basicamente, o duto é integrado por camadas poliméricas impermeáveis que mantêm isolado o material transportado do duto, camadas de fios metálicos robustos o suficiente para fornecer resistência necessária aos carregamentos impostos durante a operação e camadas poliméricas, mais externas, que previnem o contato e a ação da água do mar junto as camadas metálicas. Cada camada tem sua função individual,

porém no conjunto oferecem as características necessárias para formar o duto, como resistência a esforços mecânicos e estanqueidade aliados a uma boa flexibilidade (BRAESTRUP *et al.*, 2005).

Como características contrutivas, o duto flexível possui estruturas em camadas, intercalando entre partes de materiais poliméricos, metálicos e compósitos. Essa configuração concede ao duto uma combinação de alta rigidez axial sob esforços de tração, alta resistência à pressão de fluidos internos e externos, e baixa rigidez à esforços de flexão, sendo esse último seu grande diferencial em relação aos dutos rígidos (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014; VAZ; RIZZO, 2011).

Devido a sua finalidade de aplicação, os dutos flexíveis podem ser classificados como *risers* (dutos sujeitos a carregamentos dinâmicos), que correspondem ao trechos que fazem a ligação entre a unidade de produção a base do oceano tendo cargas oriundas da ação das ondas, e *flowlines* (dutos para aplicações estáticas), que correspondem aos trechos arranjados na base do oceano que fazem a ligação da extremidade inferior do *riser* ao poço (MONTENEGRO, 2012).

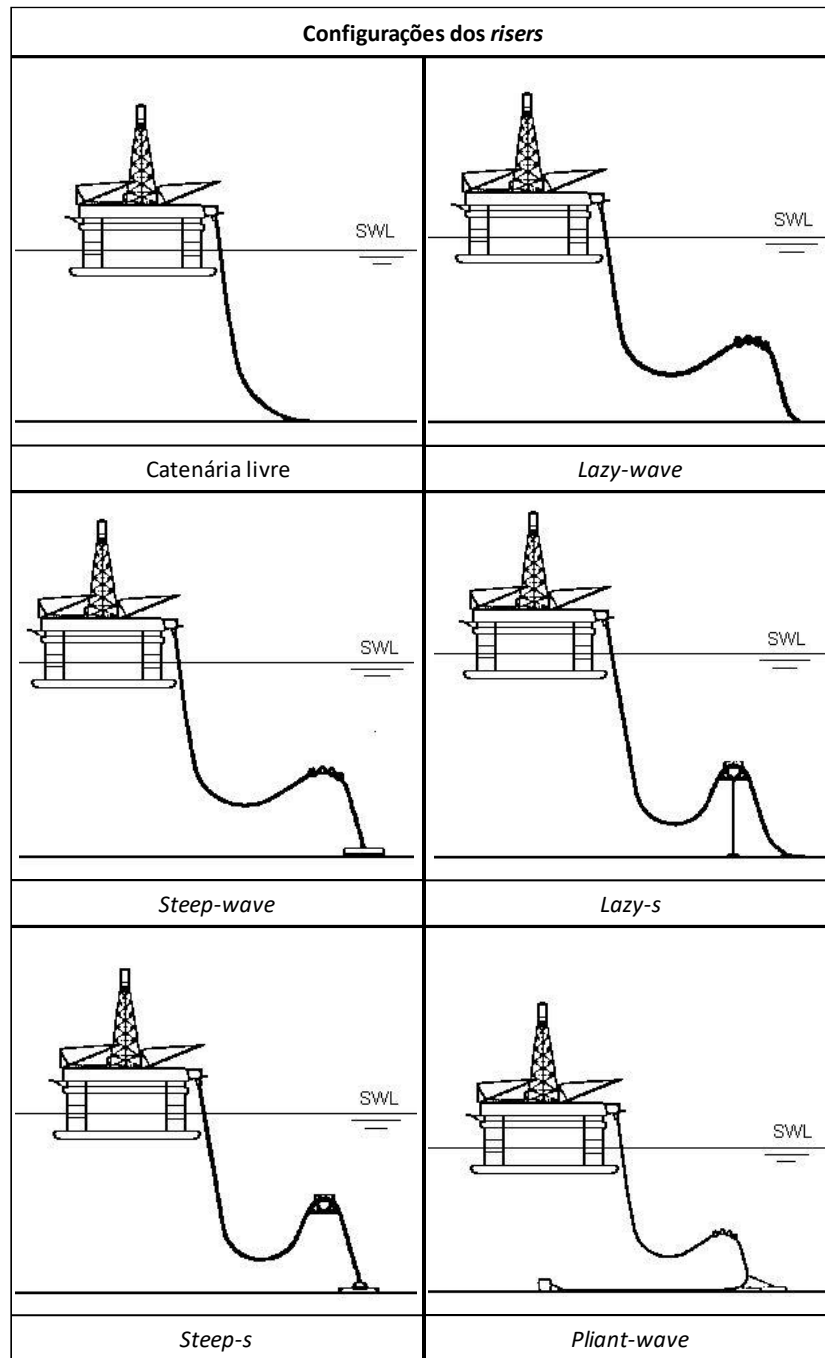
Na sequência, é descrito uma breve caracterização da classificação de dutos flexíveis, com a distinção entre os tipos.

- *Flowline*: trecho em que o duto está posicionado horizontalmente disposto sobre o fundo do mar, e possui grande parcela do carregamento estático;
- *Riser*: trecho em que o duto se encontra na posição vertical, interligado a extremidade do trecho horizontal a UEP, e de carregamento dinâmico predominante.

3.2.1 Configurações de utilização de *risers*

Os *risers* podem ser operados nas mais diversas configurações, sendo que as opções que fogem do modelo convencional tem como objetivo redução das cargas implicadas sobre os componentes do sistema. As principais configurações de utilização de *risers* são representados na Figura 4. (COUTINHO, 2018).

Figura 4 - Configurações de utilizações de risers.



Fonte: Adaptado de Coutinho (2018).

A configuração de catenária livre, ou configuração convencional, pode ser considerada a forma mais elementar de lançamento do riser. Nesse modelo, a carga total fica submetida sobre a conexão na unidade flutuante que é imposta pela própria massa do duto em suspensão, e este tem a orientação alterada, de vertical para horizontal, apenas na medida que se aproxima da superfície terrestre no fundo do mar (COUTINHO, 2018).

As demais configurações ilustradas na Figura 4, (*Lazy-wave*, *Steep-wave*, *Lazy-s*, *Steep-s*, *Pliant-wave*) utilizam componentes flutuadores intermediários para reduzir a carga imposta à conexão com a unidade flutuante. Diferem entre eles com o tipo de flutuador utilizado e da posição que o flutuador é instalado ao longo da linha (MONTENEGRO, 2012).

3.2.2 Estrutura do duto flexível

Nesta seção serão apresentadas, de forma detalhada, as camadas que formam a estrutura do duto flexível.

É relevante ressaltar a complexidade tanto do componente duto flexível quanto das condições de operação deste. A estrutura pode ser considerada com um status recorrente de aperfeiçoamento, uma vez que melhorias são realizadas e necessárias para as diferentes formas de operação.

Devido as condições na qual serão impostas durante a operação, os dutos podem ter algumas configurações de estruturas diferentes, mantendo uma mesma base mas com utilização de algumas camadas extras. Neste capítulo serão abordadas as camadas estruturais mais usuais (XAVIER, 2009; MONTENEGRO, 2012).

3.2.2.1 Carcaça interna (carcaça intertravada)

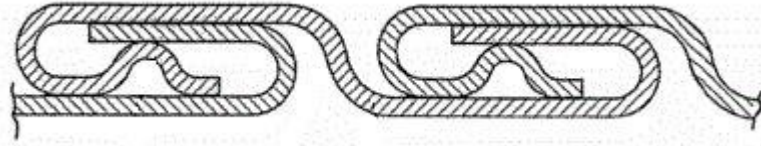
A carcaça interna é a camada mais interna, constituída de perfil metálico, fabricada e montada no duto de tal forma que contemple intertravamento. Por ser a camada mais interna da estrutura, conforme pode ser visto na Figura 3, permanece sempre em contato com o material transportado durante operação (DE SOUSA, 2005).

O principal objetivo da camada interna é fornecer resistência suficiente ao duto para que suporte os esforços oriundos de fora do duto, como esmagamentos e pressão hidrostática e evitar a falha em eventuais descompressões internas (DE SOUSA, 2005).

O perfil da carcaça interna é apresentado na Figura 5. É fabricada a partir de perfis planos de aço conformados de maneira que cada passo seja ordenado e se torne parte da estrutura intertravada. Como fica em contato direto com o fluido a ser

transportado, o material escolhido para fabricação deve conter boas propriedades de resistência a corrosão (CAMPELLO, 2014).

Figura 5 – Perfil da carcaça interna.



Fonte: Adaptado de Montenegro, 2012.

3.2.2.2 Barreira de vedação

A camada de vedação, como é conhecida, é fabricada de material polimérico que sofre processo de conformação sobre a carcaça interna, conforme é ilustrado na Figura 3. A principal função é garantir a vedação do duto flexível, evitando que o material conduzido tenha contato com os demais níveis adjacentes, e também com o ambiente externo. Sobre o material, pode variar dependendo tanto do fluido quanto da temperatura na qual será transportado (BERGE, et al., 1992; CAMPELLO, 2014).

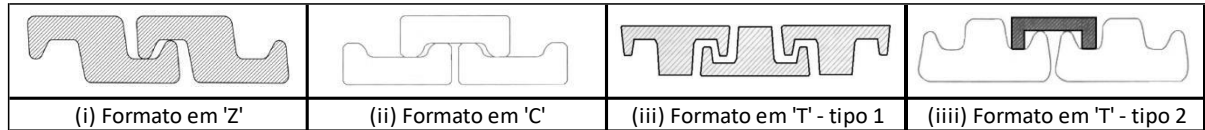
3.2.2.3 Armadura de pressão

O nível que diz respeito a armadura de pressão consiste em uma estrutura de material metálico conformado, a partir de perfis de aço comerciais, montado e acomodado seguindo um padrão helicoidal, formando um ângulo próximo a 90° em relação ao eixo longitudinal do duto, conforme é mostrado na Figura 3. Devido a essa configuração, apresenta elevada rigidez radial (API RP 17B, 2014; NEGREIROS, 2016).

Serve como reforço estrutural, uma vez que a principal função da armadura é oferecer resistência suficiente às cargas impostas pela pressão interna. Além disso, auxilia o conjunto a resistir as cargas radiais demandadas por pressões externas (XAVIER, 2009; NEGREIROS, 2016).

As tiras de aço, antes de serem assentadas, são conformadas em perfis, sendo que os mais usuais são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Perfis utilizados na armadura de pressão.



Fonte: Adaptado de NEGREIROS (2016).

3.2.2.4 Armadura de tração

Os níveis atribuídos a dar suporte a esforços de tração correspondem a camadas de fios metálicos, geralmente de perfil retangular com bordas arredondadas, montados no formato helicoidal formando um ângulo pequeno com o eixo do tubo, conforme mostra a Figura 3. Estão presentes nos dutos em números par, sendo bem usual a configuração com 2 camadas de tração e montados em sentido de hélice opostos, fato esse justificado pelo balanceamento de cargas na medida que o duto for tracionado (DE SOUSA, 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Sob a ótica estrutural, são essenciais para o conjunto que forma o duto flexível, uma vez que sua função é fornecer resistência necessária a todo o carregamento axial gerado, sendo ele oriundo de esforços de tração, flexão, pressão interna e até mesmo torção (LEMOS, 2005; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014; XAVIER, 2009).

Usualmente, os fios da armadura de tração são fabricados em aço carbono de alta resistência ao escoamento. Porém, podem ter alteração no material devido as condições de operação que serão submetidas, como em situações severas onde a armadura fica exposta a um ambiente corrosivo, especialmente pelo contaminante H₂S (BRAESTRUP et al., 2005; DE SOUSA, 2005).

3.2.2.5 Fitas de alta resistência

As bandas de elevada resistência, também chamadas de anti-desgaste, são camadas poliméricas intermediárias as armaduras metálicas, conforme é mostrado na Figura 3, que tem como objetivo suavizar o desgaste pelo contato direto entre as armaduras quando em operação, casos em que estão sujeitos a flexões cíclicas e

elevada pressão de contato provocadas pela pressão interna e pela tração do duto. A função deste componente é melhorar o desempenho do conjunto em fadiga, uma vez que reduz a resistência ao atrito e também o desgaste dos níveis constituídos de material metálico causado pela não uniformidade do movimento entre estas (API RP 17B, 2008; CAMPELLO, 2014).

3.2.2.6 Capa externa

O nível mais externo do duto pode ser definido como uma capa de material polimérico que tem como função criar uma barreira aos agentes mecânicos além de evitar que os fios de aço das camadas adjacentes estejam submetidos ao contato explícito com a água do mar e crie um ambiente propício à corrosão. Na Figura 3 é representado a capa externa na estrutura do duto flexível (API RP 17B, 2008; LEMOS, 2005; XAVIER, 2009).

Os principais materiais utilizados nesta camada são termoplásticos do tipo poliamida ou polietileno de alta densidade (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014; DE SOUSA, 2005).

Esta camada, em conjunto com a barreira de vedação (item 2.2.2.2), delimita o espaço anular do conjunto duto flexível, espaço este que corresponde a uma região interna no duto que conta com um baixo volume sem ocupação. Isso acontece por conta das camadas intermediárias presente nessa região. As camadas poliméricas que fazem o contorno do anular são as que promovem vedação junto aos conectores (API RP 17B, 2008; NEGREIROS, 2016).

3.2.2.7 Camadas adicionais

No conjunto do duto flexível podem ser utilizadas camadas adicionais, que não são consideradas tão usuais, dependendo especificamente do tipo de aplicação ou necessidade do processo.

A transferência de calor que ocorre durante o processo e que se dá por meio do conjunto de camadas do duto para o meio externo pode causar problemas, permitindo que o petróleo a ser transportado parafine a baixas temperaturas. Para evitar esse

tipo de problema, são utilizados dutos com uma camada adicional de isolante térmico, conforme mostra a Figura 3 (MONTENEGRO, 2012).

Devido a vulnerabilidade do duto flexível a carregamentos de torção e compressão axial, característica que pode causar um desarranjo dos níveis correspondentes as armaduras de tração ou a flambagem dos fios destas durante a operação, são utilizadas fitas antiflambagem. Essas são posicionadas na parte externa da armadura de tração que esta arranjada mais distante do centro do duto. Normalmente são fabricadas de fibra de vidro ou aramida (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Em outros casos, com a necessidade de utilização de materiais com melhor desempenho estrutural, aços que apresentam maiores resistências também são mais suscetíveis a fragilização e corrosão sob tensão proveniente do contato com gases contaminantes. Assim, é prudente a utilização de uma camada polimérica adicional, que previne a permeação de gases para as camadas internas do duto (VIDIGAL et al., 2017).

3.3 ACESSÓRIOS

Os acessórios podem ser definidos como componentes que são instalados de forma adjacentes aos dutos flexíveis, e que desempenham funções essenciais no sistema, como fornecer interligações entre trechos que garantam transição estrutural e vedação, manter o duto dentro do padrão de desempenho, conceder uma rigidez adicional a fim de evitar o arqueamento deste (API RP 17B, 2008).

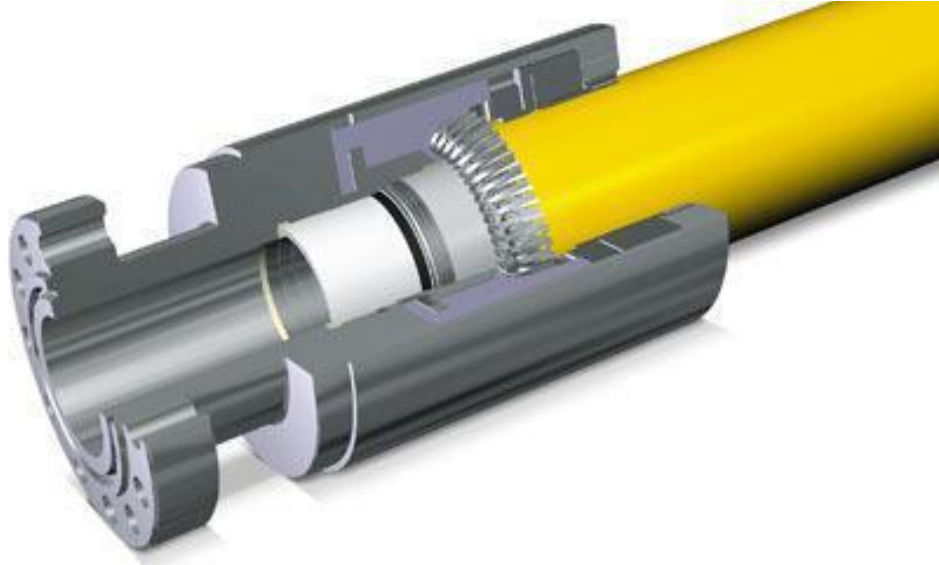
3.3.1 O conector de duto flexível

O conector de duto flexível, que também é conhecido por *end fitting*, apresentado na Figura 7, é o acessório responsável por receber o carregamento axial oriundo da linha e transmitir a UEP, além de assegurar a estanqueidade do fluído transportado (API RP 17B, 2008; CAMPELLO, 2014).

Para realização da montagem de um sistema de escoamento envolvendo dutos flexíveis, é necessário a utilização de conectores. Estes, como são instalados nas

extremidades, proporcionam a interface entre os dutos flexíveis e os demais equipamentos, ou mesmo com outros trechos de dutos.

Figura 7 – Conector (*end fitting*) instalado em um trecho de duto flexível.



Fonte: Página da empresa NKT Flexibles.

Disponível em: <<http://www.nktflexibles.com/en/Products+and+Solutions/End-fittings.htm>>. Acesso em: 23 set. 2021.

Para se projetar uma linha de dutos flexíveis devem ser consideradas premissas, como por exemplo, peso próprio, pressão interna, pressão externa, gradientes de temperatura, correntes marítimas, movimentações da UEP, condições corrosivas dos fluídos. Todavia, as solicitações estruturais geradas na linha oriundas desses parâmetros listados são agravadas na região do conector. Isso acontece em razão de uma alteração geométrica na extremidade do duto flexível produzida pela instalação do acoplamento, e conseqüente aumento de rigidez estrutural. Esse fato torna o *end fitting* um dos pontos críticos, sob a ótica estrutural, no dimensionamento de linha de produção *off-shore*, que contemple a utilização de dutos flexíveis (API RP 17B, 2008; CAMPELLO, 2014; HEPP, 2020).

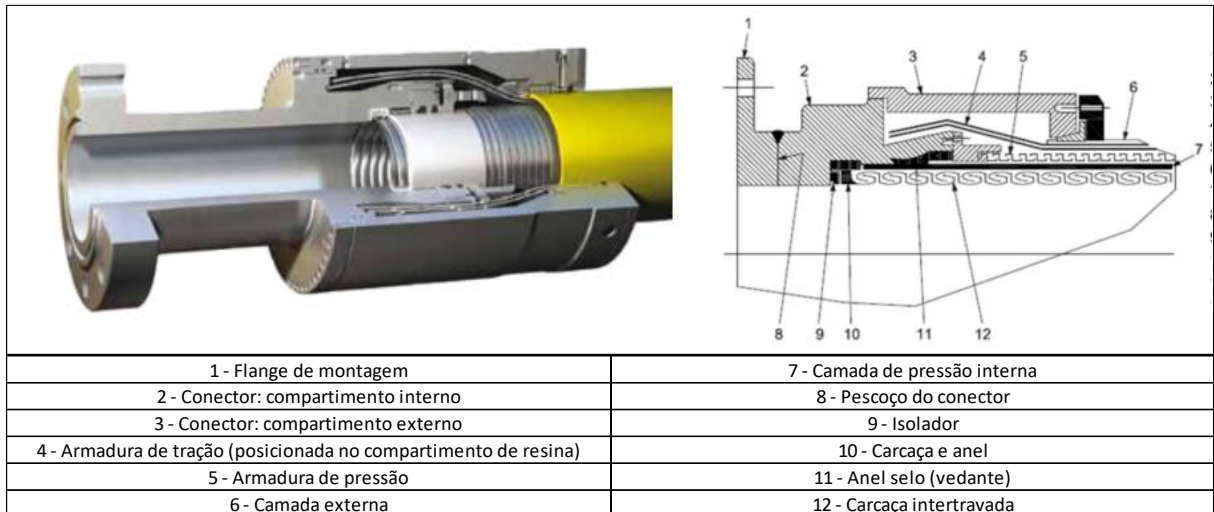
3.3.1.1 Conector do tipo convencional

O conector é projetado para que todas as camadas de um duto flexível sejam terminadas de tal forma que o próprio conector seja parte do conjunto, submetidos a mesma carga e isento de falhas de vedação. Com isso, os esforços oriundos das

linhas de produção, basicamente cargas de tração e flexão, devem ser propagados para o conector de extremidade (DONG et al., 2016).

O conceito do conector que usualmente é utilizado por fabricantes de dutos flexíveis é o do tipo convencional, descrito na norma API RP 17B, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Conector convencional proposto pela norma API RP 17B.

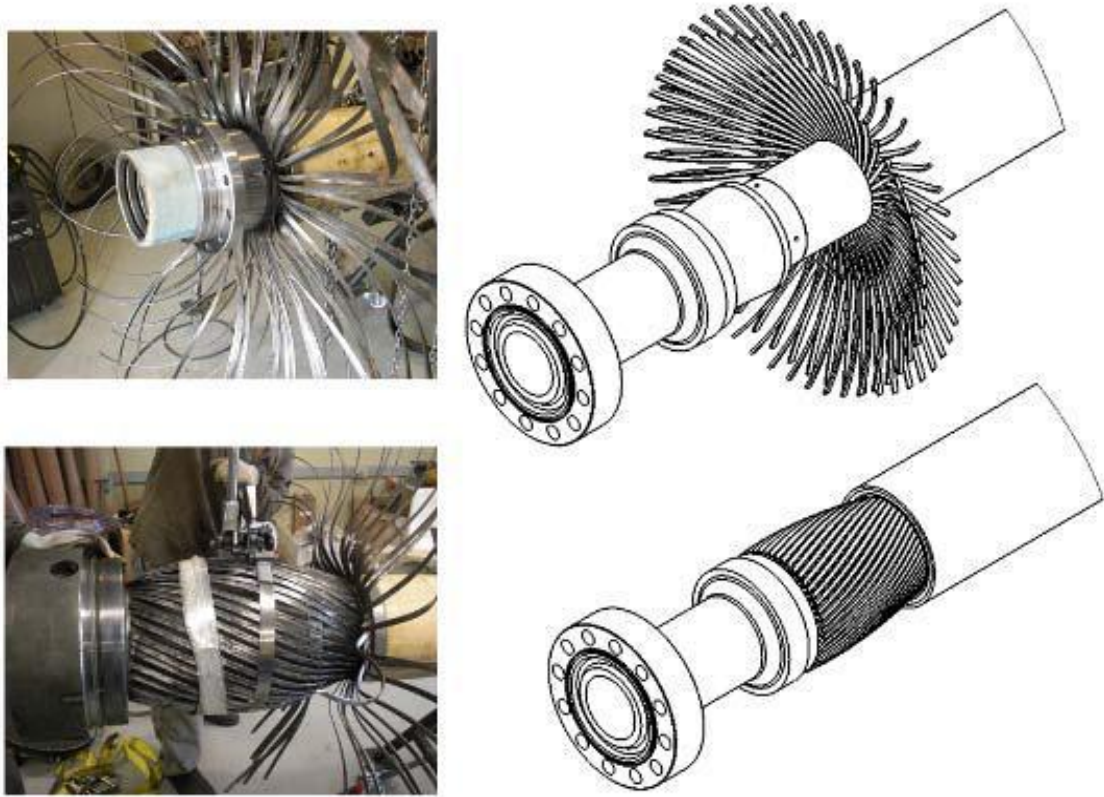


Fonte: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008.

Esse conceito de conector possui algumas peculiaridades que podem ser elencadas, como por exemplo, o sistema de vedação interna que é feito entre a camada de estanqueidade (barreira de vedação) e o end fitting, posicionado abaixo das armaduras de tração e dentro da região de ancoragem, sendo que normalmente é preenchida com resina epóxi (CAMPELLO, 2014; BERTONI, 2017).

Seguindo no detalhamento desse conceito, um ponto importante é referente ao processo de montagem do conector. Nesse processo, é inerente realizar a dobra dos fios das armaduras de tração para possibilitar acesso as camadas mais inferiores. Na prática, normalmente se utiliza um gabarito curvo para realizar a dobra dos fios, sendo que estes permanecem posicionados a aproximadamente 90° com relação ao eixo do duto ao final da etapa, conforme é apresentado na Figura 9. Com os fios conformados e a camada de vedação exposta, é feita a preparação e instalação do sistema de vedação interno. Na sequência, estes são conformados a voltar para a posição original e acomodados novamente sobre o corpo do conector (API RP 17B, 2008)

Figura 9 - Etapa de dobramento dos fios das camadas de tração durante procedimento de montagem do conector.



Fonte: SOUSA et al. (2013).

A montagem do conector convencional contempla várias etapas específicas, que seguem um procedimento padrão. A seguir, serão listadas essas etapas do processo, conforme é descrito pela norma API RP 17B (2008).

“

1. *Corte da capa plástica externa e das fitas de alta resistência (e, se houver, camada de isolamento térmico);*
2. *Bloqueio da armadura de pressão;*
3. *Preparação para vedação externa;*
4. *Dobramento dos fios da armadura de tração;*
5. *Imobilização e corte da armadura de pressão;*
6. *Preparação e realização da vedação interna;*

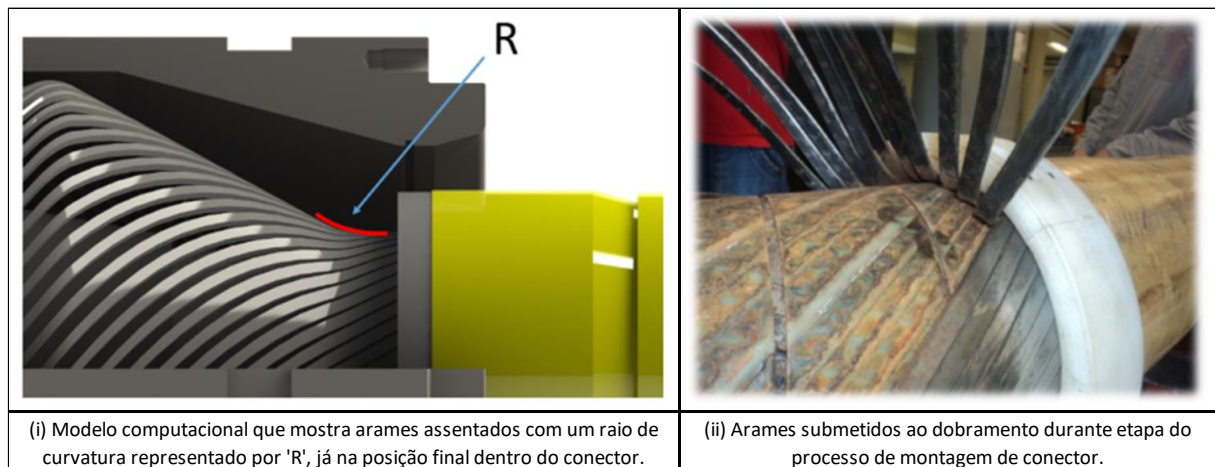
7. *Acabamento e assentamento dos fios da armadura de tração;*
8. *Realização da vedação externa e fechamento do conector;*
9. *Injeção de resina epóxi.*

”

3.3.1.1.1 Pontos relevantes do conector convencional

A instalação do conector em uma extremidade de duto contempla em seu procedimento, etapas que, inevitavelmente, expõem os fios da camada de tração a um dobramento sobre um gabarito, conforme evidenciado no tópico anterior. Diante disso, a conformação ocasionada pela dobra causa alterações nas propriedades do material (encruamento), gerando tensões residuais em diferentes direções e regiões da dobra (torção, flexão), além de acrescentar um concentrador de tensões proporcionado pelo raio de dobramento (R) na região de entrada do *end fitting*, conforme mostra Figura 10, região essa onde ocorre interligação, com a passagem da rigidez estrutural do duto para o conector (BERTONI, 2017).

Figura 10 – Região afetada pela curvatura decorrente da dobra dos fios.



Fonte: Site da empresa Símeros Technologies

Disponível em: <www.simeros.com/end-fitting-para-dutos-flexiveis-unbonded> Acesso em:

23 set. 2021.

Outro fator que agrava ainda mais a situação de montagem, é que esta é realizada de forma 100% manual, ou seja, totalmente dependente do operador. Mesmo com a utilização de gabaritos e dispositivos, é inevitável que tenham-se fios

em diferentes condições de dobra, uma vez que o fator humano é dominante no processo. Essa condição traz prejuízos no que diz respeito ao padrão de montagem de *end fittings* gerando diferentes formas geométricas entre cada unidade de fio da camada de tração na zona em que ocorre a conformação pelo dobramento, o que acarreta uma distribuição de tensões não uniforme entre os fios ao longo do perfil circular do duto (BERTONI, 2017).

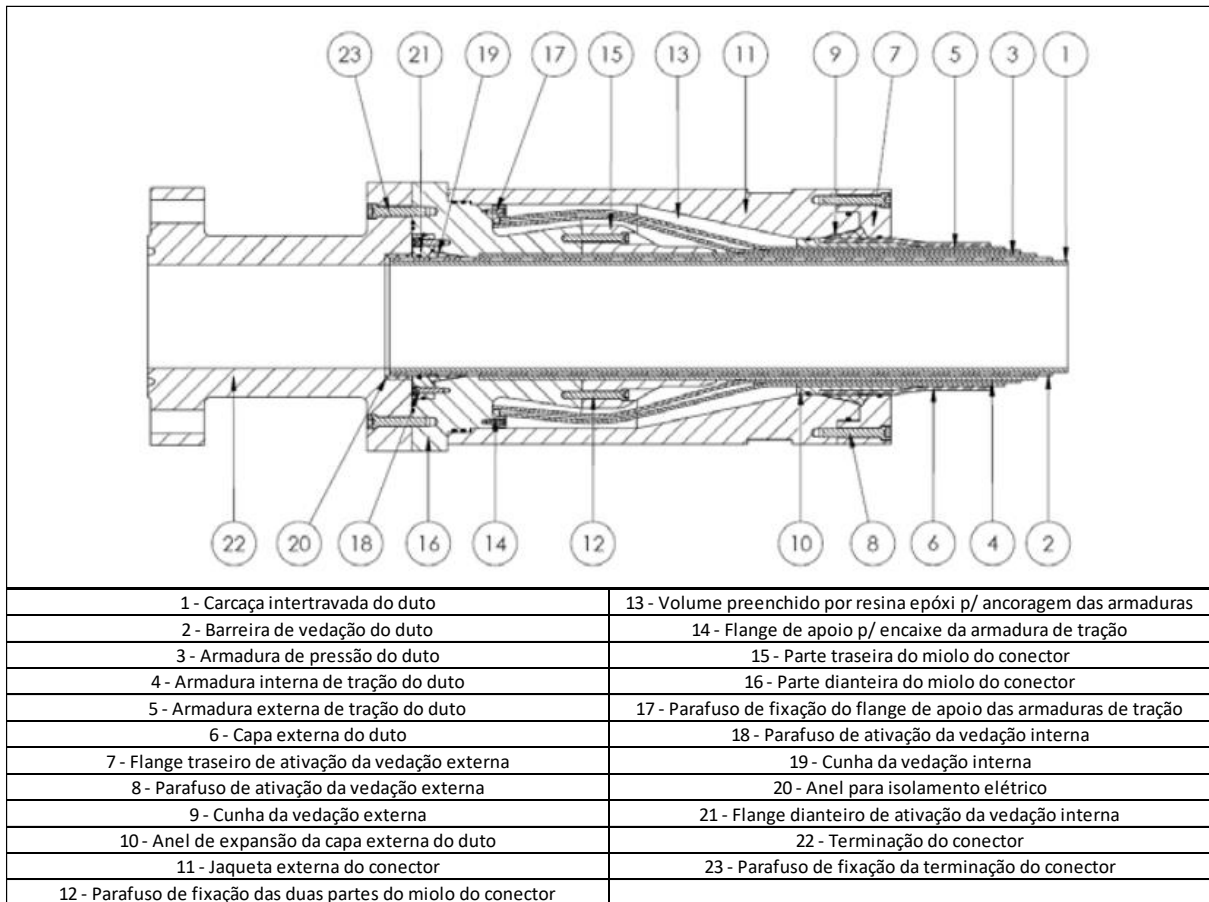
Sob a ótica estrutural do conjunto, as implicações causadas pela conformação dos fios somadas ao fato de estarem sujeitos a sobrecargas em regiões específicas devido a montagem manual, inevitavelmente, não seguir um padrão, contribuem pela diminuição de capacidade e eficiência do duto flexível (BERTONI, 2017).

Sob o ponto de vista de processo, a montagem manual e as etapas de dobra de fios e posterior assentamento dos mesmos arrames na posição final, trazem prejuízos relacionados ao *lead time*. O tempo de montagem acaba se tornando bastante elevado e retarda, conseqüentemente, o processo produtivo do duto flexível (CAMPELLO, 2014).

3.3.1.2 Conector do tipo *foldless*

O conector do tipo *foldless* foi desenvolvido com um conceito que não contempla a etapa de dobramento dos fios da camada de tração no procedimento de instalação do conector. Esse fato se dá por conta de um inovador conceito de vedação interna dissociada do sistema de ancoragem que torna o processo de montagem livre da necessidade de deformação plástica dos fios. O detalhamento do conector, com especificação dos componentes, é mostrado na Figura 11 (CAMPELLO, 2014).

Figura 11 – Detalhamento do conector do tipo foldless.



Fonte: Adaptado de CAMPELLO, 2014.

O dispositivo apresentado na Figura 11 apresenta uma configuração que pode sofrer algumas alterações, dependendo do caso, visando a simplificação para fabricação e montagem.

Os itens citados no parágrafo seguinte são referentes aos itens dos balões da Figura 11, que dizem respeito ao procedimento de montagem.

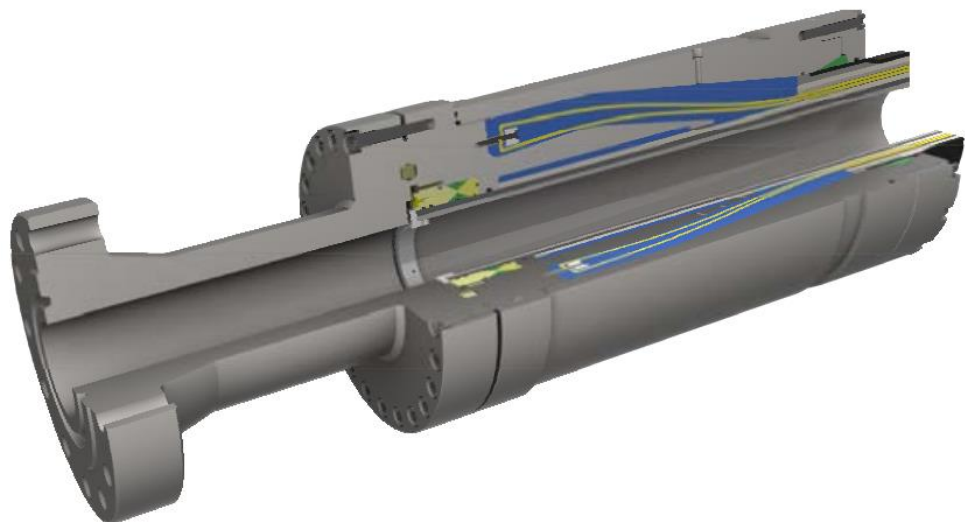
O principal diferencial em relação ao conector convencional (norma API RP 17B) é relacionado a ativação da vedação interna, que acontece por meio dos componentes (19) e (21). Esse processo é realizado em uma região independente da resina de ancoragem dos fios (13). Devido a esse fato, o procedimento de montagem do conector sofre uma melhoria, podendo ser realizado sem a necessidade de conformação dos fios da armadura de tração (4) e (5). Essa particularidade do conceito foldless representa uma evolução tanto sob o ponto de vista estrutural quanto de processo (CAMPELLO, 2014).

Essa melhoria só foi possível com a alteração de alguns componentes, como a terminação, que no modelo convencional contempla uma única peça e no modelo *foldless* se dá por meio de duas peças distintas: a terminação (22) e o miolo (16). Com isso, a vedação interna, que diferentemente do modelo convencional onde é feita dentro da região preenchida com resina, é executada de forma independente da ancoragem dos fios da armadura de tração, e portanto pode ser montado sem precisar abrir acesso em meio aos fios, evitando o ‘descabelamento’ dos mesmos.

Essas peculiaridades de projeto, que dizem respeito aos sistemas de vedação e de ancoramento, diminuem drasticamente o trabalho manual para montagem do conector, além de diminuir a interferência do *end-fitting* e do processo de montagem nos fios das camadas de tração, onde o coeficiente que representa o concentrador de tensão (kt) deve permanecer em níveis baixos, interferindo de forma benéfica no desempenho em fadiga quando comparado com conectores convencionais (CAMPELLO, 2014).

Na Figura 12 é apresentado um modelo tridimensional em corte do conector *foldless* montado no duto.

Figura 12 – Modelo tridimensional do conector *foldless* montado no duto flexível.



Fonte: CAMPELLO, 2014.

A montagem do conector *foldless* contempla várias etapas específicas, que seguem um procedimento padrão. A seguir, serão listadas essas etapas do processo, conforme é descrito por Campello (2014).

“

1. *Corte da capa externa (6) para exposição dos fios das armaduras de tração (4) / (5) a um comprimento suficiente para a ancoragem das mesmas;*
2. *Colocação do anel de expansão (10) sob a a capa externa;*
3. *Posicionamento do miolo do conector (15) / (16) por baixo dos fios das armaduras de tração (4) / (5) do duto;*
4. *Fixação do flange de apoio (14) para encaixe dos fios das armaduras de tração através de parafusos (17);*
5. *Encaixe dos fios das armaduras de tração (4) / (5) no flange (14) de modo que as armaduras sejam posicionadas e assentadas sobre o miolo do conector (15) / (16);*
6. *Posicionamento e fixação da jaqueta externa do conector (11) no miolo;*
7. *Posicionamento da cunha de vedação externa (9) por trás da jaqueta (11) e realização da ativação do engaste da capa externa por meio do flange traseiro (7) e dos parafusos (8);*
8. *Posicionamento da cunha de vedação interna (19) no chanfro localizado na parte frontal do miolo do conector (16) e realização da ativação da vedação interna por meio do flange dianteiro (21) e dos parafusos de ativação (18);*
9. *Posicionamento do anel (20) para efetivação do isolamento elétrico entre caraça intertravada (1) e miolo (16);*
10. *Fixação da terminação do conector (22) no miolo (16) por meio dos parafusos (23);*

11. Preenchimento com resina epóxi do vazio (13) para efetivar ancoragem das armaduras de tração.

”

3.3.2 Enrijecedores à flexão (*Bend stiffeners*)

Os enrijecedores à flexão consistem em uma estrutura com formato cônico que aumentam gradualmente ao longo de uma seção de comprimento. Estão presentes nas extremidades dos dutos, região de interface entre duto e UEP, e tem como objetivo impedir uma elevada deformação angular na referida região estando sujeita a cargas excessivas oriundas dos movimentos dinâmicos da UEP (BRAESTRUP et al., 2005). A Figura 13 ilustra um acessório *bend stiffener* sendo retirado de operação.

Figura 13 – Bend stiffener sendo retirado de operação.



Fonte: Site da empresa Balmoral Offshore

Disponível em: <balmoraloffshore.com/> Acesso em: 23 set. 2021.

Em uma linha de extração de petróleo, a seção do duto flexível próxima aos conectores é a que mais sofre com as cargas de flexão que podem ser impostas sobre o duto. Para tal situação, o enrijecedor é projetado com o objetivo de evitar um carregamento excessivo e garantir uma transição gradual de tensões (DONG et al., 2016; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

3.4 FALHAS EM DUTOS FLEXÍVEIS

Já é de conhecimento que o duto flexível possui uma estrutura complexa, com diversas camadas, e que essas interagem entre elas. Por conta disso, a lista de possíveis falhas é, de certa forma, extensa e podem ocorrer por diversos motivos.

As falhas são comumente originadas de algum defeito prévio ou a partir da evolução de uma degradação. Estas são definidas baseadas na falta de capacidade do duto de exercer a função na qual foi destinado, sendo que podem ser retratadas pela falta de eficiência, aumento do risco de acidentes, redução de produtividade (SIMONSEN, 2014).

A seguir é apresentada a relação dos defeitos e mecanismos de falha mais comuns vistos em dutos flexíveis, em situações que estejam submetidos a carregamentos estáticos e dinâmicos. Essa relação é citada pela norma API RP 17B (2014), conforme segue, que apresenta também as principais causas sugeridas para cada falha.

“

- *Colapso;*
- *Explosão;*
- *Falha em tração;*
- *Falha em compressão;*
- *Curvatura excessiva;*
- *Falha por torção;*
- *Falha por fadiga;*
- *Erosão;*
- *Corrosão.*

“

Analisando o histórico de danos, pode-se observar que a maior parcela das falhas em dutos flexíveis em operação são oriundos de locais próximos da interligação entre duto e conector (MARINHO, et al., 2007).

Esses dados convergem com o conhecimento adquirido durante os procedimentos de dissecação de dutos flexíveis que estavam submetidos a cargas aplicações dinâmicas. As falhas na região do conector são agravadas pela deformação plástica induzida nos fios da camada de tração no momento da instalação do conector convencional (CAMPELLO et al., 2012).

3.4.1 Falha por fadiga

Em operação, o conjunto duto flexível e acessórios fica submetido a carregamentos dinâmicos, esses com amplitudes que não seguem um padrão ou mantenham uma constância, podendo permanecer no regime de tensões elásticas ou plásticas dos componentes e que podem levar esses a desenvolver pequenas trincas com potencial de crescimento, propagação e posterior falha. Esse processo de degradação originário dos carregamentos dinâmicos é chamado de fadiga (DOWLING et al., 2013).

O fenômeno de fadiga em elementos mecânicos é um fenômeno cumulativo e irreversível, que ocorre de forma localizada, ou seja, após desenvolvida a micro trinca, esta progride até ocorrer a falha. Portanto, depende diretamente da tensão no ponto específico propício para formação de trincas, considerado crítico no sistema. A forma geométrica, o material do componente, o estado de tensões residuais são variáveis que influenciam diretamente na determinação da região crítica. Esta região certamente estará sob eminência de iniciação de trincas (CASTRO; MEGGIOLARO, 2009).

O carregamento cíclico, que caracteriza fadiga, pode causar, principalmente, danos aos fios da armadura de tração. Este, dependendo das condições, podem ser originados pelos seguintes fatos, conforme cita SHEN e JUKES (2015).

“

- *Carregamento de tração e flexão;*

- *Dobramento devido ao efeito estrutural do conector;*
- *Dobramento brusco localizado devido ao processo de dobramento / desdobramento manual;*
- *Forças de adesão associadas ao ancoramento físico do fio de tração pela resina epoxi;*
- *Tensão residual devido ao processo de dobramento e desdobramento durante a montagem.*

“

A falha de um fio da armadura de tração é um evento que representa um forte sinal que indica a deteriorização do duto, porém este só falha por completo após a ruptura de um número significativo de fios, acarretando no efeito cascata (SHEN; JUKES, 2015).

A Figura 14 mostra a ocorrência de falha no duto por decorrência do carregamento dinâmico nos fios da armadura de tração. A região de rompimento dos fios é considerada crítica, uma vez que a condição é agravada decorrente do procedimento de montagem do conector.

Figura 14 – Fios rompidos por fadiga na região do conector.



Fonte: MARINHO *et al.*, 2007.

3.5 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são produzidas por uma série de processos térmicos e mecânicos e podem ser prejudiciais ao desempenho dos componentes de aço. Dentre os defeitos, podem produzir distorção e trincas, esse último extremamente prejudicial a resistência do componente quando submetido a fadiga (KWIETNIEWSKI et al., 2014).

Quanto ao surgimento, podem ser originadas pelos seguintes fatores:

- Térmicos: causadas por gradientes de temperatura ao longo da seção transversal de uma peça durante os ciclos de aquecimento e resfriamento;
- Mecânicos: causadas pelos gradientes de deformação plástica durante o processamento mecânico a frio do material;
- Metalúrgicos: causadas pelas transformações de fase que produzem expansão e contração não uniforme ao longo da seção do componente.

As tensões residuais podem ser de dois tipos: trativas e compressivas. Tensões trativas são consideradas, em quase todas as situações, prejudiciais, pois somam-se as tensões de trabalho e favorecem a abertura de trincas. Por outro lado, tensões compressivas agem de forma benéfica subtraindo das tensões de serviço (KWIETNIEWSKI et al., 2014).

Considerando o caso dos componentes do duto flexível, é de suma importância o conhecimento e o mapeamento das tensões residuais nos fios da camada que é responsável por suportar os carregamentos trativos, para um projeto eficiente e uma operação segura. Com as informações sobre a distribuição de tensões, pode-se estimar o efeito destas sobre a estrutura, e com isso especificar pressões de trabalho máximas e número de ciclos aceitáveis de flexão aplicados ao duto durante operação (FERNANDO et al., 2015).

3.5.1 Determinação de tensões residuais

As tensões residuais podem ser determinadas por meio de medições diretas ou indiretas, sendo que nesse último caso se dá por meio de medições de outras variáveis e transformadas em tensões residuais.

Dentre os mecanismos de medição direta, estes se dividem em dois grupos: destrutivos e não-destrutivos.

Os mecanismos de medição destrutivos, como o próprio nome sugere, se baseiam na alteração física do componente, como uma furação, corte ou remoção de material, para gerar um desequilíbrio no campo de tensões residuais do componente. Com essa alteração, as tensões internas se redistribuem e acabam causando deformações pontuais que podem ser aferidas. Com a obtenção dos dados de deformação aquisitados, o mapa de tensões residuais é alcançado utilizando a técnica que relaciona com a teoria da elasticidade (KLEIMAN; KUDRYAVTSEV, 2012).

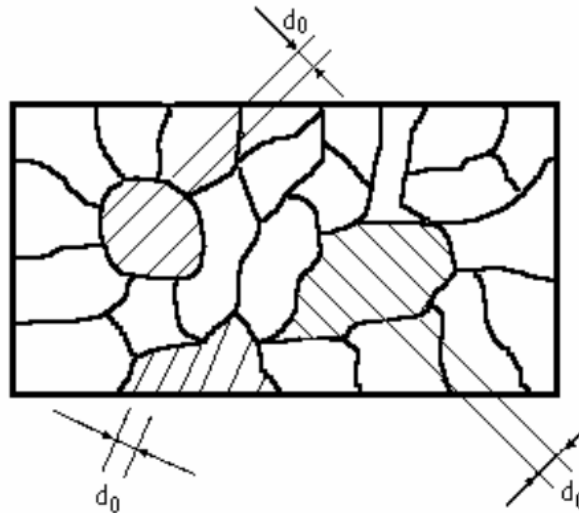
Com relação aos métodos de medição não-destrutivos, estes se baseiam na relação existente entre tensão residual e parâmetros físicos e metalográficos, ou ainda, o desequilíbrio ocasionado pelas tensões residuais nesses componentes. Dentre os métodos, podem-se destacar: métodos de difração, que se baseiam nos intervalos presentes na rede cristalina para a medição de tensão; métodos ultrassônicos, que utilizam de propagação da onda ultrassônica de forma oscilante para medição de tensão residual nos materiais; técnicas magnéticas, que utilizam a relação entre deformação elástica e magnetização em materiais ferromagnéticos (KLEIMAN; KUDRYAVTSEV, 2012).

3.5.1.1 Difração de raios X (DRX)

O método de difração de raios X é aplicada com o objetivo de mapear as tensões residuais superficiais através da aferição dos intervalos entre planos existentes na rede cristalina. Em um material policristalino e isento de tensões, o espaço entre planos cristalinos se mantém constante, conforme mostra a Figura 15. Diferentemente, quando o material está submetido a carregamentos que geram tensões, quaisquer que sejam suas direções, os intervalos entre planos variam devido ao regime elástico do material, fato que é ilustrado na Figura 16. Com a medição da variação dos intervalos entre planos adjacentes pode-se determinar a fração da

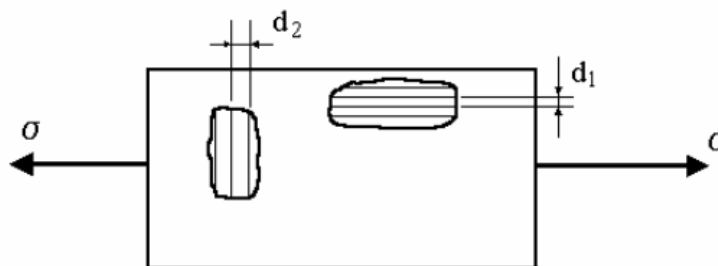
deformação elástica, e por consequência, a obtenção dos módulos de tensões residuais na superfície analisada (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Figura 15 – Distâncias interplanares de grãos em um material isento de tensões residuais.



Fonte: Adaptado de maxwell.vrac.puc-rio.br/4411/4411_3

Figura 16 – Distâncias interplanares de diferentes grãos de um corpo sob um campo de tensões. Distâncias sofrem alterações dependendo da posição relativa entre campo e grão.



Fonte: Adaptado de maxwell.vrac.puc-rio.br/4411/4411_3

Os raios X incididos sobre o componente atingem uma profundidade de 5-10 μm da superfície, limitando assim a determinação do estado de tensões a essa região. Portanto, pode-se afirmar que os resultados medidos dizem respeito ao estado de tensões residuais superficiais (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Os equipamentos que realizam as medições baseado nessa técnica podem ser fixos ou portáteis, sendo este último portador da vantagem de realizar as medições '*in loco*', conforme mostra a Figura 17. Possuem uma velocidade na resposta das medições boa e sem contato direto com a superfície a ser analisada. Além disso, são capazes de determinar o campo de tensões nos sentidos longitudinal e transversal. Sob a ótica operacional, para a obtenção de resultados de leitura satisfatórios, é necessário que seja seguido o procedimento correto, principalmente com a preparação da superfície do material (PINHEIRO et al., 2012; KANDIL et al., 2001).

Figura 17 – Equipamento portátil de medição de tensões residuais baseado na técnica de difração de raios X.



Fonte: Site da empresa Pulstec Industrial Co.

Disponível em: <<https://www.pulstec.co.jp/en/product/x-ray/>> Acesso em: 04 out. 2021.

Como o princípio de medição é baseado no espaçamento entre planos cristalográficos, a técnica que utiliza o equipamento de raios X para realizar as medições só pode ser aplicada em materiais cristalinos, policristalinos e semicristalinos. A determinação do espaçamento evidencia ainda qual o tipo do carregamento: se o componente está sob tração, onde a medida entre planos diminui no sentido longitudinal da aplicação de tensão, ou sob compressão, onde a distância

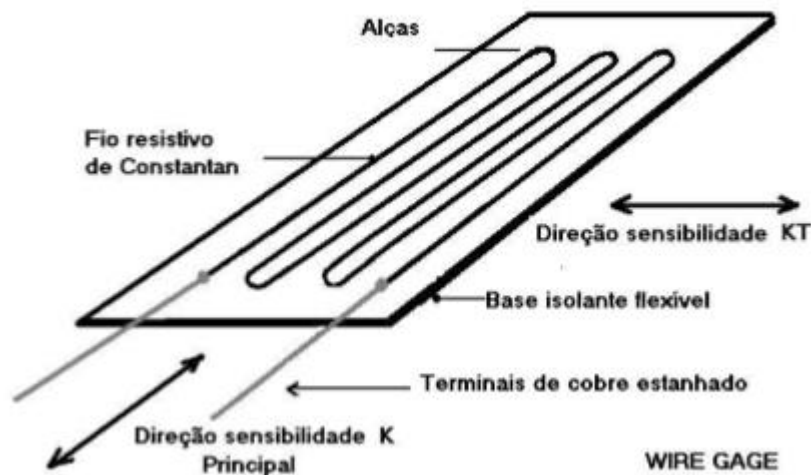
entre planos aumenta no sentido longitudinal da tensão aplicada. (ROSSINI et al., 2012).

3.5.1.2 Extensômetria (Strain Gauges)

A técnica de extensômetria consiste na instalação de extensômetros, ou *strain gauges*, na superfície da peça com o objetivo de medir a deformação diante da aplicação de um carregamento.

O *strain gauge* consiste basicamente de um fio resistivo disposto sobre uma base isolante flexível, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 – Extensômetro (*strain gauge*) em seu modelo elementar padrão.



Fonte: Site da empresa Ensus Extensômetria

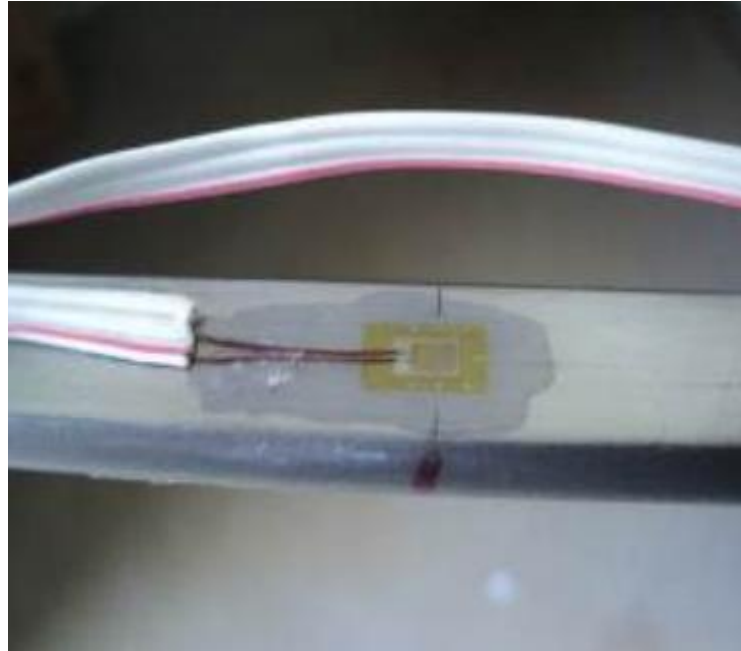
Disponível em: <ensus.com.br/extensometria> Acesso em: 23 set. 2021.

O extensômetro funciona a partir da alteração da resistência do fio resistivo de acordo com o alongamento da superfície em que está instalado. Com a deformação do componente, o sensor fica sujeito a alteração da resistência elétrica gerando sinais elétricos que são interpretados pelo sistema de aquisição. Esse sinal é convertido pelo sistema em valores de deformação (*Strain*) (GUILHERME, 2016).

Para a instalação do extensômetro sobre a superfície da peça a ser avaliada, é necessário um procedimento prévio e uma série de cuidados para que o sensor faça uma medição correta, como preparação da superfície, colagem de forma correta. Na

Figura 19 é ilustrado o extensômetro instalado corretamente sobre a superfície a ser medida (GUILHERME, 2016).

Figura 19 – *Strain gauge* instalado sobre a superfície de fio da armadura de tração.



Fonte: LOPES, 2013.

A determinação do módulo de tensões residuais a partir da obtenção dos valores de deformações medidas é baseada na Lei de Hooke. A tensão no material pode ser determinada pelo relação entre a força aplicada (F) e a área da seção transversal (A) do material que está recebendo tensão.

$$\sigma [GPa] = \frac{F [N]}{A [m^2]} \quad (3.1)$$

Com o valor de deformação medido (ϵ) a partir da leitura dos extensômetros e conhecendo o módulo de elasticidade do material (E) que está sendo analisado, este último propriedade física do material, é possível descobrir a tensão residual da superfície do componente em análise (HBM, 2021).

$$\sigma [GPa] = E [GPa] \times \epsilon \quad (3.2)$$

3.6 TRABALHOS RELACIONADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA (ARTIGOS, TESES, DISSERTAÇÕES)

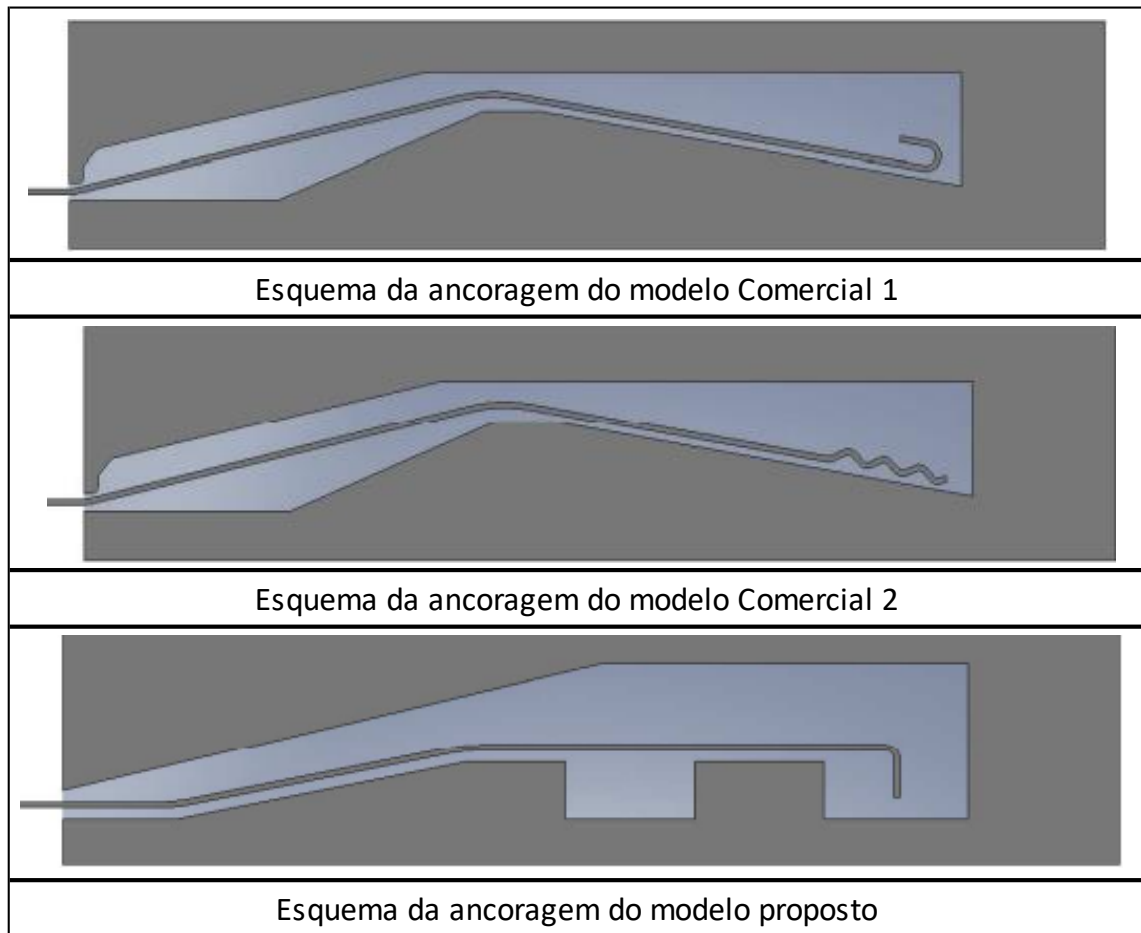
Neste capítulo serão abordados trabalhos publicados com o objetivo de embasar o leitor quanto aos procedimentos realizados e resultados alcançados que sejam relacionados ou que tenham servido de modelo para o desenvolvimento do presente estudo.

Em seu trabalho, SHEN et al. (2008) desenvolveu modelos numéricos para simular o dano do componente quando sujeito a carregamentos em fadiga. Em um dos modelos, considerou o contato interativo do fio isento de dobras com a resina na parte interna do conector, em diferentes condições: com aderência completa e não aderência total. Em outro modelo, o autor considerou que o fio sofreu dobramento e desdobramento, condição que é imposta ao fio durante o processo de montagem de um conector do tipo convencional. Como resultado, SHEN et al. (2008) chegou a valores de dano por fadiga em torno de 30% maiores na condição do fio que sofreu a ação de dobra e desdobra, quando comparados ao fio reto.

XAVIER (2009) por sua vez, concentrou suas pesquisas na avaliação e desenvolvimento de um novo modelo de terminação para ancoragem dos fios da armadura de tração com a resina na parte interna do conector. Através de recursos numéricos (método de elementos finitos) e experimentais, validou o modelo proposto com a obtenção de resultados positivos sob a ótica de desempenho de conectores em fadiga, com uma redução do fator concentrador de tensões (K_t) na região da entrada do fio ao conector na ordem de 17%. Além disso, as tensões máximas na resina no interior do conector apresentaram redução de até 60% nos valores quando comparados aos modelos já existentes no mercado e que foram utilizados como base de avaliação no trabalho. Na Figura 20 são apresentados as configurações de modelos comerciais e o proposto por XAVIER (2009).

Como etapa final do trabalho, após a realização dos ensaios numéricos e experimentais, XAVIER (2009) desenvolveu um protótipo para validação do modelo sob carregamentos de fadiga. Após o término, foi evidenciado a preservação dos fios sem ruptura na região de ancoragem, aprovando assim o modelo proposto.

Figura 20 – Modelos de ancoragem utilizados no trabalho.



Fonte: Adaptado de XAVIER, 2009.

Com o objetivo de avaliar as tensões nos fios das camadas de tração de dutos flexíveis durante os ensaios de fadiga, BUENO (2010) apresentou em seu trabalho métodos numéricos e experimentais que fizessem essa avaliação com a utilização de conectores patenteados pelo LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física – UFRGS).

Em um ensaio prévio utilizando dois conceitos diferentes de conectores, BUENO (2010) fez uma seleção prévia do conector a ser utilizado durante o restante do trabalho baseado no desempenho em fadiga que ambos apresentaram. Com isso, em uma nova amostra, foram instalados dois conectores idênticos, de modelos pré-selecionados, conforme mostra a Figura 21, e submetidos a um ensaio de fadiga em uma bancada de teste, conforme mostra a Figura 22. Esse procedimento, aliado aos modelos numéricos, permitiu a ampliação do entendimento da performance dos componentes em fadiga. Como resultado, foram obtidos valores K_t s entre 1,48 e 1,6 para as regiões de interface com o conector, ou seja, acréscimo de tensões nos fios nas regiões mais próximas do conector com relação a regiões mais distantes. BUENO

(2010) ainda comprovou a eficácia dos modelos numéricos utilizados baseado na proximidade dos resultados obtidos em ambos os casos, onde os valores de deformação obtidos foram compatíveis com as deformações lidas pelos *strain gauges*, com diferença inferior a 1,2%.

Figura 21 – Modelo de conector utilizado no ensaio experimental.



Fonte: Adaptado de BUENO, 2010.

Figura 22 – Bancada utilizada no ensaio experimental, onde: (1) Amostra de duto flexível de 2,5" com conectores nas extremidades; (2) Bancada utilizada no ensaio; (3) Atuador hidráulico.



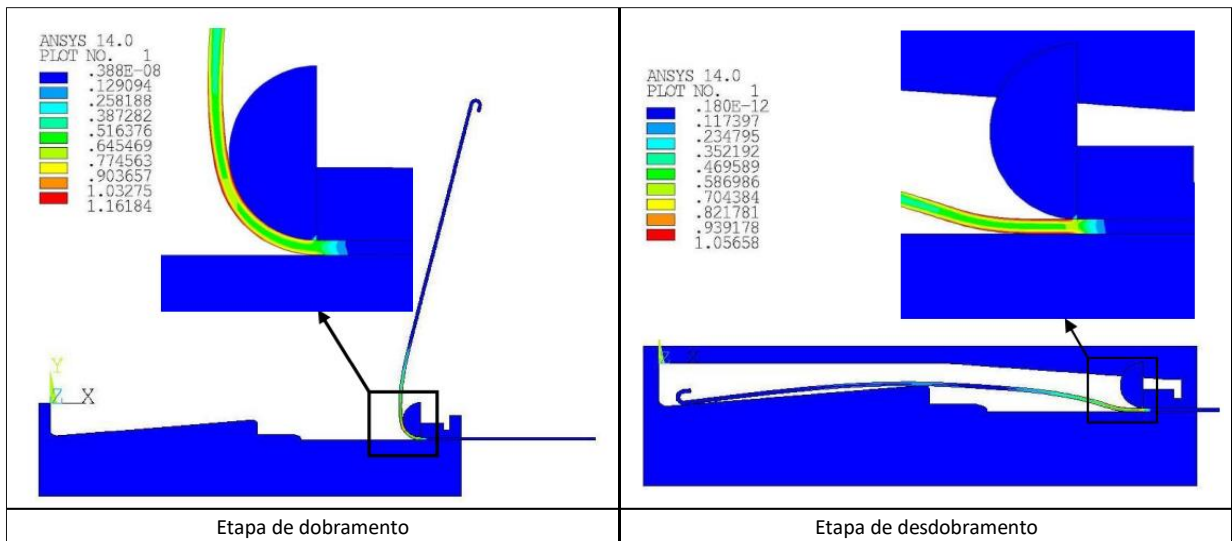
Fonte: Adaptado de BUENO, 2010.

DE SOUSA *et al.* (2013) abordam em seu trabalho um estudo que faz referência a tensão nos fios da camada de tração na parte interna do conector. O modelo de elementos finitos desenvolvido teve como alvo estimar a tensão residual gerada pelo processo de montagem de conector, durante as etapas de dobramento e desdobramento do fio, e a interação entre a resina e o fio. Como procedimento, foi realizado uma investigação sobre a influência de 3 parâmetros no estado de tensões nos fios, que são:

- Processo de interação entre a resina e o fio na parte interna do conector;
- Graus de tensões induzidas ao fio decorrente do procedimento de montagem do conector;
- Propriedades elásticas da resina.

Para representar as etapas de dobramento e desdobramento dos fios que ocorrem durante o processo de montagem do conector, e simular a tensão residual induzida, foi desenvolvido um modelo que simula um gabarito de dobra, conforme mostra Figura 23.

Figura 23 – Modelo que simula etapas de dobramento e desdobraimento do fio durante processo de montagem do conector.



Fonte: Adaptado de DE SOUSA *et al.* (2013).

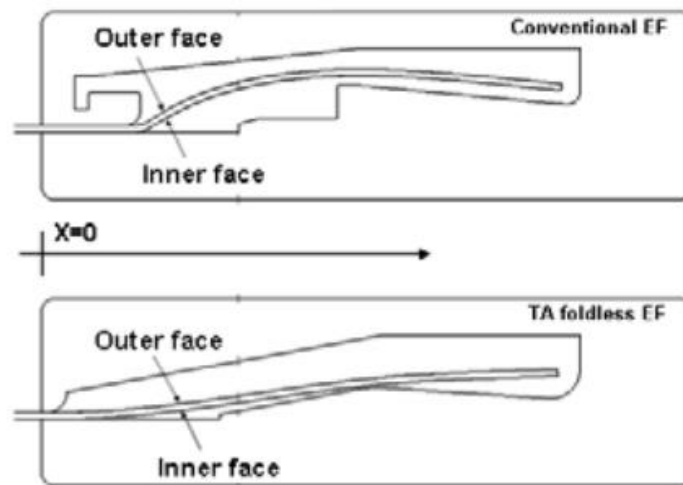
Como resultado obtido, DE SOUSA *et al.* (2013) indicam que a região de entrada do conector é crítica devido a deformação plástica imposta aos fios. A tensão induzida durante o processo de montagem influencia na tensão gerada pelo carregamento operacional. Com isso, o fator concentrador de tensão (K_t) encontrado ficou variando entre 2,2 e 2,9 na região do conector.

Por sua vez, CAMPELLO (2014) desenvolveu uma metodologia de cálculo para avaliar e projetar conectores para dutos flexíveis baseado nas características estruturais e no sistema de ancoragem das armaduras de tração. Em seu modelo analítico, considerou fatores para uma análise estrutural do duto flexível dentro do conector, como as configurações geométricas dos fios internas ao conector, a tensão de cisalhamento gerada pelo atrito entre fio e resina, o efeito cabrestante e a ancoragem mecânica na extremidade do fio. Em seu modelo numérico simulou as condições de montagem e operação do conector, de uma forma simplificada, e apresentou uma metodologia de cálculo de tensões nas armaduras de tração dos dutos.

Em adição, CAMPELLO (2014) propôs um novo conceito de conector, este com foco na melhoria de desempenho quando sujeito à fadiga, que isenta o processo de montagem das etapas de dobramento e desdobraimento dos atames. Durante a validação experimental do conector *foldless*, os resultados apresentaram uma

significativa redução de concentração de tensão na região de fronteira entre duto e terminação, em torno de 60%. Com o conector proposto os valores de K_t ficaram em torno de 1,3, enquanto os conectores convencionais apresentam um K_t em torno de 2,4. Na Figura 24 é mostrado o perfil do fio da armadura de tração dentro do conector, comparando o conceito convencional com o proposto (*foldless*).

Figura 24 – Vista que mostra o perfil dos fios da armadura de tração dentro dos conectores do tipo convencional e *foldless*.



Fonte: CAMPELLO, 2012.

BENIRSCHKE (2014) em seu trabalho, realizou um estudo sobre a relação de influências dos raios de gabarito de dobra para montagem de conectores convencionais, considerando modelos numéricos e analíticos na sua análise. Ainda, correlacionou o momento de inércia do fio, e conseqüentemente a espessura deste, com as tensões residuais induzidas durante as etapas de dobramento e desdobramento. Como resultado, comprovou que o raio tem influencia de forma inversa, ou seja, com um aumento do raio do gabarito menor serão as tensões induzidas no fio, enquanto a espessura do fio tem uma relação diretamente proporcional com as tensões residuais geradas.

4 METODOLOGIA

Para desenvolver o estudo foram utilizados dois modelos: experimental, que contempla a montagem de conectores do tipo *foldless* em trechos de dutos de 2,5", e o numérico, que consiste no modelo computacional que representa a manipulação dos fios durante as etapas de montagem de tal acessório nos trechos de dutos.

4.1 MODELO EXPERIMENTAL

No modelo experimental, para representar de forma fiel o procedimento, foram considerados as montagens de conectores nos trechos de dutos de 2,5" de diâmetro. Durante a montagem, os fios ficam sujeitos a manipulações para cumprimento das etapas do procedimento de montagem, e estas por sua vez geram deformações nos fios e conseqüentemente tensões residuais induzidas. O objetivo do modelo experimental é de monitorar as tensões e / ou deformações em cenários pré e pós montagem ou de forma contínua durante todo o processo.

4.1.1 Amostra base

O modelo experimental foi desenvolvido com base em amostras de duto flexível de 2,5" de diâmetro interno onde foram instalados conectores do tipo *foldless* em suas extremidades. Na Tabela 1 são apresentadas as características do duto flexível que foi utilizado nos experimentos.

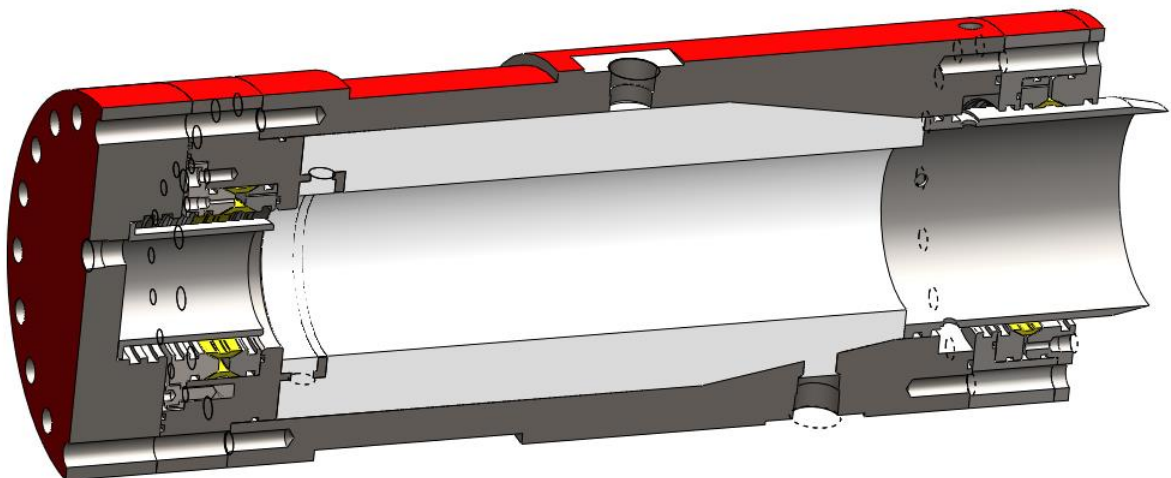
Tabela 1 – Dados característicos do duto flexível de 2,5” utilizado nos experimentos.

Duto flexível 2,5"								
Diâmetro interno: 63,5 mm								
Pressão de projeto: 20.684 MPa								
Camada	Material	Tensão escoamento (MPa)	Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)	Peso (kg/m)	Dimensões arames (mm x mm)	Nº arames	Ângulo montagem
Carcaça intertravada	Aço Inoxidável 316L		63,5	3,25	3,079	24 x 0,7		87,7
Barreira de vedação	PA 12		70	5	1,202			
Armadura de pressão	Aço carbono	758	80	6,35	11,312	14,4 x 6,4		87,9
Armadura de tração 1	Aço carbono	1310	93,29	2,01	4,059	5,0 x 2,0	43	38
Armadura de tração 2	Aço carbono	1310	100,11	2,01	4,322	5,0 x 2,0	47	38
Capa externa	HDPE (Amarelo)		106,94	5	1,646			

Fonte: O AUTOR, 2021.

Nas extremidades dos trechos de dutos, foram instaladas unidades de conectores do tipo *foldless*, conforme projeto é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Modelo tridimensional do projeto do conector *foldless* utilizado nos trechos de duto de 2,5”.



Fonte: O AUTOR, 2021.

4.1.2 Recursos utilizados

Para a avaliação do modelo experimental foram utilizados conjuntos para aquisição de dados de deformação compostos pelos sensores *strain gauges* e um receptor / condicionador de sinais, QuantumX, cujas especificações são apresentadas na Tabela 2, um equipamento para medição de tensões residuais superficiais, difratômetro de raios X portátil, cujas características são explicitadas na Tabela 3, além de um perfil utilizado na montagem com o objetivo de suavizar a dobra dos fios, que será chamado de gabarito de dobra.

Tabela 2 – Especificação dos *strain gauges* utilizados no modelo experimental

Especificação <i>Strain Gauges</i>			
Marca	Modelo	Resistência (Ω)	<i>Gauge factor</i>
KYOWA	KFGS-1-120-C1-11	119,8	2,09
Especificação QuantumX			
Marca	Modelo	Tensão entrada (V)	Potência entrada (W)
HBM	MX 1615B	10 a 30	máx. 15

Fonte: O AUTOR, 2023.

Tabela 3 – Especificação do difratômetro de raios X utilizado no modelo experimental.

Especificação Difratômetro de raios X			
Marca	Modelo	Método de cálculo	Tensão do tubo (kV)
Pulstec Industrial Co.	μ -X360s	$\cos \alpha$	30

Fonte: O AUTOR, 2023.

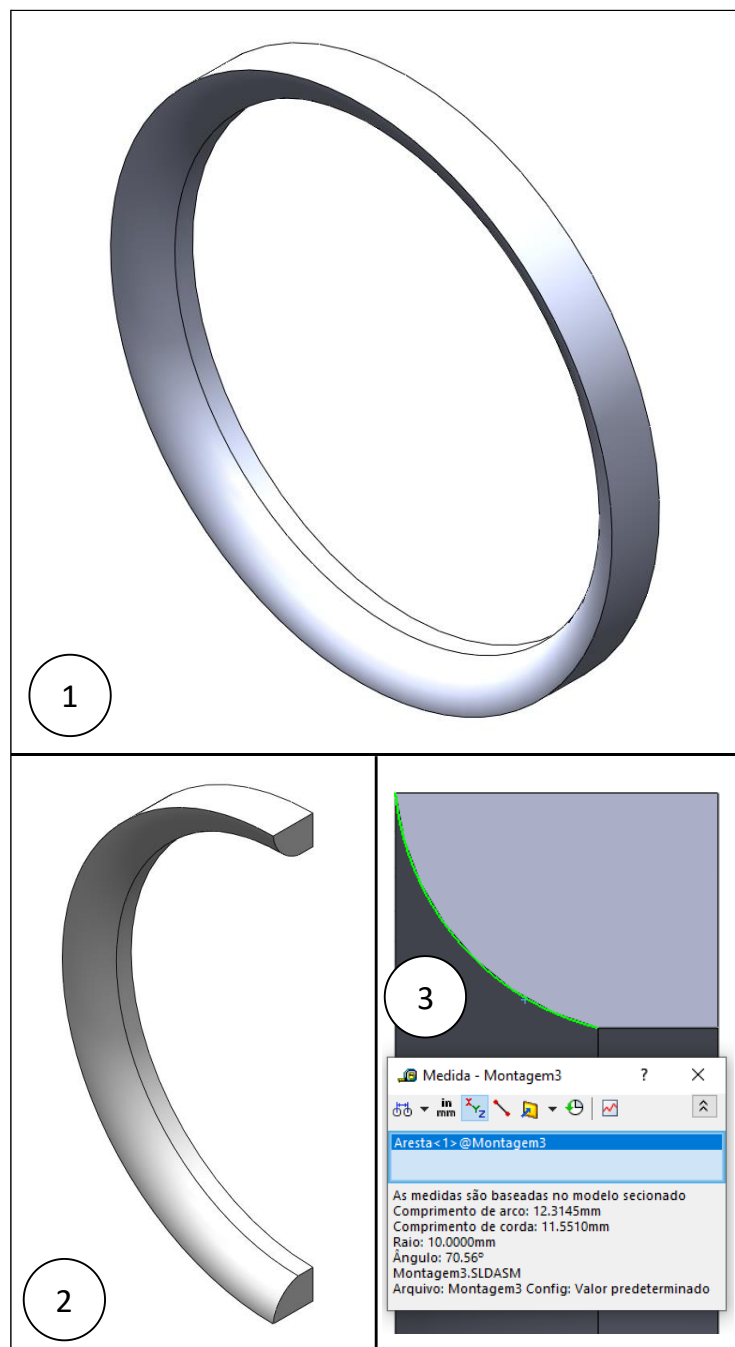
No caso dos extensômetros, o monitoramento das deformações do fio foi realizado durante todo o processo de montagem. Portanto, foram instalados nos fios pré-definidos antes do início das etapas que envolvem a manipulação destes e retirados somente no final do processo, antes da etapa de fechamento da jaqueta.

O método de DRX foi utilizado no processo com o objetivo de mapear as tensões residuais dos fios e quantificar a influência das etapas de montagem nos valores de tensões induzidas. Para isso, fez-se uma leitura nos fios pré-montagem, antes do início do processo, e uma leitura pós montagem, antes do fechamento da jaqueta. As

leituras foram realizadas nos sentidos longitudinais e transversais dos fios selecionados.

O gabarito de dobra utilizado consiste basicamente em um anel de poliacetal com um perfil curvo na face que fica em contato com os fios, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 – Gabarito utilizado nos ensaios com o objetivo de suavizar a dobra dos fios, sendo: (1) Perspectiva do modelo do gabarito de dobra; (2) Perspectiva em corte do gabarito; (3) Vista em detalhe da seção transversal do gabarito.



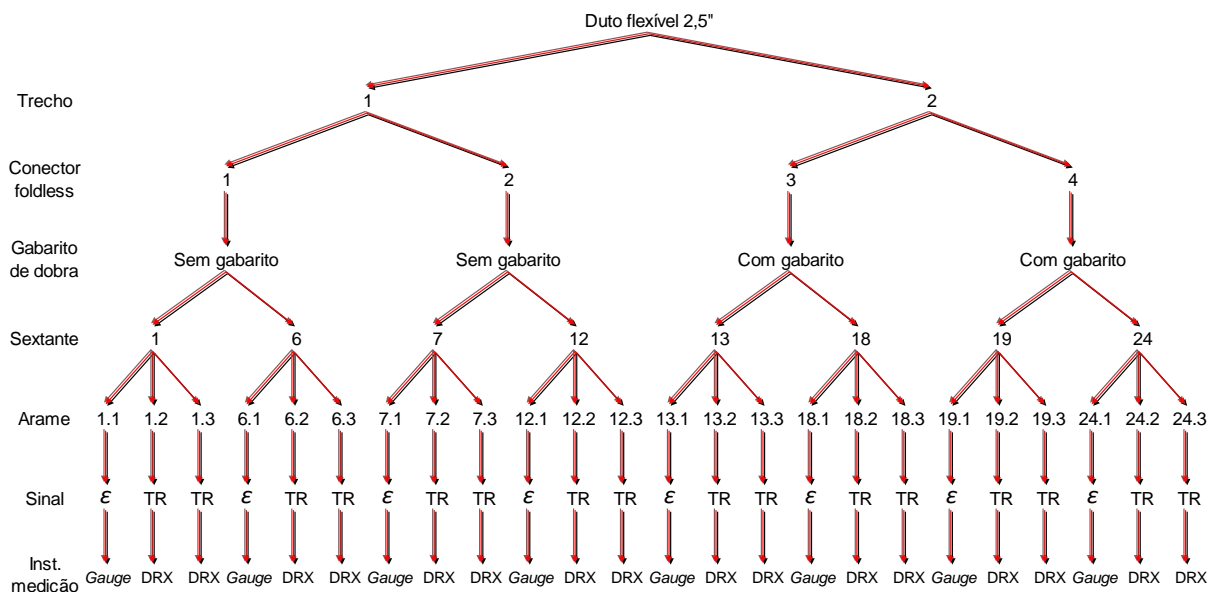
Fonte: O AUTOR, 2021.

A ideia com o uso do componente é evitar que os fios sejam dobrados sobre o canto vivo da cunha, criando uma superfície de apoio e proporcionando uma atenuação na dobra, e conseqüentemente uma indução de TRs de menor intensidade.

4.1.3 Procedimento

O modelo experimental consistiu na montagem de conectores do tipo *foldless* em dutos flexíveis de 2,5". Foram realizadas 4 amostragens em 2 trechos de dutos, sendo que destas 2 conectores foram montados sem a utilização de gabarito de dobra, e 2 com a utilização de gabarito para dobra dos fios. Na Figura 27 é apresentado a árvore de amostragem que é utilizada como base para os ensaios.

Figura 27 – Árvore de amostragem do procedimento experimental.



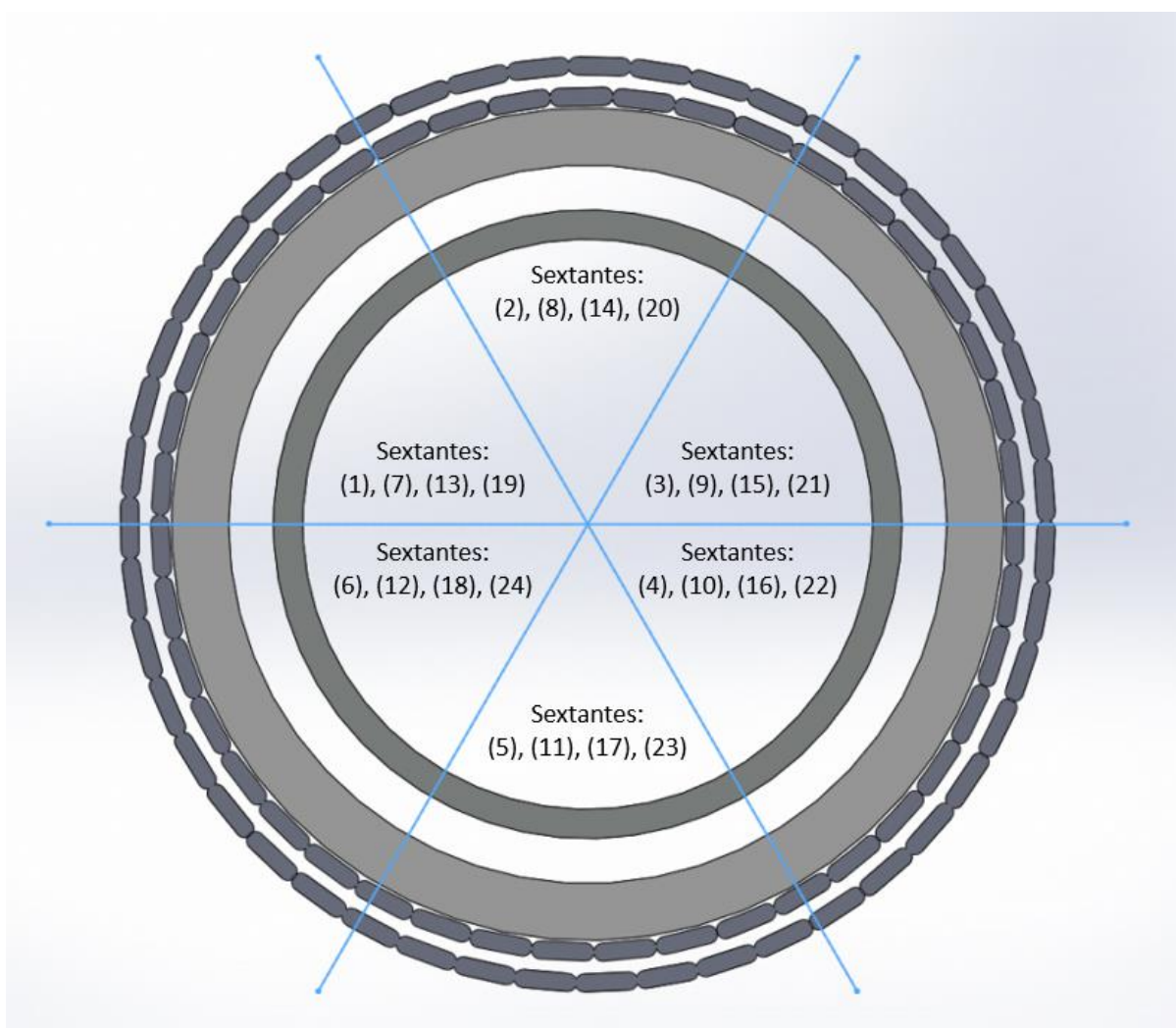
Fonte: O AUTOR, 2021.

No esquema é possível ver de forma organizada a sequência de aquisição de dados. Para definição do número de fios a serem avaliados nas extremidades de trecho de duto, região onde são instalados os conectores *foldless*, foram separadas 6 partes idênticas (sextantes) e então analisados 3 fios para cada sextante. No total, foram obtidos 24 sextantes e 72 fios monitorados. Como nomenclatura padrão, os fios foram identificados com o número do sextante seguido do número que representa a ordem do fio dentro da subdivisão. Em todos os casos, o fio 1 de cada sextante

representa a medição de deformação realizada pelo *strain gauge* enquanto os demais fios correspondem as medições de tensões residuais (TR) realizadas pelo difratômetro de raios X.

Na Figura 28 é apresentado um desenho esquemático mostrando a divisão do perfil do duto nos sextantes. A numeração do sextante segue a ordem dos conectores da Figura 27, ou seja, no conector 1 os sextantes são numerados de 1 a 6, no conector 2 a numeração fica de 7 a 12 e assim sucessivamente. Dentro de cada divisão são separados 3 fios que são identificados com a numeração do próprio sextante, seguido do número que identifica o sinal a ser adquirido, ou seja, 1 para deformação (*strain gauges*), 2 e 3 para tensões residuais (difratômetro de raios X).

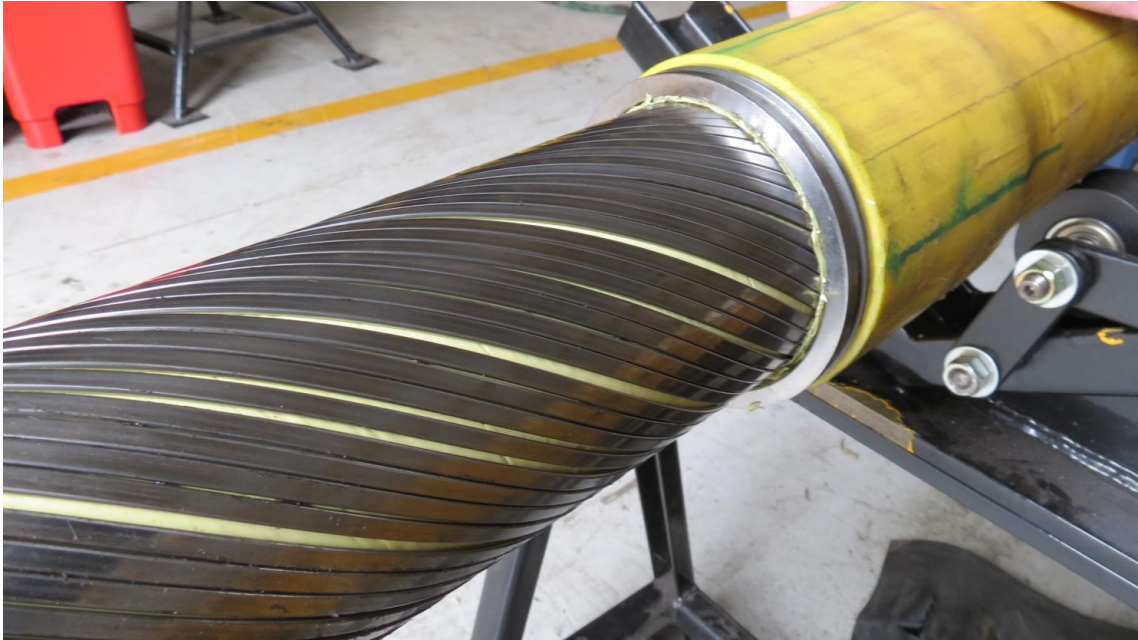
Figura 28 – Desenho esquemático do perfil do duto flexível utilizado no trabalho mostrando a divisão em 6 partes idênticas (sextantes) e como foram nomeados em cada caso.



Fonte: O AUTOR, 2023.

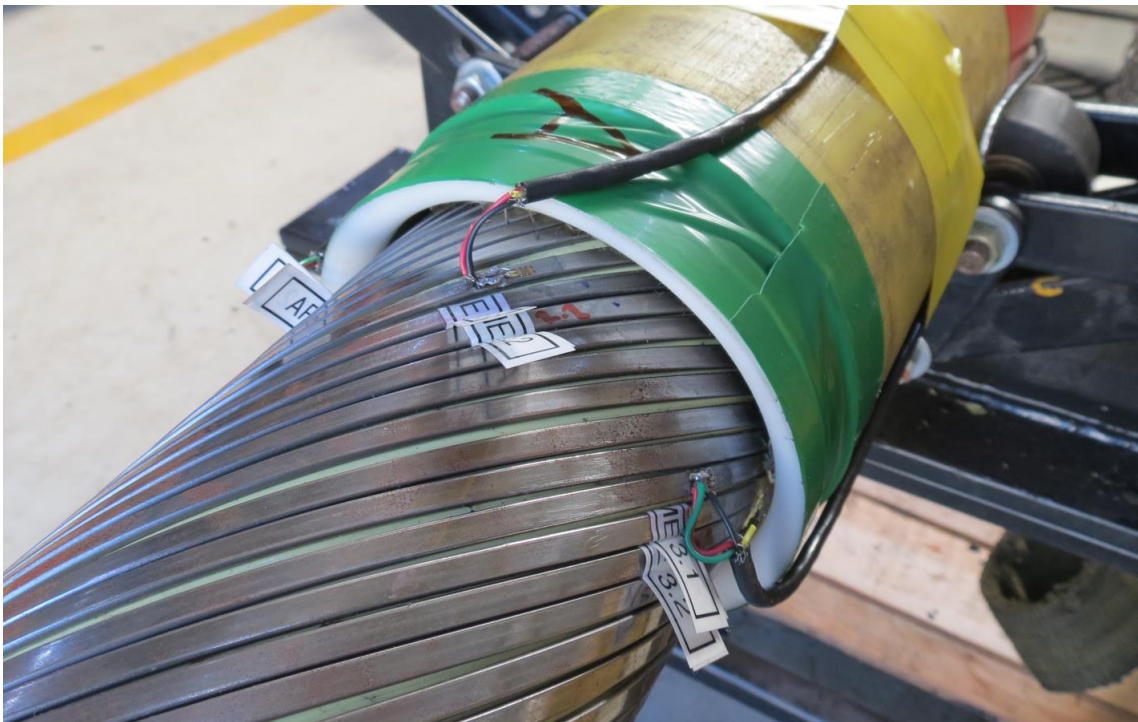
Na Figura 29 é mostrado a extremidade do trecho de duto após a inserção da cunha, etapa da montagem do conector *foldless*.

Figura 29 – Extremidade do duto flexível após etapa de inserção da cunha durante processo de montagem de conector.



Fonte: O AUTOR, 2021.

Figura 30 – Identificação e instalação de extensômetros sobre os fios que serão monitorados.

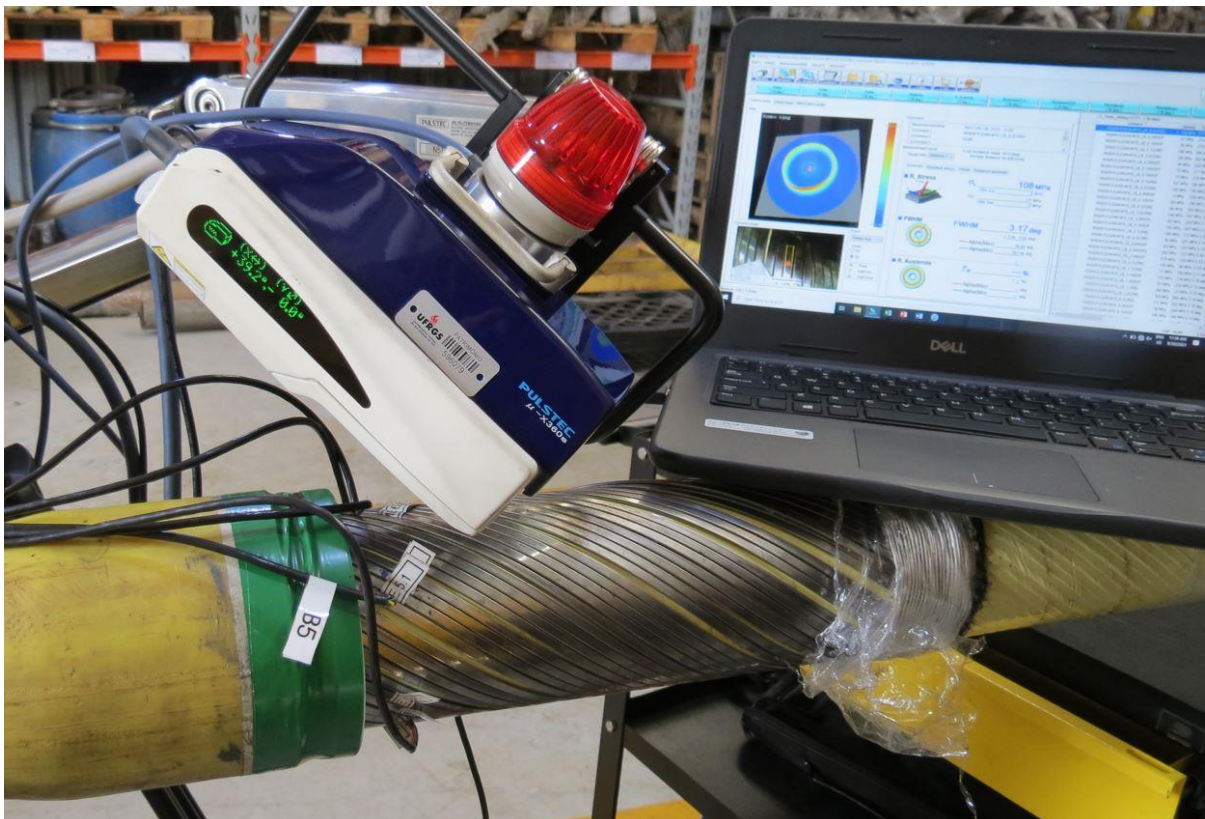


Fonte: O AUTOR, 2021.

Com os fios da armadura de tração expostos e a cunha posicionada é possível realizar a divisão da circunferência em sextantes e posteriormente a identificação dos fios para monitoramento. Na Figura 30 é apresentada a amostra com os fios para medições com DRX identificados e os extensômetros instalados. Nesse caso, na extremidade representada, é utilizado o gabarito para suavização da dobra dos fios, que permanece durante todas as etapas da montagem do conector.

Após a identificação, foram realizadas as medições de tensões residuais nas superfícies dos fios selecionados com o intuito de mapear tal parâmetro no cenário pré-montagem, ou seja, adquirir os dados de TR sem nenhuma influência do processo de montagem do conector nos valores obtidos. Na Figura 31 é mostrado o procedimento realizado com o difratômetro de raios X para medição de TR nas superfícies dos fios da armadura de tração na etapa pré-montagem.

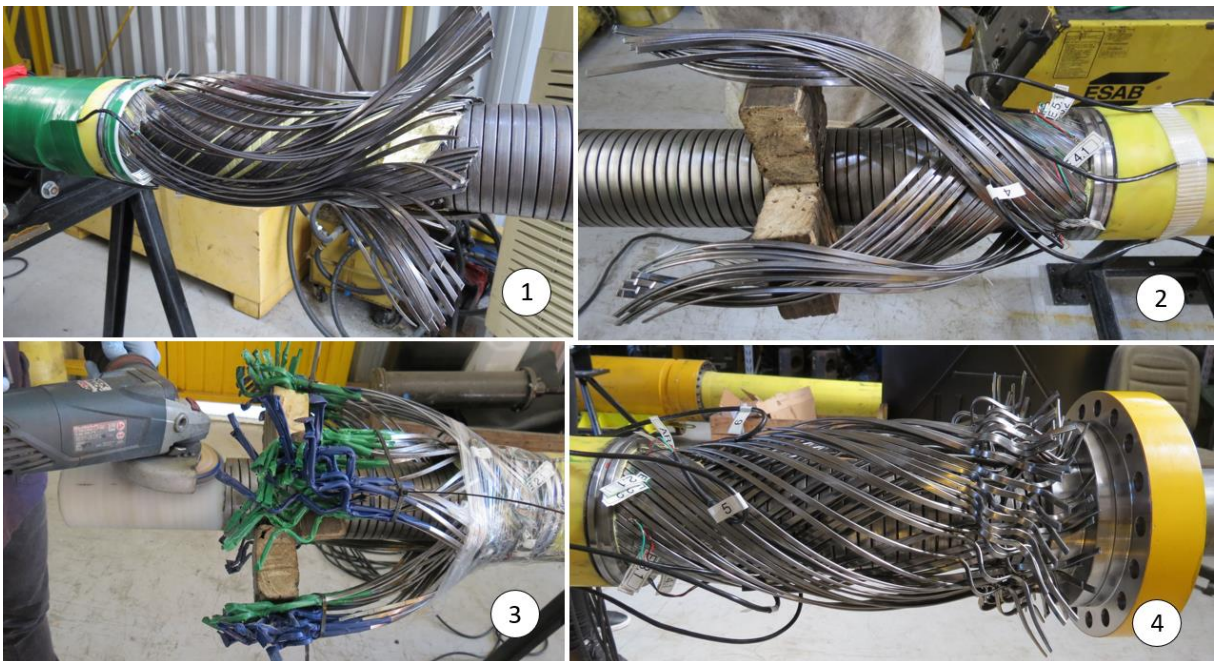
Figura 31 – Difratômetro de raios X realizando a leitura de tensões residuais nos fios da armadura de tração na etapa pré-montagem.



Fonte: O AUTOR, 2021

Com as tensões residuais mapeadas pelas medições com o DRX e os *gauges* realizando a aquisição dos dados em tempo integral, a extremidade do duto flexível ficou preparada para receber as etapas da montagem do conector *foldless*. Na Figura 32 é apresentado um compilado de imagens que mostram algumas etapas do processo de montagem, etapas essas que exigem a manipulação dos fios das armaduras de tração em níveis elevados com o intuito de se ter acesso a camadas inferiores ou como parte própria do processo, como na conformação para ancoragem desses.

Figura 32 – Etapas do processo de montagem do conector *foldless* que implicam em na manipulação dos fios em níveis elevados: (1) Etapa que corresponde a limpeza dos arames da armadura de tração; (2) Etapa de retirada e limpeza das camadas mais internas; (3) Etapa de conformação das extremidades dos fios para sistema de ancoragem; (4) Acomodamento dos fios para fechamento da jaqueta.

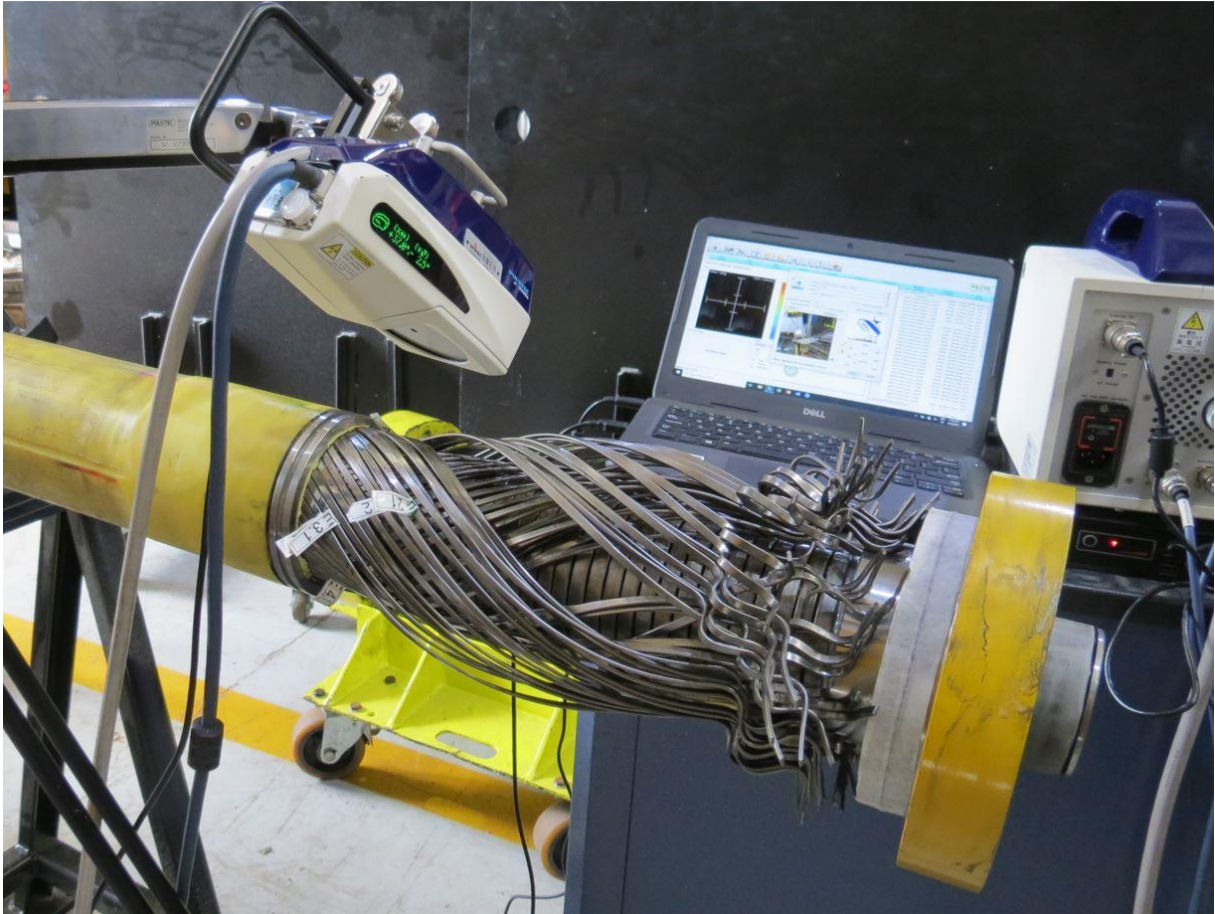


Fonte: O AUTOR, 2021.

Com as etapas prévias ao fechamento da jaqueta concluídas e os fios alocados já na posição final para resinagem (Figura 32), encerrou-se a aquisição de dados feita pelo *gauges* e realizou-se a aquisição de dados referentes a TR superficial dos fios no cenário pós montagem. Na Figura 33 é mostrado o procedimento com difratômetro de raios X para medição de tensões residuais nos fios após as etapas de montagem do conector. A partir das medições prévia e posterior ao processo de montagem, pode-

se obter a componente de tensões residuais induzidas pelas manipulações dos fios durante a montagem do acessório.

Figura 33 – Medições de tensões residuais nos fios no cenário pós etapas da montagem do conector.



Fonte: O AUTOR, 2021.

4.2 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico simulou a condição do ensaio monitorado experimentalmente. De uma forma simplificada, a ideia é avaliar a influência da manipulação dos fios das armaduras de tração, durante o processo de montagem do conector *foldless*, na indução de tensões sobre estes, e determinar um limite de abertura dos fios, ângulo máximo de manipulação, sem que gerem prejuízos à vida dos fios por conta de tensões geradas.

4.2.1 Geometria

Para a criação da geometria dos componentes que representam as condições de montagem do conector *foldless* foram utilizados os recursos do software SolidWorks 2014 x64 Edition. Nessa etapa, foram criados os seguintes componentes, como parte do modelo:

- Duto flexível base;
- Cunha;
- Fio da armadura de tração;
- Gabarito de dobra.

4.2.2 Modelo

Para geração do modelo e definição das condições de contorno da simulação, foi utilizado o software Abaqus / CAE, versão 6.12. Neste, com as geometrias dos componentes importadas, gerou-se a malha, conforme mostra a Figura 34, com as especificações de cada componente conforme é apresentado na Tabela 4, e definidas as condições para a simulação, que seguem:

- Fio com extremidade livre para deslocamentos;
- Duto flexível, cunha e gabarito de dobra como sólidos rígidos.

Ainda como condições para realização da simulação, cabe ressaltar a utilização da simplificação com *self contact* e a utilização de elementos rígidos.

Figura 34 – Modelo numérico contemplando componentes e suas respectivas malhas.

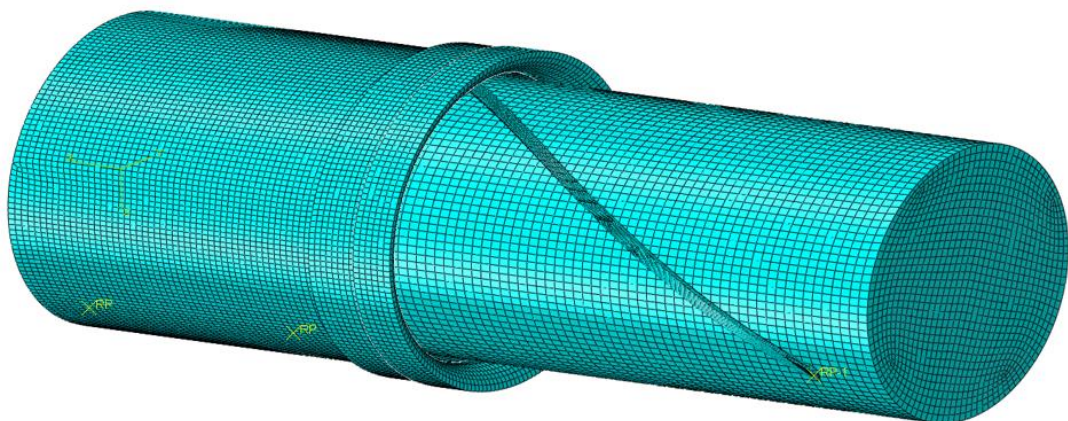


Tabela 4 – Especificação de malha utilizada nos componentes do modelo numérico.

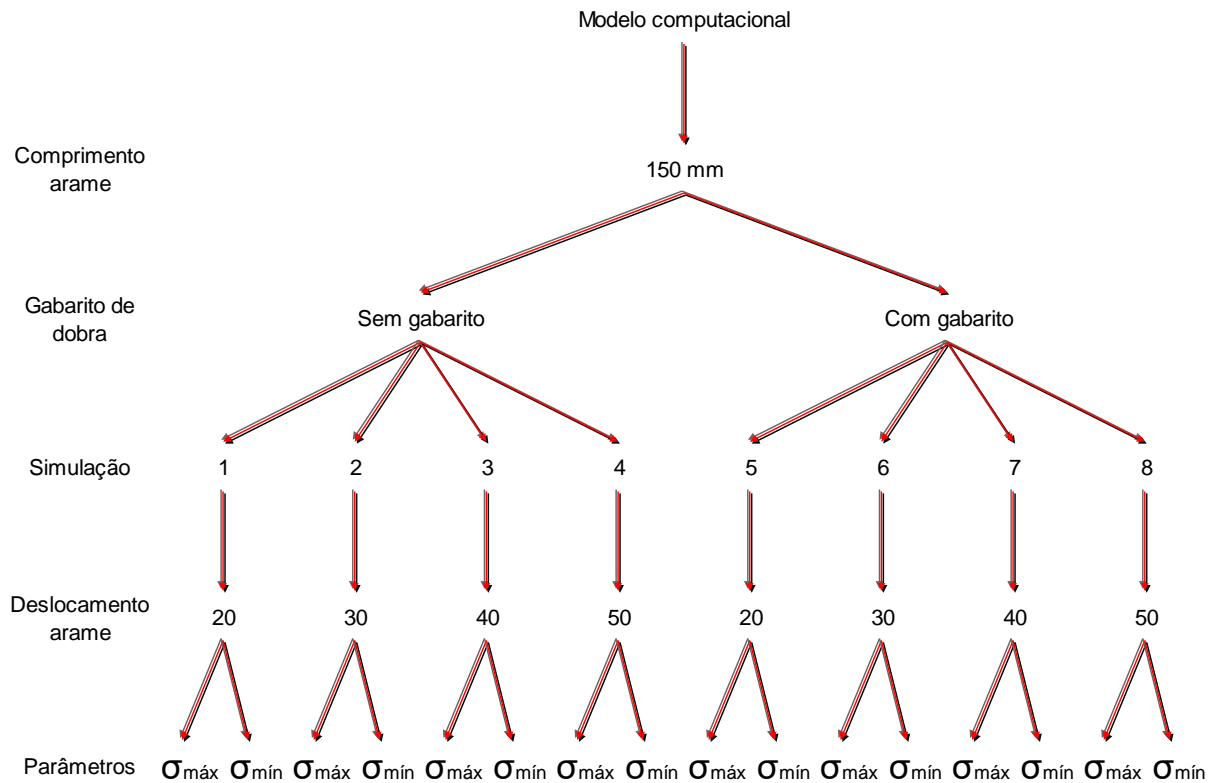
Componente	Numero de elementos	Tipo de elemento	
		Descrição	Código
Duto flexível	12504	Quadrilateral	R3D4
Cunha	22994	Quadrilateral	R3D4
Fio da armadura de tração	23188	Hexaedrico quadrático	C3D20R
Gabarito de dobra	85158	Hexaedrico linear	C3D8R

Fonte: O AUTOR, 2023.

4.2.3 Procedimento

O modelo numérico, que tem por objetivo avaliar a manipulação dos fios durante o processo de montagem do conector, foi planejado de tal forma para que diferentes graus de abertura de fio fossem simulados. No esquema da Figura 35 é apresentada a sequência das simulações e os dados que foram adquiridos, sendo estes definidos como tensão máxima principal e tensão mínima principal. No total foram 8 diferentes simulações com variação de fatores que contemplam o uso ou não do gabarito de dobra e o deslocamento na extremidade do fio.

Figura 35 - Árvore de amostragem do procedimento numérico.

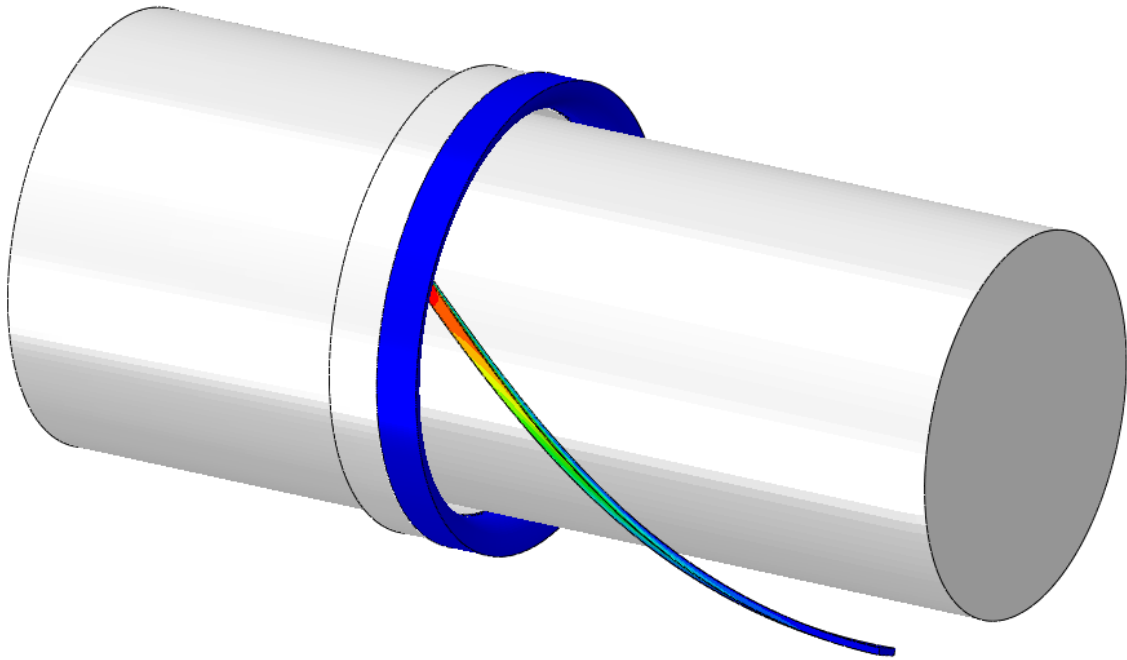


Fonte: O AUTOR, 2021.

Para simplificar o modelo, algumas considerações foram tomadas. Dentre essas, o comprimento do fio a partir da cunha ficou definido em 150 mm. Isso se deu por conta de ser o valor limite que permite o deslocamento do fio em uma só direção causando flexão pura sobre a base da cunha, ou seja, direção do deslocamento de 90° em relação a extremidade da cunha onde o fio fica apoiado. Outra simplificação foi a utilização de apenas um fio que representa todos os demais da camada externa de tração.

Na Figura 36 é apresentado o modelo com o fio deslocado em um dos níveis pré-definidos.

Figura 36 – Modelo computacional representando a manipulação de fio durante a montagem do conector.

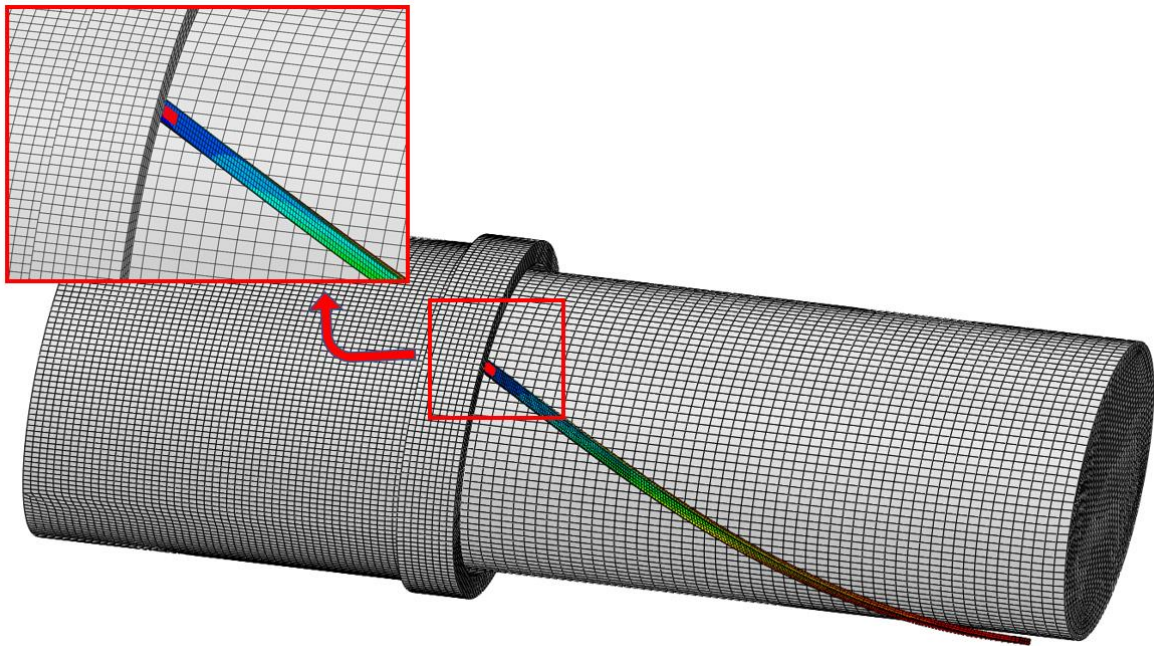


Fonte: O AUTOR, 2022.

Com o propósito de comparar os resultados encontrados nos processos numérico e experimental, foi desenvolvido uma região de análise específica no modelo numérico, sendo esta criada para simular os extensômetros instalados fisicamente, chamada de *gauge* virtual, conforme mostrado na Figura 37.

Para representar os extensômetros de forma fiel, foram selecionados para o *gauge* virtual alguns elementos da malha na parte superficial do fio. A área que o somatório dos elementos abrange e a posição destes elementos em relação ao fio / cunha / gabarito são similares aos *gauges* utilizados no modelo experimental. Com isso, a ideia é ter um modelo numérico calibrado que forneça os resultados e possibilite determinar limites para manipulação dos fios.

Figura 37 – Modelo numérico com o detalhe mostrando a região criada que representa o *gauge* virtual.



Fonte: O AUTOR, 2022.

4.2.4 Teste de convergência de malha

O teste de convergência de malha tem como objetivo a busca de uma malha que apresente um baixo erro numérico e um menor número de elementos possíveis. Na teoria, quanto mais refinada a malha, ou seja, quanto maior o número de elementos, mais acertivo é o resultado. Em contrapartida, uma geometria com uma malha muito refinada, com alto número de elementos, ocasiona em um tempo de processamento de simulação alto.

Na Tabela 5 é apresentado um resumo do que foi procedido com o teste. A cada rodada, foi reduzido o tamanho e, conseqüentemente, aumentado o número de elementos finitos, a fim de obter um resultado mais acertivo. O critério de aceitação para obtenção da malha final foi de 1,5% de erro numérico entre os resultados das malhas de rodadas subsequentes. No caso dos componentes duto, cunha e gabarito, estes tiveram uma convergência de resultado direta, com poucas rodadas de alteração de parâmetros. Com o componente fio foi necessário um processo de divisão da geometria em 3 regiões, onde a região que concentra a deformação deste,

região central do fio, teve um refinamento maior com relação as outras duas regiões, nas extremidades.

Tabela 5 – Resumo do teste de convergência de malha para definição do parâmetro do modelo numérico.

Teste de convergência de malha			
Componente	Nº rodadas até convergência	Nº final de elementos	Erro numérico
Duto flexível	2ª	12504	0,3%
Cunha	3ª	22994	0,8%
Fio armadura de tração	5ª	23188	1,2%
Gabarito de dobra	3ª	85158	0,6%

Fonte: O AUTOR, 2023.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentado um compilado de informações referentes aos resultados obtidos com os modelos realizados.

5.1 AVALIAÇÃO GERAL DO PROCEDIMENTO DE MONTAGEM DO CONECTOR *FOLDLESS*

Como base para avaliação do procedimento de montagem do conector *foldless*, será abordado uma análise quantitativa dos resultados experimentais e numéricos.

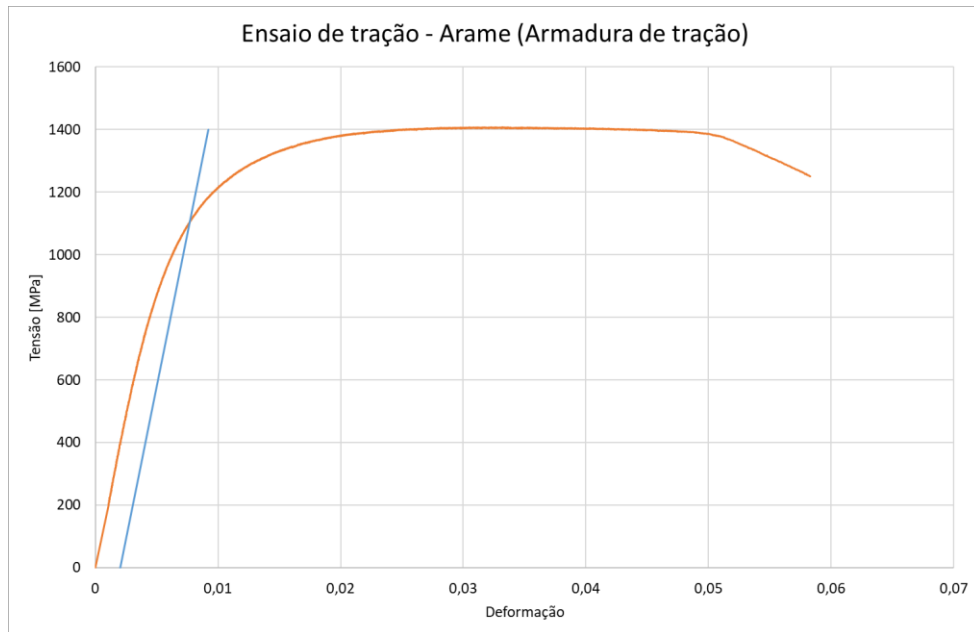
5.1.1 Método experimental

5.1.1.1 Medições de deformação

As medições de deformação realizadas por meio de extensômetros foram efetuadas durante o período de montagem do conector que envolvessem etapas de manipulação dos fios. Para ser mais exato, foram instalados após a etapa de inserção da cunha, onde os fios ainda não sofreram nenhum tipo de ação mecânica, e desinstalados após a etapa de acomodação dos fios sobre o miolo do conector.

Para obtenção das tensões nos fios, foram utilizados como base informações de ensaios de tração realizados previamente nos fios da armadura de tração. Assim, toda a deformação aquiritada pelos *strain gauges* durante o período de montagem foi convertida em tensão equivalente. Na Figura 38 é apresentado o gráfico de um dos ensaios de tração realizados.

Figura 38 – Gráfico que representa o ensaio de tração no fio da armadura de tração.



Fonte: O AUTOR, 2021.

Para maior confiabilidade dos resultados, foram realizados 3 amostragens dos ensaios de tração, onde foram extraídos dados referentes aos parâmetros de escoamento e resistência, calculados as médias e os desvios padrões, conforme segue a Tabela 6.

Tabela 6 – Dados extraídos das amostragens dos ensaios de tração nos fios da armadura de tração.

Ensaio de tração - Fios armadura de tração					
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão
Limite de escoamento [MPa]	1154,2	1129,1	1104,0	1129,1	25,1
Limite de resistência [MPa]	1412,7	1418,4	1408,3	1413,1	5,1

Fonte: O AUTOR, 2023.

Devido ao número alto de extensômetros instalados, no total 24, os gráficos com os dados dos monitoramentos de todo o processo são apresentados no item APÊNDICE A –, em grupos de 2 seguindo um padrão de configuração. A ideia nesse

caso é tornar o capítulo mais objetivo com o resumo e análise das informações adquiridas, deixando a base de dados disponível em um item a parte.

Os dados aqusitados pelos extensômetros são apresentados em gráficos individuais, que indicam a tensão medida em função do período que foram executadas as etapas relacionadas a montagem do conector. Com o intuito de identificar as atividades dentre todo o processo de montagem, foram destacadas 3 regiões nos gráficos que representam as seguintes etapas:

- 1) Retirada das camadas intermediárias, corte e soldagem da armadura de pressão;
- 2) Lixamento da camada de estanqueidade, corte e limpeza profunda dos fios, resinagem do miolo;
- 3) Conformação das extremidades dos fios para sistema de ancoragem.

Em alguns casos, como nos fios 4.1, 6.1, 7.1 e 12.1, o gráfico dos resultados apresenta apenas as 2 etapas iniciais. Isso acontece pelo fato de os extensômetros terem se danificado durante a execução da segunda etapa do processo de montagem devido a criticidade da manipulação dos fios.

O resumo das leituras realizadas com os extensômetros são apresentados nas tabelas e gráficos a seguir. Na Tabela 7, é apresentado um compilado dos dados de tensão máxima e mínima em cada fio monitorado por *strain gauge*, e o desvio padrão de todos os valores de tensões medidas durante o período de aquisições.

Tabela 7 – Tensões máximas e mínimas, e desvio padrão dos valores medidos durante a aquisição dos *strain gauges*.

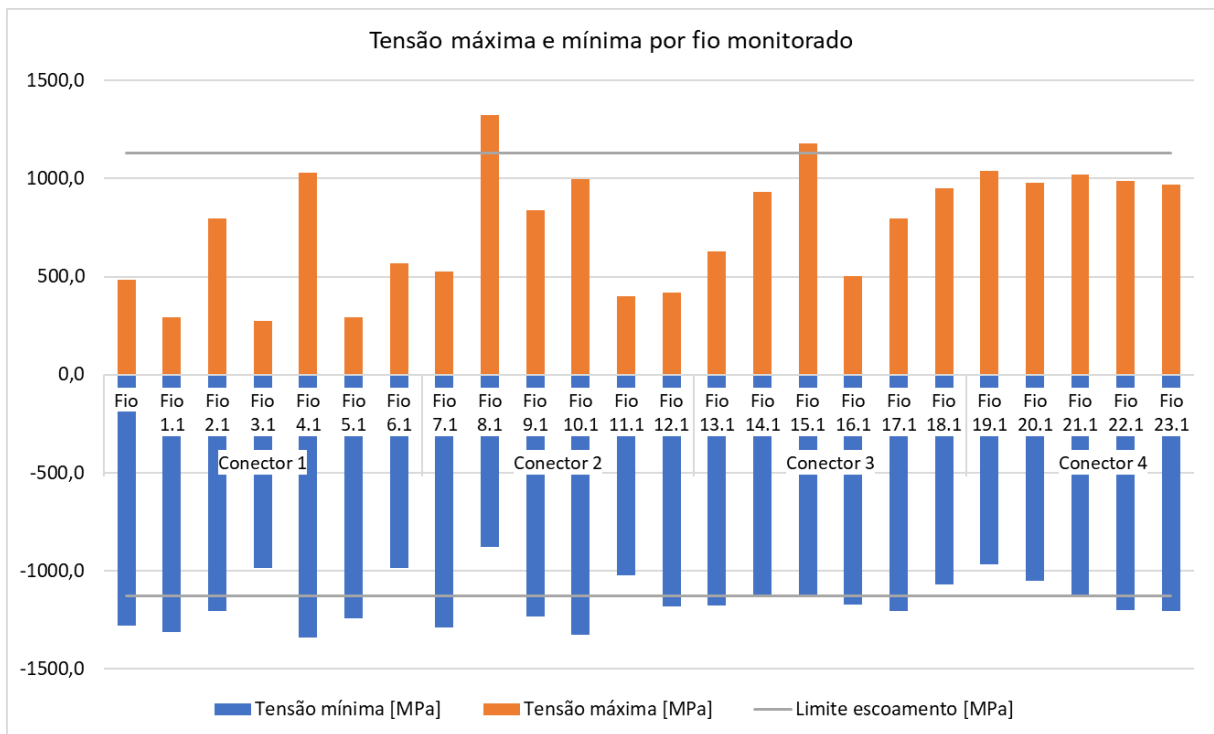
Tensões máximas e mínimas, e desvio padrão das medições com <i>strain gauges</i>						
Conector 1						
Fio	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1
Tensão mínima [MPa]	-1280,9	-1314,5	-1205,7	-987,0	-1343,0	-1244,9
Tensão máxima [MPa]	483,0	294,0	798,0	273,0	1032,0	294,0
Desvio Padrão [Mpa]	510,8	439,4	545,8	362,0	669,4	403,0
Conector 2						
Fio	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1
Tensão mínima [MPa]	-987,0	-1289,1	-877,1	-1233,5	-1326,9	-1022,7
Tensão máxima [MPa]	567,0	525,0	1322,7	839,0	997,7	399,0
Desvio Padrão [Mpa]	449,5	507,6	693,3	598,8	680,8	436,0
Conector 3						
Fio	13.1	14.1	15.1	16.1	17.1	18.1
Tensão mínima [MPa]	-1185,0	-1177,5	-1120,8	-1120,8	-1172,1	-1205,7
Tensão máxima [MPa]	420,0	630,0	931,4	1177,5	504,0	798,0
Desvio Padrão [Mpa]	418,8	498,1	510,2	528,8	471,6	550,3
Conector 4						
Fio	19.1	20.1	21.1	22.1	23.1	24.1
Tensão mínima [MPa]	-1068,7	-970,2	-1052,6	-1125,0	-1201,0	-1205,7
Tensão máxima [MPa]	950,9	1039,8	979,2	1022,7	987,7	970,2
Desvio Padrão [Mpa]	505,8	548,3	481,6	536,4	430,1	503,5

Fonte: O AUTOR, 2023.

As tensões máximas e mínimas são apresentadas no formato gráfico, conforme mostra a Figura 39. Pode-se notar que, dos 24 fios monitorados, 16 apresentaram em algum momento do processo de montagem do conector *foldless* tensões máximas ou mínimas superiores ao limite de escoamento. Ao ultrapassar esse limite, o fio sofre deformação plástica e conseqüente indução de tensões residuais nas regiões conformadas. Nesse caso, a indução de tensões residuais é originada por carregamentos em flexão, o que induz um gradiente de deformação ao longo da profundidade do fio. Sobretudo, as induções de tensões indesejadas são prejudiciais para a vida útil deste quando submetido a esforços de fadiga.

No caso dos maiores valores de tensão, o gráfico mostra que as tensões mínimas atingem o limite de escoamento mais frequentemente. Isso ocorre pelo fato de que o *strain gauge* é instalado sobre a parte superior do fio, região que recebe naturalmente maiores esforços de compressão durante o manuseio deste.

Figura 39 – Valores de tensão máxima e mínima registrada em cada fio monitorado.



Fonte: O AUTOR, 2023.

Com os resultados plotados, e conforme já ressaltado anteriormente, pode-se observar que na grande maioria dos extensômetros os valores de tensões medidas ultrapassam os limites do escoamento em pelo menos algum momento do processo de montagem. Como o processo é puramente manual, dependente das condições de montagem e habilidades do operador, é compreensível que o grau de tensões oscilem entre os casos mesmo com a configuração dos parâmetros idêntica, ou seja, em alguns fios os valores de tensão medidos não ultrapassem valores significativos e em outros atinjam valores prejudiciais a integridade do elemento. Com isso, pode-se afirmar que, embora o conceito do conector *foldless* proponha que os níveis de tensão residual nos fios sejam reduzidos pelo fato de eliminar a etapa de dobra do processo de montagem, este não evita que o processo contemple uma manipulação mais brusca dos fios e induza tensões residuais indesejadas, resultando em concentradores de tensão.

Na Tabela 8 é apresentado uma relação de dados com um comparativo entre parâmetros, relacionando o percentual de pontos adquiridos que ficaram fora do regime elástico do material. Foi utilizado o patamar do escoamento como referência pelo fato de que, para o caso de valores superiores, propriedades físicas do material podem ser alteradas.

Tabela 8 – Comparativo de dados das leituras dos extensômetros entre parâmetros.

Gabarito de dobra	Conector	Arame	Pontos fora regime elástico		
			Por arame	Por conector	Por uso de gabarito
Sem	1	1.1	19,1%	17,8%	15,6%
		2.1	23,7%		
		3.1	12,5%		
		4.1	0,0%		
		5.1	15,8%		
		6.1	19,8%		
	2	7.1	0,0%	13,5%	
		8.1	12,0%		
		9.1	21,8%		
		10.1	11,5%		
		11.1	8,7%		
		12.1	0,0%		
Com	3	13.1	2,1%	2,0%	1,9%
		14.1	0,6%		
		15.1	0,3%		
		16.1	2,1%		
		17.1	1,4%		
		18.1	5,5%		
	4	19.1	0,0%	1,8%	
		20.1	0,0%		
		21.1	0,0%		
		22.1	2,2%		
		23.1	4,0%		
		24.1	4,5%		

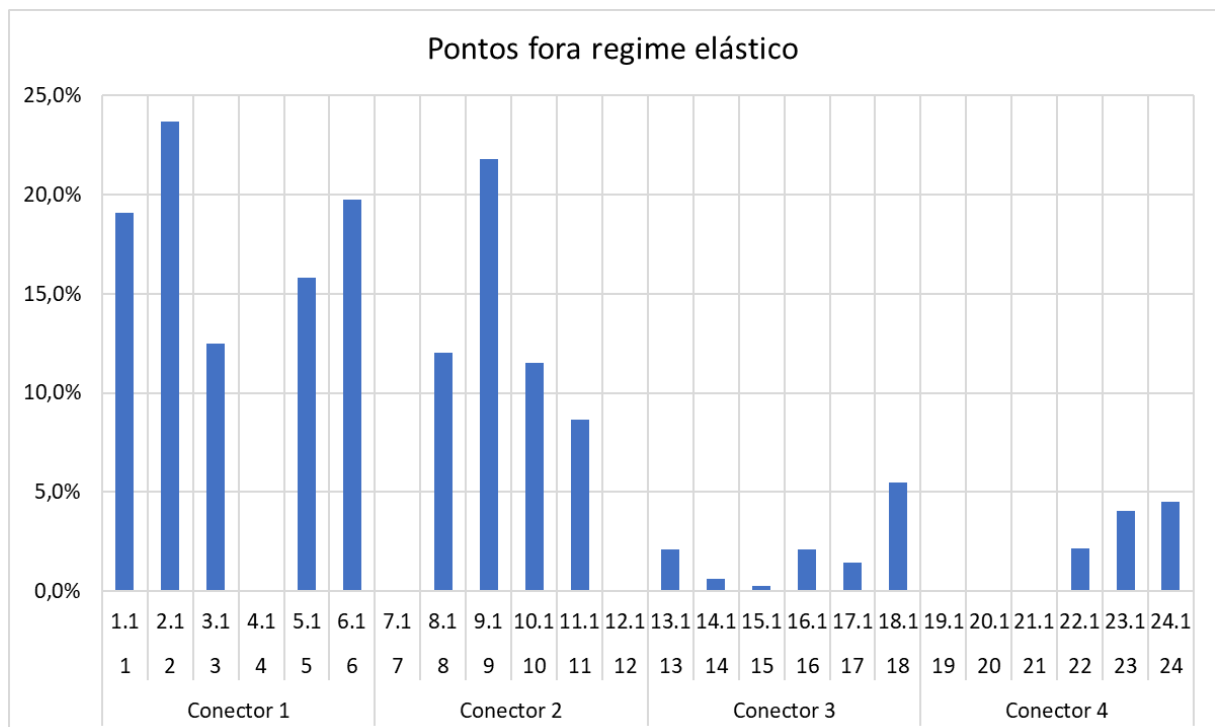
Fonte: O AUTOR, 2021.

Com base nos resultados, pode-se perceber uma grande diferença entre os valores percentuais que representam os pontos fora do regime elástico do parâmetro 'Gabarito de dobra'. Enquanto nos casos em que foram utilizados gabaritos de dobra

menos de 2% dos pontos aqisitados pelos extensômetros ficaram fora do regime elástico, para os casos em que não foram utilizados os valores atingiram mais de 15%. Esse comparativo reforça a ideia de que, com o uso do componente, a manipulação de fios durante o processo de montagem proporciona deformações menos críticas, e como efeito, menores prejuízos ao conjunto montado.

Na Figura 40 é apresentado, em forma gráfica, a relação de pontos aqisitados que ultrapassaram o limite de escoamento do material em cada fio que foi monitorado. É importante ressaltar, que o tempo de cada processo de montagem não é o mesmo em todos os casos, sendo que essa variável é dependente de condições como habilidade do operador, nível de degradação do duto, entre outros. Portanto, cada processo de montagem teve um tempo distinto e, conseqüentemente, um número de pontos de deformação aqisitados específico para cada caso.

Figura 40 – Relação de pontos aqisitados que ultrapassaram o limite do escoamento do material.



Fonte: O AUTOR, 2023.

Ao analisar o gráfico da Figura 40, é notório que nos conectores 1 e 2, casos onde não foi utilizado o componente 'Gabarito de dobra', obteve-se uma densidade maior de pontos fora da região elástica do material. Esse resultado pode ser explicado

pelo fato de que, com a utilização do gabarito, os fios se acomodam sobre uma superfície de perfil curvilíneo durante a manipulação, proporcionando um apoio mais suave quando comparado com a cunha, que por sua vez possui perfil quadrado, com um ângulo reto de 90° entre faces. Portanto, com base nos valores aquisitados, pode-se afirmar que a configuração que utiliza o gabarito de dobra apresenta melhor desempenho dos resultados.

5.1.1.2 Medições de tensões residuais

As medições de tensões residuais realizadas por meio do difratômetro de raios X foram efetuadas em duas etapas, pré e pós montagem. Conforme procedimento proposto, foram realizadas leituras em 2 fios por sextante e em duas direções distintas, longitudinal e transversal, nos 4 conectores.

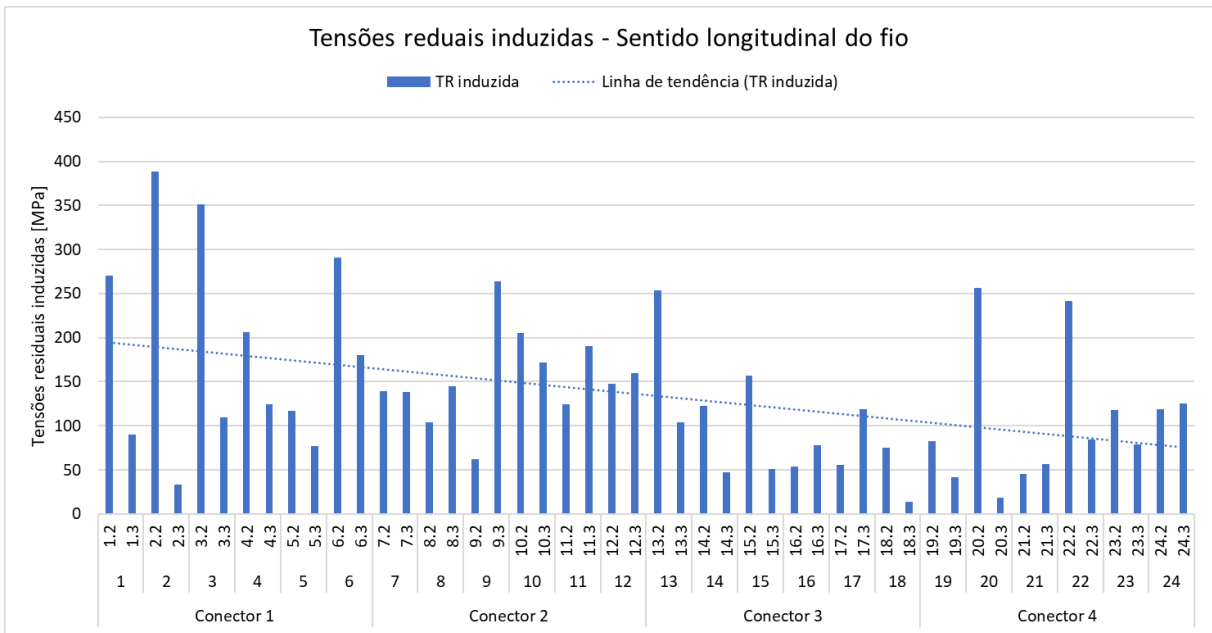
Os resultados de medição realizados nos fios dos conectores 1, 2, 3 e 4 são apresentados no item APÊNDICE B –. Nas tabelas com os dados de cada conector, a TR induzida é calculada subtraindo os valores do cenário pós montagem do cenário pré montagem.

No gráfico da Figura 41 é apresentado um compilado de todas as medições realizadas no sentido longitudinal dos fios. Para melhor entendimento, cada fio foi identificado na legenda conforme nomenclatura adotada no planejamento do procedimento experimental, apresentado na Figura 27. Ainda, pode-se analisar as medições por sextantes e / ou conectores.

Os resultados indicam um aumento de valores de tensões residuais no cenário pós montagem em todos os fios, reforçando a hipótese de que a manipulação destes no processo de montagem, feita de forma sem controle, pode gerar prejuízos a vida do conector em serviço.

Analisando a linha de tendência, esta que foi plotada com o intuito de acompanhar a variação de desempenho de montagem entre os conectores, pode-se perceber uma ligeira redução no módulo das tensões residuais induzidas nos fios nos conectores 3 e 4 quando comparados ao 1 e 2. Essa redução pode ser atribuída a utilização do ‘Gabarito de dobra’, uma vez que a função deste componente é tornar mais suave o ponto de apoio dos fios durante a manipulação e conseqüentemente induzir menores tensões sobre a região crítica

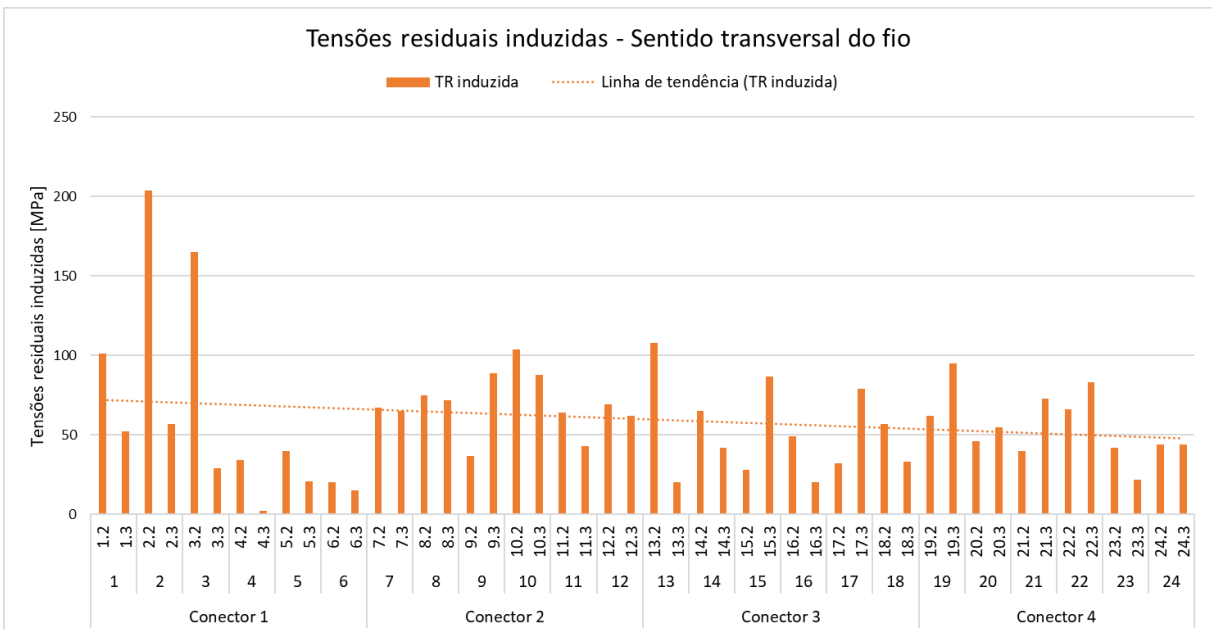
Figura 41 – Tensões residuais induzidas no sentido longitudinal dos fios da armadura de tração.



Fonte: O AUTOR, 2023.

Na Figura 42 é apresentado na forma gráfica, o compilado de valores referentes às tensões residuais induzidas no sentido transversal dos fios.

Figura 42 – Tensões residuais induzidas no sentido transversal dos fios da armadura de tração.



Fonte: O AUTOR, 2023.

Assim como ocorreu com as tensões induzidas no sentido longitudinal dos fios, os resultados correspondentes ao sentido transversal também indicam um aumento dos valores de tensões residuais no cenário pós montagem em todos os fios.

Com relação ao módulo de tensão residual induzida no sentido transversal dos fios, nota-se uma leve tendência a diminuição nos conectores que utilizam o componente 'Gabarito de dobra' quando comparados aos que não utilizam, comportamento similar ao que aconteceu nas leituras longitudinais dos fios.

Na Tabela 9 é apresentado uma relação de dados comparando a média dos resultados de TR induzidos nos fios entre os parâmetros pré definidos.

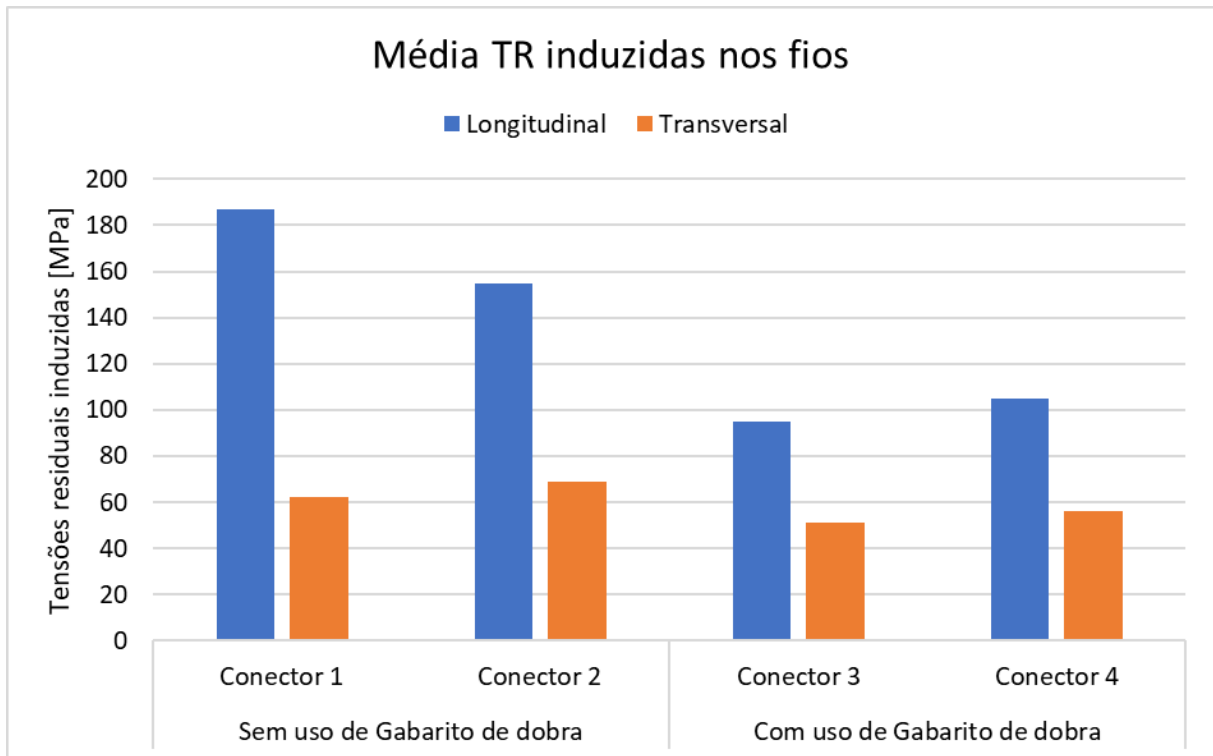
Tabela 9 – Comparativos de dados das medições com DRX entre parâmetros.

Uso de gabarito de dobra	Conector	Sentido medição	Média TR induzida [MPa]	
			Por conector	Por uso de gabarito
Sem	1	Longitudinal	187	171
	2	Longitudinal	155	
	1	Transversal	62	65,5
	2	Transversal	69	
Com	3	Longitudinal	95	100
	4	Longitudinal	105	
	3	Transversal	51	53,5
	4	Transversal	56	

Fonte: O AUTOR, 2021.

Na Figura 43 é apresentado a média das tensões residuais induzidas em ambos sentidos, longitudinal e transversal, dos fios por conectores.

Figura 43 – Média das tensões residuais induzidas nos sentidos longitudinal e transversal dos fios por conectores.



Fonte: O AUTOR, 2023.

Com base nos resultados, constata-se que as maiores variações entre as médias dos resultados se dão entre o uso de gabarito de dobra. As variações entre conectores existem, e podem ser explicadas pelas condições de montagem e perícia do operador que realiza o procedimento, porém possuem um módulo menor em relação ao parâmetro 'Gabarito de dobra'.

A redução da média das leituras utilizando gabarito de dobra atingiram valores da ordem de 40% para as medições longitudinais e em torno de 18% de redução para as medições transversais. Esse resultado é coerente com o esperado, uma vez que o uso do gabarito tem por objetivo reduzir o grau de dobra e consequentemente as tensões residuais induzidas nos fios.

Seguindo a linha do estudo de Benirschke (2014), no qual chegou-se a conclusão de que quando maior o raio do gabarito menor seriam as tensões induzidas, os resultados práticos apresentados, obtidos em um caso real, reforçam a ideia.

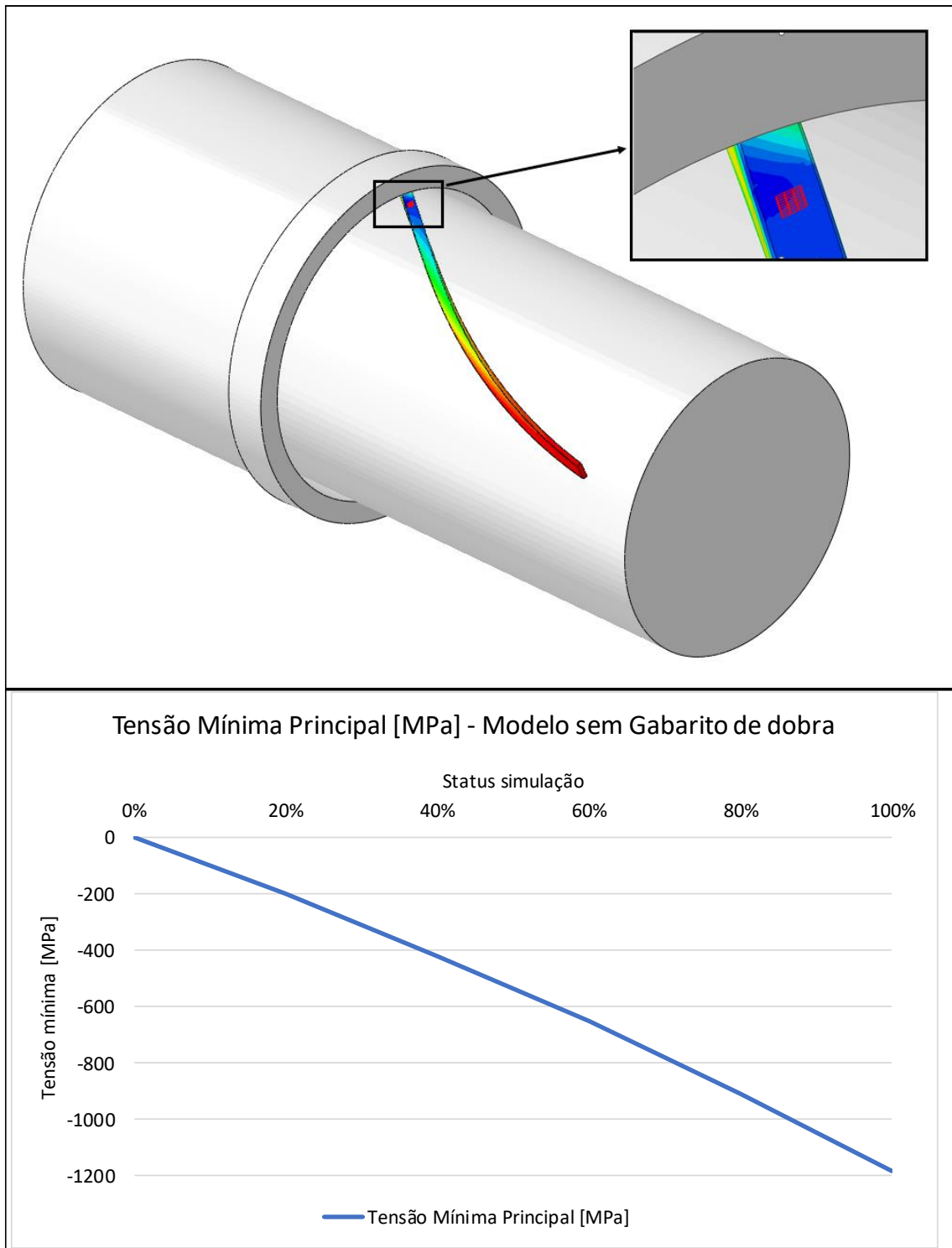
5.1.2 Método numérico

As simulações realizadas a partir do modelo numérico foram baseadas nos parâmetros e respectivos patamares apresentados na árvore de amostragem do procedimento numérico, da Figura 35.

Os resultados do modelo numérico são apresentados em gráficos que mostram o campo de tensões na região que foi instalado o *gauge* virtual, recurso que foi utilizado para simular o extensômetro físico, e em tabelas que relacionam os dados de tensão máxima e mínima encontrados nos fios durante as simulações.

Na Figura 44 é apresentado um esquema mostrando o modelo sem gabarito com o fator deslocamento no patamar máximo (50 mm), que representa a simulação 4 da árvore de amostragem, na condição deformada, e um gráfico com as tensões superficiais lidas pelo *gauge* virtual para esse caso.

Figura 44 – Esquema mostrando a simulação 4 na condição deformada e o gráfico de tensões lidas pelo *gauge* virtual.

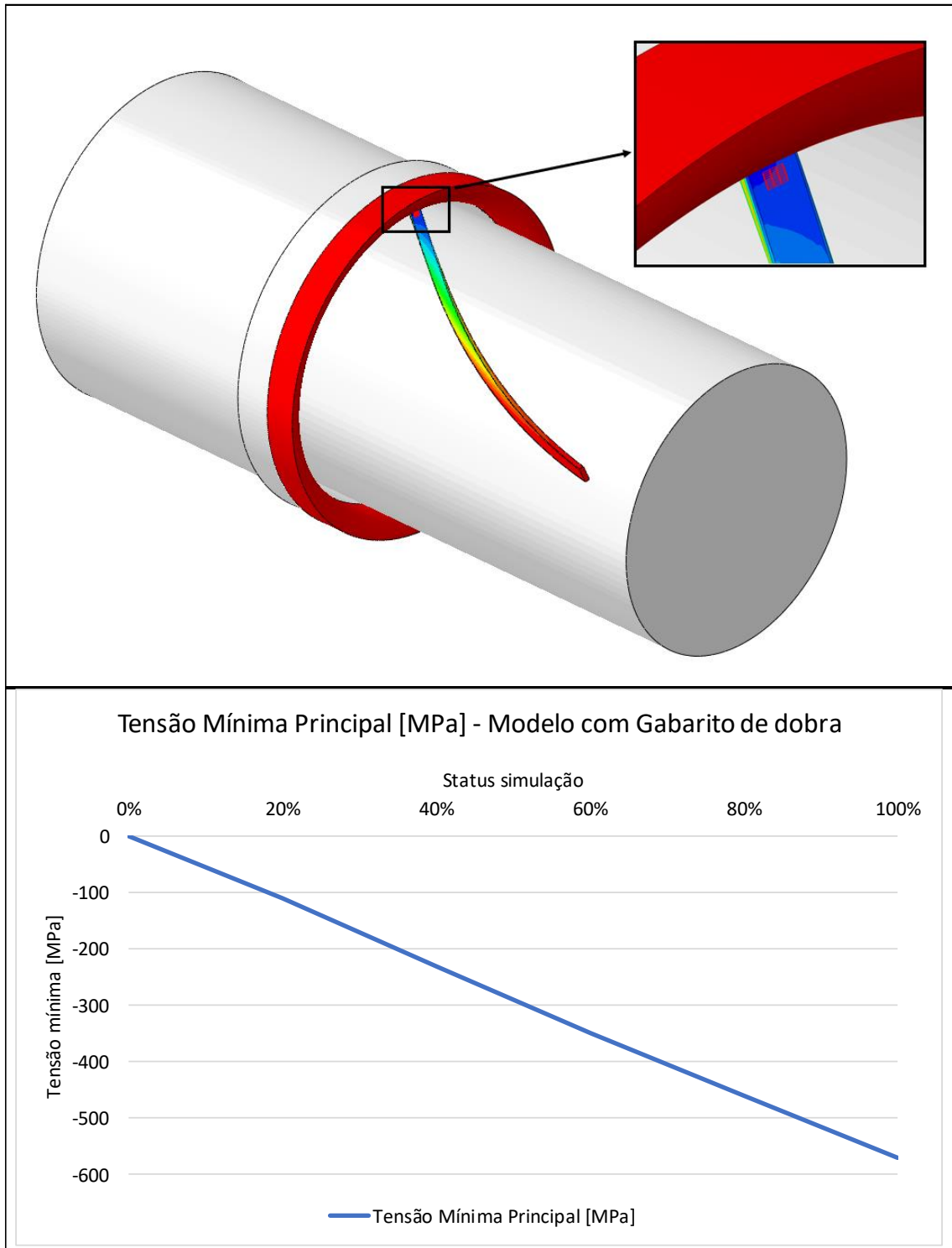


Fonte: O AUTOR, 2022.

Na Figura 45 é apresentado um esquema mostrando o modelo com gabarito de dobra e com o fator deslocamento no patamar máximo (50 mm), que representa a

simulação 8 da árvore de amostragem da Figura 35, na condição deformada e um gráfico das tensões superficiais adquiridas pelo *gauge* virtual.

Figura 45 – Esquema mostrando a simulação 8 na condição deformada e o gráfico de tensões lidas pelo *gauge* virtual.



Fonte: O AUTOR, 2022.

Comparando os dois esquemas, pode-se perceber uma diferença considerável de valores de tensões superficiais compressivas adquiridas pelos *gauges* virtuais, sabendo que o diferencial entre os casos é a utilização ou não do componente gabarito de dobra, uma vez que o vetor deslocamento na extremidade do fio é igual em módulo e direção para ambos os casos.

No caso dos gráficos das Figura 44 e Figura 45, é visto um aumento linear no módulo de tensão adquirida em função do tempo. Isso pode ser relacionado ao deslocamento linear ao longo do tempo, de forma a induzir um acréscimo no módulo da tensão na medida que o deslocamento vai aumentando. Outro ponto importante é que, por estar instalado na parte superior do fio, as tensões induzidas são compressivas, representadas pelos valores negativos nos gráficos.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos, de tensão máxima e mínima (MPa), com as simulações do modelo numérico, conforme planejamento da Figura 35.

Tabela 10 – Resultados das simulações do modelo numérico.

Gabarito de dobra	Simulação	Deslocamento arame (mm)	Parâmetros	
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)
Sem gabarito	1	20	415,3	-595,8
	2	30	664,3	-1222,2
	3	40	936,6	-1643,4
	4	50	1153,2	-1897,3
Com gabarito	5	20	388,1	-552,3
	6	30	603,8	-977,4
	7	40	846,4	-1444,7
	8	50	1090,7	-1653,0

Fonte: O AUTOR, 2022.

Nas colunas que mostram as tensões obtidas com as simulações, deve-se adotar as seguintes premissas:

- Tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)): Tensão trativa, lida na superfície inferior do fio;
- Tensão mínima ($\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)): Tensão compressiva, lida na superfície superior do fio.

As imagens com os modelos nas versões finais, com a simulação completa, em cada nível dos parâmetros pré estabelecido são apresentados no item APÊNDICE C –.

Considerando que a tensão de escoamento do material utilizado no fio é de 1129 MPa, só é possível a manipulação deste sem que seja ultrapassado o limite elástico, abaixo dos seguintes níveis de deslocamento:

- Sem uso de gabarito de dobra: deslocamento máximo de 28 mm na extremidade do fio;
- Com uso de gabarito de dobra: deslocamento máximo de 33 mm na extremidade do fio.

O valor limite de deslocamento expressa uma condição a ser seguida durante a montagem para que não haja plastificação dos fios e consequentes danos à integridade dos mesmos. Pode-se notar que, mesmo utilizando um conceito de conector que dispensa a etapa de dobra dos fios, o deslocamento necessário para gerar uma deformação plástica nesses é facilmente alcançado, uma vez que o processo de montagem é manual e não existe limitante para tal deslocamento. Com isso, caso seja manipulado acima do limite de deslocamento, o fio deve sofrer danos, fato que não está alinhado com o principal objetivo do conector *foldless*.

Através de seu trabalho, Campello (2014) propôs o conceito de conector *foldless*, que tem como principal objetivo a redução da concentração de tensões na entrada do conector por meio da isenção da etapa de dobramento dos fios durante a montagem deste. Para evitar que os fios sejam dobrados e se garantam os benefícios da utilização do conector *foldless*, deve-se trabalhar com o deslocamento máximo dos fio dentro dos limites estabelecidos para as condições de utilização ou não do gabarito de dobra.

A diferença no deslocamento máximo na extremidade do fio para garantir que as tensões não extrapolem o regime elástico evidencia uma melhora de desempenho da montagem do conector quando com o uso do componente gabarito de dobra.

Na Tabela 11 é apresentado um comparativo de tensões máximas e mínimas entre as simulações que utilizam ou não o parâmetro gabarito de dobra.

Tabela 11 – Comparativo de tensões máx. e mín. entre as simulações que utilizam ou não gabarito de dobra.

Deslocamento arame (mm)	Parâmetros					
	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)			$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)		
	S/ gabarito	C/ gabarito	Diferença (MPa)	S/ gabarito	C/ gabarito	Diferença (MPa)
20	415,3	388,1	27,2	-595,8	-552,3	43,5
30	664,3	603,8	60,6	-1222,2	-977,4	244,8
40	936,6	846,4	90,2	-1643,4	-1444,7	198,7
50	1153,2	1090,7	62,5	-1897,3	-1653,0	244,3

Fonte: O AUTOR, 2022.

Nesta, os resultados de tensão máxima e mínima ($\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$) são apresentados em grupos separados. A última coluna de cada grupo diz respeito a diferença de tensões máximas e mínimas utilizando os dois níveis do parâmetro gabarito de dobra, com ou sem o uso do componente.

Os resultados apresentados na coluna 'Diferença' reforçam o fato de que o uso do componente desenvolvido com o objetivo de reduzir os danos aos fios durante o processo de montagem do conector é eficiente. Considerando os patamares de deslocamento pré definidos para o modelo, pode-se afirmar que, o uso de gabarito reduz, em média, 7,7% as tensões trativas (máximas) e 13% as tensões compressivas (mínimas) encontradas no fio.

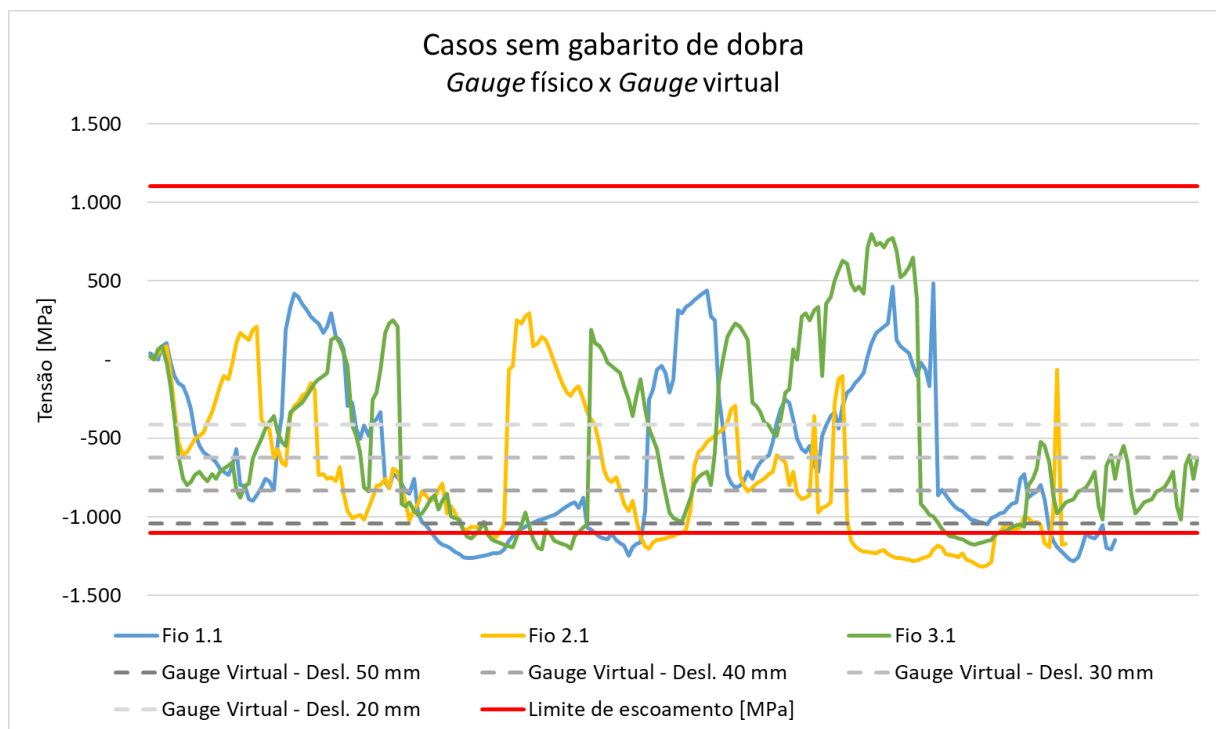
5.1.3 Comparação nos resultados experimentais e numéricos

Os resultados adquiridos com o processo físico, durante as montagens dos conectores, e com o modelo numérico foram avaliados e comparados quanto a grandezas e harmonia. Para isso, os resultados foram reproduzidos em modelos

padrões de gráficos, a fim de ter uma percepção geral mais acertiva sobre os procedimentos.

Na Figura 46 é apresentado o gráfico dos resultados dos casos experimental e numérico que não utilizaram gabarito de dobra. Com o objetivo de não poluir muito a visualização de cada curva, foram utilizados apenas 3 dos 12 extensômetros que foram instalados, que representam de forma eficiente o modelo experimental.

Figura 46 – Gráfico para comparação dos valores de tensão obtidos com os *gauges* no processo experimental e numérico nos casos que não utilizam o gabarito de dobra.



Fonte: O AUTOR, 2022.

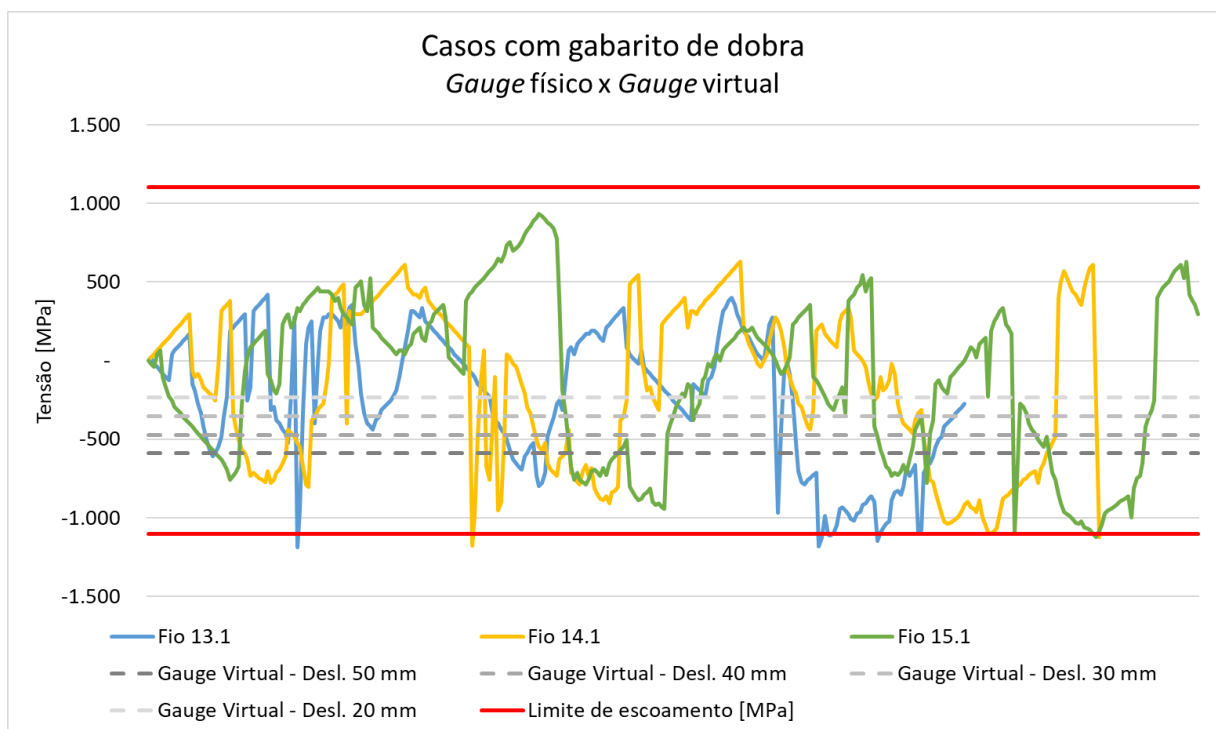
As curvas que representam os *gauges* físicos são modeladas em função do tempo que se levou para montar o conector. No caso das curvas que representam os *gauges* virtuais, estas são expressas em patamares ilustrando a tensão medida no nível de deslocamento especificado na legenda.

Fazendo uma avaliação e correlacionando as curvas dos *gauges* físicos com os patamares obtidos pelo *gauges* virtuais, é notório que, por vários momentos, o deslocamento nas extremidades dos fios ultrapassa o valor de 50 mm. Se resgatarmos o valor limite de deslocamento para evitar qualquer deformação plástica no fio vista no capítulo anterior, que para a configuração sem uso de gabarito de dobra é de 28

mm, fica evidente que o processo de montagem do conector *foldless* admitiu a indução de deformação plástica nos fios da armadura de tração.

Na Figura 47 é apresentado o gráfico dos resultados relacionando os dados obtidos pelos extensômetros físicos e virtuais nos casos que utilizaram o gabarito de dobra. Seguindo o mesmo padrão do gráfico da Figura 46, foram utilizados 3 gauges físicos para representar o modelo experimental.

Figura 47 - Gráfico para comparação dos valores de tensão obtidos com os *gauges* no processo experimental e numérico nos casos que utilizam o gabarito de dobra.



Fonte: O AUTOR, 2022.

Nessa situação, assim como aconteceu nos casos que utilizam a configuração sem gabarito de dobra, por vários momentos a tensão nos *gauges* físicos ultrapassou o limite que representa a geração de tensões equivalentes ao escoamento em regiões críticas do fio, que para o caso da montagem utilizando gabarito de dobra, conforme apresentado no capítulo anterior, é representado pelo deslocamento de 33 mm na sua extremidade.

Com base nessa linha, mesmo com a utilização de um conceito *foldless*, durante a montagem do conector pode ocorrer a plastificação por decorrência da manipulação excessiva dos fios. Ao ultrapassar o limite elástico, as deformações induzem tensões residuais nos componentes e conseqüentemente prejuízos em sua integridade física.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma avaliação detalhada sobre a influência do processo de montagem de conector *foldless* na indução de tensões residuais nos fios das armaduras de tração de dutos flexíveis e os prejuízos associados ao componente. Como base para avaliação, foram utilizados 4 casos reais de montagem de conector e um modelo numérico tridimensional, sendo esse último operado com o intuito de comparação de resultados. Na sequência são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho.

O modelo experimental se mostrou coerente com a expectativa do trabalho. Os resultados evidenciaram o nível de tensões residuais que o processo de montagem do induz nos fios da camada de tração, e ainda mostraram que mesmo sendo utilizado o conector do tipo *foldless*, conceito este que possui isento do procedimento de montagem a etapa de dobras, os fios estão sujeitos a deformações e induções de TR em determinados níveis devido as limitações de processo, como o fato de ser feito de forma manual e totalmente dependente do operador, sem o uso de quaisquer dispositivos que controle a curvatura máxima dos fios.

Seguindo na mesma linha, são fatores que demonstraram elevada influência no nível de deformação plástica induzida nos fios: a perícia do operador para realização da montagem; as condições da extremidade do duto onde se pretende instalar o conector.

Baseado nos resultados obtidos com as medições utilizando o difratômetro de raios-X, ficou explícito o aumento no grau de tensões residuais induzidas em todos os fios, sem excessões, sendo que este aumento se deu de forma mais significativa em fios específicos, com condições específicas. Na média, obteve-se um acréscimo da ordem de 120% nas tensões residuais induzidas na superfície dos fios. Essas informações corroboram com o que apresentou Bueno (2010), quando avaliou conectores sujeitos a carregamentos de fadiga e evidenciou regiões críticas com acréscimos de tensões próximas do conector. Notoriamente, o acréscimo de tensões nos fios do presente trabalho foi em regiões próximas do conector, ou seja, regiões críticas.

O modelo numérico reproduziu adequadamente o que se viu na prática e apresentou valores limites de deslocamento do fio durante a montagem para preservar

este em regime 100% elástico, evitando quaisquer danos ao fio por conta da indução de tensões residuais por deformação plástica. Vale ressaltar que, com o uso do componente gabarito de dobra, o limite máximo de abertura dos fios aumentou em torno de 17%.

Ainda, os resultados numéricos convergiram com o que apresentou De Souza (2013), onde constatou um aumento de tensões geradas em regiões críticas devido a deformação plástica sofrida pelo fio. No presente trabalho a região de acomodamento dos fios, seja nos casos em que foram feitos direto na cunha ou com o uso do gabarito de dobra, é análoga a região crítica evidenciada por De Souza (2013).

De forma esperada, com o uso de gabarito de dobra, a montagem do conector se mostrou mais eficiente sob a ótica de tensões residuais induzidas. O componente aumentou o limite de deslocamento do fio em 17,5% e tornou mais suave a manipulação destes durante o processo. Durante o procedimento experimental, os casos que utilizaram a configuração com gabarito de dobra apresentaram uma parcela maior de manipulações dos fios sem extrapolar o limite elástico quando comparado a configuração sem gabarito de dobra. O melhor desempenho foi confirmado também com as leituras de TR superficiais, sendo que o uso de gabarito de dobra proporcionou redução de tensões induzidas nos fios em ambos os sentidos (longitudinal e transversal). Esse fato ratifica o que evidenciou Benirschke (2014) com o estudo sobre a influência dos raios de gabaritos de dobra na montagem de conectores convencionais. No caso presente, o desempenho do componente 'Gabarito de dobra', este com um raio de fabricação pré-definido, foi comparado com o uso da cunha de ângulo reto (90°) para acomodamento dos fios.

De uma maneira geral, com base no que foi apresentado no trabalho, pode-se concluir que a manipulação de fios de forma não controlada durante a montagem do conector, induz tensões residuais que são prejudiciais a vida do componente. Pode-se afirmar que o conceito apresentado por Campello (2014), que tem como principal objetivo a redução da concentração de tensões na entrada do conector, é eficiente desde que os fios sejam trabalhados no processo de montagem com o deslocamento máximo dentro dos limites estabelecidos, evitando assim dobramentos e garantindo os benefícios da utilização do conector *foldless*. Além disso, pode-se afirmar que o uso do componente 'gabarito de dobra' melhora o desempenho e ajuda a reduzir os danos causados pela manipulação.

7 PROPOSTAS DE FUTUROS TRABALHOS

Nesse capítulo é apresentado algumas ideias para trabalhos futuros que foram observados durante o desenvolvimento do presente trabalho.

- Desenvolver dispositivo / mecanismo para garantir a manipulação dos fios da armadura de tração de forma controlada durante o processo de montagem de conector, a fim de evitar danos a integridade dos mesmos por deformação plástica;
- Realizar ensaios em escala real para determinar a vida em fadiga de conjuntos que utilizaram a montagem com e sem componente gabarito de dobra;
- Realizar estudo de projeto e fabricação para incorporação do gabarito de dobra à cunha, tornando um só componente otimizado;
- Realizar análise numérica com elementos de contato e gabarito de dobra polimérico com propriedades mecânicas medidas e vários raios de curvatura.

REFERÊNCIAS

ABCO Subsea, 2019. Disponível em: <abcosubsea.com/>. Acesso em: jun. de 2021.

Análise experimental de tensões com strain gauges. HBM. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/7226/analise-experimental-de-tenso-esa-com-strain-gages/>>

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). API RP 17B: **Recommended Practice for Flexible Pipe**. 4th ed. Washington, 2008. 226p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). API 17J: **Specification for Unbonded Flexible Pipe**. 4th ed. Washington, 2014. 98p.

BENIRSCHKE, C. **Análise de tensões em conectores de linhas flexíveis**. 2014. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BERGE, S., ENGSETH, A., FYLLING, I. et al., 1992, **Flexible Risers and Pipes: Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes**, Report STF70 A92006, SINTEF Structural Engineering, Trondheim, Norway.

BERTONI, F. **End Fitting para dutos flexíveis unbonded**. Simeros Technologies, 2017. Disponível em: <simeros.com/end-fitting-para-dutos-flexiveis-unbonded/>. Acesso em: jun. de 2021.

BRAESTRUP, M. et al. **Design and installation of marine pipelines**. 1st ed. Oxford: Blackwell Science, 2005.

BUENO, A. F. B. **Avaliação das armaduras de tração de riser flexível durante ensaios axiais de tração e fadiga**. 2010. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of material science and engineering an integrated approach**. 4th ed. USA: John Wiley & Sons, 2012

CAMPELLO, G. et al. **A novel concept of flexible pipe end fitting: tensile armor foldless assembly**. In: OMAE, 31., Rio de Janeiro, Brasil. Anais... EUA: ASME, 2012.

CAMPELLO, G. C. **Metodologia de projeto para o sistema de ancoragem de conectores de dutos flexíveis e proposição de novas tecnologias**. 2014. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CASTRO, J. T. P.; MEGGIOLARO, M. A. **Fadiga - Técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço: Volume II – Propagação de trincas, efeitos térmicos e estocásticos**, Brasil, 2009.

COUTINHO, T. M. N. **Análise global de configurações de risers flexíveis em águas profundas**. 2018, 60 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2018.

DE SOUSA, J. R. M. **Análise local de linhas flexíveis pelo método dos elementos finitos**. 2005. 746p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DE SOUSA, J. R. M. de et al. A FE model to predict the stress concentration factors in the tensile armor wires of flexible pipes inside end fittings. In: OMAE, 32., 2013, Nantes, França. Anais... EUA: ASME, 2013. V04BT04A016.

DE SOUSA, J. R. M. de et al. **Fatigue analyses of a flexible riser considering end fitting effects**. In: OMAE, 36., 2017, Trondheim, Norway. Anais... EUA: ASME, 2017.

Diário do pré-sal, 2011. Disponível em: < diariodopresal.wordpress.com/>. Acesso em: jun. de 2021

Dynamic bend stiffener design methodology. Balmoral Comtec. Disponível em: <balmoraloffshore.com/solutions/protection/bend-stiffeners/>. Acesso em: jul. de 2021.

DONG, L. et al. **The tensile armour behaviour of unbonded flexible pipes close to end fittings under axial tension.** Ships and Offshore Structures, v. 11, n. 5, p. 445-460, jul. 2016.

FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. **Handbook on design and operation of flexible pipes.** 3rd ed. Trondheim, Norway: MARINTEK/NTNU/4Subsea, 2014.

FERNANDO, U.S. et al. **Measurement of residual stress shakedown in pressure/tensile armour wires of flexible pipes by neutron diffraction.** In: OMAE, 34., 2015, St. John's, Canada. Anais... EUA: ASME, 2015.

GUILHERME, José. Extensometria (*Strain Gauge*) – O que é? Quando utilizar?. **Ensus Advanced Engineering**, 2016. Disponível em: <<https://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/>>

HEPP, P. **Avaliação numérica e experimental de tensões residuais na montagem de conectores de dutos flexíveis.** 2020. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

IEA, **World Energy Outlook 2011 – Special Report, Are we entering a golden age of gas?** - International Energy Agency, France, 2011.

IEA, **World Energy Outlook 2010** – International Energy Agency, Special Report, France, 2010.

KANDIL, F. A. et al. **A review of residual stress measurement methods: A guide to technique selection.** Teddington, Middlesex, UK: NPL Materials Centre, 2001.

KLEIMAN, J.; KUDRYAVTSEV, Y. **Residual stress management in welding residual stress measurement and improvement treatments**. In: OMAE, 31., Rio de Janeiro. Anais... EUA: ASME, 2012.

KWIETNIEWSKI, C. E. F. et al. **Tratamentos térmicos de aços e ferros fundidos**, 1ª edição, Porto Alegre, Brasil, 2014.

LEMOS, C. A. D. et al. **Flexible riser fatigue design and testing**. In: International Offshore and Polar Engineering Conference, 2005, Seoul, Korea, jun. 2005.

LOPES, D. G. **Avaliação das tensões residuais na montagem de conectores em armaduras de tração de dutos**. 2013. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2013.

MARINHO, M. G. et al. **Surface monitoring techniques for a continuous flexible riser integrity assessment**. In: OTC, 2007, Houston, USA. Anais... Dallas: OnePetro, 2007.

MONTENEGRO, V. A. **Visão computacional aplicada à análise de deformações em ensaios de tubos flexíveis**. 2012. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

NEGREIROS, L. A. S. **Avaliação de resistência à fadiga e corrosão-fadiga da armadura de tração de um riser flexível retirado de operação**. 2016. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NKT, 2012, “**NKT Flexibles > Products & Solutions > End-Fittings**” NKT Flexibles, 2nd of January of 2012, Disponível em: <http://www.nktflexibles.com/en/Products+and+Solutions/End-fittings.htm>.

O PETRÓLEO, **Afinal, o que é onshore e offshore?**. Disponível em: < <https://opetroleo.com.br/afinal-o-que-onshore-e-offshore/>>. Acesso em: 30 de set. 2021.

PETROBRAS, **Infográfico: Tipos de plataforma**, 2014. Disponível em: < <https://petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>>. Acesso em: 30 de set. 2021.

PINHEIRO, B. et al. **X-ray diffraction study of microstructural changes during fatigue damage in steel pipelines**. In: OMAE, 31., Rio de Janeiro. Anais... EUA: ASME, 2012.

ROSSINI, N. S. et al. **Methods of measuring residual stresses in components**. Materials and Design, Dublin, v. 35, p. 572–588, mar. 2012.

SHEN, Y., JUKES, P. **Technical challenges of unbonded flexible risers in HPHT and deepwater operations**. In: International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), 25., Kona. Anais... Richardson: OnePetro, 2015.

SIMONSEN, A. **Inspection and monitoring techniques for un-bonded flexible risers pipelines**. 2014, 76 f. Master's thesis – Offshore technology / Marine and subsea technology, University of Stavanger, Stavanger, 2014.

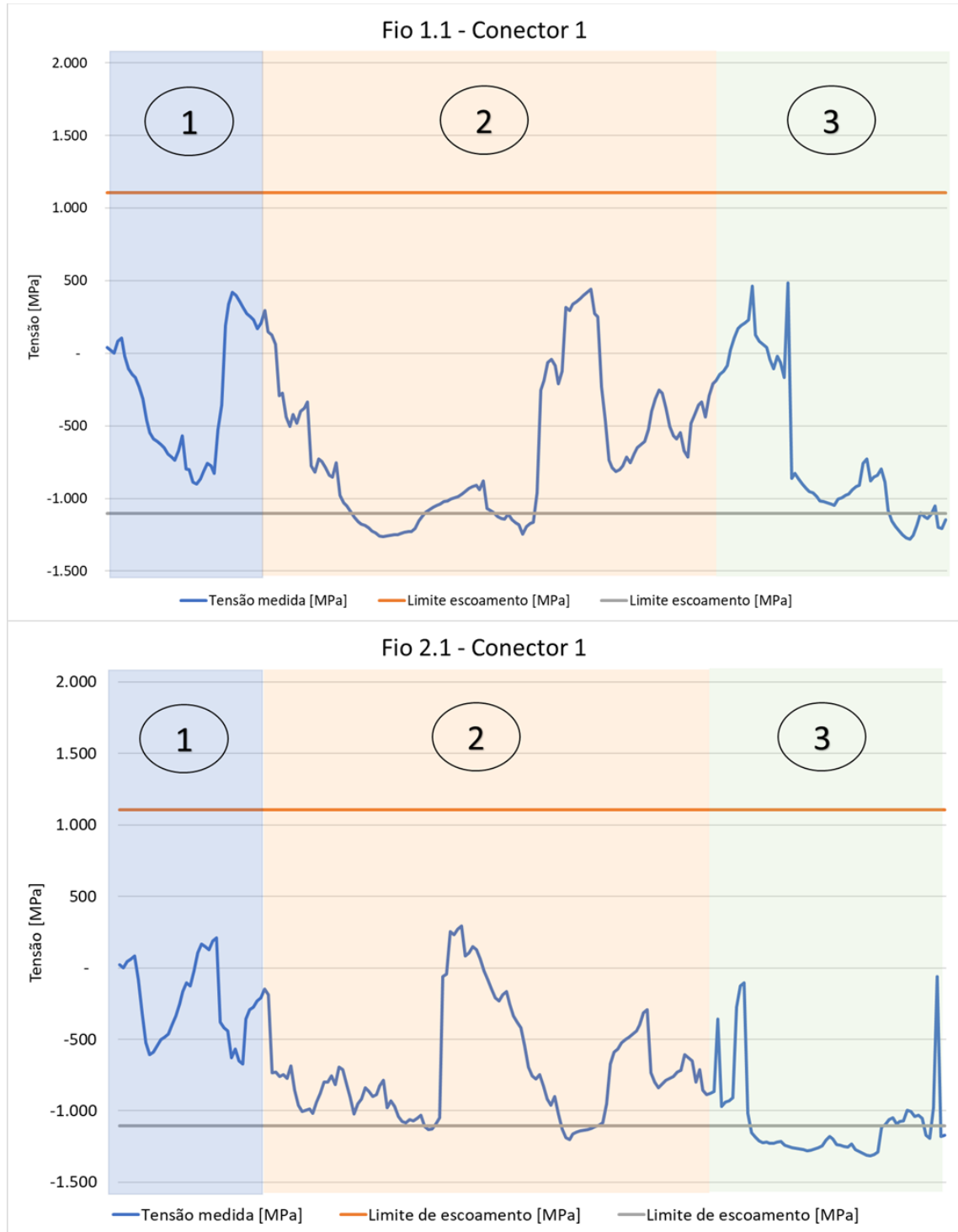
VAZ, M.A., RIZZO, N. A. S. **A finite element model for flexible pipe armor wire instability**. Marine Structures, Nova Iorque, v. 24, n. 3, p. 275–291, jul. 2011.

VIDIGAL, J. et al. **Impact of H₂S consumption and anti-H₂S layer on flexible pipe design**. In: OTC, 2017, Houston. Anais... Houston: OnePetro, 2017.

XAVIER, F. G. **Avaliação da vida em fadiga de um novo modelo de terminal conector para dutos flexíveis**. 2009. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

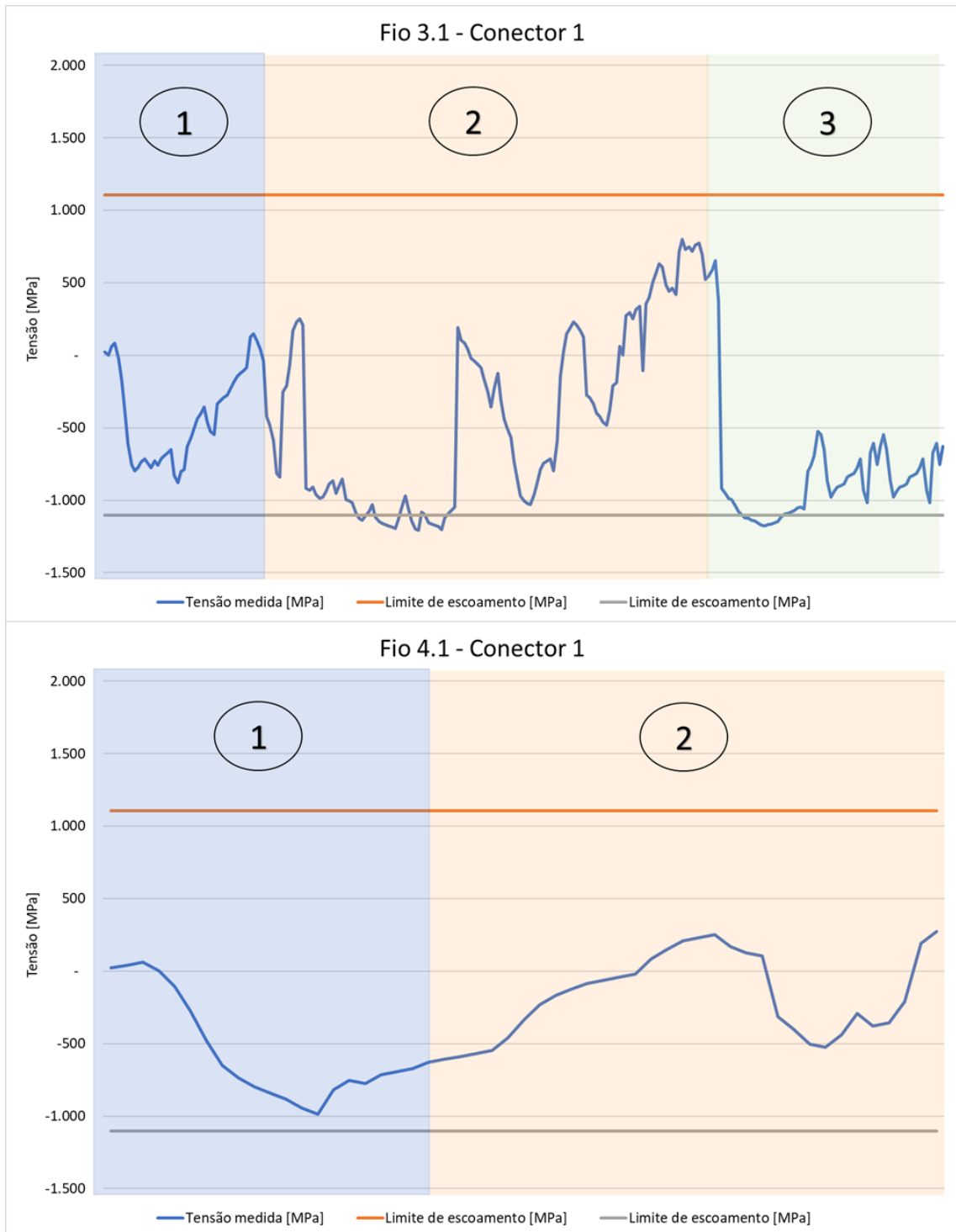
APÊNDICE A – DADOS DE MONITORAMENTO DAS DEFORMAÇÕES PELOS *STRAIN GAUGES*

Figura 48 - Dados adquiridos pelos *gauges* 1.1 e 2.1 no conector 1.

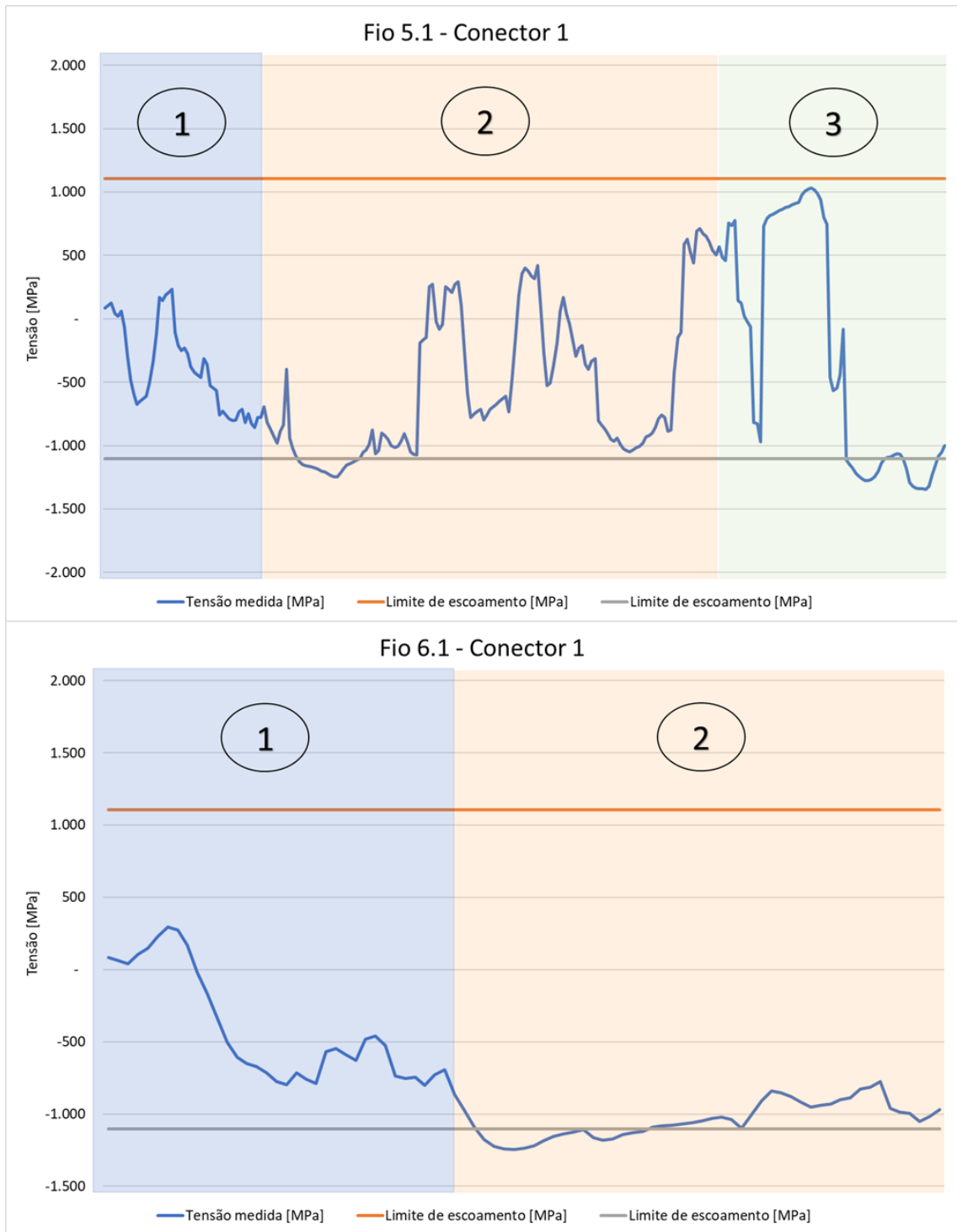


Fonte: O AUTOR, 2022.

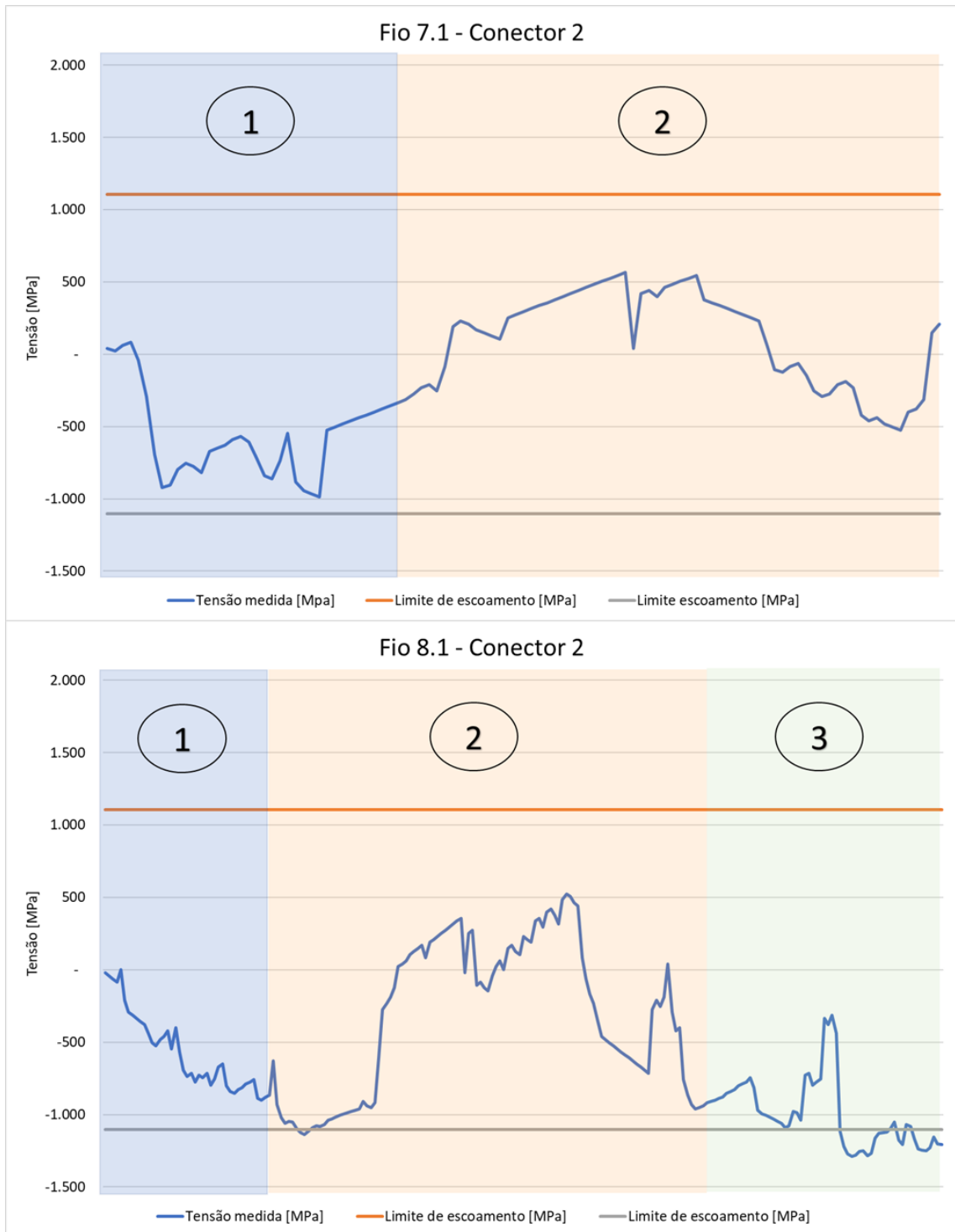
Figura 49 - Dados aquisitados pelos *gauges* 3.1 e 4.1 no conector 1.



Fonte: O AUTOR, 2022.

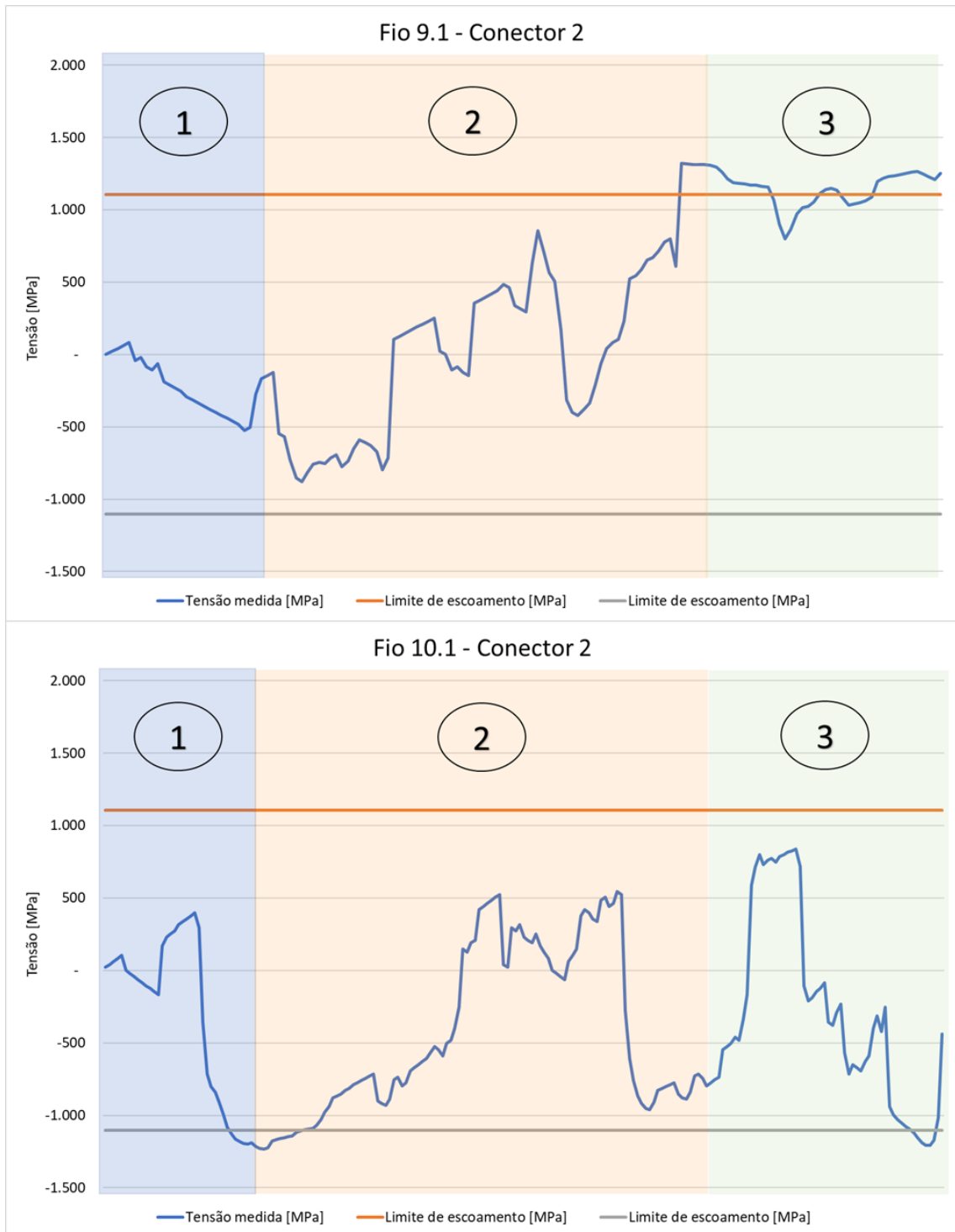
Figura 50 - Dados aquisitados pelos *gauges* 5.1 e 6.1 no conector 1.

Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 51 - Dados aquisitados pelos *gauges* 7.1 e 8.1 no conector 2.

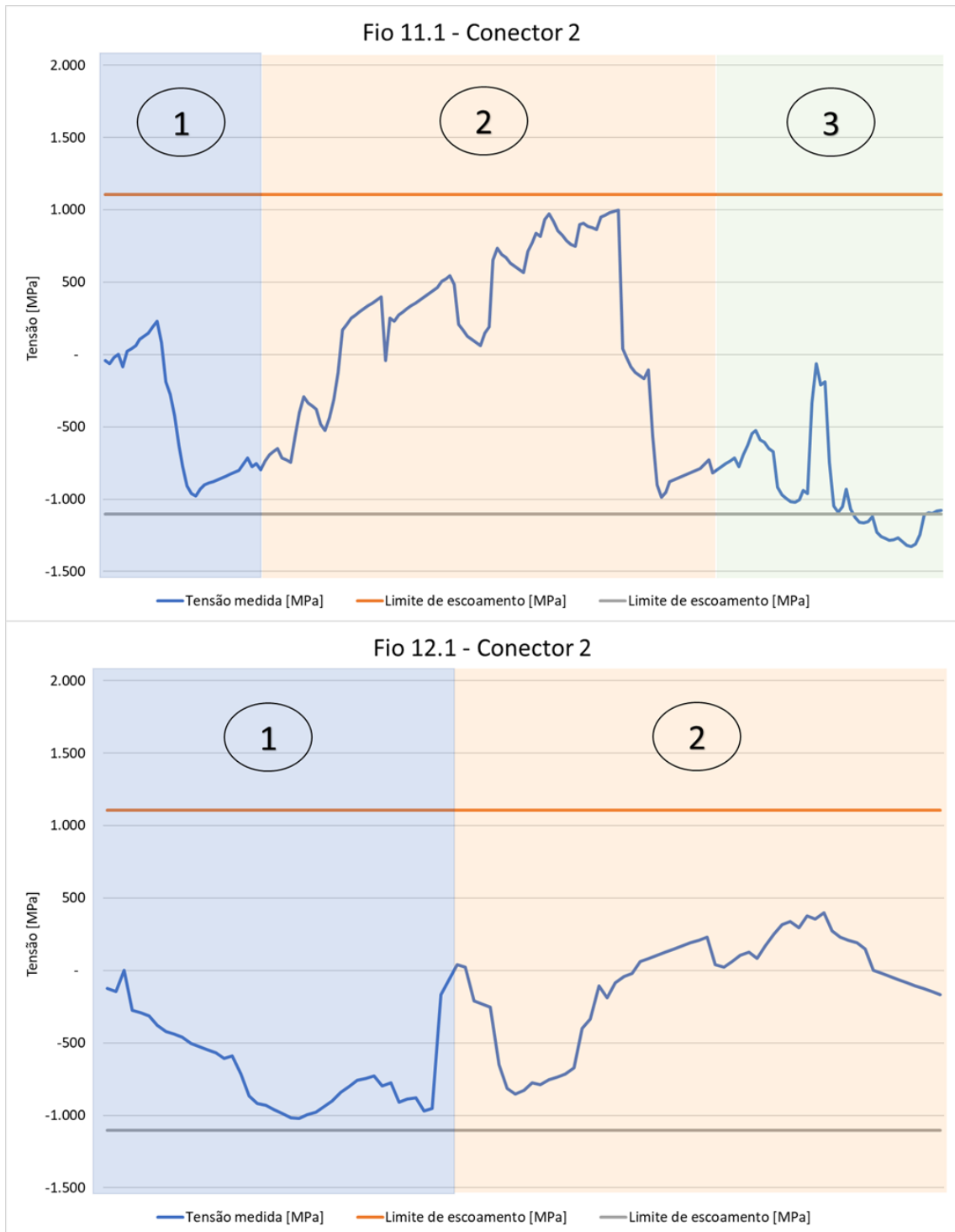
Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 52 - Dados aquisitados pelos *gauges* 9.1 e 10.1 no conector 2.



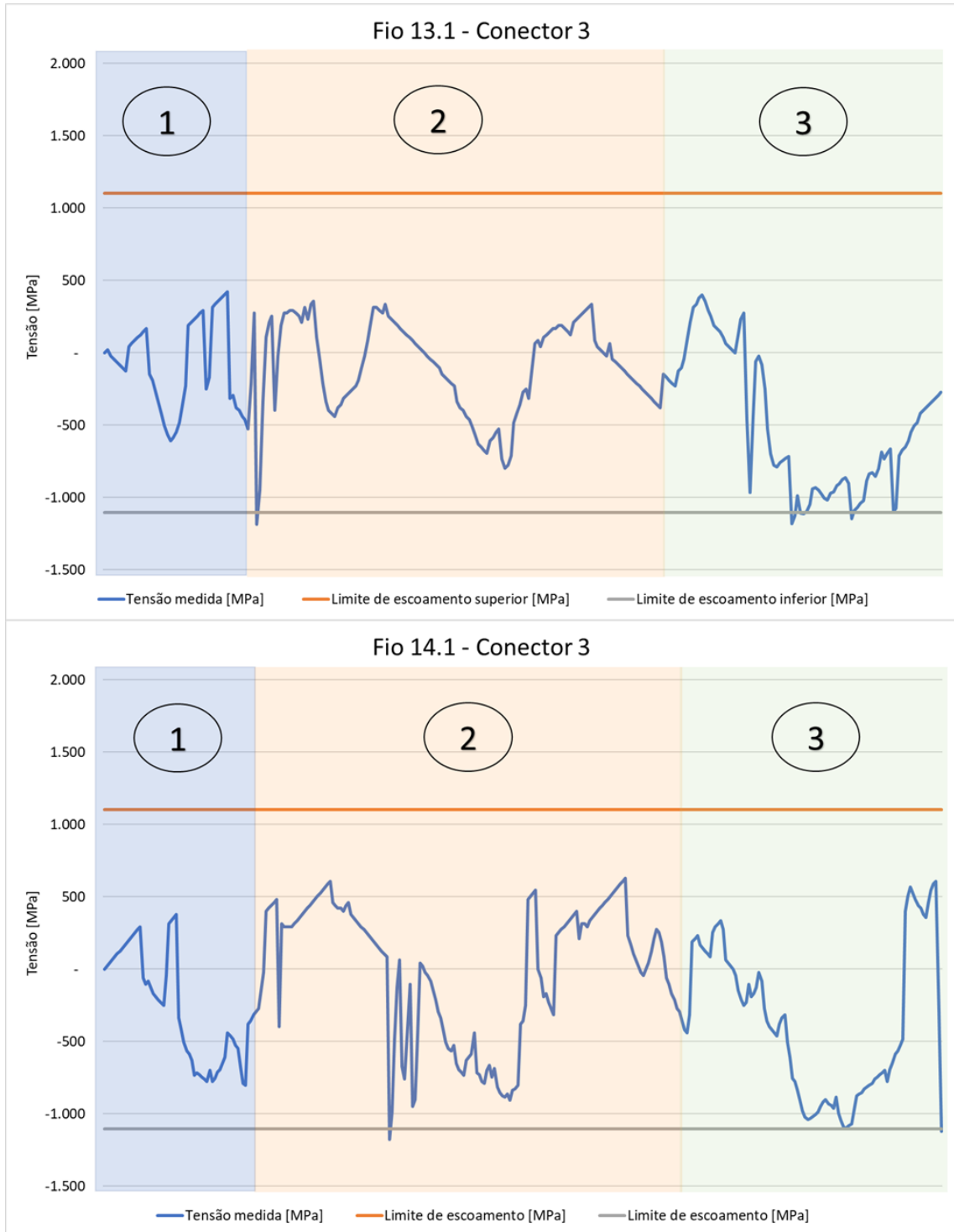
Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 53 - Dados aquisitados pelos *gauges* 11.1 e 12.1 no conector 2.

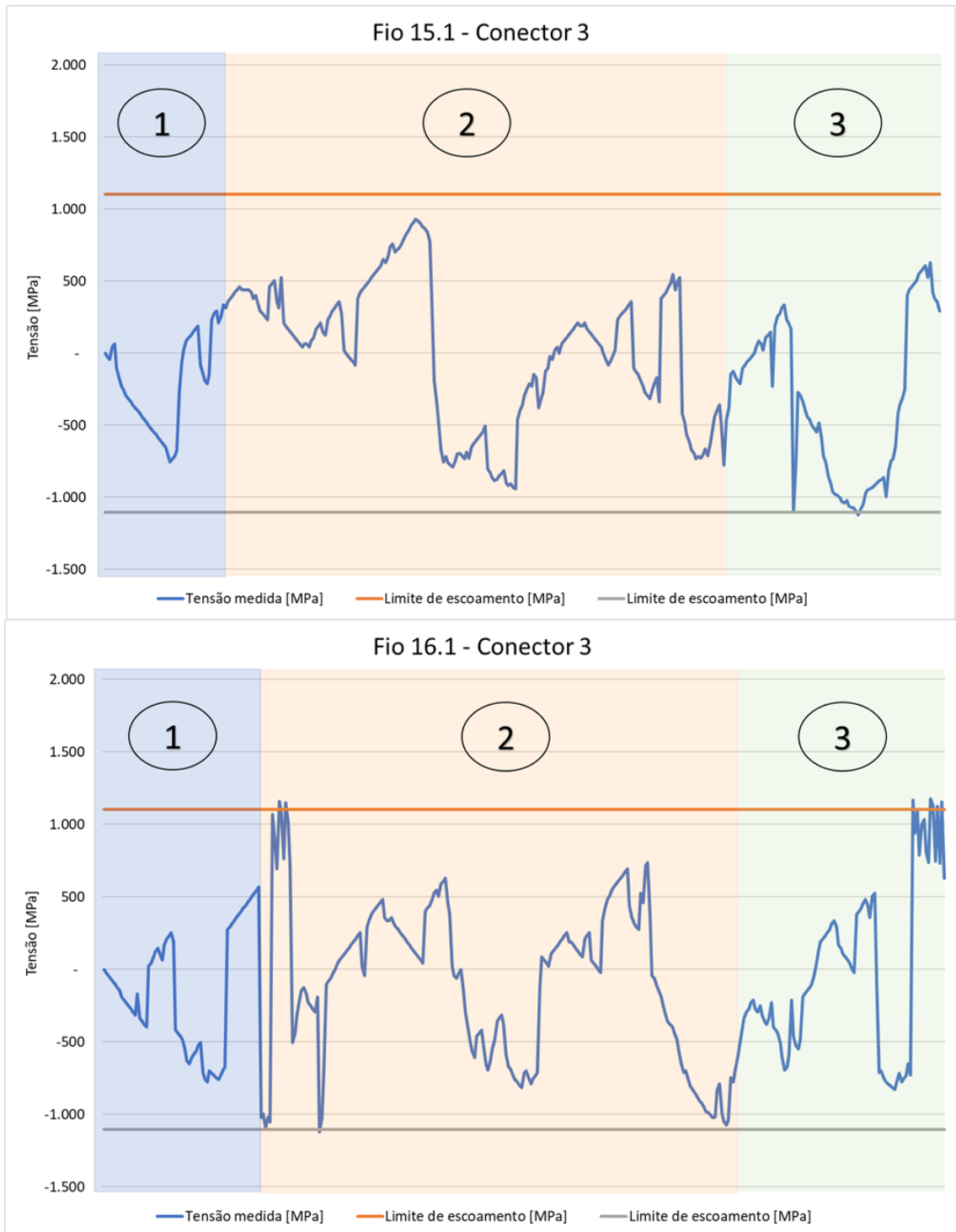


Fonte: O AUTOR, 2022.

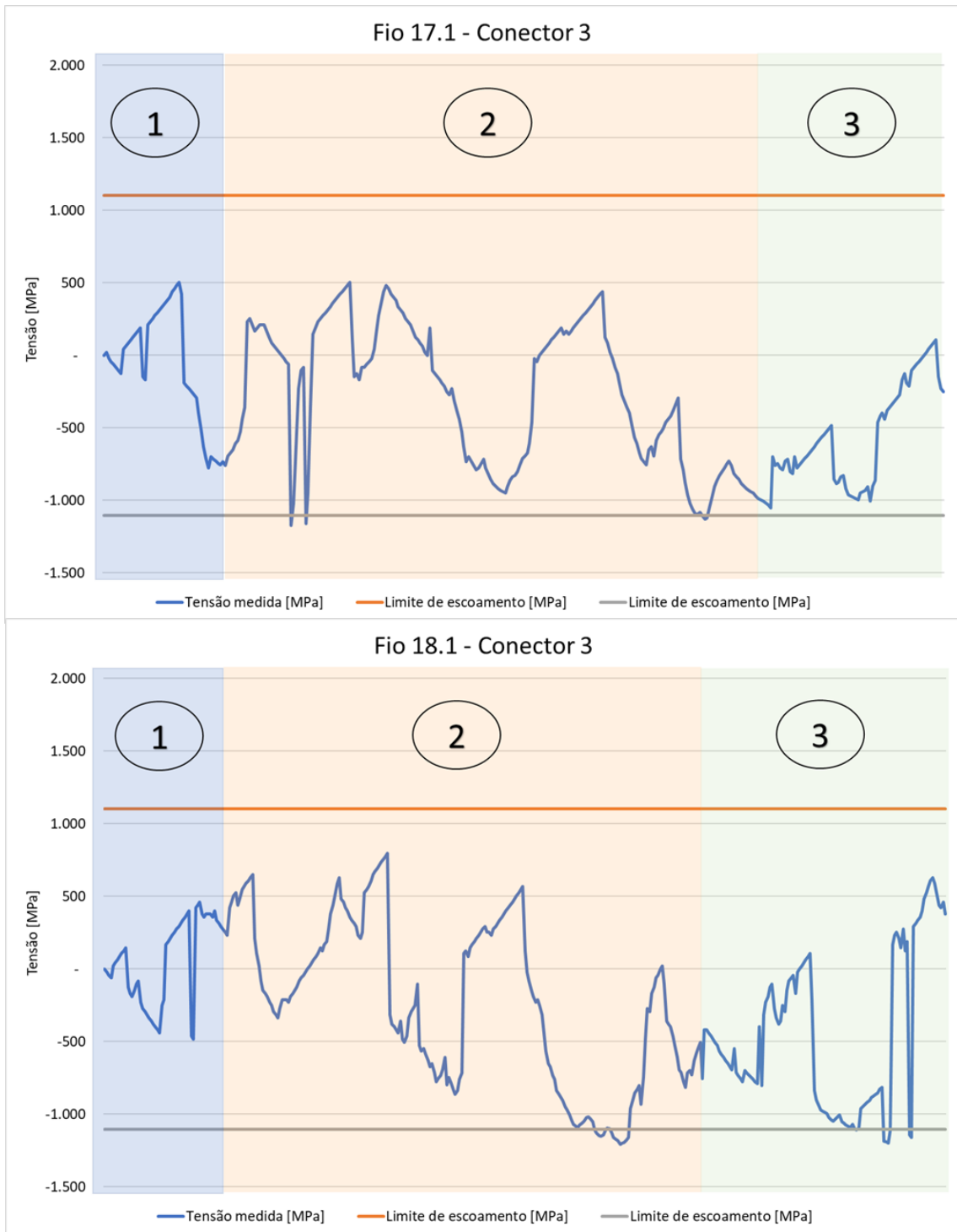
Figura 54 - Dados aquisitados pelos *gauges* 13.1 e 14.1 no conector 3.



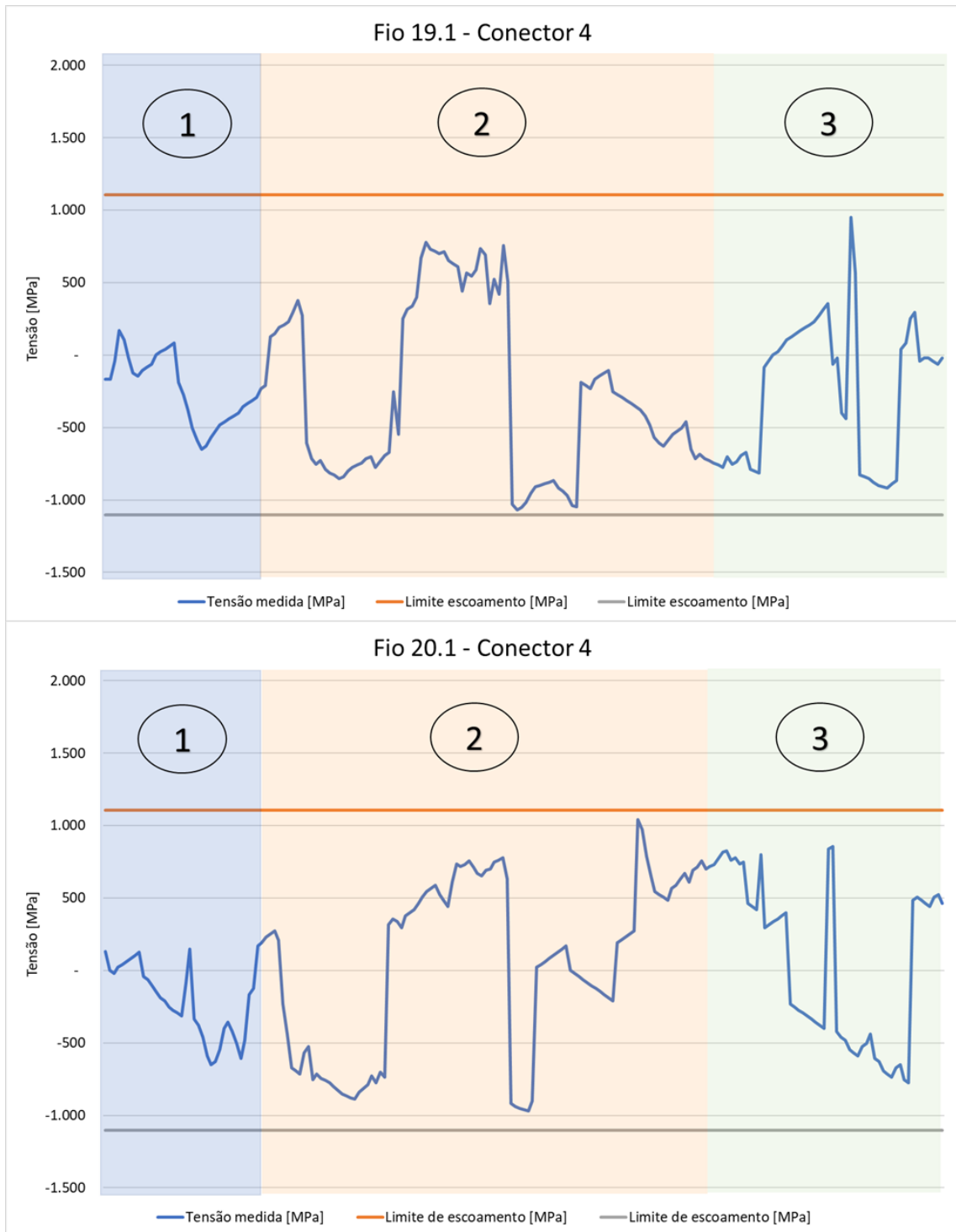
Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 55 - Dados aquisitados pelos *gauges* 15.1 e 16.1 no conector 3.

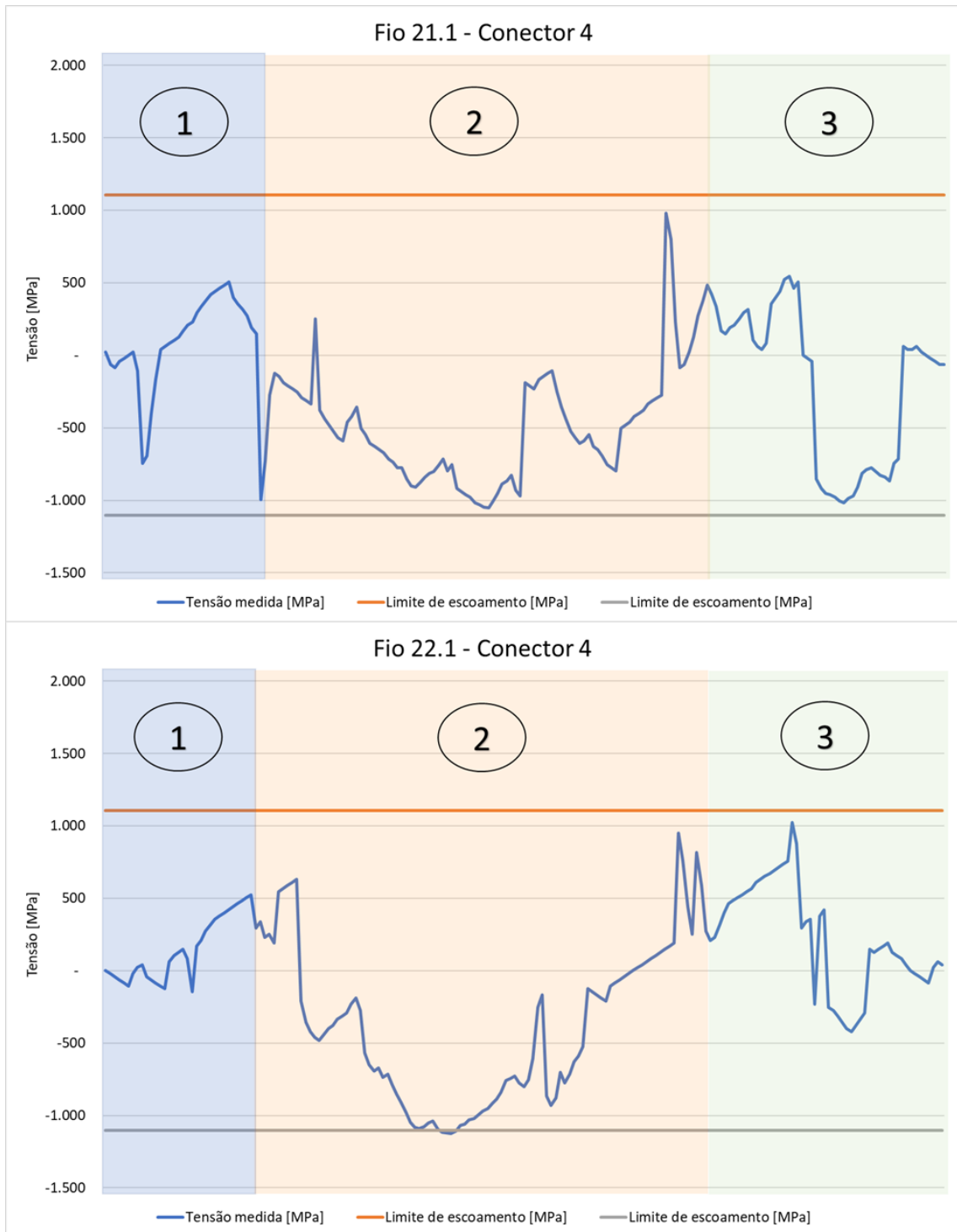
Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 56 - Dados aquisitados pelos *gauges* 17.1 e 18.1 no conector 3.

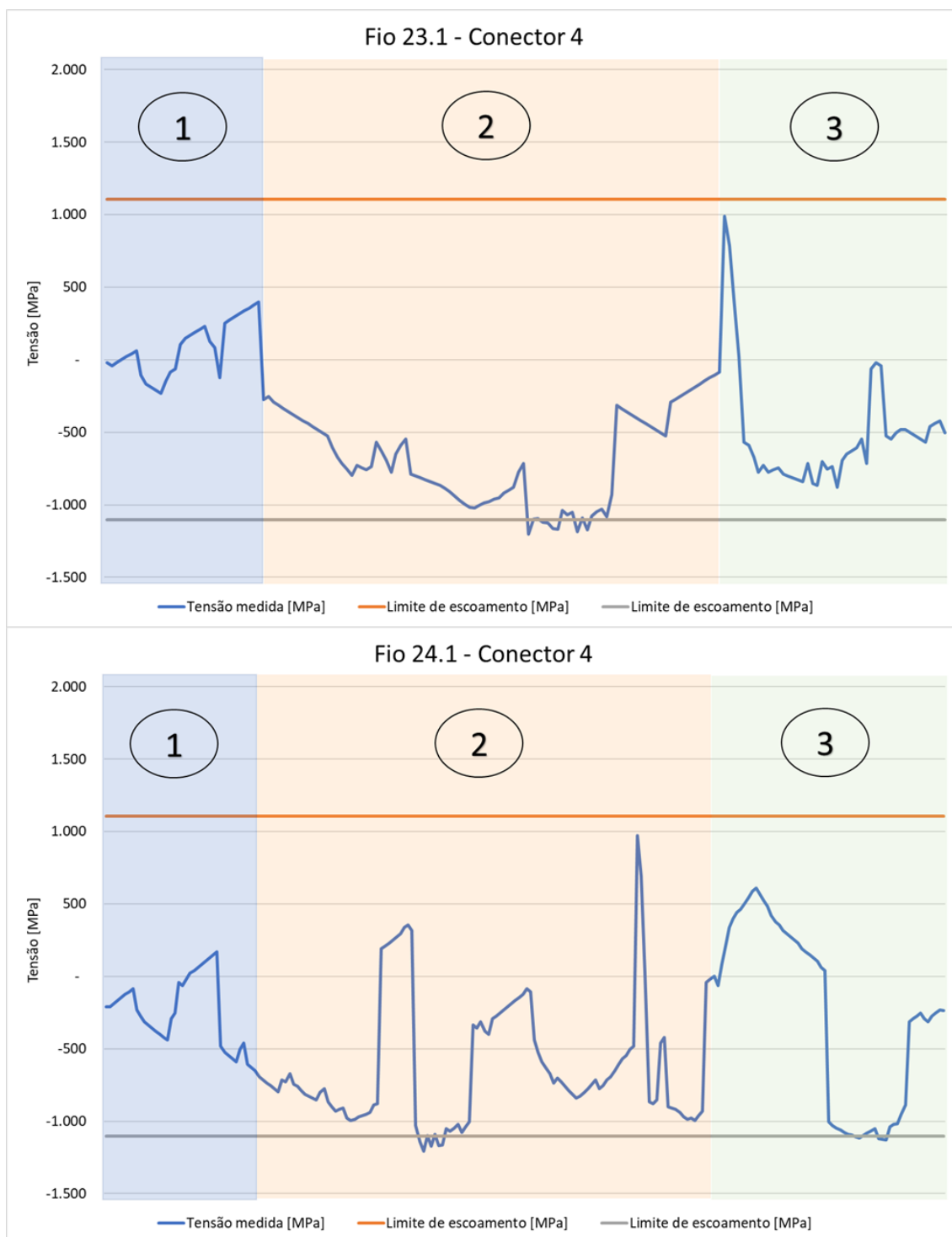
Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 57 - Dados aquisitados pelos *gauges* 19.1 e 20.1 no conector 4.

Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 58 - Dados aquisitados pelos *gauges* 21.1 e 22.1 no conector 4.

Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 59 - Dados aquisitados pelos *gauges* 23.1 e 24.1 no conector 4.

Fonte: O AUTOR, 2022.

APÊNDICE B – DADOS DAS LEITURAS DE TENSÕES NAS SUPERFÍCIES DOS FIOS COM DRX

Tabela 12 - Dados das leituras de TR do conector 1.

Conector	Sextante	Fio	Sentido medição	Pré montagem	Pós montagem	TR induzida
1	1	1.2	Longitudinal	-17	253	270
			Transversal	-114	-13	101
		1.3	Longitudinal	163	253	90
			Transversal	-87	-35	52
	2	2.2	Longitudinal	-193	195	388
			Transversal	-273	-69	204
		2.3	Longitudinal	94	127	33
			Transversal	-63	-6	57
	3	3.2	Longitudinal	-160	191	351
			Transversal	-192	-27	165
		3.3	Longitudinal	148	258	110
			Transversal	-62	-33	29
	4	4.2	Longitudinal	66	272	206
			Transversal	-65	-31	34
		4.3	Longitudinal	120	244	124
			Transversal	-3	-1	2
	5	5.2	Longitudinal	101	218	117
			Transversal	-73	-33	40
		5.3	Longitudinal	128	205	77
			Transversal	-46	-25	21
	6	6.2	Longitudinal	108	399	291
			Transversal	-55	-35	20
		6.3	Longitudinal	108	288	180
			Transversal	-67	-52	15

Fonte: O AUTOR, 2022.

Tabela 13 - Dados das leituras de TR do conector 2.

Conector	Sextante	Fio	Sentido medição	Pré montagem	Pós montagem	TR induzida
2	7	7.2	Longitudinal	45	184	139
			Transversal	-83	-16	67
		7.3	Longitudinal	51	189	138
			Transversal	-69	-4	65
	8	8.2	Longitudinal	88	192	104
			Transversal	-94	-19	75
		8.3	Longitudinal	22	167	145
			Transversal	-74	-2	72
	9	9.2	Longitudinal	121	183	62
			Transversal	-48	-11	37
		9.3	Longitudinal	34	298	264
			Transversal	-94	-5	89
	10	10.2	Longitudinal	72	277	205
			Transversal	-92	12	104
		10.3	Longitudinal	82	254	172
			Transversal	-98	-10	88
	11	11.2	Longitudinal	73	197	124
			Transversal	-78	-14	64
		11.3	Longitudinal	83	273	190
			Transversal	-47	-4	43
	12	12.2	Longitudinal	38	186	148
			Transversal	-78	-9	69
		12.3	Longitudinal	45	205	160
			Transversal	-61	1	62

Fonte: O AUTOR, 2022.

Tabela 14 - Dados das leituras de TR do conector 3.

Conector	Sextante	Fio	Sentido medição	Pré montagem	Pós montagem	TR induzida
3	13	13.2	Longitudinal	113	367	254
			Transversal	-117	-9	108
		13.3	Longitudinal	146	250	104
			Transversal	-44	-24	20
	14	14.2	Longitudinal	147	270	123
			Transversal	-72	-7	65
		14.3	Longitudinal	132	179	47
			Transversal	-120	-78	42
	15	15.2	Longitudinal	83	240	157
			Transversal	-149	-121	28
		15.3	Longitudinal	92	143	51
			Transversal	-134	-47	87
	16	16.2	Longitudinal	104	158	54
			Transversal	-119	-70	49
		16.3	Longitudinal	94	172	78
			Transversal	-126	-106	20
	17	17.2	Longitudinal	111	167	56
			Transversal	-89	-57	32
		17.3	Longitudinal	12	131	119
			Transversal	-88	-9	79
	18	18.2	Longitudinal	134	209	75
			Transversal	-106	-49	57
		18.3	Longitudinal	121	135	14
			Transversal	-39	-6	33

Fonte: O AUTOR, 2022.

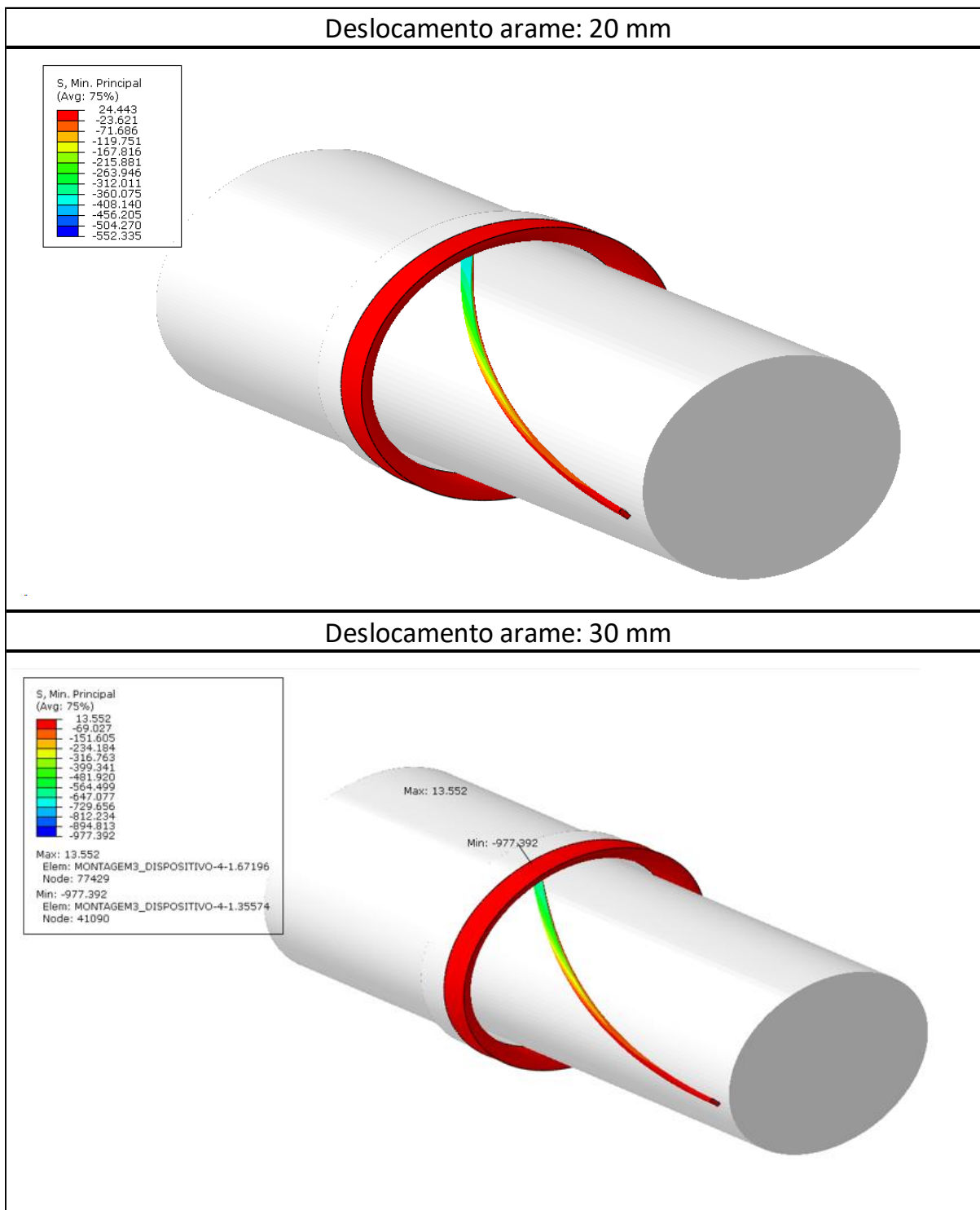
Tabela 15 - Dados das leituras de TR do conector 4.

Conector	Sextante	Fio	Sentido medição	Pré montagem	Pós montagem	TR induzida
4	19	19.2	Longitudinal	101	184	83
			Transversal	-77	-15	62
		19.3	Longitudinal	62	104	42
			Transversal	-104	-9	95
	20	20.2	Longitudinal	30	286	256
			Transversal	-82	-36	46
		20.3	Longitudinal	101	119	18
			Transversal	-58	-3	55
	21	21.2	Longitudinal	104	149	45
			Transversal	-49	-9	40
		21.3	Longitudinal	55	112	57
			Transversal	-79	-6	73
	22	22.2	Longitudinal	80	322	242
			Transversal	-65	1	66
		22.3	Longitudinal	68	152	84
			Transversal	-95	-12	83
	23	23.2	Longitudinal	68	186	118
			Transversal	-80	-38	42
		23.3	Longitudinal	55	134	79
			Transversal	-29	-7	22
	24	24.2	Longitudinal	39	158	119
			Transversal	-82	-38	44
		24.3	Longitudinal	88	213	125
			Transversal	-77	-33	44

Fonte: O AUTOR, 2022.

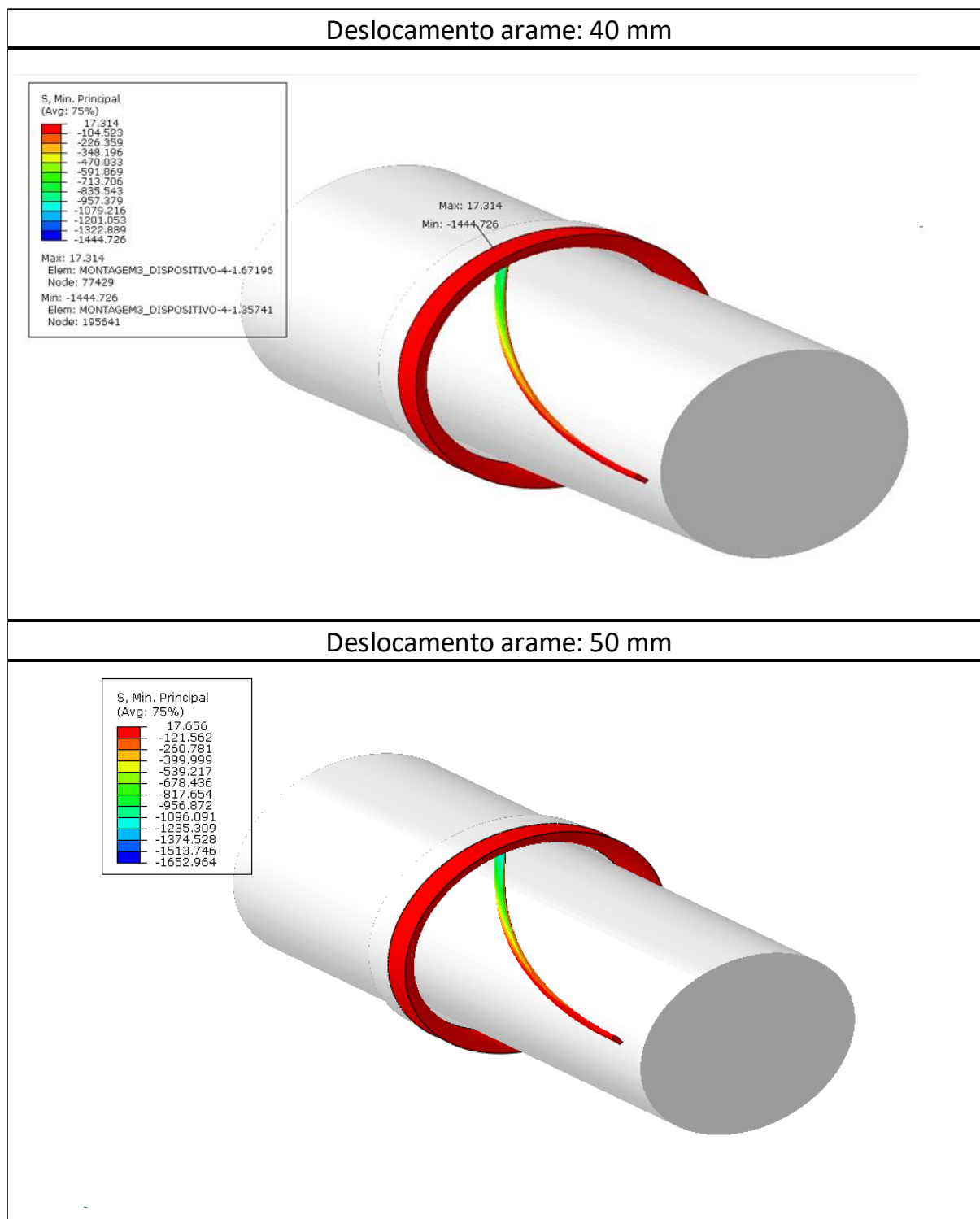
APÊNDICE C – IMAGENS DAS SIMULAÇÕES NOS DIFERENTES PATAMARES DE DESLOCAMENTO DO FIO E USO DE GABARITO DE DOBRA

Figura 60 - Versões finais das simulações nos níveis 20 e 30 mm dos parâmetros pré estabelecidos com uso de gabarito de dobra.



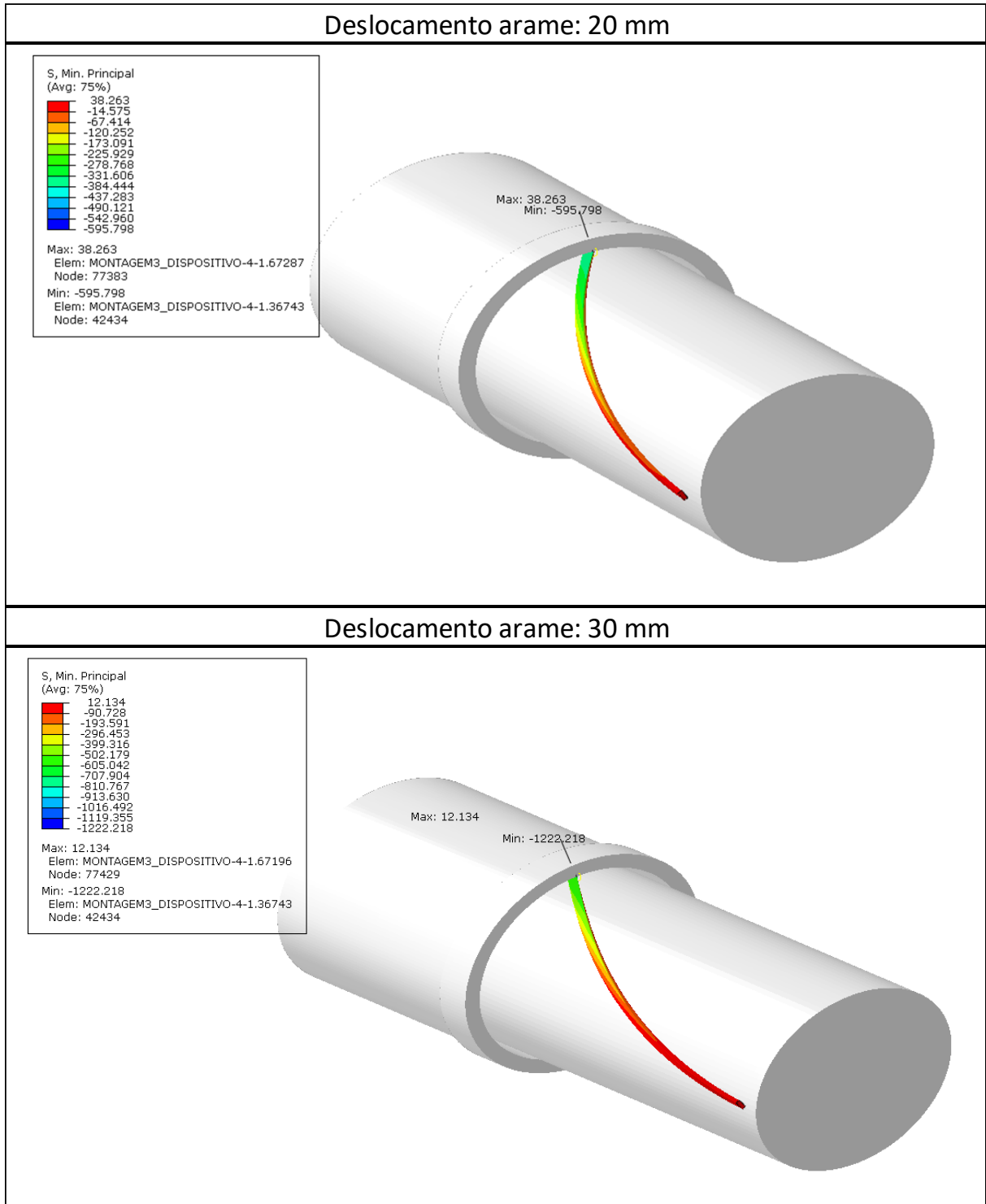
Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 61 - Versões finais das simulações nos níveis 40 e 50 mm dos parâmetros pré estabelecidos com uso de gabarito de dobra.



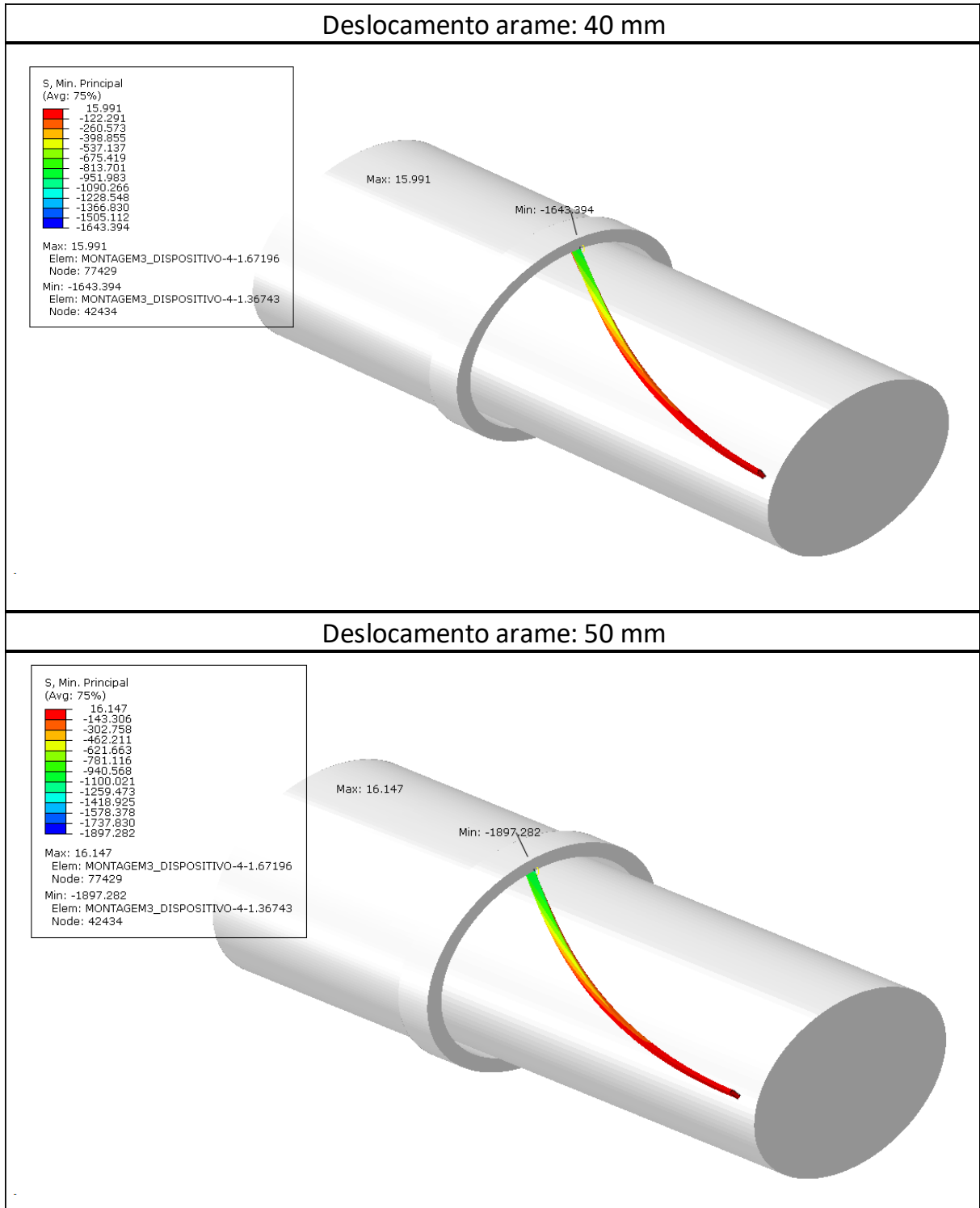
Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 62 - Versões finais das simulações nos níveis 20 e 30 mm dos parâmetros pré estabelecidos sem uso de gabarito de dobra.



Fonte: O AUTOR, 2022.

Figura 63 - Versões finais das simulações nos níveis 40 e 50 mm dos parâmetros pré estabelecidos sem uso de gabarito de dobra.



Fonte: O AUTOR, 2022.