

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**INVESTIGAÇÃO DOS IMPACTOS DA ENERGIZAÇÃO COM AR E ÁGUA EM
DISPOSITIVOS DE VEDAÇÃO METAL-METAL NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA**

Lilian Samira da Rocha Alle

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2023

LILIAN SAMIRA DA ROCHA ALLE

**INVESTIGAÇÃO DOS IMPACTOS DA ENERGIZAÇÃO COM AR E ÁGUA EM
DISPOSITIVOS DE VEDAÇÃO METAL-METAL NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA**

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes

Vice-reitora: Profa. Dra. Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Prof. Dra. Carla Schwengber ten Caten

Vice-diretor: Prof. Dr. Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS – PPGE3M

Coordenador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Vice-coordenadora: Profa. Dra. Annelise Kopp Alves

Alle, Lilian Samira da Rocha
INVESTIGAÇÃO DOS IMPACTOS DA ENERGIZAÇÃO COM AR E
ÁGUA EM DISPOSITIVOS DE VEDAÇÃO METAL-METAL NA
INDÚSTRIA PETROLÍFERA / Lilian Samira da Rocha Alle.
-- 2023.
90 f.
Orientador: Afonso Reguly.

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

1. CVU. 2. Energização. 3. Sistemas de Cabeça de
Poço Submarino. 4. Tensão Residual. 5. Wickers. I.
Reguly, Afonso, orient. II. Título.

LILIAN SAMIRA DA ROCHA ALLE

INVESTIGAÇÃO DOS IMPACTOS DA ENERGIZAÇÃO COM AR E ÁGUA EM
DISPOSITIVOS DE VEDAÇÃO METAL-METAL NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

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 aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Bancada Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: 07/12/2023

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Allan Romário de Paula Dias

Dr. Fabiano Dornelles Ramos

Dr. Guilherme Vieira Braga Lemos

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Afonso Reguly, meu orientador, pelo apoio, incentivo e orientação, fundamentais para o progresso deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por proporcionar um ambiente acadêmico de excelência, que contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste estudo. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, e seus professores, meu reconhecimento pelo ensino de qualidade e pelo valioso conhecimento transmitido ao longo dos anos.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, agradeço pela infraestrutura de altíssima qualidade disponibilizada, que desempenhou um papel crucial na execução deste trabalho, proporcionando recursos essenciais para a pesquisa.

Aos meus colegas e ex-colegas do grupo CDT, verdadeiros companheiros nesta jornada acadêmica e de vida. Diogo Buzzatti, Diego Aires e Juliano Gerber, em particular, sou muito grata pelo apoio constante e motivação que tornaram possível a conclusão deste trabalho de forma mais leve.

Ao meu coordenador de grupo, Fabiano Mattei, agradeço por sua orientação prática e direta na resolução de problemas, bem como por me permitir integrar este projeto desde o seu início

Ao meu marido Michel Orth, dedico especial gratidão. O suporte constante e a confiança em meu potencial foram fundamentais para superar obstáculos e concluir este trabalho. Obrigada por tudo!

RESUMO

Este trabalho investigou os impactos da ativação de dispositivos de vedação metal-metal utilizados na indústria petrolífera em diferentes meios (ar e água). Estes dispositivos são conhecidos como Conjuntos de Vedação Universal (CVU), e o processo de ativação deste é chamado de energização. Neste contexto, realizou-se uma avaliação da influência do meio no processo de energização, nas cargas suportadas durante os ensaios que simulam condições reais de sistema cabeças de poço e nas tensões residuais destas amostras. Para isso, foram realizadas montagens em uma bancada de ensaio, com o intuito de simular condições reais de sistemas de cabeça de poço submarino. Realizou-se a ativação das vedações metal-metal e testes de carregamento. Por fim, foram realizadas análises das tensões residuais destes conjuntos de vedação metálica através da difração de raios X. Os resultados mostraram que amostras energizadas com água demandam uma força 33% maior para completar a energização em comparação às amostras energizadas ao ar, devido à diferença na compressibilidade destes fluidos. A geometria das amostras também influenciou nos resultados de energização, sendo que amostras energizadas na banda inferior dos *wickers* apresentaram valor de força 30% maior em comparação às amostras energizadas na banda superior. Isso ocorre pelo fato de as amostras energizadas na banda inferior apresentarem maior espessura do anel de energização. No carregamento, a energização com ar resultou em maior capacidade de carga (20%) em relação às amostras energizadas com água, devido ao maior cravamento dos *wickers* nos CVUs. Em relação à geometria, as amostras energizadas na banda inferior suportaram cargas 8% maiores que as amostras energizadas na banda superior. A análise das tensões residuais revelou que a amostra energizada com água apresentou tensões compressivas 92% maiores que a amostra energizada com ar e que a amostra energizada na banda inferior apresentou tensões residuais compressivas 30% maiores quando comparada à amostra energizada na banda superior.

Palavras-chave: CVU; Energização; Sistemas de Cabeça de Poço Submarino; Tensão Residual; *Wickers*.

ABSTRACT

This work investigated the impacts of activating metal-metal sealing devices used in the oil industry in different environments (air and water). These devices are known as Universal Sealing Assemblies (USAs), and the activation process is referred to as energization. In this context, an evaluation was conducted on the influence of the environment on the energization process, the loads sustained during tests simulating real conditions of wellhead systems, and the residual stresses of these samples. For this purpose, assemblies were set up on a test bench to simulate real conditions of subsea wellhead systems. The metal-metal seals were activated, and loading tests were performed. Finally, analyses of the residual stresses in these metal sealing assemblies were conducted using X-ray diffraction. The results showed that samples energized with water required a force 33% higher to complete energization compared to samples energized in air, due to the difference in compressibility of these fluids. The geometry of the samples also influenced energization results, with samples energized in the lower band of the wickers exhibiting a force value 30% higher compared to samples energized in the upper band. This is attributed to the fact that samples energized in the lower band have a thicker energization ring. In loading tests, energization with air resulted in a higher load-carrying capacity (20%) compared to samples energized with water, due to greater penetration of the wickers into the USAs. Regarding geometry, samples energized in the lower band sustained loads 8% higher than samples energized in the upper band. Analysis of residual stresses revealed that the sample energized with water exhibited compressive stresses 92% higher than the sample energized with air, and the sample energized in the lower band presented compressive residual stresses 30% higher compared to the sample energized in the upper band.

Keywords: USA, Energization; Subsea Wellhead Systems; Residual Stresses; *Wickers*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da Produção, Exportação e Importação de Petróleo.....	20
Figura 2 - Desenho esquemático de componentes de um sistema de cabeça de poço submarino.....	23
Figura 3 - Exemplos de Vedações Utilizadas em Sistemas de Cabeça de Poço Submarino.....	24
Figura 4 - Vedação Metal-metal à esquerda e Vedação Elastomérica a direita.....	26
Figura 5 - Explosão da Plataforma Deepwater Horizon.	29
Figura 6 - Cravamento de um Wicker.....	31
Figura 7 - Vedação Metal-Metal utilizada entre Suspensor de Revestimento e Alojador.	32
Figura 8 - Conjunto de Vedação antes e após a energização, respectivamente.....	33
Figura 9 - Sequência de Instalação de um CVU.	34
Figura 10 - Variação da Força da Ferramenta durante a Energização do CVU.....	35
Figura 11 - Interferência Construtiva.	39
Figura 12 - Interferência Destrutiva.	40
Figura 13 - Descrição esquemática da difração em determinados planos hkl e sinal correspondente registrado por um difratômetro de raios X: (a) para uma rede livre de tensões; (b) para uma rede sob tensões residuais de compressão.	41

Figura 14 - Incidência dos raios X sobre a amostra. Intensidade do raio difratado para um determinado 2θ	42
Figura 15 - Fluxograma dos Itens Abordados em Materiais e Métodos.	43
Figura 16 - Sequência de Montagem da Bancada de Testes e da Estrutura de Proteção.....	45
Figura 17 - Desenho Esquemático dos Dispositivos na Bancada.	46
Figura 18 - Célula de Carga de 1500 Toneladas.....	47
Figura 19 - Células de Pressão da Câmara Superior e Câmara Inferior.	47
Figura 20 - Conjunto de Vedação Universal em Corte.	48
Figura 21 - Posições de Wickers em um Alojador.....	49
Figura 22 - Wickers Alojador	50
Figura 23 - Posições das Bandas Superior e Inferior dos Wickers.....	50
Figura 24 - Fluxograma do Processo de Energização.	51
Figura 25 - Locais de Medição das Distâncias entre o Anel E e o Anel U.....	52
Figura 26 – Medição da Distância entre Anel E e Anel U.....	53
Figura 27 - Sensor a Laser instalado na Bancada de Testes.....	55
Figura 28 - Clip-Gage MTS instalado na Bancada de Testes.	56
Figura 29 – Fluxograma do Procedimento de Carregamento apenas com Atuador..	57
Figura 30 - Fluxograma do Procedimento de Carregamento com Pressão.	57

Figura 31 – Montagem da Bancada com Indicação do Posicionamento do Atuador e da Haste.....	59
Figura 32 – Regiões de Tomada de Pressão e Posição dos Êmbolos de Vedação..	60
Figura 33 - Estrutura e Disposição dos Equipamentos de Pressurização no Local de Testes.....	61
Figura 34 - Painel de Comando para Acionamento dos Solenóides e Controle da Pressurização e Despressurização das Amostras.	61
Figura 35 - Regiões de Análise de Tensão Residual.	63
Figura 36 - Medições na Parte Externa da Amostra.....	64
Figura 37 - Processo de Energização da Amostra AM01-2 ^a -Bs ao Ar.	66
Figura 38 - Processo de Energização da Amostra AM02-2 ^a -Bs com Água.....	66
Figura 39 - Processo de Energização da Amostra AM03-1 ^a -Bi com Água.....	67
Figura 40 - Processo de Energização da Amostra AM04-2 ^a -Bi com Água.....	67
Figura 41 - Processo de Energização da Amostra AM05-2 ^a -Bs com Água.....	68
Figura 42 - Teste 01: Deslocamento do Suspensor de Revestimento – AM01-2 ^a -Bs.	70
Figura 43 - Teste 01: Deslocamento do Suspensor de Revestimento Completo - AM01-2 ^a -Bs.....	70
Figura 44 - Teste 02: Valores de Deslocamento obtidos durante os ciclos e Patamares de Pressão – AM02-2 ^a -Bs.	71

Figura 45 - Teste 02: Momento em que ocorre a Perda de Linearidade - AM02-2 ^a -Bs.	72
Figura 46 - Teste 03: Valores de Deslocamento obtidos durante os ciclos e Patamares de Pressão - AM03-1 ^a -Bi e AM04-2 ^a -Bi.....	73
Figura 47 - Teste 03: Valores de Deslocamento em Função dos Valores da Força CC ombro - AM03-1 ^a -Bi e AM04-2 ^a -Bi.....	74
Figura 48 - Teste 04: Valores de Deslocamento obtidos durante os ciclos e Patamares de Pressão - AM05-2 ^a -Bs.....	75
Figura 49 - Teste 04 - Valores de Deslocamento em Função dos Valores da Força CC ombro - AM05-2 ^a -Bs.....	75
Figura 50 – Análise da Tensão Residual das Amostras AM01-2 ^a -Bs (energizada ao ar) e AM02-2 ^a -Bs (energizada com água) – Variação do Meio de Energização.....	76
Figura 51 – Análise da Tensão Residual das Amostras AM02-2 ^a -Bs e AM04-2 ^a -Bi – Variação da Posição nas Bandas dos <i>Wickers</i>	77
Figura 52 – Análise da Tensão Residual das Amostras AM03-1 ^a -Bi e AM04-2 ^a -Bi-Variação da Posição de Energização no Alojador.....	78
Figura 53 - Comparativo dos Resultados do Processo de Energização.	80
Figura 54 - Comparativo dos Resultados do Processo de Carregamento.	81
Figura 55 - Comparativo dos Resultados da Tensão Residual.	83

LISTA DE SIGLAS

AAP	Alojador de Alta Pressão
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil
BAP	Base Adaptadora de Produção
CVU	Conjunto de Vedação Universal
DRX	Difração de Raios X
HPU	<i>Hydraulic power unit</i>
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
SCPS	Sistema de Cabeça de Poço Submarino
SR	Suspensor de Revestimento
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda do feixe de nêutrons
h	Constante de Planck
T	Tempo de percurso
V	Tensão
m	Massa do nêutron
L	Distância da fonte até o detector
d	Distância entre camadas atômicas em um cristal
2φ	Ângulo de espalhamento
V	Velocidade de propagação da onda no meio com tensões
V_0	Velocidade de propagação da onda no meio isento de tensões
K	Constante elasto-acústica
d_0^{hkl}	Espaçamento reticular inicial
2θ difratado	Ângulo formado pela direção de incidência dos raios X e o ângulo do raio difratado
σ	Tensão atuante
n	Ordem da difração
F	Força
$+\sigma$	Tração
$-\sigma$	Compressão

kip Quilolibra-força

μm Micrometro

mA Miliampere

MPa Megapascal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. INÍCIO DA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL	19
2.2. ESTADO ATUAL DA EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DO PETRÓLEO NO BRASIL	20
2.3. SISTEMAS DE CABEÇA DE POÇO SUBMARINO	22
2.4. SISTEMAS DE VEDAÇÃO EM SCPS.....	24
2.5. SISTEMA DE VEDAÇÃO METAL-METAL EM SCPS	26
2.6. NORMAS PARA A SEGURANÇA EM SCPS.....	28
2.7. ENERGIZAÇÃO	30
2.8. TENSÃO RESIDUAL.....	35
2.9. MÉTODOS DE ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL.....	38
2.10. MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS – DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. BANCADA DE ENSAIOS	44
3.1.1. Instrumentação do Atuador Hidráulico	46
3.2. CONJUNTO DE VEDAÇÃO UNIVERSAL.....	48

3.3. ENERGIZAÇÃO	51
3.4. CARREGAMENTO.....	54
3.4.1. Sensores de Deslocamento	54
3.4.2. Procedimentos de Carregamento	56
3.5. ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	62
4. RESULTADOS	65
4.1. ENERGIZAÇÃO	65
4.2. CARREGAMENTO.....	69
4.3. TENSÃO RESIDUAL.....	76
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	79
6. TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

A indústria de óleo e gás depende significativamente da confiabilidade dos sistemas de vedação. Um tipo comum de vedação empregado nesse setor é a vedação metal-metal, desempenhando um papel crucial nos sistemas de cabeça de poço submarino. Contudo, a influência do processo de ativação dessas vedações, chamado de energização, na carga suportada e nas tensões residuais resultantes permanece pouco explorada na literatura. A relevância deste tema reside na carência de estudos abrangentes e de um método de validação da energização para todos os fabricantes de vedação metal-metal, revelando uma lacuna significativa no conhecimento atual.

Este trabalho propõe-se a compreender a influência do meio utilizado para a energização de uma vedação metal-metal, denominada Conjunto de Vedação Universal (CVU), nas cargas suportadas durante ensaios que simulam condições reais de sistemas de cabeça de poço. Como objetivo secundário, pretende-se compreender e, se possível, estabelecer uma relação entre o processo de energização, a carga suportada e a tensão residual desse dispositivo, avaliando diferentes meios, geometrias da amostra e posições de energização. Para atingir esses objetivos, serão conduzidas três análises:

1. Processo de Energização: Procurar compreender como os fluidos, ar e água, influenciam no processo de energização e analisar o impacto da geometria e da posição da amostra durante este processo. A geometria é determinada pela banda dos *wickers* onde a amostra é posicionada para realizar o processo de energização, podendo ser na parte superior ou na inferior, a depender da espessura do anel de energização (Anel E) e comprimento do nariz de ataque. Os *wickers* são pequenos elementos dentados, usinados no diâmetro externo do suspensor de revestimento e no diâmetro interno do alojador, que são amostras que compõem um sistema de cabeça de poço. A posição está relacionada ao alojador, onde o mesmo apresenta três posições para instalação deste conjunto de vedação.

2. Ensaios Experimentais: Realizar ensaios experimentais para determinar a carga suportada pela vedação metal-metal, simulando as condições reais encontradas em campo. Avaliar a influência do meio e geometria na carga suportada.

3. Tensão Residual: Avaliar a tensão residual nas vedações metal-metal após o ensaio, utilizando o método de difração de raios X. Serão analisadas quatro amostras nesta etapa, sendo uma energizada com ar e as demais com água, apresentando geometrias e posições de energização distintas. A interpretação desses resultados permitirá compreender as tensões suportadas pelos componentes (CVUs) durante os processos de energização e carregamento, além de verificar se há influência nos resultados em função do meio, geometria e posição de energização utilizada no alojador. Para isso, será utilizado um difratômetro portátil.

A escolha dos meios de energização baseia-se na observação de que alguns fabricantes realizam a validação do procedimento utilizando ar, mesmo considerando que as amostras do sistema de cabeça de poço trabalham submersas no mar. Diante disso, optou-se por conduzir análises utilizando tanto ar quanto água durante o processo de energização. O objetivo é verificar possíveis influências nos resultados, permitindo, posteriormente, a utilização de um meio que se aproxime mais das condições reais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica que abrange os pontos essenciais desta pesquisa. A análise começará pelo contexto histórico e pela situação atual da exploração de petróleo no Brasil, proporcionando uma visão abrangente do cenário. Em seguida, a atenção se voltará para o sistema de cabeça de poço submarino, detalhando os elementos que compõem esse sistema. Serão destacados os principais componentes investigados neste estudo, integrantes do arranjo de uma cabeça de poço, com foco central no CVU, objeto central da análise. Além disso, a revisão incluirá informações relevantes sobre o processo de energização dessa amostra, assim como os procedimentos adotados para a análise de tensão residual.

2.1. INÍCIO DA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL

A história da indústria do petróleo no Brasil teve seu início na Bahia, mais precisamente em 1858, quando o decreto n.º 2266, assinado pelo Marquês de Olinda, concedeu a José Barros Pimentel o direito de extrair mineral betuminoso para a fabricação de querosene de iluminação em áreas próximas ao Rio Marau, na Província da Bahia. No ano seguinte, em 1859, durante a construção da Estrada de Ferro Leste Brasileiro, o inglês Samuel Allport observou o gotejamento de óleo em Lobato, no subúrbio de Salvador. Posteriormente, em 29 de julho de 1938, já sob a jurisdição do recém-criado Conselho Nacional de Petróleo – CNP, teve início a perfuração do poço DNPM-163, localizado em Lobato. Esse poço acabou sendo o responsável pela descoberta do petróleo no Brasil, quando, no dia 21 de janeiro de 1939, o óleo se apresentou ocupando parte da coluna de perfuração (THOMAS, 2004).

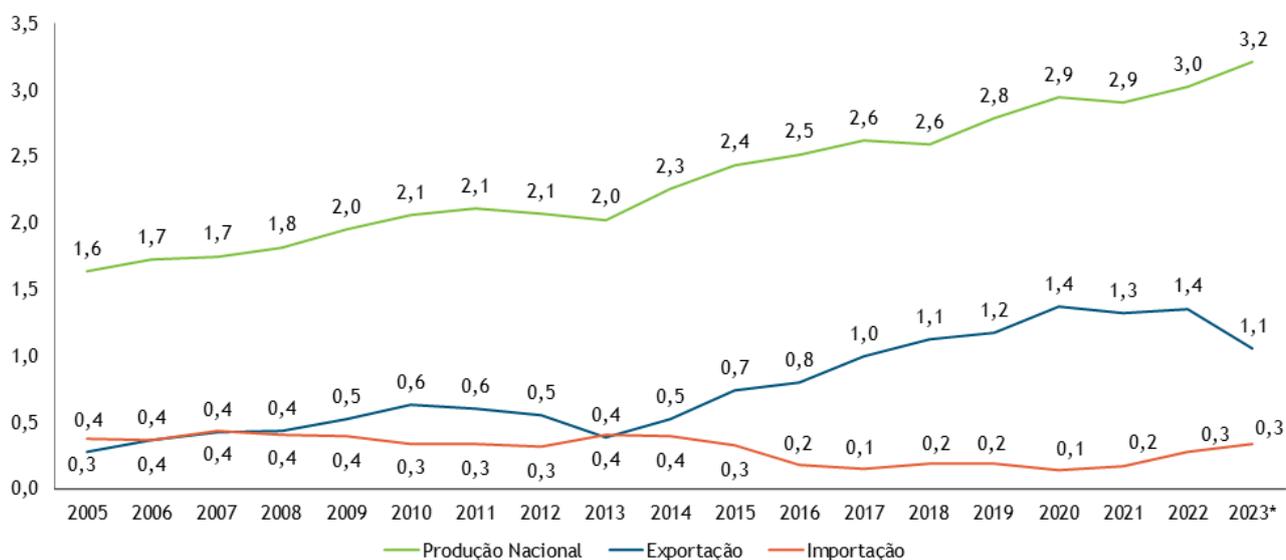
No entanto, a produção em grande escala e o desenvolvimento da indústria de petróleo ocorreram décadas mais tarde, com a criação da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.) em 1953. A Petrobras assumiu o papel principal na exploração, produção e refino de petróleo no país, desempenhando um papel crucial no progresso da indústria petrolífera brasileira. Desde então, o Brasil tem adquirido cada vez mais importância no cenário global da produção de petróleo (CAMPOS; IDAGAWA, 1995).

2.2. ESTADO ATUAL DA EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DO PETRÓLEO NO BRASIL

Atualmente, observa-se uma tendência de perfuração de poços em maiores profundidades, acompanhada de condições mais elevadas de temperatura e pressão. Essa evolução aumenta a complexidade dos equipamentos, tudo isso enquanto se busca manter os custos de perfuração em patamares mais baixos. Como resultado desse cenário, emergem novas condições nos poços, gerando variações nas condições de carga. Entre os desafios mais intrincados, destaca-se o fenômeno de acúmulo de pressão anular, ocasionado pela disparidade de pressão no anel anular (SCOTT *et al.*, 2019).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, as exportações de petróleo brasileiro representaram, em média, 31% da produção nacional no período de 2005 a 2022. Durante esse mesmo intervalo, as importações mantiveram uma média de 14%. No ano de 2020, marcado pela pandemia, essas cifras chegaram a atingir 47% para as exportações e 5% para as importações. Desde 2013, ano em que a produção nacional de petróleo registrou um notável aumento, o volume exportado cresceu aproximadamente 3,5 vezes, enquanto as importações diminuíram cerca de 32%, conforme apresentado na Figura 1 (IBP COM DADOS DA ANP, 2023).

Figura 1 - Evolução da Produção, Exportação e Importação de Petróleo.



Fonte: IBP COM DADOS DA ANP, 2023

O estado do Rio de Janeiro tem se destacado como o principal protagonista no cenário petrolífero brasileiro. No início, as descobertas estavam concentradas na Bacia de Campos; no entanto, nos últimos dez anos, a Bacia de Santos tem emergido como figura central, especialmente devido aos reservatórios abaixo da camada de sal, conhecidos como "pré-sal". Atualmente, essa região assume a responsabilidade por aproximadamente 75% de toda a produção de petróleo no país (FIRJAN SENAI SESI, 2023).

A presença da indústria petrolífera no estado do Rio de Janeiro não só contribui para a matriz energética nacional, mas também desempenha um papel significativo na geração de empregos na região. Ao longo de sua ampla cadeia produtiva, que abrange desde estudos de prospecção até as fases de exploração, refino e distribuição, essa indústria oferece uma fonte crucial de empregos, tanto diretos quanto indiretos. Assim, ela exerce uma influência positiva em diversos setores, profissões e tecnologias, solidificando-se como um elemento fundamental na economia local (SEENEMAR, 2023).

Porém, explorar o petróleo da camada pré-sal de maneira economicamente viável enfrenta inúmeras dificuldades. Assim como no início da exploração de óleo em águas profundas, é necessário agora desenvolver novos equipamentos, adaptar outros e integrar diferentes tecnologias. O progresso no pré-sal apresenta desafios significativos em termos logísticos, tecnológicos, de recursos humanos, econômicos e geopolíticos. A camada de sal, com uma espessura potencial de até 2.000 metros, impõe obstáculos consideráveis. Perfurar essa camada espessa gera altas temperaturas e, combinadas com a pressão intensa, faz o sal agir como um plástico que pode fluir, dificultando a continuidade da perfuração dos poços (BERTO; MENDES; NOGUEIRA, 2012).

Além disso, o óleo retirado do pré-sal contém uma quantidade significativa de gás carbônico (CO₂), exigindo tratamento especial devido à sua natureza corrosiva quando combinado com água. As emissões de CO₂, quando descartadas, também representam um impacto ambiental adverso. A considerável diferença de temperatura entre o óleo nos reservatórios do pré-sal e a temperatura que atinge ao chegar aos dutos, a 2.000 metros de profundidade sob o mar, é outro desafio crítico. Essa rápida queda de temperatura propicia a formação de parafina no óleo, potencialmente

obstruindo e prejudicando os equipamentos. Adicionalmente, a intensa pressão nas profundezas do oceano, à qual os equipamentos estão submetidos, aumenta a complexidade desse cenário desafiador. (BERTO; MENDES; NOGUEIRA, 2012)

2.3. SISTEMAS DE CABEÇA DE POÇO SUBMARINO

As cabeças de poço submarinas desempenham funções importantes no processo de exploração de petróleo. Elas são responsáveis por sustentar os revestimentos dos poços, resistir às tensões exercidas pelo *riser* (tubo que conecta o poço submarino à plataforma) e fornecer uma vedação segura para a válvula *Blowout Preventer* (BOP), que é essencial para evitar vazamentos de fluidos. Durante a fase de produção, as cabeças de poço também servem como suporte, travamento e vedação para o suspensor de tubulação e a árvore de natal, que são componentes fundamentais para a extração e controle do petróleo (GUEDES, 1998).

O BOP contém diversas peças móveis, que podem fechar o espaço anular entre as tubulações, ou até mesmo cisalhar as tubulações, interrompendo completamente o fluxo no poço em situações de emergência, como em casos de *blowouts*. Essas peças são dispositivos críticos de segurança e são essenciais para prevenir acidentes durante operações de perfuração e produção (JACULLI, 2021).

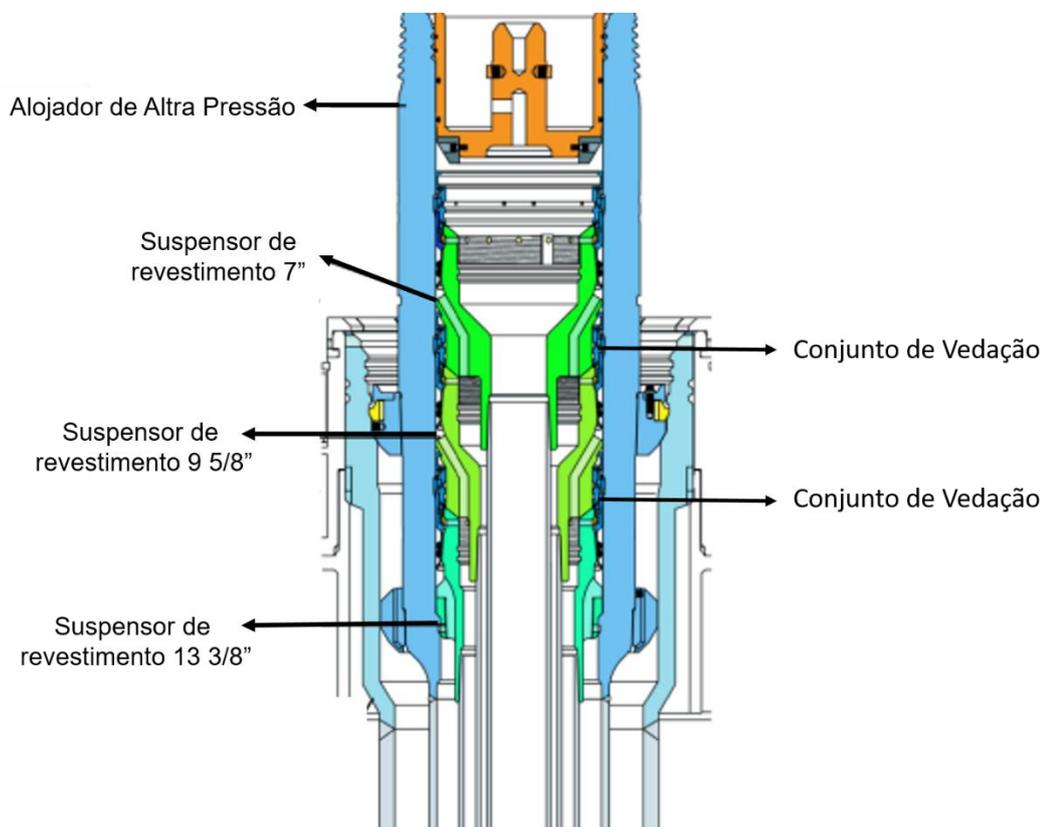
Atualmente, as cabeças de poço são projetadas de forma a permitir a instalação da base adaptadora de produção (BAP), que é uma parte integrante do sistema de produção submarino. Os sistemas de cabeça de poço submarino (SCPS) consistem em várias interfaces complexas projetadas para estabelecer a base estrutural do poço, desempenhando funções essenciais como ponto de ancoragem e barreira ambiental durante o acesso ao conteúdo do poço. Essas interfaces são componentes fundamentais do sistema, adaptando-se a diversas situações operacionais previstas para sua operação (SCOTT *et al.*, 2019).

Dentre os componentes de um sistema de cabeça de poço temos o Conjunto de Vedação Universal (CVU), o Alojador de Alta Pressão (AAP) e o Suspensor de Revestimento (SR). O CVU apresenta duas funções principais: vedação e travamento da montagem da vedação dentro do AAP, para evitar vazamentos anulares. O elemento de vedação cria uma interface de vedação metálica com o SR e o AAP para

alcançar uma vedação hermética ao gás. As interfaces entre essas peças definem a capacidade de travamento, bem como a pressão máxima no anular que o CVU pode suportar (SCOTT *et al.*, 2019).

O SR é um componente de cabeça de poço que suporta um revestimento depois de ser inserido no poço. O suspensor deve vedar o espaço anular entre os revestimentos em duas fases de perfuração diferentes, para evitar qualquer vazamento através da cabeça do poço. O revestimento de superfície fornece integridade estrutural para o poço, já que a cabeça do poço (e posteriormente o BOP) são colocados em sua parte superior. Na Figura 2 é apresentado um desenho esquemático com alguns elementos de um sistema de cabeça de poço submarino (JACULLI, 2021).

Figura 2 - Desenho esquemático de componentes de um sistema de cabeça de poço submarino.

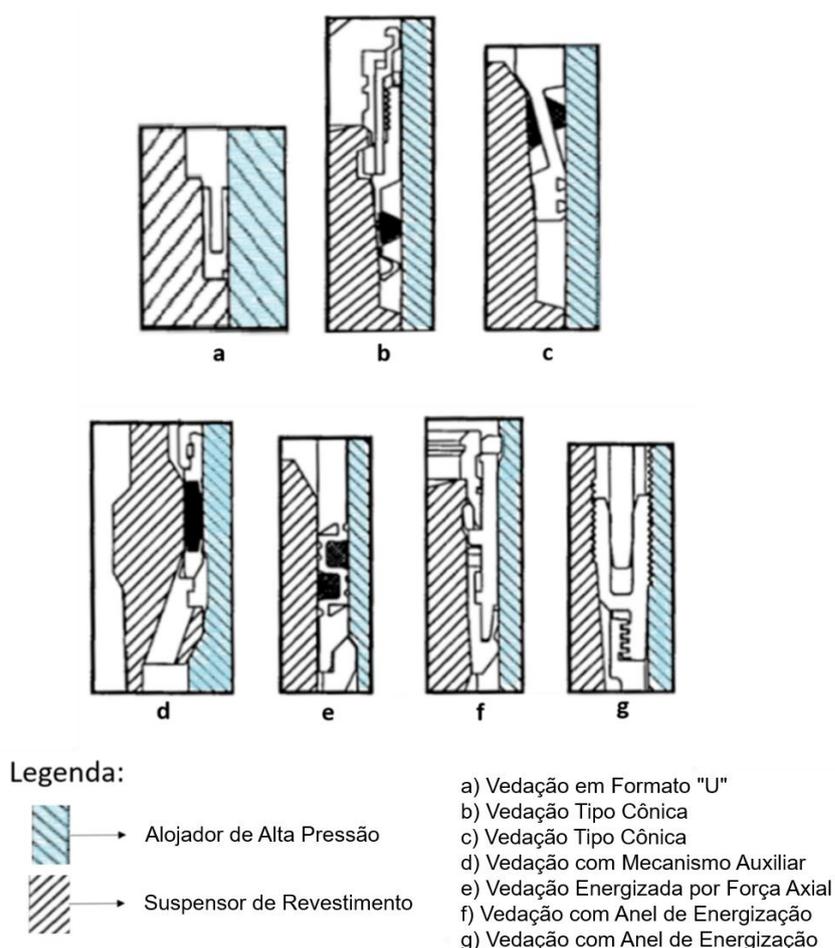


Fonte: JACULLI, 2021

2.4. SISTEMAS DE VEDAÇÃO EM SCPS

As vedações anulares desempenham um papel essencial na indústria petrolífera, sendo aplicadas em diversas situações, tais como entre os suspensores de revestimento e os alojamentos de poços submarinos, entre suspensores de tubulações e suspensores de revestimento, e até mesmo em extensões localizadas abaixo das árvores de natal. A seleção do tipo de vedação anular é influenciada pela aplicação específica, pelas condições ambientais e pelos critérios de vedação exigidos. Cada tipo de vedação apresenta suas próprias vantagens e restrições, e a escolha se dá em função do projeto mais adequado, com base nas demandas particulares dos sistemas e equipamentos utilizados na indústria petrolífera. Na Figura 3 são ilustrados alguns tipos de vedações utilizadas em sistemas de cabeça de poço. (MILBERGER; RAD, 1992).

Figura 3 - Exemplos de Vedações Utilizadas em Sistemas de Cabeça de Poço Submarino.



Fonte: Imagem Adaptada MILBERGER; RAD, 1992

Conforme apresentado na legenda, temos o alojador de alta pressão posicionado à direita com hachuras em azul, e o suspensor de revestimento posicionado à esquerda com hachuras em branco. As vedações ficam localizadas entre estas duas peças. A seguir temos a definição de cada uma das vedações apresentadas na figura anterior, definidas por MILBERGER; RADI, 1992.

Vedações em Formato "U" (Figura 3.a): Estas vedações são dispositivos cujas superfícies de vedação mantêm contato contínuo à medida que a vedação se move para o espaço anular, projetado para abrigar componentes e elementos essenciais do sistema. A tensão de contato é gerada por forças de mola e pode ser potencializada por meio de energização por pressão.

Vedações Tipo Cônica (Figuras 3.b e 3.c): Este tipo de vedação é energizada por um cone localizado em um suspensor de revestimento próximo ao final de seu curso de movimentação para o espaço anular. Semelhante às vedações em formato "U", as vedações cônicas podem manter contato por uma grande distância quando quase completamente energizadas. No entanto, essa fricção nas interfaces pode levar a danos, especialmente em ambientes contaminados.

Vedações com Mecanismo Auxiliar (Figura 3.d): Essas vedações são inicialmente deslocadas completamente para o espaço anular quando não estão energizadas. Posteriormente, são energizadas por um mecanismo auxiliar, geralmente ativado por força axial. Isso gera tensão de contato suficiente nas superfícies de vedação para criar uma vedação metal-metal.

Outras Vedações Energizadas por Força Axial (Figura 3.e): Além disso, a Figura 3.e mostra outra vedação energizada por força axial adicional.

Vedações com Anel de Energização (Figuras 3.f e 3.g): Nestas vedações, o atrito nas superfícies de vedação durante a energização é eliminado. A vedação na Figura 3.g utiliza o princípio de deformação plástica na interface de vedação e ação de cravamento de *wickers* para melhorar a capacidade de travamento (MILBERGER; RADI, 1992).

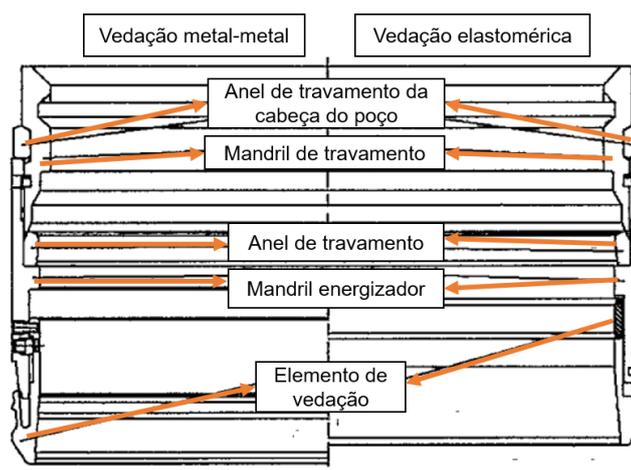
2.5. SISTEMA DE VEDAÇÃO METAL-METAL EM SCPS

A exigência de se utilizar uma vedação metal-metal surge da necessidade de evitar a incerteza relacionada ao desempenho dos materiais elastoméricos em condições operacionais rigorosas e de longo prazo, que podem ser encontradas em poços de produção submarinos (DYKES; HOPPER; JONES, 1989).

Os requisitos dos operadores de perfuração de poços submarinos em formações de alta pressão, que também apresentam potencial para temperaturas elevadas, impulsionaram o desenvolvimento de um sistema de vedação completamente metal-metal (SINGEETHAM ; VALKA, 1991).

Essa necessidade surgiu devido à demanda por soluções de vedação altamente confiáveis e robustas, capazes de suportar as condições extremas encontradas nessas formações submarinas. Como resultado, foram desenvolvidos sistemas de vedação que eliminam o uso de materiais não metálicos, como elastômeros, e adotam uma abordagem completamente baseada em componentes metálicos. Essas vedações metal-metal oferecem uma vedação mais resistente, capaz de suportar pressões e temperaturas extremas, garantindo a segurança e o desempenho adequado durante as operações de perfuração em ambientes submarinos desafiadores. Na Figura 4 é apresentado um exemplo de uma vedação, sendo do lado esquerdo metal-metal e do lado direito uma vedação elastomérica (SINGEETHAM ; VALKA, 1991).

Figura 4 - Vedação Metal-metal à esquerda e Vedação Elastomérica a direita.



Fonte: SINGEETHAM ; VALKA, 1991

A vedação metal-metal analisada no presente trabalho é também chamada de *packoff* ou CVU. A concepção e o aprimoramento dos sistemas de vedação utilizados em cabeças de poço submarino são resultado de um esforço contínuo de várias empresas, fornecedores e instituições de pesquisa ao longo do tempo. No setor de petróleo e gás, diversas empresas e fabricantes contribuíram para o desenvolvimento e avanço das tecnologias de vedação, incluindo vedação metal-metal, no contexto de SCPS. Empresas como a Cameron (agora parte da SLB), FMC Technologies (atualmente TechnipFMC), Aker Solutions, National Oilwell Varco (NOV) e muitas têm trabalhado na concepção, formação e fornecimento de SCPS, incluindo os componentes de vedação.

A vedação do CVU é totalmente metálica, com três superfícies esféricas de vedação interna e duas superfícies esféricas de vedação externa. A vedação possui formato cônico internamente (maior em direção à extremidade inferior) para se ajustar à superfície cônica de vedação externa do SR. Pinos de cisalhamento impedem que a vedação seja energizada prematuramente ao ser instalada no poço (SINGEETHAM ; VALKA, 1991) .

Dentre os requisitos estabelecidos, o *packoff* deve fornecer vedação metal-metal sem elastômero presente; ter vários locais de vedação tanto no alojador quanto no suspensor; deformar plasticamente para preencher ranhuras nas superfícies de vedação; ser "*weight set*" (energização por aplicação de peso) exigindo menos de 15.000 libras de peso da coluna de perfuração combinado com a pressão anular abaixo dos preventores para energizar totalmente; travar no suspensor do revestimento; possuir um dispositivo opcional de travamento de alta capacidade para o alojador para evitar o movimento ascendente do suspensor devido à pressão anular; ser recuperado com força de tração inferior a 50.000 libras; ser resistente e capaz de funcionar sob condições adversas do poço; ser classificado para uma faixa de temperatura operacional de -30 a 250 graus Fahrenheit; e ser capaz de suportar a pressão máxima nominal em diâmetro total a 350 graus por pelo menos uma hora (SINGEETHAM ; VALKA, 1991).

A ativação do CVU é feita por meio da aplicação de uma força externa, conhecida como "energização". A instalação da vedação ocorre por meio de uma

combinação de peso e pressão, que empurra o anel energizador entre a vedação metálica em formato de "U" e expande-o nos perfis dos *wickers*. Essa expansão da vedação em formato de "U" pressiona os *wickers* contra o material de vedação mais macio, criando uma vedação confiável, mesmo que os *wickers* tenham sofrido danos (PASCHOA, 2013).

A vedação é composta por seções internas e externas feitas de metal, que são separadas por um anel de energização que é empurrado para baixo. Conforme as seções de metal se afastam, "*wickers*" (um tipo de rosca) usinados na parte externa do suspensor de revestimento e na parte interna do alojador se encaixam nas seções de vedação de metal. Essa ação de encaixe foi comprovada por meio de testes extensivos como uma vedação metal-metal confiável (MILBERGER; BOEHM, 1989).

2.6. NORMAS PARA A SEGURANÇA EM SCPS

A função de integridade do poço é crucial, pois sua falha resulta em um vazamento indesejado de fluidos, que é denominado como *blowout*, que, além do vazamento de óleo e gás, pode ter outras consequências como: poluição ambiental, fogo nas instalações, fatalidades, entre outros. Na Figura 5 temos a explosão que ocorreu na plataforma *Deepwater Horizon* da BP, em 20 de Abril de 2010, sendo um dos maiores desastres de uma plataforma petrolífera offshore. Quatro milhões de barris de petróleo foram derramados no Golfo do México, prejudicando um grande número de aves marinhas e danificando as costas por centenas de quilômetros. (The world's worst offshore oil rig disasters, 2019)

Figura 5 - Explosão da Plataforma *Deepwater Horizon*.



Fonte: The world's worst offshore oil rig disasters, 2019

Em todas as etapas do ciclo de vida do poço, é fundamental realizar uma avaliação rigorosa de perigos e análise de riscos, juntamente com a aplicação de técnicas de engenharia de confiabilidade. Essa avaliação deve ser conduzida e documentada de maneira abrangente, com o objetivo de assegurar que o poço esteja em conformidade com requisitos essenciais, incluindo funcionalidade, segurança operacional, gerenciamento de riscos, metas de desempenho, confiabilidade, facilidade de manutenção e disponibilidade.

Uma das normas relevantes para a segurança em SCPS é a API 17D. A API (*American Petroleum Institute*) é uma organização que estabelece normas e especificações para a indústria de petróleo e gás. A norma API 17D, intitulada "*Specification for Subsea Wellhead and Tree Equipment*", abrange os requisitos para o projeto, fabricação e teste de equipamentos submarinos, incluindo proteção e conexões de cabeça de poço. Com relação à integridade de poço, segue algumas premissas:

- Pressão – de acordo com a pressão máxima de trabalho (PMT) exigida, o equipamento deverá atender à classe de pressão tal que seja maior ou igual à máxima pressão prevista no projeto durante todo o ciclo de vida do poço;

- Temperatura – resistir às temperaturas mínima e máxima previstas no projeto durante todo o ciclo de vida do poço;
- Compatibilidade dos materiais em contato com fluidos produzidos e injetados.

Estabelece ainda requisitos detalhados para diferentes componentes da cabeça de poço submarino. (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2021).

Segundo Skeels (2014), outro documento importante é a API 17TR8 (2015). Este é um relatório técnico que aborda aspectos como requisitos de material, projeto estrutural, dimensões, tolerâncias, critérios de desempenho e métodos de teste para *packoff* utilizados em SCPS. Ela fornece orientações para garantir que estes dispositivos sejam projetados e fabricados de acordo com padrões de qualidade e segurança.

Além dos documentos já citadas, outras normas e especificações podem ser cumpridas dependendo da localização geográfica, regulamentações governamentais e especificações do operador do campo de petróleo. As normas fornecem diretrizes importantes para o projeto, fabricação, instalação, operação e manutenção dos equipamentos submarinos, incluindo as vedações.

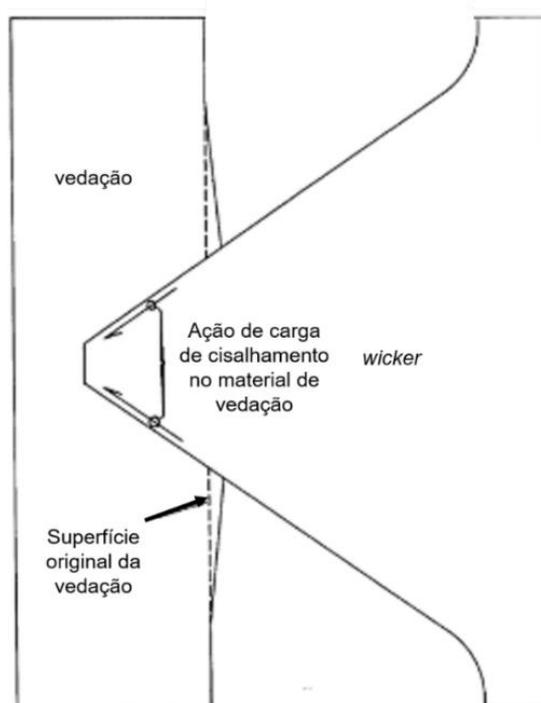
2.7. ENERGIZAÇÃO

É possível categorizar os SCPS em três grupos distintos: sistemas obsoletos, sistemas intermediários e sistemas de última geração. Além disso, esses sistemas podem ser subdivididos em duas categorias principais com base em sua técnica de energização: sistemas de *torque-set* e sistemas de *weight-set*. Essas terminologias se referem à forma como o CVU é ativado, seja por meio da aplicação de rotação ou do uso de peso, sendo este último considerado a alternativa mais avançada e atual (GARCIA , 1997).

O processo de energização gera tanto uma força normal quanto uma força de cisalhamento nas superfícies de um material de vedação. A tensão normal aplicada nesse processo é aproximadamente 2,6 vezes o limite de escoamento do material de vedação. Levando em consideração esses fatores, foi definido um padrão específico

para as superfícies de vedação. Esse padrão consiste em uma série de sulcos triangulares dispostos sem inclinação angular, que são usinados nas superfícies dos dispositivos. Isso resulta na formação de áreas triangulares, conhecidas como "*wickers*", cujas extremidades correspondem à superfície cilíndrica original de vedação. Na Figura 6 é apresentada uma indentação gerada por um *wicker* (BOEHM; HOSIE, 1990).

Figura 6 - Cravamento de um *Wicker*.

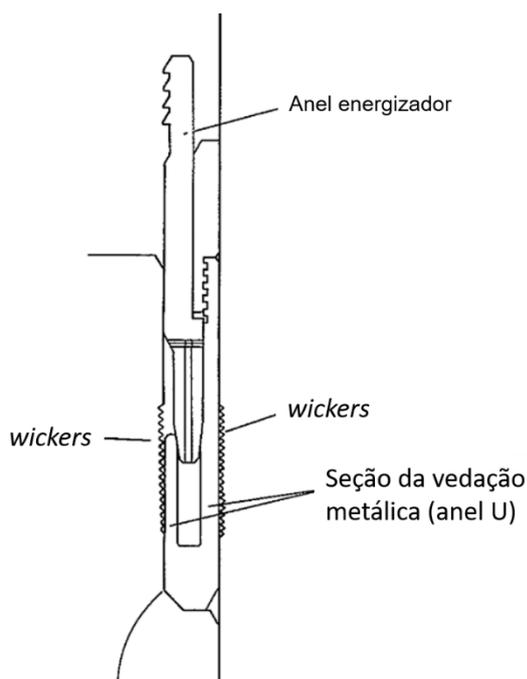


Fonte: BOEHM; HOSIE, 1990

A vedação metálica representada na Figura 7 oferece uma série de características altamente vantajosas que atendem às exigências rigorosas das operações de perfuração em ambientes marítimos desafiadores. A estrutura dessa vedação é composta por um anel em formato de U, que tem suas seções separadas com o auxílio de um anel de energização. Conforme as seções metálicas se afastam, ocorre uma interação com os *wickers*. Esse processo de interação e penetração dos *wickers* nas seções do selo metálico foi submetido a uma série de testes rigorosos. Os resultados desses testes demonstraram que esse método é altamente eficaz para estabelecer uma vedação metal-metal confiável (MILBERGER; BOEHM, 1989).

Essa abordagem proporciona benefícios significativos no contexto de operações de perfuração em ambientes submarinos, onde as demandas de vedação e a integridade do sistema são de extrema importância. A capacidade comprovada dessa vedação em garantir uma vedação metal-metal confiável é fundamental para manter a segurança, a eficiência e o sucesso das operações de perfuração nesses ambientes desafiadores. (MILBERGER; BOEHM, 1989).

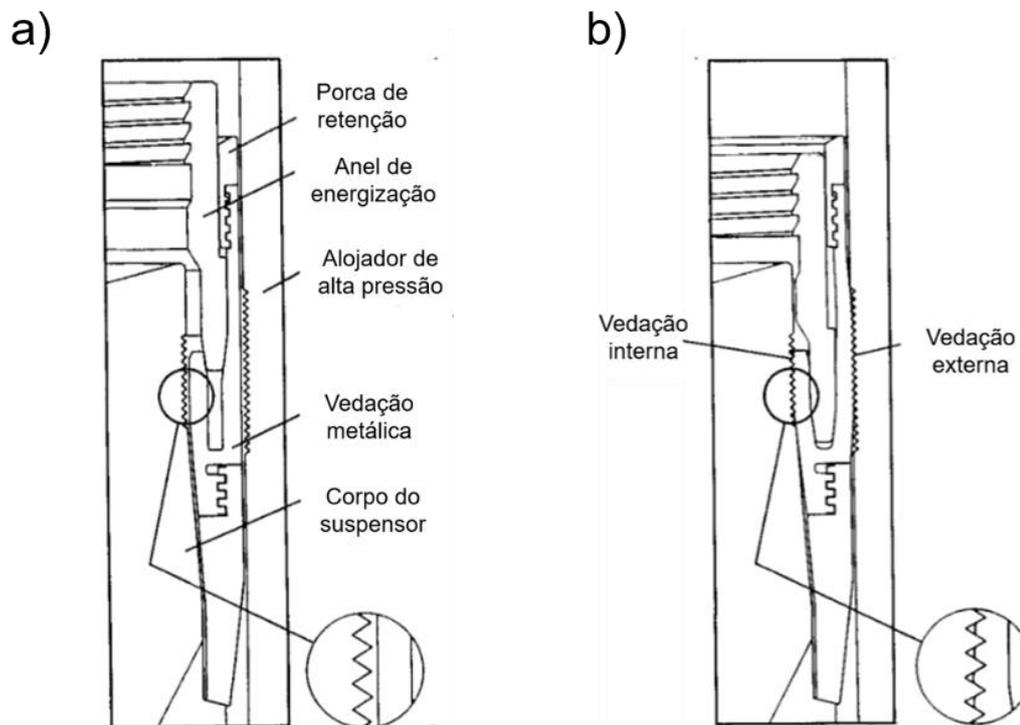
Figura 7 - Vedação Metal-Metal utilizada entre Suspensor de Revestimento e Alojador.



Fonte: MILBERGER; BOEHM, 1989

Na Figura 8 é apresentado o processo de energização, onde o CVU é energizado à medida que o anel de energização é empurrado para baixo, Figura 8.a, forçando as seções interna e externa do anel U da vedação contra os *wickers*, tanto no suspenso de revestimento quanto no alojador. Isso promove uma vedação e trava as duas seções do CVU em suas respectivas superfícies de contato, conforme apresentado na Figura 8.b (BOEHM; HOSIE, 1990).

Figura 8 - Conjunto de Vedação antes e após a energização, respectivamente.



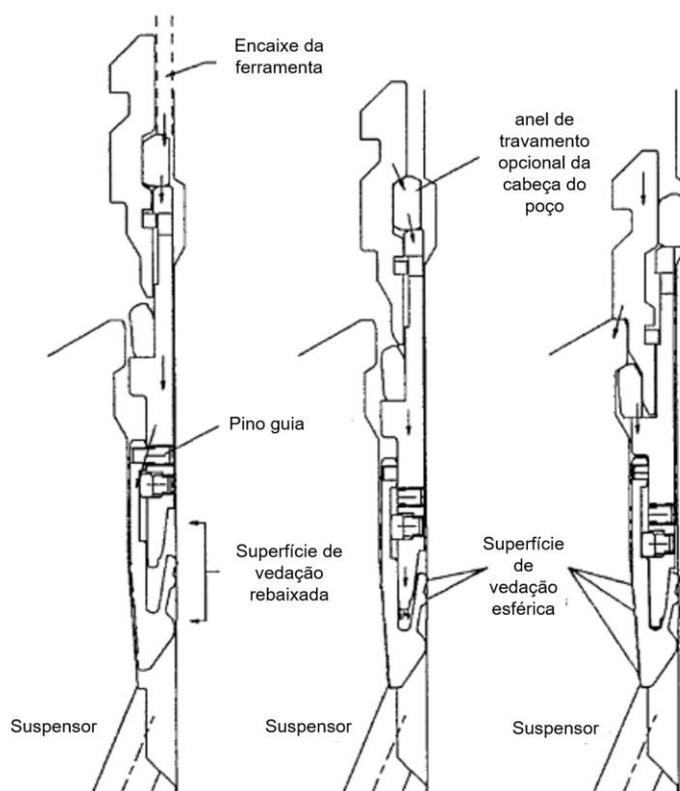
Fonte: BOEHM; HOSIE, 1990

Para energizar completamente o CVU, é aplicada pressão no anel anular. A pressão expande o interior do selo, forçando-o contra o SR e contra o AAP. Essas deflexões radiais reduzem a carga necessária para empurrar o mandril de energização para baixo. Durante a etapa final da sequência de ajuste, a força de ajuste descendente, gerada pela pressão atuando na área do pistão da ferramenta, é aumentada devido aos múltiplos cones de cunha entre o mandril de travamento, o anel de travamento do suporte e o sulco de travamento da caixa do suporte. A carga de ajuste descendente é convertida em carga radial, que energiza completamente as superfícies de vedação (SINGEETHAM ; VALKA, 1991).

Na posição totalmente energizada, ocorre um achatamento significativo das superfícies de vedação esféricas, formando várias áreas de vedação entre o SR e o AAP. Por fim, o mandril de travamento se move para baixo em relação ao anel de travamento do suporte, prendendo-o no lugar em diâmetros retos e preservando a pré-carga desenvolvida durante a sequência de energização. Na Figura 9 é apresentada a sequência de instalação de um CVU, e na Figura 10 é apresentado um gráfico com

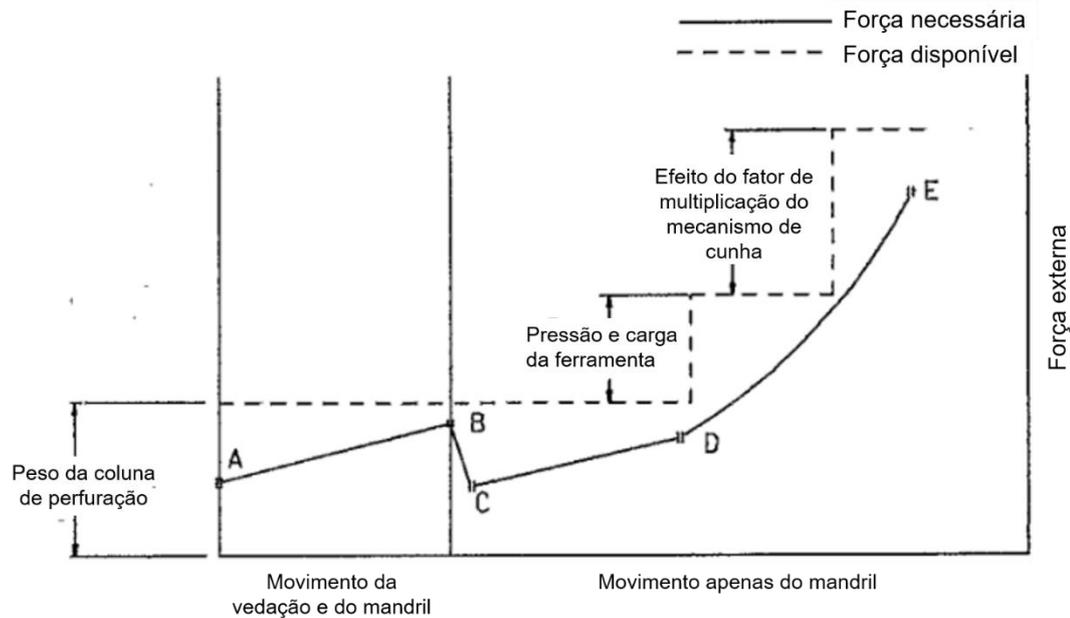
a variação de força da ferramenta durante o processo de energização de um CVU (SINGEETHAM ; VALKA, 1991).

Figura 9 - Sequência de Instalação de um CVU.



Fonte: SINGEETHAM ; VALKA, 1991

Figura 10 - Variação da Força da Ferramenta durante a Energização do CVU.



Fonte: SINGEETHAM ; VALKA, 1991

- Do ponto A até o ponto B temos a expansão da vedação e o movimento de descida no suspensor,
- Do ponto B até o ponto C temos o cisalhamento do pino de operação,
- No ponto D uma vedação com baixa pressão é alcançada,
- Do ponto D até o ponto E ocorre a deformação plástica da superfície esférica da vedação,
- No ponto E a vedação está energizada e travada.

2.8. TENSÃO RESIDUAL

No campo da engenharia, fabricar novos componentes metálicos sem afetar negativamente suas propriedades mecânicas é um desafio. Durante processos como a conformação mecânica, o material sofre deformação plástica não uniforme, alterando permanentemente suas propriedades originais e resultando em tensões residuais (TURIBUS, 2014).

A existência de tensões residuais pode gerar influências na resistência à fratura, na resistência à fadiga e na capacidade desses materiais de suportar cargas. Uma vez que essas tensões residuais interagem com as tensões aplicadas ao equipamento, elas têm o potencial de aumentar ou diminuir a tensão efetiva que atua, dependendo se são de natureza trativa ou compressiva (SOARES, 1998).

Durante o processo de deformação plástica ocorrem alterações na microestrutura do material, resultando na movimentação e formação de imperfeições na rede cristalina, o que pode aumentar sua dureza. No entanto, esse fenômeno nem sempre é benéfico, pois pode prejudicar o desempenho do componente ao gerar microfaturas em seu interior (SOUSA, 2012).

As tensões residuais estão presentes em componentes que passaram por processos de fabricação, como fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento e têmpera. Uma das principais razões para a existência dessas tensões é a ocorrência de deformações plásticas não uniformes ao longo da seção da peça, muitas vezes causadas por influências mecânicas ou térmicas. Essas tensões residuais podem ter um impacto significativo na integridade estrutural da peça, tornando-se um aspecto crucial a ser considerado em aplicações críticas (MODENESI, 2008).

As tensões residuais são frequentemente classificadas em três categorias principais, cada uma desempenhando um papel distintamente relevante:

a) Tensões residuais do tipo 1, conhecidas como macro-tensões residuais, são extensas e abrangem várias áreas do componente, envolvendo múltiplos grãos. Essas macro-tensões residuais surgem devido a influências mecânicas, térmicas ou químicas que afetam uma parcela considerável do material, comparável às dimensões do equipamento em questão. Notavelmente, elas permanecem equilibradas em todo o corpo da peça e são o resultado de deformações plásticas em uma escala macroscópica.

b) As tensões residuais do tipo 2, frequentemente referidas como tensões microestruturais, estão localizadas em um único grão ou em partes específicas dele.

Estas tensões se equilibram em alguns grãos vizinhos e são provocadas por deformações plásticas em uma escala microscópica.

c) As tensões residuais do tipo 3, chamadas de tensões microlocalizadas, estendem-se por curtas distâncias interatômicas, dentro de uma pequena porção de um grão. Elas também permanecem equilibradas, mas em uma pequena área do grão, e têm origem em defeitos cristalinos, particularmente discordâncias.

É crucial destacar que as tensões residuais do tipo 2 e 3 são consideradas microtensões, e sua presença é inerente em materiais policristalinos. Essas microtensões desempenham um papel vital no estudo da microestrutura do material. Entretanto, quando se trata de avaliar projetos mecânicos e estruturais, as macro-tensões do tipo 1 assumem um papel preponderante (SOARES, 1998).

A tensão residual em um material após a ocorrência de uma falha está diretamente relacionada à carga que o material suportou antes de falhar. Em casos em que um elemento, ou um grupo de elementos, é carregado axialmente e forma um sistema estaticamente indeterminado capaz de suportar cargas de tração e compressão, a aplicação de carregamentos externos excessivos que provocam o escoamento do material pode resultar em tensões residuais. Isso se deve à recuperação elástica do material, que ocorre durante o processo de descarregamento (HIBBELER, 2010).

Quando o material é carregado até o seu limite e ocorrem deformações permanentes, ao descarregar o material, uma parte dessas deformações é recuperada elasticamente. Essa recuperação elástica acontece devido às propriedades de elasticidade do material, que permite que ele retorne parcialmente à sua forma original. No entanto, devido à natureza da falha e das redistribuições de tensão ocorridas durante o carregamento excessivo, algumas dessas deformações não podem ser completamente recuperadas. Isso resulta na formação de tensões residuais, que são tensões remanescentes no material mesmo após a carga ter sido removida (HIBBELER, 2010).

2.9. MÉTODOS DE ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL

Os métodos para medida de tensões residuais podem ser destrutivos, semi-destrutivos ou não destrutivos. Os diversos métodos de medida de tensões residuais utilizam medidas de deformações, induzidas por tensões, que são utilizadas para calcular as tensões residuais existentes no material. No Quadro 1 são apresentados de forma resumida os principais métodos de análise de tensão residual (SUTERIO, 2005).

Os métodos de análise destrutivos e semi-destrutivos estão diretamente relacionados à alteração do estado de equilíbrio das tensões residuais, provocando alívio dessas tensões no ponto ou na região de análise. Esses métodos concentram-se exclusivamente na análise de tensões residuais macroscópicas. Já os métodos não-destrutivos se caracterizam por mensurar as variações nos parâmetros físicos ou cristalográficos do material em questão quando este está sujeito a tensões residuais (SOUSA, 2012).

Quadro 1 - Principais Métodos de Análise de Tensão Residual

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	OBSERVAÇÕES
Semidestrutivos	Método do furo cego	Execução de um furo, φ 0,8 a 3.2 mm. Método normalizado pela ASTM-E-837.
Destrutivos	Método de remoção de camadas (Método da Deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método Difração de Raios X (método não-destrutivo).
	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axissimétricas, ex.: cilindros.
Não-destrutivos	Difração de raios X	Varição das distâncias entre os planos atômicos.
	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de raios X, no entanto, com inspeção em todo o volume. Técnica normalizada pela SAE-J784a.
	Método ultrassônico	Varição da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material.
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen.

Fonte: Adaptado de SUTERIO, 2005

2.10. MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS – DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A tensão residual pode ser analisada através da difração de raios X (DRX), que é um método não destrutivo. Os raios X são uma forma de radiação eletromagnética caracterizada por sua alta energia e comprimentos de onda curtos, da ordem dos espaçamentos atômicos nos sólidos. Ao incidir sobre um material sólido, um feixe de raios X é disperso em todas as direções pelos elétrons associados a cada átomo ou íon que se encontra em sua trajetória. Isso ocorre devido à interação entre os raios X e os elétrons presentes no material, resultando na dispersão do feixe (CALLISTER, JR.; RETHWISCH).

A dispersão dos raios X pelo material sólido contém informações valiosas sobre a estrutura e composição do material. A intensidade e o padrão de dispersão podem ser analisados e interpretados para obter detalhes sobre a disposição dos átomos no material, a distância entre eles e a natureza das ligações químicas presentes. Esses raios transmitem energia na forma de comprimentos de onda, os quais podem se somar ou se anular quando duas ondas de mesmo comprimento se encontram. Isso resulta em padrões característicos de espalhamento dos raios X, permitindo a análise e estudo detalhado da estrutura cristalina dos materiais. A Figura 11, representa a interferência construtiva, ocorrendo um aumento da amplitude da onda resultante. A Figura 12 representa uma interferência destrutiva, havendo a anulação dessas ondas (CALLISTER, JR.; RETHWISCH).

Figura 11 - Interferência Construtiva.

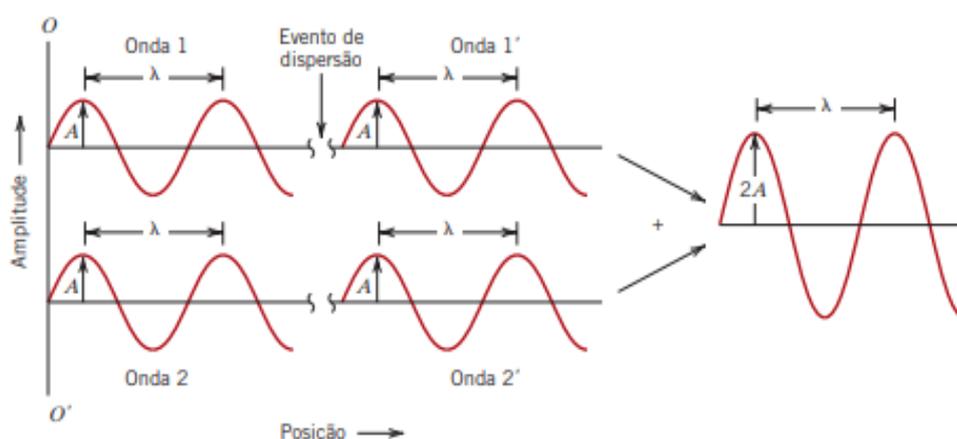
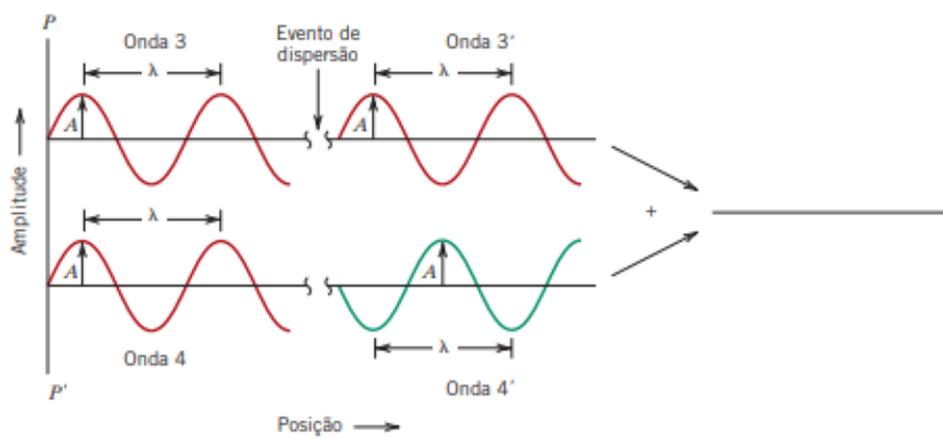


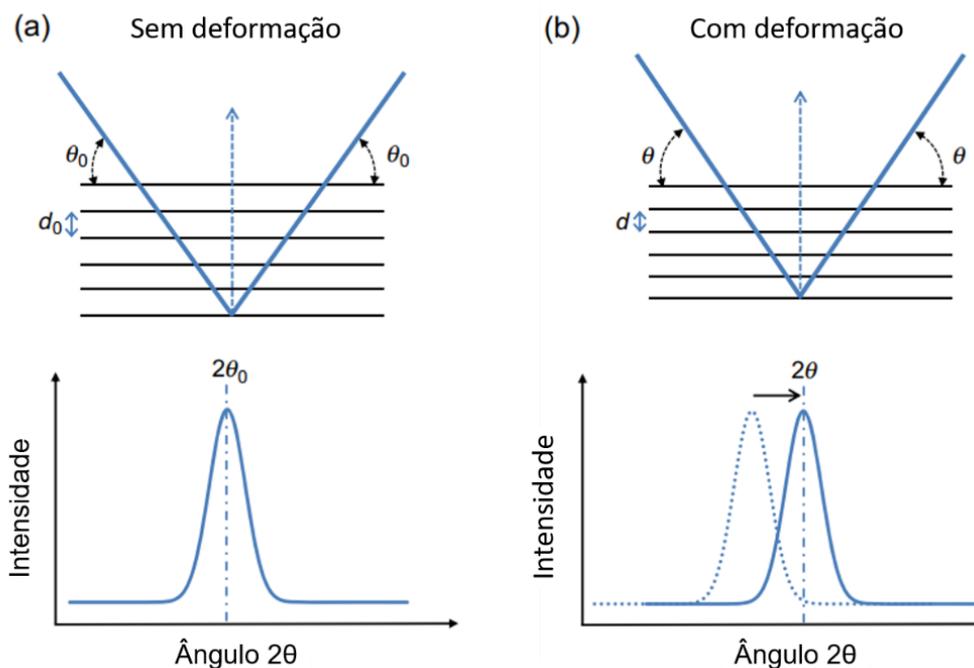
Figura 12 - Interferência Destrutiva.



Fonte: Callister, 2016, página 80

Este método se fundamenta na medição do espaçamento entre os planos de rede considerados (hkl), permitindo a determinação das deformações em uma direção específica. A Figura 13 representa o princípio fundamental da medição de tensões por difração de raios X, demonstrando uma rede reticular sem tensões, apresentando um espaçamento reticular inicial d_0^{hkl} que resulta em um pico de difração em um ângulo 2θ específico. Quando o material está submetido a tensões, o espaçamento reticular d_i^{hkl} pode aumentar ou diminuir, provocando um deslocamento na posição do pico registrado. Com base nesse princípio, é possível avaliar as tensões residuais dos tipos 1 e 2 (HÜBSCHEN *et al.*, 2016).

Figura 13 - Descrição esquemática da difração em determinados planos hkl e sinal correspondente registrado por um difratômetro de raios X: (a) para uma rede livre de tensões; (b) para uma rede sob tensões residuais de compressão.

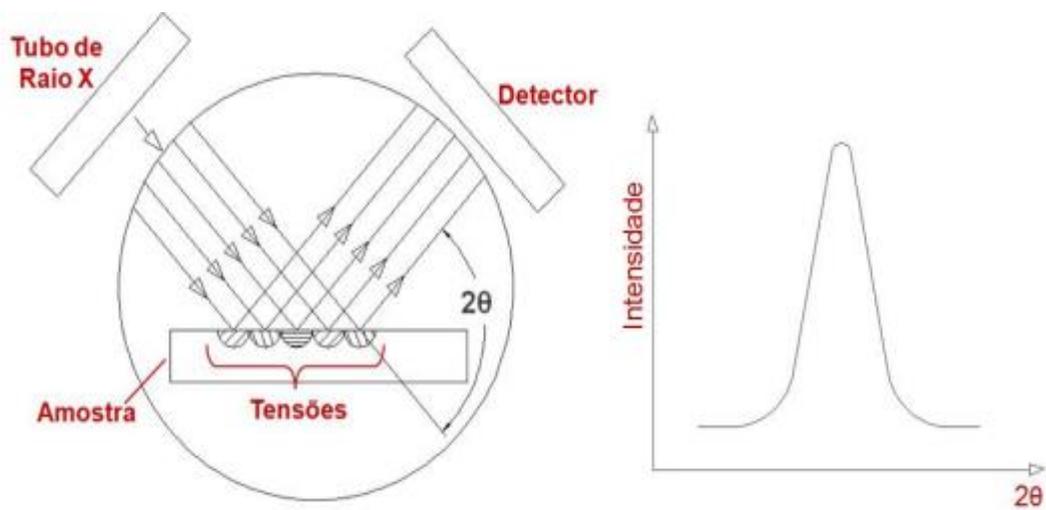


Fonte: HÜBSCHEN *et al.*, 2016

Essa metodologia avalia a deformação do retículo cristalino causada pela tensão residual. Quando o material deforma plasticamente, há o alívio das TR, sendo possível calcular a tensão aplicando a teoria da especificação juntamente com informações obtidas a partir das linhas de difração na técnica de raios X. (TURIBUS, 2014).

Quando um feixe de raios X incide na superfície de um objeto, ocorre a absorção de parte desses raios pelos átomos do material, enquanto outra parte é dispersa em todas as possibilidades da região irradiada, conforme apresentado na Figura 14. Esse procedimento de medição é focado na avaliação da intensidade máxima dos raios difratados a um ângulo específico de varredura. Através desse ângulo, é viável determinar o espaçamento entre os planos de difração (SOUSA, 2012).

Figura 14 - Incidência dos raios X sobre a amostra. Intensidade do raio difratado para um determinado 2θ .

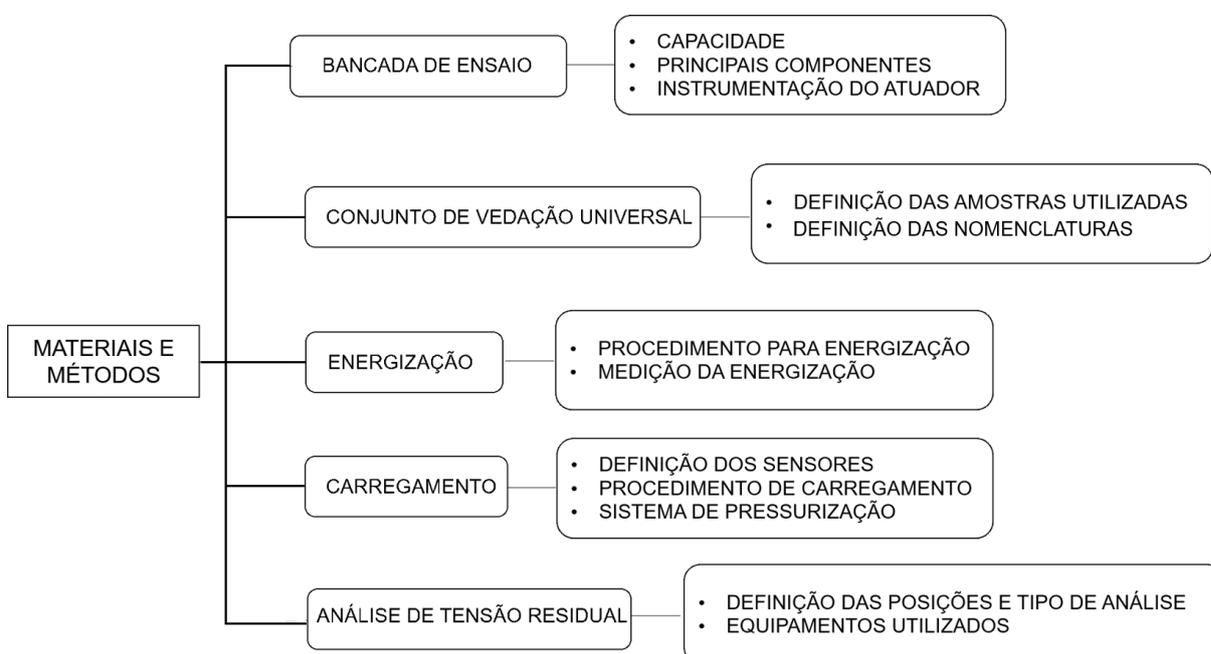


Fonte: SOUSA, 2012

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será explicado em detalhes como este estudo foi conduzido, destacando os equipamentos e amostras essenciais utilizadas. Será apresentada a bancada de ensaios, onde os testes em escala real foram realizados, e será abordada a instrumentação usada para controlar o atuador hidráulico nos testes de carregamento. Será realizado um detalhamento dos dispositivos para medição de força e aquisição de dados, além de discutir o tipo de CVU usado em cada teste. Este capítulo também apresentará todas as etapas dos procedimentos de energização e carregamento, finalizando com a análise de tensão residual. Na Figura 15 temos um fluxograma resumindo as etapas deste capítulo.

Figura 15 - Fluxograma dos Itens Abordados em Materiais e Métodos.



Fonte: A Autora

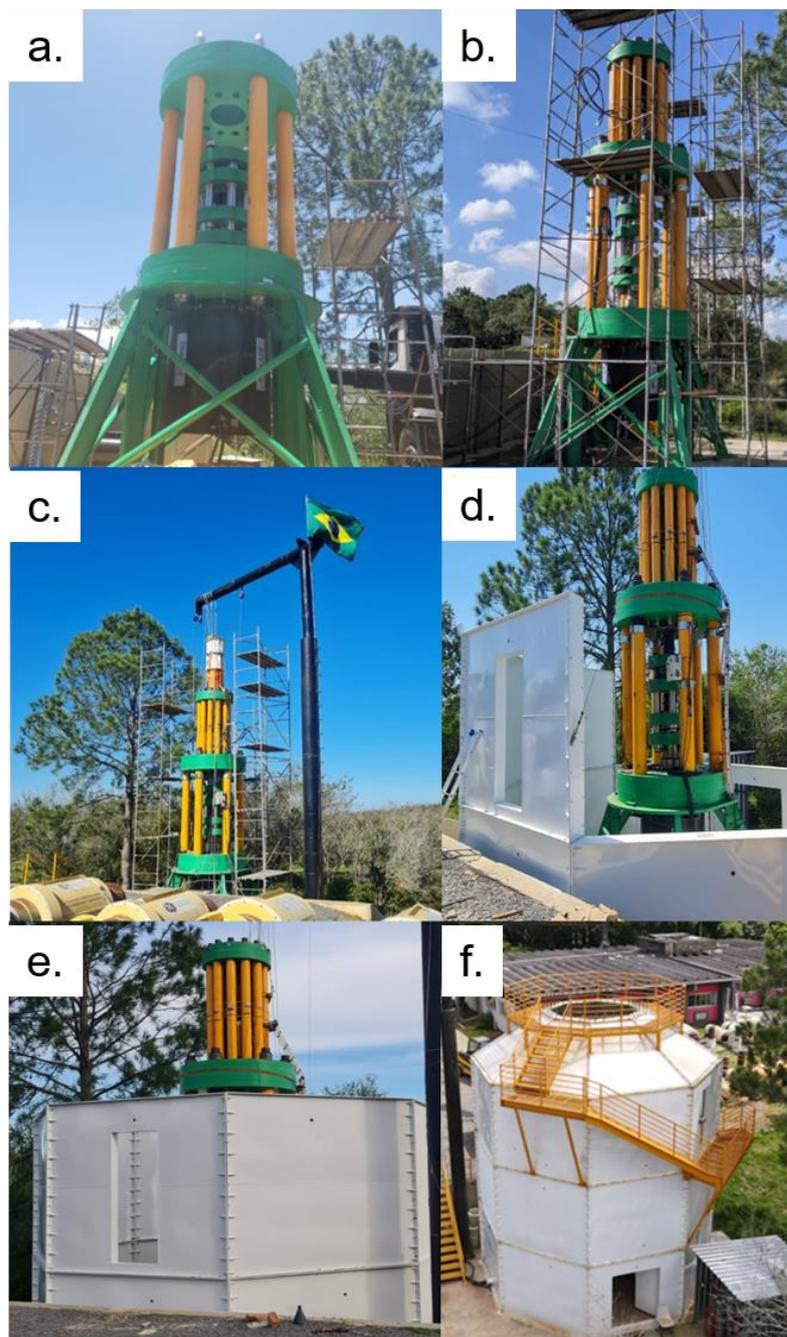
3.1. BANCADA DE ENSAIOS

Para a realização dos ensaios em escala real que simulam condições de SCPS, foi construída uma bancada de ensaios que possui um atuador com capacidade para realizar carga ascendente de 1500 toneladas e carga descendente de 750 toneladas, além de realizar ensaio com pressão interna nas amostras e ensaio com temperatura até 150 °C.

Esta bancada está localizada na UFRGS - Lamef - Unidade Barro Vermelho, localizado na cidade de Gravataí, Rio Grande do Sul, e foi projetada e montada pela equipe vinculada ao Projeto de Pesquisa em Metodologia para Cálculo de Tensões em SCPS, do qual a autora fez parte.

Na Figura 16 é possível acompanhar o desenvolvimento da bancada de testes e de sua estrutura de proteção, que se fez essencial devido às altas pressões que as amostras são submetidas durante os ensaios que simulam condições reais de SCPS. As montagens da estrutura da bancada iniciam na Figura 16.a e concluem-se na Figura 16.c, e as montagens da estrutura de proteção iniciam-se na Figura 16.d e concluem-se na Figura 16.f.

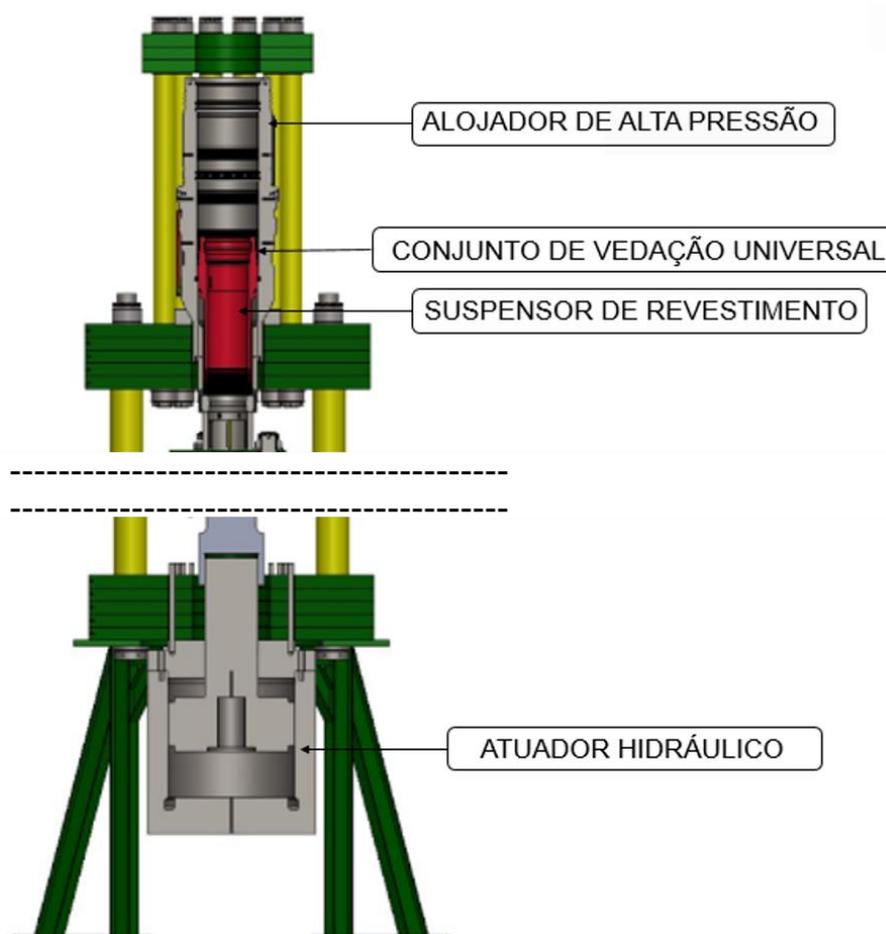
Figura 16 - Sequência de Montagem da Bancada de Testes e da Estrutura de Proteção.



Fonte: A Autora

Na Figura 17 temos um desenho esquemático da montagem de dispositivos na bancada, com um destaque para a localização das amostras de maior importância neste trabalho e para o atuador hidráulico.

Figura 17 - Desenho Esquemático dos Dispositivos na Bancada.



Fonte: A Autora.

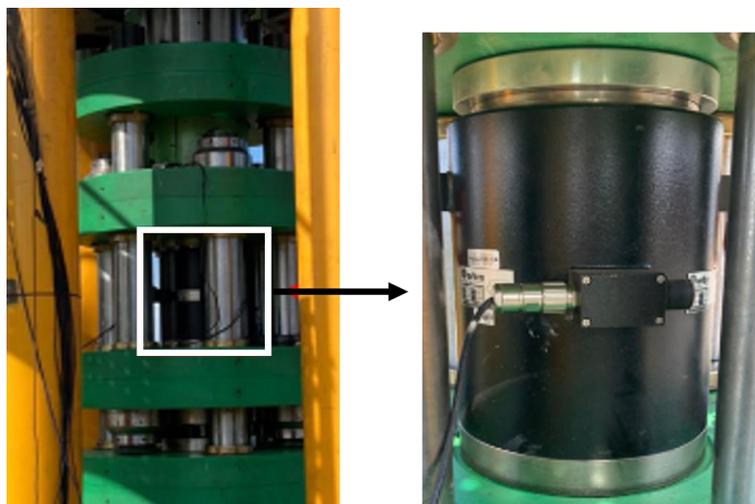
3.1.1. Instrumentação do Atuador Hidráulico

Os equipamentos utilizados para o controle do atuador hidráulico foram: unidade de pressão hidráulica MTS (HPU), Servo Válvula Moog, Flextest 60, sensor LVDT Temposonics. O sensor de deslocamento LVDT – Temposonics - é um sensor de deslocamento linear que há ausência de contato deslizante ou rolante, sendo muito preciso para aplicações industriais. O sensor foi calibrado através do sistema da MTS e um traçador de altura, com precisão de 0,01 mm.

A realização das leituras de força aplicada pelo cilindro hidráulico se deu de duas maneiras: uma através da leitura pela célula de carga de 1500 toneladas instalada no sistema de medição de força, apresentado na Figura 18, e a outra se deu

através do cálculo de força utilizando as áreas e pressões de cada câmara do cilindro hidráulico. Para isso, foram instaladas as células de pressão nos blocos das câmaras inferior e superior do cilindro hidráulico conforme Figura 19. Ambas as células de pressão estão calibradas com seus devidos certificados de calibração.

Figura 18 - Célula de Carga de 1500 Toneladas.



Fonte: A Autora.

Figura 19 - Células de Pressão da Câmara Superior e Câmara Inferior.



Fonte: A Autora.

A célula de carga foi aferida no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS unidade Embrapii, utilizando uma bancada de teste para 300 toneladas na qual foi aplicada a força de 3000 kN em compressão para fazer a sua aferição conforme curva apresentada pelo fornecedor dela e a partir desse valor foi feita a linearização da curva

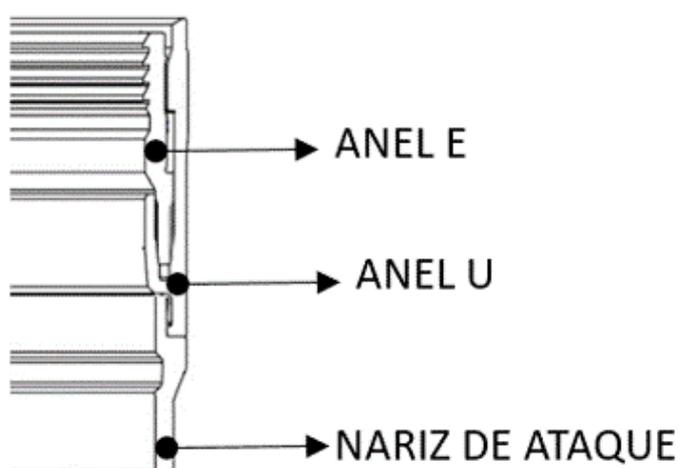
de calibração. A partir desses procedimentos ainda foi realizado na bancada de testes 10 ciclos aplicando 5000 kN a fim de verificar as leituras tanto da célula de carga quanto das obtidas pelos valores das células de pressão comparando-as pela sobreposição de suas curvas.

3.2. CONJUNTO DE VEDAÇÃO UNIVERSAL

O CVU desempenha um papel fundamental nos SCPS, ficando instalado entre o AAP e o SR. Sua principal função é garantir a vedação eficaz no espaço anular entre as colunas de revestimento. Portanto, é essencial que sua capacidade de fixação contra o SR e o AAP seja suficiente para resistir à pressão ascendente gerada pela dilatação térmica, evitando a perda da vedação do anular.

Vale ressaltar que cada fornecedor pode apresentar uma variação específica de vedação. A Figura 20 ilustra um corte representativo de um modelo de vedação, com alterações realizadas pela própria autora (visando manter o sigilo quanto às características geométricas), destacando as partes principais deste componente. As análises realizadas neste estudo concentraram-se especificamente neste modelo de CVU em particular.

Figura 20 - Conjunto de Vedação Universal em Corte.

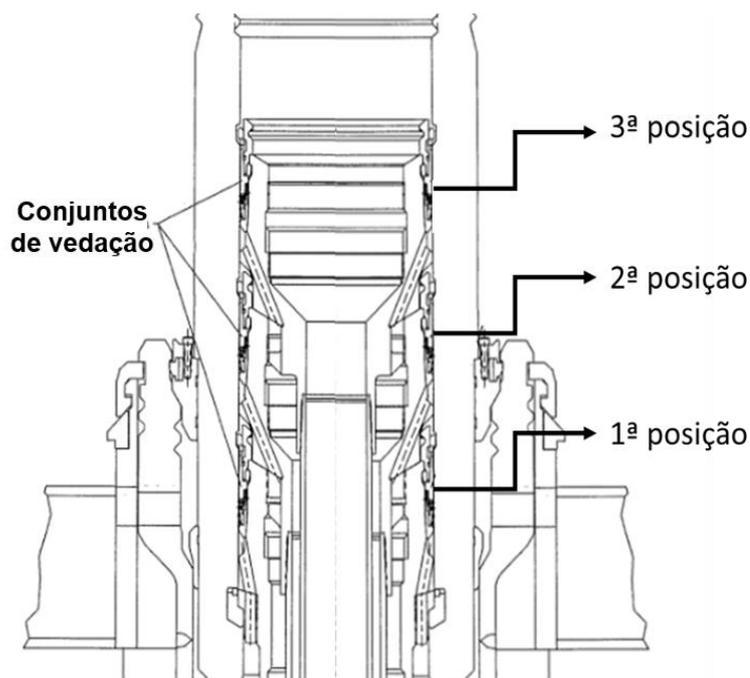


Fonte: A Autora

Neste trabalho será definida uma nomenclatura para cada conjunto de vedação, seguindo a sequência AMxx-X^a-Bx, onde AMxx refere-se ao número da amostra (01, 02, 03, 04 ou 05), X^a é a posição de instalação no alojador (1^a ou 2^a), e Bx é o posicionamento nos *wickers* em relação a banda de cravamento (superior ou inferior). As amostras energizadas na banda inferior apresentam duas características distintas das amostras energizadas na banda superior. Uma delas está relacionada ao nariz de ataque, que apresenta menor altura nas amostras energizadas na banda inferior, e a outra característica está relacionada ao anel E, onde este apresenta maior espessura nestas amostras.

Sendo assim, as amostras analisadas neste estudo serão: AM01-2^a-Bs, AM02-2^a-Bs, AM03-1^a-Bi, AM04-2^a-Bi e AM05-2^a-Bs. Na Figura 21 é apresentada um alojador com as suas posições de energização. Já na Figura 22 temos uma imagem dos *wickers* do alojador, e na Figura 23 temos a representação das bandas superior e inferior dos *wickers*.

Figura 21 - Posições de *Wickers* em um Alojador.

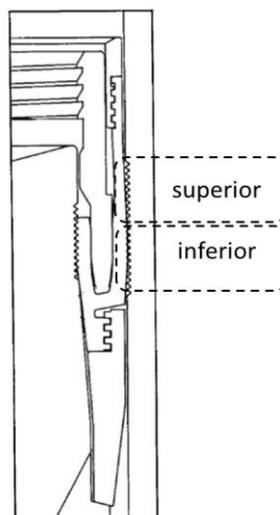


Fonte: Adaptado de SINGEETHAM ; VALKA, 1991

Figura 22 - *Wickers* Alojador

wickers

Fonte: A Autora

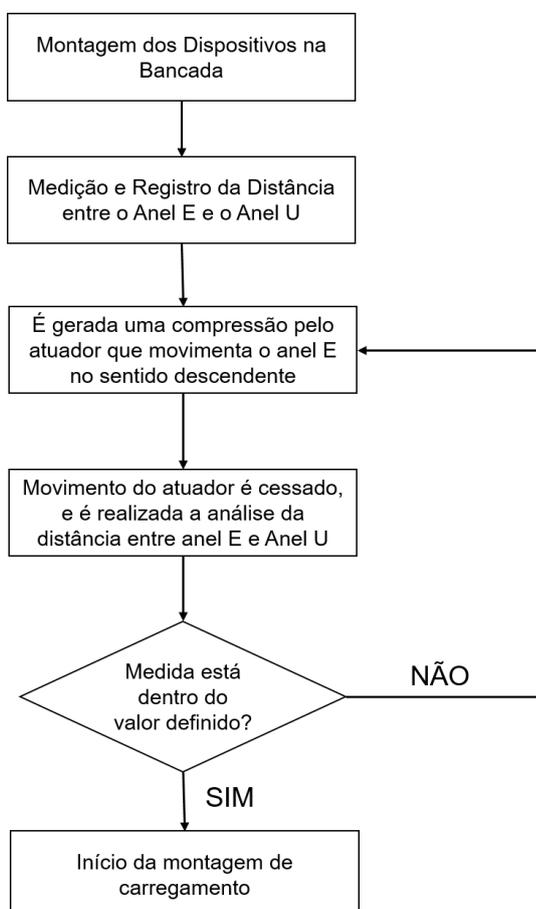
Figura 23 - Posições das Bandas Superior e Inferior dos *Wickers*.

Fonte: Adaptado de BOEHM; HOSIE, 1990

3.3. ENERGIZAÇÃO

O processo de energização trata-se da ativação e travamento do CVU. O processo de energização segue o esquema apresentado na Figura 24:

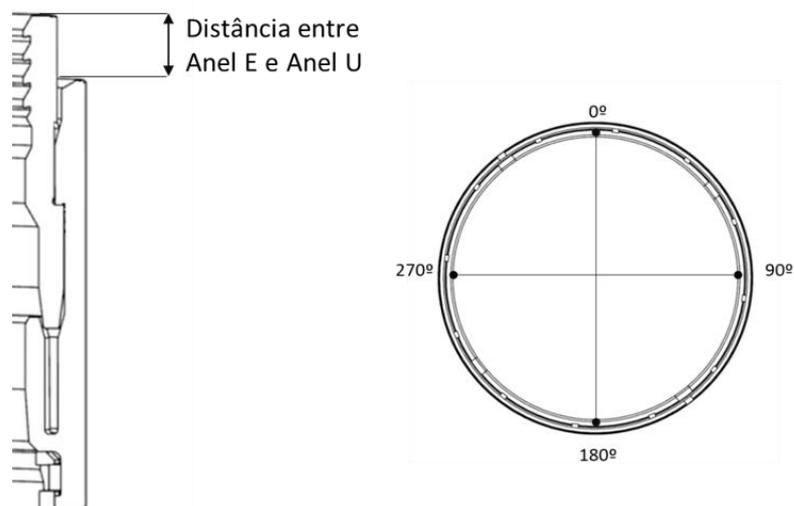
Figura 24 - Fluxograma do Processo de Energização.



Fonte: A Autora

O processo de energização inicia com a montagem dos dispositivos na bancada. Essa montagem contempla o posicionamento do CVU no SR, e o encaixe deles dentro do AAP, que já se encontra posicionado na bancada de testes. Após esse encaixe, ocorre a medição e registro das distâncias entre o Anel E e o Anel U em 4 pontos, a 0°, 90°, 180° e 270°, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Locais de Medição das Distâncias entre o Anel E e o Anel U.

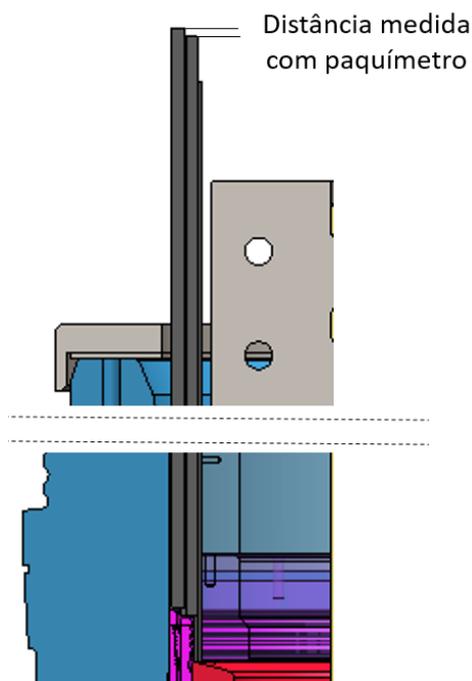


Fonte: A Autora

Após medição e registro das distâncias entre o Anel E e o Anel U, as ferramentas de energização são posicionadas, e passam a ser comprimidas pelo atuador, deslocando o Anel E para baixo para que o mesmo entre no Anel U. A partir deste momento, inicia-se o acompanhamento da curva de Força por Deslocamento através de um *software* MTS, que permite a aquisição e monitoramento de dados de todos os sensores e das células de carga e pressão, utilizados tanto no processo de energização, quanto durante os testes com carregamento. Esse acompanhamento acontece até que se atinja um patamar de carga máxima pré-estabelecido.

Após atingir este patamar de carga máxima, as ferramentas de energização são retiradas, e ocorre uma nova medição e novos registros das distâncias entre o Anel E e o Anel U. Essas medidas são realizadas com paquímetro de precisão da marca Digimess com capacidade para 150mm, para certificação da eficiência do processo de energização, conforme representação na Figura 26.

Figura 26 – Medição da Distância entre Anel E e Anel U



Fonte: A Autora

A distância entre o Anel E e o Anel U, para continuidade dos procedimentos, é determinada pelo fornecedor em conjunto com a equipe do projeto. Este valor não será apresentado neste trabalho por questões de confidencialidade. Dessa forma, se após medição os valores obtidos estiverem de acordo com o valor determinado, inicia-se o processo de montagem para carregamento. Caso a distância entre o Anel E e o Anel U não esteja dentro do valor determinado, repete-se o processo de compressão das amostras com o atuador, realizando novamente o monitoramento da curva de Força por Deslocamento. Esse processo ocorre até que se chegue na medida definida entre o Anel E e o Anel U.

Quando os ensaios contemplam dois conjuntos de vedação, as energizações ocorrem separadamente, sempre iniciando pelo CVU posicionado na região mais inferior do alojador. Sendo assim, quando temos uma montagem com CVU na 1ª e 2ª posição, por exemplo, é realizada a energização do CVU da 1ª posição, e após é realizada a energização da 2ª posição.

Ao finalizar a etapa de energização, a força descendente aplicada aumenta em função do deslocamento, indicando o final do processo. Durante a energização dos CVUs na bancada de testes, os deslocamentos foram medidos através do uso de um sensor do tipo *encoder* posicionado na extremidade superior da haste de tração, empregado de forma complementar a aquisição de deslocamento do atuador hidráulico realizada pelo sensor LVDT instalado no mesmo.

As energizações analisadas neste trabalho referem-se as amostras AM01-2^a-Bs, AM02-2^a-Bs, AM03-1^a-Bi, AM04-2^a-Bi e AM-05-Bs, onde a amostra AM01-2^a-Bs teve sua energização com ar, e as demais tiveram sua energização com água.

3.4. CARREGAMENTO

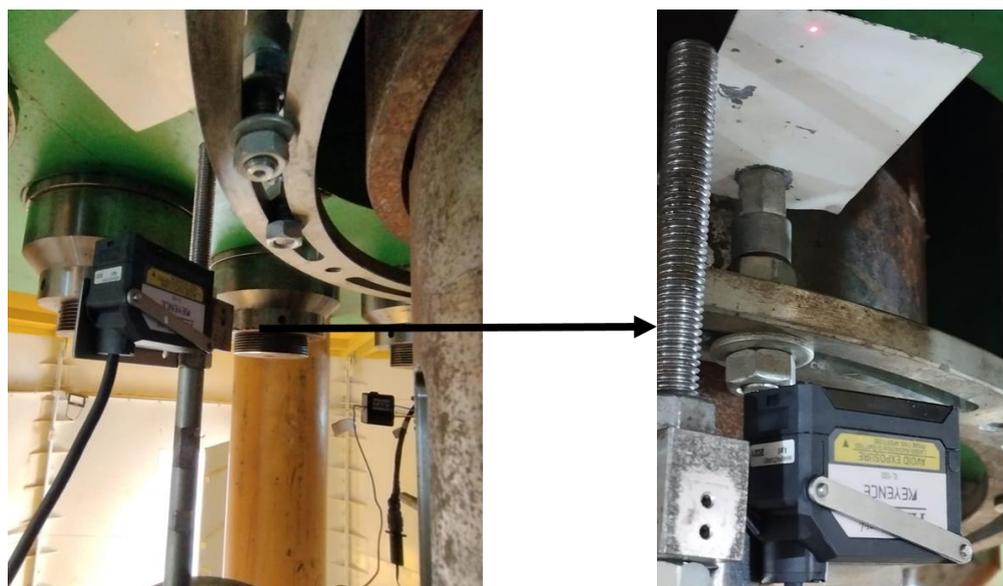
As montagens para o carregamento seguem um padrão, mudando apenas as dimensões de alguns dispositivos, em função do tipo de CVU utilizado. O ensaio de carregamento teve como fator determinante de projeto o deslocamento entre SR e o AAP, pois este é um fator essencial para definir a vida útil e desempenho do sistema de vedação universal. Neste subcapítulo serão abordadas informações relacionadas aos sensores utilizados para aquisição do deslocamento das amostras, e relacionadas ao procedimento a ser seguido durante o processo de carregamento.

3.4.1. Sensores de Deslocamento

O conjunto de medição de deslocamento das amostras consiste em três barras acopladas ao SR, sendo estas conectadas a prolongadores que permitem a fixação externa dos sensores de medição ao alojador. Um anel travando as três hastes garante a rigidez do sistema e permite a avaliação do movimento de um plano com base na média dos valores adquiridos com os sensores. Os sensores usados no teste inicial foram sensores indutivos. Estes foram calibrados através do sistema MTS com o auxílio de um traçador de altura. Após, foram adquiridos sensores de deslocamento a laser, e optou-se por usar ambos, sendo 3 sensores de deslocamento indutivo e 3 sensores de deslocamento a laser. (3 sensores de deslocamento a laser, 3 sensores de deformação do tipo *clip-gage*).

Os sensores de deslocamento a laser vêm calibrados de fábrica, tendo apenas que definir a posição zero, máximos e mínimos da sua saída de sinal. Sua leitura pode ser de tensão ou corrente. Foi realizada a verificação do sinal dos sensores, que possuem uma unidade amplificadora que mostra a medição e o sinal analógico de saída, e foi comparado com os valores recebidos no sistema de aquisição de dados. Os sensores a laser são apresentados na Figura 27.

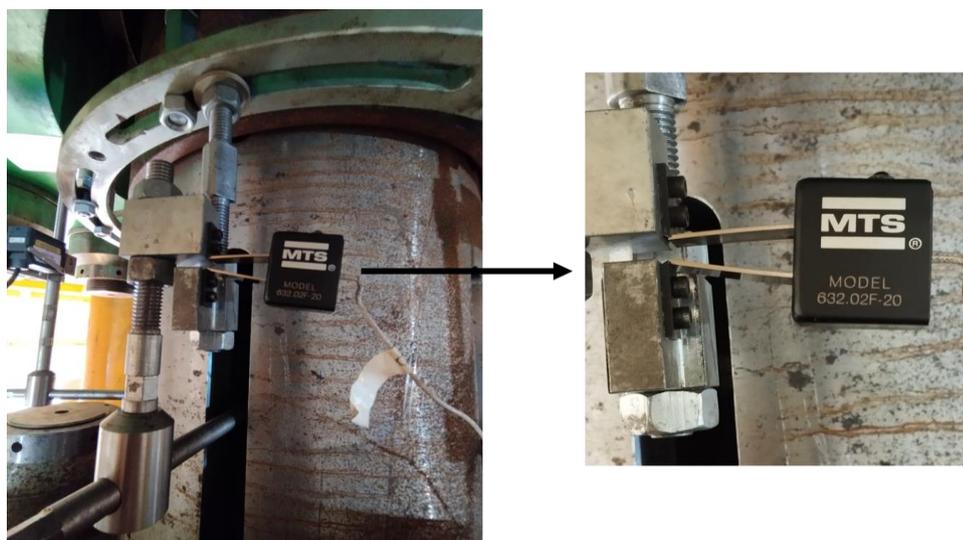
Figura 27 - Sensor a Laser instalado na Bancada de Testes.



Fonte: A Autora

Em condições de laboratório, com temperatura, umidade e vibração controladas, esses sensores apresentam incertezas abaixo de 4 μm , porém, como o ensaio de carregamento das amostras ocorre em local aberto e com variação de temperatura, umidade e ação do vento no sistema, essa incerteza ficou aumentada. Após os ensaios de carregamento preliminar, adotou-se sensores tipo *clip-gage*, conforme apresentados na Figura 28, que possuem maior precisão de medição.

Figura 28 - Clip-Gage MTS instalado na Bancada de Testes.



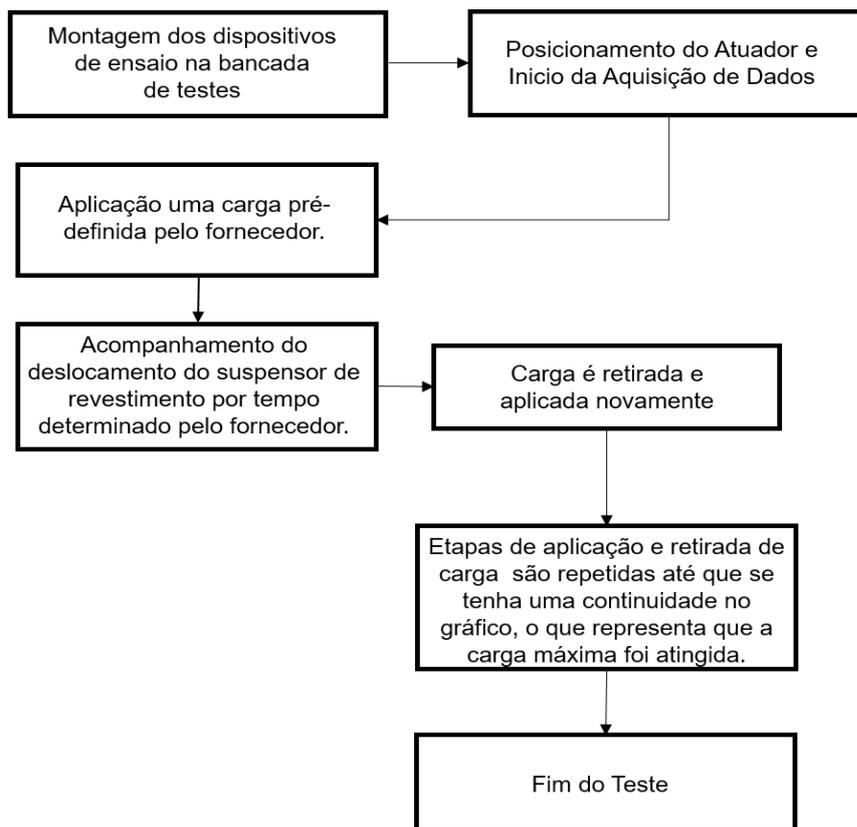
Fonte: A Autora

3.4.2. Procedimentos de Carregamento

O procedimento de carregamento pode ser realizado apenas com o atuador, utilizando o atuador e pressurização, ou apenas com pressurização. Os testes que serão analisados se dividem em teste apenas com atuador, onde a amostra AM01-2^a-Bs foi utilizada, e teste com atuador e pressurização onde as amostras AM02-2^a-Bs, AM03-1^a-Bi, AM04-2^a-Bi e AM05-2^a-Bs foram utilizadas.

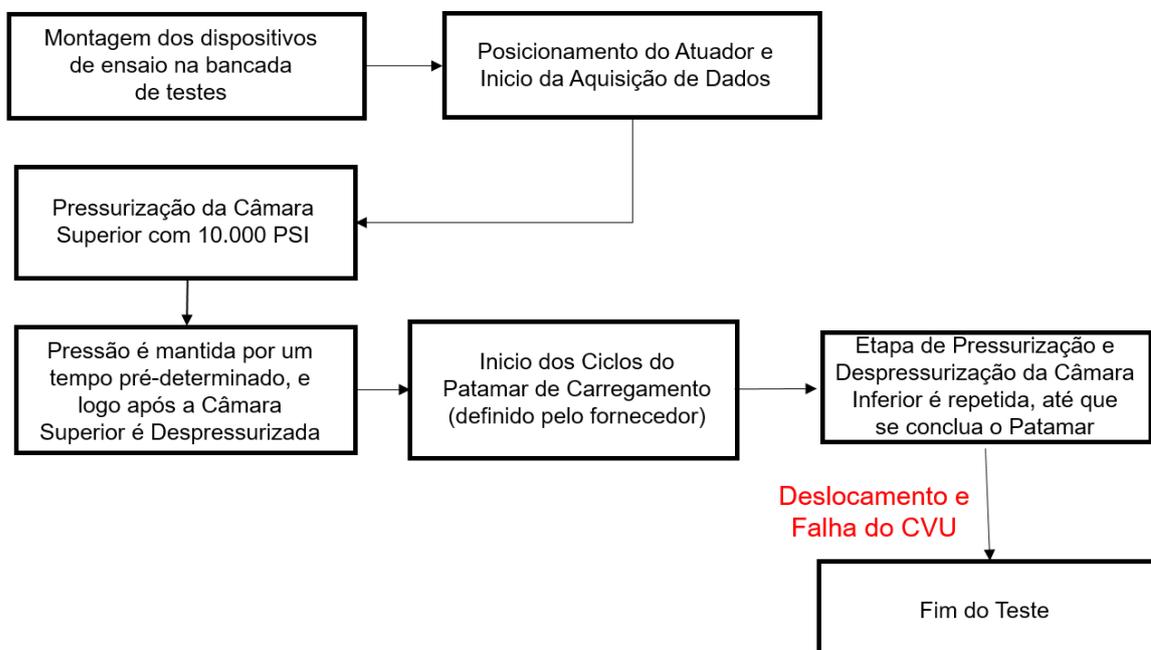
O teste utilizando apenas o atuador consiste em aplicar uma carga pré-definida pelo fornecedor, e acompanhar o deslocamento do suspensor de revestimento. Essa carga é retirada e aplicada novamente, analisando-se assim o comportamento do deslocamento. Esse processo é repetido até que se tenha uma continuidade no gráfico, que representa que se atingiu uma carga máxima para o teste, conforme apresentado no fluxograma da Figura 29, e na Figura 30 é apresentado um fluxograma do processo de carregamento utilizando o atuador e pressurização das câmaras.

Figura 29 – Fluxograma do Procedimento de Carregamento apenas com Atuador.



Fonte: A Autora

Figura 30 - Fluxograma do Procedimento de Carregamento com Pressão.



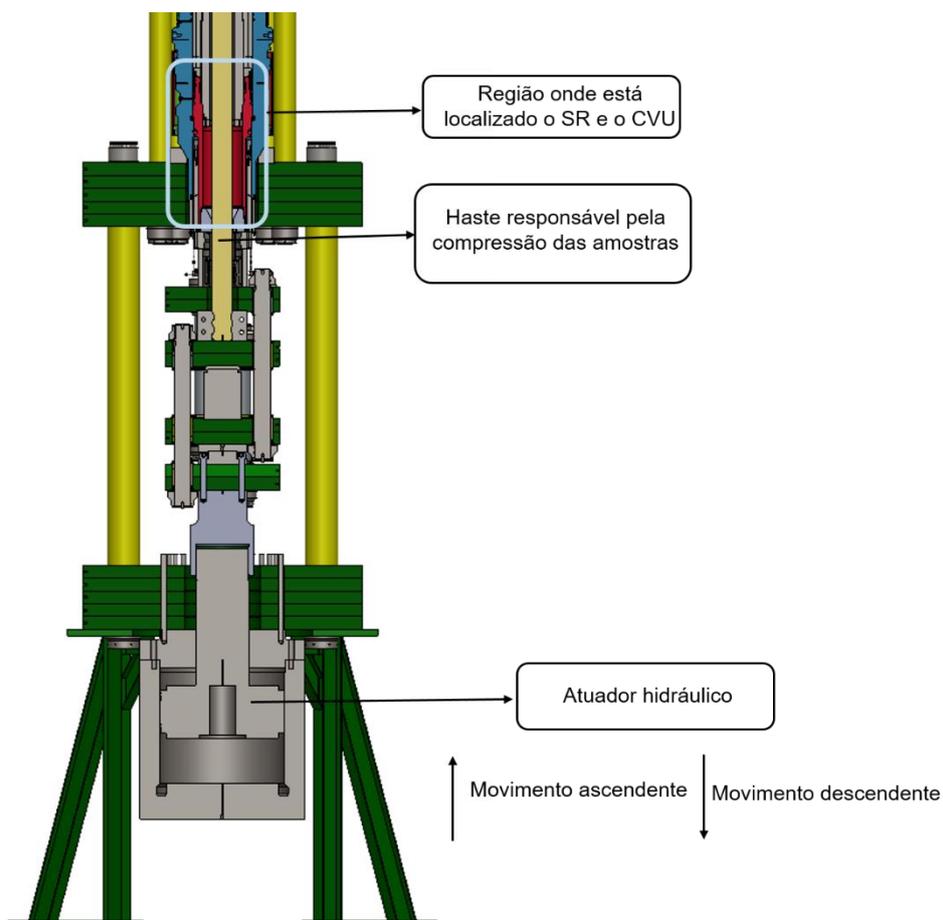
Fonte: A Autora

Os testes com pressão consistem, inicialmente, na pressurização de 10.000 PSI de nitrogênio na câmara superior e a repetição dessa pressurização a cada mudança de patamar subsequente, seguindo o teste de sobrevivência determinado pelo fornecedor, buscando-se analisar o comportamento do CVU. Dessa forma, pressuriza-se até 10.000 PSI a câmara superior, aguarda-se um tempo pré-definido e retira-se essa pressão.

Após estes procedimentos inicia-se o primeiro ciclo do patamar, onde a câmara inferior é pressurizada. Essa pressão é aplicada por um período de tempo previamente determinado e, em seguida, é retirada. Ao final de cada carregamento, é realizada uma força descendente, onde as amostras são puxadas para baixo, com exceção do último carregamento de cada patamar, onde logo após será realizada a pressurização de 10.000 PSI na câmara superior, iniciando um novo patamar. Repete-se essa etapa até que sejam atingidos o número de ciclos determinado pelo fornecedor para aquele patamar, ou até que seja percebida uma variação na inclinação do gráfico de força por deslocamento. Quando a inclinação sofre alteração, é definido pelo fornecedor o tipo de procedimento que deve ser seguido, até que se atinja a falha.

Durante os testes de carregamento, o SR recebe os esforços gerados pelo movimento ascendente do atuador através de dispositivos instalados na bancada de ensaios. O carregamento é distribuído pelo contato destes dispositivos com o SR, sendo posteriormente transmitido ao CVU. O SR atua como intermediário, recebendo os esforços e encaminhando-os para o CVU. Já quando ocorre o movimento descendente do atuador, e a haste é puxada para baixo, o carregamento é distribuído nos componentes, resultando no retorno das amostras à sua posição inicial e gerando compressão no CVU. Na Figura 31 está a bancada com a representação da localização do atuador e da haste.

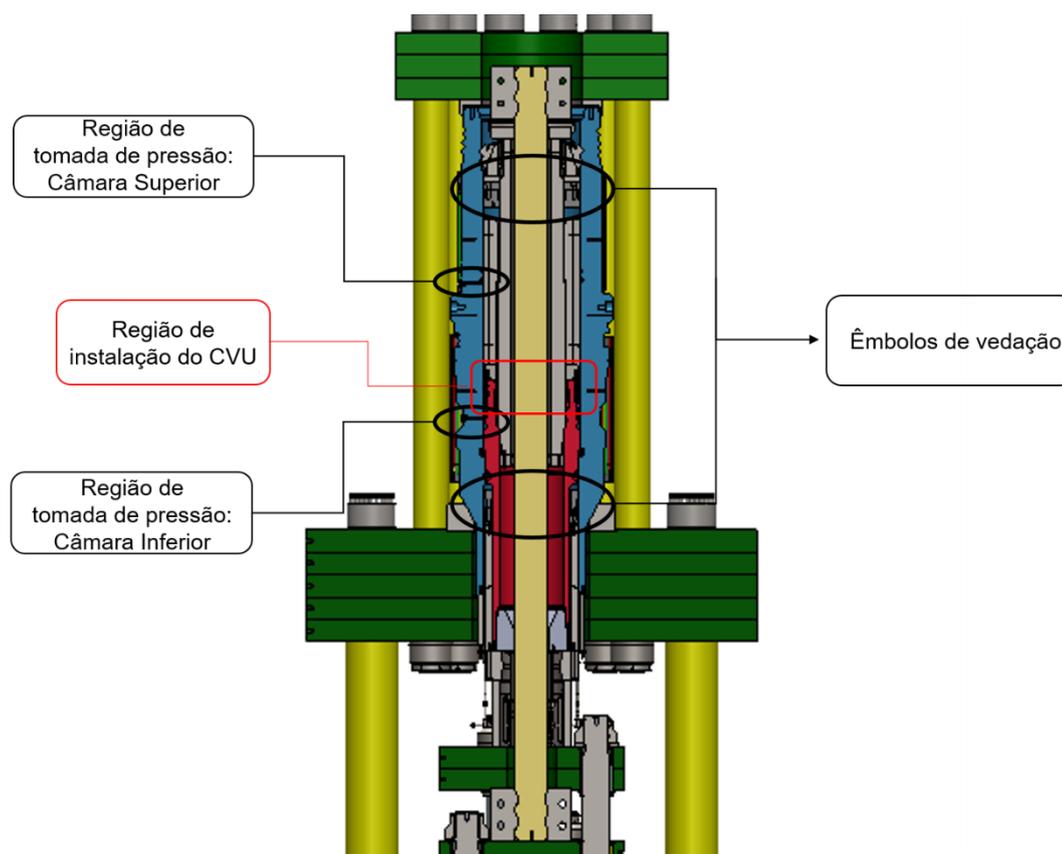
Figura 31 – Montagem da Bancada com Indicação do Posicionamento do Atuador e da Haste.



Fonte: A Autora.

Na Figura 32 destacam-se as áreas onde ocorre a pressurização da amostra, efetuada através das tomadas de pressão, onde é possível realizar a pressurização da câmara superior e inferior de forma independente. Dessa forma, tanto a região acima, quanto a região abaixo do CVU sofrem os efeitos da pressurização, conforme etapa do processo de carregamento. Também são identificadas as posições dos êmbolos de vedação, responsáveis por reter o nitrogênio pressurizado na região e evitar vazamentos para fora da bancada.

Figura 32 – Regiões de Tomada de Pressão e Posição dos Êmbolos de Vedação.



Fonte: A Autora

A casa de gases, como é chamada a estrutura composta pelos cilindros de nitrogênio, equipamento de pressurização e estrutura de proteção, fica localizada na parte externa à bancada de testes. O controle de pressurização e despressurização é feito manualmente, através da abertura e fechamento de válvulas. O equipamento de pressurização tem capacidade para até 15.000 PSI. Na Figura 33 temos a disposição dos equipamentos utilizados para a pressurização das amostras.

Figura 33 - Estrutura e Disposição dos Equipamentos de Pressurização no Local de Testes.



Fonte: A Autora

A unidade de pressurização de nitrogênio possui duas válvulas pneumaticamente acionadas por comando *on-off* de solenóide de 24V, para realizar o controle de pressurização e despressurização das amostras, conforme Figura 34. Foi construído um painel de comando para acionamento semiautomático dos dois solenóides que comandam a abertura das válvulas do sistema.

Figura 34 - Painel de Comando para Acionamento dos Solenóides e Controle da Pressurização e Despressurização das Amostras.



Fonte: A Autora.

No painel de comando temos um *led* vermelho (1) para identificar se a solenóide de pressurização está aberta. Quando o mesmo está aceso significa que a chave seletora (7) foi girada no sentido anti-horário, e o sistema está sendo pressurizado. Ao girar a chave seletora neste sentido, o processo de pressurização já pode ser iniciado. Este comando pode ser realizado manualmente apertando o botão vermelho (2).

Quando temos o *led* amarelo (3) está aceso significa que a solenóide está sendo comandada pelo PMX de acordo com o *setpoint* de pressão definido. O *led* verde (4) é utilizado para identificar se a solenóide de despressurização está aberta. Quando o mesmo está aceso significa que a chave seletora (7) foi girada no sentido horário, e o sistema está sendo despressurizado. Ao girar a chave seletora neste sentido, o processo de despressurização já pode ser iniciado. Este comando pode ser realizado manualmente apertando o botão verde (5). A chave localizada na região inferior direita (6) é responsável pelo acionamento contínuo da solenóide, quando está selecionada na chave seletora.

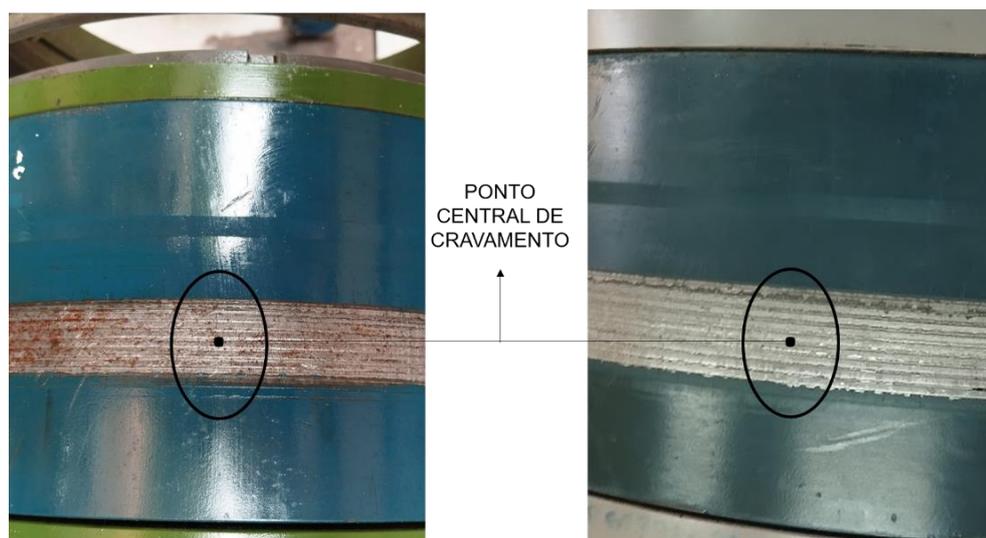
3.5. ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

No presente trabalho serão avaliadas as tensões residuais das amostras, no sentido axial, através de ensaio não destrutivo via difração de raios X, utilizando um difratômetro portátil. As medições serão realizadas em quatro amostras de CVU, sendo uma delas energizada com ar, e três delas energizadas com água. Cada amostra foi devidamente limpa com pano e álcool, a fim de remover qualquer sujeira que pudesse interferir nas medições.

Definiu-se então as regiões a serem medidas, marcando-se o ponto central da região de cravamento, conforme Figura 35. A partir deste ponto, foram realizadas medidas acima do ponto central e medidas abaixo, nos quatro quadrantes, totalizando 29 pontos em cada amostra. Essas medidas foram realizadas na região externa da amostra, e apresentam uma distância média de 2mm entre elas.

Na Figura 35 é apresentada uma das regiões de análise da amostra energizada na banda inferior dos *wickers*, e de uma amostra energizada na banda superior, respectivamente.

Figura 35 - Regiões de Análise de Tensão Residual.



Fonte: A Autora.

A técnica de medição utilizada foi difração de raios X, a partir do método $\cos \alpha$. O equipamento utilizado foi um difratômetro portátil Pulstec – μ -X360s. Os parâmetros de medida são apresentados a seguir:

Parâmetros de Medição:

- Elemento do tubo de raios X: Cr
- Comprimento de onda $k\text{-}\alpha$: 2.2897Å
- Tensão do tubo: 30 kV
- Corrente: 1.5 mA
- Detector: Image Plate 2D
- Ângulos ψ_0 utilizados: 35°
- Tempo de escaneamento: 10 s
- Pitch: 100 μm
- Tempo de ensaio: uma medição em uma direção (Longitudinal) ~ 1 minuto.
- Pico de difração utilizado: $\{2\ 1\ 1\}$ $\{h\ k\ l\}$ 2-Ângulo teta (156,08°)
- Colimador 1 mm

Constantes elásticas:

- $1/2S_2$: $5.810 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹
- $-S_1$: $1.270 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹
- Módulo de Young: $220.264 \cdot 10^3$ MPa
- Coeficiente de Poisson: 0.280

Na Figura 36 é possível ver o equipamento posicionado na amostra, durante o processo de análise de tensão residual. Definiu-se as seguintes convenções quanto o sentido das tensões residuais: **TR > 0**: Tensões residuais trativas e **TR < 0**: Tensões residuais compressivas.

Figura 36 - Medições na Parte Externa da Amostra.



Fonte: A Autora.

4. RESULTADOS

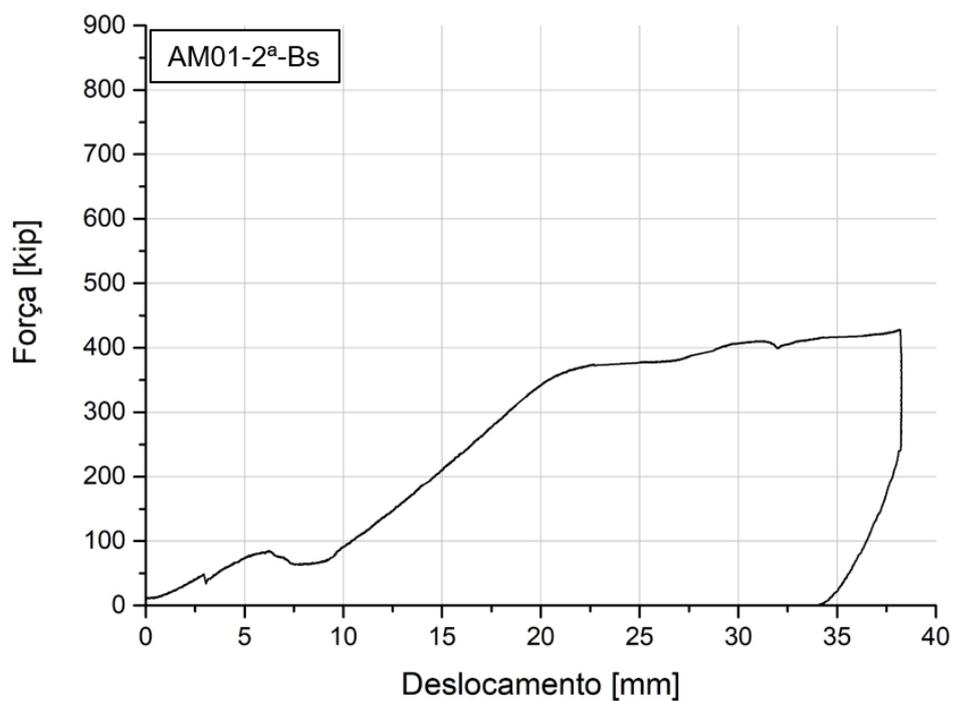
Os resultados obtidos nos processos de energização serão apresentados através de gráficos, com as devidas análises, assim como os gráficos referentes aos carregamentos. Será utilizada a unidade de medida Quilolibra-força [kip] para se referir a força, por ser a unidade utilizada comumente nas normas e publicações relacionadas ao tema, onde 1 kip equivale a aproximadamente 4.448,22 Newton [N].

Nos resultados relacionados aos carregamentos, serão apresentados os valores de deslocamento dos *clip-gages*, em função dos patamares de pressão executados, quando os testes envolveram pressão. Considerando a confidencialidade dos resultados, os valores de pressão serão apresentados de forma adimensional, em função dos máximos valores obtidos. Será avaliada a influência do meio, geometria e posição de energização, tanto no processo de energização, quanto no processo de carregamento. Por fim, serão avaliados os resultados obtidos através do método não destrutivo de difração de raios X.

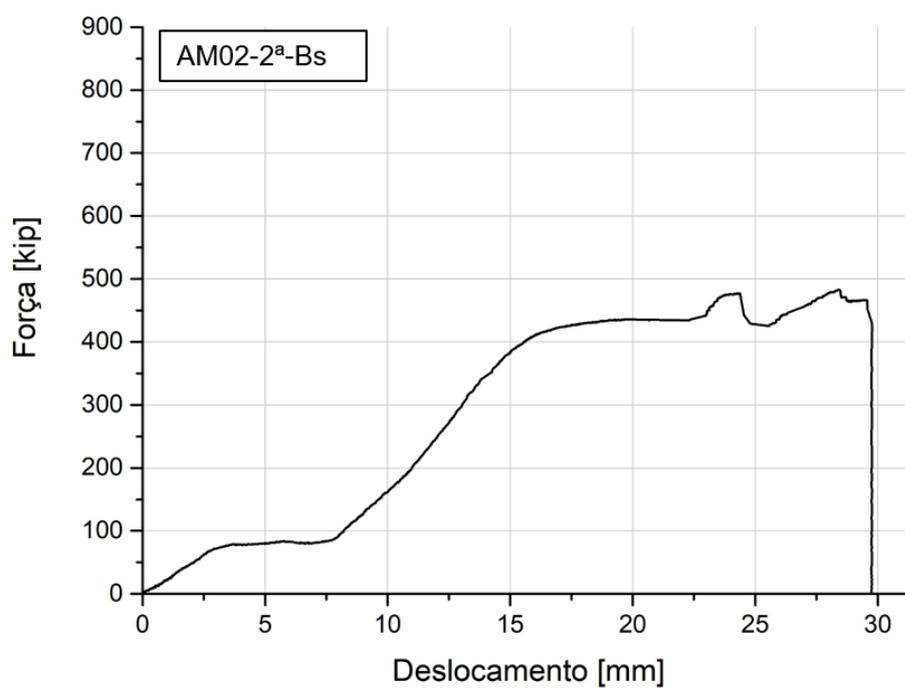
4.1. ENERGIZAÇÃO

A etapa de energização do CVU é uma das mais importantes, pois nela é realizada a ativação da vedação com *wickers*, que realiza tanto a vedação quanto o travamento do SR. Nas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41 são apresentados os gráficos de energização das amostras AM01-2^a-Bs, AM02-2^a-Bs, AM03-1^a-Bi, AM04-2^a-Bi e AM05-2^a-Bs, respectivamente.

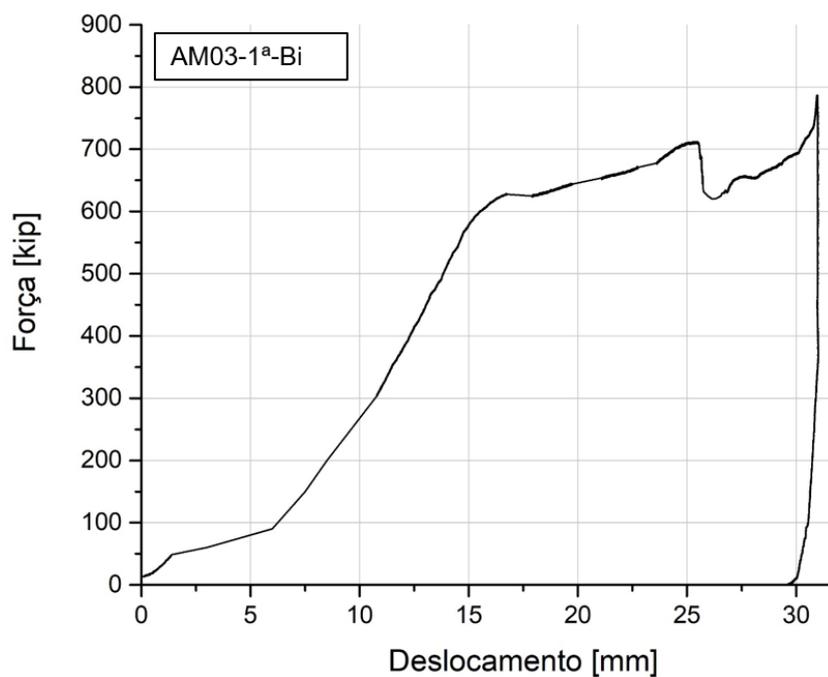
Conforme apresentado em Materiais e Métodos, a nomenclatura para cada CVU é definida da seguinte maneira: AMxx-X^a-Bx, onde AMxx refere-se ao número da amostra (01, 02, 03, 04 ou 05), X^a é a posição de instalação no alojador (1^a ou 2^a), e Bx é o posicionamento nos *wickers* em relação a banda de cravamento (superior ou inferior).

Figura 37 - Processo de Energização da Amostra AM01-2^a-Bs ao Ar.

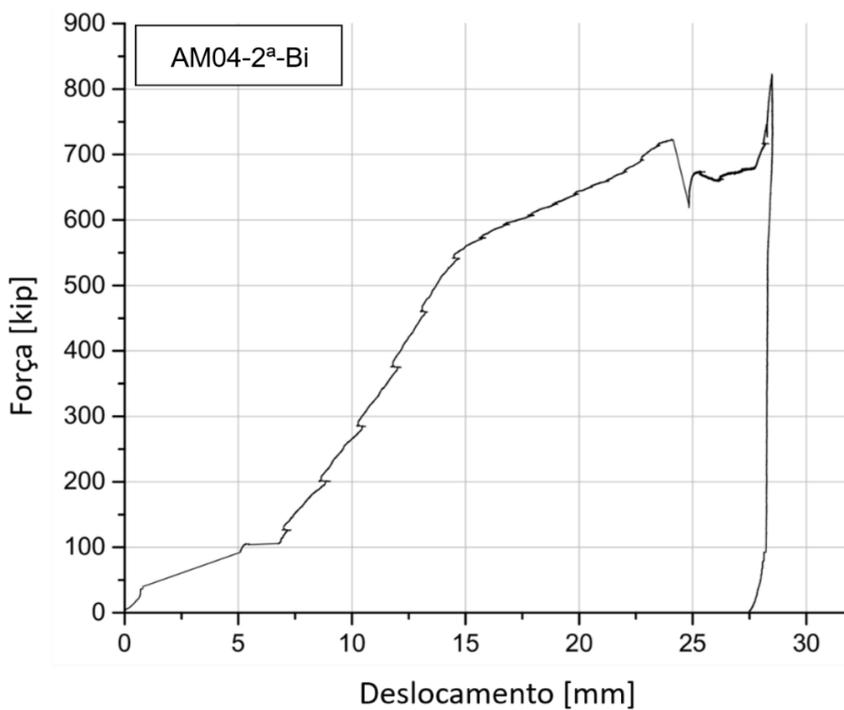
Fonte: A Autora

Figura 38 - Processo de Energização da Amostra AM02-2^a-Bs com Água.

Fonte: A Autora

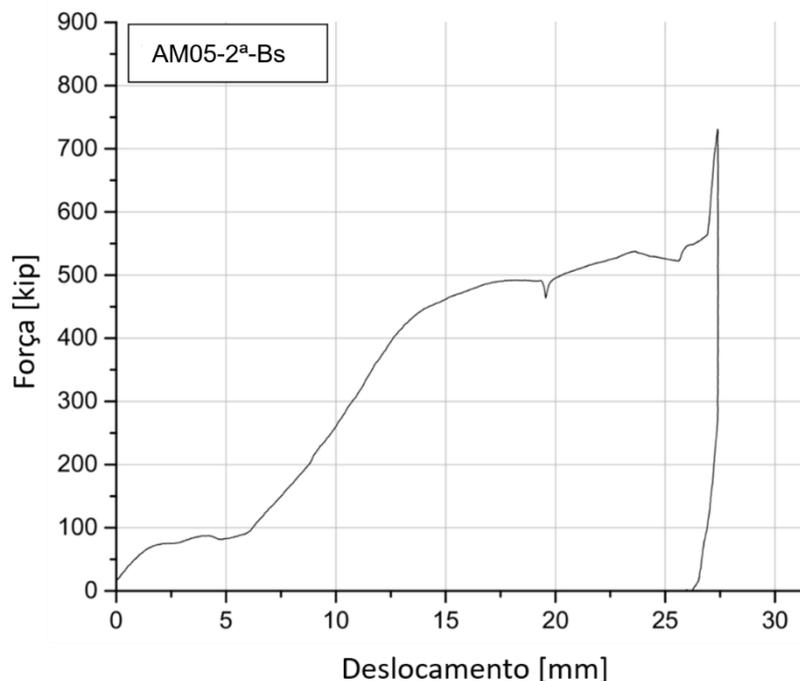
Figura 39 - Processo de Energização da Amostra AM03-1^a-Bi com Água.

Fonte: A Autora

Figura 40 - Processo de Energização da Amostra AM04-2^a-Bi com Água.

Fonte: A Autora

Figura 41 - Processo de Energização da Amostra AM05-2^a-Bs com Água.



Fonte: A Autora

Com exceção da amostra AM01-2^a-Bs (energizada ao ar), as demais energizações ocorreram com as amostras imersas em água, buscando-se uma primeira aproximação com a condição real encontrada em poços submarinos. Com os dados adquiridos, foi possível verificar nas curvas de força (kip) x deslocamento (mm), que existem deformações elásticas até aproximadamente 5 mm, provenientes dos dispositivos que compõem o sistema. Para deslocamentos superiores a 5 mm há um aumento da força, indicando o início da energização das amostras. Nas Figuras 39, 40 e 41 percebe-se um acréscimo abrupto nos valores de força ao final do processo. Isso ocorreu devido ao batente que passou a ser utilizado para que fosse possível identificar que o mesmo, que inicialmente estava apoiado apenas no anel E, entrou em contato simultâneo com uma das superfícies do anel U, indicando o final do processo de energização e ativação da vedação.

É possível perceber que nos gráficos há uma diferença na força necessária para a energização das amostras. Para energizar a amostra AM01-2^a-Bs foi necessária uma força inferior a 400 kip, para a amostra AM02-2^a-Bs foi necessária uma força próxima de 500 kip, para as amostras AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi foi necessária uma mesma força próxima de 700 kip, e para a amostra AM05-2^a-Bs foi necessária uma força

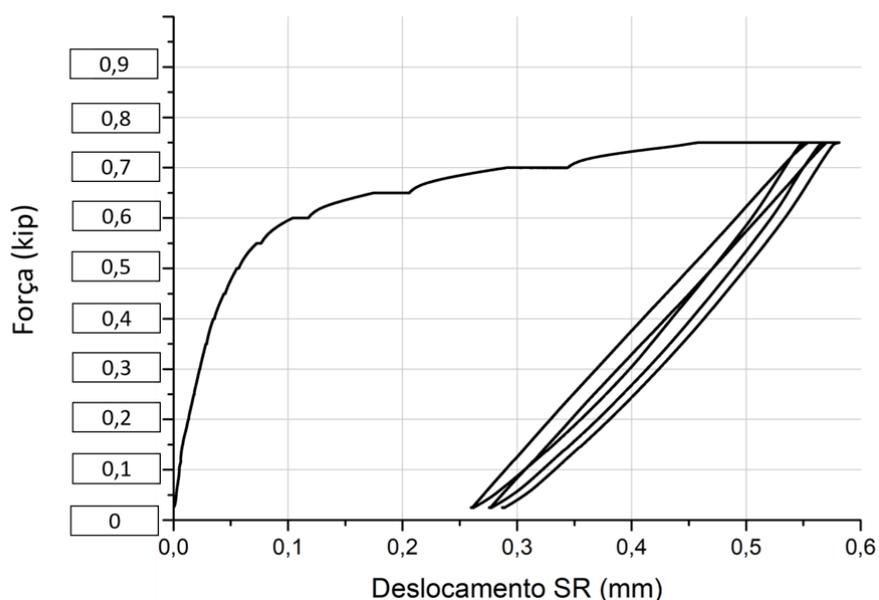
próxima de 500 kip. Comparando as amostras AM01-2^a-Bs e AM02-2^a-Bs, onde temos uma energização em uma mesma posição e com amostras de mesma geometria, é possível perceber que para energizar uma amostra com ar (AM01-2^a-Bs) é necessária uma força menor do que para energizar uma amostra com água (AM02-2^a-Bs).

Além disso, ao comparar as amostras AM02-2^a-Bs e AM04-2^a-Bi, onde temos uma energização em uma mesma posição e mesmo meio, porém com amostras de geometrias diferentes, é possível perceber que para energizar uma amostra localizada na banda inferior dos *wickers* a força necessária é maior do que para energizar uma amostra localizada na banda superior. Isso se deve ao fato de amostras energizadas na banda inferior possuírem uma maior espessura do anel de energização. Dessa forma, a força para completar este processo se torna maior.

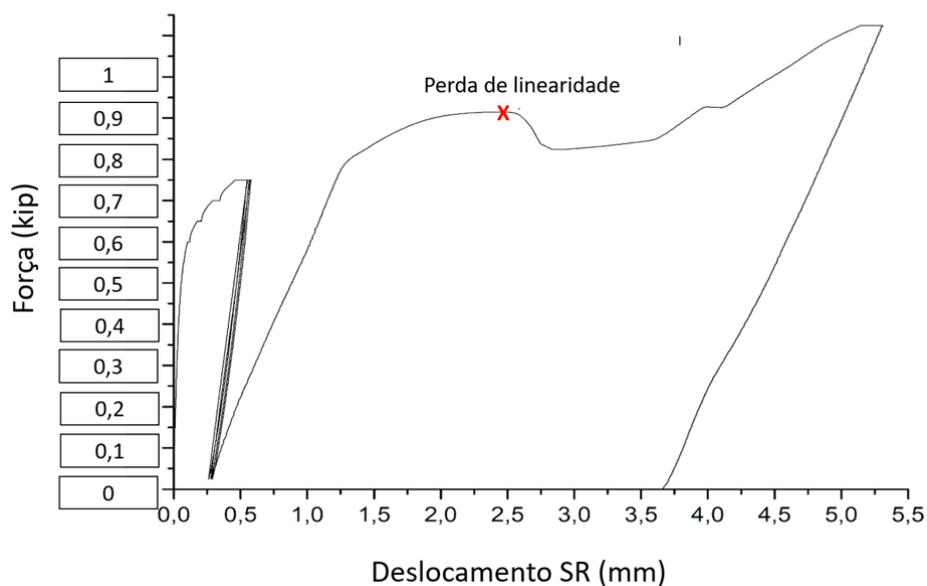
Ao comparar as amostras AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi (ambas energizadas com água) percebe-se que as forças de energização são semelhantes, o que nos mostra que a posição de energização não tem grande influência na força necessária para energizar a amostra, e que amostras de mesma geometria apresentam valores semelhantes para energização. Por fim, ao analisar as amostras AM02-2^a-Bs e AM05-2^a-Bs, onde temos amostras em mesmas condições de energização, porém em testes distintos, percebemos que os valores de força para energização são bem próximos

4.2. CARREGAMENTO

O primeiro teste, onde utilizou-se a amostra AM01-2^a-Bs, consistiu na realização de carregamento ascendente utilizando apenas o atuador hidráulico. Nas Figuras 42 e 43, é possível ver o deslocamento do suspensor de revestimento em função da força aplicada. Na Figura 42 temos os valores de deslocamento obtidos com um zoom da primeira região, e na Figura 43 temos os deslocamentos completos.

Figura 42 - Teste 01: Deslocamento do Suspensor de Revestimento – AM01-2^a-Bs.**Teste 01**

Fonte: A Autora

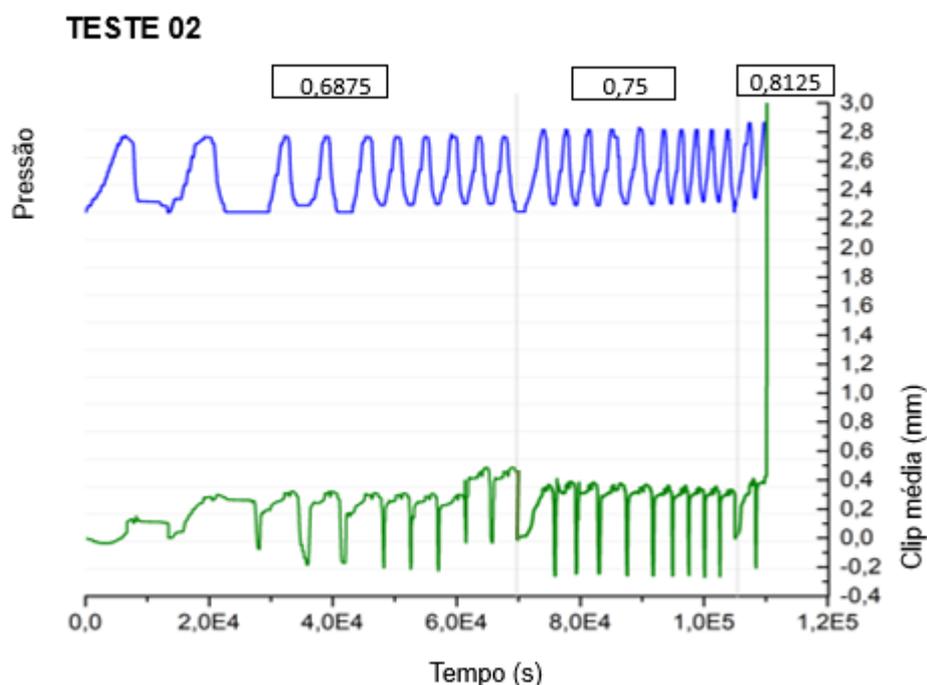
Figura 43 - Teste 01: Deslocamento do Suspensor de Revestimento Completo - AM01-2^a-Bs.**Teste 01**

Fonte: A Autora

No decorrer deste ensaio, uma carga foi progressivamente aplicada até atingir um ponto pré-definido, sendo posteriormente removida. Em uma etapa subsequente, a mesma força foi reaplicada, revelando uma continuidade nos resultados do gráfico.

Essa tendência persistiu, mesmo após repetidos ciclos de aplicação e remoção de carga. Ao ampliar a magnitude da carga aplicada, foi possível identificar que os conjuntos de vedação atingiram seus limites. No segundo teste, representado na Figura 44, utilizou-se a amostra AM02-2^a-Bs.

Figura 44 - Teste 02: Valores de Deslocamento obtidos durante os ciclos e Patamares de Pressão – AM02-2^a-Bs.



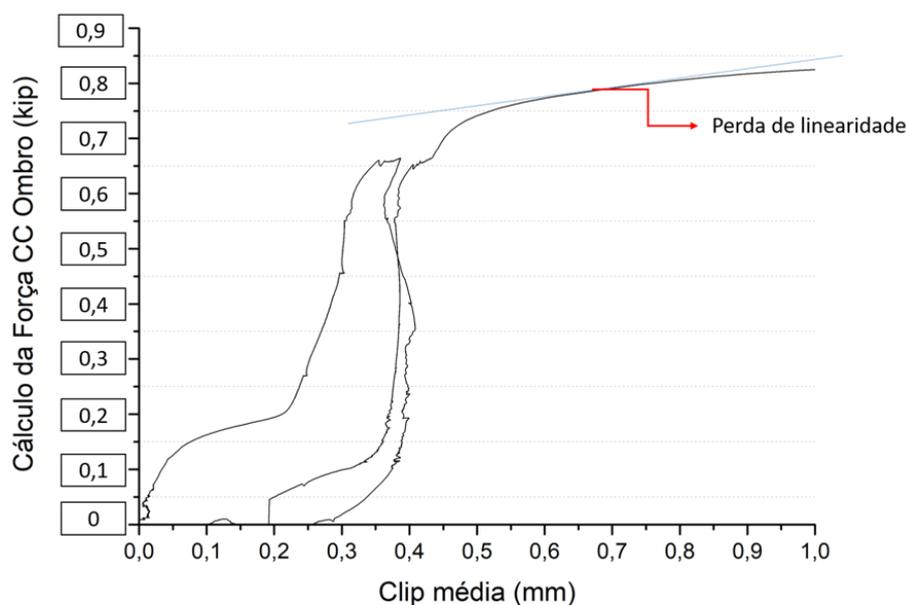
Fonte: A Autora

É possível perceber que neste teste ocorreram 10 ciclos de carregamento no 1^o patamar, 10 ciclos de carregamento no 2^o patamar e no terceiro ciclo do 3^o patamar, ocorreu um avanço não planejado do atuador hidráulico, que gerou uma falha prematura na amostra devido à elevada força ascendente. Seguindo o procedimento definido como padrão, ao final do 10^o ciclo do patamar, foi realizada a pressurização da câmara superior até 10.000 PSI, para avaliar a estanqueidade da amostra e possibilitar a continuação dos testes. O gráfico apresentado anteriormente nos mostra que o comportamento das amostras se manteve estável ao longo dos patamares que antecedem a falha, e que o deslocamento do SR em relação ao AAP aumentou para valores dentro do esperado.

O deslocamento acelerado do atuador hidráulico gerou uma sobrecarga no ensaio, e não permitiu identificar o carregamento resultante exato, no qual a falha do conjunto ocorre. Porém, sabe-se que o carregamento máximo atingido é maior do que o carregamento em velocidades normais (o mesmo ocorreu nos outros testes). Dessa forma, o carregamento necessário para a falha do componente foi estimado através da taxa de deslocamento do Clip média, com base nos outros ensaios, visto que a taxa de deslocamento é crescente antes da falha. Na Figura 45 é possível perceber o valor de força onde se estimou a perda da linearidade, o que permite, apesar da falha durante o processo de carregamento, a realização de uma análise comparativa deste teste com os outros testes realizados.

Figura 45 - Teste 02: Momento em que ocorre a Perda de Linearidade - AM02-2^a-Bs.

TESTE 02



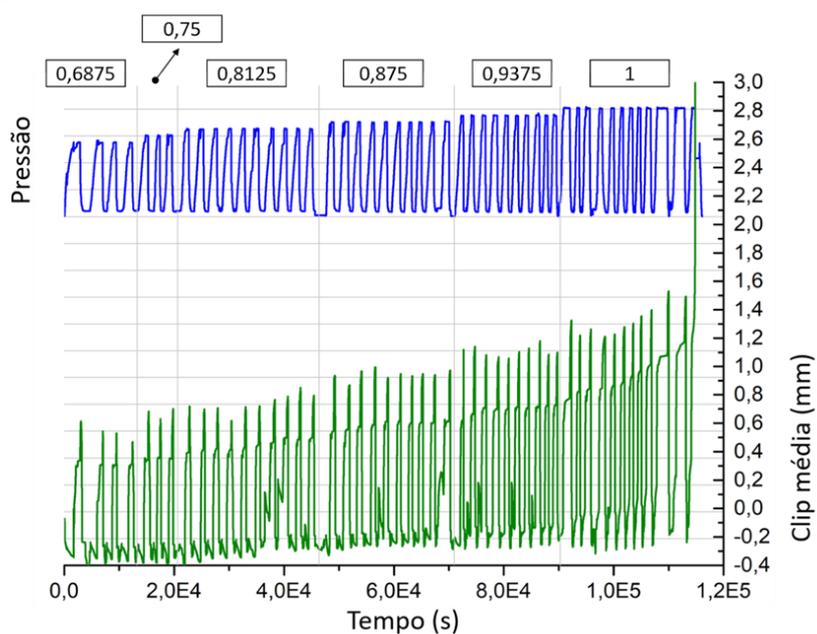
Fonte: A Autora

No terceiro teste utilizou-se as amostras AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi. Foram realizados inicialmente 04 ciclos de carregamento combinado no 1^o patamar, e 03 ciclos de carregamento combinado no 2^o patamar. A partir desta etapa o teste seguiu com a realização de 10 ciclos de carregamento combinado no 3^o patamar, 10 ciclos de carregamento combinado no 4^o patamar, 10 ciclos de carregamento combinado no

5° patamar, e por fim, 13 ciclos de carregamento combinado no 6° patamar, onde ocorreu a falha da amostra, conforme apresentado na Figura 46. Na Figura 47 temos os valores de deslocamento obtidos em função dos valores da força CC ombro.

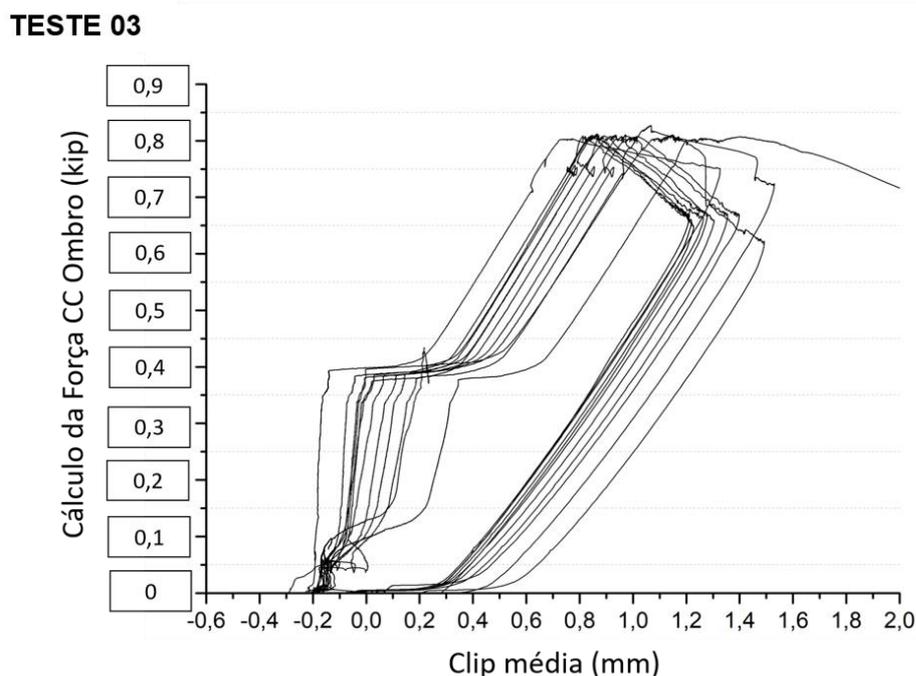
Figura 46 - Teste 03: Valores de Deslocamento obtidos durante os ciclos e Patamares de Pressão - AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi.

TESTE 03



Fonte: A Autora

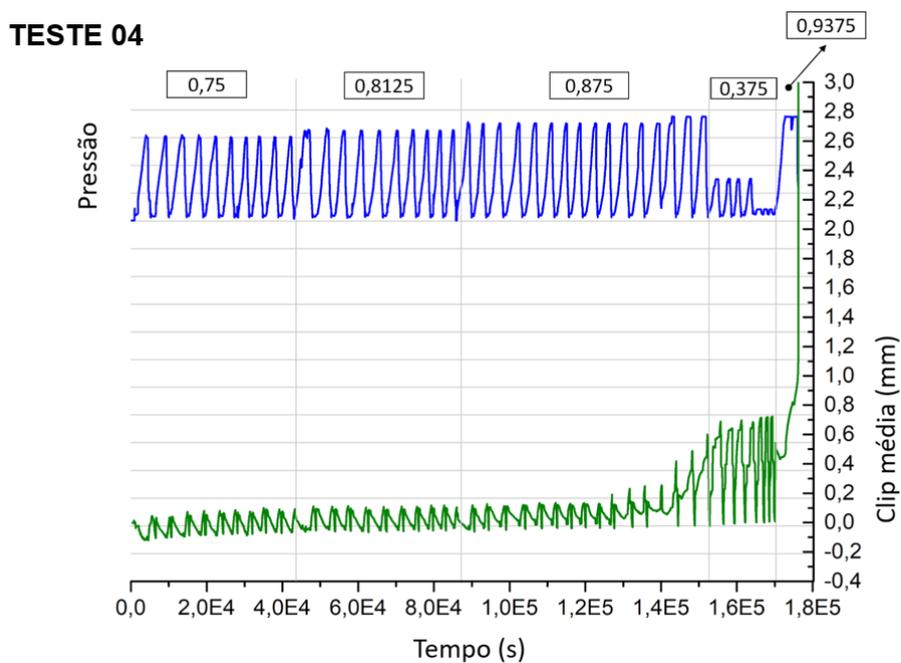
Figura 47 - Teste 03: Valores de Deslocamento em Função dos Valores da Força CC ombro - AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi.



Fonte: A Autora

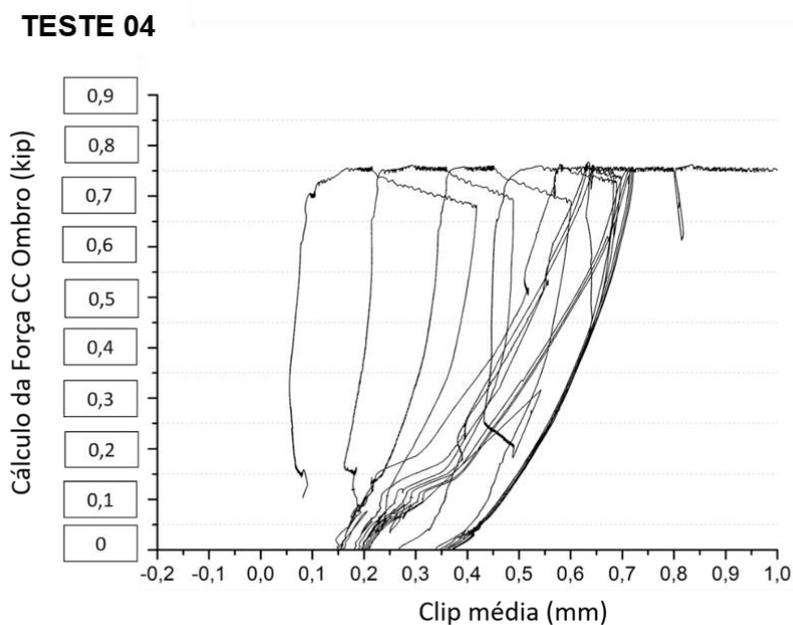
No quarto teste utilizou-se a amostra AM05-2^a-Bs. O teste iniciou com a realização de 10 ciclos de carregamento combinado no 1^o patamar, 10 ciclos de carregamento combinado no 2^o patamar e 13 ciclos de carregamento combinado no 3^o patamar. Mediante definição da equipe técnica do fornecedor, via acompanhamento remoto do teste, foram realizados mais 03 ciclos em um patamar menor e posteriormente um ciclo no 4^o patamar, levando a falha da amostra. Na Figura 48, consta o gráfico dos deslocamentos por tempo de todos os ciclos executados neste teste até a falha da amostra, além das pressões utilizadas. Já na Figura 49 temos os valores de deslocamento obtidos em função dos valores da força CC ombro de forma adimensional.

Figura 48 - Teste 04: Valores de Deslocamento obtidos durante os ciclos e Patamares de Pressão - AM05-2^a-Bs.



Fonte: A Autora

Figura 49 - Teste 04 - Valores de Deslocamento em Função dos Valores da Força CC ombro - AM05-2^a-Bs.



Fonte: A Autora

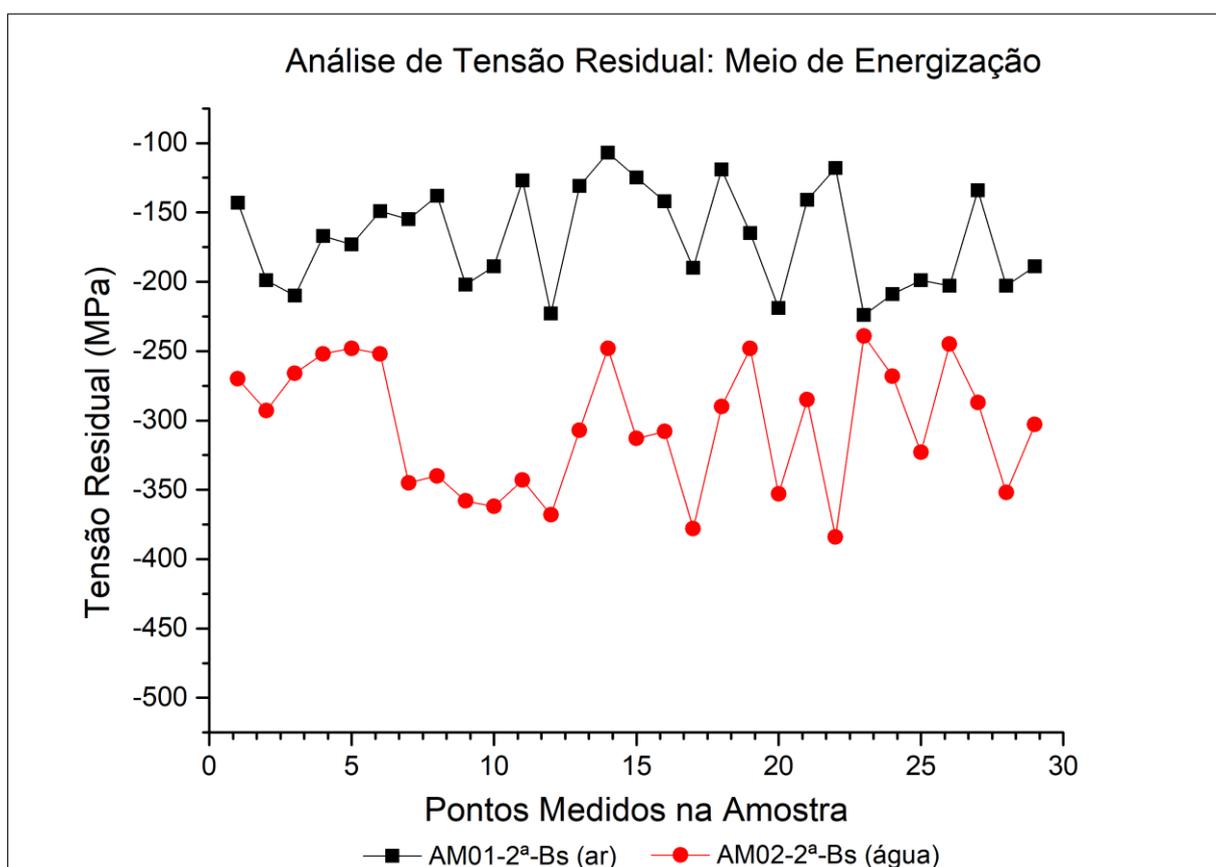
4.3. TENSÃO RESIDUAL

Conforme apresentado em materiais e métodos, nesta etapa houve a avaliação da tensão residual no sentido axial de 5 amostras, sendo uma delas energizada com ar e as outras quatro energizadas com água. As análises levaram em conta o meio de energização, a posição de energização no alojador e a geometria da amostra. Os resultados serão apresentados em tópicos.

- Meio de Energização

Nesta análise levou-se em consideração duas amostras iguais, energizadas na mesma posição, porém em meios distintos, sendo elas as amostras AM01-2^a-Bs energizada ao ar e AM02-2^a-Bs energizada com água. Na Figura 50 temos o gráfico dos valores de tensão residual externas encontrados nestas amostras.

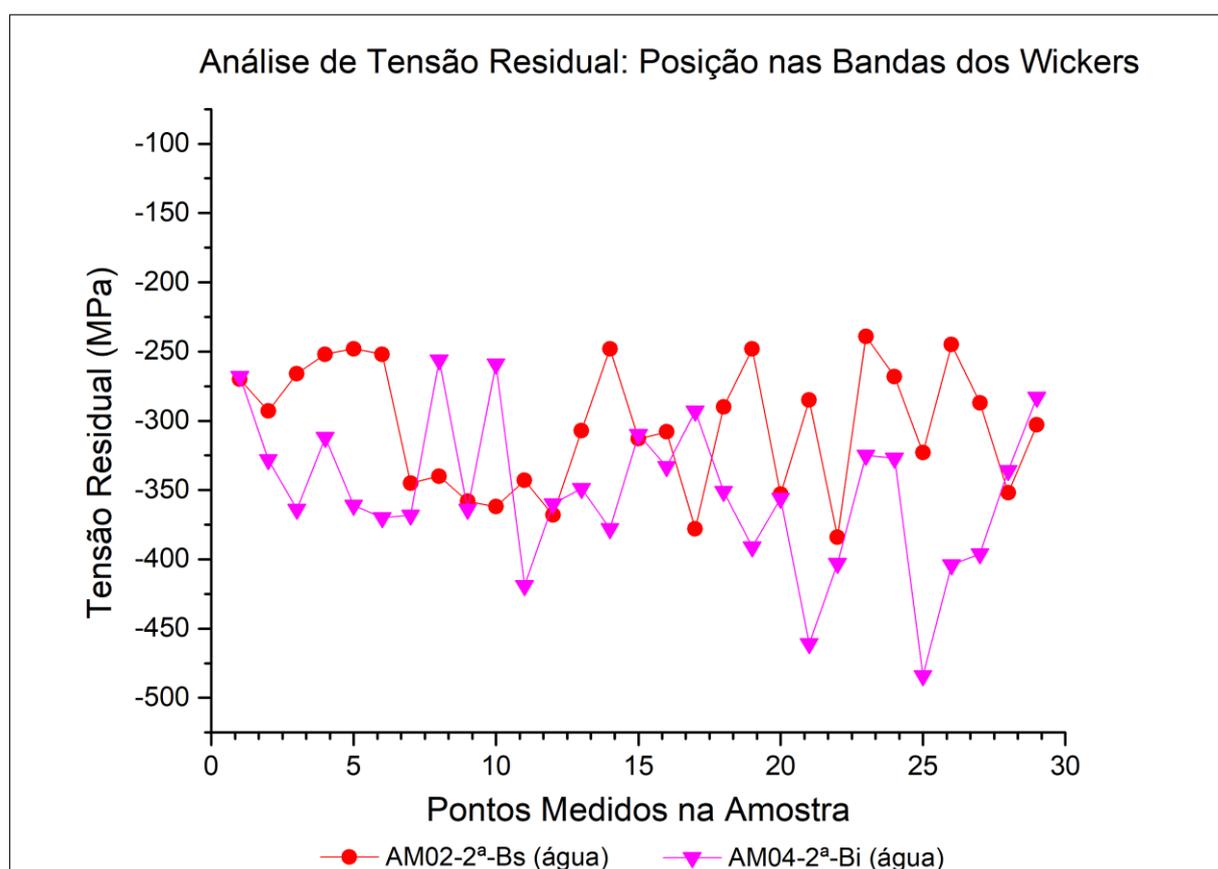
Figura 50 – Análise da Tensão Residual das Amostras AM01-2^a-Bs (energizada ao ar) e AM02-2^a-Bs (energizada com água) – Variação do Meio de Energização.



- Geometria da Amostra – Posição nas Bandas dos *Wickers*

Nesta análise levou-se em consideração duas amostras de geometrias distintas, AM02-2^a-Bs e AM04-2^a-Bi, energizadas no mesmo meio e na mesma posição do alojador, porém em bandas distintas dos *wickers*. Na Figura 51 temos o gráfico dos valores de tensão residual externas encontrados nestas amostras.

Figura 51 – Análise da Tensão Residual das Amostras AM02-2^a-Bs e AM04-2^a-Bi
– Variação da Posição nas Bandas dos *Wickers*

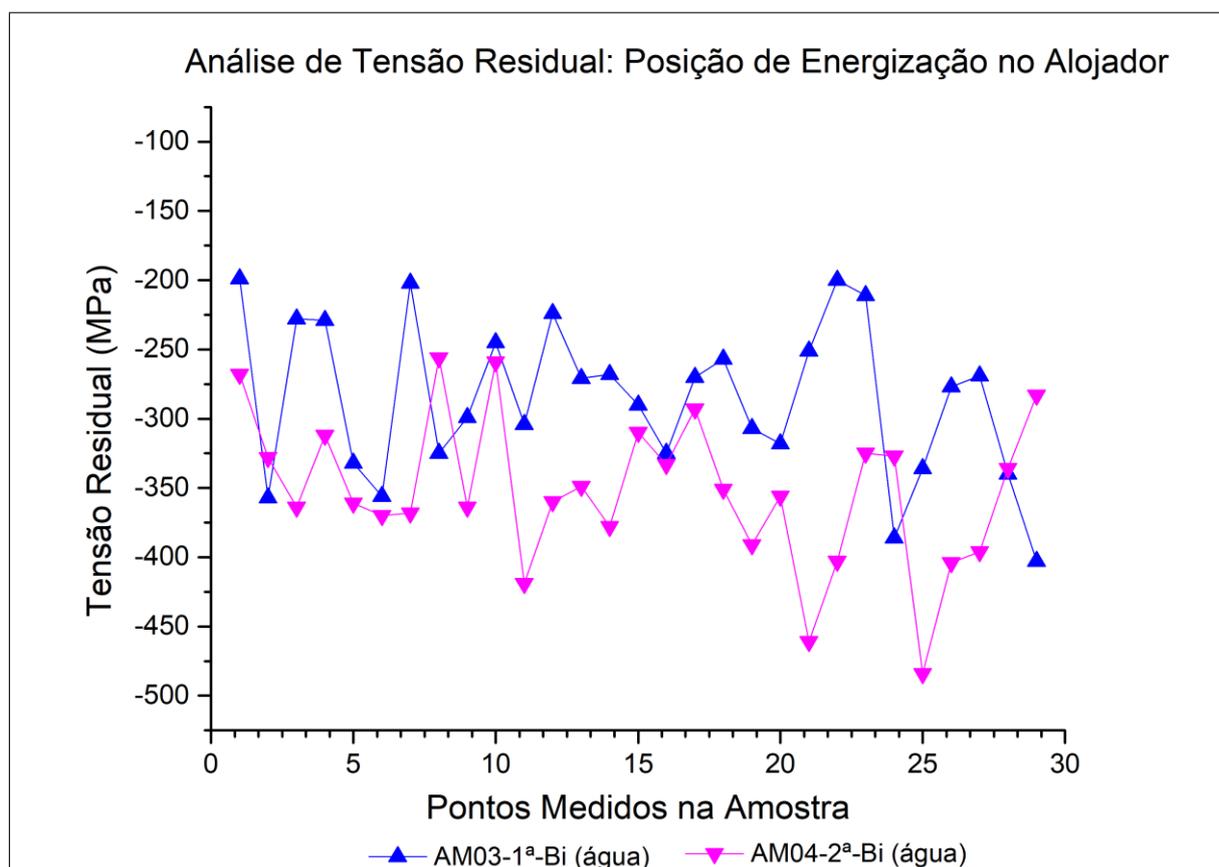


Fonte: A Autora

- Posição de Energização no Alojador

Nesta análise levou-se em consideração duas amostras iguais, AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi, energizadas no mesmo meio, na mesma banda dos *wickers*, porém em posições distintas. Na Figura 52 temos a variação dos valores de tensão residual ao longo da superfície externa encontrados nestas amostras.

Figura 52 – Análise da Tensão Residual das Amostras AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi-
Variação da Posição de Energização no Alojador.



Fonte: A Autora

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, será realizada uma análise detalhada dos resultados obtidos no capítulo anterior, com o objetivo de fornecer uma compreensão mais clara e abrangente sobre os dados apresentados nos gráficos.

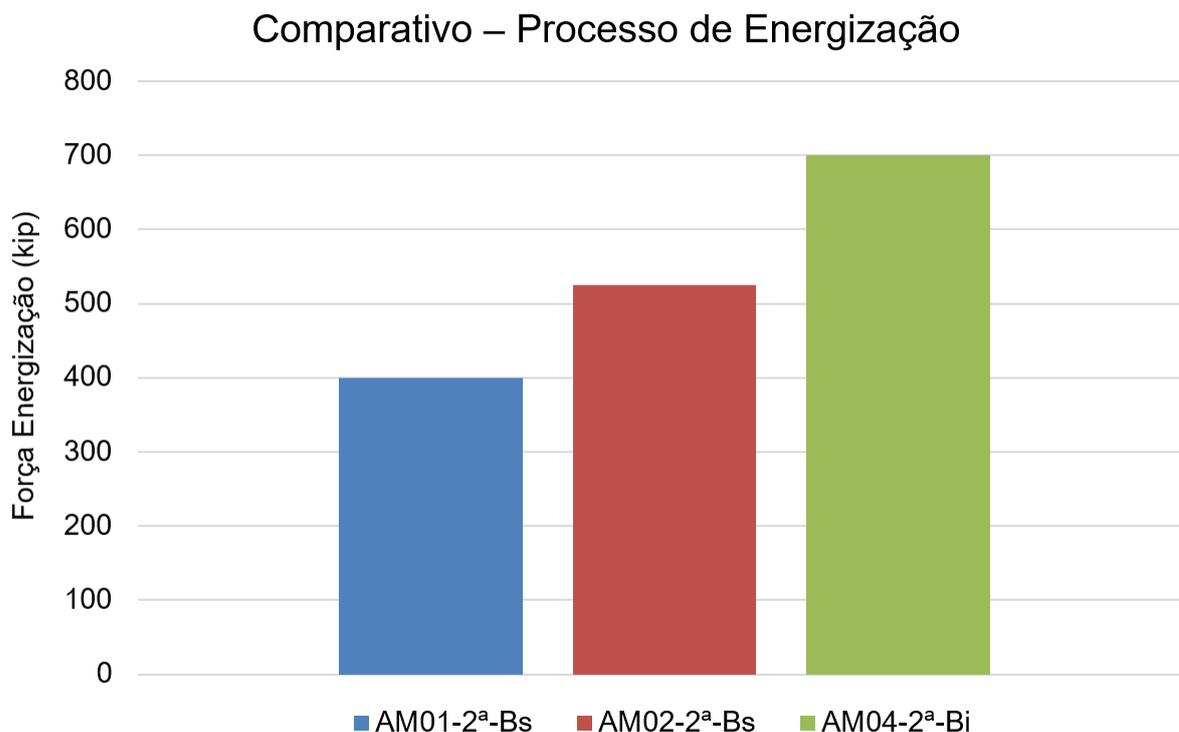
Processo de energização:

Comparação do meio em que a amostra foi energizada: As amostras energizadas com água demandam uma força maior para alcançar a completa energização em comparação com aquelas energizadas com ar. Essa diferença resulta, principalmente, da compressibilidade da água, que é substancialmente inferior à do ar. A pressão contraposta gerada pela água é diretamente proporcional ao volume que ela ocupa e ao módulo volumétrico do fluido.

Comparação da geometria das amostras: Amostras energizadas na banda inferior dos *wickers* requerem uma força maior para atingir a plena energização quando comparadas às amostras energizadas na banda superior. Essa diferença é devida à variação na geometria do anel E entre amostras, onde o anel E das amostras energizadas na banda inferior apresenta maior espessura.

Comparação da posição de energização no alojador: Amostras energizadas no mesmo meio, com mesma geometria, porém em posições distintas do alojador não apresentam variação relevante na carga necessária para completar o processo de energização. Na Figura 53 temos um gráfico com os resultados obtidos em relação ao processo de energização.

Figura 53 - Comparativo dos Resultados do Processo de Energização.



Fonte: A Autora

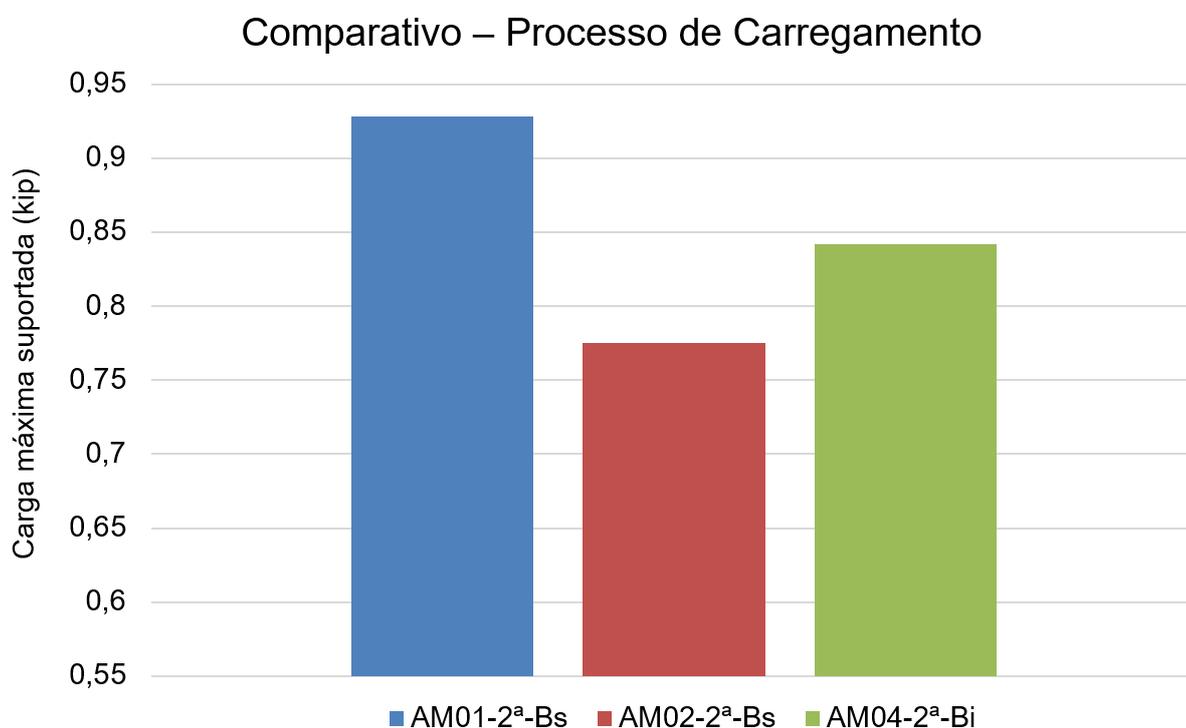
Processo de carregamento:

Em todos os gráficos de carregamento apresentados, os valores de força e pressão foram tornados adimensionais em função dos valores máximos encontrados, para preservar a confidencialidade dos resultados.

Comparação do meio em que a amostra foi energizada: Uma comparação entre os testes 01 e 02 revela que o teste 01 conseguiu suportar uma carga maior. Isso ocorreu devido ao método de energização do CVU. No teste 01, a energização foi realizada com ar, enquanto no teste 02 foi feita com água. A variação dos meios resultou em uma diferença no cravamento dos *wickers*, que foi mais acentuada na amostra energizada com ar. Isso levou a um travamento mais eficaz do CVU, permitindo que suportasse uma carga maior. Consequentemente, no teste 02, observamos uma perda de linearidade quando a força se aproximou de 0,775, enquanto no teste 01, esse valor foi de 0,928.

Comparação da geometria das amostras: Ao comparar os ensaios 03 e 04, percebemos que o teste 03 suportou uma carga combinada maior quando comparado ao teste 04. Isso se deve a geometria dos conjuntos de vedação, que influencia na banda dos *wickers* que será utilizada. Conforme já indicado anteriormente nas discussões sobre os processos de energização, as amostras energizadas na banda inferior dos *wickers* possuem maior espessura do anel E, permitindo uma maior expansão e deformação do anel U, o que permite um maior cravamento e conseqüentemente maior travamento. Sendo assim, observamos uma perda de linearidade no teste 03 quando a força se aproximou de 0,842, enquanto no teste 04, esse valor foi de 0,753. Na Figura 54 temos um gráfico com os resultados obtidos em relação ao processo de carregamento para as amostras AM01-2^a-Bs, AM02-2^a-Bs e AM04-2^a-Bi.

Figura 54 - Comparativo dos Resultados do Processo de Carregamento.



Fonte: A Autora

Tensão Residual:

Comparação do meio em que a amostra foi energizada: No que diz respeito ao meio de energização, observa-se uma distinção nos resultados obtidos entre as amostras AM01-2^a-Bs e AM02-2^a-Bs. A primeira, energizada ao ar, exibiu valores de tensões residuais compressivas inferiores em comparação com a segunda, que foi submetida à energização com água. Essa disparidade pode ser atribuída às propriedades distintas de compressibilidade desses meios.

O ar é considerado altamente compressível. Isso significa que pode sofrer uma redução significativa de volume quando submetido a pressão. Essa compressibilidade é devido à natureza dos gases, nos quais as moléculas estão mais distantes umas das outras e podem ser comprimidas mais facilmente. Já a água, exibe uma menor compressibilidade, devido à natureza mais próxima das moléculas líquidas, que têm uma estrutura mais rígida e menos espaço para compressão. Os resultados para as tensões residuais da amostra AM01-2^a-Bs ficaram próximos do intervalo de -100 MPa à -200 MPa e para a amostra AM02-2^a-Bs ficaram próximas do intervalo de -200 MPa e -400 MPa.

Comparação da geometria das amostras: No que diz respeito a geometria das amostras, observa-se uma distinção nos resultados apresentados pelas amostras AM02-2^a-Bs e AM04-2^a-Bi. A amostra energizada na banda inferior apresentou tensões residuais compressivas maiores quando comparada à amostra energizada na banda superior. Isso pode ser explicado pelo fato de amostras energizadas na banda inferior possuírem maior espessura do anel E, que gera uma maior expansão e deformação do anel U contra os *wickers*.

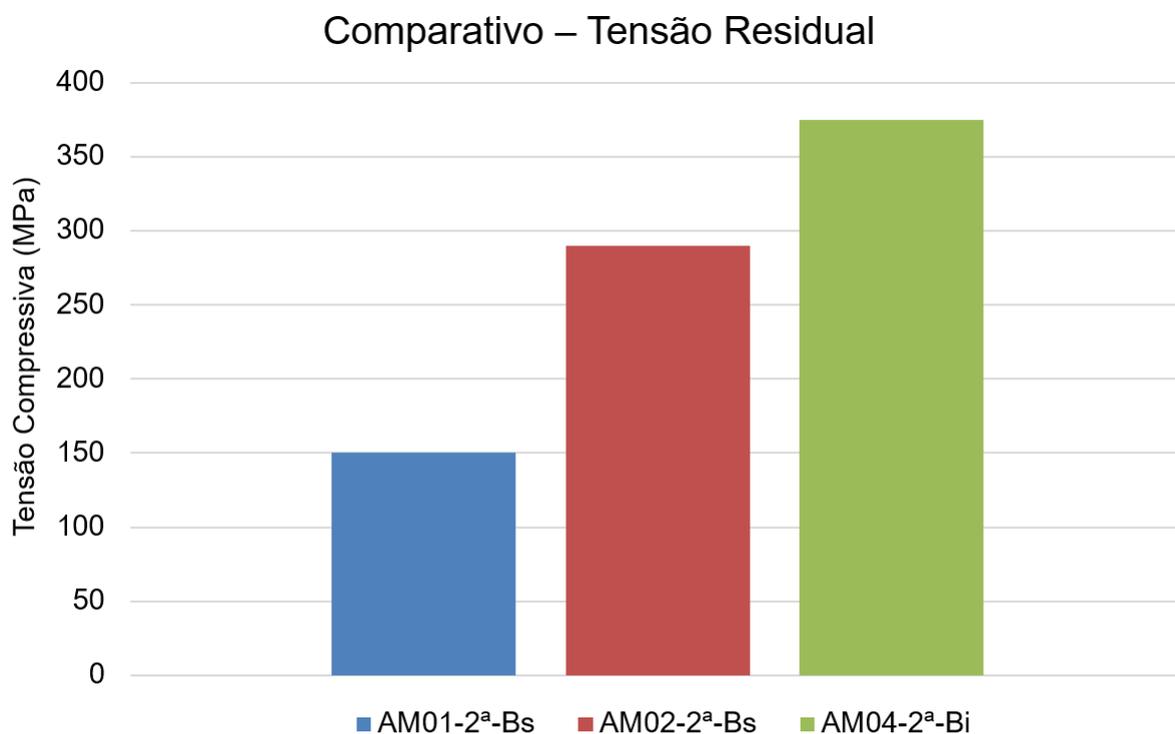
Na amostra do tipo superior as tensões residuais variaram de valores próximos de -200 Mpa até aproximadamente -380 MPa. Já a amostra energizada na banda inferior apresentou tensões residuais variando de valores próximos de -250 MPa até aproximadamente -500 MPa.

Comparação da posição de energização: No que diz respeito à posição de energização, observou-se uma distinção nos resultados apresentados pelas amostras AM03-1^a-Bi e AM04-2^a-Bi. A amostra energizada na 2^a posição do alojador apresentou

tensões residuais compressivas maiores quando comparada à amostra energizada na 1ª posição. Isso pode ser explicado pelo fato de a amostra localizada na 2ª posição do alojador estar submetida a maiores carregamentos, quando comparada com as amostras localizadas na 1ª ou 3ª posição (não avaliada neste estudo).

Na amostra energizada na 2ª posição as tensões residuais variaram entre valores próximos de -250 MPa até aproximadamente -500 MPa. Já na amostra energizada na 1ª posição, as tensões residuais variaram entre valores próximos de -180 MPa até -380 MPa. Na Figura 55 temos um gráfico com os resultados obtidos em relação à tensão residual.

Figura 55 - Comparativo dos Resultados da Tensão Residual.



Fonte: A Autora

Com esses resultados, é possível perceber que existe uma correlação entre o processo de energização, carga suportada durante o processo de carregamento e tensão residual na amostra. Nos gráficos apresentados nas Figuras 53, 54 e 55, considerou-se apenas os resultados das amostras energizadas na mesma posição.

CONCLUSÃO

Em conclusão, esta pesquisa se concentrou na investigação dos efeitos da energização com ar e água em dispositivos de vedação metal-metal, conhecidos como conjuntos de vedação universal (CVU), na indústria petrolífera. Os principais objetivos da pesquisa incluíram compreender a influência do meio de energização nos CVUs, avaliar as cargas suportadas sob condições reais de cabeças de poço e analisar a tensão residual gerada nos processos de energização e carregamento destes CVUs.

Em relação ao processo de energização, os resultados demonstram que amostras energizadas com água demandam aproximadamente uma força 33% maior para atingir a completa energização em comparação com aquelas energizadas com ar. Isso ocorre devido à diferença na compressibilidade desses fluidos. Além disso, a geometria das amostras desempenhou um papel importante, com amostras energizadas na banda inferior dos *wickers* requerendo uma força aproximadamente 30% maior para completar o processo de energização, devido a uma espessura adicional no anel E.

Durante a aplicação de carga com o atuador hidráulico, identificou-se que o meio de energização teve um impacto significativo nas cargas suportadas pelos CVUs. A energização com ar levou a um maior cravamento dos *wickers* nos conjuntos de vedação, resultando em uma capacidade de carga 20% maior em comparação com a energização com água. Além disso, a geometria das amostras também desempenhou um papel importante, com amostras energizadas na banda inferior suportando cargas 8% maiores em relação a amostras energizadas na banda superior, devido à maior expansão e deformação do anel U.

A análise da tensão residual mostrou que as tensões compressivas nas amostras energizadas com água foi 92% maior do que naquelas energizadas com ar, quando comparados os valores médios obtidos. Isso ocorreu em função da carga suportada durante os ensaios, que possui relação com o processo de energização. Amostras energizadas com água apresentam maior dificuldade de cravamento quando comparadas com amostras energizadas ao ar, devido a diferença de compressibilidade destes fluidos. O mesmo ocorreu na amostra energizada na banda

inferior, que apresentou tensões compressivas 30% maiores que as tensões encontradas na amostra do tipo superior, utilizando o mesmo método de análise.

Estes resultados têm implicações práticas significativas para a indústria petrolífera. Recomenda-se que os testes de validação de CVUs sejam realizados com fluidos que se aproximem o máximo possível das condições reais de poços, uma vez que o tipo de fluido utilizado pode impactar substancialmente nos processos de energização e conseqüentemente nas cargas suportadas pelos sistemas de cabeça de poço.

Em resumo, esta pesquisa preenche uma lacuna no conhecimento ao abordar a influência do meio de energização em CVUs e suas implicações para a indústria petrolífera. Os resultados fornecem informações valiosas que podem orientar práticas de teste e projeto mais precisas, contribuindo assim para a eficiência e segurança das operações de cabeça de poço submarino.

6. TRABALHOS FUTUROS

Em relação ao tema abordado, existe uma variedade de tópicos interessantes e importantes que podem direcionar a futuras pesquisas na área de dispositivos de vedação metal-metal na indústria petrolífera. A seguir, será apresentada uma lista de sugestões para trabalhos futuros. Cada item oferece oportunidades para expandir o conhecimento e abordar desafios específicos relacionados a esses dispositivos.

- **Energização em Condições Variadas:** Investigar a influência da energização de amostras com inclinações distintas, ou com processos de energização incompletos, na capacidade de carga dos CVUs.
- **Tensão Residual e Integridade Estrutural:** Estudar a influência da tensão residual na integridade estrutural dos CVUs ao longo do tempo e em ambientes de alta pressão.
- **Escala Laboratorial e Métodos Econômicos:** Explorar oportunidades para realizar testes em escala laboratorial ou desenvolver métodos de teste mais econômicos para a validação de CVUs.
- **Materiais:** Investigar como as características dos materiais utilizados nos CVUs podem influenciar o processo de energização e as cargas suportadas.
- **Temperatura do Meio de Energização:** Avaliar o impacto da temperatura do meio de energização na eficácia da vedação e na capacidade de carga.
- **Condições de Pressão Subaquáticas:** Examinar como diferentes condições de pressão no ambiente subaquático afetam o desempenho dos CVUs.
- **Contaminantes no Fluido de Energização:** Investigar os efeitos da presença de contaminantes no fluido de energização sobre o desempenho e a vida útil dos CVUs.
- **Otimização de Geometria:** Explorar estratégias de projeto que possam otimizar a geometria dos CVUs, visando melhorar sua capacidade de carga e vida útil.
- **Rugosidade Superficial e Eficácia da Vedação:** Investigar como a rugosidade superficial dos anéis de vedação influencia a eficácia da vedação e a capacidade de carga dos CVUs.
- **Materiais Avançados e Desempenho:** Explorar como a incorporação de materiais avançados, como polímeros de alta performance, podem melhorar o desempenho e a durabilidade dos CVUs.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. High-pressure High-temperature Design Guidelines. **API Technical Report 17TR8**, n. 5ª, 2015.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for Subsea Wellhead and Tree Equipment. **API Specification 17D**, 2021.

BERTO, A. D. S.; MENDES, B. L.; NOGUEIRA, M. B. As complexidades da exploração do pré-sal no que se refere à inovação na indústria em engenharia e novos materiais, mão de obra e aspectos econômicos e geopolíticos. **Essentia Editora**, 2012.

BOEHM, C. F.; HOSIE, . Metal Annulus Seals for Subsea Wellheads: Important Systems Considerations. **Offshore Technology Conference**, 1990.

CALLISTER, JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. [S.l.]: [s.n.].

CAMPOS, A. C. M.; IDAGAWA, L. S. A PERFURAÇÃO NO BRASIL E ATIVIDADES NA BACIA DO PARANÁ, 1995. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22486>.

CORNELIUSSEN, K. W. Well Safety: Risk Control in the Operational Phase of Offshore Wells, Trondheim, 2006.

DYKES, C. E.; HOPPER, H. P.; JONES, R. G. Development and Implementation of a Universal Subsea Wellhead System. **SPE/IADC Drilling Conference**, New Orleans, 1989.

FIRJAN SENAI SESI. **Petróleo: uma fonte de riquezas para o país a partir do litoral fluminense**. Anuário do Petróleo no Rio 2023. Rio de Janeiro. 2023.

FIRJAN SENAI SESI. **Visão dos novos campos produtores e o potencial agregado a ser alcançado pelo estado do Rio de Janeiro**. Anuário do Petróleo no Rio 2023. [S.l.]. 2023.

GARCIA , E. D. L. **A Completação de Poços no Mar**. Salvador: [s.n.], 1997.

GUEDES, S. L. T. Aplicação da Análise de Riscos nas fases de projeto em sistemas submarinos de produção de petróleo., RIO DE JANEIRO, 1998. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufri-peno_upl/THESIS/10001871/1998_mestrado_sergio_luiz_teixeira_guedes_reduced_20210917101327607.pdf.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson, 2010.

HÜBSCHEN, G. *et al.* **Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods**. [S.l.]: Woodhead publishing, 2016.

IBP COM DADOS DA ANP. Evolução da produção, exportação e importação de petróleo no Brasil. **Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás**, 2023. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/producao-importacao-e-exportacao-de-petroleo/>. Acesso em: 2023.

JACULLI, M. A. INTEGRITY INDEX FOR SUBSEA WELLHEADS , Campinas, 2021.

MILBERGER, ; BOEHM, C. F. High-Performance Metal-Seal System for Subsea Wellhead Equipment. **Offshore Technology Conference**, Houston, 1989.

MILBERGER, L. J.; RADY, A. Evolution of Metal Seal Principles and Their Application in Subsea Drilling and Production. **Offshore Technology Conference**, Houston, 1992.

MODENESI, P. J. Efeitos mecânicos do Ciclo Térmico., Minas Gerais, 2008.

PARK , C. *Materials Science & Engineering*, Spring, 2019.

PASCHOA, C. VetcoGray's Metal-to-Metal Sealing Technology. **Marine Technology**, 2013. Disponível em: <https://www.marinetechologynews.com/blogs/vetcograyc2b4s-metal-to-metal-sealing-technology-700096>.

PERINI, R. **Uso da difração de raios X para determinação da tensão residual induzida pelo processo de roleteamento de uma camisa de cilindro de motor diesel**. São Paulo: [s.n.], 2008.

SANTOS, C. H. Estudo do Alívio das tensões residuais, em peça estampada, pela técnica de vibrações mecânicas., Guaratinguetá, 2011.

SCOTT, P. E. *et al.* Seal Qualification and Single-Trip Lockdown Sleeve Reduces Risk Through. **Offshore Technology Conference**, Rio de Janeiro, 2019.

SEENEMAR. **A importância do petróleo para o estado do Rio de Janeiro e as ações para garantia da sustentabilidade social e fiscal no longo prazo**. Anuário do Petróleo no Rio 2023. Rio de Janeiro. 2023.

SINGEETHAM , S. P.; VALKA, W. A. Development of an All-Metal-Sealing Subsea Wellhead System for Critical Service Applications. **Offshore Technology Conference**, Houston, 1991.

SKEELS, H. B. API 17TR8 - HPHT Design Guideline for Subsea Equipment. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2014.

SOARES, A. C.; FREIRE, J. L. D. F. Avaliação dos efeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pela técnica do furo cego, Rio de Janeiro, 2003.

SOARES, M. C. B. V. Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas., São Paulo, 1998.

SOUSA, D. A. D. Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza, São João Del-Rei, 2012.

SUTERIO, R. Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica., Florianópolis, 2005.

THE world's worst offshore oil rig disasters. **Offshore Technology**, 2019. Disponível em: <https://www.offshore-technology.com/features/feature-the-worlds-deadliest-offshore-oil-rig-disasters-4149812/?cf-view>. Acesso em: 15 Novembro 2023.

THOMAS, J. E. **FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**. 2^a. ed. [S.l.]: INTERCIÊNCIA, 2004.

TURIBUS, N. S. Análise por difração de raios X do estado das tensões residuais em chapas de aço inoxidável duplex após soldagem, Rio de Janeiro, 2014.