

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS

EVANDRO BERTOLDI

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO E FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO  
SUBMARINA DE *CLAMPS* DE REPARO DE DUTOS OU PROTEÇÃO DE  
SISTEMAS DE MONITORAMENTO**

Porto Alegre  
2018

EVANDRO BERTOLDI  
Engenheiro Mecânico

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO E FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO  
SUBMARINA DE *CLAMPS* DE REPARO DE DUTOS OU PROTEÇÃO DE  
SISTEMAS DE MONITORAMENTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.  
Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Porto Alegre  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Profa. Dra. Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Profa. Dra. Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Bertoldi, Evandro

Desenvolvimento de Método e Ferramenta para Aplicação Submarina de *Clamps* de Reparo de Dutos ou Proteção de Sistemas de Monitoramento / Evandro Bertoldi – 2018.

139 f. : il.

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, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke.

1. Método. 2. Ferramenta Submarina. 3. *Clamp*. 4. Reparo de *Risers* Flexíveis. 5. Proteção de Sistemas de Monitoramento em *Risers* Rígidos. I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauo, orient. II. Desenvolvimento de Método e Ferramenta para Aplicação Submarina de *Clamps* de Reparo de Dutos ou Proteção de Sistemas de Monitoramento.

EVANDRO BERTOLDI

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO E FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO  
SUBMARINA DE *CLAMPS* DE REPARO DE DUTOS OU PROTEÇÃO DE  
SISTEMAS DE MONITORAMENTO**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Thomas Gabriel Rosauro Clarke, Dr. Eng. – Orientador

---

Carlos Pérez Bergmann, Dr. Eng. – Coordenador

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Afonso Reguly - PPGE3M / UFRGS \_\_\_\_\_

Dra. Joseane Ortiz Breitenbach Canterle - PPGE3M / UFRGS \_\_\_\_\_

Dr. Ricardo Callegari Jacques - PPGE3M / UFRGS \_\_\_\_\_

A minha família, em especial aos meus pais Adilson José Bertoldi e Zeli Rosalia Bertoldi, meu irmão Everton Bertoldi e à minha namorada Nara Liege Barbieri, pela compreensão dos momentos ausentes e pelo apoio e incentivo constante ao longo desta caminhada, dedico-lhes esta conquista como gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida e por me fortalecer nos momentos difíceis, não me deixando desistir dos meus objetivos.

A toda a minha família, namorada e amigos, pelo apoio e incentivo nos momentos de dificuldades ao longo desta trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, pela oportunidade e confiança depositada, e fundamental participação para a realização deste trabalho.

Ao LAMEF e a PETROBRAS, pela disponibilização de todos os recursos necessários para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa e apoio financeiro.

A UFRGS pelo ensino gratuito e de qualidade, e aos professores, pelo suporte técnico e teórico que sempre colocaram a minha disposição para o aprendizado.

Aos colegas e amigos do GEND e demais grupos do LAMEF, pelo companheirismo e por toda a ajuda prestada durante o desenvolvimento deste trabalho, em especial ao Alberto Bisognin, Daniel Saraiva da Silva, Felipe Lutckmeier, Fernando Vendramin, Rodrigo Marques Praetzel e Yuri Longaray Pereira pelo auxílio na montagem, testes de funcionamento e movimentação do protótipo, preparação, instrumentação e movimentação dos corpos de prova, e realização dos ensaios experimentais.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma participaram e tornaram possível a concretização deste trabalho.

## RESUMO

O escoamento entre o poço marítimo e a unidade flutuante é realizado através de dutos definidos como *risers*. Os *risers* flexíveis são compostos por camadas intercaladas de diferentes materiais, como aço e polietileno, o qual cada camada possui uma função. Os mecanismos de falha mais reportados são referentes a danos na camada externa polimérica, o que leva à exposição de suas armaduras metálicas ao meio externo. Os *risers* rígidos são dutos fabricados normalmente em aço, formados por segmentos de dutos unidos por soldas, onde a causa de dano mais frequente é a corrosão. Tem-se como objetivo nesta dissertação, o projeto e desenvolvimento de uma ferramenta e de um método para operações submarinas em *risers*. A ferramenta deverá ser capaz de aplicar de forma automática, um *clamp* bipartido no reparo da camada externa polimérica de *risers* flexíveis, ou acoplar sistemas de monitoramento em *risers* rígidos. Já o método, deverá permitir a sua aplicação tanto no reparo quanto na proteção do sistema de monitoramento. Para isto, realizou-se uma revisão bibliográfica a fim de obter uma melhor compreensão sobre o tema estudado. Desenvolveu-se o projeto do método e da ferramenta, e, posteriormente, construiu-se o protótipo para a realização de testes de funcionamento em um duto rígido. Por último, através de ensaios hidrostáticos de pressão interna e externa, realizaram-se ensaios para avaliação do comportamento do método aplicado em um duto rígido. Os ensaios comprovaram a eficácia do *clamp* quando aplicado em ambientes submarinos em grandes profundidades, porém apresentou vazamentos nos ensaios de pressão interna e externa. A resina epóxi utilizada não garantiu a estanqueidade, possivelmente devido a sua alta rigidez, aderência ineficaz em superfícies metálicas, ou presença de vazios ou porosidades. O ensaio de pressão interna indicou que as deformações não ultrapassaram o regime elástico tanto do duto quanto do *clamp* até aproximadamente 182 bar de pressão. No regime elástico, o ensaio apresentou deformações menores no *clamp* em relação ao duto, possivelmente porque a resina acabou absorvendo as deformações. O método demonstrou ser eficiente como recipiente para a resina, e também permitiu a montagem e fixação de um colar de sensores no seu interior. Os testes de funcionamento mostraram que a ferramenta projetada e construída mostrou-se adequada para a aplicação automática de um *clamp* bipartido em *risers*, e o método mostrou-se adequado para sua aplicação em *risers*, tanto no reparo quanto na proteção do sistema de monitoramento.

**Palavras-chave:** Método. Ferramenta Submarina. *Clamp*. Reparo de *Risers* Flexíveis. Proteção de Sistemas de Monitoramento em *Risers* Rígidos.

## ABSTRACT

The drain between the maritime oil well and the floating unit is made through pipes, which is defined as risers. The flexible risers are composed by alternate layers from different materials as steel and polyethylene, each layer has its function. The failure mechanisms more reported are referent to the damage in the external polymeric layer which leads to the exposition of the metal armature to the outside. The rigid risers are pipes usually fabricated in steel made by ducts segments connect by spot welding, where the most common damage is corrosion. This essay aims to project and create a tool and a method for submarine operations in risers. The tool must be able to apply, in an automatic way, a bipartite clamp in the repair of the flexible risers in external polymeric layer or to attach monitoring systems to the rigid risers. The method must allow its application in the repair as much as the monitoring system protection. For this, it was made a bibliographic review to obtain a better comprehension from the studied theme. A project from the method and a tool were developed, later a prototype was built to make the operation tests in a rigid pipe. At last, by internal and external pressure hydrostatic trials, were made tests to evaluate the behavior of the method applied in a rigid pipe. The trials proved the efficiency of the clamps when applied in submarine environments and in depth; however there were leaks in the internal and external pressure tests. The Epóxi resin did not guarantee the leak-tightness, possible due to its hardness, ineffective adherence in metal surfaces or presence of gaps and porosities. The internal pressure trial indicated that the deformations did not exceed the elastic regime in the pipe as in the clamp until, about 182 pressure bar. In the elastic regime, the trial presented minor deformation in the clamps related to the pipe possibly, because the resin absorbed the deformation. The method has proven efficient as recipient for the resin and also allowed the assembly and fixation of a sensor collar in its interior. The operation tests showed that the designed and built tool is proper for an automatic bipartite clamp application in risers and the method has proven proper for its application in risers in repair as much as monitoring system protection.

**Key words:** Method. Submarine Tool. Clamp. Flexible Risers Repair. Monitoring System Protection in Rigid Risers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das profundidades na exploração de petróleo no Brasil.....	23
Figura 2 – Configurações: (A) vertical, (B) catenária livre, (C) catenária complexa .....	24
Figura 3 – Sistemas de produção de petróleo <i>offshore</i> , no qual é mostrado da esquerda para a direita: plataforma fixa, unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO), e plataforma semi-submersível.....	24
Figura 4 – Configuração típica de um duto flexível do tipo <i>unbonded</i> .....	27
Figura 5 – Mecanismos de falha ou dano em <i>risers</i> flexíveis .....	28
Figura 6 – a) Defeito na bandagem de alta resistência gerado na instalação da linha flexível; b) Defeito na bandagem de alta resistência devido ao contato com a plataforma durante operação ou instalação do <i>riser</i> .....	29
Figura 7 – a) Braçadeira macia de reparo; b) Aplicação da braçadeira macia de reparo em <i>riser</i> flexível .....	36
Figura 8 – a) Braçadeira rígida; b) Aplicação da braçadeira rígida em reparo de dano na camada externa .....	36
Figura 9 – a) Parte interna da braçadeira estrutural de reparo em posição aberta; b) Parte externa da braçadeira estrutural de reparo em posição fechada e montada sobre a parte interna; c) Braçadeira estrutural de reparo instalada em um <i>riser</i> submerso.....	37
Figura 10 – a) Esquema da reparação por moldagem; b) Reparo por moldagem aplicado em um <i>riser</i> .....	38
Figura 11 – Produto <i>FlexGel</i> sendo injetado em um reparo de dano na camada externa .....	38
Figura 12 – Reparo de um dano com a utilização do produto <i>Armadillo</i> : a) Dano na camada externa; b) Produto <i>Armadillo</i> instalado na região do dano; c) Injeção do líquido de vedação .....	39
Figura 13 – Produto <i>Armawrap</i> instalado em um <i>riser</i> .....	39
Figura 14 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas da empresa SIG: a) Sistema de monitoramento g-PIMS instalada em <i>riser</i> rígido; b) Interface de uma unidade g-PIMS com um ROV a partir de conexões em águas profundas.....	40
Figura 15 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas da empresa GUL instalado em um <i>riser</i> rígido .....	41
Figura 16 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas <i>Teletest Permamount</i> instalado em um <i>riser</i> rígido: a) Conceito 1; b) Conceito 2 .....	42
Figura 17 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas da empresa GUL instalado em um <i>riser</i> rígido: a) Estrutura de proteção do sistema de monitoramento; b) Transdutores do sistema de monitoramento encapsulados com um colar de poliuretano.....	42
Figura 18 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas <i>RiserTest</i> instalado em um <i>riser</i> rígido: a) Protótipo do sistema de monitoramento montado em um <i>riser</i> rígido com revestimento; b) Imagem de vídeo subaquática do sistema de monitoramento <i>RiserTest</i> em operação.....	43
Figura 19 – a) Equipamento <i>Rebreather</i> ; b) Mergulhadores com umbilical de suporte de vida; c) ROV classe trabalhador.....	44
Figura 20 – Ferramenta de instalação de braçadeira macia de reparo por ROV .....	44
Figura 21 – Instalação do produto <i>Armadillo</i> da empresa Flexlife em um <i>riser</i> flexível danificado .....	45
Figura 22 – Ferramenta hidráulica de instalação de braçadeiras de reparo em linhas de transporte de gás .....	45
Figura 23 – a) Produto FlexGuard para monitoramento de <i>risers</i> da empresa Flexlife; b) Produto <i>UT scanning</i> para monitoramento de <i>risers</i> da empresa Flexlife .....	46

Figura 24 – Manutenção de flutuadores em <i>risers</i> flexíveis: a) Acoplamento do flutuador no <i>riser</i> ; b) Aperto dos parafusos do flutuador.....	46
Figura 25 – Ferramenta submarina de instalação de braçadeira de reparo em <i>risers</i> rígidos controlada remotamente: a) Acoplamento da braçadeira no <i>riser</i> ; b) Aperto dos parafusos da braçadeira executada por ROV; c) Instalação da braçadeira concluída e desacoplamento da ferramenta.....	47
Figura 26 – Ferramenta submarina de instalação de colar de sensores em <i>risers</i> rígidos controlada remotamente: a) Ferramenta com o colar de sensores instalada em um ROV simulando movimentos de rotação e inclinação; b) Acoplamento e fixação do colar de sensores no <i>riser</i> executada por ROV; c) Colar de sensores instalado na ferramenta em posição de acoplamento.....	47
Figura 27 – Concepção 1 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no <i>riser</i> .....	50
Figura 28 – Concepção 2 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no <i>riser</i> .....	50
Figura 29 – Concepção 3 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no <i>riser</i> .....	51
Figura 30 – Concepção 4 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no <i>riser</i> .....	51
Figura 31 – Concepção 5 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no <i>riser</i> .....	52
Figura 32 – Concepção 6 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no <i>riser</i> .....	52
Figura 33 – a) Concepção 1 para a estrutura externa da ferramenta; b) Concepção 2 para a estrutura externa da ferramenta .....	54
Figura 34 – a) Concepção 3 para a estrutura externa da ferramenta; b) Concepção 4 para a estrutura externa da ferramenta .....	54
Figura 35 – Concepção 1 para a estrutura interna da ferramenta: a) Estrutura interna; b) Vista simplificada da interface entre as estruturas interna e externa .....	55
Figura 36 – Concepção 2 para a estrutura interna da ferramenta: a) Estrutura interna; b) Vista simplificada da interface entre as estruturas interna e externa .....	56
Figura 37 – Concepção 3 para a estrutura interna da ferramenta: a) Estrutura interna; b) Vista simplificada da interface entre as estruturas interna e externa .....	56
Figura 38 – Método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Conjunto completo do método; b) Detalhe da chapa de ancoragem.....	58
Figura 39 – a) Vistas frontal e lateral com as principais dimensões do <i>clamp</i> acoplado no <i>riser</i> ; b) <i>Clamp</i> fixado no <i>riser</i> .....	59
Figura 40 – a) Meias calha com estruturas e insertos metálicos; b) Estruturas metálicas.....	60
Figura 41 – Detalhe dos componentes do método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento.....	61
Figura 42 – Vistas frontal e lateral com as principais dimensões da ferramenta acoplada no <i>riser</i> .....	62
Figura 43 – Ferramenta em posição de acoplamento para posterior fixação do <i>clamp</i> em torno do <i>riser</i> .....	62
Figura 44 – Estrutura externa da ferramenta em posição de acoplamento no <i>riser</i> .....	63
Figura 45 – Estrutura interna da ferramenta em posição de acoplamento no <i>riser</i> .....	64
Figura 46 – Vistas frontal e lateral com as principais dimensões da estrutura interna da ferramenta acoplada no <i>riser</i> .....	65
Figura 47 – Detalhe da interface da estrutura interna da ferramenta em relação ao <i>clamp</i> em posição de acoplamento no <i>riser</i> .....	66

Figura 48 – Vista em corte do suporte posicionador do <i>clamp</i> com fixador magnético .....	66
Figura 49 – Vista em corte do suporte de aperto do <i>clamp</i> com fixador magnético .....	67
Figura 50 – a) Diagrama esquemático da ligação em série dos motores elétricos; b) Fonte de alimentação da marca ICEL modelo PS-6000.....	74
Figura 51 – Corpo de prova para ensaio de pressão interna.....	76
Figura 52 – Corpo de prova para ensaio de pressão externa .....	76
Figura 53 – a) Corpos de prova fabricados para ensaio de pressão interna e externa; b) Detalhe da conexão para entrada de fluido no ensaio de pressão interna; c) Detalhe do defeito na região central do corpo de prova para ensaio de pressão interna; d) Detalhe dos defeitos na região central do corpo de prova para ensaio de pressão externa.....	77
Figura 54 – a) Corpo de prova para ensaio de pressão interna após a preparação da superfície; b) Detalhe do fechamento do furo com resina epóxi no corpo de prova para ensaio de pressão interna; c) Corpo de prova para ensaio de pressão externa após a preparação da superfície; d) Detalhe do fechamento dos furos com resina epóxi no corpo de prova para ensaio de pressão externa .....	78
Figura 55 – Localização dos extensômetros e do colar .....	79
Figura 56 – a) Extensômetro colado na superfície externa do duto; b) Extensômetro colado na superfície externa do duto e protegido com fita adesiva de alumínio; c) Extensômetro colado na superfície interna do <i>clamp</i> ; d) Extensômetro colado na superfície interna do <i>clamp</i> e protegido com fita adesiva de alumínio.....	81
Figura 57 – Instrumentação do duto utilizado no ensaio hidrostático de pressão interna: a) Lado do defeito; b) Lado oposto ao defeito.....	81
Figura 58 – Aparato para a realização do processo de injeção de resina epóxi no interior do <i>clamp</i> .....	82
Figura 59 – Corpos de prova após o processo de injeção de resina .....	83
Figura 60 – Corpo de prova posicionado no interior do <i>bunker</i> .....	84
Figura 61 – a) <i>Clamp</i> com os cabos dos extensômetros; b) Detalhe dos cabos dos extensômetros que serão conectados ao sistema de aquisição dos dados experimentais .....	85
Figura 62 – a) <i>Clamp</i> com os cabos dos colares e o <i>dummy</i> ; b) Detalhe dos cabos do <i>dummy</i> que serão conectados ao sistema de aquisição dos dados experimentais; c) Detalhe dos cabos dos colares e do duto que serão conectados nos multímetros .....	85
Figura 63 – Aparato para realização do ensaio hidrostático e aquisição dos dados de pressão.....	86
Figura 64 – a) Visão geral do <i>bunker</i> ; b) Detalhe da conexão dos multímetros nos cabos do colar; c) Detalhe dos multímetros preparados para a realização do ensaio .....	86
Figura 65 – a) Sistema de pressurização e controle utilizado no ensaio hidrostático de pressão interna; b) <i>Notebook</i> conectado ao sistema de aquisição dos dados experimentais; c) Equipamento para teste hidrostático da marca Flutrol; d) Monitor conectado as câmeras de vídeo instaladas no interior do <i>bunker</i> .....	86
Figura 66 – a) Movimentação do corpo de prova para o interior da câmara hiperbárica; b) Corpo de prova posicionado no interior da câmara hiperbárica.....	87
Figura 67 – a) Realização do aperto do flange conforme procedimento e torque recomendado; b) Câmara hiperbárica preparada para a realização do ensaio.....	88
Figura 68 – Transdutor de pressão montado na conexão da câmara hiperbárica .....	88
Figura 69 – a) Equipamento para teste hidrostático da marca Flutrol; b) <i>Notebook</i> conectado ao sistema de aquisição dos dados experimentais; c) Sistema de aquisição dos dados experimentais.....	89
Figura 70 – Amostra inicial da estrutura metálica.....	90
Figura 71 – Amostra inicial do <i>clamp</i> : a) <i>Clamp</i> com as duas meias calha não parafusadas; b) Imagem superior da meia calha; c) Imagem lateral da meia calha.....	91

Figura 72 – Detalhe da montagem do colar de sensores por ondas guiadas na região central da parte interna do <i>clamp</i> .....	91
Figura 73 – a) Estrutura metálica reprojeta; b) Estrutura metálica reprojeta após a construção.....	92
Figura 74 – <i>Clamp</i> com a estrutura metálica reprojeta: a) <i>Clamp</i> com as duas meias calha parafusadas; b) Imagem superior do <i>clamp</i> ; c) Imagem lateral do <i>clamp</i> .....	93
Figura 75 – Ferramenta após a montagem com o <i>clamp</i> e o duto .....	94
Figura 76 – a) Interface da meia calha do <i>clamp</i> em relação ao suporte de aperto; b) Interface da meia calha do <i>clamp</i> em relação ao suporte posiciodor; c) Interface da meia calha do <i>clamp</i> acoplada no duto a partir da lateral; d) Interface da meia calha do <i>clamp</i> acoplada no duto a partir da parte superior.....	94
Figura 77 – a) Ferramenta acoplada no duto; b) Detalhe do motor elétrico.....	95
Figura 78 – Imagem da câmera de vídeo durante o acoplamento da ferramenta no duto: a) Câmera de vídeo instalada no lado externo da ferramenta; b) Câmera de vídeo instalada na parte interna da ferramenta.....	96
Figura 79 – Imagem da câmera de vídeo após o acoplamento da ferramenta no duto: a) Câmera de vídeo instalada no lado externo da ferramenta; b) Câmera de vídeo instalada na parte interna da ferramenta.....	96
Figura 80 – Imagem da câmera de vídeo após o aperto dos parafusos do <i>clamp</i> .....	97
Figura 81 – Imagem da câmera de vídeo durante o desacoplamento da ferramenta do duto: a) Câmera de vídeo instalada no lado externo da ferramenta; b) Câmera de vídeo instalada na parte interna da ferramenta.....	97
Figura 82 – Gráfico pressão interna (bar) x tempo (min).....	100
Figura 83 – Resultados do patamar de estabilização do sistema: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	100
Figura 84 – Resultados do 1° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	101
Figura 85 – Imagem da câmera de vídeo no momento que inicia um vazamento na forma de gotas de água .....	101
Figura 86 – Resultados do 2° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	102
Figura 87 – Resultados do 3° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	103
Figura 88 – Resultados do 4° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	103
Figura 89 – Resultados do 5° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	104
Figura 90 – Imagem da câmera de vídeo no momento que inicia um vazamento na forma de jato de água.....	104
Figura 91 – Resultados do 6° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	104

Figura 92 – Resultados do 7° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	105
Figura 93 – Imagem da câmera de vídeo no momento que aumenta o vazamento na forma de jato de água.....	105
Figura 94 – Resultados do 8° patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).....	106
Figura 95 – <i>Clamp</i> após a realização do ensaio de pressão interna.....	106
Figura 96 – a) Esvaziamento da câmara hiperbárica; b) Retirada do corpo de prova do interior da câmara hiperbárica.....	109
Figura 97 – a) Realização do corte da extremidade do duto para verificação de entrada de água; b) <i>Clamp</i> após a realização do ensaio de pressão externa .....	109
Figura 98 – Amostras após o processo de resinagem: a) Amostras 1 e 2; b) Amostras 3 e 4	124
Figura 99 – Equipamentos e instalações utilizadas nos ensaios .....	125
Figura 100 – Resultado do ensaio da Amostra 1: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do <i>bunker</i> no momento da falha .....	125
Figura 101 – Resultado do ensaio da Amostra 2: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do <i>bunker</i> no momento da falha .....	126
Figura 102 – Resultado do ensaio da Amostra 3: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do <i>bunker</i> no momento da falha .....	126
Figura 103 – Resultado do ensaio da Amostra 4: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do <i>bunker</i> no momento da falha .....	126
Figura 104 – Aparato para ensaio de deflexão da borracha de vedação.....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Defeitos na camada externa polimérica em <i>riser</i> em aplicação estática e dinâmica .....	28
Tabela 2 – Faixa de valores de resistência exigidos pela norma API 5L para cada grau.....	30
Tabela 3 – Valores de composição química para os graus sem cordão de solda estabelecidos pela norma API.....	31
Tabela 4 – Valores de composição química para os graus soldados estabelecidos pela norma API.....	31
Tabela 5 – Resultados do ensaio de pressão externa.....	108
Tabela 6 – Descrição das amostras utilizadas nos ensaios de pressão .....	124
Tabela 7 – Propriedades de cura da resina ARAL 1457 e endurecedor ARAL 951 .....	127
Tabela 8 – Resultados do ensaio de deflexão em perfis de borracha .....	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i> – Instituto Americano de Petróleo
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicles</i> - Veículos Submarinos Autônomos
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Projeto Assistido por Computador
CONTEC	Comissão de Normas Técnicas Petrobras
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i> - Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência
GEND	Grupo de Ensaio Não Destrutivos
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
MEG	Monoetilenoglicol
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PIMS	<i>Permanently Installed Monitoring Systems</i> - Sistema de Monitoramento Instalado Permanentemente
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i> - Veículo Operado Remotamente
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicles</i> – Veículos Submarinos Não Tripulado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_e$	Limite de Resistência ao Escoamento [MPa]
$\sigma_t$	Limite de Resistência a Tração [MPa]
$A_t$	Área de Tensão de Tração ou Área Resistente Nominal [mm <sup>2</sup> ]
F	Força [N]
$d_{am}$	Diâmetro do Arame da Mola [mm]
$DM_m$	Diâmetro Médio da Mola [mm]
$L_{om}$	Comprimento Inicial da Mola [mm]
$L_{1m}$	Comprimento Final Máximo da Mola [mm]
$P_{1m}$	Carga Máxima da Mola [kg]
$C_m$	Constante da Mola [kg/mm]
$\sigma_{e\text{ mín.}}$	Limite de Resistência ao Escoamento Mínimo [MPa]
S	Limite de Escoamento para Ensaios de Pressão Hidrostática de Teste [MPa]
P	Pressão Hidrostática de Teste [MPa]
t	Espessura da Parede do Duto [mm]
D	Diâmetro Externo do Duto [mm]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
3.1	A Trajetória da Produção <i>Offshore</i> no Brasil .....	22
3.2	Dutos Submarinos .....	23
3.2.1	Definição de <i>Risers</i> .....	23
3.2.2	<i>Risers</i> Flexíveis .....	24
3.2.2.1	Tecnologia de <i>Risers</i> Flexíveis.....	24
3.2.2.2	Características Técnicas .....	25
3.2.2.3	Mecanismos de Falhas ou Danos em <i>Risers</i> Flexíveis .....	27
3.2.3	<i>Risers</i> Rígidos.....	29
3.2.3.1	Tecnologia de <i>Risers</i> Rígidos.....	29
3.2.3.2	Aços para Dutos de Transporte de Óleo e Gás.....	29
3.2.3.3	Mecanismos de Falhas ou Danos em <i>Risers</i> Rígidos .....	31
3.2.3.4	Aplicação de Métodos de Ensaio Não Destrutivos (END) em <i>Risers</i> Rígidos...32	
3.3	Métodos de Avaliação de Sistemas de Reparo de Dutos.....	33
3.4	Métodos de Reparo de Danos na Camada Externa Polimérica em <i>Risers</i> Flexíveis	34
3.5	Métodos de Proteção de Sistemas de Monitoramento em <i>Risers</i> Rígidos .....	40
3.6	Métodos de Operações Submarinas em <i>Risers</i> .....	43
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO E DA FERRAMENTA .....</b>	<b>48</b>
4.1	Análise das Necessidades e Definição dos Requisitos .....	48
4.2	Geração de Soluções e Escolha da Melhor Concepção.....	49
4.2.1	Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento .....	49
4.2.2	Ferramenta para Aplicação Submarina de <i>Clamps</i> de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento .....	52

4.2.2.1	Estrutura Externa .....	53
4.2.2.2	Estrutura Interna .....	55
4.3	Projeto do Método e da Ferramenta .....	57
4.3.1	Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento .....	57
4.3.2	Ferramenta para Aplicação Submarina de <i>Clamps</i> de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento .....	61
4.3.2.1	Estrutura Externa .....	62
4.3.2.2	Estrutura Interna .....	64
4.4	Dimensionamento e Seleção dos Componentes .....	67
4.4.1	Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento .....	68
4.4.2	Ferramenta para Aplicação Submarina de <i>Clamps</i> de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento .....	70
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>74</b>
5.1	Testes de Funcionamento e Modificações do Protótipo.....	74
5.2	Ensaios de Avaliação do Método de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento .....	75
5.2.1	Definição dos Corpos de Prova .....	75
5.2.2	Preparação e Instrumentação dos Corpos de Prova.....	77
5.2.3	Procedimento para a Realização dos Ensaios.....	83
5.2.4	Ensaio Hidrostático com Pressão Interna .....	84
5.2.5	Ensaio Hidrostático com Pressão Externa.....	87
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>90</b>
6.1	Resultados dos Testes de Funcionamento e Modificações do Protótipo.....	90
6.1.1	Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento .....	90
6.1.2	Ferramenta para Aplicação Submarina de <i>Clamps</i> de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento .....	93
6.2	Resultados dos Ensaios de Avaliação do Método de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento .....	98
6.2.1	Ensaio Hidrostático com Pressão Interna .....	98

6.2.2	Ensaio Hidrostático com Pressão Externa.....	107
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>112</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>113</b>
	<b>APÊNDICE A – Ensaio de Pressão em Resinas Epóxis.....</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE B – Ensaio de Deflexão em Perfis de Borracha.....</b>	<b>128</b>
	<b>APÊNDICE C – Pedido de Patente de Invenção: Dispositivo Bipartido (<i>Clamp</i>) ....</b>	<b>130</b>
	<b>APÊNDICE D – Pedido de Patente de Invenção: Ferramenta Bipartida .....</b>	<b>132</b>
	<b>APÊNDICE E – Gráficos pressão interna (bar) x deformação (<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>) .....</b>	<b>134</b>
	<b>ANEXO A - Diâmetros e Áreas de Roscas Métricas .....</b>	<b>135</b>
	<b>ANEXO B – Categorias Métricas de Propriedades Mecânicas para Parafusos e Porcas.....</b>	<b>136</b>
	<b>ANEXO C – Especificação do Rolamento Esférico com Fixação por Parafusos Y 205 V22 .....</b>	<b>137</b>
	<b>ANEXO D – Especificação do Mancal Tipo Flange FL 205 .....</b>	<b>138</b>
	<b>ANEXO E – Especificação do Motor F006 WMO 310.....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a demanda crescente de petróleo e com a descoberta de novos campos petrolíferos em águas cada vez mais profundas, surge a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitam a exploração com segurança nestes locais.

O escoamento entre o poço marítimo e a unidade flutuante é realizado através de dutos definidos como *risers* segundo a terminologia da norma DNV-OS-F201 (DET NORRSKE VERITAS DNV-OS-F201, 2010). O *riser* pode ser considerado uma das partes críticas de um sistema de produção *offshore*, em função de estar continuamente submetido a condições ambientais severas e a um grande número de solicitações variáveis (ZILIO, 2013). Eles podem ser denominados *risers* rígidos ou flexíveis.

Os *risers* flexíveis são compostos por camadas intercaladas de diferentes materiais, como aço e polietileno (ÁVILA, 2005). E conforme Carneval, Marinho e Santos (2006), cada camada possui uma função específica, e podem ser descritas como: carcaça, camada de estanqueidade, armadura de pressão, armadura de tração e camada externa.

Devido à complexidade dos dutos flexíveis e das operações de instalação e operação, os mesmos estão susceptíveis a uma série de modos de falha. Os mecanismos de dano ou falha mais reportados são referentes a danos na camada externa polimérica, o que leva à exposição de suas armaduras metálicas ao meio externo (BOSCHEE, 2012). A armadura de tração que possui função estrutural é fabricada a partir de aços de elevada resistência mecânica, no entanto, apresenta baixa resistência à corrosão em água do mar (BABOIAN, 2002).

Na literatura encontra-se que após o rompimento do polímero externo dos *risers* flexíveis, os reparos efetuam-se através de procedimentos envolvendo a aplicação de uma vedação na área afetada (JOEL, 2009). No entanto, as informações são muito escassas a respeito dos procedimentos empregados, como também, na especificação dos materiais utilizados e na eficiência das técnicas de reparo (CARRO, 2015).

Os *risers* rígidos são dutos fabricados normalmente em aço, formados por segmentos de dutos unidos por soldas circunferenciais de topo (ÁVILA, 2005). Embora tubulações de exploração e distribuição de óleo e gás tenham um excelente histórico no quesito segurança, estas estão sujeitas a vários tipos de danos durante sua operação em campo (GAMBOA; LINTON; LAW, 2008). Estes defeitos podem envolver a perda de espessura da parede por

corrosão, trincas, riscos e amassamentos (PETRY, 2011). E conforme Concawe (2002), a causa de dano mais frequente é a corrosão.

Em relação aos *risers* rígidos, podem-se aplicar técnicas de ensaio não destrutivo (END) para evitar que danos se propaguem podendo causar algum tipo de acidente, ou para localizar a posição de um possível dano na estrutura. Os ENDs realizados em tubulações na indústria petroquímica são uma questão de grande importância por razões de segurança e de controle do impacto ambiental (CORRÊA, 2014).

Para inspeções mais rápidas, a técnica acústica chamada ondas guiadas está sendo utilizada e desenvolvida. Esta onda mecânica é capaz de se propagar por toda a área da seção transversal da estrutura, sendo chamada de ondas de Lamb (CORRÊA, 2014). Uma das variações da técnica é a utilização de anéis de sensores acoplados à parede do duto, em espaçamentos regulares, que possibilitam o monitoramento da integridade estrutural sem a necessidade de se acessar a estrutura ou parada de produção.

Desta forma, tem-se como objetivo nesta dissertação, o projeto e desenvolvimento de uma ferramenta e de um método para operações submarinas em *risers*. A ferramenta deverá ser capaz de aplicar de forma automática um *clamp* bipartido no reparo da camada externa polimérica de *risers* flexíveis, ou acoplar sistemas de monitoramento em *risers* rígidos. Já o *clamp*, deverá permitir a sua aplicação tanto no reparo quanto na proteção do sistema de monitoramento.

Quando aplicado no reparo, o *clamp* possuirá a função de restaurar a estanqueidade e proteger as armaduras metálicas, controlando, assim, os processos corrosivos em curso. E quando aplicado na proteção de sistemas de monitoramento, o *clamp* atuará como um invólucro protetivo, onde os sensores, cabos, e eletrônicas que constituem o sistema serão pré-inseridos no seu interior.

Apresentam-se os resultados dos testes de funcionamento do protótipo da ferramenta e do método, e os resultados dos ensaios hidrostáticos de pressão interna e externa em um reparo aplicado em um duto com a finalidade de conhecer o comportamento do método desenvolvido, não sendo o foco deste desenvolvimento, o estudo da resina ou mistura mais adequada para o reparo ou para a proteção do sistema de monitoramento. Além disso, utilizou-se um duto rígido tanto na realização dos testes de funcionamento, quanto nos ensaios hidrostáticos, devido ser comercialmente de fácil obtenção e de menor custo.

## 2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Esta dissertação tem como objetivo principal o projeto e desenvolvimento de uma ferramenta e de um método para operações submarinas em *risers* por meio de mergulhador em profundidades de até 300 m, correspondente a uma pressão de 30 bar, ou ROV em maiores profundidades. A ferramenta deverá ser capaz de aplicar de forma automática um *clamp* bipartido no reparo da camada externa polimérica de *risers* flexíveis, ou acoplar sistemas de monitoramento em *risers* rígidos. Já o método deverá permitir a sua aplicação tanto no reparo quanto na proteção do sistema de monitoramento.

Para isto, a seguinte metodologia foi adotada:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados nesta dissertação, a fim de obter uma melhor compreensão sobre os danos na camada externa polimérica de *risers* flexíveis e a utilização de colar de sensores em *risers* rígidos, sobre métodos de aplicação similar, permitindo, assim, uma vantagem técnica através da comparação dos produtos, e sobre métodos de avaliação de sistemas de reparo de dutos;
- Análise das necessidades para definir o que deve ser projetado através de uma lista de requisitos, formalizando, assim, as necessidades e as limitações do projeto;
- Desenvolvimento do projeto do método e da ferramenta através da definição de uma concepção viável;
- Construção do protótipo do método e da ferramenta para a realização de testes de funcionamento em um duto;
- Execução de ensaios experimentais para avaliação do comportamento do método de reparo ou proteção de sistemas de monitoramento aplicado em um duto através de testes hidrostáticos de pressão interna em *bunker* e pressão externa em câmara hiperbárica;
- Discussões dos resultados e conclusões.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A Trajetória da Produção *Offshore* no Brasil

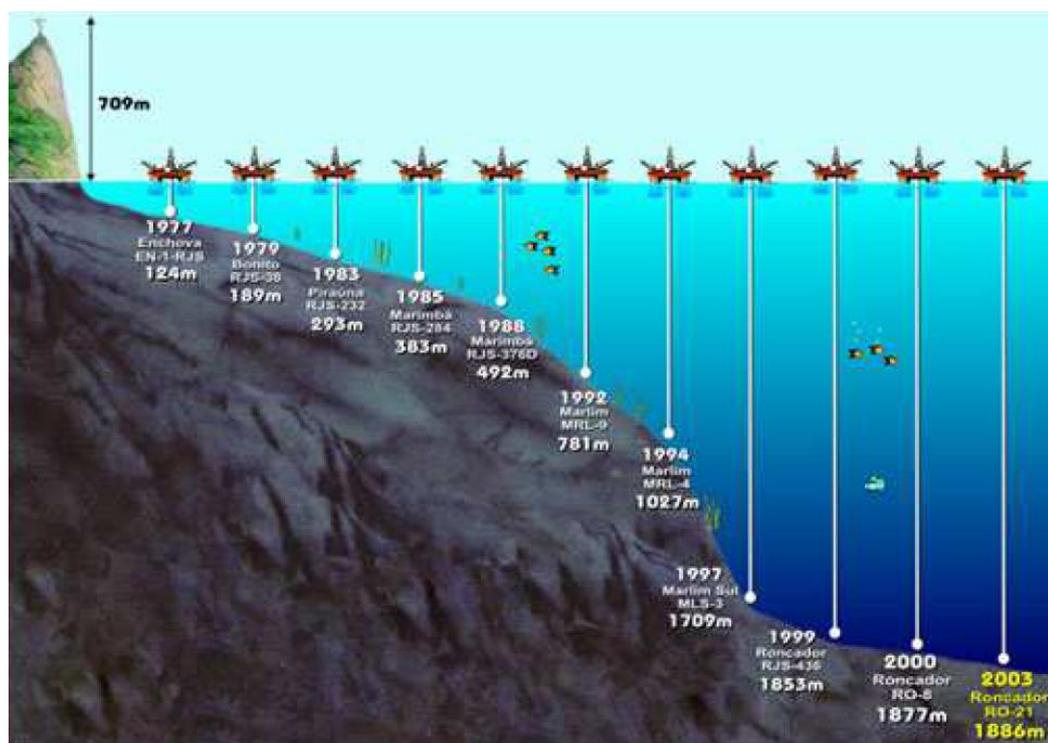
Desde o início da exploração do petróleo, por volta de 1860, os poços somente eram perfurados em terra firme, chegando a pequenos lagos e mares rasos em torno de 1900, e finalmente em águas profundas a partir de 1950 (BETANZOS, 2004). No Brasil, na década de 1950, foi criada a Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), uma companhia estatal para cuidar dos interesses brasileiros quanto à obtenção do petróleo. Durante sua existência, esta companhia vem sofrendo ampliação de suas atividades tornando-se responsável desde a exploração, extração, refino até a distribuição dos derivados de petróleo (BUENO, 2010).

A história do petróleo no Brasil foi alavancada pela crise da década de 1970, quando a Petrobras se viu obrigada a aumentar a sua produção para atender a demanda interna do país. Devido à baixa resposta dos poços perfurados em terra firme, foram voltados os esforços para o mar. Desde então a produção marítima não parou de crescer e hoje alcança cerca de 80% da produção nacional (BETANZOS, 2004).

Buscando a autossuficiência na exploração e produção de petróleo em um quadro de aumento contínuo de demanda, a exploração e extração de petróleo em águas profundas tornou-se uma necessidade (BUENO, 2010). A decisão de explorar petróleo em alto mar foi um marco na história nacional. A partir disto, a Petrobras tem trilhado um caminho de inúmeras descobertas, alcançando o título de líder mundial em tecnologia de exploração de petróleo em águas profundas (NETO; DALLA COSTA, 2007).

A Figura 1 mostra o aumento na lâmina de água na exploração de petróleo no Brasil através dos anos, salientando-se que o aumento de lâmina de água requer a transposição de barreiras tecnológicas em materiais, processos de fabricação e tecnologias em suas várias áreas (BUENO, 2010). De acordo com a profundidade da bacia, a exploração pode ocorrer em águas rasas (até 400 m), águas profundas (400 a 1000 m) ou águas ultraprofundas (acima de 1000 m) (LOPES, 2004 *apud* FARO, 2008). Estima-se que 45% das reservas brasileiras estão localizadas em águas profundas e a previsão é de que 50% das reservas a serem descobertas estarão situadas em águas ultraprofundas. No caso do pré-sal, as rochas se estendem por 800 km na costa brasileira, abaixo de uma camada de sal com espessura média de 2000 m (DOMINGUES, 2010).

Figura 1 – Evolução das profundidades na exploração de petróleo no Brasil



Fonte: BUENO, 2010

## 3.2 Dutos Submarinos

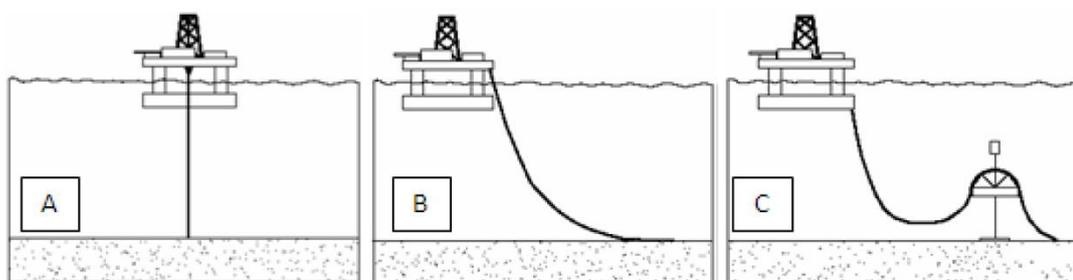
### 3.2.1 Definição de Risers

*Riser* é uma palavra de origem inglesa, que conforme a terminologia da norma DNV-OS-F201 (DET NORSKE VERITAS DNV-OS-F201, 2010) define o duto de escoamento entre o poço marítimo e a unidade flutuante. De acordo com Zilio (2013), os *risers* podem ser denominados flexíveis ou rígidos, de acordo com o material empregado na sua fabricação. Os *risers* flexíveis são compostos por camadas intercaladas de diferentes materiais, como aço e polietileno. Já os *risers* rígidos são dutos fabricados normalmente em aço, formados por segmentos de dutos unidos por soldas circunferenciais de topo.

Conforme mostrado na Figura 2, os *risers* podem estar dispostos nas seguintes configurações geométricas, onde as suas aplicações dependem das condições de utilização: vertical (para serem utilizados em plataformas que apresentam pouco deslocamento), em catenária livre, ou em alguma das configurações de catenária complexas (semelhantes aos de catenária livre, diferenciando-se pela utilização de flutuadores ou boias mantidas submersas) (ÁVILA, 2005). Na exploração *offshore* de petróleo, mostrado na Figura 3, são utilizados

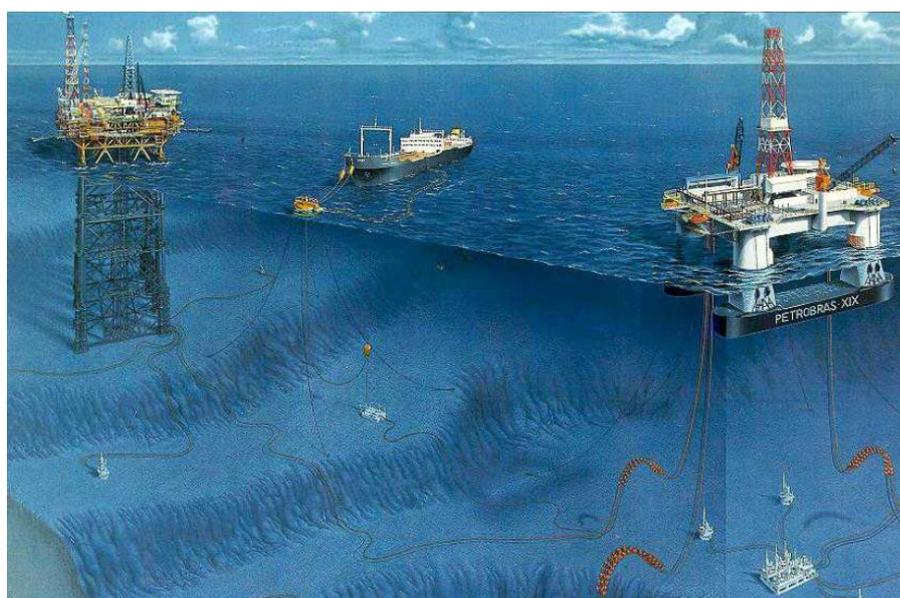
duto rígidos ou flexíveis (BUENO, 2010). Os rígidos são frequentemente utilizados em pequenas lâminas de água, menores que 200 m, e em plataformas fixas, enquanto que os flexíveis são utilizados tanto em grandes profundidades quanto em pequenas lâminas de água, e também podem ser utilizados em aplicações *onshore* (SILVA, 2010).

Figura 2 – Configurações: (A) vertical, (B) catenária livre, (C) catenária complexa



Fonte: ÁVILA, 2005

Figura 3 – Sistemas de produção de petróleo *offshore*, no qual é mostrado da esquerda para a direita: plataforma fixa, unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO), e plataforma semi-submersível



Fonte: CAMERINI, 2006

### 3.2.2 Risers Flexíveis

#### 3.2.2.1 Tecnologia de Risers Flexíveis

Desde o início da exploração de gás e petróleo em águas profundas, dutos flexíveis foram considerados a melhor opção para o transporte de fluidos (MARINHO *et al.*, 2007). Este tipo

de duto é mais fácil de ser instalado, transportado e operado do que dutos rígidos. Outra vantagem, é que diferente dos dutos rígidos, os flexíveis podem ser recuperados e reinstalados (JACQUES, 2009). Os *risers* flexíveis apresentam uma resistência mecânica igual à dos *risers* rígidos, maior resistência à fadiga e ainda maior proteção contra a corrosão. Estas características são muito importantes, pois falhas neste tipo de tubulação, invariavelmente, ocasionam graves danos ambientais pelo vazamento de grandes quantidades de óleo nos oceanos (BETANZOS, 2004).

Além disso, os *risers* flexíveis possuem alta flexibilidade, o que justifica o seu uso acoplado a estruturas complacentes, e capacidade de ser armazenada em rolos, diminuindo o custo de transporte e instalação (ALMIRÓN, 2010). Fabricados em comprimentos que podem ultrapassar 3000 m, permitem a instalação de longas linhas, evitando a utilização de flanges intermediários, no qual aumenta o risco de falha da linha (XAVIER, 2009). Apesar do custo, superior aos componentes rígidos, os dutos flexíveis são estruturas compostas que oferecem alta resistência aos carregamentos de tração, torção e pressão. Esta performance é alcançada através da utilização de tubos poliméricos complacentes para o isolamento dos elementos, e camadas helicoidais de aço para garantir resistência mecânica à estrutura (OUT *et al.*, 1995; COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS CONTEC N-2409, 1994). Atualmente, aproximadamente 80% da produção brasileira de petróleo e gás são produzidas por dutos flexíveis (CARNEVAL; MARINHO; SANTOS, 2006). A aplicação destes equipamentos incluem altas pressões, da ordem de 10000 psi (689,5 bar), em águas profundas e ultraprofundas, e capacidade de suportar grandes movimentos (WALLAUER, 2015).

### 3.2.2.2 Características Técnicas

Os dutos flexíveis possuem algumas classificações, onde as definições detalhadas de cada tipo de duto podem ser encontradas na norma Petrobrás CONTEC N-2409 (COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS CONTEC N-2409, 2004). Tipicamente um duto flexível contém as camadas principais mostradas na Figura 4, no qual cada camada possui uma função específica (BOGARIN; EBECKEN, 1996; RUBIN; GUDME, 2006; CARNEVAL; MARINHO; SANTOS, 2006). A seguir, apresenta-se uma breve descrição das camadas usualmente integrantes de um *riser* flexível do tipo *unbonded* (MARINHO *et al.*, 2007; CARNEVAL; MARINHO; SANTOS, 2006). Quanto à forma geométrica de cada

camada metálica, as mesmas são especificadas na norma API 17B (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API 17B, 2002).

- Carcaça: Tem a função de resistir à pressão interna e suportar os esforços causados pela inércia do componente. Geralmente é composta de aços inoxidáveis do tipo AISI 316L ou 304L (limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) = 290 MPa);
- Camada de estanqueidade: Tem a função de impedir a permeabilidade de gases, óleo ou água para as camadas posteriores. É formada por polímeros variados, dependendo da temperatura de aplicação do duto: polietileno de alta densidade (HDPE) para 60°C; nylon (poliamida, PA11) para 80°C; e fluoreto de polivinilideno (PVDF) para 130°C;
- Armadura de pressão: Tem a função de resistir à pressão hidrostática interna e compressão radial. A armadura de pressão contém duas camadas de tiras de aço, as quais, dependendo da natureza do carregamento, podem ter a forma de um perfil plano ou de um perfil em C. Geralmente esta camada é confeccionada em aço carbono de alta resistência do tipo ABNT 1060;
- Armadura de tração: Tem a função de resistir aos esforços axiais e de torção no qual o duto está sujeito. Funciona para o balanceamento à torção, apresentando camadas de arames helicoidalmente distribuídas aos pares. Geralmente é confeccionada com aço carbono de alta resistência mecânica do tipo ABNT 1060 encruado ( $\sigma_e$  = 900 MPa);
- Camada externa: Tem a função de garantir resistência à corrosão e à abrasão à armadura de tração. É formada de material polimérico (PEAD para *flowline* e PA11 para *riser*) apresentando espessura variável segundo a aplicação (entre 5 e 12 mm).

Muitos trabalhos na literatura trazem revisões bibliográficas detalhadas sobre o duto flexível e seus acessórios. Maiores detalhes do comportamento de cada uma das camadas descritas anteriormente, assim como os demais componentes que compõem o sistema, podem ser encontrados nos trabalhos de Bueno (2010), Lemos (2005), Sousa *et al.* (2014) e Campello (2014).

Atualmente o diâmetro dos dutos flexíveis varia entre 2” e 19”, levando-se em consideração o diâmetro interno, diferente dos dutos rígidos que são referenciados pelo diâmetro externo. Conforme o seu diâmetro, profundidade de trabalho e função, a pressão interna pode variar de 70 a 700 bar. As temperaturas podem chegar a 130°C e as profundidades de trabalho podem variar de 1500 a mais de 3000 m (XAVIER, 2009).

Figura 4 – Configuração típica de um duto flexível do tipo *unbonded*



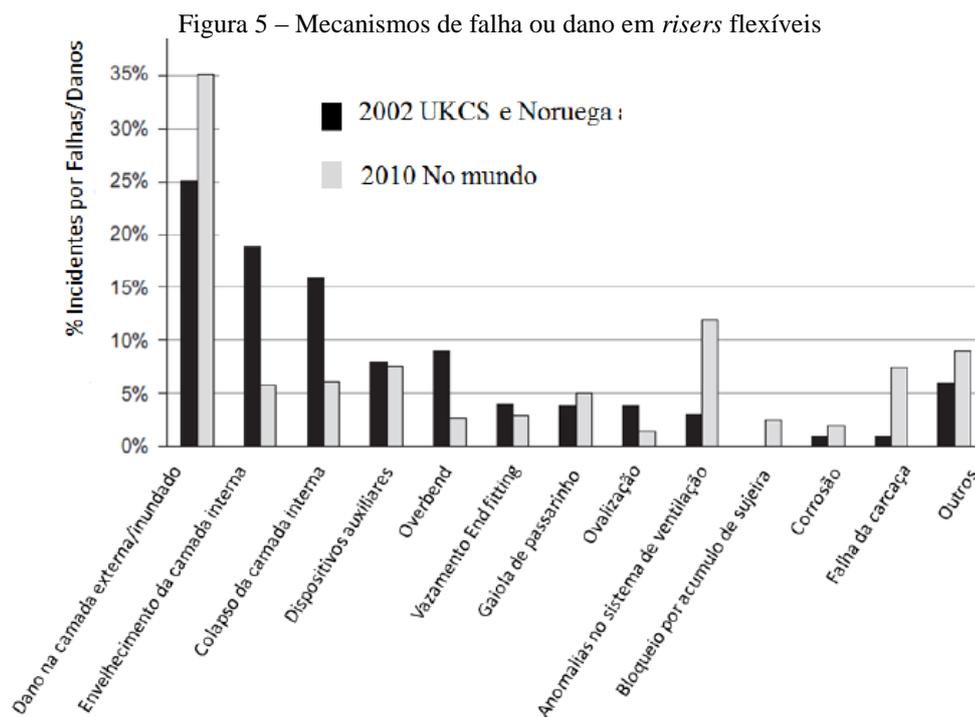
Fonte: RUBIN; GUDME, 2006

### 3.2.2.3 Mecanismos de Falhas ou Danos em *Risers* Flexíveis

Devido à complexidade dos dutos flexíveis como também das operações de instalação e operação, estes equipamentos estão susceptíveis a uma série de modos de falha. A norma Petrobrás CONTEC N-2409 (COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS CONTEC N-2409, 2004) especifica os modos de falha agrupando-os conforme a localização onde ocorrem: falhas nas camadas estruturais, falhas na barreira de pressão, falhas no *end fitting*, e falhas por aumento do peso do duto. Também tem-se a norma API 17B (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API 17B, 2002), no qual são apresentados os tipos de falhas em dutos flexíveis de acordo com os modos de falha de colapso, estouro, tensão, compressão, excesso de dobramento, torção, fadiga, erosão, e corrosão. Porém os modos de falhas descritos em ambas as normas são muito parecidos (JACQUES, 2009).

Segundo Boechee (2012 *apud* Carro, 2015), os mecanismos de dano ou falha mais reportados são referentes a danos na camada externa polimérica, e a sua ocorrência tem aumentado desde 2001 conforme é visto na Figura 5, onde verificam-se os tipos de falhas ou danos, e a sua incidência comunicada por operadores ao redor do mundo.

Conforme apresentado na Tabela 1, a norma API 17B (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API 17B, 2002) relaciona as causas e consequências para um dano da camada externa do duto flexível. É importante considerar que a ruptura das camadas externas permite a passagem de soluções corrosivas (gases e água do mar) para o interior do duto, acelerando o processo de degradação através da combinação de fatores associados à fadiga e a corrosão.



Fonte: BAI; BAI, 2014

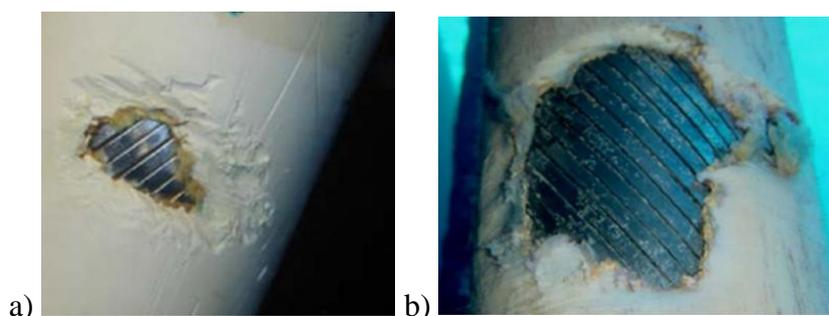
Tabela 1 – Defeitos na camada externa polimérica em *riser* em aplicação estática e dinâmica

Componente	Defeito	Consequência	Causas possíveis
Camada externa polimérica	Furo, ruptura, rasgo ou fenda	Ingresso de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Defeito de fabricação;</li> <li>- Rasgamento durante a instalação;</li> <li>- Ponto de contato, impacto ou desgaste;</li> <li>- Desenho de projeto impróprio;</li> <li>- Pressão acumulada no anular;</li> <li>- Válvula de ventilação bloqueada;</li> <li>- Entre outros.</li> </ul>
	Ingresso de água do mar	Corrosão das armaduras de pressão e tração (em especial na <i>splash zone</i> )	- Furo, rasgo, fenda, ruptura da camada externa polimérica.
	Desgaste	Possível ruptura devido a pressão no anular ou corrosão acelerada das armaduras metálicas	- Contato abrasivo com o solo marinho, outras linhas ou outras superfícies.

Fonte: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API 17B, 2002

A Figura 6 demonstra os defeitos na camada externa do duto flexível no momento de sua instalação ou operação em alto mar. Para este processo diz-se que o anular foi alagado, onde o contato entre a água do mar e a armadura de tração resulta em um processo acelerado de degradação, associando os esforços trativos aos efeitos da corrosão (TALGATTI, 2013).

Figura 6 – a) Defeito na bandagem de alta resistência gerado na instalação da linha flexível; b) Defeito na bandagem de alta resistência devido ao contato com a plataforma durante operação ou instalação do *riser*



Fonte: a) PICKSLEY *et al.*, 2002; b) CARNEVAL; MARINHO; SANTOS, 2006

### 3.2.3 *Risers* Rígidos

#### 3.2.3.1 Tecnologia de *Risers* Rígidos

Os *risers* rígidos são formados por segmentos de dutos fabricados normalmente em aço baixa liga ou microligado e unidos por soldas circunferenciais de topo. Estes *risers*, utilizados em grandes profundidades sob a forma de catenária, atingem flexibilidade suficiente para serem considerados como uma alternativa economicamente atrativa, embora, também podem ser aplicados sob a forma vertical (CORRÊA, 2010). O *riser* rígido em catenária é uma concepção nova e foi introduzido com o objetivo de substituir, em grandes profundidades, o *riser* flexível cujo custo é elevado (ÁVILA, 2005).

#### 3.2.3.2 Aços para Dutos de Transporte de Óleo e Gás

A necessidade crescente de buscar soluções econômicas para o transporte de óleo e gás tornou comum à utilização de aços para dutos que atendam certos requisitos de propriedades mecânicas como: resistência, tenacidade à fratura, ductilidade, soldabilidade, resistência à corrosão fadiga e corrosão sobtensão (COHEN; HANSEN, 1979; SHANMUGAM *et al.*, 2008).

Os aços alta resistência e baixa liga (ARBL) surgem como a opção mais eficiente economicamente. Estes aços, além de apresentarem uma relação ótima de compromisso entre resistência e peso, também dispõem de uma excelente tenacidade e grande soldabilidade (COHEN; HANSEN, 1979). Estas duas últimas propriedades garantem a estes aços a preferência na aplicação em dutos de transporte (COHEN; HANSEN, 1979; SILVA, 2004; VENTRELLA; ALCÂNTARA; FERREIRA, 2001; SHANMUGAM *et al.*, 2008).

Os aços para dutos com aplicação na indústria do petróleo e gás, são especificados pela American Petroleum Institute (API), através da norma API 5L (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API SPECIFICATION 5L, 2004) para dutos com e sem costura. Estes aços são classificados por esta norma primeiramente conforme a resistência mecânica do duto soldado (como fabricado). A norma ainda especifica limites para alguns elementos de sua composição química. Entretanto, a propriedade que determina o grau do duto é o limite de escoamento em Ksi (VALIM, 2005). De acordo com as exigências dos dutos, as especificações API 5L A e B são utilizadas em sistema de baixas pressões, enquanto que as API 5L X 42, 60, 70 etc., para uso em altas pressões (VALIM, 2005; VENTRELLA; ALCÂNTARA; FERREIRA, 2001).

A Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 mostram os valores de resistência mínimos e composição química para aços definidos pela norma API 5L (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API SPECIFICATION 5L, 2004).

Tabela 2 – Faixa de valores de resistência exigidos pela norma API 5L para cada grau

Grau	Limite de Escoamento Mínimo (MPa)	Limite de Escoamento Máximo (MPa)	Limite de Resistência Mínimo (MPa)	Limite de Resistência Máximo (MPa)
B	241	448	414	758
X42	290	496	414	758
X46	317	524	434	758
X52	359	531	455	758
X56	386	544	490	758
X60	414	565	517	758
X65	448	600	531	758
X70	483	621	565	758
X80	552	690	621	827

Fonte: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API SPECIFICATION 5L, 2004

Tabela 3 – Valores de composição química para os graus sem cordão de solda estabelecidos pela norma API

Grau	Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Titânio	Outros
	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	
Sem cordão de solda						
B	0,24	1,20	0,025	0,015	0,04	b, c
X42	0,24	1,30	0,025	0,015	0,04	a, b
X46, X52, X56, X60	0,24	1,40	0,025	0,015	0,04	a, b
X65, X70, X80	0,24	1,40	0,025	0,015	0,06	a, b

<sup>a</sup>Nióbio, vanádio ou combinações dos mesmos podem ser usados sob responsabilidade do fabricante;

<sup>b</sup>A soma dos teores de nióbio, vanádio e titânio não deve exceder 0,15%;

<sup>c</sup>A soma dos teores de nióbio e vanádio não devem exceder 0,06%, exceto quando houver acordo entre comprador e fabricante, um novo limite máximo pode ser estabelecido.

Fonte: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API SPECIFICATION 5L, 2004

Tabela 4 – Valores de composição química para os graus soldados estabelecidos pela norma API.

Grau	Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Titânio	Outros
	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	
Soldado						
B	0,22	1,20	0,025	0,015	0,04	b, c
X42	0,22	1,30	0,025	0,015	0,04	a, b
X46, X52, X56	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04	a, b
X60	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04	a, b
X65	0,22	1,45	0,025	0,015	0,06	a, b
X70	0,22	1,65	0,025	0,015	0,06	a, b
X80	0,22	1,85	0,025	0,015	0,06	a, b

<sup>a</sup>Nióbio, vanádio ou combinações dos mesmos podem ser usados sob responsabilidade do fabricante;

<sup>b</sup>A soma dos teores de nióbio, vanádio e titânio não deve exceder 0,15%;

<sup>c</sup>A soma dos teores de nióbio e vanádio não devem exceder 0,06%, exceto quando houver acordo entre comprador e fabricante, um novo limite máximo pode ser estabelecido.

Fonte: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API SPECIFICATION 5L, 2004

### 3.2.3.3 Mecanismos de Falhas ou Danos em *Risers* Rígidos

Embora tubulações de exploração e distribuição de óleo e gás tenham um excelente histórico no quesito segurança, estas estão sujeitas a vários tipos de danos durante sua

operação em campo (CORRÊA, 2010). Os danos podem envolver a perda de espessura da parede por corrosão, trincas, riscos e amassamentos (PETRY, 2011).

Quando aplicadas em águas profundas, estas tubulações estão sujeitas a salinidade da água do mar, o qual podem ocasionar defeitos superficiais de corrosão nos dutos. Existem ainda os defeitos que podem surgir nas paredes internas do duto que são ocasionadas devido ao tipo de fluido que está sendo transportado, no qual podem contar com uma quantidade elevada de hidrocarbonetos tais como o petróleo (SILVA, 2015).

Dentre as principais causas de danos, conforme apurado por Concawe (2002) em diversas linhas de dutos, destacam-se a corrosão, falhas mecânicas, defeitos de fabricação, falhas de projeto e erros operacionais, onde a mais frequente é a corrosão. Maiores informações sobre as formas de corrosão em *risers* rígidos e suas características, podem ser encontrados nos trabalhos de Geremia (2012), Corrêa (2010) e Zilio (2013).

#### **3.2.3.4 Aplicação de Métodos de Ensaio Não Destrutivos (END) em *Risers* Rígidos**

Um dos processos críticos relacionados aos dutos é a sua inspeção periódica, a qual é necessária e obrigatória. Conhecidos como END, estes ensaios são procedimentos realizados em componentes através da sua superfície em busca de falhas ou defeitos superficiais, subsuperficiais, ou internos. Caracterizam-se por ser não destrutivos pelo fato de não afetar o normal funcionamento do componente e nem danificá-lo (GEREMIA, 2012).

Sistemas de varredura de tubulações baseados em ondas guiadas ultrassônicas vêm ganhando espaço devido a sua capacidade de inspecionar trechos extensos da estrutura a partir de um único ponto de acesso, sem necessidade de parada de produção ou de inserção de equipamentos no interior do duto. A natureza das ondas guiadas assegura que energia na forma de ultrassom percorra as paredes do duto por dezenas de metros e que parte desta energia seja refletida ao encontrar obstáculos estruturais como: soldas, apoios ou defeitos, corrosão, trincas, ou falhas no revestimento.

Uma das variações da técnica é a utilização de anéis de sensores permanentemente acoplados à parede do duto em espaçamentos regulares, o qual possibilita o monitoramento da integridade estrutural sem a necessidade de se acessar a estrutura. Atualmente o Grupo de Ensaio Não Destrutivos (GEND) vinculado ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), desenvolve projetos de pesquisa referentes a sistemas submarinos de monitoramento estrutural em *risers* rígidos.

Estes projetos visam operacionalizar dispositivos acoplados à parede externa do duto com possibilidade de ser removido, para o monitoramento da integridade estrutural de dutos metálicos submersos de forma periódica, e por longos intervalos de tempo, o qual teria como requisito a fácil instalação. Estes dispositivos tratam-se de sistemas de monitoramento de dutos compostos de colar de transdutores, eletrônica, invólucro, e *software* de processamento de dados. O invólucro é o componente de interesse nesta dissertação, e terá a função de proteger o sistema de monitoramento.

### **3.3 Métodos de Avaliação de Sistemas de Reparo de Dutos**

Com o propósito de servir como orientação na preparação e execução dos ensaios experimentais desta dissertação, apresenta-se a seguir alguns trabalhos desenvolvidos para estudar o comportamento de dutos utilizados na indústria do petróleo. Em Fergestad e Løtveit (2017), é mencionado que o método de reparo desenvolvido para danos na camada externa polimérica de *risers* flexíveis deve ser sujeito a uma série de qualificações, incluindo testes de verificação, para garantir que o método atenda as especificações e atinja o objetivo, porém, não é descrito os tipos de testes que devem ser realizados. Para a verificação do comportamento do método desenvolvido, definiu-se previamente a utilização de um duto rígido devido ao baixo custo de aquisição e facilidade de obtenção comparada ao *riser* flexível, cujas características e propriedades serão apresentadas posteriormente.

Em Rosas (2010) é apresentado um estudo de análise e validação de modelos que explicam o comportamento de reparos tipo luva em dutos com defeitos caracterizados por perda de espessura através de testes experimentais. Faz-se uma comparação das deformações de um duto reparado com camadas metálicas e um duto reparado com material compósito através da aplicação de pressão interna e utilização de extensômetros de resistência elétrica.

Em Perrut (2010) realizou-se um estudo das deformações atuantes em um duto reparado com material compósito com o propósito de conhecer o comportamento e o nível destas deformações na região onde existem as camadas de reparo. Foram testados três reparos comerciais de material compósito, dois reparos utilizando fibra de vidro e outro utilizando fibra de carbono. Os espécimes tubulares utilizados pertencem à especificação API 5L X70. Estes foram instrumentados com extensômetros de resistência elétrica e com extensômetros de fibra óptica. Neste estudo está descrito detalhadamente as etapas do procedimento do ensaio, e os resultados encontrados para cada extensômetro.

O artigo desenvolvido por Meniconi *et al.* (2002) baseia-se na análise do comportamento mecânico dos reparos de material compósito, mais especificamente dos reparos fornecidos por *Strongback*. Foram testados quatro tubos em escala real: dois reparados, um com defeito externo, e outro com defeito interno. Foram apresentadas as deformações obtidas mediante as rosetas extensométricas instaladas no defeito, fora do defeito, e sobre o reparo.

No artigo desenvolvido por Meniconi *et al.* (2000) são apresentados os resultados de testes experimentais de um duto com defeito externo reparado com material compósito. São utilizados extensômetros de resistência elétrica próprios para grandes deformações para leituras em pontos sob e sobre o material do reparo. Este artigo conclui que o efeito de reforço do reparo é evidenciado, mas seu principal efeito ocorre no instante em que a parede de aço do defeito inicia seu escoamento, momento que o reparo passa a trabalhar efetivamente.

Em Qingquan *et al.* (2009) foram realizados ensaios hidrostáticos em três dutos metálicos de aço segundo a norma API 5L X80 com costura. Ao longo dos corpos de prova foram instalados dezessete extensômetros para verificar o comportamento da deformação à medida que é realizado o ensaio hidrostático. Estabeleceu-se que o teste seria realizado em diferentes níveis de pressão para acompanhar o comportamento elástico e plástico do tubo.

O estudo realizado por Netto, Ferraz e Botto (2007) analisou o efeito da ovalização em tubulações. O principal foco foi estudar a relação que existe entre o efeito da ovalização e o defeito corrosivo no duto. Realizou-se ensaios experimentais nos quais os corpos de prova foram submetidos a uma pressão externa a fim de verificar o efeito da ovalização.

Além dos trabalhos descritos acima, existem diversos outros estudos que descrevem métodos de avaliação de sistemas de reparo de dutos a partir de ensaios hidrostáticos em corpos de prova instrumentados como: Sampaio (2009); Sampaio (2006); Paim (2014); Costa Mattos, Paim e Reis (2012); Silva (2015); Diniz *et al.* (2002); Diniz *et al.* (2006); Rosas (2006); e Felippes (2010).

### **3.4 Métodos de Reparo de Danos na Camada Externa Polimérica em *Risers* Flexíveis**

Em Fergestad e Løtveit (2017) é descrito em detalhes o processo de planejamento e execução de um reparo na camada externa polimérica em *riser* flexível. Segundo a norma API 17B (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API 17B, 2002), um dano na camada externa do duto flexível pode ser responsável por um rápido processo corrosivo caso seja este exposto ao ar atmosférico ou a água do mar. Desta maneira, apresentam-se a seguir alguns métodos de

reparo a partir de uma breve descrição, onde maiores informações sobre procedimentos de instalação, inspeções periódicas, e as vantagens e desvantagens de cada método, são encontrados em Fergestad e Løtveit (2017). Com a finalidade de conhecer algumas alternativas de reparo disponíveis, além dos métodos para danos na parte submersa, pesquisaram-se outros métodos, porém aplicados acima do nível do mar ou na *splash zone*.

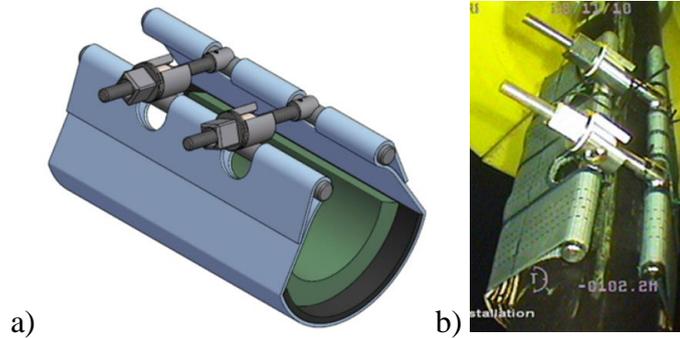
No caso de dano na camada externa polimérica, o método de injeção de líquido inibidor, como o monoetilenoglicol (MEG), na região anular do *riser* pode ser aplicado. O objetivo deste método é deslocar a água do mar já ingressada na região do dano a partir do MEG que possui uma densidade maior que da água do mar, e limitar a entrada adicional de água do mar contendo oxigênio, evitando assim, que a água do mar circule pelos arames de armadura de tração. A injeção do inibidor é preferencialmente usada em combinação com outro método de reparo de camada externa, conforme os que serão apresentados a seguir, com a finalidade de proteger a região do dano do ambiente corrosivo. Em resumo, este método pode ser aplicado em danos submersos ou acima do nível do mar, e pode ser uma alternativa de reparo temporário antes da aplicação do reparo permanente.

Na Figura 7 é mostrada uma braçadeira macia de reparo e uma aplicação em reparo de *riser*. Esta braçadeira pode ser aplicada em danos submersos ou acima do nível do mar em *riser* flexível com pequenos danos na camada externa polimérica, como um furo ou um rasgo. A finalidade desta braçadeira de reparo é vedar o dano e, assim, evitar que a água do mar contendo oxigênio circule na armadura de aço. O componente principal da braçadeira é a cinta de poliéster que fornece pressão radial constante na área do dano através do aperto dos parafusos. Um componente de borracha montada na parte interna da braçadeira de reparo é projetado para realizar a vedação na região do dano. Existem vários casos de reparo bem sucedidos utilizando este método, e é somente utilizado em danos da camada externa.

Na Figura 8 é mostrado uma braçadeira rígida de reparo, e um caso de aplicação em reparo de *riser*. Este método é aplicado em reparo de danos na camada externa polimérica de *risers* flexíveis, e tem como objetivo, restaurar a integridade da camada externa e evitar a exposição das armaduras de aço no ambiente. Entre os principais componentes deste método, destacam-se a braçadeira metálica fabricada em aço inoxidável que fornece pressão radial na área do dano através do aperto dos parafusos. O revestimento de borracha montado da parte interna da braçadeira possui a função de realizar a vedação na região do dano. Em resumo, este método pode ser aplicado em danos submersos ou acima do nível do mar. Existem vários

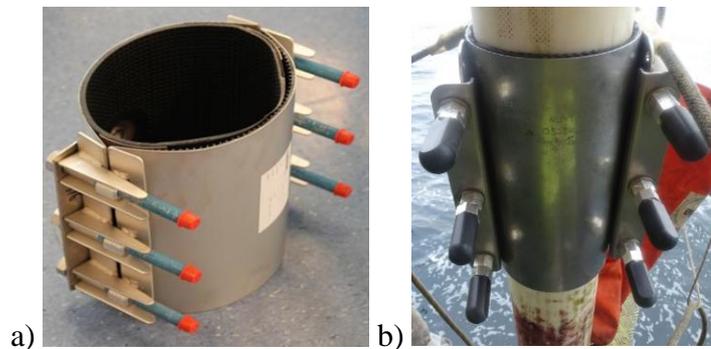
casos de reparo bem sucedidos utilizando este método, e é somente utilizado em danos da camada externa.

Figura 7 – a) Braçadeira macia de reparo; b) Aplicação da braçadeira macia de reparo em *riser* flexível



Fonte: FERGESTAD; LØTVEIT, 2017

Figura 8 – a) Braçadeira rígida; b) Aplicação da braçadeira rígida em reparo de dano na camada externa

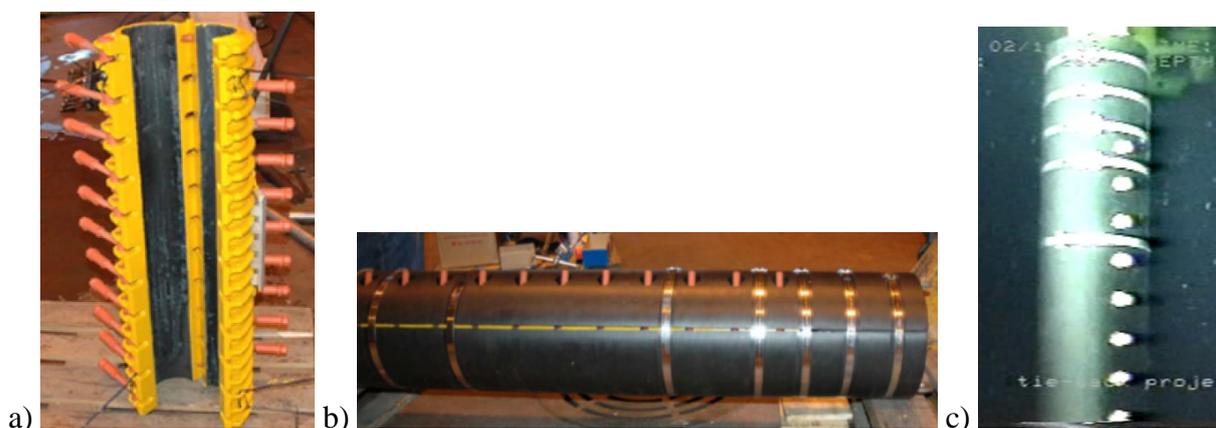


Fonte: a) FERGESTAD; LØTVEIT, 2017; b) 4SUBSEA, 2017

Na Figura 9 é apresentada a braçadeira estrutural de reparo. Este método é aplicado para a reparação de *risers* flexíveis com dano na camada externa polimérica e também com as armaduras de aço rompidas. O objetivo da braçadeira estrutural de reparo é vedar o dano, evitando, desta maneira, que a água do mar contendo oxigênio circule pelas armaduras de aço, e imobilizar os arames da armadura de tração na região danificada e, deste modo, proporcionar um reparo estrutural. A parte danificada da camada externa polimérica deve ser cortada antes da instalação da braçadeira de reparo, o volume removido substituído pelo preenchimento de borracha e coberto com uma fina borracha adesiva, e em seguida a braçadeira é acoplada e fixada no *riser* na região do dano. A braçadeira estrutural de reparo é composta de duas partes principais: a braçadeira interna fabricada em aço, e a braçadeira

externa fabricada de material plástico, no qual é montada sobre a braçadeira interna e tem a função garantir uma flexão controlada próxima da braçadeira interna. Este método pode ser aplicado em casos submersos ou acima do nível do mar.

Figura 9 – a) Parte interna da braçadeira estrutural de reparo em posição aberta; b) Parte externa da braçadeira estrutural de reparo em posição fechada e montada sobre a parte interna; c) Braçadeira estrutural de reparo instalada em um *riser* submerso

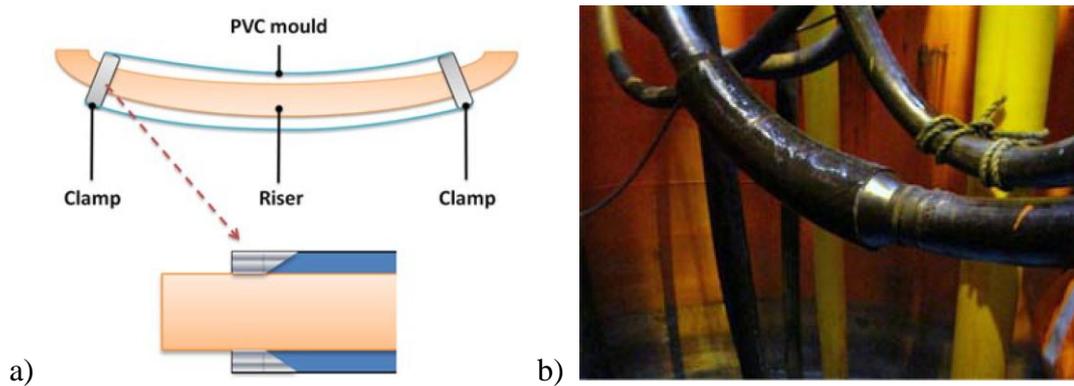


Fonte: FERGESTAD; LØTVEIT, 2017

O reparo por moldagem, apresentado na Figura 10, trata-se de um método aplicável em danos da camada externa polimérica de *risers* flexíveis, localizados acima do nível do mar, quando a aplicação de uma braçadeira comum é inadequada, como, por exemplo, quando existe uma variação de diâmetro na camada externa. O objetivo deste reparo é restaurar a integridade da camada externa e evitar que os arames da armadura de tração fiquem à exposição ambiental. Uma peça de PVC em forma de molde é montada no *riser* a partir de braçadeiras, enclausurando a região danificada. Um material líquido é derramado dentro deste molde, e após a cura, o molde e as braçadeiras já podem ser removidos. O material líquido tem a função de vedação da camada externa danificada, mantendo a pressão interna da região anular, e evitando a entrada de ar, água, e umidade. Existe um relato de reparo utilizando este método, e é somente utilizado em danos da camada externa.

O *FlexGel*, mostrado na Figura 11, é um produto comercial da Flexlife e é aplicado para minimizar a corrosão na região anular do *riser*. O método de reparo é aplicado em danos na camada externa na *splash zone* de *risers* flexíveis localizados na parte interna dos tubos guias. O gel é injetado no tubo guia, preenchendo a área em torno do dano e deslocando a água do mar. Maiores informações sobre este produto podem ser encontradas em Flexlife (2017a).

Figura 10 – a) Esquema da reparação por moldagem; b) Reparo por moldagem aplicado em um *riser*



Fonte: FERGESTAD; LØTVEIT, 2017

Figura 11 – Produto *FlexGel* sendo injetado em um reparo de dano na camada externa



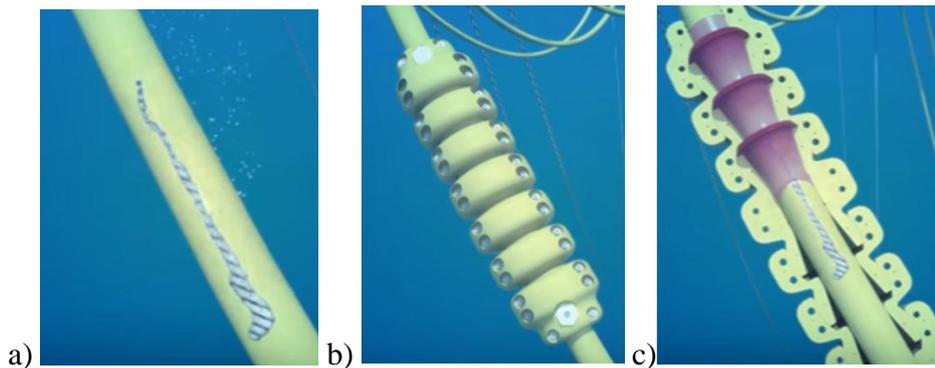
Fonte: FLEXLIFE, 2017a

Já o *Armadillo*, mostrado na Figura 12, no qual é um produto comercial da Flexlife, é um método de reparo permanente por braçadeira e moldagem, e de aplicação *offshore* para danos na camada externa de *risers* flexíveis. O objetivo deste tipo de reparo é encapsular e vedar a região do dano na camada externa para evitar a entrada de água do mar contendo oxigênio. O sistema de reparo é modular, ajustável de acordo com o comprimento da região danificada, composto de duas meias calha que são fixadas entre si em torno do *riser*, e é preenchido com um líquido de vedação. Este líquido ou gel desloca a água do mar da região do dano e conseqüentemente interrompe a corrosão das armaduras. Após a cura do gel, é formado um sólido elástico permitindo que o *riser* flexível se dobre normalmente. Este método pode ser instalado tanto por veículo operado remotamente (ROV) quanto por mergulhador. Maiores informações sobre este produto podem ser encontradas em Flexlife (2017a).

O *Armawrap*, mostrado na Figura 13, é um produto comercial da empresa NICC, o qual possui o objetivo de encapsular e vedar a região danificada da camada externa para evitar a

entrada de água do mar contendo oxigênio. Este método é aplicável a danos localizados acima da água ou na *splash zone*. É construído a partir de um elastômero, e é acoplado e fixado em torno do *riser* flexível. Um gel e um inibidor de corrosão são aplicados no seu interior para realizar a vedação da região do dano. A sua instalação pode ser realizada tanto por mergulhador quanto acesso por cabo, dependendo da localização do dano. Maiores informações sobre este produto podem ser encontradas em NICC Systems (2017).

Figura 12 – Reparo de um dano com a utilização do produto *Armadillo*: a) Dano na camada externa; b) Produto *Armadillo* instalado na região do dano; c) Injeção do líquido de vedação



Fonte: FLEXLIFE, 2017a

Figura 13 – Produto *Armawrap* instalado em um *riser*



Fonte: NICC SYSTEMS, 2017

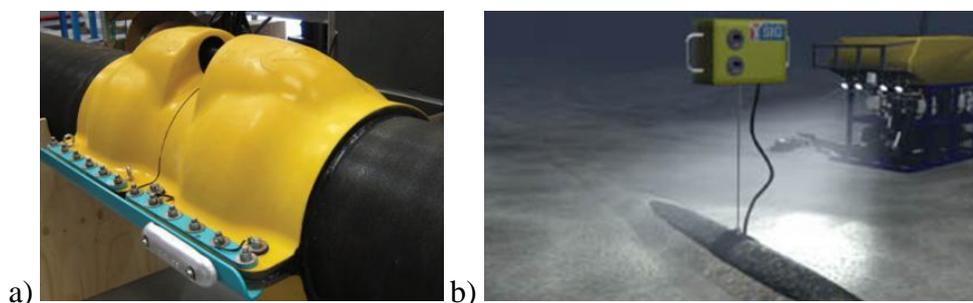
Com a finalidade de verificar a integridade do reparo, é realizado nas braçadeiras descritas anteriormente um teste de volume ou de pressão da região anular do *riser* com o intuito de verificar a sua eficiência em relação à vedação sob pressão. Maiores detalhes sobre os testes de pressão da região anular e volume da região anular podem ser encontrados em Fergestad e Løtveit (2017).

### 3.5 Métodos de Proteção de Sistemas de Monitoramento em *Risers* Rígidos

Devido à bibliografia sobre este assunto ser bastante restrita, pesquisaram-se sistemas de monitoramento comerciais de aplicação submarina, em especial por ondas guiadas, para a detecção de redução de espessura em *risers* rígidos. Além de sistemas que são permanentemente instalados, apresentam-se a seguir alguns sistemas removíveis.

O g-PIMS, mostrado na Figura 14, é um conjunto de transdutores de ondas guiadas da empresa SIG instalada permanentemente em oleodutos e gasodutos para monitorar a corrosão, erosão, e perda generalizada de espessura. A unidade é instalada no *riser* em locais críticos ou de difícil acesso antes mesmo da instalação submarina do próprio *riser*. Dependendo da localização e da profundidade, uma série de interfaces para a obtenção dos resultados está disponível, como conexões que permitem à interface a um ROV e umbilical que liga o sistema a plataforma. A unidade é encapsulada através de uma robusta proteção de fibra de vidro que fornece proteção contra impacto de objetos e proteção ambiental por um longo período de tempo. O interior da proteção bipartida é preenchido com resina de poliuretano NP5070 com a função de vedar o colar de sensores, e as duas meias calha são fixadas entre si em torno do *riser* rígido a partir de barras laterais, flanges, parafusos, e porcas. Este sistema é desenvolvido para monitorar *risers* em profundidades de até 2000 m (SIG, 2017).

Figura 14 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas da empresa SIG: a) Sistema de monitoramento g-PIMS instalada em *riser* rígido; b) Interface de uma unidade g-PIMS com um ROV a partir de conexões em águas profundas



Fonte: SIG, 2017

Na Figura 15 é mostrada uma inspeção por ondas guiadas através de um sistema de monitoramento instalado permanentemente (PIMS) da empresa GUL. Este tipo de sistema de monitoramento é aplicado em *risers* normalmente através de colar de transdutores removíveis, no entanto, os PIMS oferecem uma solução para áreas de difíceis acessos e ambientes hostis.

Nos PIMS, os colares de transdutores são acoplados nos *risers* e vedados do ambiente externo, neste caso a água do mar, através de um invólucro de poliuretano, e, além disso, um umbilical conectado ao PIMS fornece os dados da inspeção para um local de fácil acesso. Como vantagens desta tecnologia, pode-se citar: colares com robusta proteção, inspeção remota de áreas inacessíveis do *riser*, inspeções rápidas e de longo alcance, eficiente inspeção em *risers* rígidos com fina camada de revestimento (STRUCTURAL INTEGRITY, 2017).

Figura 15 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas da empresa GUL instalado em um *riser* rígido



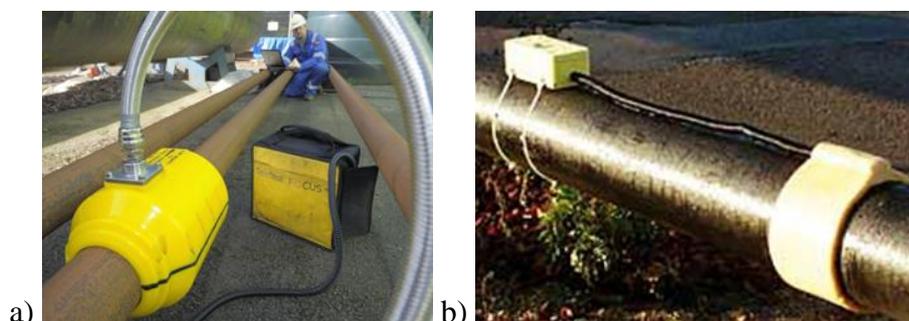
Fonte: STRUCTURAL INTEGRITY, 2017

Na Figura 16 são apresentados dois conceitos do sistema de monitoramento por ondas guiadas chamado de *Teletest Permamount* desenvolvido pela empresa Plant Integrity em parceria com a TWI. Este sistema consiste em um colar de transdutores acoplado diretamente na superfície do *riser*, e destinado ao monitoramento da corrosão de *risers* rígidos em ambientes submarinos, hostis, locais com pouca segurança, ou de difícil acesso. O invólucro foi projetado de acordo com especificações submarinas, para que, uma vez instalado, permaneça inalterado durante anos, seja qual forem as condições do ambiente em que se encontra. O invólucro atende a classificação IP68, no qual trata-se de uma norma de proteção contra o ingresso de água, estando o sistema imerso de forma contínua. A coleta dos dados é através de uma caixa de comunicação externa, podendo ser analisada por um operador ou remotamente. Possui um compacto e robusto invólucro de proteção, e pode operar em uma faixa de temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  (TWI, 2017a; TWI, 2017b).

Na Figura 17 (a) é mostrado um PIMS da empresa GUL que foi instalado em um *riser* submerso e posteriormente trazido a plataforma através de cabos. Este sistema trata-se de um colar de sensores acoplado no *riser*, o qual possui uma estrutura de proteção também montada no *riser*. Já na Figura 17 (b), é mostrado um sistema de monitoramento, onde os transdutores

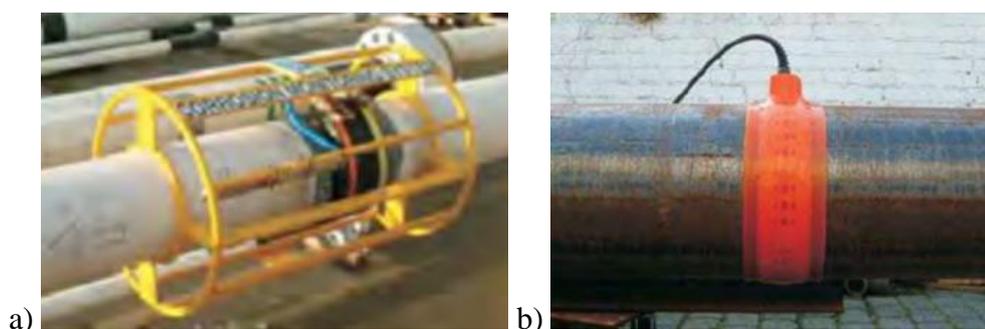
são encapsulados através de um colar de poliuretano com a função de protegê-los, permitindo que os resultados sejam obtidos em ambientes submarinos (STEPINSKI, 2011).

Figura 16 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas *Teletest Permamount* instalado em um *riser* rígido: a) Conceito 1; b) Conceito 2



Fonte: a) TWI, 2017a; b) TWI, 2017b

Figura 17 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas da empresa GUL instalado em um *riser* rígido: a) Estrutura de proteção do sistema de monitoramento; b) Transdutores do sistema de monitoramento encapsulados com um colar de poliuretano

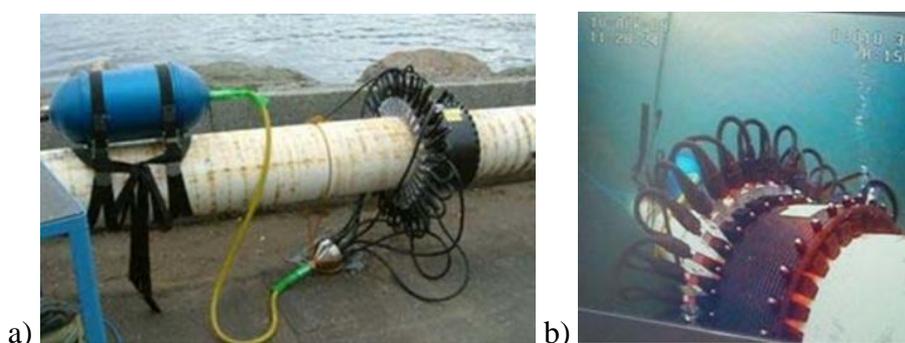


Fonte: STEPINSKI, 2011

Na Figura 18 (a) é mostrado um PIMS denominado *RiserTest*, desenvolvido para aplicações submarinas em *risers* por um grupo de empresas e coordenado pela empresa TWI. Este sistema não possui um invólucro para a proteção, desta maneira, somente os componentes eletrônicos são montados dentro de um invólucro resistente a pressão. Este invólucro é basicamente um cilindro com fechamento nas extremidades, no qual são vedados com anéis O'Ring. Este invólucro possui penetradores nas suas extremidades para a entrada de um umbilical de dados que é conduzido até o colar de sensores. O invólucro foi projetado para profundidades de até 300 m e é montado no *riser* ao lado do colar de sensores. O transdutor ultrassônico consiste em um colar, no qual os transdutores, os suportes dos transdutores, e os cabos de interligação foram todos vedados com anéis O'Ring ou com

conectores desenvolvidos para aplicações submarinas. Durante os ensaios submarinos o tubo foi monitorado por um pequeno ROV da classe observação com câmera de vídeo, conforme mostrado na Figura 18 (b) (MUDGE, 2008).

Figura 18 – Sistema de monitoramento por ondas guiadas *RiserTest* instalado em um *riser* rígido: a) Protótipo do sistema de monitoramento montado em um *riser* rígido com revestimento; b) Imagem de vídeo subaquática do sistema de monitoramento *RiserTest* em operação



Fonte: MUDGE, 2008

### 3.6 Métodos de Operações Submarinas em *Risers*

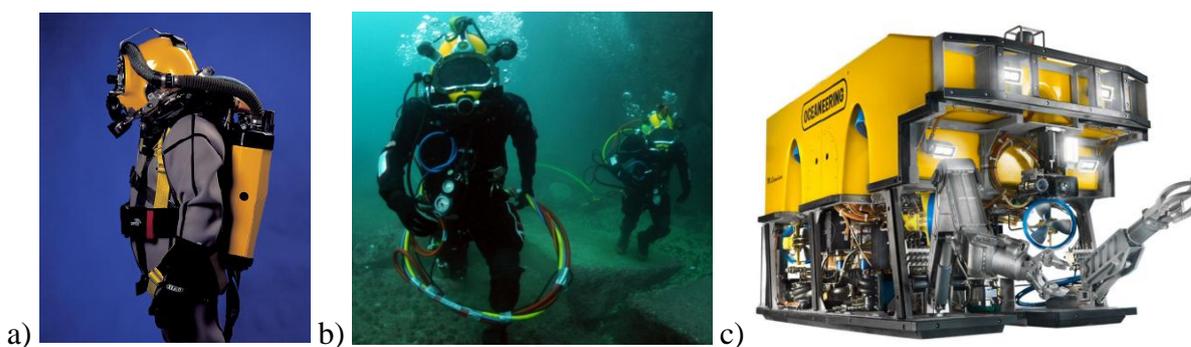
A descoberta de óleo e gás em lâminas de água cada vez mais profundas gerou a necessidade de métodos alternativos de intervenção submarina que independessem da presença humana, limitada a profundidade de 300 m (mergulho saturado). Assim, os ROVs, desenvolvidos originalmente para aplicação militar, encontraram uma grande aplicação na área *offshore* da indústria do petróleo (AWAD; CORDEIRO; RODRIGUES, 1989).

A exploração em águas rasas utiliza mergulhadores de profundidade para montar e operar os equipamentos subaquáticos através de equipamentos como o *Rebreather*, mostrado na Figura 19 (a), no qual o próprio equipamento administra a respiração através de um sistema que processa o gás exalado pelo mergulhador (OLIVER, 2005). Este sistema também pode ser administrado na superfície, com uma equipe de apoio injetando os gases necessários por meio de uma tubulação até o mergulhador, mostrado na Figura 19 (b) (SOUZA, 2014).

Atualmente, as atividades e operações como o monitoramento e reparo nos equipamentos em águas profundas e ultraprofundas são somente possíveis por veículos submarinos não tripulados (UUVs) (SOUZA, 2014). A categoria de UUVs pode ser desmembrada por dois grupos de robôs: veículos submarinos autônomos (AUVs) e ROVs, que diferem pelo seu modelo, projeto mecânico, e operações capazes de executarem. Os ROVs são veículos subaquáticos operados remotamente a partir da superfície, e possuem um componente

essencial, que é um cabo umbilical que transmite sinais de vídeos e energia do veículo até a superfície. Há três principais classes de ROVs presentes no mercado: observação, trabalhador, e especial (CHRIST, 2007). Os ROVs da classe trabalhador, mostrado na Figura 19 (c), são os utilizados para a instalação de braçadeiras de reparo em *risers*.

Figura 19 – a) Equipamento *Rebreather*; b) Mergulhadores com umbilical de suporte de vida; c) ROV classe trabalhador



Fonte: a) JOHN CLARKE, 2017; b) BOTTOM TIMER, 2017; c) LERUS TRAINING, 2017

A bibliografia sobre métodos de operações submarinas em *risers* é muito restrita, desta forma, pesquisaram-se alguns métodos comerciais, no qual serão apresentados a seguir, com o intuito de auxiliar no desenvolvimento da ferramenta proposta nesta dissertação.

Apresenta-se na Figura 20, uma ferramenta hidráulica de aplicação submarina para instalação de braçadeiras do tipo macia de reparação descrita no item 3.4, e mostrada na Figura 7. Neste caso, o ROV da classe trabalhador posiciona a braçadeira na área danificada e fecha a ferramenta hidráulicamente, acoplando a mesma ao redor do *riser*. Em seguida são montados os parafusos e aplicado o torque especificado (FERGESTAD; LØTVEIT, 2017).

Figura 20 – Ferramenta de instalação de braçadeira macia de reparo por ROV



Fonte: 4SUBSEA, 2017

Já na Figura 21, é mostrado a instalação do *Armadillo*, descrito no item 3.4 e mostrado na Figura 12, em um reparo de dano na camada externa. Neste caso, a instalação é realizada por mergulhadores e auxiliada por ROV da classe observador (FLEXLIFE, 2017b).

Figura 21 – Instalação do produto *Armadillo* da empresa Flexlife em um riser flexível danificado



Fonte: FLEXLIFE, 2017b

Na Figura 22 é ilustrado um sistema de instalação de braçadeira de reparo desenvolvido pela empresa SUBSEA para linhas de transporte de gás. Trata-se de uma ferramenta hidráulica de grandes dimensões para aplicação em *risers* rígidos. O sistema é lançado da embarcação até o fundo do mar, onde está localizado o *riser*, com o auxílio de cabos, e o acoplamento e aperto da braçadeira é executado remotamente por ROV (SUBSEA, 2017).

Figura 22 – Ferramenta hidráulica de instalação de braçadeiras de reparo em linhas de transporte de gás

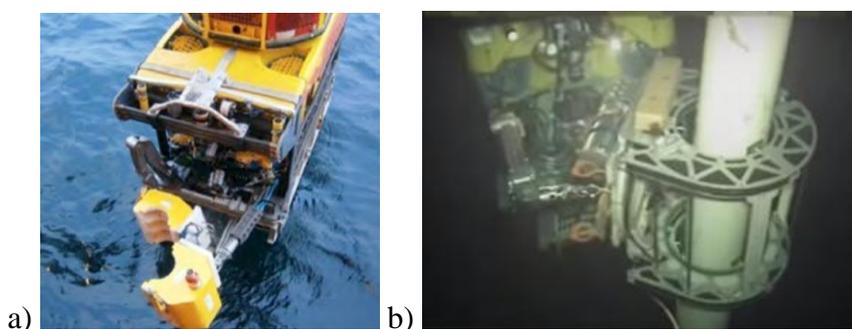


Fonte: SUBSEA, 2017

Na Figura 23 (a) é apresentado o produto *FlexGuard* da empresa Flexlife o qual é montado no *riser* flexível através de um ROV, e possui a função de monitorar remotamente as condições da região anular a partir da detecção de inundação desta região (FLEXLIFE, 2017c). Na Figura 23 (b) é mostrado o produto *UT Scanning* da empresa Flexlife, o qual é

uma tecnologia ultrassônica capaz de verificar a presença de umidade na camada de isolamento de *risers* flexíveis, e é acoplado no *riser* através de um ROV (FLEXLIFE, 2017d).

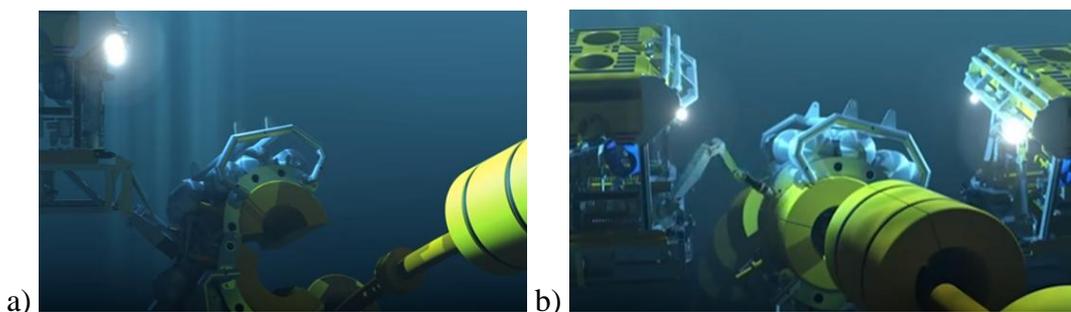
Figura 23 – a) Produto FlexGuard para monitoramento de *risers* da empresa Flexlife; b) Produto *UT scanning* para monitoramento de *risers* da empresa Flexlife



Fonte: FLEXLIFE, 2017c

Na Figura 24 é mostrada uma atividade de manutenção de módulos de fluutuabilidade em *risers* flexíveis através de ferramentas operadas por ROV. Tanto o ROV quanto as ferramentas utilizadas na operação de instalação da braçadeira interna e do flutuador são lançados da embarcação até o local de instalação através de cabo e gaiola. Após a inspeção do *riser* e dos módulos de fluutuabilidade, é realizado a instalação do flutuador, no qual envolve várias atividades executadas pelo ROV, como a troca de ferramentas para instalação da braçadeira interna e posterior instalação do flutuador (SUBC, 2017).

Figura 24 – Manutenção de flutuadores em *risers* flexíveis: a) Acoplamento do flutuador no *riser*; b) Aperto dos parafusos do flutuador



Fonte: SUBC, 2017

Na Figura 25 é apresentada uma ferramenta submarina de instalação de braçadeira de reparo em *risers* rígidos controlada remotamente para aplicações em profundidades de até

3000 m. É uma ferramenta de grandes dimensões, a qual é lançada da embarcação até o local do reparo através de cabo. O acoplamento da braçadeira no *riser* é realizado por sistema hidráulico e o aperto dos parafusos é efetuado por ROV (TDW, 2017).

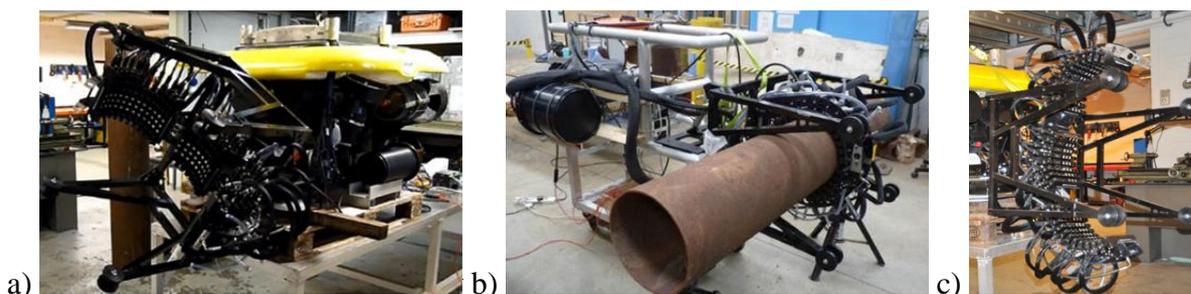
Figura 25 – Ferramenta submarina de instalação de braçadeira de reparo em *risers* rígidos controlada remotamente: a) Acoplamento da braçadeira no *riser*; b) Aperto dos parafusos da braçadeira executada por ROV; c) Instalação da braçadeira concluída e desacoplamento da ferramenta



Fonte: TDW, 2017

Na Figura 26 é mostrada uma ferramenta para manipular, acoplar, e fixar um colar de sensores de ondas guiadas em um *riser* para o monitoramento de corrosão, no qual foi desenvolvida para aplicações submarinas com interface para ser operado por ROV, e possui os seguintes subsistemas: colar de sensores; sistema hidráulico com bomba hidráulica própria, e válvulas que permitem o manipulador rotacionar, fechar, travar, e inflar o colar; caixa eletrônica contendo todos os elementos eletrônicos necessários para realizar a inspeção, controles, e um computador com os softwares necessários (LAGE *et al.*, 2016).

Figura 26 – Ferramenta submarina de instalação de colar de sensores em *risers* rígidos controlada remotamente: a) Ferramenta com o colar de sensores instalada em um ROV simulando movimentos de rotação e inclinação; b) Acoplamento e fixação do colar de sensores no *riser* executada por ROV; c) Colar de sensores instalado na ferramenta em posição de acoplamento



Fonte: LAGE *et al.*, 2016

## 4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO E DA FERRAMENTA

A partir da revisão bibliográfica, e da análise das necessidades e definição dos requisitos, desenvolveu-se, de forma simultânea, algumas concepções do método e da ferramenta no qual foram posteriormente avaliadas com o propósito de obter uma solução viável. Em qualquer fase do desenvolvimento, voltou-se a fase anterior ou ao início caso a concepção se tornasse inviável ou surgissem novas e melhores ideias durante a execução do projeto.

Para auxiliar no desenvolvimento, levou-se em consideração alguns princípios de projeto descritos em Shigley, Mischke e Budynas (2005) e Back *et al.* (2008) com o intuito de reduzir a possibilidade de alterações pós-construção do protótipo. Desta forma, para o desenvolvimento, considerou-se o seguinte: uso de componentes padronizados; projeto simplificado com menor número de componentes possíveis sem prejudicar o desempenho e a função do método e da ferramenta; soluções simples e fáceis de construir; e, sempre que possível, grandes tolerâncias na especificação dos componentes manufaturados. Assim, obtendo, menor número de operações de fabricação, maior confiabilidade no funcionamento, e, conseqüentemente, menos custos de fabricação.

### 4.1 Análise das Necessidades e Definição dos Requisitos

O método e a ferramenta serão empregados em *risers* tanto flexíveis quanto rígidos com a vantagem de monitoramento à distância, menor tempo de trabalho, redução dos riscos durante a operação, e aumento do limite de profundidade de trabalho, e deverão possuir as seguintes características:

- Permitir o acoplamento do método e da ferramenta no *riser* sem comprometer a integridade do mesmo;
- Permitir a fixação do método em torno do *riser* de forma automatizada;
- Permitir o desacoplamento da ferramenta após a fixação do método no *riser*;
- Permitir a operação por meio de mergulhador em profundidades de até 300 m ou ROV em maiores profundidades;
- Ser de construção simples, com uso de componentes padronizados e encontrados no mercado.

Em relação aos requisitos, definiram-se alguns parâmetros iniciais a serem observados no desenvolvimento. O método e a ferramenta deverão ser desenvolvidos considerando as suas aplicações em um duto de 6 pol. de diâmetro. Além disso, o método deverá ser desenvolvido considerando que será utilizado tanto no reparo quanto na proteção do sistema de monitoramento. Quanto ao reparo, definiu-se que o método deverá possuir um comprimento máximo de 1000 mm, e a espessura da camada de resina na região do dano deverá ser de 10 mm. E quanto ao sistema de monitoramento, o mesmo método deverá servir de invólucro protetivo para um colar de sensores por ondas guiadas bipartido com 195 mm de largura e 238 mm de diâmetro. O método deverá ser mais compacto possível, e, além das dimensões e geometrias do método, para o desenvolvimento da ferramenta, deverá ser levado em consideração que todos os componentes e estruturas necessários para a realização da operação estarão localizados na sua parte interna.

## **4.2 Geração de Soluções e Escolha da Melhor Concepção**

### **4.2.1 Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento**

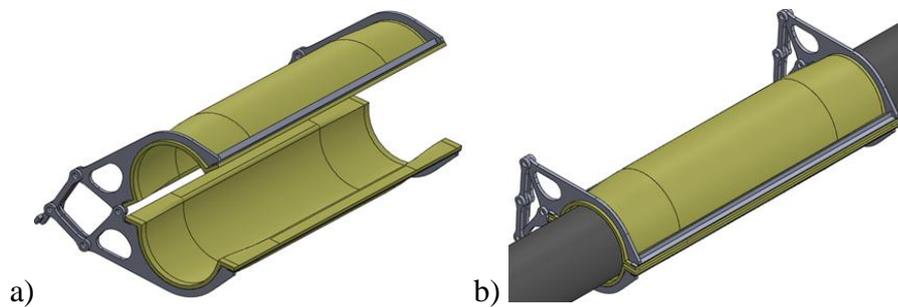
Com o intuito de desenvolver um método para ser usada tanto em reparo de danos na camada externa polimérica de *risers* flexíveis quanto na proteção de sistemas de monitoramento de *risers* rígidos, inicialmente, fez-se uma análise dos métodos apresentados na revisão bibliográfica.

Em relação aos métodos de reparo, destaca-se o *Armadillo*, produto comercial da Flexlife, pelas características descritas no item 3.4, o qual é mostrado na Figura 12. Já em relação aos métodos de proteção de sistema de monitoramento, apesar de ser montado no *riser* antes mesmo da sua própria instalação submarina, destaca-se o sistema g-PIMS da empresa SIG pelas características descritas no item 3.5, o qual é mostrado na Figura 14. Também destaca-se o método de proteção utilizado no sistema de monitoramento denominado *Teletest Permamount* desenvolvido pela empresa Plant Integrity, pelas características descritas no item 3.5, o qual é mostrado na Figura 16.

No desenvolvimento do método geraram-se algumas concepções, primeiramente concentrando-se no reparo de *risers* flexíveis, e, posteriormente, na possibilidade de aplicar o mesmo método na proteção de sistemas de monitoramento em *risers* rígidos.

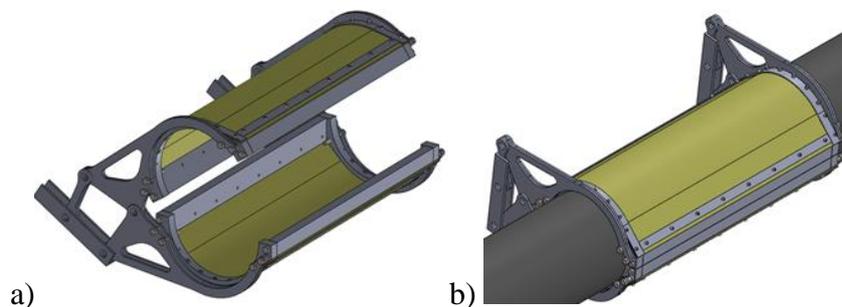
Na Figura 27 é apresentada uma alternativa para o método, composto por estrutura metálica, e invólucro que poderia ser construído a partir de material polimérico ou fibra de vidro. Já na Figura 28, é apresentada uma alternativa similar, porém o invólucro seria uma lona fixada na estrutura metálica. Nas duas alternativas, a fixação seria por pressão a partir do mecanismo de fechamento, o qual poderia ser acionado hidráulicamente, porém, constatou-se que o mecanismo poderia danificar outros *risers* vizinhos em caso de colisão devido a sua exposição. Outra dificuldade encontrada nestas alternativas está relacionada à fixação do colar de sensores, o qual é bipartido, e estaria fixado no invólucro que suportaria a força magnética dos sensores no momento de acoplamento no *riser* rígido.

Figura 27 – Concepção 1 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no *riser*



Fonte: Próprio Autor

Figura 28 – Concepção 2 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no *riser*

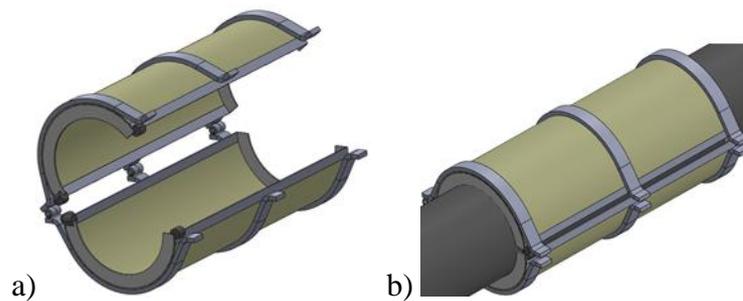


Fonte: Próprio Autor

Na alternativa apresentada na Figura 29, foi desenvolvida uma concepção constituída de estrutura metálica, articulação por meio de dobradiças, e lona vulcanizada na estrutura, porém, logo no início do desenvolvimento descartou-se esta ideia devido à dificuldade de desenvolver fornecedores que realizassem a operação de vulcanização. E na Figura 30, é

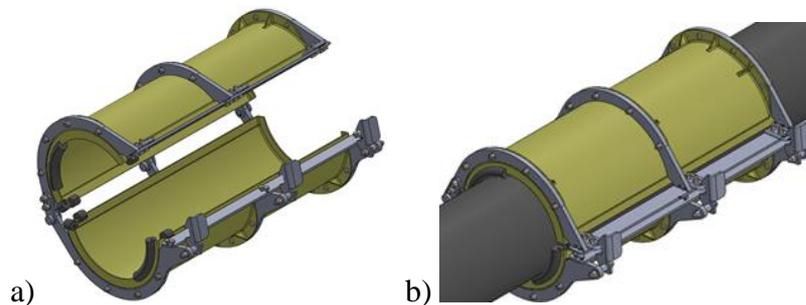
apresentada uma evolução da alternativa anterior, constituída de estrutura metálica, articulação por meio de dobradiças, flanges para permitir o acoplamento automatizado a partir de ventosas, ganchos com travamento a partir de molas de torção, e invólucro em fibra de vidro, porém constataram-se dificuldades tanto na montagem da borracha de vedação quanto na eficiência da vedação da resina líquida encontrada no seu interior. Também verificou-se dificuldades em relação a fixação do colar de sensores que estaria fixado no invólucro e suportaria a força magnética dos sensores no momento de acoplamento no *riser* rígido.

Figura 29 – Concepção 3 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no *riser*



Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – Concepção 4 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no *riser*

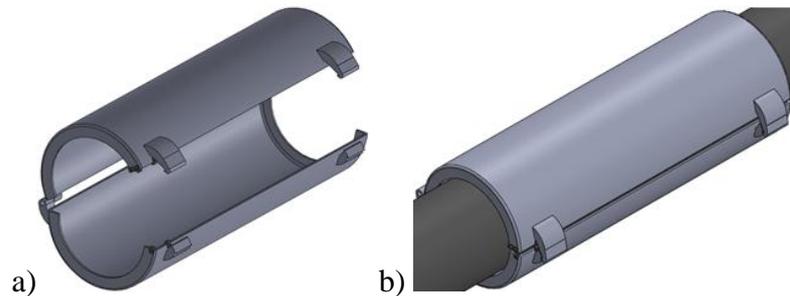


Fonte: Próprio Autor

Procurando uma alternativa mais simples e com menor número de componentes, desenvolveu-se a concepção apresentada na Figura 31, no qual é totalmente em fibra de vidro, possível de ser manufatura e com fabricantes dispostos em fabricá-la, porém verificou-se os mesmos problemas da concepção anterior em relação à vedação e fixação do colar de sensores. Além disso, o sistema de travamento, por ser rígido, teria que deformar elasticamente para a realização do fechamento em torno do *riser*.

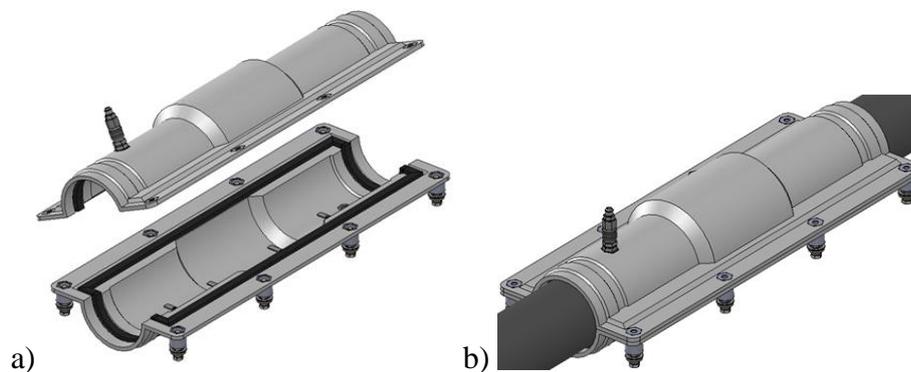
A solução escolhida é apresentada na Figura 32, composto por duas meias calha construído em material polimérico, no qual são fixadas em torno do *riser* através de parafusos, entrada para injeção de resina, borracha de vedação, e estrutura metálica embebida no polímero. Além disso, possui um diâmetro maior na região central com o objetivo de permitir a montagem do colar de sensores que será suportado a partir da estrutura metálica. Desenvolveu-se esta concepção a partir das considerações descritas em Rotodesign (2017), o qual permitiu a sua fabricação a partir do processo de rotomoldagem, obtendo, assim, uma concepção possível de ser manufaturada e fornecedores dispostos a fabricá-la.

Figura 31 – Concepção 5 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no *riser*



Fonte: Próprio Autor

Figura 32 – Concepção 6 para o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Método aberto em posição de acoplamento; b) Método acoplado no *riser*



Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.2 Ferramenta para Aplicação Submarina de *Clamps* de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento

Inicialmente fez-se uma análise dos métodos apresentados na revisão bibliográfica referente a métodos de operações submarinas em *risers*. Dentre os métodos analisados,

destaca-se a ferramenta hidráulica de aplicação submarina para instalação de braçadeiras de reparo, mostrada na Figura 20, pelas suas características descritas no item 3.6. Destaca-se também, o produto *UT Scanning* da empresa Flexlife, mostrado na Figura 23 (b), por ser operado através de ROV e pela sua estrutura que permite o acoplamento em um *riser* flexível. E na Figura 25, destaca-se uma ferramenta submarina de instalação de braçadeira de reparo em *riser* rígido controlado remotamente, pela configuração da sua estrutura e por possuir sistema hidráulico, no qual permite o acoplamento da braçadeira no *riser*.

Do mesmo modo que o método, no desenvolvimento da ferramenta, geraram-se algumas concepções, primeiramente concentrando-se na estrutura externa, e posteriormente, na estrutura interna de acoplamento e fixação do método.

#### 4.2.2.1 Estrutura Externa

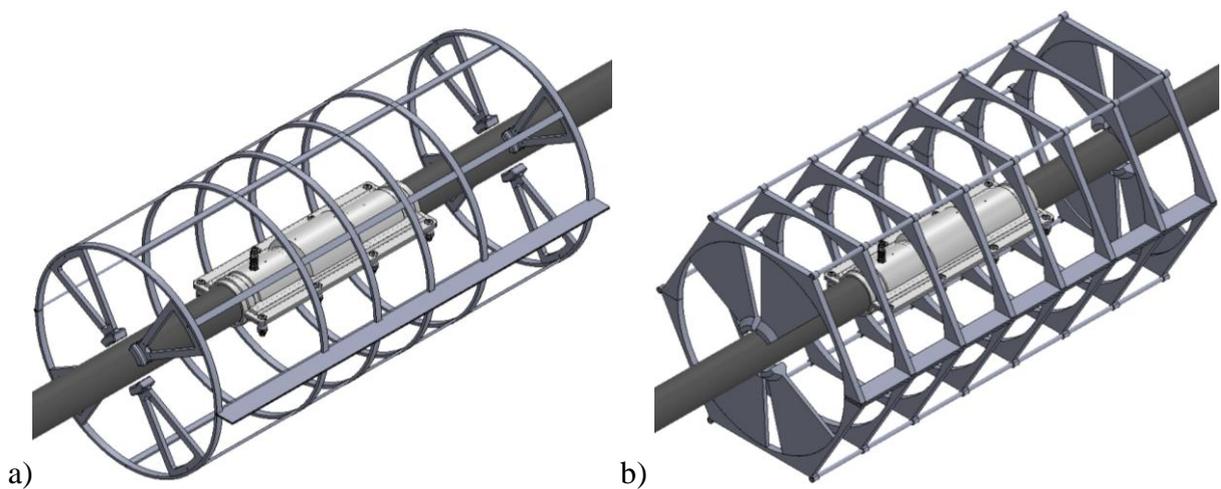
A seguir apresenta-se uma breve descrição sobre a evolução do desenvolvimento da estrutura externa da ferramenta. Na Figura 33 (a) é apresentada uma alternativa para a estrutura externa da ferramenta. Nesta primeira concepção, preocupou-se em desenvolver uma estrutura metálica de configuração simples e fácil de manufaturar a partir de perfis comerciais. A estrutura é bipartida, unida através de articulações, e é acoplado no *riser* a partir de flanges laterais que possuem a função de garantir a concentricidade do método em relação ao *riser*. Além disso, possui a função estrutural de suportar e acondicionar os demais subsistemas da ferramenta, porém, no início do desenvolvimento, constatou-se que a forma circular dificultaria o acondicionamento dos demais componentes da ferramenta.

Na Figura 33 (b) é apresentada uma alternativa para o problema de acondicionamento dos componentes da ferramenta através de uma estrutura em formato hexagonal, facilitando a fixação de qualquer tipo de componente na sua parte externa, porém, na sua parte interna, manteve-se o formato circular, o que seria facilmente resolvido alterando a geometria do componente para formato hexagonal, no entanto, verificou-se que este componente, que seria fabricado pelo processo de corte *laser*, poderia ser substituído por algum perfil comercial, facilitando a fabricação da estrutura.

Na alternativa apresentada na Figura 34 (a), foi desenvolvida uma concepção através de uma estrutura modular em formato hexagonal, construído a partir de tubos com flanges soldados nas suas extremidades, entretanto, logo verificou-se um grande aumento no número de componentes, e conseqüentemente um aumento no tempo de montagem.

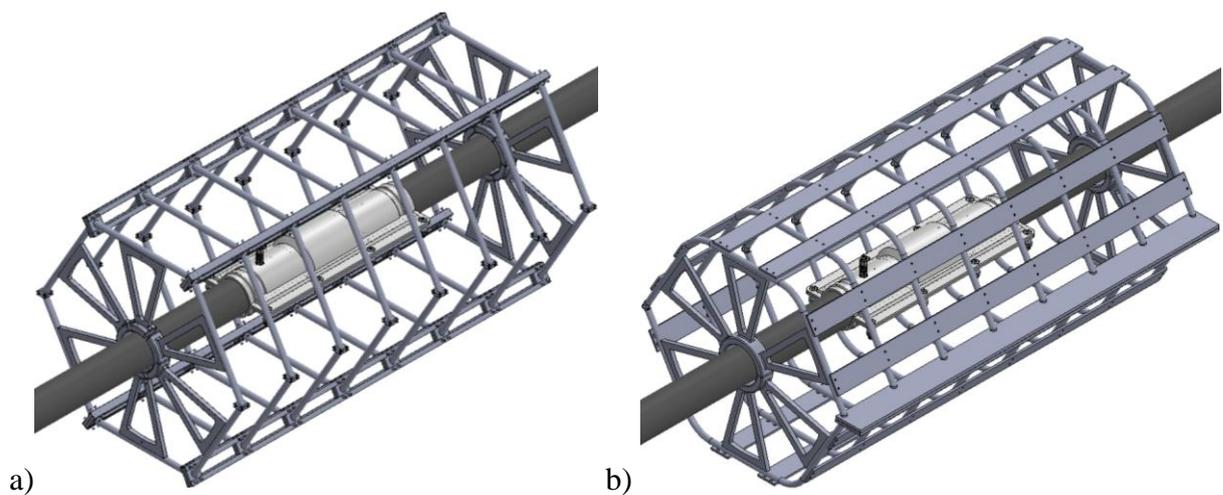
Na Figura 34 (b) é apresentada a solução escolhida, no qual manteve-se o formato hexagonal e a construção a partir de tubos, porém, alterou-se a configuração de módulos tubulares para tubos inteiros, diminuindo o número de componentes e facilitando a montagem, além disso, acrescentou-se chapas transversais fixadas a partir de braçadeiras, melhorando o aspecto estrutural e facilitando o acondicionamento dos demais subsistemas da ferramenta.

Figura 33 – a) Concepção 1 para a estrutura externa da ferramenta; b) Concepção 2 para a estrutura externa da ferramenta



Fonte: Próprio Autor

Figura 34 – a) Concepção 3 para a estrutura externa da ferramenta; b) Concepção 4 para a estrutura externa da ferramenta

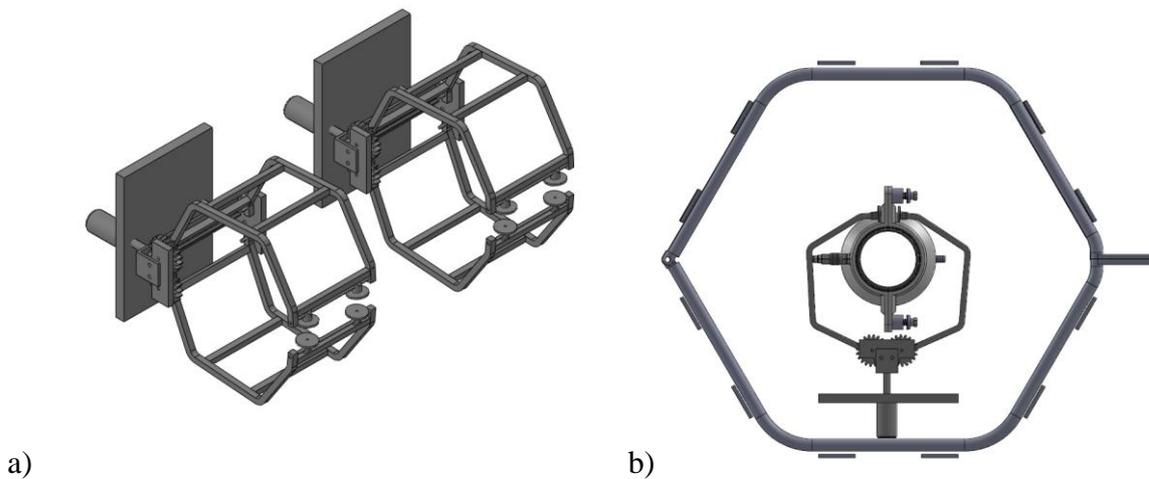


Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.2.2 Estrutura Interna

Na Figura 35 é apresentada uma alternativa para a estrutura interna, constituída por sistema hidráulico para posicionar o método próximo do *riser*, e mecanismos compostos por eixos e engrenagens acionado através de motor com a função de realizar a operação de abertura e fechamento das garras, além disso, as garras possuem um sistema de ventosas nas suas extremidades com o intuito de suportar o método antes de seu acoplamento, no entanto, constatou-se que poderia ser desenvolvido um mecanismo mais simples e com menor número de componentes para a realização da mesma operação.

Figura 35 – Concepção 1 para a estrutura interna da ferramenta: a) Estrutura interna; b) Vista simplificada da interface entre as estruturas interna e externa



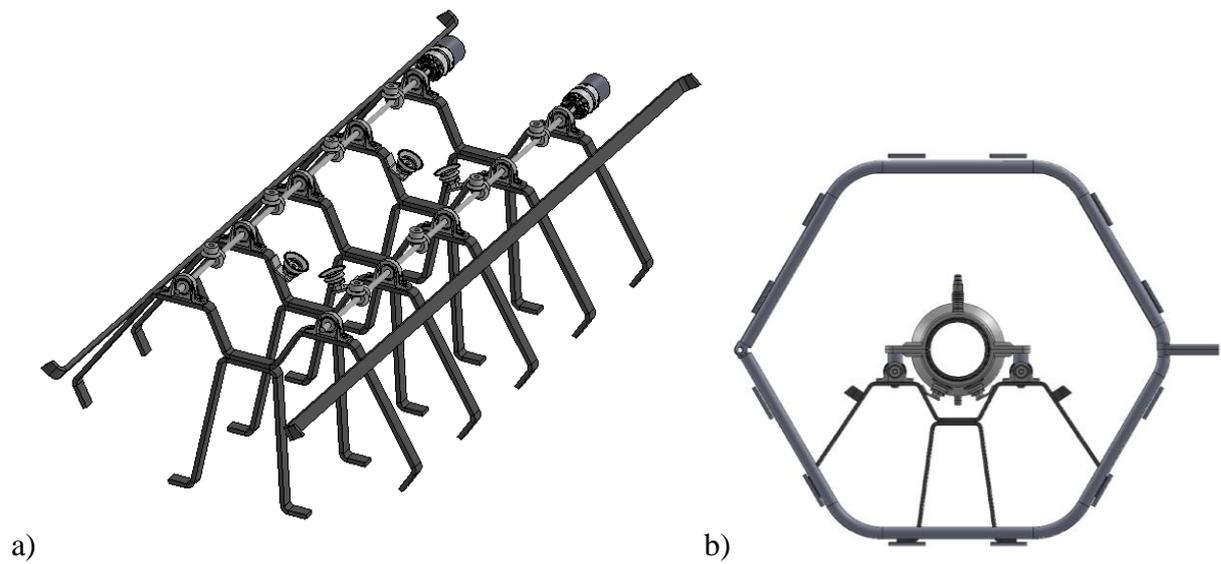
Fonte: Próprio Autor

Procurando uma solução mais simples, desenvolveu-se a alternativa apresentada na Figura 36, constituída de um mecanismo formado por motor, eixo, mancais e conjunto de coroa e pinhão, além do sistema de ventosas para suportar o método. Este mecanismo é montado em uma estrutura de sustentação, no qual é acondicionada na estrutura externa. Esta alternativa eliminaria o sistema hidráulico e o mecanismo de abertura e fechamento das garras da alternativa anterior, porém para evitar possíveis problemas de funcionamento, verificou-se que a estrutura interna poderia ser ainda mais simplificada.

Desta forma, é apresentada na Figura 37 a concepção escolhida constituída de dois conjuntos montados na estrutura externa bipartida. Um dos conjuntos é constituído por uma estrutura de fixação no qual é montado um conjunto composto por ferramenta de aperto e

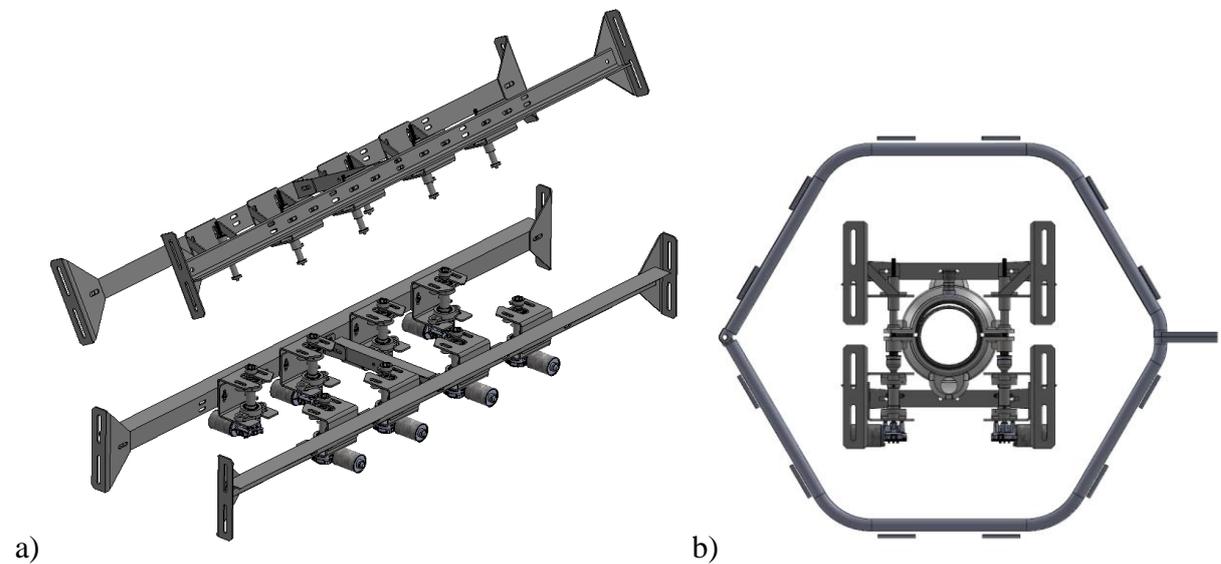
motor, e terá a função de realizar o aperto dos parafusos do método após o acoplamento em torno do *riser*, além de suportar meia calha através de fixadores magnéticos. Já o outro conjunto é constituído por suportes com fixadores magnéticos, e terá a função de suportar a outra meia calha.

Figura 36 – Concepção 2 para a estrutura interna da ferramenta: a) Estrutura interna; b) Vista simplificada da interface entre as estruturas interna e externa



Fonte: Próprio Autor

Figura 37 – Concepção 3 para a estrutura interna da ferramenta: a) Estrutura interna; b) Vista simplificada da interface entre as estruturas interna e externa



Fonte: Próprio Autor

### 4.3 Projeto do Método e da Ferramenta

O projeto foi desenvolvido utilizando o *software* de projeto assistido por computador (CAD) *SolidWorks* 2013. A partir da análise das necessidades e definição dos requisitos, descritos no item 4.1, e da concepção escolhida, chegou-se a uma configuração, no qual definiu-se as dimensões principais, localização, e posição dos componentes, e, posteriormente, os componentes padronizados e peças a serem fabricadas.

#### 4.3.1 Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento

A seguir apresenta-se o método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento desenvolvido, ou simplesmente *clamp*, o qual quando aplicado em reparo serve como recipiente para injeção de resina pura ou misturas contendo produtos anticorrosivos. Embora o objetivo desta dissertação não seja o estudo da resina ou mistura mais adequada para esta aplicação, salienta-se que o emprego destas substâncias tem como objetivo a restauração da estanqueidade da camada externa danificada, e o controle da corrosão das armaduras de tração e pressão de *risers* flexíveis proporcionado pelo ingresso de água do mar na região anular do *riser*. Desta forma, a resina ou mistura deve possuir boa adesão tanto no aço quanto na camada externa polimérica. E quando aplicado na proteção de sistemas de monitoramento, o *clamp* atua como um invólucro protetivo, onde os sensores, cabos, e eletrônicas que constituem o sistema são pré-inseridos no seu interior e embebidos pela resina.

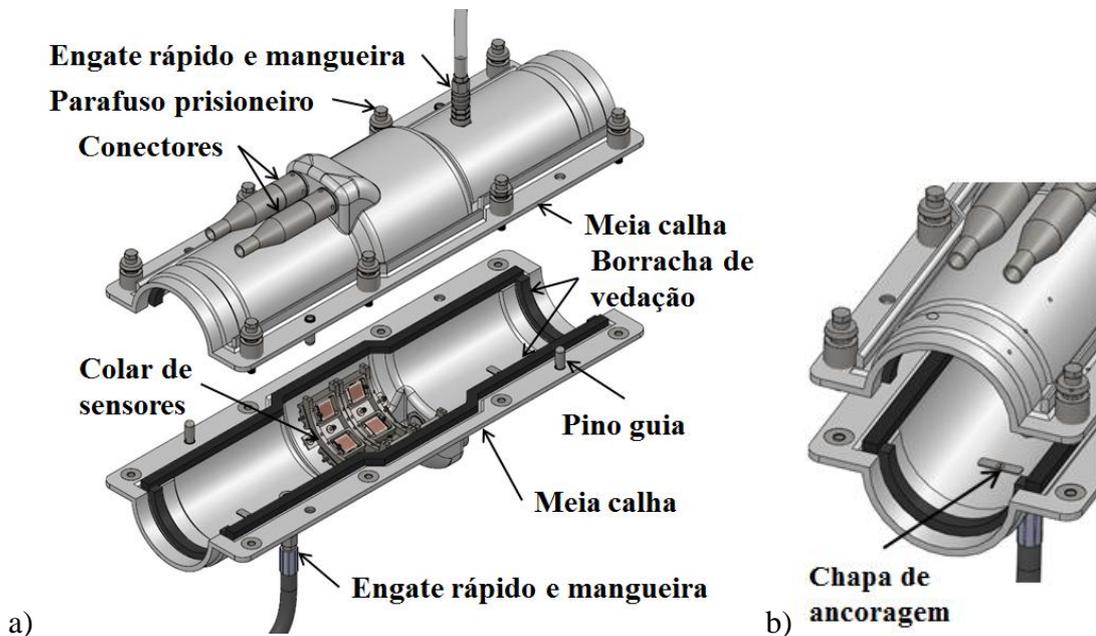
Quanto à região anular, Fergestad e Løtveit (2017), definem como sendo o espaço entre a camada externa e a de estanqueidade, mostrado na Figura 4, onde se encontram a armadura de tração e de pressão. A região anular possui uma pressão interna de 3 bar, o qual é o *set point* da válvula de alívio do anular, logo, a pressão interna no anular será de no máximo 3 bar, caso a válvula estiver funcionando corretamente. Quanto à pressão externa, se o *riser* flexível apresentar dano na camada externa, o anular já estará alagado, assim, a pressão no anular será equivalente à lâmina de água. Após o reparo, a pressão no anular irá se elevar e estabilizar próximo a 3 bar novamente. Desta maneira, o reparo da camada externa polimérica deve ser capaz de manter a pressão interna na região anular de 3 bar, e evitar a entrada de água do mar.

Para o caso real, a resina ou mistura será aplicada sobre o substrato metálico contendo presença de umidade e fase líquida. O aprisionamento de ar ou água poderá resultar em vazios e maus preenchimentos do *clamp*, e, desta forma, comprometendo a homogeneidade das características do revestimento. A presença de porosidade interfere na capacidade do polímero

formar uma barreira física contra o ingresso de água do mar, pois formam locais para a passagem de água através do revestimento. Portanto, a pressão exercida durante a aplicação da resina dentro do *clamp* possuirá efeito na qualidade do reparo. Desta forma, deve-se aplicar resina com o emprego de pressão no preenchimento do *clamp*, e, assim, haverá a movimentação da resina em direção as armaduras de tração. Pressupõe-se que, ao penetrar entre os espaços da armadura de tração, a adesão da resina ou mistura apresentaria influências nas características da qualidade do reparo, pois formaria uma barreira protetiva contra ingresso de água na região danificada.

A partir da Figura 38 e Figura 39 apresenta-se o *clamp*, o qual definiu-se a utilização de material polimérico para sua construção e processo de fabricação por rotomoldagem devido à sua geometria. O *clamp* é bipartido e ao contrário da ferramenta, ficará montado permanentemente em torno do *riser* na região do dano ou na região que se pretende monitorar. Conforme mostrado na Figura 38, o *clamp* é constituído por duas meias calha, parafusos prisioneiros, conjuntos de engates rápidos e mangueiras, pinos guia, borrachas de vedação, chapas de ancoragem para resina, além dos conectores e colar de sensores quando aplicado no sistema de monitoramento.

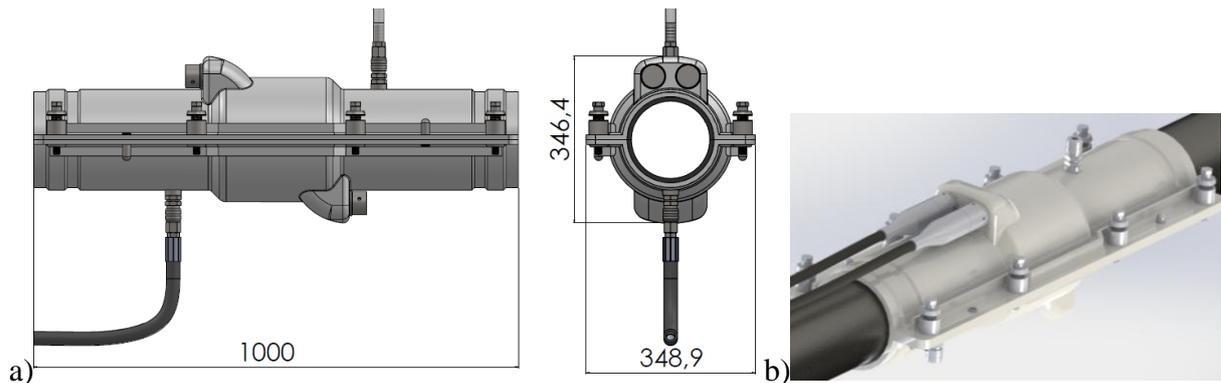
Figura 38 – Método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento: a) Conjunto completo do método; b) Detalhe da chapa de ancoragem



Fonte: Próprio Autor

As borrachas de vedação são de perfil padronizado e coladas no alojamento do *clamp*, e possuem a função de garantir que não ocorra vazamento de resina no momento da injeção no interior do *clamp*. Já as chapas de ancoragem são fabricadas a partir de barras chatas cortadas e usinadas, e são parafusadas no interior do *clamp* através de insertos roscados e parafusos, os quais possuem a função de auxiliar na fixação do *clamp* a partir da cura da resina.

Figura 39 – a) Vistas frontal e lateral com as principais dimensões do *clamp* acoplado no *riser*; b) *Clamp* fixado no *riser*

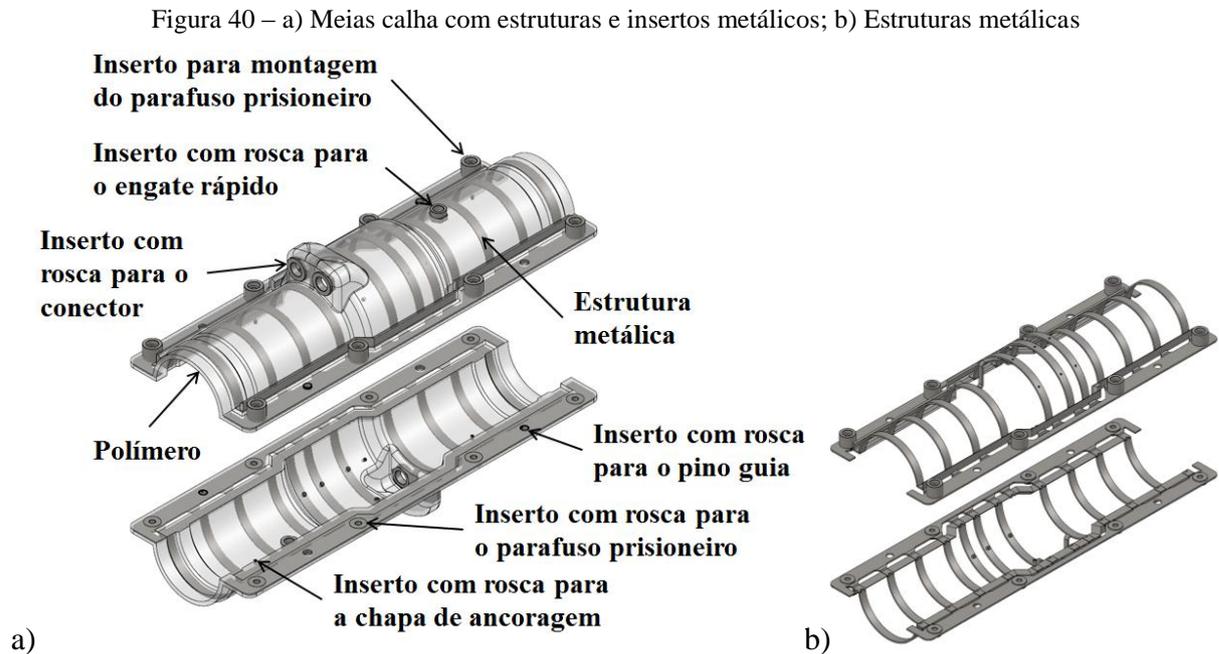


Fonte: Próprio Autor

O processo de fabricação por rotomoldagem permitirá a obtenção do *clamp*, mostrado na Figura 40 (a), com uma estrutura metálica embebida no polímero, no qual servirá como inserto para a fixação do colar de sensores, e garantirá que no sentido longitudinal e radial, a borracha de vedação se deforme no momento do aperto, ao invés do *clamp*. Uma das estruturas metálicas possui insertos para a montagem dos parafusos prisioneiros, enquanto que a outra possui insertos com rosca interna, permitindo fixar as duas meias calha entre si. Além das estruturas metálicas, as meias calha são constituídas por insertos metálicos com roscas internas que permitirão a conexão dos conjuntos de engates rápidos, dos conectores do sistema de monitoramento, e fixação das chapas de ancoragem e dos pinos guia. No projeto foi previsto a possibilidade de obter o *clamp* sem o inserto dos conectores para a aplicação em reparo, ou com os insertos para aplicação na proteção do sistema de monitoramento.

Baseado nos custos para a construção do protótipo definiu-se o aço carbono como material para os componentes manufaturados, os quais receberão pintura como revestimento anticorrosivo. Já os componentes comerciais possuem zincagem como proteção anticorrosiva ou são de material inoxidável. As estruturas metálicas, mostradas na Figura 40 (b), são construídas a partir de perfis de barras chatas calandradas, cantoneiras, flanges cortados a

*laser* a partir de chapas, peças usinadas a partir de barras redondas que servirão de alojamento para os parafusos prisioneiros e insertos com rosca interna para a fixação das duas meias calha. Todas as peças serão soldadas entre si através de um gabarito que garantirá o posicionamento dos mesmos.



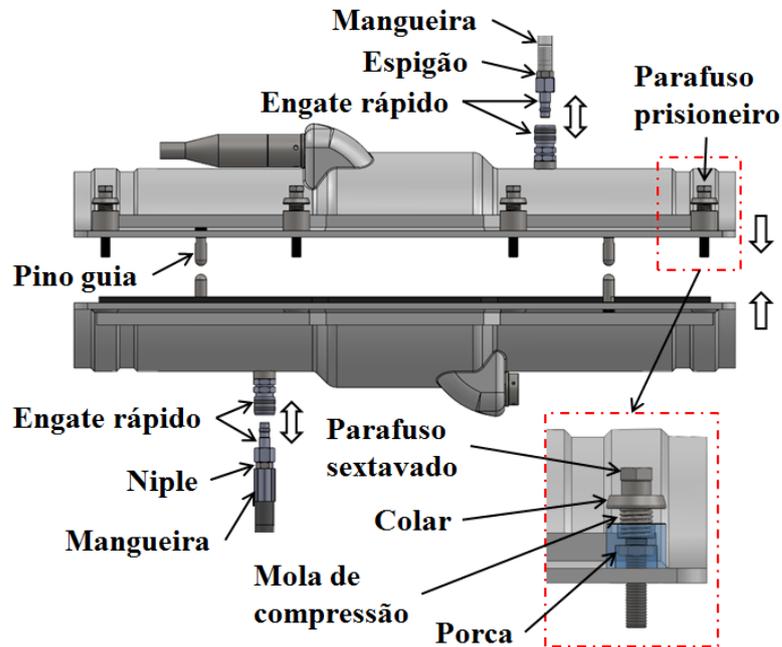
Fonte: Próprio Autor

Através da Figura 41 verificam-se os detalhes dos componentes que compõem o *clamp*. Os parafusos prisioneiros são montados somente em uma meia calha através do alojamento da estrutura metálica. Os parafusos prisioneiros tratam-se de conjuntos de componentes formados por parafuso sextavado, colar, mola de compressão, e porca. O colar e a mola são montados no parafuso, e em seguida, este conjunto de componentes é montado no alojamento, e, posteriormente, é colada a porca no parafuso, mantendo a distância desejada entre o alojamento e o colar.

Um conjunto de engate rápido é montado em cada meia calha. Enquanto que em um engate rápido é conectado uma mangueira para a realização da injeção de resina líquida para o interior do *clamp*, no outro engate rápido é conectado uma mangueira transparente permitindo a saída de ar e a visualização do completo preenchimento de resina. Após a conclusão do processo de injeção, ambos os engates rápidos são desconectados do *clamp*. Também são

montados dois pinos guias em cada meia calha, no qual possuem a função de garantir o alinhamento entre as meias calhas no momento do seu acoplamento em torno do *riser*.

Figura 41 – Detalhe dos componentes do método de reparo ou proteção de sistema de monitoramento



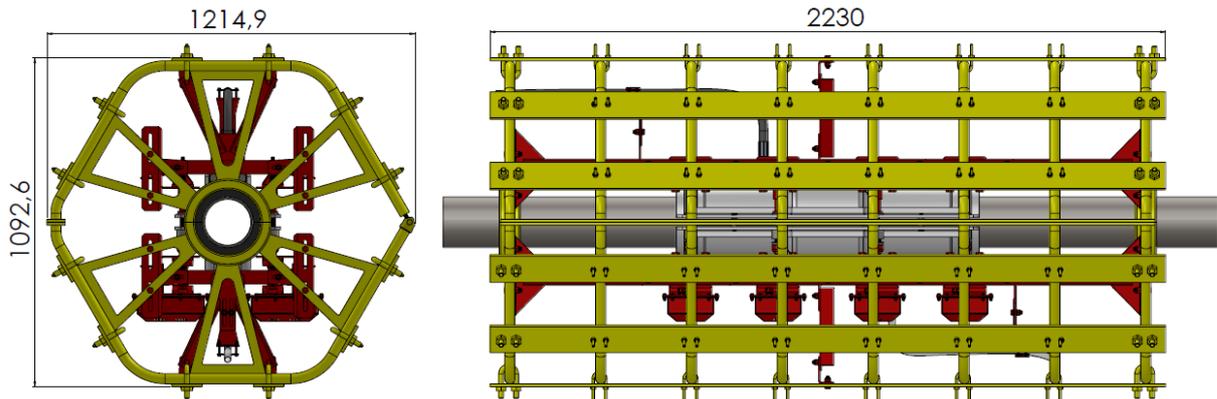
Fonte: Próprio Autor

#### 4.3.2 Ferramenta para Aplicação Submarina de *Clamps* de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento

Desenvolveu-se o projeto da ferramenta para acoplar e fixar o *clamp* bipartido em torno do *riser* de forma automatizada. Desta forma, na Figura 42 e Figura 43 é apresentada a ferramenta bipartida para aplicação submarina de *clamp* de reparo ou proteção de sistemas de monitoramento, no qual é constituída por uma estrutura externa bipartida e estruturas internas.

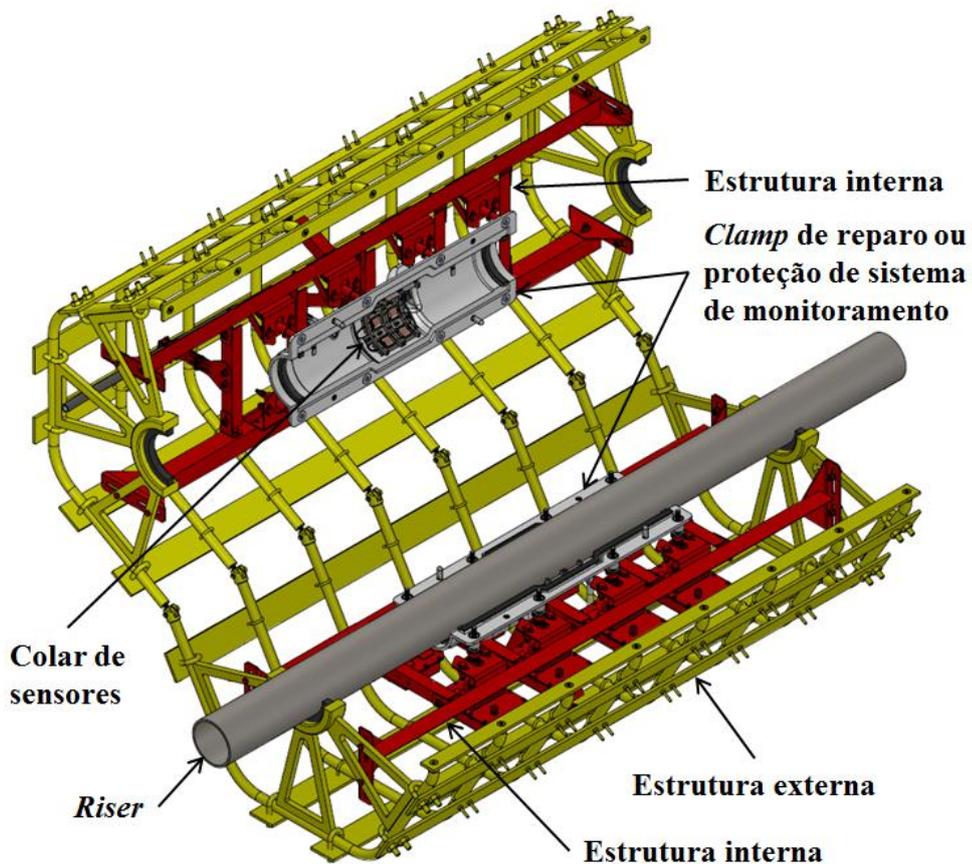
Devido à falta de informações sobre a interface da ferramenta com o ROV, para o desenvolvimento da ferramenta, baseou-se na revisão bibliográfica sobre métodos de operações submarinas em *risers*, descritos no item 3.6. Considerou-se que com pequenas adaptações na estrutura seria possível a operação por meio de mergulhador em profundidades de até 300 m, ou por ROV em maiores profundidades. Assim como no *clamp*, para a construção do protótipo da ferramenta, baseado nos custos de fabricação, definiu-se o material aço carbono para os componentes manufaturados, os quais receberão pintura como revestimento anticorrosivo. Já os componentes comerciais possuem zincagem como proteção.

Figura 42 – Vistas frontal e lateral com as principais dimensões da ferramenta acoplada no *riser*



Fonte: Próprio Autor

Figura 43 – Ferramenta em posição de acoplamento para posterior fixação do *clamp* em torno do *riser*



Fonte: Próprio Autor

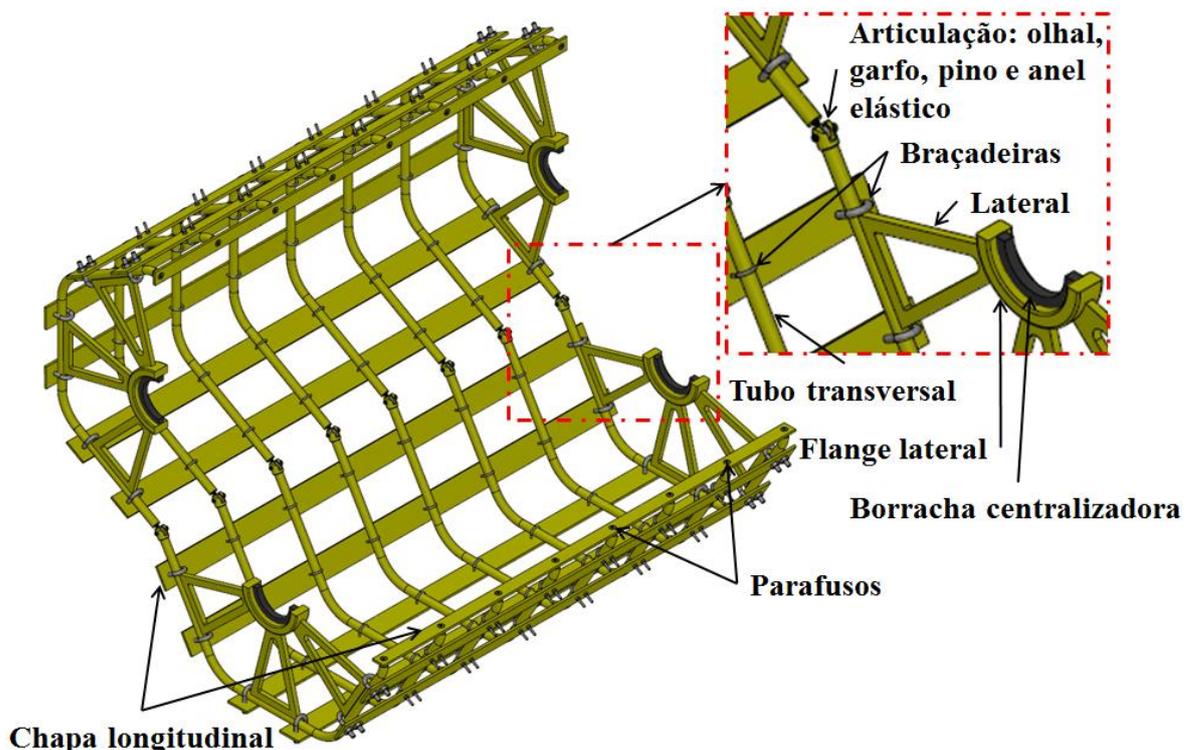
#### 4.3.2.1 Estrutura Externa

A estrutura externa, mostrada na Figura 44, tem a função de suportar e acondicionar os demais subsistemas da ferramenta. É constituída de duas estruturas unidas por meio de

conjuntos de articulações compostas de olhal, garfo, pino e anel elástico, os quais são roscados no tubo transversal, formando uma estrutura bipartida capaz de executar os movimentos de abertura e fechamento. Cada estrutura possui um flange nas laterais em formato de meia lua, que além de permitir o acoplamento da ferramenta, também garante a concentricidade da ferramenta em relação ao *riser* através da compressão aplicada na superfície do mesmo.

Os flanges possuem um perfil comercial de borracha colado nas suas superfícies que permite o aumento do atrito através da compressão aplicada no *riser*, além de evitar qualquer tipo de dano na superfície do mesmo devido o contato da ferramenta, e compensar qualquer irregularidade ou ovalização do *riser* através da deformação da borracha. As estruturas ainda são constituídas por chapas longitudinais e tubos no sentido transversal, no qual são montados entre si através de braçadeiras e parafusos, além das laterais, que são os únicos componentes soldados. As estruturas são basicamente fabricadas a partir de tubos, chapas, e barras redondas, através de processos de corte, dobramento, usinagem e solda.

Figura 44 – Estrutura externa da ferramenta em posição de acoplamento no *riser*



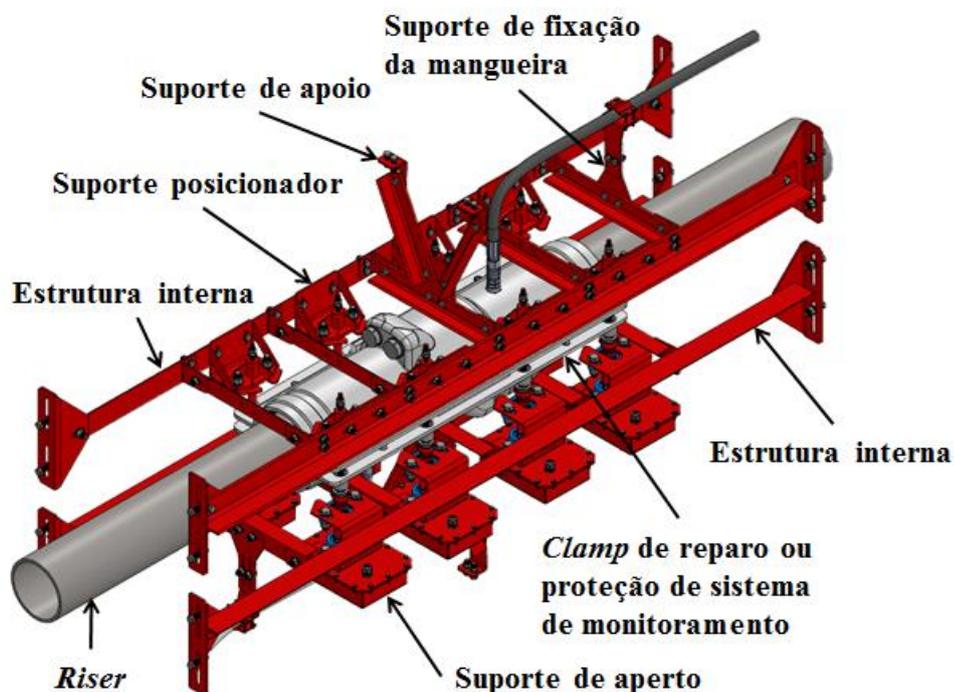
Fonte: Próprio Autor

#### 4.3.2.2 Estrutura Interna

Já a estrutura interna, mostrada na Figura 45 e Figura 46, é montada na estrutura externa e possui a função de suportar, posicionar e fixar o *clamp* em torno do *riser*. Além disso, também possui a função de acondicionar os demais componentes da ferramenta.

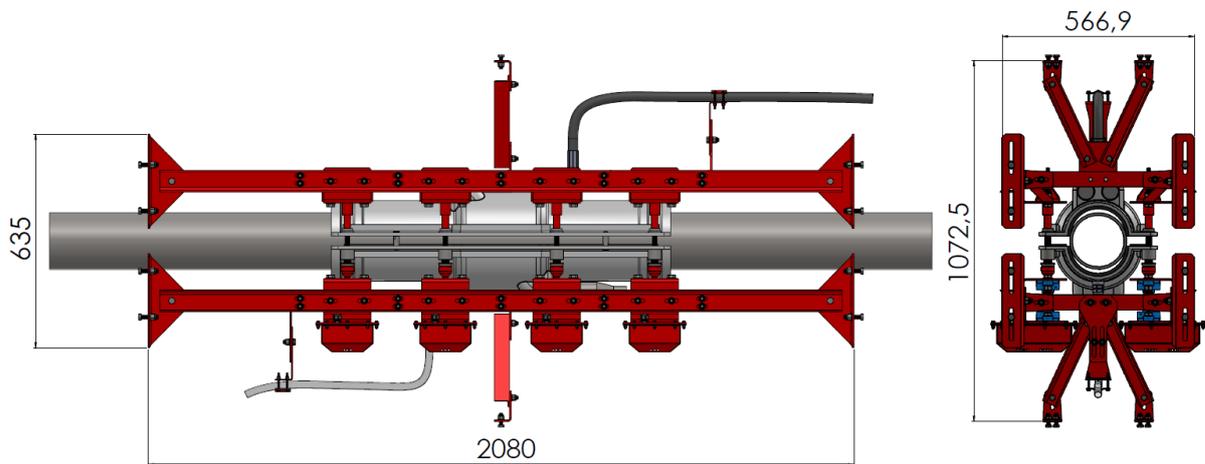
Em uma das estruturas é montado o suporte posicionador, o qual possui a função de suportar o *clamp* e garantir o seu posicionamento, enquanto que a outra estrutura possui o suporte de aperto, que além de suportar e garantir o posicionamento do *clamp*, também possui a função de realizar o aperto dos parafusos prisioneiros para a realização de sua fixação em torno do *riser*. As estruturas permitem o ajuste de posição de seus componentes nos três graus de liberdade (x, y, z), os quais garantem o correto posicionamento do *clamp* em relação ao *riser*. Para garantir a rigidez da estrutura interna, a mesma é interligada com a estrutura externa através do suporte de apoio. Os suportes de fixação das mangueiras são montados na estrutura interna, que foi fabricada a partir de cantoneiras, chapas, e barras redondas através de processos de corte, dobramento, usinagem, e solda. Todos os componentes são montados entre si através de parafusos, porcas, e arruelas.

Figura 45 – Estrutura interna da ferramenta em posição de acoplamento no *riser*



Fonte: Próprio Autor

Figura 46 – Vistas frontal e lateral com as principais dimensões da estrutura interna da ferramenta acoplada no *riser*



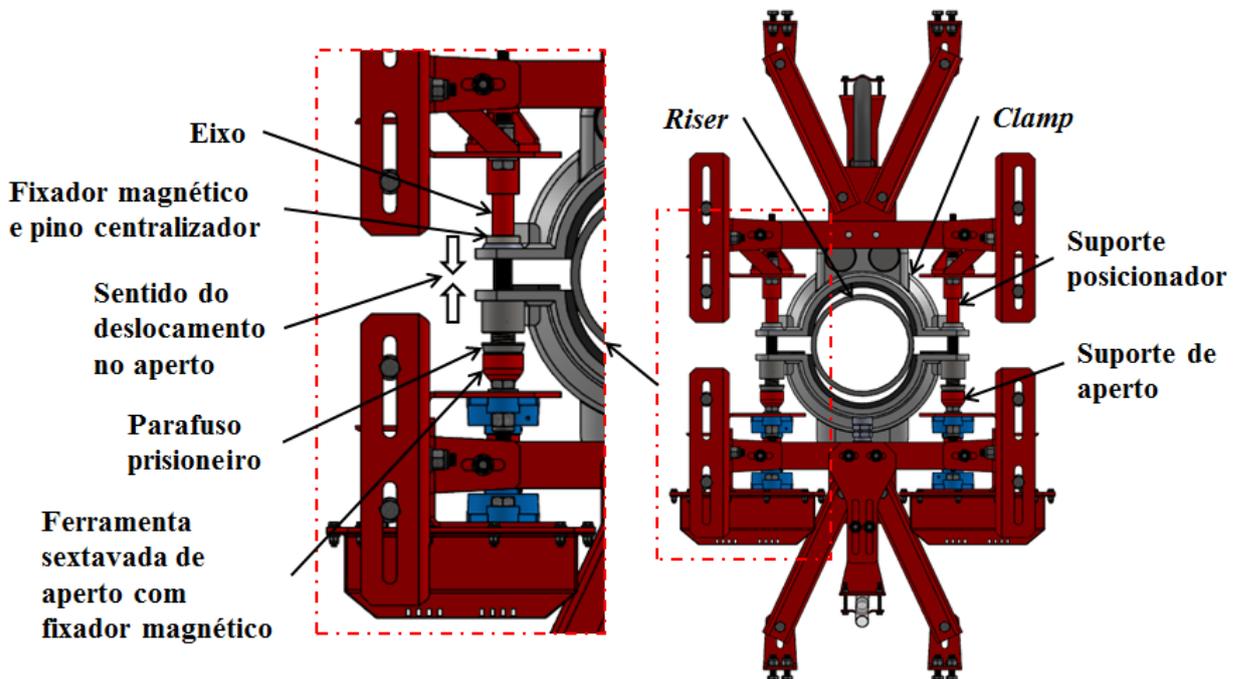
Fonte: Próprio Autor

Na Figura 47 é apresentada a interface de funcionamento da ferramenta a partir da estrutura interna, do *clamp*, e do *riser*, onde verifica-se o posicionamento dos componentes para a realização do acoplamento e fixação do *clamp* em torno do *riser*. Os principais componentes da estrutura interna são o suporte posicionador e o suporte de aperto do *clamp*, os quais possuem fixadores magnéticos responsáveis em suportar meia calha do *clamp*. Tanto o suporte posicionador quanto o suporte de aperto possuem um sistema com mola que permite o deslocamento axial do eixo em que o fixador magnético está montado. No momento do acoplamento da ferramenta no *riser*, o *clamp* entra em contato com o *riser* deslocando os eixos que o suportam. Após acoplada a ferramenta, inicia-se o processo de aperto dos parafusos prisioneiros a partir do acionamento do motor, fixando as duas meias calha em torno do *riser*. O avanço dos parafusos prisioneiros permitem que os mesmos se afastem dos fixadores magnéticos que estão montados nas ferramentas sextavadas de aperto, e, ao mesmo tempo, os parafusos entram em contato com o pino centralizador que está montado no suporte posicionador, o qual está suportando a outra meia calha, deslocando o eixo que o fixador magnético está montado. Desta forma, após concluído o aperto, o *clamp* está desacoplado dos fixadores magnéticos, permitindo que a ferramenta seja desacoplada do *riser*.

Na Figura 48 é mostrado o suporte posicionador que é constituído por um suporte de fixação, o qual é um conjunto soldado montado na estrutura interna. O suporte do eixo é outro conjunto soldado, o qual é montado no suporte de fixação e possui a função de acondicionar

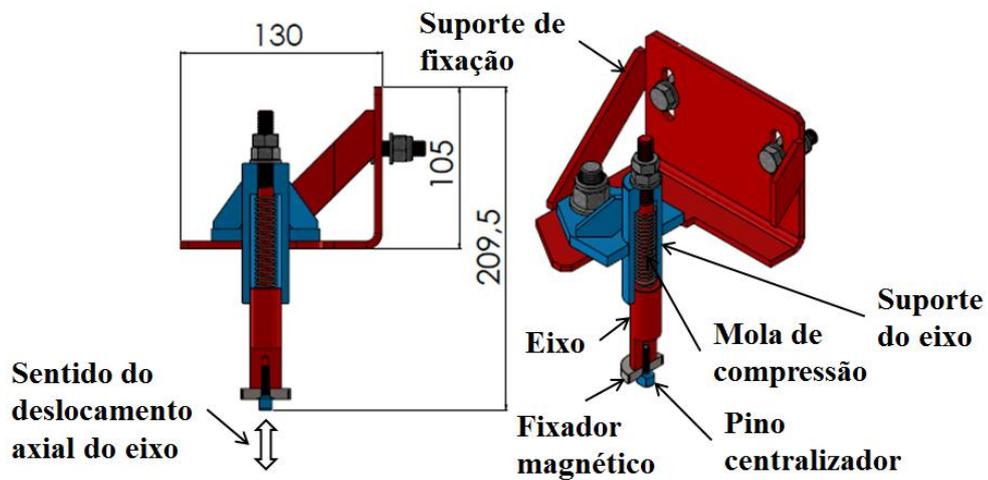
os demais componentes como o eixo, a mola de compressão, o fixador magnético, o pino centralizador, e demais elementos de fixação.

Figura 47 – Detalhe da interface da estrutura interna da ferramenta em relação ao *clamp* em posição de acoplamento no *riser*



Fonte: Próprio Autor

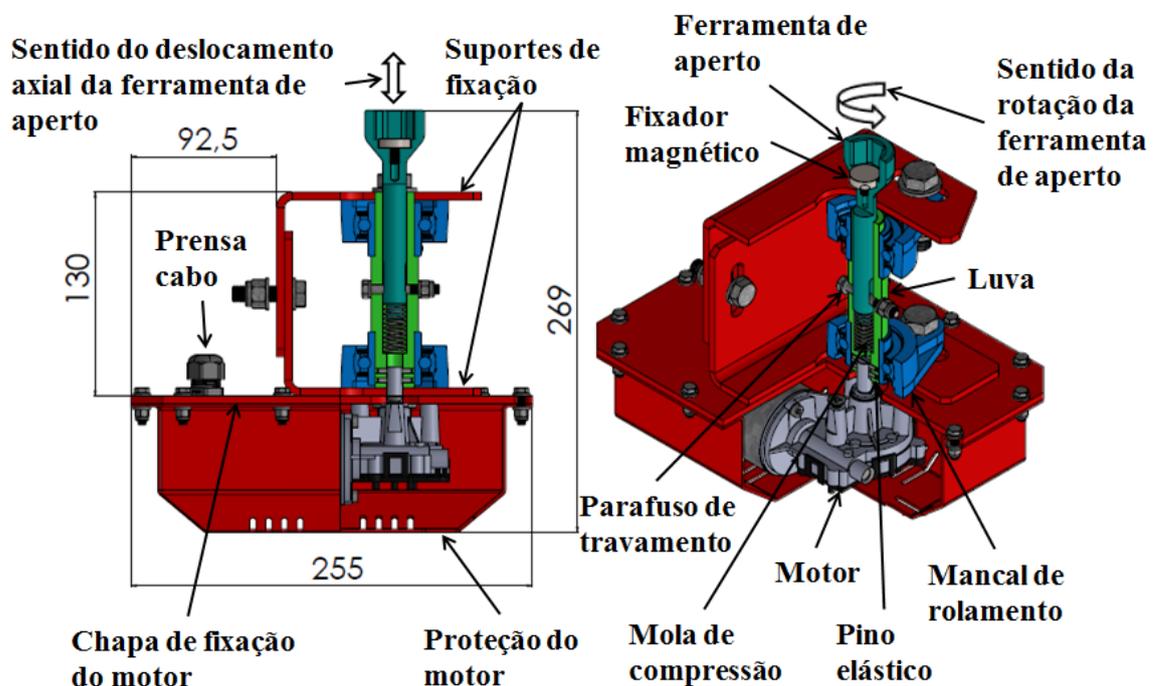
Figura 48 – Vista em corte do suporte posicionador do *clamp* com fixador magnético



Fonte: Próprio Autor

E na Figura 49 é apresentado o suporte de aperto que é constituído por dois suportes de fixação montados na estrutura interna com a função de acondicionar os demais componentes. Uma luva com dois mancais de rolamento montados nas suas extremidades é fixada nos suportes de fixação com a função de aplicar o torque necessário para a realização do aperto do parafuso prisioneiro a partir do acionamento do motor. O motor é montado em uma chapa de fixação e possui uma proteção. A chapa de fixação com o motor é montada no suporte de fixação de forma que o eixo do motor fique montado no furo da luva e travado através de pinos elásticos. Na luva é montada uma mola de compressão e um eixo com perfil sextavado através de um parafuso de travamento montado no sentido transversal. Este eixo trata-se da ferramenta de aperto, e possui um rasgo passante no qual permite a montagem do parafuso de travamento. E na parte sextavada da ferramenta de aperto é montado um fixador magnético.

Figura 49 – Vista em corte do suporte de aperto do *clamp* com fixador magnético



Fonte: Próprio Autor

#### 4.4 Dimensionamento e Seleção dos Componentes

O dimensionamento foi realizado simultaneamente com o desenvolvimento do projeto e auxiliou na definição das especificações de materiais e seleção de componentes padronizados.

#### 4.4.1 Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento

Considerando que o *clamp* será fabricado com uma estrutura metálica embebida no polímero, tem-se como requisito no processo de rotomoldagem, uma camada mínima de 3 mm de polímero sobre a estrutura devido ao fluxo de material durante o processo. Devido ao ambiente corrosivo que o *clamp* estará sujeito, selecionou-se o material polimérico por ser anticorrosivo, e, além disso, por ser leve, desta maneira, evitando comprometer a estrutura e integridade do *riser*. Selecionou-se o polietileno de alta densidade por possuir características desejadas como alta resistência ao impacto, e temperatura de fusão consideravelmente maior que a temperatura de cura da resina polimérica utilizada (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). Para o dimensionamento do *clamp*, levaram-se em consideração as dimensões e considerações previamente definidas na análise das necessidades e definição dos requisitos descritos no item 4.1. Desta forma, definiu-se 10 mm para a espessura do *clamp* e 4 mm para a espessura da estrutura metálica, obtendo-se uma peça com a mínima camada de polímero exigida sobre a estrutura, e com dimensões que atendem o especificado no item 4.1. Tanto para a estrutura metálica quanto para os demais insertos e componentes que constituem o *clamp*, definiu-se a utilização do aço ASTM A36 para sua fabricação por se tratar de um material comercialmente de fácil obtenção. Ensaios experimentais foram realizados em câmara hiperbárica com pressão externa e em *bunker* com pressão interna em um reparo aplicado em um duto rígido com o objetivo de verificar o comportamento do *clamp* desenvolvido, cujos resultados serão apresentados posteriormente.

A seleção do engate rápido baseou-se na relação entre o maior diâmetro de furo com o intuito de favorecer o fluxo de resina líquida durante a injeção para o interior do *clamp*, e menor comprimento com o intuito de obter o *clamp* com as menores dimensões externas possíveis. As dimensões máximas do *clamp* desenvolvido já com o engate rápido montado são mostradas na Figura 39. Desta forma, a especificação do conjunto de componentes do engate rápido selecionado é a seguinte: pino 1/2" NPT interna, acoplador 1/2" NPT externa, espigão 1/2" NPT x 3/4", mangueira sanfonada transparente 3/4", conector tipo união macho 3/4" JIC 37° x 1/2" NPT e mangueira 3/4" JIC 37°.

A definição da bitola dos parafusos prisioneiros baseou-se no diâmetro do fixador magnético disponível comercialmente para suportar a meia calha. Devido o fixador magnético ser montado na ferramenta de aperto e possuir um diâmetro de 20 mm, selecionou o parafuso sextavado M14 classe 8.8. Quanto ao comprimento dos parafusos, definiu-se 100 mm em

função da configuração do *clamp*, e do curso de deslocamento necessário para a realização da sua fixação no *riser*. Para verificar se o parafuso selecionado suportaria as cargas aplicadas, calculou-se a massa do *clamp* e da resina líquida, e em seguida realizou-se os cálculos de força conforme as propriedades tabeladas descritas em Shigley, Mischke e Budynas (2005), e apresentadas no Anexo A e Anexo B. Considerando-se que meia calha possui uma massa de 14 kg, e a massa da resina líquida no interior do *clamp* antes do processo de cura é de 17,6 kg (11 L de resina líquida com densidade de 1,6 g/cm<sup>3</sup> conforme propriedades da resina apresentadas no Apêndice A), tem-se uma massa total de 31,6 kg. Neste caso, considerou-se que os parafusos estariam sujeitos a tração conforme Equação 1. Então tem-se:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_t$ : Limite de resistência a tração;

$A_t$ : Área de tensão de tração ou área resistente nominal;

F: Força.

Desta forma, para o parafuso selecionado, considerou-se o seguinte:

$A_t = 115 \text{ mm}^2$  (conforme Anexo A);

$\sigma_t = 830 \text{ MPa}$  (conforme Anexo B).

Assim, obtém-se que um parafuso possui a capacidade de suportar a força de 95450 N. Considerando-se que a massa de 31,6 kg está distribuída em oito pontos de fixação do *clamp*, tem-se que o parafuso selecionado está dimensionado com um elevado coeficiente de segurança.

Para o perfeito funcionamento do parafuso prisioneiro, as molas possuem constante capaz de suportar a massa de meia calha sem se comprimir. Em função do diâmetro do parafuso e da massa de meia calha, selecionou-se uma mola de compressão em aço carbono com as seguintes especificações:  $d_{am} = 2 \text{ mm}$ ;  $DM_m = 20 \text{ mm}$ ;  $L_{0m} = 40,9 \text{ mm}$ ;  $L_{1m} = 13,6 \text{ mm}$ ;  $P_{1m} = 15 \text{ kg}$ ;  $C_m = 0,552 \text{ kg/mm}$ . A mola de compressão selecionada é montada no alojamento com o parafuso prisioneiro de forma que fique comprimida com um deslocamento de 16,9 mm, assim, considerando a sua constante  $C_m$ , a mola é capaz de suportar uma carga de 9,3 kg sem se deslocar. Considerando que o *clamp* possui oito pontos de fixação, todas as molas são

capazes de suportar uma carga de até 74,4 kg sem se deslocar. Considerando ainda que meia calha possui uma massa de 14 kg, tem-se que a mola está dimensionada com um coeficiente de segurança de aproximadamente 5.

Para a borracha de vedação, selecionou-se o material SBR como elastômero base por apresentar ótima resistência à compressão e ao desgaste, boa resistência ao calor e a água, e por possuir uma grande faixa de temperatura de trabalho (DIPEBOR, 2017). Inicialmente, desenvolveu-se um aparato, mostrado no Apêndice B, para analisar o comportamento de alguns perfis de borracha pré-selecionados de diferentes durezas em relação à deflexão e o torque necessário para comprimi-las, com a finalidade de auxiliar na seleção da dureza da borracha, e o motor para realizar o aperto dos parafusos. Considerando que a borracha de vedação será aplicada para realizar a vedação de resina líquida, é preferível uma borracha de menor dureza devido a maior deflexão com a finalidade de compensar irregularidades geométricas do *clamp* na região do assento da borracha. Desta forma, de acordo com os resultados dos ensaios de deflexão dos perfis selecionados, apresentado no Apêndice B, verificou-se que a borracha de dureza 40 Shore atenderia a necessidade de realizar a vedação. Além disso, de acordo com Ciser (2017), o torque máximo para o parafuso M14 classe 8.8 é de 138 N.m, desta forma, comparado com os torques obtidos nos ensaios, verifica-se que o parafuso selecionado para a realização da fixação do *clamp* no *riser* está dimensionado com um elevado coeficiente de segurança.

#### **4.4.2 Ferramenta para Aplicação Submarina de Clamps de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento**

Assim como o *clamp*, para a construção da ferramenta, definiu-se a utilização do aço ASTM A36 por se tratar de um material comercialmente de fácil obtenção. Para a borracha centralizadora, de acordo com o comportamento observado no ensaio de deflexão, apresentado no Apêndice B, selecionou-se um perfil comercial de 25 x 25 mm de material SBR com dureza de 50 Shore.

Devido à estrutura interna possuir um grande número de componentes montados, procurou-se utilizar o menor número possível de bitolas de parafusos, porcas, e arruelas diferentes, desta forma, considerou-se no dimensionamento a situação com aplicação das maiores cargas. Para o dimensionamento dos parafusos M12 classe 5.8, verificou-se que a situação mais crítica é em relação à montagem da estrutura interna com os suportes de aperto.

Para este caso considerou-se que os parafusos estariam sujeitos a cisalhamento, no qual é a pior condição, desta forma utilizou-se a tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) para a realização do cálculo conforme é mencionado por Shigley, Mischke e Budynas (2005). A massa total neste caso, considerando a estrutura interna com os suportes de aperto e meia calha é de 113,4 kg. Desta forma tem-se a Equação 2 apresentada a seguir:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_t} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_e$ : Limite de resistência ao escoamento.

Desta forma, para o parafuso selecionado, considerou-se o seguinte:

$A_t = 84,3 \text{ mm}^2$  (conforme Anexo A);

$\sigma_e = 420 \text{ MPa}$  (conforme Anexo B).

Para este caso, o parafuso selecionado é capaz de suportar uma carga de 35406 N. Considerando a massa total de 113,4 kg é suportado por quatro parafusos, tem-se uma carga de 28,35 kg por parafuso. Assim verifica-se um elevado coeficiente de segurança em relação ao parafuso selecionado.

Outra situação é em relação à aplicação dos parafusos M10 classe 5.8 na fixação dos suportes de aperto. Neste caso, considerou-se a massa total dos oito sistemas de aperto e a massa de meia calha, ou seja, 80,4 kg. Também considerou-se que os parafusos estariam sujeitos a cisalhamento conforme Equação 2. Desta forma, para o parafuso selecionado, considerou-se o seguinte:

$A_t = 58 \text{ mm}^2$  (conforme Anexo A);

$\sigma_e = 420 \text{ MPa}$  (conforme Anexo B).

Para esta aplicação, o parafuso selecionado é capaz de suportar uma carga de 24360 N. Considerando que a massa total de 80,4 kg é suportada por dezesseis parafusos, tem-se uma carga de 5 kg por parafuso. Desta forma, verifica-se um elevado coeficiente de segurança.

Em função dos diâmetros do eixo do suporte posicionador e da ferramenta do suporte de aperto, da massa de meia calha, e também do curso de deslocamento axial necessário, selecionou-se as molas de compressão em aço carbono conforme especificações comerciais. A mola de compressão selecionada para o suporte de aperto possui a seguinte especificação:

$d_{am} = 1,25$  mm;  $DM_m = 12,5$  mm;  $L_{0m} = 43,3$  mm;  $L_{1m} = 11,6$  mm;  $P_{1m} = 6,5$  kg;  $C_m = 0,219$  kg/mm. A mola de compressão selecionada é montada no furo da luva de forma que fique comprimida com um deslocamento de 12,3 mm, assim, considerando a sua constante  $C_m$ , a mola é capaz de suportar uma carga de 2,69 kg sem se deslocar. Considerando que a estrutura interna possui oito suportes de aperto, todas as molas são capazes de suportar uma carga de até 21,6 kg sem se deslocar. Considerando que meia calha possui uma massa de 14 kg, tem-se que a mola está dimensionada com um coeficiente de segurança de 1,5. E a mola de compressão aplicada no suporte posicionador possui a seguinte especificação:  $d_{am} = 1,25$  mm;  $DM_m = 12,5$  mm;  $L_{0m} = 90,1$  mm;  $L_{1m} = 23,1$  mm;  $P_{1m} = 6,5$  kg;  $C_m = 0,092$  kg/mm. A mola de compressão selecionada é montada no furo do suporte do eixo de forma que fique comprimida com um deslocamento de 29,1 mm, assim, considerando a sua constante  $C_m$ , a mola é capaz de suportar uma carga de 2,67 kg sem se deslocar. Considerando que a estrutura interna possui oito suportes posicionadores, todas as molas são capazes de suportar uma carga de até 21,4 kg sem se deslocar. Considerando que meia calha possui uma massa de 14 kg, tem-se que a mola está dimensionada com um coeficiente de segurança de 1,5.

A seleção dos fixadores magnéticos baseou-se na configuração do suporte de aperto, do suporte posicionador, do *clamp*, e da massa de meia calha. Estes fixadores magnéticos possuem a desvantagem de serem muito mais sensíveis em casos de movimentação lateral, por este motivo, desenvolveram-se os suportes de forma que as duas meias calha fiquem travadas neste sentido. Para o suporte de aperto, o fixador magnético possui a seguinte especificação: diâmetro de 20 mm, pino roscado M6, força magnética de tração vertical de 12 kg. Considerando que a estrutura interna possui oito suportes de aperto, todos os fixadores são capazes de suportar uma carga de 96 kg. Desta forma, os fixadores estão dimensionados com coeficiente de segurança de aproximadamente 7, considerando que meia calha possui uma massa de 14 kg. E para o suporte posicionador, o fixador magnético possui a seguinte especificação: diâmetro de 32 mm, furo central escareado, força magnética de tração vertical de 23 kg. Considerando que a estrutura interna possui oito suportes posicionadores, todos os fixadores são capazes de suportar uma carga de 184 kg. Desta forma, os fixadores estão dimensionados com coeficiente de segurança de aproximadamente 13. Selecionaram-se os fixadores com elevado coeficiente de segurança devido às especificações de forças serem apenas uma referência, obtida em testes realizados em laboratório em condições ideais. Outro motivo é que seus desempenhos dependem muito de fatores como espessura e área da superfície, no qual são fundamentais para uma maior ou menor aderência.

Selecionou-se o conjunto de mancal e rolamento em função da configuração do suporte de aperto, do diâmetro do eixo da ferramenta de aperto, e das cargas radial e axial aplicadas durante o funcionamento da ferramenta. Conforme FRM (2017), a especificação do conjunto mancal e rolamento selecionado é UCFL 205. O rolamento selecionado possui fixação por parafuso da série UC 200 para um eixo de diâmetro 25 mm. Conforme o Anexo C, o rolamento para este diâmetro é o Y 205 V22, no qual possui carga radial dinâmica de 1430 kg e estática de 800 kg. Além disso, conforme FRM (2017), os rolamentos com fixação por parafusos da série Y 200 podem suportar cargas axiais de até 20% da capacidade da carga radial dinâmica. Já o mancal selecionado é do tipo flange e série FL 200 para um eixo de diâmetro 25 mm conforme especificações apresentadas no Anexo D. Considerando que tanto a carga radial quanto axial aplicada é em relação à massa de meia calha, ou seja, 14 kg, e que a estrutura interna possui oito suportes de aperto, então tem-se que cada suporte de aperto sofrerá uma carga de 1,75 kg. Desta maneira, o conjunto de mancal e rolamento utilizado possui um elevado coeficiente de segurança.

Quanto ao acionamento, utilizou-se os motores elétricos existentes no laboratório da marca Bosch e modelo CEP F 006 WMO 310 24V 46W, cujo as especificações técnicas são descritas em Kalatec (2017), e apresentadas no Anexo E. A utilização destes motores baseou-se nos custos de fabricação do protótipo, e não são os motores indicados para esta aplicação por não possuírem proteção para operar continuamente de forma submersível. A seleção deste motor baseou-se na borracha de vedação selecionada, descrita no item 4.4.1, a partir dos resultados do ensaio de deflexão apresentado no Apêndice B, cujo torque de aperto será de aproximadamente 7 N.m. O eixo do motor é montado na luva e transmitirá o torque de aperto através dos pinos elásticos que foram dimensionados de acordo com as dimensões do rasgo do eixo do motor.

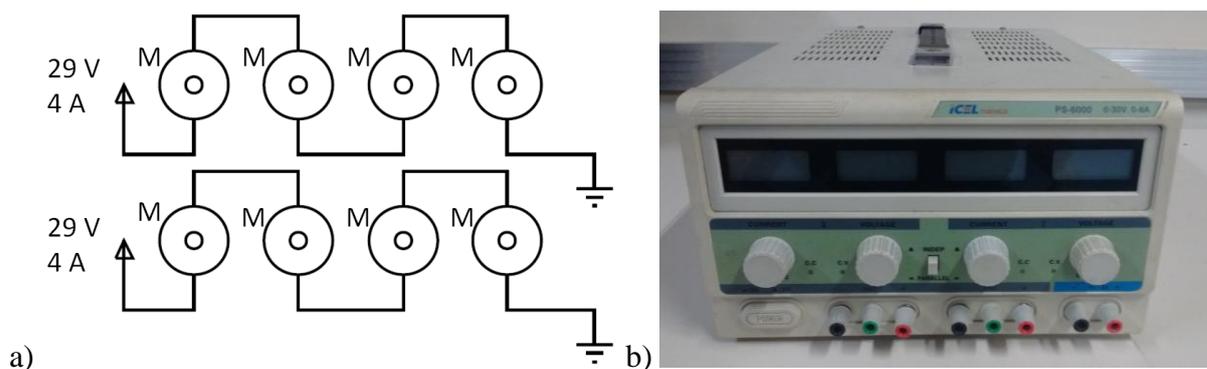
## 5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Testes de Funcionamento e Modificações do Protótipo

Após detalhado o projeto, iniciou-se a construção do protótipo para posteriormente realizar os testes de funcionamento e possíveis modificações. Pretende-se apresentar algumas características observadas durante o processo de fabricação e testes de funcionamento do método e da ferramenta, e também algumas modificações que foram necessárias realizar durante a construção. Assim como no desenvolvimento do projeto, para a realização dos testes de funcionamento, levaram-se em consideração as características da análise das necessidades e definição dos requisitos descritos no item 4.1.

Conforme apresentado na Figura 50, considerou-se que os motores elétricos serão ligados em série, e o acionamento e controle da corrente aplicada nos motores serão executados com o auxílio de uma fonte de alimentação da marca ICEL modelo PS-6000 com capacidade de tensão de 0 – 30 V e corrente de 0 – 6 A. De acordo com o Anexo E, para a obtenção de um torque de 7,5 N.m no motor selecionado descrito no item 4.4.2, é necessário uma corrente de aproximadamente 4 A. Ainda conforme o Anexo E, conseqüentemente, a rotação de aperto será de aproximadamente 38 rpm, através de uma potência de aproximadamente 29 W e rendimento em torno de 28%. Desta forma, para a realização do aperto dos parafusos prisioneiros, todos os motores serão acionados ao mesmo tempo, onde o torque de aperto será controlado a partir do controle da corrente aplicada pela fonte de alimentação.

Figura 50 – a) Diagrama esquemático da ligação em série dos motores elétricos; b) Fonte de alimentação da marca ICEL modelo PS-6000



Fonte: Próprio Autor

## 5.2 Ensaio de Avaliação do Método de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento

A realização dos ensaios hidrostáticos apresentados nesta dissertação visa verificar o comportamento do método proposto, onde a preparação e execução dos ensaios basearam-se na bibliografia descrita no item 3.3. Foram realizados ensaios hidrostáticos de pressão interna e externa nas dependências do LAMEF a partir de ensaios de curta duração em diferentes patamares de pressão em dutos com fluido a temperatura ambiente.

### 5.2.1 Definição dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios, foram utilizados dois corpos de prova com as extremidades fechadas. Ambos os corpos de prova foram construídos a partir de dutos rígidos de 6 pol. de diâmetro, 3 m de comprimento, Schedule 80 com espessura de parede de 10,97 mm, e material composto por uma liga de aço de acordo com a norma API 5L grau B, por ser comercialmente de fácil obtenção. Para o fechamento das extremidades, utilizou-se CAPs sem costura Schedule 80 de material ASTM A234 forjado. As propriedades mecânicas e composição química do duto são apresentadas na Tabela 2 e Tabela 3.

O cálculo da pressão hidrostática de teste normalmente utilizada pelos fabricantes é apresentado a partir da Equação 3. Já para a pressão máxima de trabalho, usualmente é considerada 1/3 da pressão hidrostática de teste quando utilizado por longos períodos de tempo.

$$P = 2 \cdot S \cdot \frac{t}{D} \quad (3)$$

$$S = \sigma_{e \text{ min}} \cdot 60\% \text{ (para aço carbono e baixa liga)}$$

Onde:

P: Pressão hidrostática de teste;

S: Limite de escoamento para ensaios de pressão hidrostática de teste;

t: Espessura da parede do duto;

D: Diâmetro externo do duto;

$\sigma_{e \text{ min}}$ : Limite de resistência ao escoamento mínimo.

Desta forma, para o duto selecionado, considerou-se o seguinte:

$\sigma_{e \text{ m\u00edn.}} = 241 \text{ MPa}$  (conforme Tabela 2);

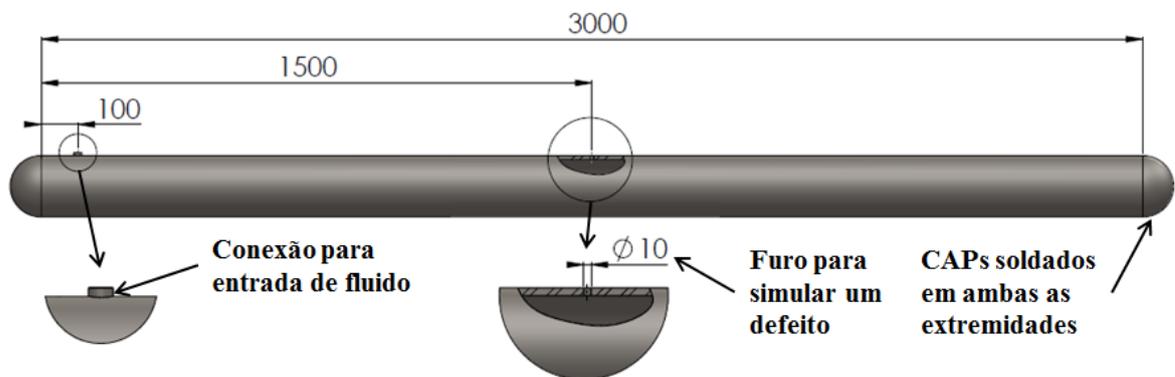
$t = 10,97 \text{ mm}$ ;

$D = 168,3 \text{ mm}$ .

Assim, a press\u00e3o hidrost\u00e1tica de teste para o duto selecionado \u00e9 de 18,85 MPa (188,5 bar).

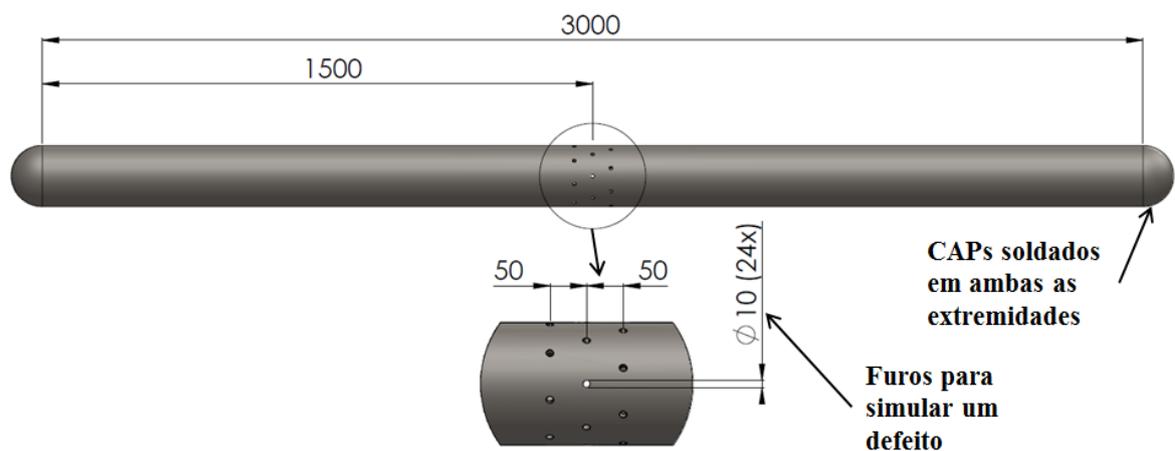
Na Figura 51 apresenta-se o corpo de prova desenvolvido para a realiza\u00e7\u00e3o do ensaio hidrost\u00e1tico com press\u00e3o interna com a especifica\u00e7\u00e3o das principais dimens\u00f5es e caracter\u00edsticas geom\u00e9tricas. Observa-se que este corpo de prova possui uma conex\u00e3o de entrada de fluido em uma das extremidades e possui um furo passante de di\u00e2metro 10 mm na regi\u00e3o central com a finalidade de verificar a estanqueidade do m\u00e9todo de reparo que ser\u00e1 aplicado nesta regi\u00e3o.

Figura 51 – Corpo de prova para ensaio de press\u00e3o interna



Fonte: Pr\u00f3prio Autor

Figura 52 – Corpo de prova para ensaio de press\u00e3o externa



Fonte: Pr\u00f3prio Autor

Na Figura 52 é mostrado o corpo de prova desenvolvido para a realização do ensaio hidrostático com pressão externa. Por se tratar de um ensaio com pressão externa, desconsiderou-se a utilização de uma conexão de entrada de fluido. Além disso, com o objetivo de facilitar a verificação da estanqueidade, definiu-se a especificação de diversos furos passantes de diâmetro 10 mm na região central do duto, no local onde será aplicado o método de reparo. Observa-se que as três carreiras de furos encontram-se desalinhadas justamente para facilitar o ingresso de água para o interior do duto, caso haja permeação pelo método de reparo durante a execução do ensaio. Já na Figura 53 são mostrados os corpos de prova fabricados conforme as especificações descritas.

Figura 53 – a) Corpos de prova fabricados para ensaio de pressão interna e externa; b) Detalhe da conexão para entrada de fluido no ensaio de pressão interna; c) Detalhe do defeito na região central do corpo de prova para ensaio de pressão interna; d) Detalhe dos defeitos na região central do corpo de prova para ensaio de pressão externa



Fonte: Próprio Autor

## 5.2.2 Preparação e Instrumentação dos Corpos de Prova

Inicialmente realizou-se a colagem das borrachas de vedação nos rebaixos previstos no *clamp*, e foram realizados testes de acoplamento e fixação do *clamp* em torno do duto. Em seguida, iniciou-se a preparação das superfícies dos dutos para aplicação do reparo. A rugosidade ou o aumento da superfície colada tem mostrado bons resultados na melhora da adesão entre os materiais. Desta forma, com o intuito de melhorar a adesão aumentando a

resistência na interface entre a superfície do duto e a resina epóxi, realizou-se um tratamento superficial nas superfícies dos dutos na região de aplicação do método de reparo.

Com o auxílio de uma lixadeira de cinta para tubos e lixas de granulação 120 e 150, realizou-se o lixamento das superfícies dos dutos removendo qualquer resíduo de oxidação. Após o lixamento, realizou-se uma limpeza final com solvente para obter uma superfície sem qualquer resíduo de óleo ou poeira. Em seguida, preparou-se a resina epóxi de acordo com as especificações do fornecedor, apresentadas no Apêndice A, e realizou-se o fechamento dos furos para evitar vazamento de resina líquida no interior do duto no momento da injeção. Na Figura 54 apresentam-se os corpos de prova após a preparação das superfícies e fechamento dos furos com resina epóxi.

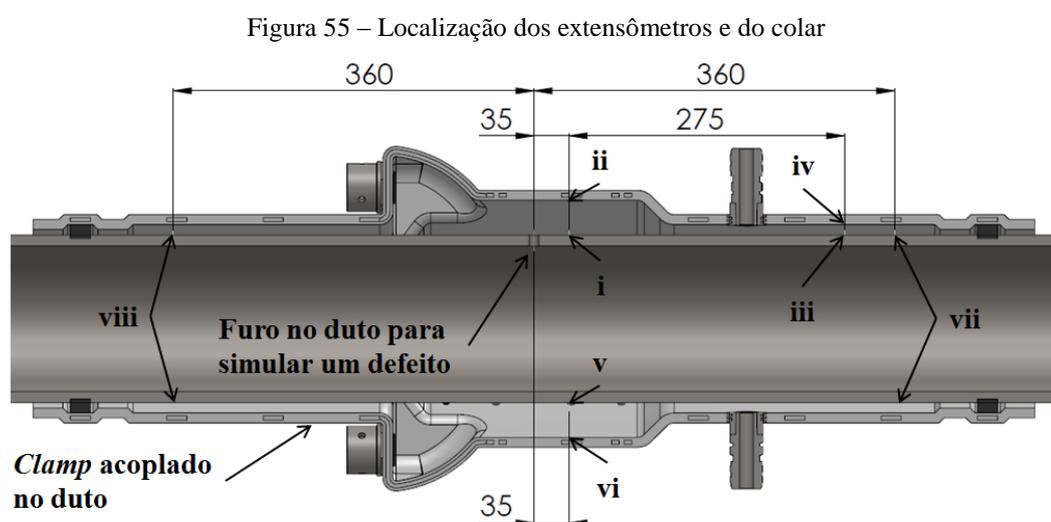
Figura 54 – a) Corpo de prova para ensaio de pressão interna após a preparação da superfície; b) Detalhe do fechamento do furo com resina epóxi no corpo de prova para ensaio de pressão interna; c) Corpo de prova para ensaio de pressão externa após a preparação da superfície; d) Detalhe do fechamento dos furos com resina epóxi no corpo de prova para ensaio de pressão externa



Fonte: Próprio Autor

Após a preparação das superfícies dos dutos, realizou-se a instrumentação do corpo de prova utilizado no ensaio hidrostático de pressão interna. Devido ao alto custo de aquisição dos conectores ou penetradores, e dos cabos necessários para a aquisição de dados dos extensômetros para a realização do ensaio em câmara hiperbárica, definiu-se que o corpo de prova utilizado no ensaio de pressão externa não seria instrumentado. Instalou-se no duto e no *clamp*, extensômetros de resistência elétrica com o propósito de medir as deformações durante o ensaio. Também instalou-se na superfície do duto, um colar em torno do seu diâmetro confeccionado a partir de uma chapa de fibra de vidro cobreada para circuito impresso, com o propósito de verificar qualquer vazamento de água no sentido longitudinal do reparo durante o ensaio hidrostático, principalmente, pequenos vazamentos que não poderiam ser observados pelas câmeras de vídeo.

Realizou-se uma avaliação das deformações atuantes em diferentes pontos do duto e do *clamp* na região reparada, com o propósito de conhecer o comportamento e o nível destas deformações nas seguintes regiões, mostrados na Figura 55: (i) na região próxima do defeito na superfície externa do duto; (ii) na região próxima do defeito na superfície interna do *clamp*; (iii) na extremidade da região reparada na superfície externa do duto; (iv) na extremidade da região reparada na superfície interna do *clamp*; (v) a 180° da região do defeito na superfície externa do duto; e (vi) a 180° da região do defeito na superfície interna do *clamp*. Também analisou-se a estanqueidade do método de reparo a partir de qualquer vazamento de água no sentido longitudinal do duto nas seguintes regiões mostradas na Figura 55: (vii) e (viii), na superfície externa do duto em ambas as extremidades do método de reparo.



Fonte: Próprio Autor

Para a realização da instrumentação, utilizou-se *strain gages* tipo roseta da marca Kyowa modelo KFG-3-120-D17-11 e terminais da marca Vishay modelo CPF-50C. Uma vez determinada as posições dos pontos a serem monitorados no duto, iniciou-se o processo de preparação da superfície, o qual consiste nas etapas de lixamento e limpeza. Realizou-se o lixamento do local onde serão colados os *strain gages* inicialmente com o uso de lixas rotativas de granulometria 80, 150 e 280 com auxílio de uma furadeira. Em seguida, de forma manual, lixou-se a superfície com lixas de granulometria 320 e 400. Tomou-se o cuidado de realizar o lixamento no mesmo sentido, e a cada troca de lixa girou-se 90° o sentido de lixamento, e realizou-se o lixamento até desaparecer as marcas do lixamento anterior. Por último, realizou-se novamente o lixamento com lixa de granulação 400 de forma aleatória

para não se ter um sentido preferencial devido às marcas superficiais do processo de lixamento. Já na preparação da superfície do *clamp*, por se tratar de material polimérico, realizou-se o lixamento somente com a lixa de granulometria 400 de forma aleatória. O propósito deste procedimento é garantir uma superfície com menor rugosidade possível no local onde será colado o *strain gage*, garantindo, assim, um melhor desempenho dos mesmos.

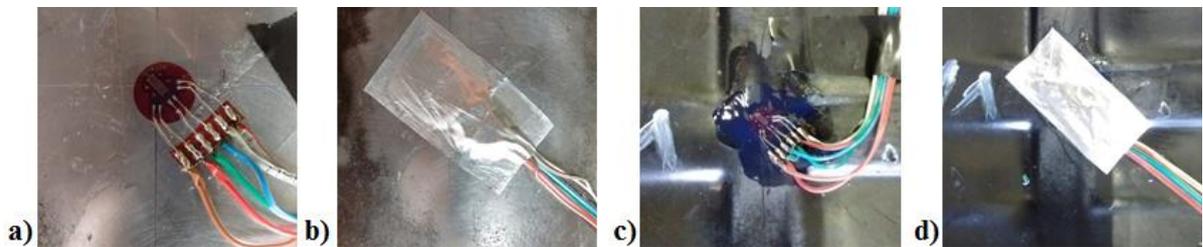
Posteriormente ao lixamento da superfície onde serão colados os extensômetros, realizou-se a marcação do local exato de colagem do sensor com uma caneta esferográfica e em seguida realizou-se a limpeza do local com acetona. A limpeza final destina-se a remoção de qualquer tipo de impureza que possa se alojar entre as superfícies do duto e do *clamp* em relação à superfície do sensor, evitando, assim, que a medição das deformações seja prejudicada. Na sequência, realizou-se a preparação e a colagem dos *strain gages* com a utilização da cola Loctite 496, no qual foi aplicada na superfície do *strain gage* que estará em contato com a superfície do duto e do *clamp*, e em seguida, pressionou-se o mesmo com o dedo por aproximadamente 1 min com o auxílio de fita durex entre o dedo e o *strain gage*. Após a colagem, separaram-se com uma pinça os fios do *strain gage* para posteriormente realizar as suas soldagens com o terminal.

Logo após, aplicou-se PU 140 da marca HBM sobre os *strain gages* com o intuito de protegê-los contra oxidação. As rosetas foram coladas de modo que a direção da grade do *strain gage* 1 ficasse alinhada com a direção longitudinal do duto e do *clamp*. Posteriormente, realizou-se a colagem dos terminais através do mesmo procedimento utilizado nos *strain gages*, e a soldagem dos três sensores das rosetas até o terminal, e em seguida a soldagem dos cabos aos terminais. Devido toda a instrumentação se encontrar no interior do reparo, tomou-se o cuidado para que os cabos tivessem um comprimento suficiente para compensar qualquer contração da resina durante a sua cura, evitando assim, a quebra das soldas dos extensômetros e rompimento dos cabos. Devido à temperatura de cura da resina epóxi, realizou-se a proteção dos extensômetros através da aplicação de fita adesiva de alumínio sobre os mesmos, e araldite na região dos cabos para evitar o ingresso e contato da resina líquida com os extensômetros. Por último, verificou-se através de um multímetro, se havia algum curto-circuito, por exemplo, se havia continuidade nos terminais e se os *strain gages* estavam com a resistência prevista pelo fabricante.

Para a confecção dos colares para verificação de vazamentos de água no sentido longitudinal do reparo, recortaram-se duas tiras de comprimento pouco maior que o perímetro

do duto a partir de uma chapa de fibra de vidro cobreada para circuito impresso. Em seguida, aplicou-se araldite na face da fibra de vidro e realizou-se a colagem em torno do duto. Após a cura do araldite, realizou-se a soldagem dos cabos no colar, e por último, com a utilização de um multímetro, certificou-se que não havia contato entre a face de cobre do colar e a superfície do duto. Na Figura 56 são apresentados detalhes da instrumentação nas superfícies externa do duto e interna do *clamp*, e na Figura 57, é apresentada uma imagem global da instrumentação do duto que será utilizado no ensaio hidrostático de pressão interna, no qual as dimensões para o posicionamento da instrumentação estão especificadas na Figura 55.

Figura 56 – a) Extensômetro colado na superfície externa do duto; b) Extensômetro colado na superfície externa do duto e protegido com fita adesiva de alumínio; c) Extensômetro colado na superfície interna do *clamp*; d) Extensômetro colado na superfície interna do *clamp* e protegido com fita adesiva de alumínio



Fonte: Próprio Autor

Figura 57 – Instrumentação do duto utilizado no ensaio hidrostático de pressão interna: a) Lado do defeito; b) Lado oposto ao defeito



Fonte: Próprio Autor

Concluída a instrumentação, realizou-se a montagem dos *clamps* nos dutos e em seguida realizou-se o processo de injeção de resina epóxi no seu interior. Na Figura 58 são apresentados os corpos de prova preparados para a realização do processo de injeção da resina

epóxi, e o aparato utilizado para a realização deste processo, no qual é composto basicamente por: estrutura, recipiente para a realização da mistura da resina e endurecedor, motor elétrico, bomba de engrenagem, mangueira, e conexões. Selecionou-se a resina bi componente e o respectivo endurecedor de acordo com os ensaios apresentados no Apêndice A, os quais possuem a seguinte especificação: resina Aral 1457 e endurecedor Aral 951 fabricado pela empresa Aralsul (2017). A preparação e proporção da mistura dos componentes para a realização do processo de injeção baseou-se nas especificações do fornecedor e estão descritas no Apêndice A.

Primeiramente colocou-se a resina no recipiente e realizou-se um teste de funcionamento fazendo com que a resina circulasse a partir do acionamento do motor. Em seguida, com o motor acionado, colocou-se o endurecedor no recipiente e realizou-se a mistura por aproximadamente 5 min até obter-se uma mistura homogênea. Na sequência, desligou-se o motor, conectou-se a mangueira no *clamp*, ligou-se o motor novamente, e realizou-se a injeção da resina epóxi. Injetou-se a resina líquida até verificar que o interior do *clamp* estava totalmente preenchido através do vazamento de resina pela mangueira de saída de ar. Posteriormente, desligou-se o motor, desconectou-se a mangueira, e mantiveram-se os corpos de prova estáticos para a obtenção da completa cura da resina.

Figura 58 – Aparato para a realização do processo de injeção de resina epóxi no interior do *clamp*



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 59 é apresentado detalhes dos corpos de prova após a conclusão do processo de injeção de resina. Após a mistura da resina, levou-se aproximadamente 10 min para concluir o processo de injeção de resina descrito anteriormente. De acordo com as propriedades da resina selecionada, apresentadas no Apêndice A, o tempo de manuseio após a mistura é de

116 min, assim, verifica-se que a partir da resina selecionada, o tempo para a realização do processo de injeção se mostra adequado. Ainda conforme as propriedades da resina selecionada, apresentadas no Apêndice A, o tempo necessário para a cura da resina é de 2 h.

Figura 59 – Corpos de prova após o processo de injeção de resina



Fonte: Próprio Autor

### 5.2.3 Procedimento para a Realização dos Ensaios

Definiram-se diferentes procedimentos para a realização dos ensaios de pressão hidrostática interna e externa, porém ambos os ensaios possuem características em comum. Considerou-se a água como fluido a temperatura ambiente para a realização dos ensaios hidrostáticos devido ser facilmente acessível. Estabeleceu-se que os ensaios seriam realizados a pressão crescente a partir de diferentes patamares de pressão para acompanhar o comportamento do método desenvolvido. Um fator que levou-se em consideração foi o sistema de vedação de todas as conexões e flanges presentes no sistema de ensaio, pois um vazamento fora da região de interesse pode representar um resultado não confiável.

No ensaio de pressão interna, tanto os extensômetros quanto o transdutor de pressão devem ser zerados antes do início do ensaio, então realiza-se a pressurização conforme procedimento descrito a seguir. O ensaio de pressão interna inicia-se com a pressurização de modo crescente da pressão nula até a pressão equivalente a 50% da pressão do primeiro patamar do teste, no qual é mantida por 10 min para fins de estabilização e acomodação do sistema. Em seguida, eleva-se a pressão lentamente até o primeiro patamar de 30 bar, e mantém-se a pressão constante por um período de 30 min. Após este período, aumenta-se a pressão lentamente até os próximos patamares de 50 bar, 75 bar, 100 bar, 125 bar, 150 bar, e 175 bar, mantendo-se a pressão constante por um período de 30 min em cada patamar de pressão. Considerou-se pressão de falha o momento em que verifica-se qualquer vazamento

no qual não é mais possível manter a pressão constante. Consideraram-se dois tipos de falha: falha por vazamento e falha total do método. Assim, caso for observado uma falha por vazamento, aumenta-se lentamente a pressão do sistema, de acordo com os patamares descritos anteriormente, até verificar a ocorrência de falha total do método, considerando-se 175 bar como pressão máxima de ensaio para verificação de falha total. Após atingir a pressão máxima do ensaio, ou verificar a falha do método, realiza-se a despressurização do sistema.

Já para o ensaio de pressão externa, o procedimento é basicamente o mesmo descrito anteriormente, porém será necessário zerar somente o transdutor de pressão, devido este corpo de prova não ter sido instrumentado. Quanto aos patamares de pressão, serão os mesmos descritos para o ensaio de pressão interna, porém, devido à capacidade da câmara hiperbárica de suportar pressão, definiu-se que a pressão máxima para este ensaio será de 100 bar.

#### 5.2.4 Ensaio Hidrostático com Pressão Interna

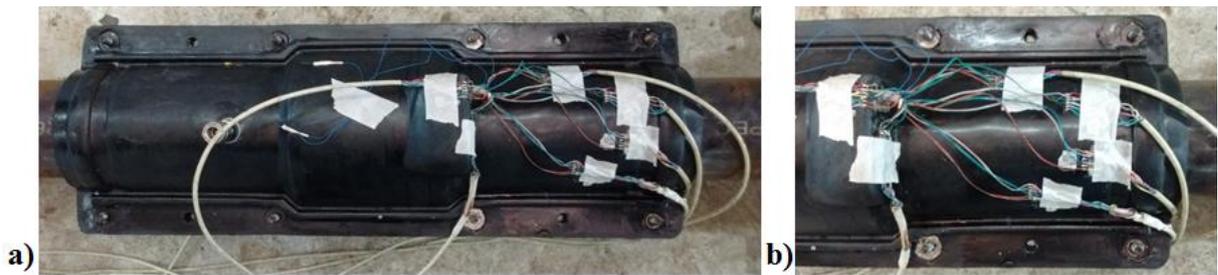
Para a realização do ensaio de pressão interna, inicialmente, movimentou-se o corpo de prova instrumentado para o interior do *bunker* conforme é mostrado na Figura 60. Em seguida, conforme mostrado na Figura 61, realizou-se a colagem na superfície do *clamp* dos terminais da marca Vishay modelo CPF-50C e posterior soldagem dos cabos que serão conectados ao sistema de aquisição dos dados experimentais. Conforme mostrado na Figura 62 (c), realizou-se a fixação dos cabos na superfície do duto, os quais serão conectados aos multímetros. Conforme mostrado na Figura 62 (b), também realizou-se a fixação do *dummy* na superfície do *clamp*, no qual será conectado ao sistema de aquisição dos dados com a finalidade de compensar qualquer variação de deformação devido a temperatura. Confeccionou-se o *dummy* a partir de uma amostra do mesmo material polimérico do *clamp*, o qual foi instrumentado com um *strain gage* da marca Kyowa modelo KFG-1-120-C1-11 e um terminal da marca Vishay modelo CPF-50C através do mesmo procedimento realizado na instrumentação do *clamp*.

Figura 60 – Corpo de prova posicionado no interior do *bunker*



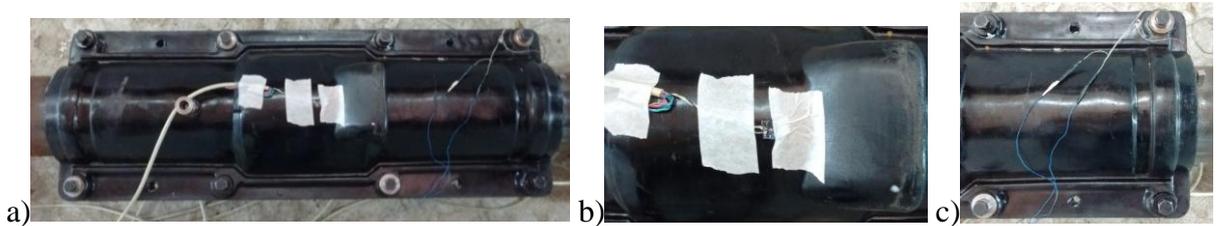
Fonte: Próprio Autor

Figura 61 – a) *Clamp* com os cabos dos extensômetros; b) Detalhe dos cabos dos extensômetros que serão conectados ao sistema de aquisição dos dados experimentais



Fonte: Próprio Autor

Figura 62 – a) *Clamp* com os cabos dos colares e o *dummy*; b) Detalhe dos cabos do *dummy* que serão conectados ao sistema de aquisição dos dados experimentais; c) Detalhe dos cabos dos colares e do duto que serão conectados nos multímetros



Fonte: Próprio Autor

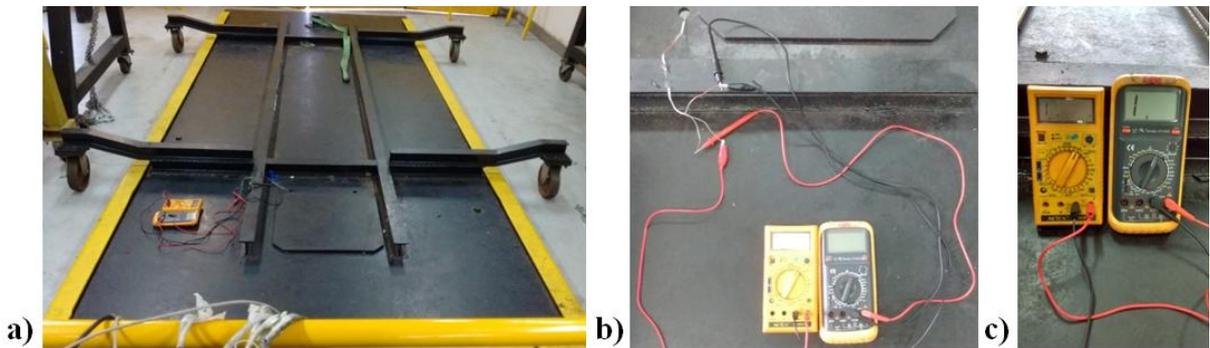
Posteriormente, o interior do duto foi completamente preenchido de forma manual com água através de uma mangueira a partir da conexão de entrada de fluido, tomando-se o cuidado para que não ficasse ar no seu interior a partir de uma mangueira de ar comprimido encaixada em um furo feito na lateral da mangueira, e da inclinação do duto. Em seguida montou-se o transdutor de pressão, com faixa de operação entre 0 a 500 bar, para monitorar a pressão durante o ensaio, e a mangueira de alta pressão, com capacidade de pressão de 400 bar, na conexão de entrada de fluido do duto conforme mostrado na Figura 63. A mangueira de alta pressão é conectada ao equipamento de teste hidrostático, com capacidade de operação de 350 bar, e o transdutor de pressão ao sistema de aquisição dos dados experimentais. Antes da realização do ensaio, realizou-se uma breve pressurização para verificar possíveis vazamentos nas conexões, e fixou-se a frequência de aquisição dos dados em 2 Hz para cada sinal adquirido. Uma vez que o corpo de prova está preparado para iniciar o ensaio, realizou-se o fechamento da tampa do *bunker* e conectaram-se os cabos do duto e dos colares aos multímetros, conforme mostrado na Figura 64, com o intuito de detectar a ocorrência de vazamento durante a realização do ensaio.

Figura 63 – Aparato para realização do ensaio hidrostático e aquisição dos dados de pressão



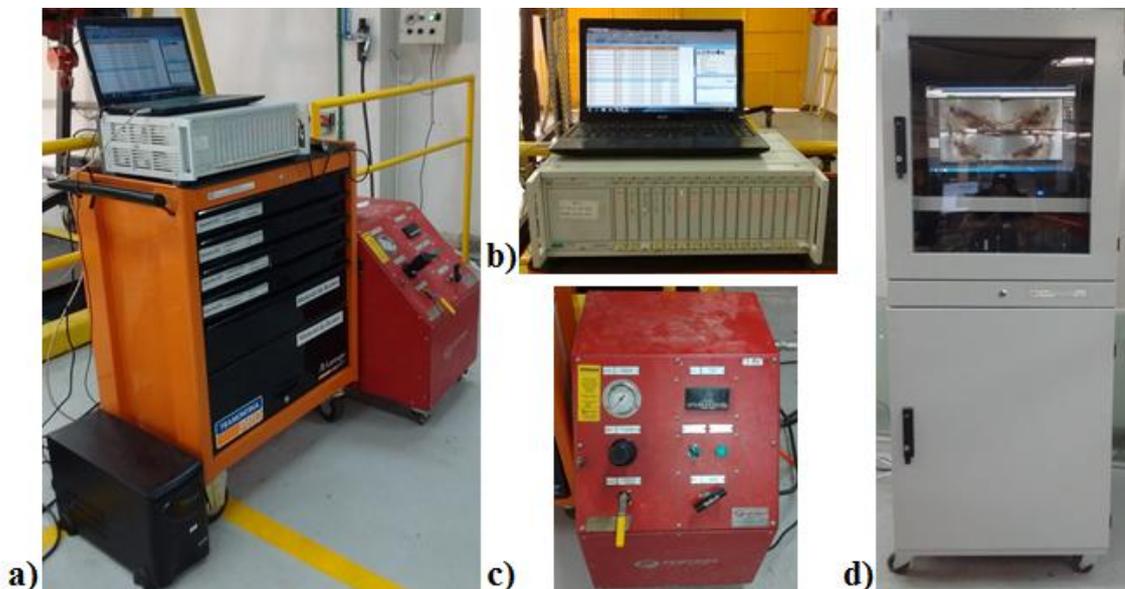
Fonte: Próprio Autor

Figura 64 – a) Visão geral do *bunker*; b) Detalhe da conexão dos multímetros nos cabos do colar; c) Detalhe dos multímetros preparados para a realização do ensaio



Fonte: Próprio Autor

Figura 65 – a) Sistema de pressurização e controle utilizado no ensaio hidrostático de pressão interna; b) *Notebook* conectado ao sistema de aquisição dos dados experimentais; c) Equipamento para teste hidrostático da marca Flutrol; d) Monitor conectado as câmeras de vídeo instaladas no interior do *bunker*



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 65 são apresentados os equipamentos e instalações utilizados no ensaio hidrostático de pressão interna, constituído por: *notebook*; sistema de aquisição dos dados experimentais marca HBM modelo MGC Plus para aquisição, condicionamento, e armazenamento dos dados dos extensômetros e do transdutor de pressão; equipamento para teste hidrostático da marca Flutrol, com capacidade de 350 bar; monitor conectado as câmeras de vídeo instaladas no interior do *bunker*; *nobreak*; além de um compressor de ar. Para a aquisição dos dados, utilizou-se o programa computacional Catman 4.0 da HBM. Desta forma, os sinais dos extensômetros e do transdutor de pressão são plotados no monitor do *notebook* e gravados, assim como os registros das câmeras de vídeo são mostrados e gravados em um computador.

### 5.2.5 Ensaio Hidrostático com Pressão Externa

Para a realização do ensaio de pressão externa, primeiramente, posicionou-se o corpo de prova no interior da câmara hiperbárica conforme mostrado na Figura 66. Em seguida, conforme mostrado na Figura 67, montou-se a vedação entre as faces dos flanges, e realizou-se o fechamento da câmara hiperbárica através do aperto do flange de acordo com o procedimento de aperto e torque recomendado. Posteriormente, o interior da câmara hiperbárica foi completamente preenchido com água através de uma mangueira a partir da conexão de entrada de fluido. Devido à câmara hiperbárica ter uma leve inclinação de forma que a conexão do transdutor de pressão fique na extremidade mais alta, foi possível garantir que não ficasse ar no seu interior durante o preenchimento com água.

Figura 66 – a) Movimentação do corpo de prova para o interior da câmara hiperbárica; b) Corpo de prova posicionado no interior da câmara hiperbárica



Fonte: Próprio Autor

Figura 67 – a) Realização do aperto do flange conforme procedimento e torque recomendado; b) Câmara hiperbárica preparada para a realização do ensaio



Fonte: Próprio Autor

Em seguida montou-se o transdutor de pressão, mostrado na Figura 68, com faixa de operação entre 0 a 500 bar, para monitorar a pressão durante o ensaio. Conforme mostrado Figura 67 (b), também montou-se a mangueira de alta pressão, com capacidade de pressão de 400 bar, na conexão de entrada de fluido da câmara hiperbárica. A mangueira de alta pressão é conectada ao equipamento de teste hidrostático, com capacidade de operação de 350 bar, e o transdutor de pressão ao sistema de aquisição dos dados experimentais. Antes da realização do ensaio, realizou-se uma breve pressurização para verificar possíveis vazamentos nas conexões, e, fixou-se a frequência de aquisição dos dados em 2 Hz para cada sinal aquisitado.

Figura 68 – Transdutor de pressão montado na conexão da câmara hiperbárica



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 69 são apresentados os equipamentos e instalações utilizados no ensaio hidrostático de pressão externa, constituído por: *notebook*; sistema de aquisição dos dados experimentais marca HBM modelo Spider8 para aquisição, condicionamento, e armazenamento dos dados do transdutor de pressão; equipamento para teste hidrostático da marca Flutrol, com capacidade de 350 bar; além de um compressor de ar. Para a aquisição dos

dados, utilizou-se o programa computacional Catman 4.0 da HBM. Desta forma, os sinais do transdutor de pressão são plotados no monitor do *notebook* e gravados.

Figura 69 – a) Equipamento para teste hidrostático da marca Flutrol; b) *Notebook* conectado ao sistema de aquisição dos dados experimentais; c) Sistema de aquisição dos dados experimentais



Fonte: Próprio Autor

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Resultados dos Testes de Funcionamento e Modificações do Protótipo

#### 6.1.1 Método de Reparo ou Proteção de Sistema de Monitoramento

Durante a fabricação das primeiras amostras do *clamp*, observaram-se problemas referentes à geometria das duas meias calha e dificuldades em garantir as dimensões especificadas no projeto. As principais dimensões definidas no projeto do *clamp* são apresentadas na Figura 39. Nas primeiras amostras do *clamp* utilizando polietileno de alta densidade e estrutura metálica, foram verificados problemas dimensionais ocasionados pela contração do polímero após o resfriamento da peça. Na Figura 70 é apresentada a estrutura metálica após a sua construção.

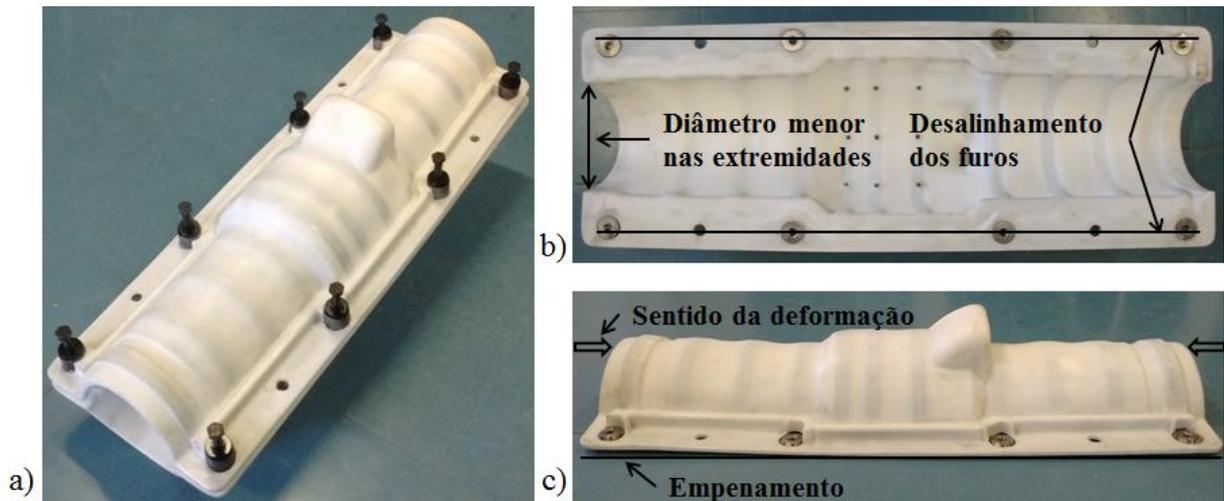
Figura 70 – Amostra inicial da estrutura metálica



Fonte: Próprio Autor

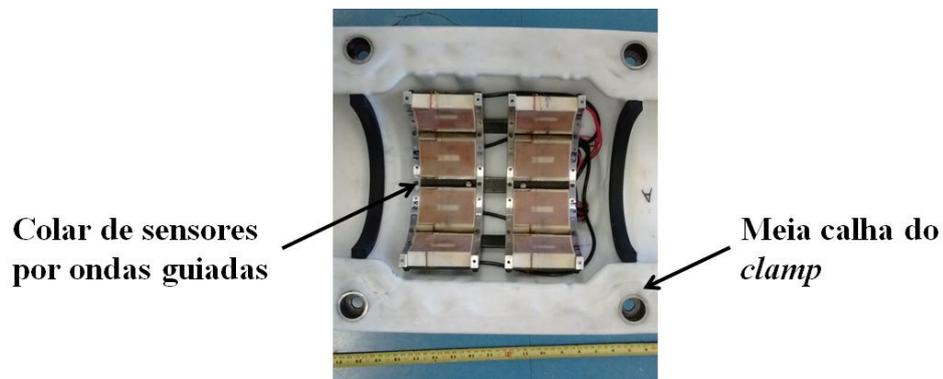
Já a partir da Figura 71 observa-se que a contração do polímero ocasionou deformação da estrutura metálica, e por consequência, empenamento das peças, diminuição do diâmetro nas extremidades, e desalinhamento dos furos. Estas deformações impossibilitaram a utilização do *clamp*, pois não foi possível acoplar as meias calha no duto devido à diminuição do seu diâmetro, e fixá-las entre si devido ao desalinhamento dos furos e empenamento. A partir da Figura 72, observa-se que foi possível a montagem do colar de sensores por ondas guiadas na região central do *clamp*. Desta forma, verifica-se que os problemas a serem solucionados encontram-se principalmente nas suas extremidades.

Figura 71 – Amostra inicial do *clamp*: a) *Clamp* com as duas meias calha não parafusadas; b) Imagem superior da meia calha; c) Imagem lateral da meia calha



Fonte: Próprio Autor

Figura 72 – Detalhe da montagem do colar de sensores por ondas guiadas na região central da parte interna do *clamp*



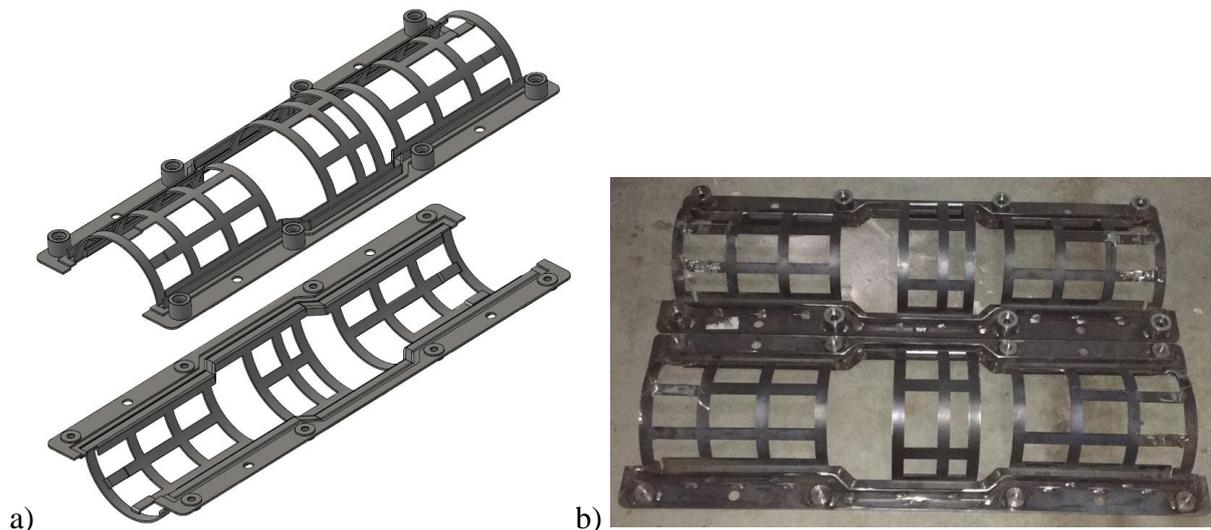
Fonte: Próprio Autor

A solução encontrada foi a substituição do polietileno de alta densidade, no qual possui contração de 3%, pelo polietileno de baixa densidade que possui contração de 1,5%. O polietileno de baixa densidade apresenta uma temperatura de fusão inferior comparado ao polietileno de alta densidade, porém, ainda é consideravelmente maior que a temperatura de cura da resina polimérica utilizada. Além disso, o polietileno de baixa densidade possui características desejadas como tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, e boa processabilidade (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). Também foram implementadas algumas alterações na estrutura metálica com o objetivo de reforçá-la e melhorar o preenchimento de polímero durante o processo de rotomoldagem. A alteração da estrutura também visou melhorar a região do assentamento da borracha de vedação através do

fechamento de regiões que eram abertas, já que as peças de amostra apresentaram defeitos devido à falta de preenchimento de polímero nestas regiões. Também alterou-se a tampa do molde com o objetivo de garantir as dimensões e geometria do assento da borracha de vedação. Além destas mudanças, modificou-se o processo de fabricação através do aumento do tempo de resfriamento das peças quando fixadas no gabarito após a retirada das mesmas do molde.

Na Figura 73 é apresentada a nova estrutura, que pode ser comparada com o projeto original mostrada na Figura 40 (b) e Figura 70. Nota-se que as alterações basearam-se na configuração da estrutura e processos de fabricação, não impactando na mudança de geometria e dimensões do produto final após o processo de rotomoldagem. Em comparação com a estrutura metálica original, observa-se que foi diminuída a quantidade de solda através da obtenção de uma chapa cortada a *laser* e calandrada. A partir desta chapa incluíram-se reforços longitudinais com o objetivo de estruturar e evitar deformação devido à contração.

Figura 73 – a) Estrutura metálica reprojeta; b) Estrutura metálica reprojeta após a construção

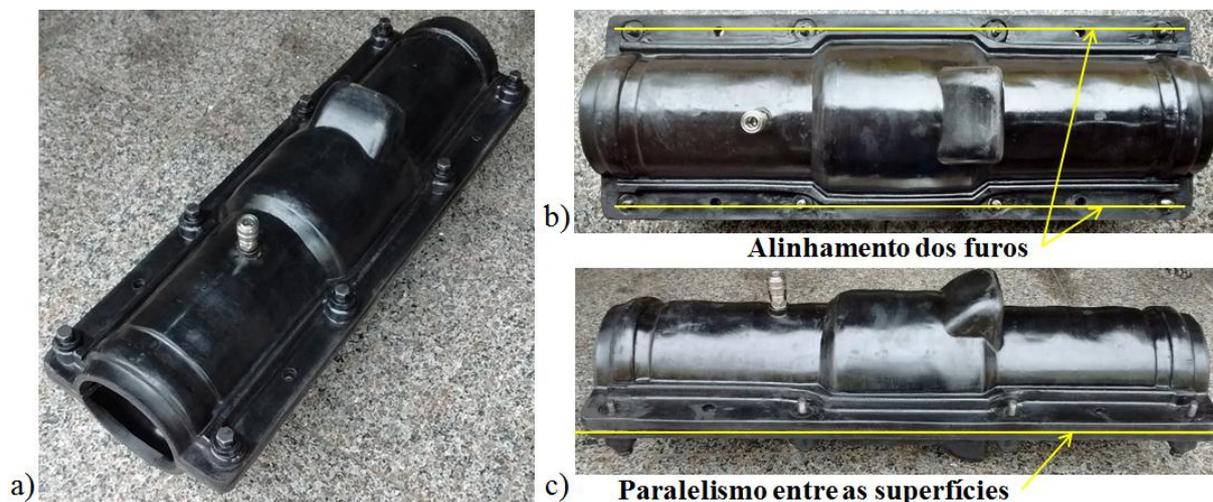


Fonte: Próprio Autor

Já na Figura 74, é mostrado o *clamp* com as alterações descritas anteriormente implementadas. Estas alterações permitiram a obtenção do *clamp* de acordo com as especificações de projeto. Em comparação com a amostra inicial apresentada na Figura 71, observa-se que foi minimizado os problemas de deformação, empenamento, desalinhamento dos furos, e diminuição do diâmetro nas extremidades da peça, no qual permitiu o perfeito

acoplamento e fixação em torno do duto. Porém, nas extremidades do *clamp*, na região de assentamento das borrachas de vedação, observou-se uma pequena ovalização no seu diâmetro, o qual espera-se ser compensado através da deformação das borrachas de vedação.

Figura 74 – *Clamp* com a estrutura metálica reprojeta: a) *Clamp* com as duas meias calha parafusadas; b) Imagem superior do *clamp*; c) Imagem lateral do *clamp*



Fonte: Próprio Autor

### 6.1.2 Ferramenta para Aplicação Submarina de *Clamps* de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento

Quanto a construção da ferramenta, não verificou-se dificuldades na obtenção dos componentes manufaturados devido a forma simples e campos de tolerância definidos na fase de projeto, no qual permitiu a obtenção dos componentes a partir de simples processos de fabricação. Além disso, observou-se fácil montagem dos componentes e conjuntos apresentados no item 4.3.2, devido à padronização dos componentes comerciais através do menor número possível de componentes de tamanhos diferentes, e também devido à possibilidade de ajustes de posição entre os componentes. Quanto ao suporte posicionador e suporte de aperto mostrados na Figura 48 e Figura 49, foi possível realizar o ajuste de posição através dos três graus de liberdade, permitindo, desta forma, garantir a concentricidade do *clamp* em relação ao duto no momento do seu acoplamento.

Realizou-se a montagem a partir dos menores conjuntos até a obtenção da montagem final da ferramenta conforme mostrado na Figura 75. Após a montagem da ferramenta, montou-se as duas meias calha que constituem o *clamp* na estrutura interna através dos fixadores

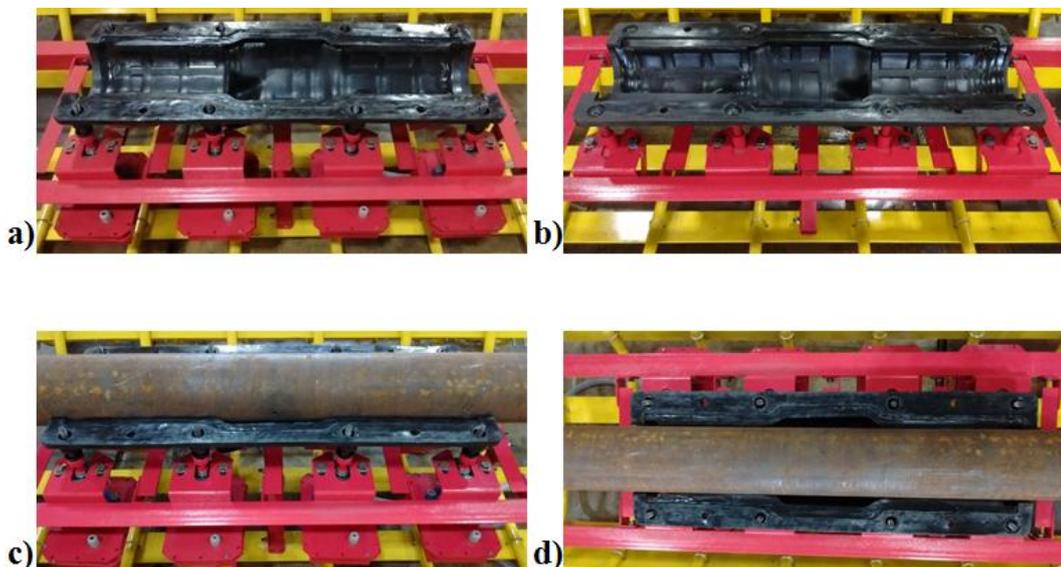
magnéticos do suporte de aperto e do suporte posicionador. Na sequencia, acoplou-se o duto a partir dos flanges laterais da estrutura externa. Através da Figura 76 é possível visualizar a interface das meias calha em relação à estrutura interna e a interface da meia calha acoplada no duto.

Figura 75 – Ferramenta após a montagem com o *clamp* e o duto



Fonte: Próprio Autor

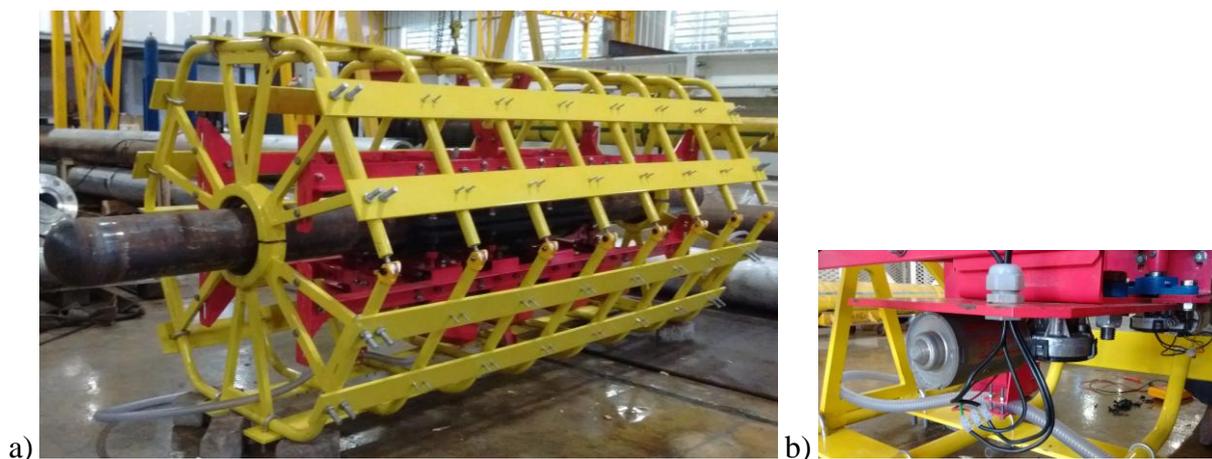
Figura 76 – a) Interface da meia calha do *clamp* em relação ao suporte de aperto; b) Interface da meia calha do *clamp* em relação ao suporte posicionador; c) Interface da meia calha do *clamp* acoplada no duto a partir da lateral; d) Interface da meia calha do *clamp* acoplada no duto a partir da parte superior



Fonte: Próprio Autor

Em seguida, acoplou-se o *clamp* no duto através do fechamento da ferramenta conforme mostrado na Figura 77 (a) e realizou-se o ajuste de posição dos suportes de aperto e posicionador. Finalmente, realizou-se a ligação em série dos motores elétricos, mostrado na Figura 77 (b), para posteriormente iniciar os testes de funcionamento. Após concluída a montagem da ferramenta e os ajustes necessários, realizou-se os testes de funcionamento.

Figura 77 – a) Ferramenta acoplada no duto; b) Detalhe do motor elétrico



Fonte: Próprio Autor

O teste iniciou-se a partir do acoplamento do *clamp* no duto conforme mostrado na Figura 78. Nesta etapa do teste, observou-se que a realização dos ajustes de posição dos suportes de aperto e posicionador permitiram obter um satisfatório acoplamento do *clamp* no duto, conforme mostrado na Figura 79. Antes da realização do acoplamento, observou-se que as molas de compressão suportaram meia calha do *clamp* sem se comprimir. Observou-se que os fixadores magnéticos foram capazes de suportar a meia calha do *clamp* durante o movimento de acoplamento. Também observou-se que, após o acoplamento, os sistemas de mola dos suportes de aperto e posicionador permitiram o deslocamento axial dos eixos no momento que o parafuso prisioneiro, montado em uma meia calha, teve contato com o inserto roscado da outra meia calha.

Após o acoplamento, os parafusos prisioneiros ficaram alinhados e pressionados através das molas de compressão contra o inserto roscado, permitindo, desta forma, o aperto dos parafusos a partir do acionamento dos motores elétricos. Na Figura 80 é apresentado o *clamp* já fixado em torno do duto após a realização do aperto dos parafusos. É possível verificar que

com o avanço dos parafusos prisioneiros, simultaneamente, os parafusos afastaram-se dos fixadores magnéticos do suporte de aperto e afastaram os fixadores magnéticos do suporte posicionador do inserto roscado, permitindo, desta forma, o desacoplamento da ferramenta. Durante a realização do aperto, verificou-se que os parafusos prisioneiros foram fixados de forma intercalada até cada parafuso atingir a corrente máxima ajustada na fonte de alimentação de acordo o torque de aperto desejado. De acordo com a ligação em série dos motores elétricos, a sequencia de aperto dos parafusos aconteceu sempre a partir do parafuso que avançou mais livremente, ou seja, com menor corrente necessária para girar o parafuso.

Figura 78 – Imagem da câmera de vídeo durante o acoplamento da ferramenta no duto: a) Câmera de vídeo instalada no lado externo da ferramenta; b) Câmera de vídeo instalada na parte interna da ferramenta



Fonte: Próprio Autor

Figura 79 – Imagem da câmera de vídeo após o acoplamento da ferramenta no duto: a) Câmera de vídeo instalada no lado externo da ferramenta; b) Câmera de vídeo instalada na parte interna da ferramenta



Fonte: Próprio Autor

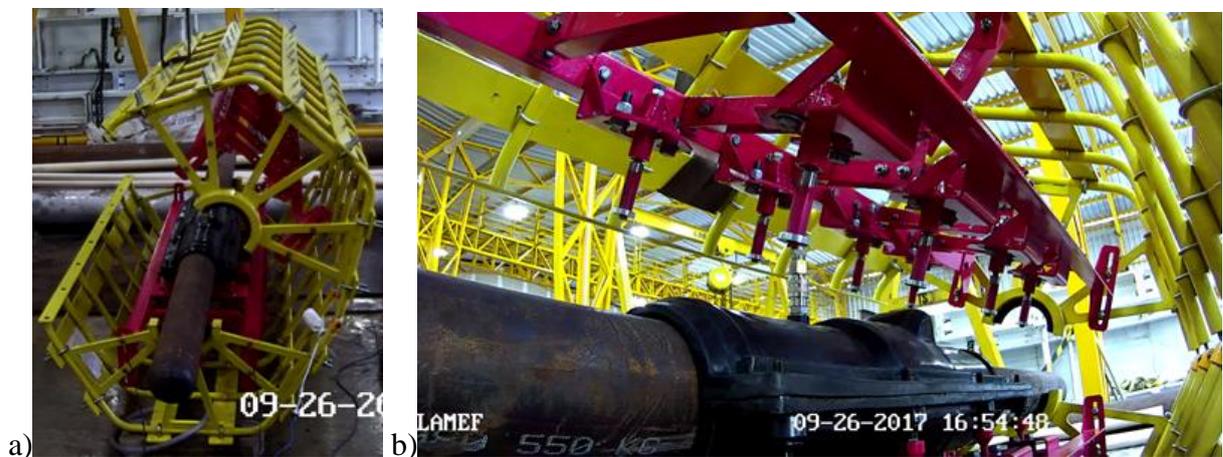
Figura 80 – Imagem da câmera de vídeo após o aperto dos parafusos do *clamp*



Fonte: Próprio Autor

Por último, após a realização do aperto dos parafusos, realizou-se o desacoplamento da ferramenta, conforme mostrado na Figura 81. Nesta etapa, observou-se que todos os mecanismos desenvolvidos funcionaram de forma satisfatória conforme previsto na fase de projetos. A maior dificuldade encontrada durante a realização dos testes foi o alinhamento dos parafusos em relação aos insertos roscados, pois, os mesmos devem estar perfeitamente alinhados para que seja possível a realização do aperto do *clamp* em torno do duto.

Figura 81 – Imagem da câmera de vídeo durante o desacoplamento da ferramenta do duto: a) Câmera de vídeo instalada no lado externo da ferramenta; b) Câmera de vídeo instalada na parte interna da ferramenta



Fonte: Próprio Autor

## 6.2 Resultados dos Ensaios de Avaliação do Método de Reparo ou Proteção de Sistemas de Monitoramento

### 6.2.1 Ensaio Hidrostático com Pressão Interna

São apresentados a seguir os resultados obtidos no ensaio de pressão interna para os diferentes patamares de pressão conforme procedimento descrito no item 5.2.3. Os sinais adquiridos no transdutor de pressão são mostrados na Figura 82, onde podem ser vistas as taxas de aumento de pressão. Devido o aumento de pressão ter sido realizado manualmente, ocorreram algumas variações nos valores dos patamares de pressão em relação aos estabelecidos no procedimento.

Antes de iniciar o ensaio, verificou-se novamente, através de um multímetro, se todos os *strains gages* estavam com a resistência prevista pelo fabricante. Neste momento, observou-se que o extensômetro (ii) no sentido longitudinal havia se danificado. As soldas ou o próprio cabo do sentido longitudinal deste extensômetro, provavelmente se danificaram durante a preparação do corpo de prova. O dano pode ter ocorrido durante a montagem do *clamp* no duto, já que toda a instrumentação se encontra sob o *clamp*, dificultando a visualização dos cabos durante a montagem, ou, durante a cura da resina, uma possível contração pode ter rompido o cabo ou a solda.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos para cada patamar de pressão a partir dos sinais adquiridos pelos extensômetros e pelo transdutor de pressão ao longo do ensaio hidrostático, o qual possibilitou a interpretação do comportamento do método desenvolvido através da evolução das deformações experimentais. Com a finalidade de melhorar a visualização e interpretação dos gráficos, apresentam-se somente os resultados de deformação referentes à pressurização de cada patamar para os diferentes extensômetros, cujo suas localizações estão representadas na Figura 55. Comparam-se as deformações dos extensômetros até a pressão a qual se tem leituras de deformação.

De acordo com os gráficos que serão apresentados a seguir, percebe-se que as indicações de deformações mantiveram certa linearidade até o final do ensaio, desta forma, verifica-se que o ensaio não ultrapassou o regime elástico tanto do duto quanto do *clamp*, o qual possui deformações pequenas se comparadas com regime plástico. Para a correta interpretação dos resultados, apresentam-se alguns possíveis comportamentos, ou seja, caso iniciasse o processo plástico, uma curva indicaria tal processo, e caso fosse observado o estabelecimento da

estricção, haveria, após a curva, uma inflexão na indicação das deformações no qual estaria associado a este processo. Já quando as deformações circunferenciais tornam-se grandes, caso do regime plástico para materiais dúcteis, as deformações longitudinais tendem a ser nulas, chegando até a ser negativas, o que significaria a compressão do material na direção axial.

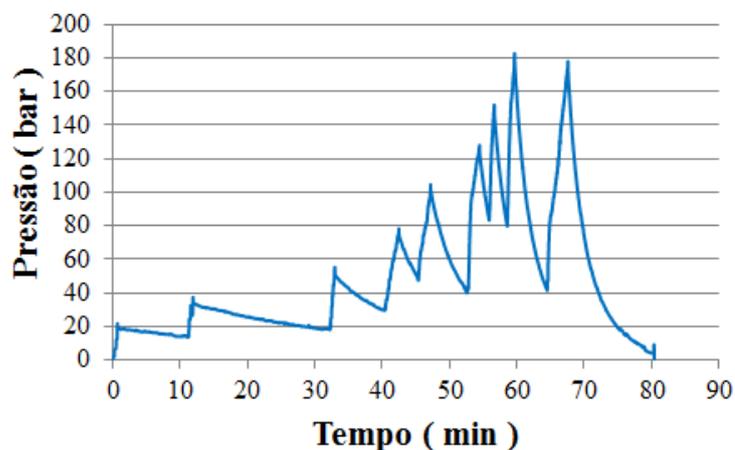
Percebe-se, a partir dos resultados experimentais, que as deformações no *clamp* são menores que no duto. Devido às deformações se encontrarem no regime elástico, a resina acaba absorvendo as mesmas, e, conseqüentemente, as deformações no *clamp* tendem a ser menores que no duto.

Na Figura 83 são apresentados os resultados de deformação em relação ao patamar de estabilização do sistema. Este patamar corresponde à pressão de aproximadamente 21 bar mostrado na Figura 82, no qual verifica-se que após o tempo estabelecido para a estabilização e acomodação do sistema, a pressão baixou gradativamente até aproximadamente 14 bar. Mesmo apresentando uma queda de pressão, não verificou-se vazamento neste patamar.

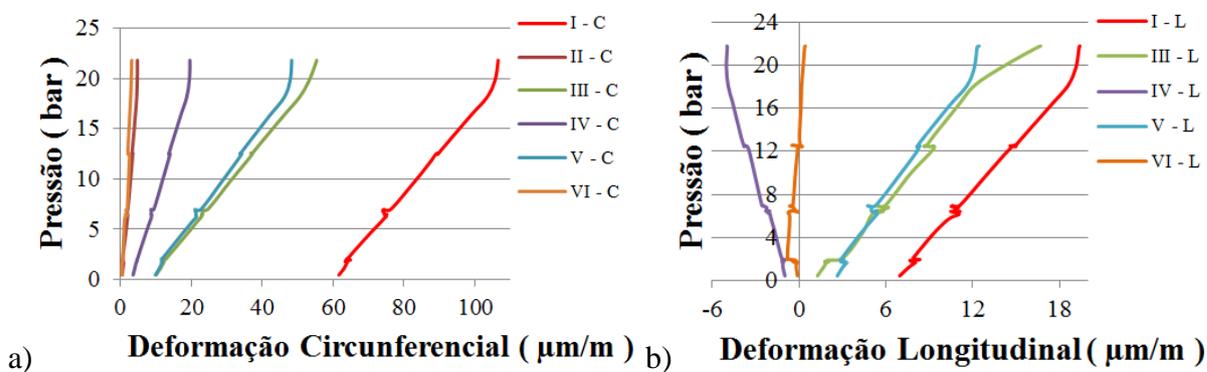
Desde o patamar de estabilização até o último patamar, observa-se que o extensômetro (iv) no sentido longitudinal do *clamp* indicou deformações negativas. Devido às deformações circunferenciais do extensômetro (iv) serem maiores que as deformações circunferenciais do extensômetro (ii), o *clamp* acabou fletindo na extremidade, assim, tendendo a diminuir seu comprimento, e, conseqüentemente obtendo deformações negativas.

Observa-se também, que as deformações do extensômetro (iv) no sentido circunferencial do *clamp* foram maiores em relação aos extensômetros (ii) e (vi) no sentido circunferencial. Um fato que pode ser relacionado a este comportamento, é que a região onde está localizado o extensômetro (iv) possui espessura de resina menor que na região central, onde estão localizados os extensômetros (ii) e (vi), desta forma, a resina estaria absorvendo menos deformação naquela região. Já no duto, como era esperado, o extensômetro (i) no sentido circunferencial localizado na região central, próximo do defeito, indicou as maiores deformações em relação aos extensômetros (iii) e (v). É na direção circunferencial que ocorre o maior esforço durante a pressurização, e é nesta direção que ocorrem as maiores deformações, o que inibe o crescimento da deformação axial. De acordo com Silva (2015), em dutos de grandes comprimentos, as deformações longitudinais normalmente são desprezíveis em comparação com as deformações circunferenciais. Em função do fechamento das extremidades do corpo de prova, foi possível determinar as deformações longitudinais.

Figura 82 – Gráfico pressão interna (bar) x tempo (min)



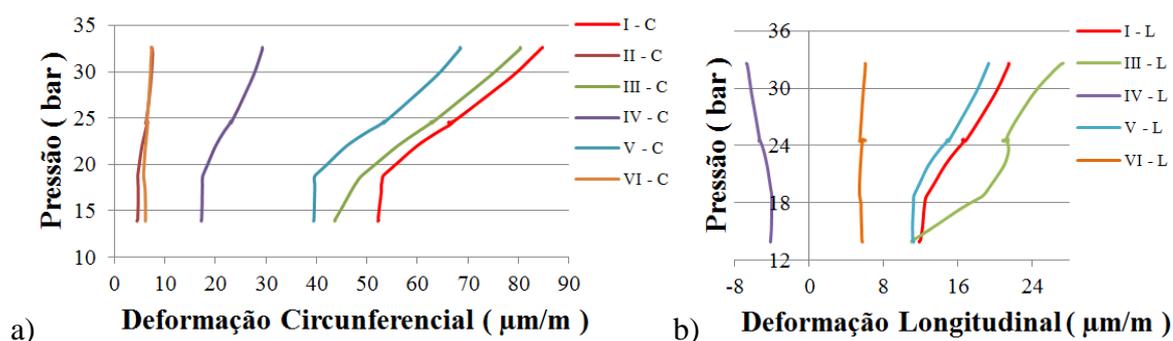
Fonte: Próprio Autor

Figura 83 – Resultados do patamar de estabilização do sistema: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 84 são apresentados os resultados de deformação em relação ao 1º patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 32 bar. Conforme mostrado na Figura 82, verifica-se que após 20 min, a pressão baixou gradativamente até aproximadamente 18 bar. Neste momento, conforme mostrado na Figura 85, verificou-se o início de um vazamento na forma de gotas de água, o qual é muito pequeno, dificultando a sua visualização. Após verificado o vazamento, continuou-se o ensaio para os demais patamares de pressão com o intuito de verificar o comportamento do método desenvolvido. Conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 82, nos demais patamares, à medida que se aumentava a pressão, aumentava a velocidade de depressurização devido ao vazamento. Para os demais patamares, devido ao vazamento, não foi possível controlar o tempo descrito no procedimento do item 5.2.3.

Figura 84 – Resultados do 1º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



Fonte: Próprio Autor

Figura 85 – Imagem da câmera de vídeo no momento que inicia um vazamento na forma de gotas de água

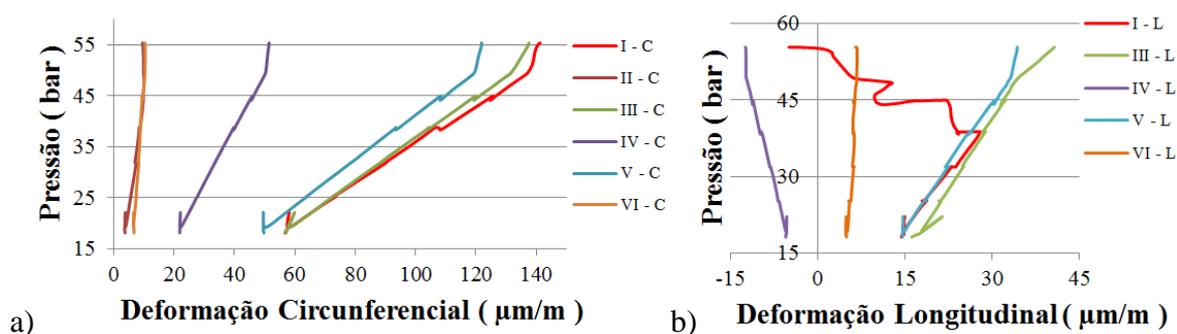


Fonte: Próprio Autor

Na Figura 86 são apresentados os resultados de deformação em relação ao 2º patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 55 bar. Foi possível medir a deformação do extensômetro (ii) no sentido circunferencial, mostrado na Figura 86 (a), até aproximadamente 55 bar, momento em que verificou-se problemas com o extensômetro durante a despressurização resultante do vazamento, indicando uma brusca inflexão a partir de altos valores negativos, o qual, nos próximos patamares, observou-se que as deformações continuaram com altos valores negativos através de curvas aleatórias durante a pressurização e despressurização. Conforme mostrado na Figura 86 (b), verifica-se que foi possível medir as deformações do extensômetro (i) no sentido longitudinal até aproximadamente 38,8 bar durante a pressurização. A partir desta pressão o extensômetro indicou uma inflexão a partir de valores negativos, e durante a despressurização resultante do vazamento, indicou elevados valores negativos de deformação. E nos próximos patamares, observou-se que o extensômetro indicou valores negativos de deformação cada vez maiores através curvas aleatórias durante a

pressurização e despressurização. Além disso, a indicação de deformação linear do extensômetro (i) no sentido circunferencial, mostra que a inflexão da indicação de deformação longitudinal do extensômetro (i) não resulta de um fenômeno físico, mas de um problema de medição do extensômetro, já que a linearidade do sentido circunferencial mostra que a deformação não ultrapassou o regime elástico.

Figura 86 – Resultados do 2º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



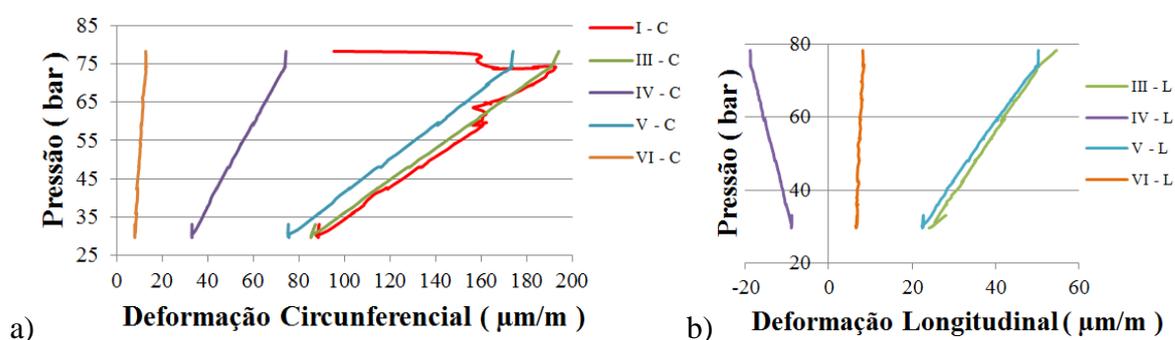
Fonte: Próprio Autor

Na Figura 87 são apresentados os resultados de deformação em relação ao 3º patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 78 bar. A partir deste patamar, observa-se na Figura 87 (a), que foi possível medir a deformação do extensômetro (i) no sentido circunferencial até aproximadamente 74 bar durante a pressurização. A partir desta pressão o extensômetro indicou uma inflexão, e durante a despressurização resultante do vazamento, indicou elevados valores negativos de deformação. A inflexão da indicação de deformação não resulta de um fenômeno físico, mas de um problema de medição do extensômetro, já que a linearidade mostra que não houve deformação plástica. Para os próximos patamares, observou-se o mesmo problema descrito na perda do extensômetro (i) no sentido longitudinal.

Na Figura 88 são apresentados os resultados de deformação em relação ao 4º patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 104 bar. Foi possível medir a deformação do extensômetro (vi) tanto no sentido circunferencial quanto longitudinal, até aproximadamente 104 bar, momento em que verificou-se problemas com o extensômetro durante a despressurização resultante do vazamento, indicando uma brusca inflexão a partir de

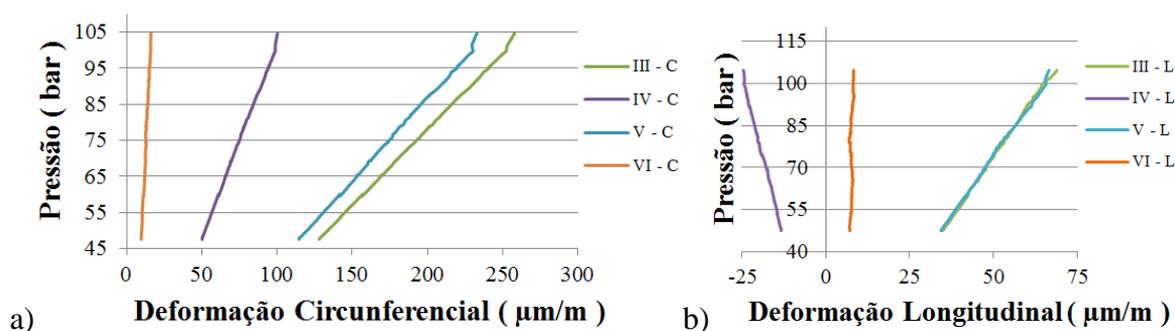
altos valores negativos. Para os próximos patamares, em ambos os sentidos, observou-se o mesmo problema descrito na perda do extensômetro (ii) no sentido circunferencial.

Figura 87 – Resultados do 3º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



Fonte: Próprio Autor

Figura 88 – Resultados do 4º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



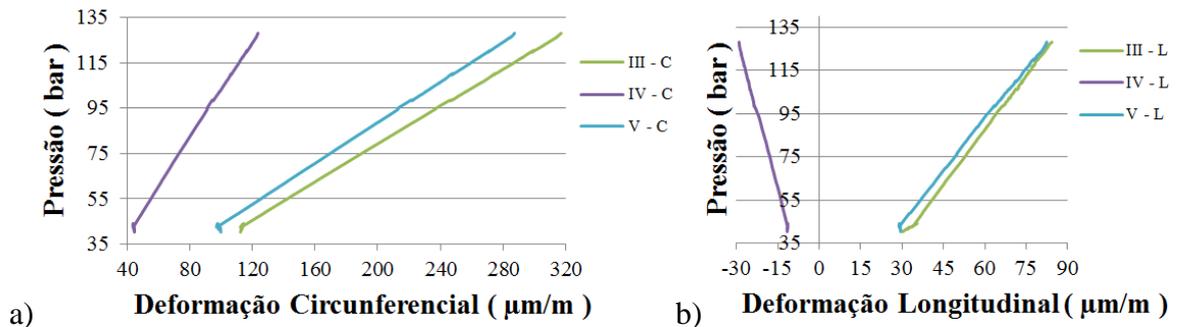
Fonte: Próprio Autor

Na Figura 89 são apresentados os resultados de deformação em relação ao 5º patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 128 bar. Nesta pressão, conforme mostrado na Figura 90, observou-se o aumento do vazamento a partir de jatos de água, o qual é muito fino, dificultando a sua visualização.

Na Figura 91 são apresentados os resultados de deformação em relação ao 6º patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 152 bar. Foi possível medir a deformação do extensômetro (v) no sentido longitudinal, mostrado na Figura 91 (b), até aproximadamente 152 bar. Durante a pressurização, o extensômetro indicou pequenas inflexões, e durante a despressurização, resultante do vazamento, o extensômetro indicou

deformações negativas. E a partir dos próximos patamares, o extensômetro indicou novamente deformações com valores positivos, porém com falta de linearidade e curvas aleatórias. A hipótese de haver problemas com o extensômetro neste sentido é mais provável, já que a indicação dos resultados se mostraram inconsistentes.

Figura 89 – Resultados do 5º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



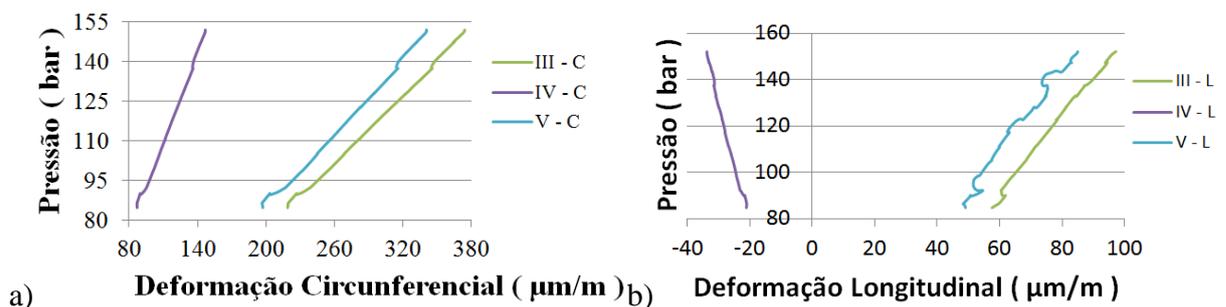
Fonte: Próprio Autor

Figura 90 – Imagem da câmera de vídeo no momento que inicia um vazamento na forma de jato de água



Fonte: Próprio Autor

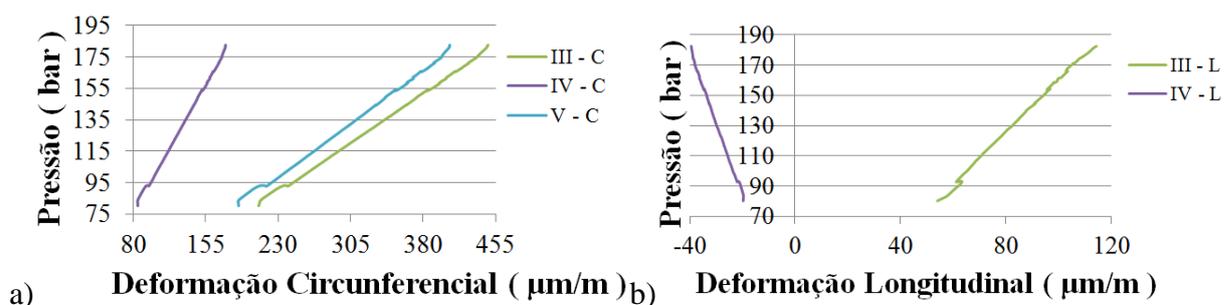
Figura 91 – Resultados do 6º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



Fonte: Próprio Autor

Apresenta-se na Figura 92 os resultados de deformação em relação ao 7º e último patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 182 bar. Nesta pressão, conforme mostrado na Figura 93, observou-se o aumento do número de jatos de água próximos à região de início do vazamento.

Figura 92 – Resultados do 7º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m/m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m/m}$ )



Fonte: Próprio Autor

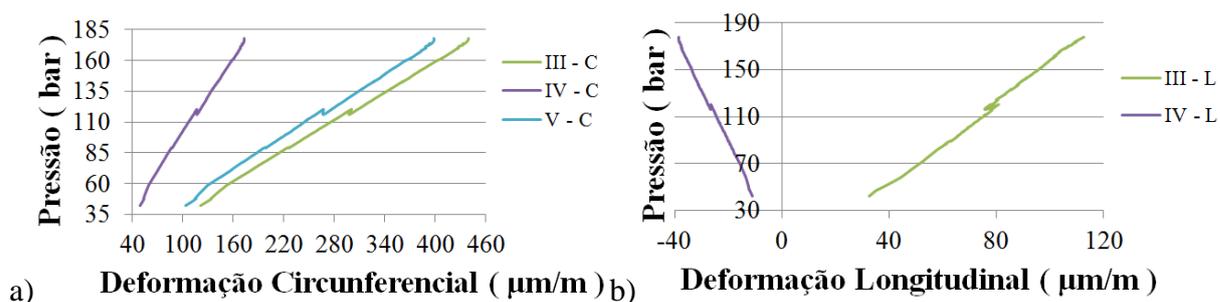
Figura 93 – Imagem da câmera de vídeo no momento que aumenta o vazamento na forma de jato de água



Fonte: Próprio Autor

Após realizado o ensaio do último patamar e verificado que não houve falha total do método, decidiu-se repetir a pressão corresponde ao último patamar. Na Figura 94 são apresentados os resultados de deformação em relação ao 8º patamar do ensaio, correspondente a pressão de aproximadamente 178 bar, o qual observa-se que as deformações são praticamente as mesmas do patamar anterior. A partir da Figura 95 verifica-se que o método de reparo não apresentou falha total, mantendo-se íntegro após a execução do ensaio de pressão.

Figura 94 – Resultados do 8º patamar do ensaio: a) Gráfico pressão interna (bar) x deformação circunferencial ( $\mu\text{m/m}$ ); b) Gráfico pressão interna (bar) x deformação longitudinal ( $\mu\text{m/m}$ )



Fonte: Próprio Autor

Figura 95 – *Clamp* após a realização do ensaio de pressão interna



Fonte: Próprio Autor

Após realizado o ensaio, iniciou-se a tentativa de dissecação através da retirada do *clamp* com o intuito de analisar a causa do vazamento, porém não foi possível a sua retirada devido a resina ter ocupado os espaços das chapas de ancoragem e demais cavidades da parte interna do *clamp*, fazendo com que a meia calha ficasse fixa a partir da resina. Em caso de vazamento, esperava-se que a falha fosse provocada na interface da resina e a superfície do duto, através do líquido pressurizado que vazaria por uma fissura a partir do furo do duto até a extremidade do reparo, porém não observou-se vazamentos nas extremidades. Além disso, em caso de vazamento, os multímetros indicariam mudanças nos valores de resistência devido ao fechamento do circuito ocasionado pelo contato da água com as superfícies do duto e do colar, porém os multímetros não indicaram tais mudanças.

Observou-se que o vazamento aconteceu a partir da lateral do *clamp*. A deformação circunferencial no duto, na região do defeito, ocasionada pela pressurização, pode ter iniciado uma trinca na resina devido a sua rigidez, cujas propriedades são apresentadas no Apêndice A, o qual pode ter se propagado a partir do líquido pressurizado. A baixa pressão no momento da injeção da resina líquida pode ter permitido a presença de vazios ou porosidades, o qual

pode interferir na capacidade do polímero formar uma barreira física contra o vazamento, caso estiverem presentes próximo do defeito, portanto, a pressão exercida durante a aplicação da resina dentro do *clamp* poderá possuir efeito na qualidade do reparo.

Além disso, espera-se que o *clamp* foi totalmente preenchido com resina devido ao controle do volume de resina que foi injetado no seu interior. O volume calculado, considerando o total preenchimento do interior do *clamp*, é equivalente a 11 L. Conforme já mencionado no item 4.4.1 e apresentado no Apêndice A, a resina líquida selecionada possui densidade de  $1,6 \text{ g/cm}^3$ , desta forma, é necessário 17,6 kg de resina para o preenchimento do interior do *clamp*. Porém, preparou-se e injetou-se no seu interior um volume de resina líquida superior ao calculado com o intuito de verificar o seu total preenchimento a partir da mangueira de saída de ar. Após o processo de injeção, como era esperado, observou-se que a mangueira de saída de ar foi preenchida com resina, e, conseqüentemente, mostrando que o *clamp* também foi preenchido com resina.

Os problemas obtidos nos extensômetros durante a realização do ensaio podem ser consequência do ambiente em que se encontravam, ou seja, imersos na resina líquida no momento da injeção, a qual possui temperatura de cura de aproximadamente  $80^\circ\text{C}$ , possível contração da resina durante o processo de cura, e contato com a água devido ao vazamento. No Apêndice E, apresentam-se os gráficos dos extensômetros que não tiveram problemas de medição no ensaio a partir de todos os patamares. Nestes gráficos é possível verificar a linearidade das deformações através dos patamares de elevação de pressão. Assim como os demais, nestes gráficos são apresentadas somente as deformações durante a pressurização.

### **6.2.2 Ensaio Hidrostático com Pressão Externa**

Apresentam-se a seguir, os resultados obtidos no ensaio de pressão externa para os diferentes patamares de pressão, cujo ensaio foi realizado conforme procedimento descrito no item 5.2.3. Durante o ensaio hidrostático, verificou-se através do sistema de aquisição dos dados experimentais que os sinais adquiridos no transdutor de pressão se mostraram inconsistentes, possivelmente devido a problemas no transdutor. Desta maneira, a partir da Tabela 5, apresenta-se os resultados do ensaio através da leitura dos valores de pressão adquiridos diretamente no equipamento para teste hidrostático, onde podem ser vistas as taxas de aumento de pressão. Devido o aumento de pressão ter sido realizado manualmente,

obtiveram-se algumas variações nos valores dos patamares de pressão em relação aos estabelecidos no procedimento.

Verifica-se, através da Tabela 5, que após o tempo estabelecido para cada patamar, a pressão baixou gradativamente em todos os patamares de pressão. Mesmo verificando a queda de pressão nos primeiros patamares, indicando possível entrada de água no interior do duto através dos furos, continuou-se o ensaio para os demais patamares de pressão com o intuito de verificar o comportamento do método desenvolvido.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de pressão externa

Patamares de pressão	Tempo (min)	Pressão inicial (bar)	Pressão final (bar)	Diferença de pressão (bar)
Estabilização do sistema	10	15,2	9,9	5,3
1°	30	33,7	26,8	6,9
2°	30	50,1	42,5	7,6
3°	30	75,0	67,2	7,8
4°	30	100,0	91,4	8,6

Fonte: Próprio Autor

Conforme mostrado na Figura 96, após realizado o ensaio do último patamar, despressurizou-se o sistema, retirou-se a água do interior da câmara hiperbárica, e em seguida retirou-se o corpo de prova. Para a verificação de entrada de água no interior do duto, realizou-se um corte em uma das suas extremidades com o auxílio de uma esmirilhadeira. Conforme mostrado na Figura 97 (a), verificou-se que o duto estava com aproximadamente a metade do seu interior preenchido com água. Desta forma, comprova-se que a diminuição da pressão durante os patamares do ensaio foi resultado da entrada de água no interior do corpo de prova. Observa-se, a partir da diferença de pressão mostrada na Tabela 5, que conforme se aumentava a pressão, aumentava a velocidade de entrada de água no interior do duto. A entrada de água pode representar a falha na interface da resina com a superfície do duto até a região central do reparo onde estão localizados os furos. A falha na interface metal/resina pode ser devido à tensão que a água pressurizada provoca em todas as direções.

Figura 96 – a) Esvaziamento da câmara hiperbárica; b) Retirada do corpo de prova do interior da câmara hiperbárica



Fonte: Próprio Autor

De acordo com a Figura 97 (b), verifica-se que o método de reparo não apresentou falha total, mantendo-se íntegro após a execução do ensaio de pressão. A baixa pressão no momento da injeção da resina líquida pode ter sido uma das causas da falha, pelos mesmos motivos descritos nos resultados do ensaio de pressão interna. Além disso, conforme já elucidado nos resultados do ensaio de pressão interna, espera-se que o *clamp* foi totalmente preenchido com resina devido ao controle do volume de resina que foi injetado no seu interior.

Figura 97 – a) Realização do corte da extremidade do duto para verificação de entrada de água; b) *Clamp* após a realização do ensaio de pressão externa



Fonte: Próprio Autor

De posse dos resultados dos testes de funcionamento do método e da ferramenta, e dos resultados dos ensaios hidrostáticos de avaliação do método, garantiu-se a integridade do desenvolvimento através de pedidos de depósito de patente junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) conforme apresentados no Apêndice C e Apêndice D.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho é um primeiro passo no desenvolvimento de uma ferramenta e de um método que possibilitem operações submarinas com segurança em *risers* através de mergulhadores ou ROVs. Ao longo deste estudo, realizou-se o projeto, construção, e testes de funcionamento da ferramenta e do método em um duto rígido. E para a avaliação do comportamento do método, realizaram-se ensaios hidrostáticos de pressão interna e externa no reparo de um duto rígido. Desta forma, através dos resultados obtidos, garantiu-se a integridade do desenvolvimento através de dois pedidos de depósito de patente junto ao INPI, e chegaram-se as seguintes conclusões:

- Após melhorias no projeto, processo de fabricação e alteração do material polimérico, o *clamp* projetado e construído mostrou-se adequado para sua aplicação em *risers*, tanto no reparo quanto na proteção do sistema de monitoramento, permitindo o seu acoplamento e montagem no duto de forma satisfatória, e montagem e fixação de um colar de sensores por ondas guiadas bipartido no seu interior através dos insertos da estrutura metálica;
- No processo de injeção de resina líquida no interior do *clamp*, observou-se que o método desenvolvido apresentou ser eficiente como recipiente para a resina, porém verificou-se que quanto menor a ovalização do *clamp* na região do assentamento das borrachas, menor será a possibilidade de vazamentos;
- A ferramenta mostrou-se de fácil construção a partir de simples processos de fabricação, e de fácil montagem a partir de componentes padronizados;
- A ferramenta projetada e construída mostrou-se adequada para a aplicação automática de um *clamp* bipartido em *risers*. A ferramenta permitiu ajustar a posição dos componentes da estrutura interna, garantindo, assim, a concentricidade das meias calha em relação ao duto no momento do seu acoplamento. A partir dos testes de acoplamento e desacoplamento da ferramenta, conseguiu-se fixar o *clamp* em torno de um duto rígido, e verificar o satisfatório funcionamento dos mecanismos;
- Os ensaios hidrostáticos de pressão interna e externa mostraram que a pressão não se manteve constante durante a realização dos ensaios, e, a partir dos ensaios, foi possível verificar a ocorrência de vazamentos, indicando, assim, que não foi possível manter a estanqueidade a partir dos valores de pressão estabelecidos. No ensaio de

pressão interna, devido à rigidez da resina, a deformação circunferencial no duto pode ter iniciado uma trinca que se propagou a partir do líquido pressurizado ocasionando um vazamento pela lateral do método. No ensaio de pressão externa, o motivo do vazamento pode ter sido a falha na interface da resina com a superfície metálica devido à tensão que a água pressurizada provoca em todas as direções. A baixa pressão no momento da injeção da resina líquida em ambos os ensaios, pode ter permitido a presença de vazios ou porosidades, o qual pode interferir na capacidade do polímero formar uma barreira física contra o vazamento. Além disso, verificou-se a partir da comparação do volume de resina injetada no interior do *clamp* em relação ao volume calculado, que o seu interior foi preenchido;

- A avaliação do comportamento do método através do ensaio hidrostático de pressão interna indicou que a partir dos valores de pressão estabelecidos, as deformações lidas pelos extensômetros mantiveram certa linearidade até o final do ensaio, ou até a pressão a qual se tem leituras de deformação, desta forma, verificou-se que as deformações não ultrapassaram o regime elástico tanto do duto quanto do *clamp*. Assim, verificou-se que no regime elástico, a resina utilizada acaba absorvendo as deformações, pois o *clamp* apresentou valores de deformação menores que o duto;
- Após a execução dos ensaios hidrostáticos de pressão interna e externa a partir dos valores de pressão estabelecidos e da resina utilizada, verificou-se que o *clamp* manteve-se íntegro.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste projeto de pesquisa levantou algumas possibilidades que podem gerar trabalhos futuros:

- Aplicar um reparo em *riser* flexível com dano na camada externa polimérica e realizar ensaios hidrostáticos para avaliação do método;
- Estudar e testar diferentes resinas ou misturas quanto à adesão para aplicação na restauração da estanqueidade da camada externa polimérica danificada e controle da corrosão das armaduras metálicas de *riser* flexível, e proteção de sistemas de monitoramento em *risers* rígidos;
- Realizar testes de acoplamento e fixação do *clamp* com a ferramenta em dutos submersos;
- Desenvolver sistema a partir de flutuadores fixados na estrutura externa da ferramenta que permita aumentar a flutuabilidade, e a ferramenta então ser elevada a superfície;
- Desenvolver suporte fixado na estrutura externa da ferramenta considerando a sua interface com mergulhador e ROV, permitindo, assim, o seu manuseio e operação quando submerso;
- Desenvolver sistema hidráulico fixado na estrutura externa que permita a abertura e fechamento da ferramenta de forma automatizada;
- Adaptar sistema de câmeras de vídeo na ferramenta com o objetivo de permitir o monitoramento da operação submarina;
- Desenvolver sistema fixado na estrutura externa da ferramenta para armazenar, misturar, e aplicar a resina ou mistura polimérica líquida com emprego de pressão no preenchimento do *clamp*, e, assim, movimentar a resina ou mistura em direção às armaduras expostas retirando a água do mar do seu interior, e realizando a vedação da região do dano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

4SUBSEA. **Repair clamps**. Disponível em: <<https://www.4subsea.com/solutions/flexible-risers/epic/>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

ALMIRÓN, A. J. **Estudo preliminar comparativo do efeito da espessura no comportamento em fadiga de arames de armadura de tração de risers flexíveis**. 2010. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 17B**: recommended practice for flexible pipe. Washington, 2002.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5L**: specification for line pipe. Washington, 2004.

ARALSUL. **Resinas especiais para um mundo em expansão**. Disponível em: <<http://www.aralsul.com.br/home.html>>. Acesso em: 03 ago. 2017.

ÁVILA, G. G. **Cálculo de fadiga de risers rígidos através da mecânica da fratura**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

AWAD, S. P.; CORDEIRO, A. L.; RODRIGUES, R. S. Operações com veículos remotos em águas profundas. In: 2º ENCONTRO TÉCNICO INTERDEPARTAMENTAL SOBRE EXPLORAÇÃO EM ÁGUAS PROFUNDAS, Rio de Janeiro, 1989.

BABOIAN, R. **Corrosion engineers reference book**. 3. ed. Houston: NACE, 2002.

BACK, N. *et al.* **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. 1. ed. Barueri: Manole, 2008.

BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea pipeline integrity and risk management**. 1. ed. Waltham: Gulf Professional Publishing, 2014. 428 p. ISBN: 978-0-12-394432-0.

BETANZOS, J. T. **Projeto, construção e teste de equipamento para ensaios de fadiga de riser flexível**. 2004. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em

Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BOGARIN, J.A.G.; EBECKEN, N.F.F. Integration of knowledge sources for flexible pipe evaluation and design. **Expert Systems With Applications**, [S.l], v. 10, n. 1, p. 29-36, 1996.

BOTTOM TIMER. **Diver school**. Disponível em:  
<<http://www.bottomtimer.com/2015/09/dive-school-week-1-2.html>>. Acesso em: 23 jul. 2017.

BOSCHEE, P. Best practices for flexible pipe integrity evolve. **Oil & Gas Facilities. Society of Petroleum Engineers**, [S.l], v. 1, n. 21, 2012.

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, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CAMERINI, C. Inspeção e monitoração de dutos flexíveis. In: I WORKSHOP SOBRE TECNOLOGIAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, Porto Alegre: UFRGS, 2006.

CAMPELLO, G. C. **Metodologia de projeto para o sistema de ancoragem de conectores de dutos flexíveis e proposição de nova tecnologia**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CARNEVAL, R.O.; MARINHO, M. G.; SANTOS, J. M. Flexible line inspection. In: 9<sup>th</sup> EUROPEAN NDT CONFERENCE, 2006, Berlin, Alemanha. **ECNDT** (Poster 106), 2006.

CARRO, C. P. U. **Estudo da corrosão de um aço carbono através da análise de ruído eletroquímico**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CHRIST, R. **The ROV manual**: a user guide for observation class remotely operated vehicles. 1. ed. Massachusetts: Elsevier, 2007. ISBN 0750681489.

CISER. **Informações técnicas**. Disponível em:

<[http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/tabela-de-precos/br/informacoes\\_tecnicas.pdf](http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/tabela-de-precos/br/informacoes_tecnicas.pdf)>.

Acesso em: 03 set. 2017.

COHEN, M.; HANSEN, S. S. Microstructural control in microalloyed steels. MiCon 78: Optimization of Processing, Properties and Service Performance Through Microstructural Control, American Society for Testing and Materials Special Technical Publication 672, p. 34-52, 1979.

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS. **CONTEC N-2409**: flexible pipe specification. Rio de Janeiro, 1994.

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS. **CONTEC N-2409**: specification for flexible pipe. Rio de Janeiro, 2004.

CONCAWE. **Western european cross-country oil pipelines 30 – year performance statistics**. Conservation of Clean Air and Water in Europe, 2002.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n° 1, p. 1-13, 2003.

CORRÊA, L. de A. **Estudo de propagação de ondas em tubos epóxi reforçado com fibra de vidro**. 2014. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CORRÊA, M. B. **Avaliação da resistência a corrosão-fadiga do aço API 5L X60 em ambiente pressurizado contendo CO<sub>2</sub>**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

COSTA MATTOS, H. S. da; PAIM, L. M.; REIS, J. M. L. Analysis of burst tests and long-term hydrostatic tests in produced analysis of burst tests and long-term hydrostatic tests in produced water pipelines. **Engineering Failure Analysis**, [S.l.], v. 22, p. 128-140, June 2012.

DET NORSKE VERITAS. **DNV-OS-F201**: offshore standard: dynamic risers. 2010.

DINIZ, J. L. C. *et al.* Análise experimental e numérica da ruptura de dutos. In: 6° CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 2002. **Anais do 6° COTEQ**, 2002.

DINIZ, J. L. C. *et al.* Stress and strain analysis of pipelines with localized metal loss. **Exp. Mech.**, [S.l.], v. 46, n. 6, p. 765–775, Dec. 2006.

DIPEBOR. **Tabela de informações técnicas**. Disponível em: <<http://dipebor.com.br/>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

DOMINGUES, H. C. N. **Estudo do comportamento eletroquímico do aço carbono, em meio de bicarbonato de sódio e gás carbônico, utilizando a técnica do ruído eletroquímico**. 2010. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

EPHOXAL. **Ephoxal technology**. Disponível em: <<http://www.ephoxal.com.br/Home.htm>>. Acesso em: 03 ago. 2017.

FARO, A. A. S. **Desenvolvimento de tubos compósitos produzidos por enrolamento filamentar para possíveis aplicações como risers rígidos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FELIPPES, B. A. de. **Estudo do comportamento mecânico de dutos de aço com reparos compósitos híbridos**. 2010. 227 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. **Handbook on design and operation of flexible pipes**. 3 ed. Trondheim: NTNU, 4Subsea and SINTEF Ocean, 2017.

FLEXLIFE. **Flexlife pipe – inspection, monitoring and repair**. Disponível em: <<http://www.flexlife.co.uk/services-and-solutions/flexible-pipe-inspection-monitoring-repair/repair>>. Acesso em: 21 jul. 2017a.

FLEXLIFE. **Flexible riser outer sheath repair**. Disponível em: <<http://www.flexlife.co.uk/services-and-solutions/case-studies/subsea-technology-solutions/113-flexible-riser-outer-sheath-repair>>. Acesso em: 24 jul. 2017b.

FLEXLIFE. **Flexguard ROV deployment**. Disponível em: <<http://www.flexlife.co.uk/services-and-solutions/case-studies/subsea-technology-solutions/121-flexguard-rov-deployment>>. Acesso em: 24 jul. 2017c.

FLEXLIFE. **UT Scanning**. Disponível em: <<http://www.flexlife.co.uk/world-firsts/ut-scanning>>. Acesso em: 24 jul. 2017d.

FRM. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <<http://www.sdrolamentos.com.br/catalogos/FRM-023.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2017.

GAMBOA, E.; LINTON, V.; LAW, M. Fatigue of stress corrosion cracks in X60 pipeline steels. **International Journal of Fatigue**, [S.l.], v. 30, n. 5, p. 850–860, 2008.

GEREMIA, G. **Sistema autônomo de inspeção de dutos**. 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

JACQUES, R. C. **Avaliação de parâmetros de emissão acústica para monitoramento de risers flexíveis**. 2009. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

JOEL, J. **Reinforcing wire corrosion in flexible pipe**. Health & Safety Laboratory, Buxton, 2009.

JOHN CLARKE. **Redundancy – a life saver in diving and aviation**. Disponível em: <<http://johnclarkeonline.com/2014/11/01/redundancy-a-life-saver-in-diving-and-aviation/>>. Acesso em: 23 jul. 2017.

KALATEC. Motores Bosch. Disponível em: <[http://www.kalatec.com.br/Motor\\_Bosch/F006\\_WM0\\_310.pdf](http://www.kalatec.com.br/Motor_Bosch/F006_WM0_310.pdf)>. Acesso em: 13 jul. 2017

LAGE, Y. E. *et al.* Deepwater NDT technology for pipes and tubular structures. **Pipeline Technology Journal**, [S.l.], p. 14-21, Nov. 2016. ISSN 2196-4300.

LEMOS, C. A. D. de. **Análise de fadiga em risers flexíveis**. 2005. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LERUS TRAINING. **ROV: classification, tasks e tools**. Disponível em: < <https://www.lerus-training.com/blog/offshore-operations/rov-classifications-%E2%97%8F-tasks-%E2%97%8F-tools/>>. Acesso em: 23 jul. 2017.

MARINHO, M. G. *et al.* Surface monitoring techniques for a continuous flexible riser integrity assessment. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 18946, 2007, Houston, Texas, USA. **Proceedings OTC-18946-PP**, 2007.

MENICONI, L. *et al.* Análise do desempenho de sistemas de reparo de dutos por materiais compostos. 5° CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 2000, Salvador. **Anais do 5° Coteq**, 2000.

MENICONI, J. *et al.* **Reparação de defeitos internos e externos em dutos através de mangas externas de materiais compostos fornecidas pela Strongback**. [S.l.], Jun. 2002. Disponível em: <<http://www.optec.com.br/docs/Relatorio%20Strongback.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2017.

MUDGE, P. J. **RiserTest**: development of a guided wave long range ultrasonic inspection system for the examination of offshore sub-sea risers, steel catenary risers (SCR) and flowlines. Cambridge: TWI, 2008. 20 f. Publishable Final Activity Report - Publishable Final Activity Report.

NETO, J. B. O.; DALLA COSTA, A. J. A Petrobras e a exploração de petróleo offshore no Brasil: um approach evolucionário. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 61. n. 1, Jan./Mar. 2007.

NETTO, T.; FERRAZ, U.; BOTTO, A. On the effect of corrosion defects on the collapse pressure of pipelines. **International Journal of Solid and Structures**, [S.l.], v. 44, p. 7597–7614, 2007.

NICC SYSTEMS. **Corrosion protection**. Disponível em: <<http://www.armawrap.com/corrosion.htm>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

OLIVER, P. Nauti Nitrox Diver em Português. **National Association of Underwater Instructors (NAUI)**, 2005.

OUT, J. M. M. *et al.* The integrity of flexible pipe: search for an inspection strategy. **Engineering Structures**. [S.l.], v. 17, n. 4, p. 305-314, 1996.

OUT, J. M. M. *et al.* The integrity of flexible pipe: search for an inspection strategy. **Engineering Structures**, [S.l.], v. 17, n. 4, p. 305-314, 1995.

PAIM, L. M. **Análise de ensaios hidrostáticos e dimensionamento de sistemas de reparo com materiais compósitos**. 2014. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2014.

PERRUT, V. A. **Ensaio para estudo da durabilidade de reparos de material compósito em dutos**. Programa Tecnológico de Dutos PRODUT - CENPES Petrobras, 2010.

PETRY, G. **Comparação do efeito de retardo de trinca por sobrecarga entre corpos de prova CT e trincas em dutos reais**. 2011. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PICKSLEY, J. W. *et al.* Managing the integrity of flexible pipe field systems: industry guidelines and their application. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2002. **Proceedings OTC-14064**, 2002.

MARINHO, M. G. *et al.* Surface monitoring techniques for a continuous flexible riser integrity assessment. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 18946, 2007, Houston, Texas, USA. **Proceedings OTC-18946-PP**, 2007.

QINGQUAN, D. *et al.* Hydrostatic burst test of X80 grade steel pipe. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [S.l.], v. 22, n. 2, 2009.

ROSAS, M. A. P. **Avaliação de dutos com perda de espessura reparados com multicamadas metálicas coladas**. 2006. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ROSAS, M. A. P. **Avaliação de modelos do comportamento de reparo do tipo luva em dutos com defeitos de perda de espessura**. 2010. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ROTODESIGN. **Para designers**. Disponível em:  
<<https://rotodesign.wordpress.com/paradesigners/>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

RUBIN, A.; GUDME, J. Qualification of steel wire for flexible pipes. In: 61st ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION - CORROSION, 2006. **Proceedings NACExpo2006 (Paper No. 06149)**, 2006.

SAMPAIO, R. F. **Análise da influência do fechamento em dutos elastoplásticos reforçados com materiais compósitos de matriz polimérica**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

SAMPAIO, R. F. **Desenvolvimento de uma metodologia de reparo de defeitos transpassantes em dutos metálicos com adesivo epóxi**. 2009. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

SHANMUGAM, S. *et al.* Microstructure and high strength-toughness combination of a new 700MPa Nb-microalloyed pipeline steel. **Materials Science and Engineering**, [S.l.], v. 478, p. 26-37, 2008.

SHIGLEY, J. E; MISCHKE, C. R; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SIG. **g-PIMS**. Disponível em: < <http://subsea-integrity.com/G-PIMS.asp#>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

SILVA, L. A. M. T da. **Análise da camada interna de um tubo flexível submetido à carregamentos externos**. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

SILVA, M. de C. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curva J-R para avaliação de tenacidade a fratura**. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SILVA, M. L. da. **Análise de dutos metálicos com defeitos de corrosão**. 2015. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

SOUSA, J. R. M. *et al.* Structural response of a flexible pipe with damaged tensile armor wires under pure tension. **Marine Structures**, [S.l.], v. 39, p. 1-38, 2014.

SOUZA, N. C. A. **Modelagem, navegação e localização de robô subaquático utilizando filtros não paramétricos**. 2014. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração em Sistemas Mecatrônicos, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

STEPINSKI, T. **Structural health monitoring of piping in nuclear power plants: a review of efficiency of existing methods.** Sweden: Uppsala University, 2011. ISSN 2000-0456.

STRUCTURAL INTEGRITY. **Guided wave testing with permanently installed monitoring systems (PIMS).** Disponível em:

<<https://www.structint.com/competency/nondestructive-examination/products-and-services/guided-wave-testing-technology/gpims>>. Acesso em: 26 jul. 2017.

SUBC. **Riser BM repair.** Disponível em: <<http://www.subcpartner.com/subsea-engineering/riser-bm-repair>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

SUBSEA. **Major structural pipeline repair clamp order for subsea innovation.**

Disponível em: <<http://www.subsea.co.uk/news-events/141-major-structural-pipeline-repair-clamp-order-for-subsea-innovation>>. Acesso em: 24 jul. 2017.

TALGATTI, O. L. **Instabilidade radial em dutos flexíveis com defeitos na bandagem de altas resistência sujeitos a cargas axiais compressivas.** 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

TDW. **Offshore services – subsea remote controlled clamp installation tool.** Disponível em: <<http://www.tdwilliamson.ru/uslugy/raboty-na-shelfe>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

TWI. **Teletest permamount - guiding the wave of innovation.** Disponível em:

<<http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/teletest-permamount-guiding-the-wave-of-innovation-565/>>. Acesso em: 26 jul. 2017a.

TWI. **Development of a permanent installation tool for structural health monitoring.**

Disponível em: <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/development-of-a-permanent-installation-tool-for-structural-health-monitoring-september-2008/>>. Acesso em: 27 jul. 2017b.

VALIM, M. T. Tenacidade a fratura da junta soldada obtida a arco submerso de aço API 5L Grau X-80. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

VENTRELLA, V. A.; ALCÂNTARA, N. G. de; FERREIRA, M. H. M. Microestrutura do metal de solda do aço API X-70 soldado com arame tubular AWS E-81T1-Ni. In: XXVII CONSOLDA, 2001, Campinas-SP. **Anais do XXVII Congresso Nacional de Soldagem**, 2001.

**WALLAUER, F. A. Materiais para aplicação em arames da armadura de tração de dutos flexíveis – comportamento frente a entalhes.** 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

**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, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

**ZILIO, J. L. Avaliação da resistência à corrosão-fadiga no aço API 5L X60 em meio aquoso salino.** 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## APÊNDICE A – Ensaio de Pressão em Resinas Epóxis

Embora esta dissertação não tenha como objetivo o estudo da resina mais adequada ou da mistura mais adequada de produtos anticorrosivos para aplicação na restauração da estanqueidade da camada externa polimérica danificada e controle da corrosão das armaduras metálicas de *riser* flexível, e proteção de sistemas de monitoramento em *risers* rígidos, realizou-se alguns ensaios de pressão em dois tipos de resinas pré-selecionadas com o intuito de verificar o seu comportamento quando submetido à pressão hidrostática.

Os ensaios visam verificar o comportamento da resina em relação à aderência na superfície do aço, e em diferentes tipos de cabos utilizados no sistema de monitoramento, os quais estarão envolvidos pela resina. As especificações das resinas bi componentes e os respectivos endurecedores selecionados para os testes são as seguintes: resina Aral 1457 e endurecedor Aral 951 fabricado pela empresa Aralsul (2017), e resina RCC EX 177 e endurecedor HCL EX 406 fabricado pela empresa Ephoxal (2017).

Para a construção dos corpos de prova, utilizaram-se conectores tipo macho 3/4" JIC 37° x 3/4" JIC 37°, no qual montou-se os cabos de forma concêntrica nos furos dos mesmos. Realizou-se a montagem dos cabos nos conectores com o auxílio de tampões montados nas extremidades dos conectores, os quais também possuem a função de manter a resina líquida no interior do conector.

Inicialmente, com a utilização de álcool, realizou-se a limpeza das superfícies dos conectores e dos cabos que terão contato com a resina. Realizou-se a preparação e mistura da resina e endurecedor conforme especificações dos fornecedores, o qual possuem a proporção de mistura de 100 partes de resina por 5 partes de endurecedor, e que devem ser misturados por aproximadamente 5 min para obter uma homogeneização satisfatória. Por último, realizou-se o procedimento de resinagem dos conectores, e após a cura da resina, retiraram-se os tampões para a realização dos ensaios.

Na Figura 98 são apresentados os conectores já resinados de acordo com a Tabela 6. Observa-se que nas amostras 1 e 3, no qual foi utilizado o cabo coaxial, a extremidade que estará sob alta pressão está vedada com resina para evitar que durante o ensaio ocorra vazamento pela parte interna da capa do cabo.

Para a conexão dos corpos de prova na mangueira do equipamento para teste hidrostático, utilizou-se um conjunto de adaptadores tipo macho e uma luva tipo fêmea. Antes de iniciar os

ensaios, realizou-se o processo de remoção de ar do sistema. Para garantir a segurança, os ensaios foram realizados em um *bunker*, conforme mostrado na Figura 99, com o auxílio de um equipamento para teste hidrostático da marca Flutrol com capacidade de 350 bar, de uma câmera de vídeo instalada no interior do *bunker*, e de um *notebook* conectado a câmera permitindo a observação do ensaio.

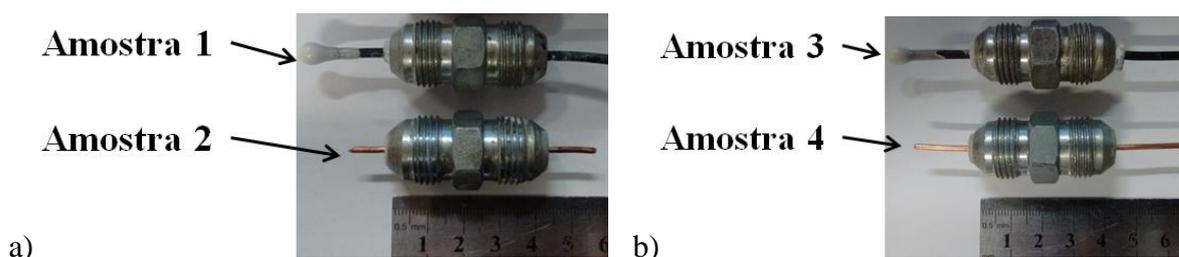
A análise dos resultados dos ensaios de pressão baseou-se no valor de pressão que iniciava o vazamento, considerando falha qualquer indício de vazamento de água nas amostras. Os procedimentos para a realização dos ensaios foi o mesmo para todas as amostras. A seguir são apresentados os resultados do ensaio a partir de imagens da pressão no equipamento no momento da falha, e imagens da câmera de vídeo das amostras no interior do *bunker* no momento da falha.

Tabela 6 – Descrição das amostras utilizadas nos ensaios de pressão

Amostras	Características das amostras	
	Tipo de cabo	Tipo de resina
Amostra 1	Cabo coaxial de diâmetro 3 mm	Resina Aral 1457 e endurecedor Aral 951
Amostra 2	Fio rígido de cobre de diâmetro 2 mm	Resina Aral 1457 e endurecedor Aral 951
Amostra 3	Cabo coaxial de diâmetro 3 mm	Resina RCC EX 177 e endurecedor HCL EX 406
Amostra 4	Fio rígido de cobre de diâmetro 2 mm	Resina RCC EX 177 e endurecedor HCL EX 406

Fonte: Próprio Autor

Figura 98 – Amostras após o processo de resinagem: a) Amostras 1 e 2; b) Amostras 3 e 4



Fonte: Próprio Autor

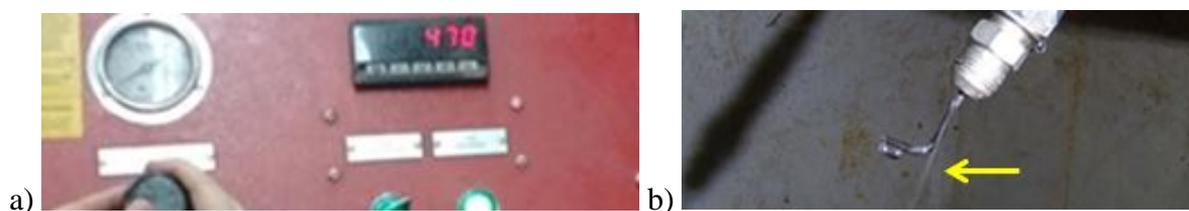
Figura 99 – Equipamentos e instalações utilizadas nos ensaios



Fonte: Próprio Autor

Os testes iniciaram-se a partir da Amostra 1, aumentando-se gradativamente a pressão no equipamento. Neste ensaio, observou-se através da câmera conectada ao *notebook*, que o vazamento iniciou-se a partir de 470 psi (32,40 bar) conforme mostrado na Figura 100. De acordo com as observações, a falha ocorreu a partir da permeação de água, indicado pela seta, entre a resina e a capa externa do cabo coaxial.

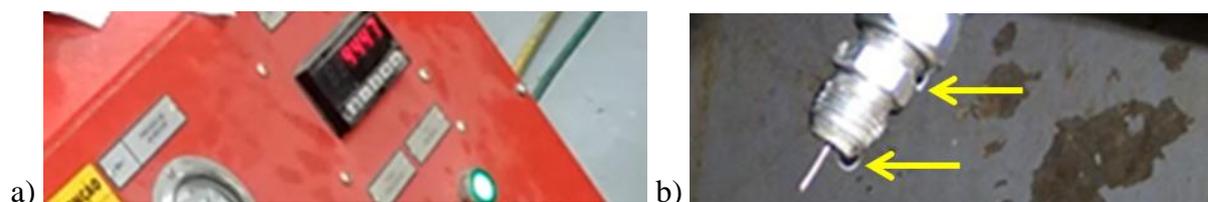
Figura 100 – Resultado do ensaio da Amostra 1: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do *bunker* no momento da falha



Fonte: Próprio Autor

No ensaio realizado na Amostra 2, aplicou-se pressão até 4447 psi (306,61 bar), não ocorrendo falha. Então manteve-se a pressão constante por aproximadamente 15 min, quando constatou-se uma possível falha por vazamento. No entanto, ao analisar-se o vídeo pós-ensaio, verificou-se que não foi possível afirmar se realmente houve falha, ou se o gotejamento observado durante o ensaio, indicado pelas setas, foi proveniente de um vazamento em conexões adjacentes, conforme mostrado na Figura 101.

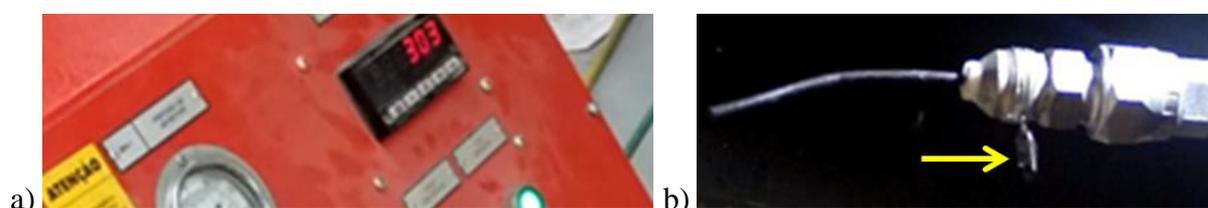
Figura 101 – Resultado do ensaio da Amostra 2: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do *bunker* no momento da falha



Fonte: Próprio Autor

Já na Amostra 3, aplicou-se pressão até 303 psi (20,89 bar), momento em que observou-se o vazamento indicado pela seta mostrado na Figura 102. De acordo com as observações, a falha ocorreu a partir da permeação de água entre a resina e a capa externa do cabo coaxial.

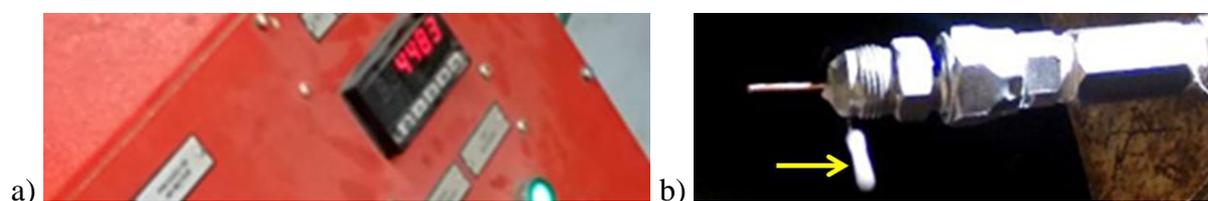
Figura 102 – Resultado do ensaio da Amostra 3: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do *bunker* no momento da falha



Fonte: Próprio Autor

Finalmente, na Amostra 4, aplicou-se pressão até 4483 psi (309,09 bar), não ocorrendo falha. Então manteve-se a pressão constante, e em aproximadamente 15 min, constatou-se uma possível falha por vazamento. Porém ao analisar-se o vídeo pós-ensaio, verificou-se que não foi possível identificar se o vazamento de água ocorreu entre a resina e a superfície do conector, ou entre a resina e a superfície do fio rígido, conforme a seta indicada na Figura 103.

Figura 103 – Resultado do ensaio da Amostra 4: a) Imagem da pressão no equipamento para teste hidrostático no momento da falha; b) Imagem da câmera de vídeo no interior do *bunker* no momento da falha



Fonte: Próprio Autor

De acordo com os ensaios apresentados, verifica-se que ambas as resinas bi componentes obtiveram resultados parecidos, onde a aplicação em fio rígido obteve melhores resultados, desta forma, selecionou-se a de menor custo. A resina bi componente e o respectivo endurecedor selecionado possui a seguinte especificação: resina Aral 1457 e endurecedor Aral 951 fabricado pela empresa Aralsul (2017), cujas propriedades de cura são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades de cura da resina ARAL 1457 e endurecedor ARAL 951

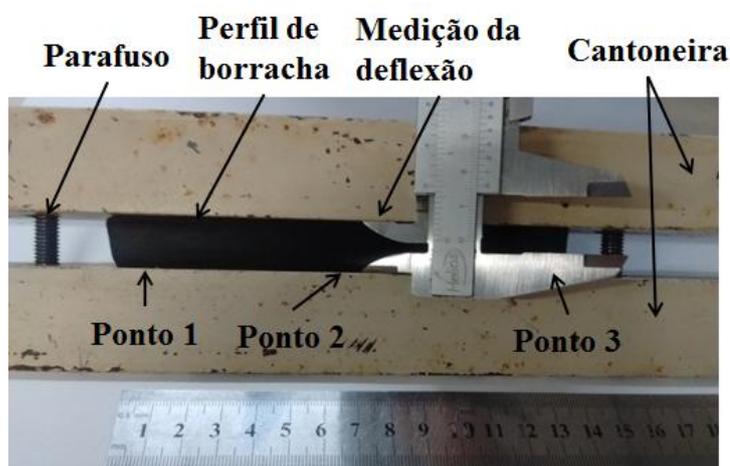
Produto	Propriedades da cura	
Resina ARAL 1457	Viscosidade a 25°C (mPa.s)	25.000,00
	Densidade a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,65 – 1,69
Endurecedor ARAL 951	Viscosidade a 25°C (mPa.s)	30,00
	Densidade a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,97
Resina ARAL 1457 e Endurecedor ARAL 951	Cor	Bege
	Densidade a 25°C de acordo com a norma DIN 55990 (g/cm <sup>3</sup> )	1,60
	Temperatura de transição vítrea (°C)	43,80
	Dureza considerando cura em 2 h a 80°C (Shore D)	85,00
	Temperatura de deflexão térmica de acordo com a norma ISO 75(°C)	44,00
	Resistência à flexão de acordo com a norma ISO 178 (N/mm <sup>2</sup> )	54,00
	Resistência à compressão (N/mm <sup>2</sup> )	90,00
	Resistência volumétrica após 48 h a 24°C (Ωcm)	3,60 x 10 <sup>14</sup>
	Resistência volumétrica após 7 dias a 25°C (Ωcm)	9,80 x 10 <sup>14</sup>
	Constante dielétrica de acordo com a norma DIN 53483	5,50 (23°C) e 7,00 (50°C)
	Rigidez dielétrica de acordo com a norma IEC 243 (kV/mm <sup>2</sup> )	15,00 – 20,00
	Pot Life a 25°C (min)	116

Fonte: Adaptado de ARALSUL, 2017

## APÊNDICE B – Ensaio de Deflexão em Perfis de Borracha

O aparato utilizado para a realização dos ensaios de deflexão, mostrado na Figura 104, possui uma simples configuração, constituído basicamente por duas cantoneiras com furos nas suas extremidades que permitem a montagem dos parafusos e porcas. Para a realização do ensaio, posicionou-se o perfil de borracha entre as duas cantoneiras, e com o uso de um torquímetro, aplicou-se o aperto de forma intercalada nos dois parafusos, ou seja, uma volta de aperto em cada parafuso até atingir o torque desejado. O teste iniciou-se a partir do torque de 4 N.m, e a cada intervalo de 1 N.m realizou-se a medição da deflexão. Devido a aplicação de torque ser manual, possibilitando aplicar um aperto diferente nos parafusos, realizou-se a medição nas duas extremidades e no centro da borracha para obter uma média de deformação.

Figura 104 – Aparato para ensaio de deflexão da borracha de vedação



Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 8 são apresentados os valores das deflexões para três borrachas de material SBR de diferentes durezas, no qual mediu-se a deflexão a partir da menor dimensão do perfil. É apresentada a medição de cada ponto, mostrado na Figura 104, de acordo com o referido torque aplicado, a média das medições, e na última coluna o percentual da deflexão.

Verifica-se, a partir dos resultados, uma diferença considerável no percentual de deflexão entre as diferentes durezas. Enquanto a borracha de dureza 40 Shore obteve uma deflexão de 54,8% com a aplicação de um torque de 7 N.m, com o mesmo torque aplicado a borracha de dureza 50 Shore obteve uma deflexão de 29,1%, e a de dureza 70 Shore obteve uma deflexão de 5,8%.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de deflexão em perfis de borracha

Deflexão da borracha SBR com perfil 19x14 mm e dureza 40 Shore					
Torque (N.m)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)	Ponto 3 (mm)	Média (mm)	Média (%)
4	7,6	8,0	7,0	7,53	46,2
5	7,4	7,5	6,1	7,00	50,0
6	6,8	7,3	6,1	6,73	51,9
7	6,5	7,0	5,5	6,33	54,8
Deflexão da borracha SBR com perfil 20x11 mm e dureza 50 Shore					
Torque (N.m)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)	Ponto 3 (mm)	Média (mm)	Média (%)
4	8,9	9,4	8,6	8,96	18,5
5	8,3	9,1	8,5	8,63	21,5
6	7,8	8,8	8,0	8,20	25,4
7	7,4	8,4	7,6	7,80	29,1
8	7,2	8,1	7,0	7,43	32,4
9	7,1	8,1	6,8	7,33	33,4
10	6,5	7,9	6,1	6,83	37,9
11	6,3	7,8	6,0	6,70	39,1
12	5,8	7,7	5,5	6,33	42,4
Deflexão da borracha SBR com perfil 20x11 mm e dureza 70 Shore					
Torque (N.m)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)	Ponto 3 (mm)	Média (mm)	Média (%)
4	10,8	11,2	10,6	10,86	1,3
5	10,6	11,1	10,4	10,70	2,7
6	10,3	11,0	10,2	10,50	4,5
7	10,2	10,9	10,0	10,36	5,8
8	10,0	10,7	9,9	10,20	7,3
9	9,9	10,6	9,7	10,06	8,5
10	9,8	10,4	9,5	9,90	10,0
11	9,7	10,3	9,3	9,76	11,3
12	9,5	10,1	9,2	9,60	12,7

Fonte: Próprio Autor

**APÊNDICE C – Pedido de Patente de Invenção: Dispositivo Bipartido (Clamp)****Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT****Número do Processo:** BR 10 2017 017283 0**Dados do Depositante (71)**

---

**Depositante 1 de 1****Nome ou Razão Social:** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**Tipo de Pessoa:** Pessoa Jurídica**CPF/CNPJ:** 92969856000198**Nacionalidade:** Brasileira**Qualificação Jurídica:** Instituição de Ensino e Pesquisa**Endereço:** AV. PAULO GAMA Nº 110, 6º ANDAR, CENTRO, PORTO ALEGRE, RS, BRASIL**Cidade:** Porto Alegre**Estado:** RS**CEP:** 90040-060**País:** Brasil**Telefone:** (51)3308.3800**Fax:** (51)3308.4237**Email:** propriedadeintelectual@ufrgs.br

**Dados do Pedido**

---

**Natureza Patente:** 10 - Patente de Invenção (PI)

**Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54):** DISPOSITIVO BIPARTIDO (CLAMP) PARA APLICAÇÃO DE RESINA EM REPARO DE UM DUTO FLEXÍVEL (RISER) E/OU MONITORAMENTO DE DUTO RÍGIDO (RISER)

**Resumo:** A presente invenção se refere a um dispositivo bipartido (clamp) e método para aplicação de resina ou misturas contendo produtos anticorrosivos para reparo de estruturas do tipo dutos flexíveis (risers) e/ou ainda para atuar no monitoramento de dutos rígidos. O dispositivo permite o acoplamento de sistemas de monitoramento a dutos rígidos, e neste caso, os sensores, cabos e eletrônica que constituem o sistema são pré-inseridos no dispositivo que atua como um invólucro protetivo. O invento atende às áreas de emissários submarinos, oleodutos, gasodutos, adutoras, plataformas de petróleo, tanques de armazenamento, preferentemente em ambientes marinhos.

**Figura a publicar:** 2

**APÊNDICE D – Pedido de Patente de Invenção: Ferramenta Bipartida**11/08/2017 870170057878  
13:55

03.158.8.6.17.0616388.6

**Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT**

Número do Processo: BR 10 2017 017288 0

**Dados do Depositante (71)**

---

Depositante 1 de 1

**Nome ou Razão Social:** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**Tipo de Pessoa:** Pessoa Jurídica**CPF/CNPJ:** 92969856000198**Nacionalidade:** Brasileira**Qualificação Jurídica:** Instituição de Ensino e Pesquisa**Endereço:** AV. PAULO GAMA Nº 110, 6º ANDAR, CENTRO, PORTO ALEGRE, RS, BRASIL**Cidade:** Porto Alegre**Estado:** RS**CEP:** 90040-060**País:** Brasil**Telefone:** (51)3308.3800**Fax:** (51)3308.4237**Email:** propriedadeintelectual@ufrgs.br

**Dados do Pedido**

---

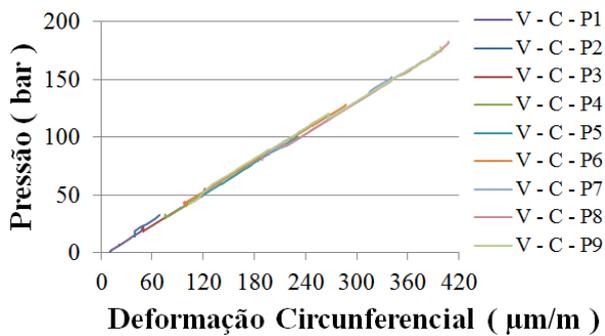
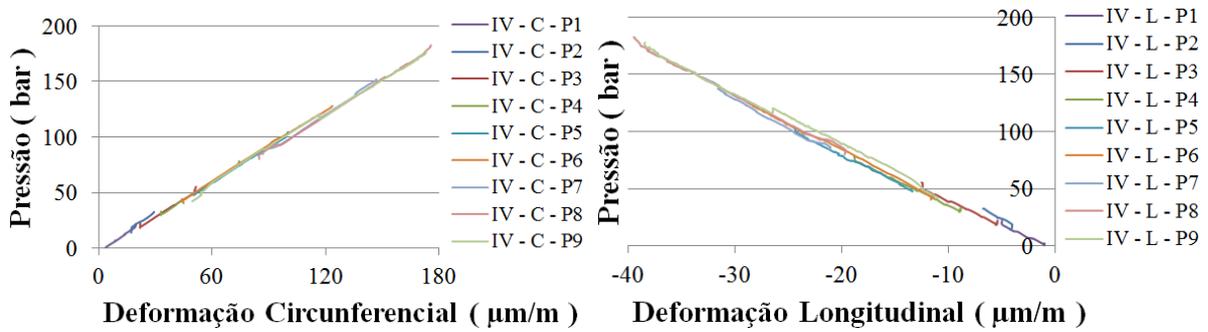
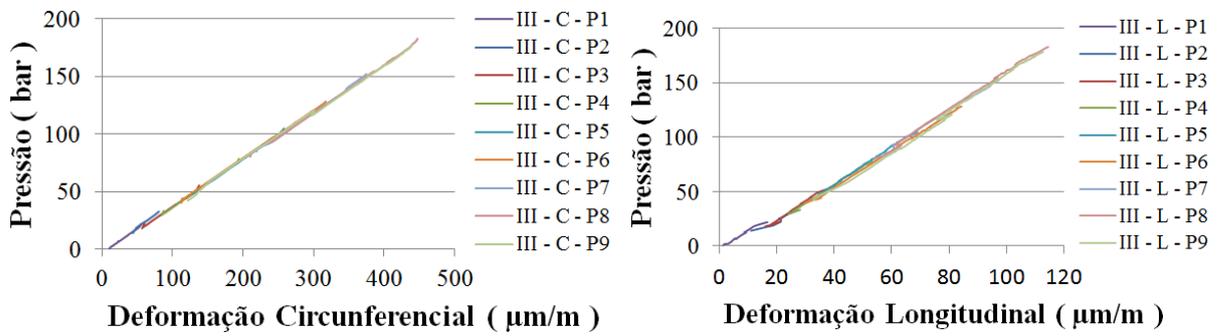
**Natureza Patente:** 10 - Patente de Invenção (PI)

**Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54):** FERRAMENTA BIPARTIDA PARA APLICAÇÃO DE UM DISPOSITIVO (CLAMP) EM REPARO DE DUTO FLEXÍVEL E/OU MONITORAMENTO DE DUTO RÍGIDO (RISER)

**Resumo:** A presente invenção se refere a uma ferramenta bipartida e método de aplicação de um dispositivo, que pode ser um clamp, mas não restrito a esse, destinado a reparo e/ou monitoramento de estruturas do tipo dutos flexíveis ou rígidos (risers), na região compreendida entre a zona de variação de maré e um acessório do tipo conexão ou terminação (end-fitting), incluindo este. O presente invento pode ser acoplado por mergulhador ou adaptado em veículo submarino operado remotamente (ROVs) e permite a aplicação automática de um dispositivo bipartido (clamp) que serve como recipiente para injeção de resina pura ou misturas, contendo produtos anticorrosivos e garantindo, desta maneira, a proteção das armaduras e o controle de processos corrosivos em curso, no caso de reparo de dutos flexíveis. A ferramenta permite também o acoplamento de sistemas de monitoramento a dutos rígidos. Neste caso, os sensores, cabos e eletrônica que constituem o sistema são pré-inseridos no dispositivo (clamp), que atua como um invólucro protetivo.

**Figura a publicar:** 2

### APÊNDICE E – Gráficos pressão interna (bar) x deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )



## ANEXO A - Diâmetros e Áreas de Roscas Métricas

Tabela 8-1 Diâmetros e áreas de roscas métricas de passo grosso e passo fino (todas as dimensões em milímetros)\*

Diâmetro maior nominal $d$	Série de passo grosso			Série de passo fino		
	Passo $p$	Área de tensão de tração $A_t$	Área do diâmetro menor $A_m$	Passo $p$	Área de tensão de tração $A_t$	Área do diâmetro menor $A_m$
1,6	0,35	1,27	1,07			
2	0,40	2,07	1,79			
2,5	0,45	3,39	2,98			
3	0,5	5,03	4,47			
3,5	0,6	6,78	6,00			
4	0,7	8,78	7,75			
5	0,8	14,2	12,7			
6	1	20,1	17,9			
8	1,25	36,6	32,8	1	39,2	36,0
10	1,5	58,0	52,3	1,25	61,2	56,3
12	1,75	84,3	76,3	1,25	92,1	86,0
14	2	115	104	1,5	125	116
16	2	157	144	1,5	167	157
20	2,5	245	225	1,5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3,5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4,5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5,5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1,5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080

\* As equações e os dados usados para desenvolver esta tabela foram obtidos da ANSI B1.1-1974 e B18.3.1-1978. O diâmetro menor foi encontrado a partir da equação  $d_m = d - 1,226869p$ , e o diâmetro de passo, a partir de  $d_p = d - 0,649519p$ . A média do diâmetro de passo e do diâmetro menor foi usada para computar a área de tensão de tração.

## ANEXO B – Categorias Métricas de Propriedades Mecânicas para Parafusos e Porcas

**Tabela 8-11** Categorias métricas de propriedades mecânicas para parafusos de aço (de porca), parafusos e prisioneiros\*

<b>Categoria da propriedade</b>	<b>Intervalo de tamanho, inclusivo</b>	<b>Resistência mínima à prova<sup>†</sup>, MPa</b>	<b>Resistência mínima à tração<sup>†</sup>, MPa</b>	<b>Resistência mínima ao escoamento<sup>†</sup>, MPa</b>	<b>Material</b>	<b>Marcação de cabeça</b>
4,6	M5-M36	225	400	240	Baixo ou médio carbono	
4,8	M1,6-M16	310	420	340	Baixo ou médio carbono	
5,8	M5-M24	380	520	420	Baixo ou médio carbono	
8,8	M16-M36	600	830	660	Baixo carbono, martensita Q&T (temperado e revenido)	
9,8	M1,6-M16	650	900	720	Baixo carbono, martensita Q&T (temperado e revenido)	
10,9	M5-M36	830	1040	940	Médio carbono, Q&T (temperado e revenido)	
12,9	M1,6-M36	970	1220	1100	Liga, Q&T (temperada e revenida)	

\* O comprimento de rosca para parafusos de rosca e de calota é

$$l_r = \begin{cases} 2d+6 & l \leq 125 \\ 2d+12 & 125 < l \leq 200 \\ 2d+25 & l > 200 \end{cases}$$

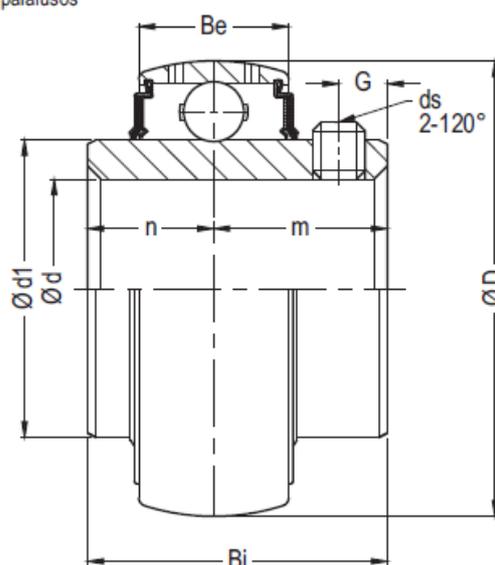
onde  $l$  é o comprimento do parafuso de porca. O comprimento de rosca para parafusos estruturais de porca é ligeiramente menor do que o fornecido *supra*.

<sup>†</sup> Resistências mínimas são resistências excedidas por 99% dos fixadores.

## ANEXO C – Especificação do Rolamento Esférico com Fixação por Parafusos Y 205

### V22

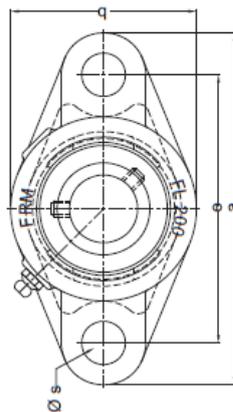
#### Y 200 Rolamento esférico com fixação por parafusos Serviço Normal



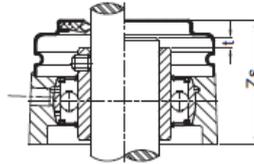
Ø eixo mm pol	Rolamento Série Y	Dimensão nominal (mm)							ds (mm) (UNF)	Cargas (Kgf)		Peso (Kg)
		D	d1	Bi	n	m	Be	G		dinâmica Cr	estática Cor	
12 1/2	Y 201 V22 Y 201-08 V22											0,20
15 5/8	Y 202 V22 Y 202-10 V22	47,0	29,0	31,0	12,7	18,3	16,0	4,5	M5x0,8 1/4-28	1310	680	0,10
17	Y 203 V22											0,15
3/4 20	Y 204-12 V22 Y 204 V22	47,0	29,0	31,0	12,7	18,3	16,0	5,0	M6x1 1/4-28	1310	680	0,20
7/8 15/16	Y 205-14 V22 Y 205-15 V22											
25 1	Y 205 V22 Y 205-16 V22	52,0	34,0	34,0	14,3	19,7	17,0	5,5	M6x1 1/4-28	1430	800	0,20

**ANEXO D – Especificação do Mancal Tipo Flange FL 205**

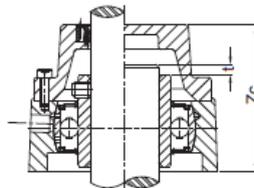
**FL 200**  
Mancal tipo Flange  
Serviço Normal



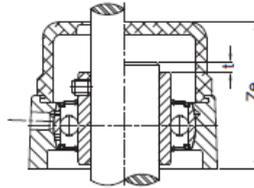
S YFL200 { SE { S



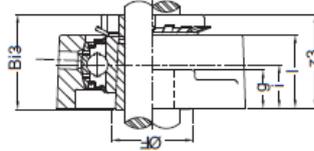
C YFL200 { CE { C



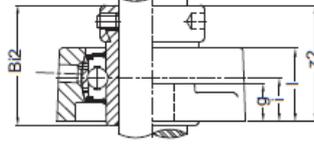
YFL200 ECY { B



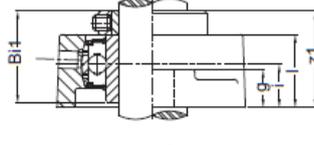
Conjunto FRM



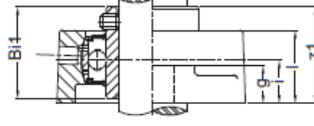
UKFL200



GFL200



YFL200T



YFL200

Ø eixo mm pod	Caixa	Dimensão nominal (mm)							Paraf.					
		a	e	i	g	l	s	b						
12														
1/2														
15														
58	FL 204 <sup>®</sup>	113	90,0	15,0	11	25	12,0	60	-	2	40	46	47,0	M10
17														3/8
34														
20														
7/8														
15/16	FL 205 <sup>®</sup>	130	99,0	16,0	14	27	16,0	68	30,0	2	44	51	53,5	M14
25														1/2

Peso (Kg)	YFL200 YFL20T	CF/L2 OE	GFL2	UKFL2	D	Rolamentos						
						Y 200 z1	Y 200 T B11	G 200 z2	B12			
0,50	0,70	0,50	-	47,0	33,0	31,0	41,5	43,5	-	-	-	-
0,60	0,80	0,70	0,70	52,0	35,7	34,0	42,9	44,3	3/4	HE2005	HE2005	34,5
									20	HE2005	HE2005	35,0

