

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

**PROJETO E VALIDAÇÃO DE VÁLVULA INDUSTRIAL DO TIPO ESFERA COM
REVESTIMENTO ANTICORROSIVO ORGÂNICO INTERNO**

DOUGLAS GASPARETTO

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2014

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

**PROJETO E VALIDAÇÃO DE VÁLVULA INDUSTRIAL DO TIPO ESFERA COM
REVESTIMENTO ANTICORROSIVO ORGÂNICO INTERNO**

DOUGLAS GASPARETTO
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Materiais Poliméricos 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.

Porto Alegre,
2014

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Prof. Ph.D. Sandro Campos Amico
Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Álvaro Meneguzzi
PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Franco Dani Rico Amado
PROCIMM/UESC

Prof^ª. Dr^a. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha
PPGEC/UNISINOS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a DEUS e aos meus pais por estarem ao meu lado a todos os instantes e terem me auxiliado sempre na escolha do melhor caminho a ser seguido e nas melhores decisões a serem tomadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha Mãe Isabel Maria Furlan, meu Pai Valmor Paulo Gasparetto e minha Irmã Andressa Gasparetto, por sempre estarem ao meu lado, me apoiando em todos os momentos, incentivando na caminhada rumo a mais esta conquista e me mostrando que o conhecimento e o estudo são os únicos bens que não podem ser perdidos e que levamos até o fim de nossas vidas.

A todos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, em especial ao Eng. Mateus Faccio e Eng. Diogenes Teles pelo apoio na realização dos testes práticos e no auxílio no desenvolvimento deste trabalho e ao Eng. Maikson Tonato pelas suas contribuições.

Ao Professor Dr. Sandro Campos Amico pela sua orientação e disponibilidade em orientar o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os Professores (as) do PPGE3M pelo conhecimento transferido neste período.

Ao apoio da empresa Micromazza, pela oportunidade de divulgação dos resultados obtidos neste trabalho, bem como disponibilização das bancadas de ensaio.

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Válvulas Industriais	4
3.2. Válvulas Industriais do tipo Esfera	7
3.3. Projeto de Válvulas Esfera Industrial do tipo Esfera	9
3.3.1. Projeto Válvula Industrial Tipo Esfera com Revestimento Anticorrosivo Interno	9
3.4. Características Técnicas de Revestimentos	16
3.5. Propriedades do Poli Etileno Clorotrifluoroetileno (ECTFE - Comercial)	17
3.6. Processo de Revestimento Orgânico	23
3.6.1. Preparação de Superfície	24
3.6.2. Aplicação do Revestimento	26
3.6.3. Controle de Qualidade/Processo	28
4. METODOLOGIA	31
4.1. Caracterização do Polímero Halar – ECTFE comercial	31
4.2. Preparação dos Protótipos	33
4.2.1. Pré-usinagem das Peças Conforme Projeto	33
4.2.2. Revestimento das Peças / Processo de Aplicação do Polímero	34
4.2.2.1. Preparação de Superfície	34
4.2.2.2. Aplicação do Revestimento	36
4.2.3. Controle de Qualidade Realizado no Processo de Revestimento	38
4.2.3.1. Contaminação Salina	38
4.2.3.2. Determinação de Perfil de Rugosidade	38
4.2.3.3. Verificação Visual do Preparo da Superfície	40
4.2.3.4. Ensaio de Contaminação por Pó	41
4.2.3.5. Verificação Visual do Revestimento	42

4.2.3.6.	Ensaio de Aderência do Revestimento	42
4.2.3.7.	Medição de Espessura Total do Revestimento	44
4.2.3.8.	Ensaio de Descontinuidade.....	45
4.2.3.9.	Medição de Dureza do Revestimento	45
4.2.4.	Usinagem Após Revestimento Conforme Dimensões de Projeto.....	47
4.2.5.	Montagem e Testes Iniciais dos Protótipos	47
4.2.6.	Ensaio de Desempenho e Validação dos Protótipos	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1.	Caracterização do Polímero ECTFE.....	53
5.1.1.	Propriedades Mecânicas.....	53
5.1.2.	TGA - Análise Termogravimétrica	55
5.1.3.	DMA - Análise Dinâmico-Mecânica	57
5.2.	Controle de Qualidade do Processo de Revestimento	58
5.2.1.	Contaminação Salina.....	58
5.2.2.	Determinação de Perfil de Rugosidade	59
5.2.3.	Verificação Visual do Preparo da Superfície	60
5.2.4.	Ensaio de Contaminação por Pó	60
5.2.5.	Verificação Visual do Revestimento.....	61
5.2.6.	Ensaio de Aderência do Revestimento.....	61
5.2.7.	Medição de Espessura Total do Revestimento e de Descontinuidade	62
5.2.8.	Medição de Dureza do Revestimento	63
5.3.	Testes Iniciais dos Protótipos	64
5.4.	Ensaio de Desempenho e Validação dos Protótipos	66
6.	CONCLUSÕES	73
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
8.	REFERÊNCIAS	75

RESUMO

Em função das novas fronteiras exploratórias de petróleo, principalmente proveniente das reservas do pré-sal, as situações operacionais e condições de serviços estão se tornando cada vez mais severas (pressão, temperatura, composição dos fluidos, etc), exigindo o desenvolvimento de novos materiais e de novas tecnologias para a adequação de materiais tradicionais existentes, como o aço carbono, agregando-lhes novas propriedades e características, por exemplo, com o uso de revestimentos poliméricos. Este trabalho tem por objetivo desenvolver e avaliar um projeto de uma válvula esfera industrial com todas suas partes internas revestidas, incluindo componentes internos, e realizar uma análise do processo de revestimento e validação do projeto final com os testes de desempenho realizados baseados na norma ABNT NBR 15827, com vistas a possibilitar a substituição de ligas metálicas nobres de alto custo (inconel, duplex, superduplex etc.), por aço carbono revestido. Inicialmente, foram realizadas alterações no projeto original da válvula esfera industrial de diâmetro 4" CL300 montagem tipo flutuante para tornar o projeto convencional em um projeto com revestimento interno. Na sequência, foram revestidas duas válvulas com o polímero etileno clorotrifluoroetileno (ECTFE), e realizados ensaios de controle de qualidade durante as etapas do revestimento e ao final do processo. Após a montagem e testes iniciais funcionais e de vedação das válvulas, estas foram submetidas a teste de ciclagem e desempenho, com 1000 ciclos de abertura e fechamento com a pressão máxima de trabalho, sendo realizado monitoramento contínuo do torque de acionamento e pressão aplicada. Foram realizadas sete avaliações de integridade das vedações e do revestimento durante a ciclagem. Gráficos de ciclagem, pressão e testes de vedação foram gerados na etapa de avaliação de desempenho dos protótipos. Ao final dos ensaios os protótipos foram desmontados e uma avaliação dos componentes foi realizada, sendo observado apenas desgaste uniforme nas vedações e superfície de vedação da esfera e haste devido ao atrito gerado pela abertura e fechamento da válvula. Este desgaste não comprometeu a vedação das válvulas. Os resultados satisfatórios validaram o projeto e o processo de revestimento desenvolvido.

Palavras-chave: Revestimento orgânico, Válvula industrial, Polímero ECTFE, ciclagem, desgaste.

ABSTRACT

Due to new exploratory frontiers of oil, mainly from pre-salt reserves, the operational situations and service conditions are becoming increasingly severe (pressure, temperature, composition of fluids, among others), demanding the development of new materials and technologies to the suitability of the traditional materials, as the carbon steel, by adding them new properties and characteristics, for example, with the use of polymeric coatings. This paper has the objective of to develop and evaluate the project of an industrial ball valve, with all the inner parts coated, including internal components, perform an analysis of the coating and validate the final design process with performance tests conducted based on standard ABNT NBR 15827, with the objective of enabling the replacement of noble metal alloys of high cost (inconel, duplex, super duplex, etc.) by coated carbon steel. Initially, there were changes in the original design of industrial ball valve of a diameter 4" CL300 floating mounting type to turn the conventional project in a project with internal coating. Following, two valves were coated with the polymer ethylene chlorotrifluoroethylene (ECTFE) and control quality tests performed during the stages of the coating and the end of the process. After the assembly and the initial functional tests and sealing of the valves, they were subjected to cycling and performance tests with 1000 cycles of opening and closing at maximum working pressure, being carried out continuous monitoring of the drive torque and pressure applied. Seven evaluations of the integrity of the sealing and coating were performed during cycling. Charts of cycle number, pressure and sealing tests were generated during the stage of evaluation of the prototype's performance. At the end of the testing, the prototypes were disassembled and a review of the components was conducted, being observed only the uniform wear on the seals and sealing surfaces of the sphere and the stem due to the friction generated by the opening and closing of the valve. This wear did not commit the seal of the valves. Satisfactory results have validated the project and the coating process developed.

Key words: Organic coating, industrial valve, ECTFE Polymer, cycling, wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Demanda futura dos diferentes tipos de válvulas.	6
Figura 2: Válvulas utilizadas na plataforma de petróleo P-53 da Petrobras: a) Área interna da plataforma, b) Válvulas industriais do tipo esfera, c) Válvula industrial do tipo gaveta, d) Área externa da plataforma.	6
Figura 3: Esquema de funcionamento de válvula esfera instalada em uma tubulação.	7
Figura 4: Válvula esfera flutuante, partes e funcionamento: 1) Corpo, 2) Tampa, 3) Haste, 4) Esfera, 5) Sede, 6) Prisioneiro, 7) Porcas, 8) Preme-gaxeta, 9) Gaxeta, 10) Anel da haste.	8
Figura 5: Válvula esfera trunnion, suas partes principais e funcionamento: 1) Corpo, 2) Tampa, 3) Haste, 4) Esfera, 5) Sede, 6) Prisioneiro, 7) Porcas, 8) Preme-gaxeta, 9) Gaxetas, 10) Anel da haste, 11) Eixo trunnion, 12) Anel da sede.	8
Figura 6: Comparação de resistência à corrosão (PRE) entre diferentes aços.	11
Figura 7: Projeto de válvulas esfera com componentes internos revestidos: 1) Corpo, 2) Tampa, 3) Prisioneiro, 4) Porca sextavada, 5) Sede, 6) Esfera, 7) Haste, 8) Anel da haste, 9) Junta, 10) Gaxeta, 11) Preme-gaxeta, 12) Prisioneiro, 13) Porca Sextavada, 14) Suporte, 15) Alavanca Tubular.	13
Figura 8: Esquema para projeto de válvulas revestidas.	14
Figura 9: Representação da pré-usinagem de alguns componentes: a) Tampa, b) Corpo, c) Detalhe do rebaixo ocasionado pela pré-usinagem.	14
Figura 10: Esquema de identificação das regiões revestidas e usinadas nos componentes corpo e tampa de válvula.	15
Figura 11: Representações da estrutura química do ECTFE.	18
Figura 12: Influência da temperatura nas propriedades do ECTFE: a) Resistência ao escoamento e à ruptura, b) Módulo em tração, c) Módulo em flexão.	20
Figura 13: Características superficiais do ECTFE: a) Imagem de microscopia de força atômica (20 × 20 μm), b) Comparação de dureza do ECTFE.	22
Figura 14: Processo de revestimento a pó por pistola eletrostática: a) Aplicação do revestimento, b) Equipamento de aplicação.	27
Figura 15: Componentes de válvulas sendo revestidos com utilização de pistola eletrostática.	28
Figura 16: Máquina universal de ensaios utilizada para realização do ensaio de tração.	31
Figura 17: Ilustração de obtenção dos filmes para ensaios de tração: a) Placa de vidro de 200mm × 200mm sem revestimento, b) Placa de vidro sendo revestida.	32

Figura 18: Equipamento para análise de TGA.	32
Figura 19: Equipamento para análise de DMA.	33
Figura 20: Pré-usinagem do corpo dos protótipos no centro de usinagem.	34
Figura 21: Processo de descontaminação térmica aplicada aos protótipos em forno (temperatura entre 350 - 400°C por 2 h).	35
Figura 22: Equipamento de realização do processo de jateamento abrasivo das peças com a utilização de granalha de aço.	36
Figura 23: Forno / cabines para aplicação do revestimento.	37
Figura 24: Aplicação do polímero nas peças aquecidas através de pistola eletrostática.	37
Figura 25: Realização de ensaio de contaminação salina.	38
Figura 26: Medição do perfil de rugosidade utilizando método <i>Replica Tape</i>	39
Figura 27: Medição do perfil de rugosidade.	40
Figura 28: Graus de comparação – Contaminação por pó.	42
Figura 29: Ensaio de determinação de aderência (<i>Pull-off</i>) hidráulico.	43
Figura 30: Critério de análise de falhas de aderência pelo método <i>Pull-off</i> , onde: A) Corpo de prova ou peça, B-C-D) Revestimento, Y) Adesivo, Z) Dispositivo de ensaio.	43
Figura 31: Configuração de teste sugerida pelo fabricante para máxima aderência.	44
Figura 32: Demonstração de ponto de medição de espessura de película seca.	45
Figura 33: Ensaio de descontinuidade no revestimento (método <i>Holiday Detector</i> via úmida).	46
Figura 34: Medição de dureza do revestimento.	46
Figura 35: Usinagem final do revestimento para adequação das peças às dimensões de projeto (componente esfera): a) processo de usinagem, b) controle dimensional.	47
Figura 36: Sequência de montagem sugerida para uma válvula esfera flutuante.	48
Figura 37: Demonstração da montagem dos protótipos.	48
Figura 38: Bancada de testes de pressão: a) Fixação da válvula na bancada, b) Monitoramento da pressão hidrostática e pneumática.	49
Figura 39: Bancada de ensaios de desempenhos de válvulas.	51
Figura 40: Software utilizado para monitoramento e regulagem dos parâmetros de ensaio. ...	52

Figura 41: Gráficos de Tensão × Deformação: a) <i>Top Coat</i> - Halar 6014 – Acabamento, b) <i>Primer</i> - Halar 6614 – Fundo, c) Halar 6614+Halar 6014.	55
Figura 42: Análise de TGA a) <i>Primer</i> – Halar 6614 – Fundo, b) <i>Top Coat</i> – Halar 6014 – Acabamento.	56
Figura 43: Gráfico da análise de DMA (Halar 6014 + Halar 6614).	57
Figura 44: Verificação visual do preparo da superfície.	60
Figura 45: Resultado ensaio contaminação por pó.	61
Figura 46: Visual do corpo e tampa da válvula.	62
Figura 47: Demonstração de ausência de vazamentos visíveis em ensaios de válvulas.	64
Figura 48: Gráfico da curva de torque de acionamento da Válvula Esfera 4” CL300 revestida.	65
Figura 49: Gráfico torque de acionamento de válvulas diversas.	65
Figura 50: Ciclagem protótipo – 0 a 200 ciclos.	66
Figura 51: Ciclagem protótipo – 800 a 1000 ciclos.	67
Figura 52: Pressão de teste durante ciclagem – 0 a 200 ciclos.	68
Figura 53: Pressão de teste durante ciclagem – 800 a 1000 ciclos.	68
Figura 54: Gráfico de ensaio de vedação após 1000 ciclos.	69
Figura 55: Componentes revestidos após os 1000 ciclos.	70
Figura 56: Detalhe dos componentes das válvulas: Protótipo 1: a) Corpo, b) Tampa, c) Haste, d) Esfera; Protótipo 2: e) Haste, b) Esfera.	71
Figura 57: Gráfico de torque após a realização de 200 ciclos.	72
Figura 58: Gráfico de torque após a realização de 1000 ciclos.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Seleção e aplicação de diferentes tipos de válvulas.	5
Tabela 2: Padrões construtivos de válvulas industriais do tipo esfera.	9
Tabela 3: Aplicações dos aços inoxidáveis duplex (AID) e aços inoxidáveis super-duplex (AISD) em função do PRE do aço.	10
Tabela 4: Comparativo de propriedades mecânicas de aços carbono e inoxidáveis (martensíticos, austeníticos e duplex) utilizados em válvulas industriais.	12
Tabela 5: Comparação do custo (por kg) dos aços mais utilizados na produção de válvulas industriais.	12
Tabela 6: Opção de revestimentos a serem aplicados em válvulas.	16
Tabela 7: Características técnicas dos revestimentos fluoropolimérico para aplicação no interno de válvulas industriais.	17
Tabela 8: Propriedades gerais do ECTFE.	18
Tabela 9: Resumo da resistência química do ECTFE comercial.	19
Tabela 10: Propriedades térmicas do ECTFE.	21
Tabela 11: Dados de permeabilidade do ECTFE.	22
Tabela 12: Alturas de perfil de rugosidade obtidas em função do abrasivo.	41
Tabela 13: Critérios de testes de vedação para válvula esfera Ø4” CL300.	49
Tabela 14: Requisitos de ciclagem para ensaios de válvulas conforme NBR 15827.	50
Tabela 15: Parâmetros para execução dos ensaios de desempenho dos protótipos.	52
Tabela 16: Propriedades mecânicas dos grades de ECTFE avaliados.	54
Tabela 17: Resultado ensaio de contaminação salina.	58
Tabela 18: Resultado ensaio de determinação do perfil de rugosidade	59
Tabela 19: Resultado ensaio de aderência.	62
Tabela 20: Resultado medição de espessura do revestimento antes e após usinagem final.	63
Tabela 21: Resultados de medição de dureza do revestimento antes e após ciclagem.	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ΔP – Diferencial de pressão
- ABNT – Associação brasileira de normas técnicas
- AID – Aços inoxidáveis duplex
- AISD – Aços inoxidáveis super duplex
- API – *American petroleum institute*
- ASME – *American society of mechanical engineers*
- ASTM – *American society for testing and materials*
- BRS – Bactérias redutoras de sulfato
- BS – *British standard*
- CENPES – Centro de pesquisa e desenvolvimento Landolfo Miguez de Mello
- DMA – Análise dinâmico-mecânica
- DN – Diâmetro nominal (mm)
- ECTFE – Etileno clorotrifluoroetileno
- EPC – *Eletrostatic Powder Coating*
- ET – Especificação técnica
- FBE – Epóxi termo-curável
- FRP – Plástico reforçado com fibras
- ISO – *International organization for standardization*
- MDF – Fibras de médiadensidade
- NACE – *National association of corrosion engineers*
- NBR – Norma Brasileira da ABNT
- NPS – *Nominal pipe size* (polegadas)
- PE – Polietileno
- PFA – Perfluoroalcoxi
- pH – Potencial de hidrogênio
- PMT – Pressão máxima de trabalho
- PRE – Número equivalente de resistência à corrosão por pite
- PRFV – Plástico reforçado com fibra de vidro
- PTFE – Poli (tetrafluoroetileno)
- PVC – Poli (cloreto de vinila)
- PVDF – Poli (fluoreto de vinilideno)

PVF – Poli (fluoreto de vinila)

Sa – *Standard Abrasive Blasting*

SCM – *Salt Contamination Meter*

Tg – Temperatura de transição vítrea

TGA – Análise termogravimétrica

UNS – *Uniform numbering system*

UR – Umidade relativa do ar

1. INTRODUÇÃO

A produção de petróleo e gás, o seu transporte e refino, e sua posterior utilização como combustível e matéria-prima para produtos químicos constituem um processo complexo e exigente. Vários desafios são encontrados nestes processos, sendo a corrosão um dos principais. Os custos associados a paradas devido à substituição de materiais e equipamentos, e o envolvimento de pessoal no controle contínuo da corrosão são substanciais e, se esta não for controlada, o resultado pode ser catastrófico. Análise de um número seletivo de falhas na indústria do petróleo indica que 33% destas são decorrentes de problemas diversos de corrosão, 18% fadiga, 14% falhas mecânicas/sobrecarga, 9% fraturas frágeis, 9% defeitos de fabricação, 7% defeitos de soldagem, 10% outras falhas. Dessa forma, alternativas no combate à corrosão precisam ser aperfeiçoadas e testadas na indústria do petróleo. (ASM, 1992), (KERMANI, et al., 1996).

Equipamentos fabricados de materiais diversos são utilizados em todas as fases de exploração do petróleo (perfuração e completação de um poço, produção e transporte do petróleo), porém os materiais envolvidos muitas vezes não possuem as características de propriedades mecânicas e resistência à corrosão desejada. Dessa forma há necessidade de criação de alternativas para o desenvolvimento deste segmento. Atualmente, várias soluções para revestimento interno de tubulações são aplicadas comumente no mercado, porém a aplicação de revestimentos internos em acessórios de tubulações, ex. válvulas industriais; tem sido limitado devido ao alto grau de complexidade e responsabilidade de um projeto de válvula.

De fato, nos últimos anos, o projeto de válvulas industriais tem exigido um plano de sofisticação e de necessidades inovadoras. Grande parte dessa exigência surge do ramo petrolífero, que tem demarcado novas fronteiras em busca do crescimento tecnológico. As extrações de petróleo são cada vez mais arriscadas e desafiadoras, exigindo maquinário de última geração, que assegure confiabilidade e ótimo desempenho. Alternativas em materiais e processos vêm sendo desenvolvidas para tornar viáveis novas aplicações, porém garantindo a qualidade e a segurança do produto.

Com a busca do prolongamento da vida útil de campos produtores maduros, a Petrobras vem utilizando técnicas de recuperação secundária, como por exemplo injeção de CO₂; reinjeção de água produzida, entre outros. A água produzida, apesar de tratada, possui teor elevado de cloreto, pH ácido, presença de ácidos orgânicos, H₂S e ausência de O₂, o que

exige a utilização de equipamentos fabricados em materiais com resistência à corrosão adequada ou com revestimentos orgânicos capazes de suportar essa demanda. (KOEBSCH, et al., 2010).

A utilização de revestimentos orgânicos sobre substratos metálicos pode conferir aos equipamentos novas propriedades e características funcionais, tornando-os aptos a serem utilizados em severas condições operacionais de temperatura, pressão e meio corrosivo. Entretanto, a aplicação de revestimentos anticorrosivos no interior de válvulas industriais está em fase de consolidação no mercado de óleo e gás brasileiro, pois usualmente são revestidos apenas os componentes corpo e tampa do produto final (componentes estáticos), sendo os componentes internos fabricados em ligas metálicas nobres, geralmente aço inoxidável duplex ou super-duplex. A aplicação de revestimento anticorrosivo interno em válvulas é uma tecnologia que pode gerar uma excelente relação custo / benefício, pois reduz muito os custos de válvulas utilizadas em ambientes agressivos. Resinas aplicadas sobre válvulas de aço carbono têm o potencial de possibilitar a substituição de ligas metálicas especiais em diversas situações, com ganho de vida útil do equipamento devido à proteção anticorrosiva gerada pelo revestimento aliada a um menor custo da válvula, desde que os desafios tecnológicos relacionados ao processo de aplicação e ao desempenho final sejam atendidos.

2. OBJETIVO

a) Objetivo Geral:

Validar o projeto de uma válvula industrial do tipo esfera com revestimento interno anticorrosivo orgânico.

b) Objetivos Específicos:

- Estudar e descrever a aplicação geral dos tipos usuais de válvulas utilizados na indústria do petróleo.
- Estudar e descrever as características técnicas dos materiais do revestimento.
- Analisar os métodos e procedimento de aplicação do revestimento.
- Realizar os ensaios no revestimento final para validação do processo de aplicação.
- Analisar o desempenho do produto revestido em comparação com os parâmetros utilizados para validação de produtos convencionais que utilizam aços comuns e ligas metálicas nobres.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Válvulas Industriais

Válvulas são equipamentos amplamente empregados em todos os processos industriais, representando em média 8% do custo total de uma instalação industrial e, no caso da indústria do petróleo e gás, alcançando 20 a 30% dos custos de tubulação (SILVA, 2008). As válvulas em uma instalação de petróleo estão diretamente ligadas a aspectos operacionais, segurança das instalações e pessoas, e ao meio ambiente. A Petrobras, por exemplo, investiu em compras diretas dos fabricantes de válvulas cerca de R\$ 957 milhões e em compras de terceiro mais de R\$ 1 bilhão nos últimos 5 anos (PETROBRAS / ABIMAQ, 2013).

Por definição, válvulas industriais são acessórios de tubulações e dispositivos mecânicos concebidos especificamente para direcionar, iniciar, bloquear, misturar ou regular o fluxo, pressão ou temperatura de fluidos em processos industriais. São dispositivos operados mecanicamente e utilizados sob diversas condições operacionais (SKOUSEN, 2004), (MATHIAS, 2008). Atualmente existem diversos tipos de válvulas com funções específicas, e os padrões construtivos variam de acordo com a função do equipamento no escoamento do fluxo.

As válvulas podem ser classificadas quanto à sua função em (SILVA, 2008), (MATHIAS, 2008):

- **Válvulas de Bloqueio (*block-valve*):** São aquelas que trabalham na condição de totalmente aberta e fechada da passagem do fluido, proporcionando uma restrição completa ao seu escoamento. Permitem mínima queda de pressão quando totalmente abertas, pois têm alta vazão. Devem sempre operar totalmente abertas ou totalmente fechadas, pois o projeto construtivo de seus componentes internos não permite sua utilização para controle de fluxo. Os modelos mais utilizados são gaveta, esfera e macho.
- **Válvulas de Regulagem (*throttlingvalves*):** Controlam o fluxo do fluido e podem trabalhar em qualquer posição, inclusive em fechamento e abertura parcial. Geralmente, mesmo totalmente abertas, proporcionam perda de carga no sistema em função da geometria interna do corpo da válvula, devido a restrições na passagem do fluxo. Os modelos mais utilizados são borboleta, agulha, globo, diafragma.
- **Válvulas de Segurança (*safetyvalves*):** São dispositivos auto-operados, que utilizam a energia do próprio fluido para sua operação. Utilizadas para alívio de pressão, a fim de evitar sobre-pressão no sistema, garantindo segurança nas aplicações.

- **Válvulas de Retenção (*checkvalves*):** Utilizadas para impedir o retorno do fluido, permitindo escoamento em um único sentido enquanto seu elemento móvel de vedação estiver na posição aberta. Ao ser interrompido ou alterado a direção do fluxo, a válvula efetua a vedação automaticamente. Os modelos mais utilizados são as válvulas de retenção pistão, retenção esfera e retenção portinhola.

A seleção, o tipo e o dimensionamento são pontos de vital importância na escolha de uma válvula. Os principais pontos a serem considerados para a especificação são: perda de carga, pressão e temperatura do fluido, tipo de fluido, capacidade de vazão, tipos de acionamento, espaço para instalação, materiais de construção e tipo de conexões. A Tabela 1 mostra diversos tipos de válvulas para diferentes aplicações (MATHIAS, 2008).

Tabela 1: Seleção e aplicação de diferentes tipos de válvulas.

APLICAÇÕES									
TIPOS DE VÁLVULAS	Bloqueio de fluxo	Controle de Fluxo	Acionamento Rápido	Operações Frequentes	Passagem plena	Prevenção de refluxo	Alta pressão diferencial	Alívio de pressão	Fluidos viscosos
Gaveta	.				.		.		
Globo		.		.			.		
Retenção						.			
Guilhotina
Diafragma					
Mangote
Esfera
Borboleta
Macho
Segurança								.	
Controle			.	.			.		

Fonte: MATHIAS (2008)

A Figura 1 apresenta a previsão de demanda de válvulas diversas para os anos de 2013 até 2021 (PETROBRAS / ABIMAQ, 2013). Nota-se que as válvulas do tipo esfera e gaveta se destacam nesta comparação, e que há projeção para utilização de uma grande quantidade de válvulas anuais em instalações, tornando necessário o desenvolvimento de produtos mais confiáveis e resistentes para desenvolver todas estas aplicações.

A Figura 2 demonstra um exemplo de aplicação de válvulas industriais em uma plataforma de exploração de petróleo. Pode-se perceber um grande número de válvulas de todos os tipos, cada válvula com uma função específica. A Figura 2(b) apresenta uma válvula industrial do tipo esfera, e a Figura 2(c) uma válvula do tipo gaveta, sendo que ambas têm como finalidade o bloqueio do fluxo de fluido.

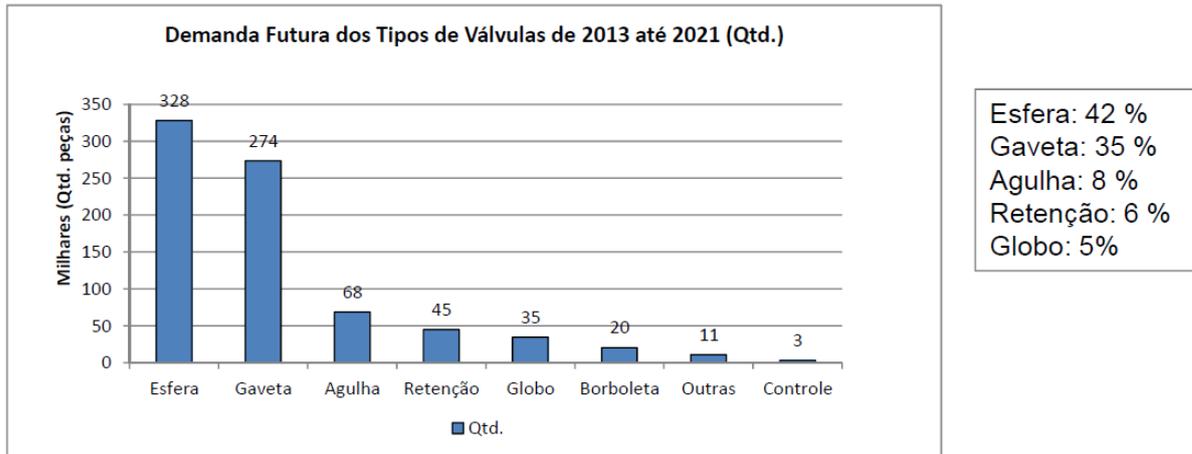


Figura 1: Demanda futura dos diferentes tipos de válvulas.

Fonte: PETROBRAS / ABIMAQ (2013)

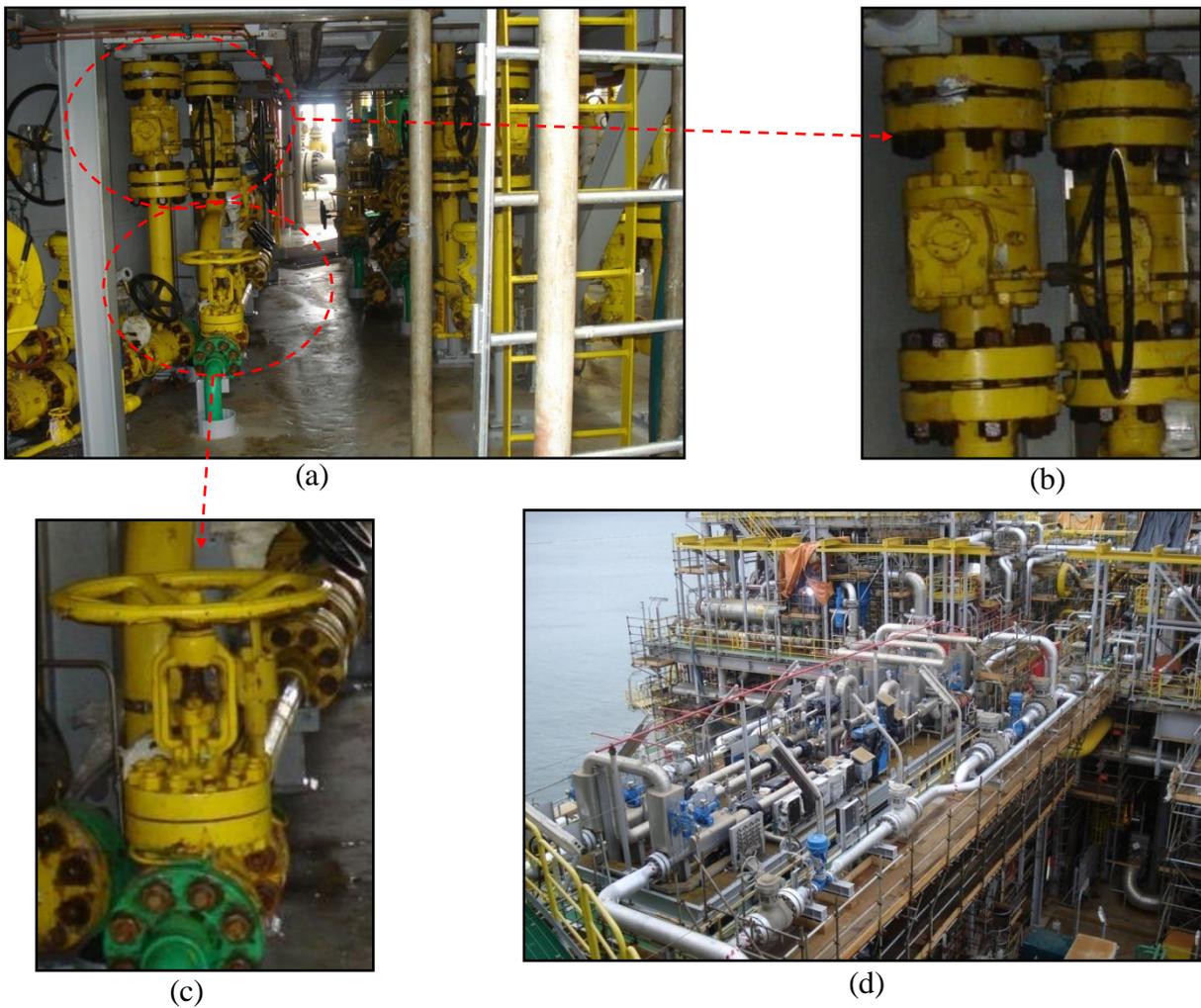


Figura 2: Válvulas utilizadas na plataforma de petróleo P-53 da Petrobras: a) Área interna da plataforma, b) Válvulas industriais do tipo esfera, c) Válvula industrial do tipo gaveta, d) Área externa da plataforma.

3.2. Válvulas Industriais do tipo Esfera

São válvulas de movimento rotativo nas quais o obturador é uma esfera que descreve movimento rotacional de 0° a 90° em relação ao sentido de escoamento do fluxo na tubulação, para sua abertura e fechamento, respectivamente. Na posição aberta, o furo da passagem da esfera fica totalmente alinhado com a tubulação, permitindo a vazão do fluido. Na posição fechada, o orifício da esfera fica perpendicular ao sentido do escoamento do fluxo, efetuando o bloqueio da passagem do fluido, como mostra a Figura 3 (MATHIAS, 2008), (COOLEY, 1986), (SILVA, 2008).

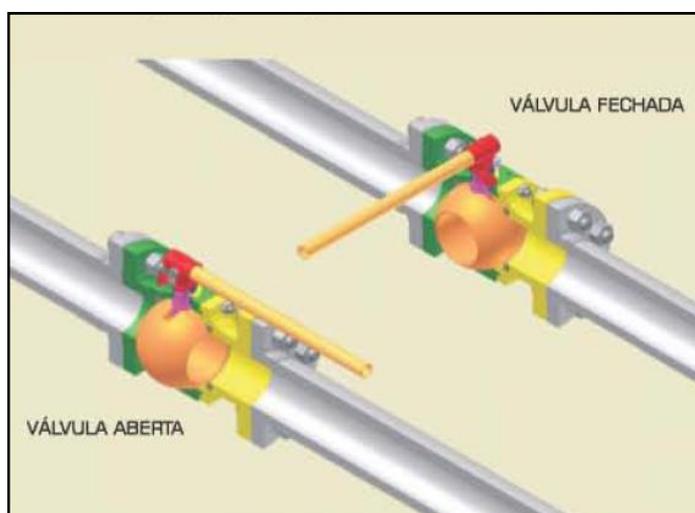


Figura 3: Esquema de funcionamento de válvula esfera instalada em uma tubulação.

Fonte: MNA (2012)

Dependendo do sistema de vedação, as válvulas esferas podem ser flutuante ou *trunnion*. A válvula esfera flutuante (Figura 4) é a mais comum, sendo muito utilizada em baixas pressões e em bitolas de até 8". A construção desta válvula é baseada essencialmente em um obturador (esfera) contido por duas sedes, na montante e na jusante (entrada e saída, respectivamente). A parte interna é composta por uma haste e uma esfera, sendo que o encaixe entre ambas permite liberdade de movimento axial da esfera para efetuar uma força mecânica sobre a vedação de saída na posição fechada, devido à pressão de entrada exercida sobre a área da esfera no diâmetro interno do anel de vedação a montante (extremidade de entrada do fluido). A diferença de pressão entre a montante e a jusante (ΔP) produz uma força na esfera que comprime a sede, produzindo vedação na jusante do fluxo (MNA, 2012), (MATHIAS, 2008).

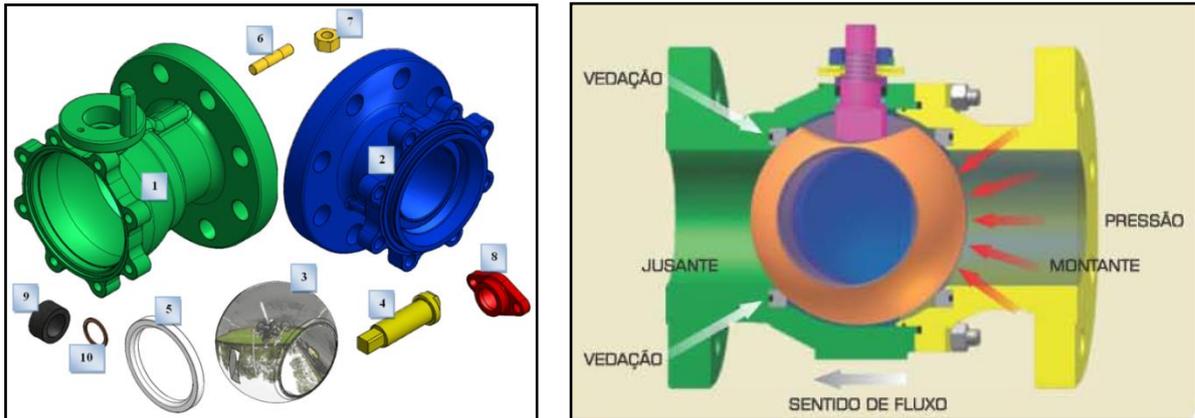


Figura 4: Válvula esfera flutuante, partes e funcionamento: 1) Corpo, 2) Tampa, 3) Haste, 4) Esfera, 5) Sede, 6) Prisioneiro, 7) Porcas, 8) Preme-gaxeta, 9) Gaxeta, 10) Anel da haste.

Fonte: Adaptado de MNA (2012)

A válvula esfera *trunnion* (Figura 5), por outro lado, possui em seu projeto um eixo superior (haste) e outro inferior (eixo *trunnion*). Estes eixos impedem o movimento axial da esfera, evitando que a pressão do fluido influencie o torque operacional da válvula e o desgaste do anel de vedação, suportando a carga dinâmica exercida pelo fluido e garantindo longa durabilidade ao sistema de vedação. (MATHIAS, 2008).

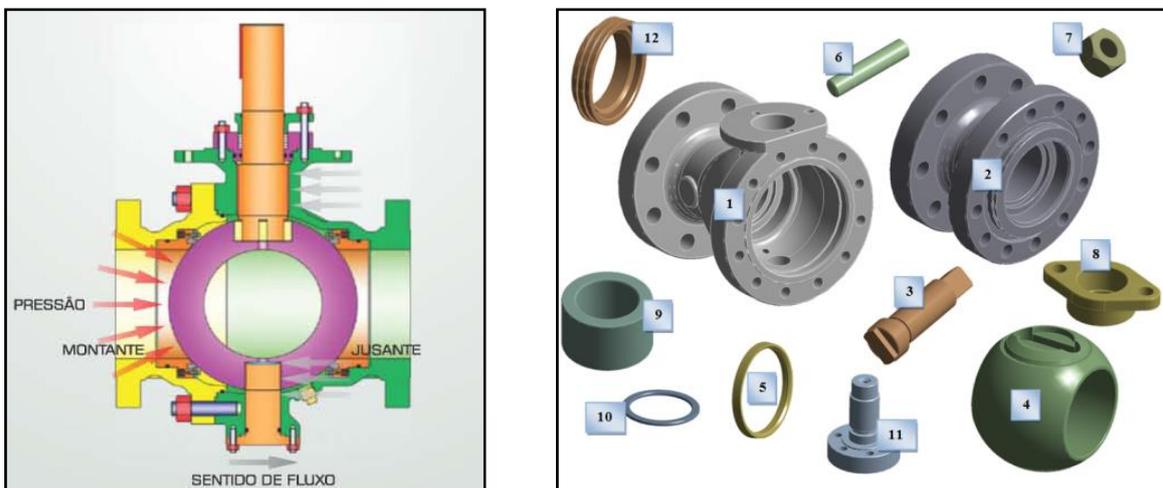


Figura 5: Válvula esfera *trunnion*, suas partes principais e funcionamento: 1) Corpo, 2) Tampa, 3) Haste, 4) Esfera, 5) Sede, 6) Prisioneiro, 7) Porcas, 8) Preme-gaxeta, 9) Gaxetas, 10) Anel da haste, 11) Eixo *trunnion*, 12) Anel da sede.

Fonte: Adaptado de MNA (2012)

3.3. Projeto de Válvulas Esfera Industrial do tipo Esfera

Para o projeto de uma válvula industrial convencional de qualquer tipo, deve-se atender uma gama de normas nacionais e internacionais. Atualmente no Brasil, fomentado pela Petrobras, a principal norma para projetos de válvulas industriais é a (NBR 15827, 2013), que define grande parte dos parâmetros do projeto e também indica normas e especificações técnicas complementares para a definição dos padrões construtivos. A Tabela 2 apresenta outras normas a serem consultadas e seguidas no projeto de válvula industrial do tipo esfera.

Para o projeto e dimensionamento da válvula, é também necessário conhecer os seguintes parâmetros: pressão e temperatura de operação do fluido, materiais utilizados, métodos de fabricação dos materiais (fundido, forjado, micro-fundido), fluido utilizado na tubulação, tipo de acionamento, tipo de vedação, entre outros. No caso de uma válvula do tipo esfera com revestimento interno anticorrosivo, deve-se ainda atender e considerar as características do revestimento e de seus componentes.

Tabela 2: Padrões construtivos de válvulas industriais do tipo esfera.

Parâmetros	Material do corpo/Extremidades da válvula						
	Aço fundido ou forjado				Aço forjado		
	Flange ou solda de topo ^b				Roscada	Encaixe para solda	
DN ^a (NPS)	50 a 900 (2 a 36)	50 a 600 (2 a 24)	50 a 400 (2 a 16)	50 a 300 (2 a 12)	15 a 40 (½ a 1 ½)		
Classe	150 a 600	900	1 500	2 500	150	800	1 500 e 2 500
Padrão construtivo	ISO 14313 e Anexo C desta Norma				BS ISO 7121	ISO 17292, e Anexo C desta Norma	ASME B16.34, e Anexo C desta Norma
Ensaída a fogo	ISO 14313, ISO 10497 e Anexo C desta Norma				-	ISO 17292, ISO 10497 e Anexo C desta Norma	ASME B16.34, ISO 10497 e Anexo C desta Norma
^a DN = diâmetro nominal, expresso em milímetros (mm). ^b Para diâmetros maiores do que os padronizados, a dimensão face a face deve ser acordada entre o fabricante e o comprador. O projeto deve ser conforme ASME B16.34.							

Fonte: NBR 15827 (2013)

3.3.1. Projeto Válvula Industrial Tipo Esfera com Revestimento Anticorrosivo Interno

A necessidade do desenvolvimento de válvulas com materiais alternativos é motivada pelo prolongamento da vida útil dos campos maduros produtores de petróleo e pelos desafios

relacionados à exploração de petróleo em campos no pré-sal pela Petrobras iniciada em 2008. Estudos recentes estimam que a produção desse óleo em condições de processo mais severas (de temperatura, pressão, concentração de CO₂ e H₂S), pode culminar em processos de deterioração extremos, com taxas de corrosão crítica nos equipamentos e tubulações de processo (KOEBSCH, et al., 2010), (COSTA, 2009).

Em situações de alta agressividade do fluido, são normalmente especificados para os componentes de válvulas aços inoxidáveis duplex (AID) e super-duplex (AISD) em função do PRE (número equivalente de resistência à corrosão por pite) destes aços. Estas classes de materiais são caracterizadas por apresentar uma interessante combinação de elevadas propriedades mecânicas e resistência à corrosão (SENATORE, et al., 2007). A aplicação dos AID e AISD se concentra nos setores de processamento químico, petroquímico, papel e celulose, fertilizantes, indústria nuclear, e de extração de petróleo *onshore* e *offshore* (Tabela 3) (Pardal, et al., 2013). Nestes casos, são geralmente utilizados em tubulações, bombas, tanques e vasos de pressão.

Tabela 3: Aplicações dos aços inoxidáveis duplex (AID) e aços inoxidáveis super-duplex (AISD) em função do PRE do aço.

Segmento Industrial	23 % Cr, sem Mo PRE=25	22 % Cr+Mo 30<PRE<36	25 % Cr 32<PRE<40	26 –27 % Cr PRE>40
Processamento Químico	---	Bombas, tanques de produtos químicos, serpentinas para fusão de enxofre e centrifugadores.	Extratores de uréia, reatores agitadores e trocadores de calor.	Evaporação salina, tubulações, bombas, sistemas de refrigeração de água do mar.
Petroquímico	Reatores tubulares com revestimento de aço carbono.	Unidades de dessalinização e destilação.	Carcaças de bombas de dessulfuração.	Tubulações para meios contendo Cl ⁻ ou HCl.
Polpa e papel	Digestores, pré-aquecedores e evaporadores.	Digestores contendo sulfatos e sulfitos.	Digestores e pré-aquecedores.	Equipamento de branqueamento contendo cloretos.
Geração de Energia (fóssil e nuclear)	Reaquecedores, aquecedores de água de alimentação.	Tubo de injeção em alta velocidade em poços geométricos.	---	Trocadores de calor e sistemas em condições geotérmicas ou salinas.
Extração de Petróleo e gás (on e offshore)	Refrigeradores, tubulações e linhas de distensão.	Estruturas e revestimentos (H ₂ S+CO ₂).	Transporte de gás sulfuroso, bombas de injeção de água salgada.	Sistemas de refrigeração, bombas, separadores, vasos de pressão e válvulas.

Fonte: Pardal et al. (2013)

A Figura 6 compara a resistência à corrosão por pites, representado pelo PRE, entre os aços inoxidáveis comerciais ferríticos, austeníticos e duplex (APERAM, 2013). Verifica-se que os aços inoxidáveis duplex possuem considerável resistência à corrosão em relação aos demais. Em termos de resistência mecânica, a Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas estipuladas por normas para os principais aços utilizados em válvulas. Pode-se observar que as propriedades mecânicas do CD4MCUN (aço inoxidável duplex) são superiores aos demais aços inoxidáveis (CF8, CF8M, CA15) e ao aço carbono (WCB). Dessa forma, quando se utiliza este tipo de aço para aplicações de alta agressividade do fluido e do meio, a válvula fica super-dimensionada, pois o projeto leva em consideração as propriedades mecânicas do material menos resistente para análise de tensões resultantes.

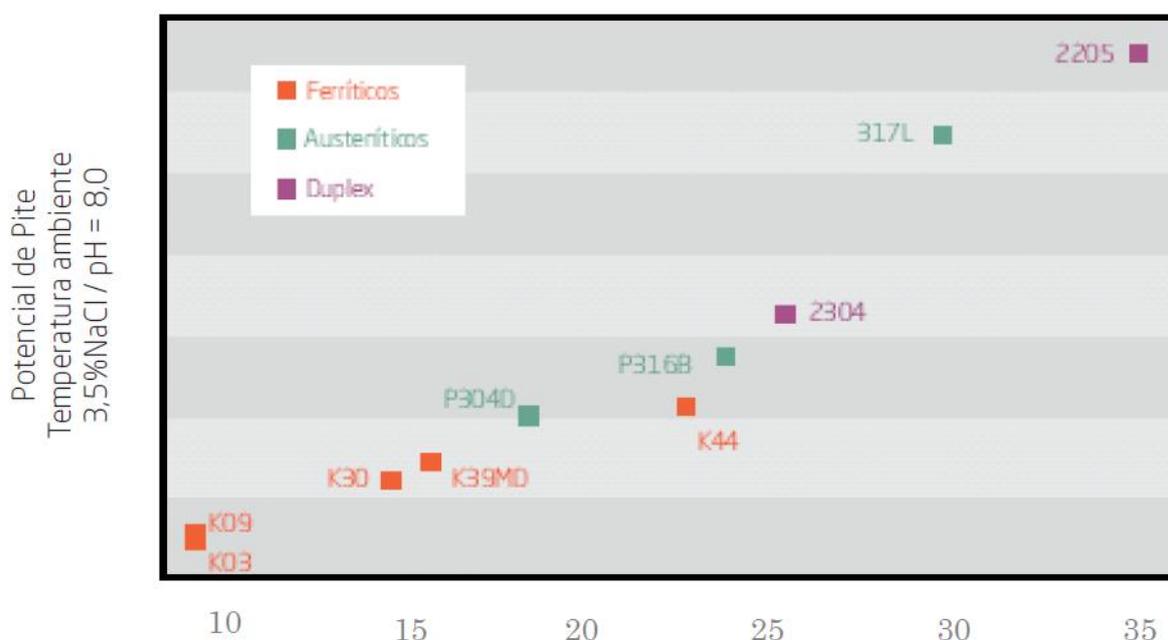


Figura 6: Comparação de resistência à corrosão (PRE) entre diferentes aços.

Fonte: APERAM (2013)

Vários documentos emitidos por companhias de Óleo & Gás (Total, Statoil, Concha, entre outros) sublinham o comportamento muito satisfatório dos aços inoxidáveis duplex utilizados por mais de 25 anos em uma série de aplicações, como *top side*, tubulações submarinas, coletores (*manifolds*), umbilicais, aplicados em poços, sistemas de combate a incêndio, entre outros (CHARLES, et al., 2008). Porém há uma grande diferença de custo de fabricação entre as diversas famílias de aços utilizados em válvulas, sendo o do aço inoxidável duplex (CD4MCUN) de 2 a 4 vezes mais elevado o do aço carbono (WCB).

Tabela 4: Comparativo de propriedades mecânicas de aços carbono e inoxidáveis (martensíticos, austeníticos e duplex) utilizados em válvulas industriais.

TIPO DE AÇO PROPRIEDADES MECÂNICAS	(ASTM A216) WCB UNS J03002 Aço Carbono	(ASTM A217) CA15 UNS J91150 Aço Inoxidável Martensítico	(ASTM A351) CF8 UNS J92600 Aço Inoxidável Austenítico	(ASTM A351) CF8M UNS J92900 Aço Inoxidável Austenítico	(ASTM A995) CD4MCCUN UNS J93372 Aço Inoxidável Duplex
Resistência à tração (MPa)	485 a 655	620 a 795	485 mín.	485 mín.	690 mín.
Resistência ao escoamento (MPa)	250 mín.	450 mín.	205 mín.	205 mín.	485 mín.
Alongamento (%)	22 mín.	18 mín.	35 mín.	30 mín.	16 mín.

A Tabela 5 apresenta uma comparação de custos por quilograma dos processos de fabricação mais utilizados atualmente para válvulas industriais. O processo de maior custo é o de fundição em areia, devido à sua complexidade, modelos e equipamentos de grande porte utilizados. Com relação aos materiais, o aço CD4MCCUN possui custo de fabricação mais elevado especialmente porque os processos mencionados utilizam lingotes do material final já pronto para obtenção das peças, enquanto os demais materiais são obtidos de sucata, com adição de componentes para correção do material final.

Tabela 5: Comparação do custo (por kg) dos aços mais utilizados na produção de válvulas industriais.

TIPO DE AÇO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	(ASTM A216) WCB UNS J03002 Aço Carbono	(ASTM A217) CA15 UNS J91150 Aço Inoxidável Martensítico	(ASTM A351) CF8 UNS J92600 Aço Inoxidável Austenítico	(ASTM A351) CF8M UNS J92900 Aço Inoxidável Austenítico	(ASTM A995) CD4MCCUN UNS J93372 Aço Inoxidável Duplex
Fundido em areia	R\$ 12,60	R\$ 20,30	R\$ 25,15	R\$ 30,40	R\$ 35,65
Microfundido	R\$ 11,26	R\$ 12,68	R\$ 15,41	R\$ 18,12	R\$ 23,37
Centrifugado	R\$ 5,34	R\$ 6,76	R\$ 9,49	R\$ 12,20	R\$ 17,92

Fonte: Micromazza Industria de Válvulas

Como alternativa da utilização dos aços de elevado custo e para tornar viável a aplicação de válvulas esferas nessas condições, a Petrobras iniciou a utilização de válvulas

esfera de aço carbono revestidas após testes realizados por (KOEBSCH, et al., 2010). Os projetos foram adaptados para acomodar o revestimento interno, porém contemplando apenas as partes mais simples da válvula (corpo e tampa), enquanto as partes móveis (esfera, haste, eixo, anéis de vedação) não são alteradas devido à ausência de estudos dinâmicos da válvula com componentes revestidos. Neste caso, a principal preocupação de projeto é o desgaste que o material do revestimento pode sofrer, expondo o material base à agressividade do fluido, com variação de dimensional interno e comprometimento do desempenho da válvula. Outro ponto fundamental a ser considerado é o tipo de revestimento a ser utilizado, que deve ser resistente à aplicação, considerando fluido utilizado, pressão e temperatura. A Figura 7 apresenta o projeto de uma válvula com todos os componentes revestidos.

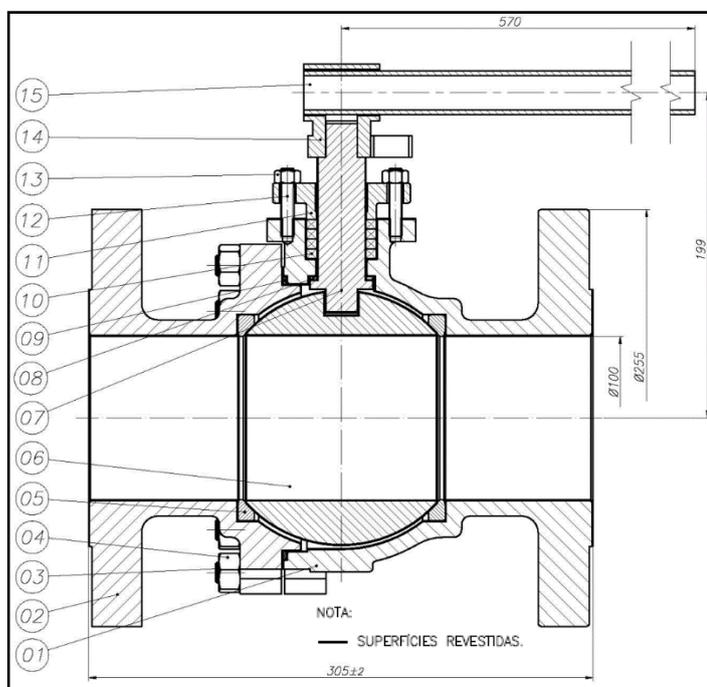


Figura 7: Projeto de válvulas esfera com componentes internos revestidos: 1) Corpo, 2) Tampa, 3) Prisoneiro, 4) Porca sextavada, 5) Sede, 6) Esfera, 7) Haste, 8) Anel da haste, 9) Junta, 10) Gaxeta, 11) Preme-gaxeta, 12) Prisoneiro, 13) Porca Sextavada, 14) Suporte, 15) Alavanca Tubular.

O projeto base de uma válvula com componentes revestidos deve seguir os passos principais abaixo, também apresentados na Figura 8:

a) Projetar os componentes a serem revestidos com as dimensões menores do que o projeto convencional (ou seja, descontando a espessura do revestimento aplicado), sendo assim é necessária a pré-usinagem dos componentes.

- b) Projetar os componentes após o revestimento, com excesso de espessura de polímero.
- c) Projetar os componentes após a retirada do excesso de espessura, sendo que essas dimensões são praticamente idênticas a do projeto convencional, sem revestimento.

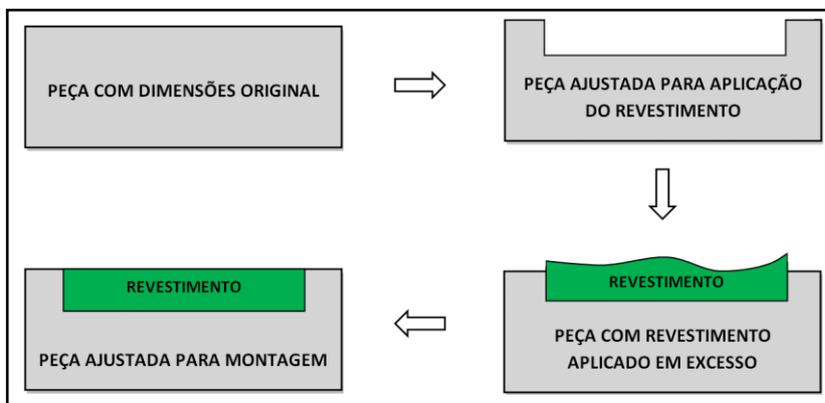


Figura 8: Esquema para projeto de válvulas revestidas.

Para aplicação do revestimento é necessária uma pré-usinagem de todas as peças conforme definições do projeto. A Figura 9 representa de forma esquemática a pré-usinagem da peça onde a linha pontilhada representa as regiões onde será realizada esta pré-usinagem, como encaixe de vedações, encaixe de haste, esfera, haste, ou seja, as regiões que serão rebaixadas para aplicação do polímero em excesso para posterior usinagem final e adequação às linhas contínuas. O rebaixo realizado deve garantir a preservação da espessura mínima de película seca do revestimento, respeitando as tolerâncias dimensionais.

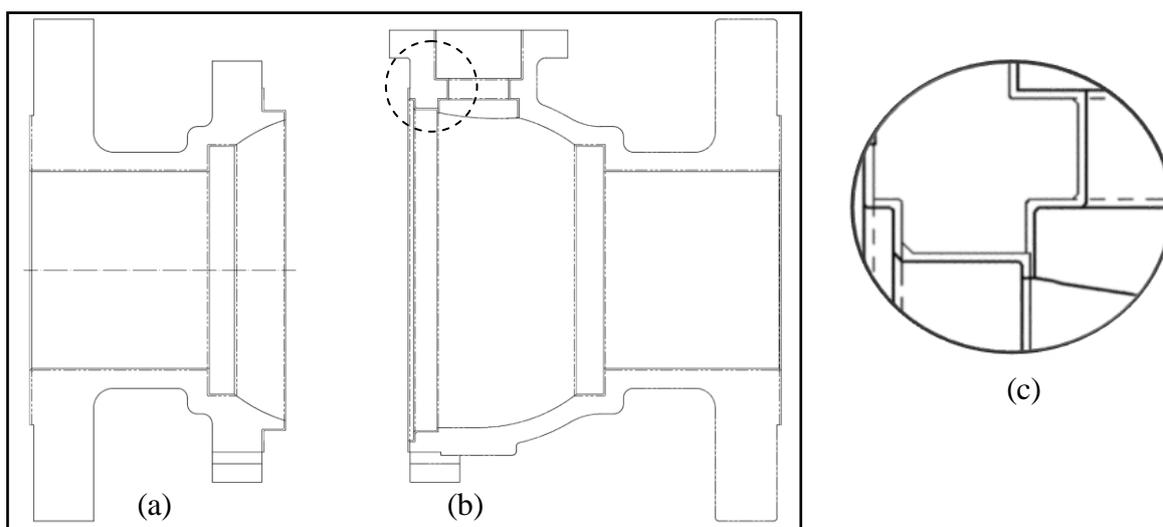


Figura 9: Representação da pré-usinagem de alguns componentes: a) Tampa, b) Corpo, c) Detalhe do rebaixo ocasionado pela pré-usinagem.

Para melhor compreensão do processo de revestimento aplicado nas peças, a Figura 10 identifica todas as regiões dos componentes corpo e tampa. A cor amarela representa as áreas das peças que serão pré-usinadas, a região vermelha representa o revestimento nas regiões pré-usinadas, a região verde mostra às partes que devem ser revestidas e onde não há usinagem mas que há contato com o fluido, a região azul representa as áreas internas que são posteriormente novamente usinadas para adequação às medidas, por fim a região marrom representa toda a região revestida com partes usinadas e partes não-usinadas, ou seja toda a superfície que estará em contato direto com o fluido. Após a usinagem final dos componentes, a válvula é montada utilizando os mesmos passos da montagem de uma válvula convencional.

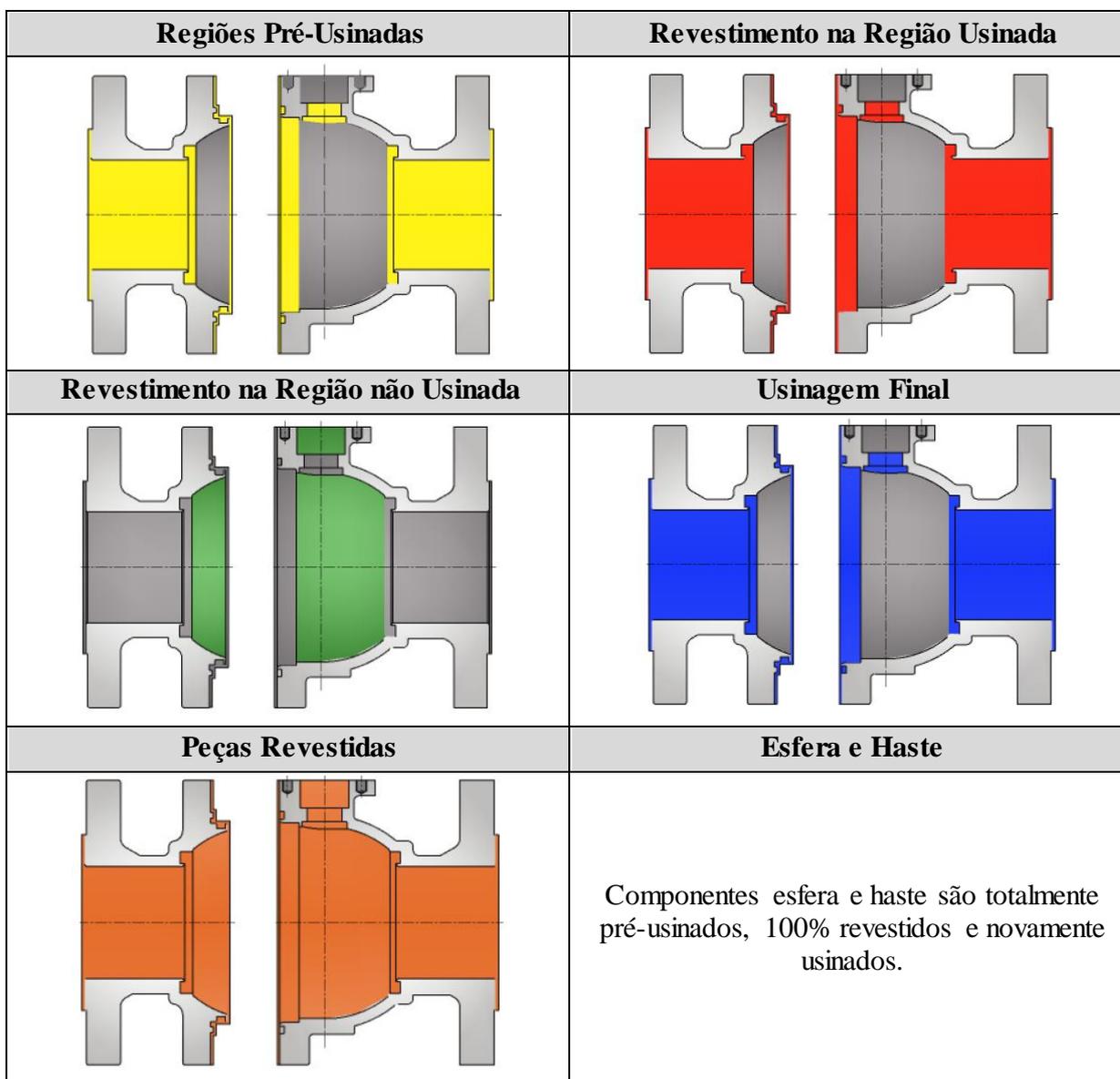


Figura 10: Esquema de identificação das regiões revestidas e usinadas nos componentes corpo e tampa de válvula.

Alguns testes com válvulas revestidas já foram realizados por (MEDEIROS, et al., 2011). Neste caso, foi estudada uma válvula esfera tipo *Trunnion* instalada em um sistema de transporte de petróleo com grande volume de água de formação e presença de bactérias redutoras de sulfatos (BRS). O diâmetro nominal da válvula foi de 26” e a classe de pressão CL150. O material de revestimento utilizado foi o ECTFE (Etileno clorotrifluoroetileno) Halar 6614 para a camada base e Halar 6014 para o *top coat*, ambos da Solvay Solexis. Os testes de vedação e pós instalação do produto foram satisfatórios, porém nenhuma análise dinâmica foi realizada para verificação do desempenho e vida útil do revestimento nas situações operacionais da válvula durante sua abertura e fechamento de modo contínuo na linha.

3.4. Características Técnicas de Revestimentos

A seleção do revestimento aplicado no interno de válvulas foi baseada nos requisitos estabelecidos pela empresa Petrobras, sendo a escolha limitada àqueles apresentados na Tabela 6 (QUINTELA, et al., 2010). Esses materiais são testados e aprovados para aplicação em tubulações, acessórios de tubulações, *drillpipes* e *tubings* utilizados pela Petrobras, como pode ser verificado no documento técnico CT TMEC 020/2010 – Materiais para revestimento de tubulação para instalação de produção e processo – Pesquisa, Desenvolvimento de Produção – Tecnologia de Materiais, Equipamentos e Corrosão emitido pelo CENPES – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da empresa Petrobras.

Tabela 6: Opção de revestimentos a serem aplicados em válvulas.

Fabricante	Produto	Material
Nova Coating	IPC Magma	ECTFE
	IPC ME 35	FBE
Solvay-Solexis	Halar 9414	ECTFE
	Halar 6614 + 6014	ECTFE
3M	Scothkote 134	FBE
Jera	Ciapowder FLP 2491	ECTFE
	Ciapoxi EFL RT 150	Epóxi Novolac
DuPont	DuPontXF	Fluorpolímero

Fonte: QUINTELA, et al. (2010).

Segundo (COSTA, 2009), as principais propriedades requeridas para um revestimento são: inércia química, aderência e resistência a erosão. O revestimento adotado para este trabalho em específico foi o etileno clorotrifluoroetileno (ECTFE), do fabricante Solvay-Solexis, identificado como Halar, na combinação do Halar 6614 (Fundo) e Halar 6014 (Acabamento). Este material atende as características técnicas exigidas para os materiais fluoropolimérico (Tabela 7), conforme se observa nos resultados apresentados nesta tabela.

Tabela 7: Características técnicas dos revestimentos fluoropolimérico para aplicação no interno de válvulas industriais.

Ensaio	Norma	Critério de Avaliação
Descolamento catódico	(ASTM G8)	Diâmetro equivalente menorque 10 mm
Resistência à abrasão	(ASTM D4060)	60 mg/1000 ciclos
Aderência à tração	(ISO 4624)	12 MPa, com falha diferente de A/B
Imersão em água produzida sintética	Sem norma: 250°C, por 2000h	Ausência de Falhas
	Sem norma: 90°C, por 2000h	Ausência de Falhas
Espectrometria vibracional	---	---
Empolamento hidráulico	(API RP 5L2)	Ausência de Falhas
Empolamento a gás	(API RP 5L2)	Ausência de Falhas

Fonte: Adaptado de QUINTELA, et al. (2010).

3.5. Propriedades do Poli Etileno Clorotrifluoroetileno (ECTFE - Comercial)

O copolímero de etileno-clorotrifluoroetileno (ECTFE) é um copolímero de fórmula geral $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CFCl}-\text{CF}_2-)_n-$, composto de unidades alternadas de etileno e cloro trifluoretileno (Simone, et al., 2012). A estrutura química do ECTFE pode ser visualizada na Figura 11.

O ECTFE é um termoplástico pertencente à classe dos fluoropolímeros, polímeros que se destacam pela elevada resistência química (a ácidos, bases e solventes) e estabilidade térmica em temperaturas elevadas (H.I. Rowan, 1988). O ECTFE foi desenvolvido na segunda metade do século XX e tem como particularidade a presença de um átomo de cloro na unidade de repetição fluorada, que aparece alternada a um etileno em sua cadeia principal.

Esse arranjo resulta em uma morfologia diferenciada proporcionando excelente balanço entre resistência mecânica, térmica e química, assim como características de barreira para diversos produtos químicos de interesse tecnológico (MEDEIROS, et al., 2012).

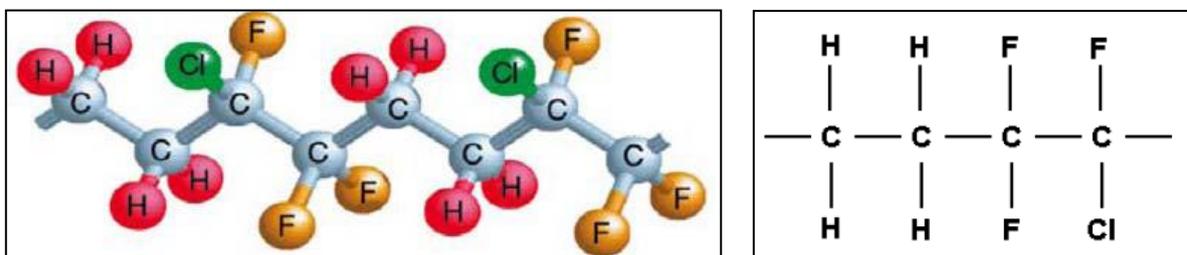


Figura 11: Representações da estrutura química do ECTFE.

Fonte: (EBNESAJJAD, 2003) e (SOLVAY SOLEXIS, 2006)

A Tabela 8 mostra as propriedades gerais do ECTFE. Pode-se dizer que o ECTFE é um material praticamente inerte, atóxico, com baixo coeficiente de atrito e com excelente resistência química, e grande impermeabilidade a fluidos e gases dissolvidos. De fato, o ECTFE é um dos polímeros mais resistentes quimicamente disponíveis atualmente para utilização industrial e o revestimento com ECTFE tem sido utilizado com sucesso para proteção contra corrosão por mais de 30 anos, sendo amplamente utilizado na indústria química, farmacêutica, semicondutores, fábricas, refinarias, usinas de energia, bem como para muitas aplicações diferentes onde há contato com produtos químicos altamente corrosivos.

Tabela 8: Propriedades gerais do ECTFE.

Property	Unit	ECTFE
Melting Point	°C	220-245
Specific Gravity	g/cm ³	1.68
Abrasion Resistance, Armstrong	cm ³	0.3
Hardness, Shore D (ASTM D 785)		75
Hardness, Rockwell R		93
Water absorption	%	< 0.1
Oxygen index	%	> 52
Flammability [UL 94]		V-O
Volume resistivity	Ohm-cm	> 10 ¹⁵
Dielectric strength at 1/8 inch thickness	V/mil (V/mm)	370 (1.5x10 ⁴)
Dielectric constant		
at 1kHz		2.5
at 1 MHz		2.5
at 60 Hz		2.6
Impact strength, notch IZOD at 25°C	J/m	No break

Fonte: MAGGI, et al. (2009)

Ensaio de exposição a mais de 120 substâncias químicas utilizadas nas indústrias em geral foram realizados por (SOLVAY SOLEXIS, 2010), sendo que as propriedades do ECTFE não foram alteradas após o período de exposição prolongado. A Tabela 9 apresenta alguns dos resultados encontrados nos testes de resistência química, que indicam se houve efeito sobre o material em termos de ganho de massa (permeabilidade) e de alteração nas propriedades mecânicas após 30 dias de exposição (imersão) contínua na substância. A concentração das substâncias e a temperatura máxima de aplicação também podem ser visualizadas e utilizadas como parâmetro em aplicações reais.

Tabela 9: Resumo da resistência química do ECTFE comercial.

Chemical	Formula	Concentration	Max. Temp. [°C]
Acids			
Hydrochloric	HCl	37 %	150
Hydrofluoric	HF	50 %	150
Nitric	HNO ₃	65 %	66
Phosphoric	H ₃ PO ₄	85 %	150
Sulphuric	H ₂ SO ₄	98 %	125
		oleum	23
Bases			
Ammonium hydroxide	NH ₄ (OH)	30 %	150
Potassium hydroxide	KOH	30 %	121
Sodium hydroxide	NaOH	50 %	121
Sodium hypochlorite	NaClO	5% - stabilized at pH 12	150
Hydrocarbons			
n-Hexane	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	100 %	150
Toluene	C ₆ H ₅ CH ₃	100 %	66
Alcohols and ethers			
Methanol	CH ₃ OH	100 %	65
Ethanol	CH ₃ CH ₂ OH	100 %	140
Organic acids, esters and ketones			
Acetic acid	CH ₃ COOH	100 %	> 100
		50 %	> 121
Acetone	CH ₃ COCH ₃	100 %	66
Acetophenone	C ₆ H ₅ COCH ₃	100 %	50
Ethyl Acetate	CH ₃ COOCH ₂ CH ₃	100 %	50
Classic polymer solvents			
Dimethyl formamide	CH ₃ CON(CH ₃) ₂	100 %	50
Dimethyl sulphoxide	CH ₃ SOCH ₃	100 %	> 100
N-Methylpyrrolidone		100 %	25
Halogenated solvents			
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	100 %	66
Chloroform	CHCl ₃	100 %	not resistant
Amines and nitriles			
Acetonitrile	CH ₃ CN	100 %	> 100
Aniline	C ₆ H ₅ NH ₂	100 %	100
Dimethyl amine	(CH ₃) ₂ NH	100 %	25
Peroxides			
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂	30 %	> 88
Fluids used in the automotive industry			
Crude oil		100 %	150
Dexron II (gear oil)		100 %	150
Gasoline		100 %	150
Diesel Fuels		100 %	150
Mineral oil		100 %	150

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2006)

O ECTFE tem ponto de fusão de 222 a 245°C, que possibilita uma capacidade de trabalho contínuo em temperaturas de até 150°C. Também pode trabalhar em baixa temperatura (criogenia), pois sua temperatura de fragilização está abaixo de -70°C (MEDEIROS, et al., 2012). Porém, as propriedades do polímero são alteradas pela temperatura de aplicação, como mostra a Figura 12, com a variação das propriedades mecânicas (resistência ao escoamento e à ruptura, módulo em tração e flexão) de acordo com a temperatura do polímero.

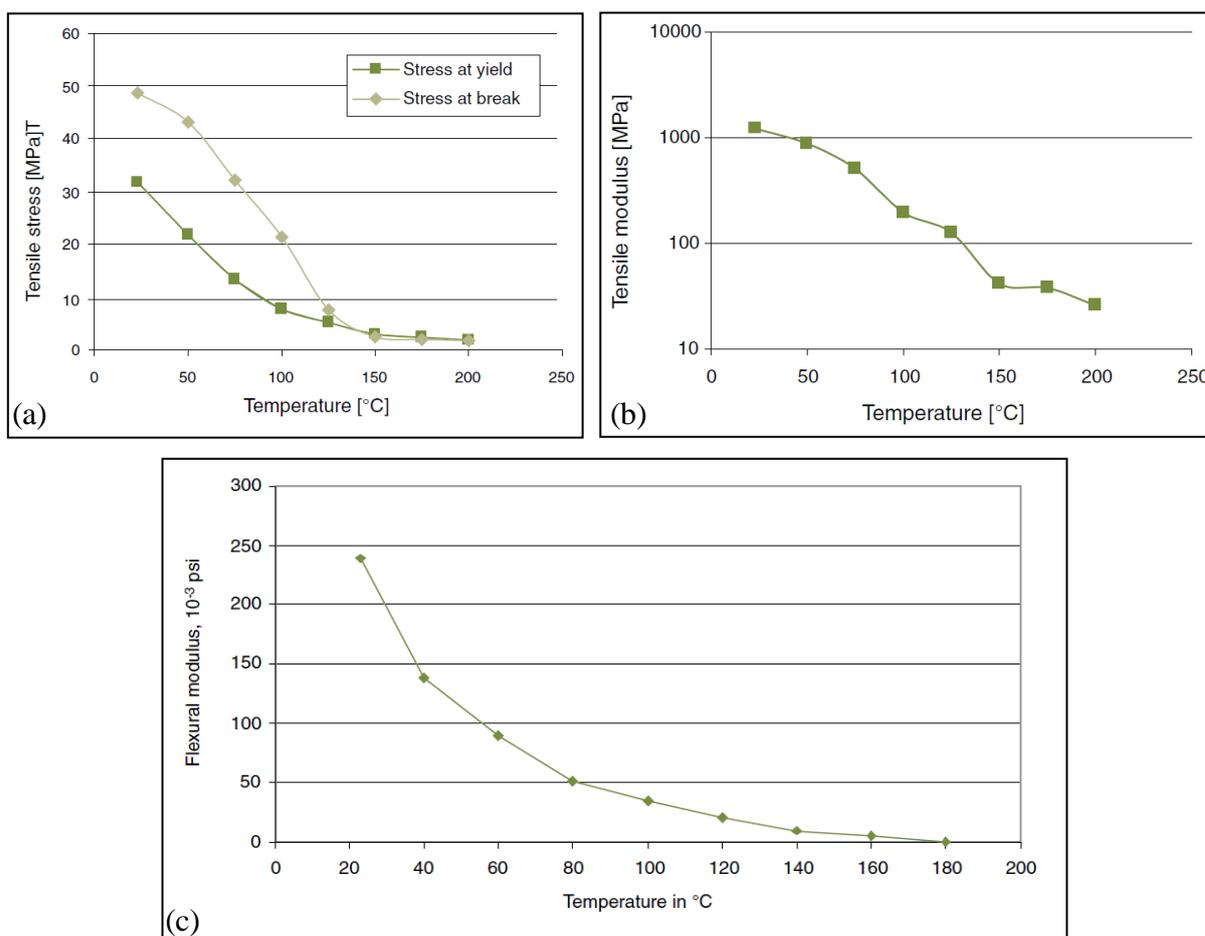


Figura 12: Influência da temperatura nas propriedades do ECTFE: a) Resistência ao escoamento e à ruptura, b) Módulo em tração, c) Módulo em flexão.

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2006)

Outras propriedades térmicas importantes para caracterização e utilização do polímero são apresentadas na Tabela 10. Pode-se verificar que a temperatura de transição vítrea (Tg) informada é de 85°C, parâmetro importante para análise do parâmetro máximo de temperatura aplicado a uma válvula esfera totalmente revestida com ECTFE.

Tabela 10: Propriedades térmicas do ECTFE

THERMAL (DSC)		ASTM D3418	
Melting point		°C (°F)	220-230 (428-446)
Heat of fusion		J/g	28
Cristallizing point		°C (°F)	205 (400)
Cristallization heat		J/g	28
Deflection temperature	ASTM D648		
load 0.46 MPa (66 psi)		°C (°F)	90 (195)
load 1.82 MPa (264 psi)		°C (°F)	70 (160)
Glass Transition (Tg)	DMTA	°C (°F)	85 (185)
Brittleness temperature	ASTM D746A	°C (°F)	<-76 (<-105)
Molding shrinkage		%	2.5
Thermal stability	TGA begin - at 1% weight loss in air	°C (°F)	405 (760)
Linear thermal expansion coefficient	ASTM D696	10 ⁻⁶ /K (10 ⁻⁶ /°F)	90 (50)
Thermal conductivity @ 40°C (104°F)	ASTM C177	W/m.K	0.15
Specific heat	23°C	J/g.K	0.95

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2006)

A resistência química do polímero por si só não é um condição suficiente para assegurar a proteção contra a corrosão do substrato. Mesmo quando o material do revestimento não é afetado pelo contato com a substância química, a permeação do produto químico através do revestimento pode, após algum tempo de serviço, levar à corrosão do substrato metálico, com a subsequente falha na aplicação (SOLVAY SOLEXIS, 2010).

A Tabela 11 apresenta os dados de permeabilidade do ECTFE. As elevadas propriedades de barreira do ECTFE dentre os polímeros fluorados resultam em elevado potencial de aplicação no segmento de Óleo & Gás, cuja presença de H₂S e CO₂ dissolvidos conferem alta agressividade ao meio (MEDEIROS, et al., 2011).

A dureza do polímero é fundamental para a aplicação em interno de válvulas, pois é necessário obter um diferencial de dureza entre o material da sede e o revestimento da esfera. Além disso, uma baixa rugosidade superficial pode permitir uma diminuição no torque de acionamento da válvula e minimizar possíveis incrustações no interno da mesma. A Figura 13(a) apresenta uma microscopia de força atômica da superfície do ECTFE. Dentre os fluoropolímeros o ECTFE é o que possui o menor coeficiente de atrito dinâmico (entre 0,1-0,2), ou seja, uma superfície mais lisa, como pode ser observada nesta imagem, onde aparece uma comparação entre as superfícies do PVDF, PFA e ECTFE. Além disso, o ECTFE apresenta dureza em torno de 75 ShoreD (Figura 13(b)) (SOLVAY SOLEXIS, 2006).

Tabela 11: Dados de permeabilidade do ECTFE.

Test Temp. °C	Chemical	Permeation Coefficients		
		ECTFE	ETFE	unit
25°C	O ₂	0.2	0.7 (0.6 ^a)	[cm ³ (STP)·mm/m ² ·atm·24h]·10 ⁻²
	N ₂	0.1	(0.2 ^a)	
	H ₂ O (vapour)	7.5	(98 ^b)	
25°C	HCl from a 37% solution in water	0.01	0.07	[g·mm/m ² ·24h]
	HNO ₃ from a 65% solution in water	< 0.001 ^c	-	
	H ₂ SO ₄ from 96% solution in water	< 0.001 ^c	-	
50°C	HCl 37%	0.5	1.7	
	Methanol	0.3	1.2	
	H ₂ O (liq)	0.5	1.6	

LEGEND

^a - published literature data from ETFE supplier A according to ASTM D1434
^b - published literature data from ETFE supplier B according to ASTM D1434
^c - no permeation detected after 2000 hours in 0.3 mm thick samples

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2010)

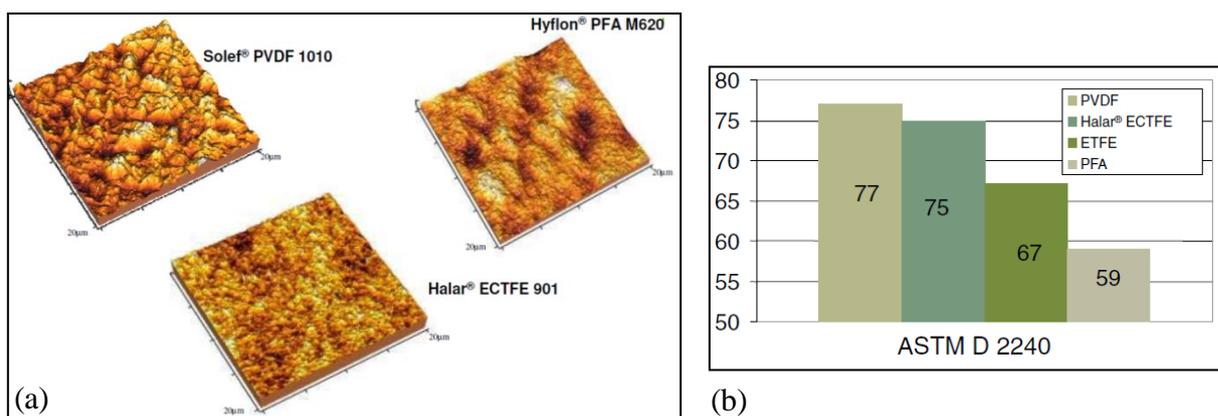


Figura 13: Características superficiais do ECTFE: a) Imagem de microscopia de força atômica (20 × 20µm), b) Comparação de dureza do ECTFE.

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2006)

3.6. Processo de Revestimento Orgânico

Os equipamentos metálicos estão sujeitos a deteriorações de diversas naturezas, como perda de espessura por corrosão ou erosão, fragilização ou empolamento por difusão de hidrogênio e incrustação por depósitos. Dentre as técnicas de proteção anticorrosivas disponíveis, a aplicação de revestimentos é uma das mais empregadas. O revestimento orgânico, apresenta uma série de características importantes, tais como facilidade de aplicação e de manutenção e relação custo-benefício (GENTIL, 2008).

A aplicação de revestimentos orgânicos internos tem por objetivo adequar a superfície dos equipamentos e tubulações às condições do meio, atuando em (COSTA, 2009):

- Isolamento por barreira entre fluido e o metal base (substrato);
- Redução da rugosidade superficial, melhorando o escoamento e, conseqüentemente, reduzindo as turbulências e perdas de carga responsáveis pelo processo erosivo.

Os revestimentos orgânicos vêm sendo empregados nas diversas áreas onde habitualmente são utilizados materiais metálicos resistentes à corrosão. Para exemplificar, (COSTA, 2009) aplicou revestimentos orgânicos (FRP e PVC) em aço carbono de equipamentos utilizados no processamento primário do petróleo e (POLONIO, 2003) utilizou a técnica de revestimento com PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro) em interno de um condensador (vaso de pressão) utilizado na indústria de açúcar e álcool.

O revestimento é a técnica contra corrosão mais difundida por se tratar de um processo de fácil execução na maioria dos casos. Essa facilidade pode aparentar que esta técnica não seja considerada uma tecnologia complexa, mas sua performance é fortemente influenciada pelos requisitos de qualidade mínimos que devem ser alcançados nas etapas que compõem o processo (COSTA, 2009), (QUINTELA, 2006). São elas:

- a) Limpeza da superfície para eliminação de substâncias contaminantes como poeira, gordura, produtos de corrosão, sais solúveis, carepa de laminação.
- b) Preparação de superfície para conferir rugosidade, de forma a aumentar a área de contato entre superfície metálica e o revestimento, aumentando a aderência.
- c) Qualidade do revestimento em relação aos seus constituintes básicos, formulação e resistência química ao meio corrosivo onde irá atuar.
- d) Qualidade da aplicação de modo a obter películas isentas de falhas
- e) Inspeção durante todo o processo para o cumprimento das etapas e procedimentos indispensáveis ao bom desempenho do revestimento.

O processo de revestimento orgânico pode ser dividido nas seguintes etapas: Preparação de superfície, aplicação do revestimento e controle de qualidade/processo, que serão detalhadas a seguir.

3.6.1. Preparação de Superfície

A preparação da superfície metálica é etapa muito importante na execução de revestimentos industriais, sendo realizada com dois grandes objetivos (NUNES, 2007):

- a) Remover da superfície materiais que possam impedir o contato direto do revestimento com o substrato;
- b) Criar condições adequadas para uma boa aderência, incluindo um adequado perfil de rugosidade, capaz de permitir a ancoragem mecânica do revestimento ao substrato.

Assim, toda a superfície deve estar isenta de impurezas, pó, sujeiras, óleos, graxas, soluções, óxidos, outros produtos de corrosão, etc., para permitir uma boa aderência entre o substrato e o revestimento orgânico (FURTADO, 2010). A presença de óleo, graxas e outros materiais gordurosos, não só prejudicam a aderência dos revestimentos, como também pode acarretar o aparecimento de defeitos graves no mesmo, como, crateras e porosidades. Portanto, a preparação de superfície é uma etapa que deve ser executada com bastante cuidado, para se obter o grau de limpeza desejado, caso contrário, a durabilidade dos revestimentos será reduzida drasticamente. De fato, grande parte das falhas prematuras em revestimentos decorre de problemas ocorridos na preparação de superfície (GENTIL, 2008).

Na indústria brasileira em geral, são utilizadas uma série de normas que definem a sistemática da preparação e padrões visuais pós-preparação, dentre elas podemos destacar (NBR 15158, 2004), (NBR 15239, 2005) e (ISO 8501-1, 2007), sendo que grandes empresas possuem normas específicas para tratamento de superfícies metálicas, como exemplo a (N9, 2010) da Petrobras.

Há vários métodos de limpeza de superfície, como limpeza mecânica, química, limpeza a fogo, limpeza a vapor etc. Para o processo em estudo, a abordagem focará na limpeza mecânica, que envolve quatro processos (NUNES, 2007):

- a) **Inspeção:** Deve-se proceder uma inspeção visual geral da superfície a ser revestida a fim de assinalar locais onde haja óleos, gorduras, defeitos superficial, bem como avaliar o estado inicial de corrosão (NBR 14847, 2002).

b) **Limpeza com solvente e remoção de defeitos superficiais:** Nos locais onde haja óleo, graxa ou gordura deve-se proceder uma limpeza com solvente ou método equivalente. Nos locais onde haja defeitos superficiais, deve-se proceder sua remoção por esmerilhamento (NBR 15158, 2004).

c) **Lavagem com água doce:** Em locais onde possa haver sais solúveis, a superfície deve ser lavada com água doce.

d) **Limpeza por ação mecânica:** Após a limpeza com solvente e a remoção de defeitos superficiais, procede-se a limpeza da superfície por um dos seguintes métodos: Limpeza mecânica com ferramentas manuais ou mecânicas, jateamento abrasivo ou hidrojateamento.

Para este estudo, será adotada a limpeza por jateamento abrasivo. Este método já foi empregado por (MEDEIROS, et al., 2011) e (KOEBSCH, et al., 2010) em testes realizados em revestimento de tubulações e válvulas, pois além de realizar limpeza superficial, este jateamento consegue gerar perfil de rugosidade mais adequado à ancoragem do revestimento.

A limpeza com jateamento abrasivo se baseia na remoção de camadas de impureza (ex. produtos de corrosão e carepa de laminação) pela força de um jato abrasivo (granalha de aço, bauxita sinterizada, escória de cobre, dentre outros). O jato abrasivo é obtido pela projeção sobre a superfície de partículas de abrasivo, impulsionadas por ar comprimido ou por força centrífuga. Neste processo, vários fatores têm que ser controlados em termo qualitativos e quantitativos, a fim de se obter o grau de limpeza desejado, entre os quais cabe citar (NUNES, 2007), (FURTADO, 2010), (GENTIL, 2008):

- **Qualidade do ar comprimido:** O ar comprimido deve ser limpo e seco (isento de umidade e óleo).
- **Qualidade e características técnicas dos abrasivos:** Importante para obtenção do grau de limpeza e perfil de rugosidade desejado, sendo necessário controlar granulometria e salinidade dos mesmos.
- **pH:** Abrasivos com pH ácidos ou básicos devem ser rejeitados, pois contaminarão a superfície metálica.
- **Dureza, formato e pureza dos abrasivos:** São propriedades que influenciam diretamente no grau de limpeza e no perfil de rugosidade.

Na limpeza por jateamento abrasivo, distinguem-se quatro graus de jateamento (N9, 2010), (ISO 8501-1, 2007):

- **Grau Sa 1 - Jateamento Abrasivo Ligeiro:** A carepa de laminação solta, a ferrugem e o material estranho não aderente devem ser removidos. A superfície deve ser limpa

imediatamente com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. A aparência final deve corresponder às gravuras com designação Sa 1. Esta limpeza não se aplica a superfícies que apresentem Grau A de intemperismo original. Para as demais, os padrões de limpeza são: BSa 1, CSa 1 e DSa 1.

- **Grau Sa 2 - Jateamento Abrasivo Comercial:** Quase toda a carepa de laminação, a ferrugem e o material estranho devem ser removidos. A superfície deve ser limpa imediatamente com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. A superfície deve apresentar, então, coloração acinzentada e corresponder, em aparência, às gravuras com designação Sa 2. Esta limpeza não se aplica a superfícies que apresentem Grau A de intemperismo original. Para as demais, os padrões de limpeza são: BSa 2, CSa 2 e DSa 2.
- **Grau Sa 2 1/2 - Jateamento Abrasivo ao Metal quase Branco:** A carepa de laminação, a ferrugem e o material estranho devem ser removidos de maneira tão perfeita que seus vestígios apareçam somente como manchas tênues ou estrias. A superfície deve ser limpa imediatamente com aspiradores, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. A superfície deve apresentar, então, aspecto correspondente às gravuras com designação Sa 2 1/2. Os padrões de limpeza são: ASa 2 1/2, BSa 2 1/2, CSa 2 1/2 e DSa 2 1/2.

Grau Sa 3 - Jateamento Abrasivo ao Metal Branco: A carepa de laminação, a ferrugem e o material estranho devem ser totalmente removidos. A superfície deve ser limpa imediatamente com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. A superfície deve apresentar, então, coloração metálica uniforme, correspondente em aparência às gravuras com designação Sa 3. Os padrões de limpeza são: ASa 3, BSa 3, CSa 3 e DSa 3.

3.6.2. Aplicação do Revestimento

A seleção adequada do método de aplicação e a observância de alguns requisitos básicos durante todo o período de aplicação têm influência tão grande no desempenho do sistema de revestimento quanto o próprio revestimento utilizado (NUNES, 2007). Existem vários processos de aplicação de revestimentos, alguns antigos e tradicionais e outros mais modernos e sofisticados, para atender uma grande diversidade de situações e qualidade dos revestimentos. Para a escolha do processo mais adequado influenciam vários fatores, como por exemplo, a produção em série, a quantidade de peças, realização do revestimento em fábrica ou em campo, tipo de conformação de peças, dentre outros. Qualquer que seja o

processo adotado, ele deve atender à seguinte condição básica: proporcionar a espessura de película seca desejada e permitir um bom rendimento para a aplicação (FURTADO, 2010).

Nos testes de revestimento de válvulas realizados por (KOEBSCH, et al., 2010) e (MEDEIROS, et al., 2011), o processo de aplicação do revestimento adotado foi a aplicação por pistola eletrostática. As especificações técnicas (DR-ENGP-1, 2010) e (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), designam que o revestimento interno de válvulas deve ser feito com equipamento pulverizador eletrostático ligado a um sistema de ar comprimido, sendo que o ar que alimenta o sistema de aplicação deve estar isento de água, óleo e quaisquer impurezas. O equipamento deve ser provido, no mínimo, de filtros separadores contendo sílica-gel e carvão ativado para retirada de água e de óleo, respectivamente, ou de qualquer processo de secagem que garanta a pureza do ar.

Este método de aplicação utiliza uma pistola de pulverização, onde é aplicada uma carga eletrostática às partículas de pó, as quais são então atraídas pela peça que está aterrada (Figura 14). Após a aplicação do revestimento em pó, as peças são aquecidas, permitindo que ocorra a fusão do polímero e a formação do revestimento.

Este é o método mais comum de aplicação de pós (COATING, 2013) e apresenta diversas vantagens, dentre elas: a) Consegue-se revestir completamente peças com formatos complexos (cantos, reentrâncias); b) Quase não há perda do revestimento em pó, sendo o rendimento próximo a 100%; c) A película resultante é uniforme (FURTADO, 2010).

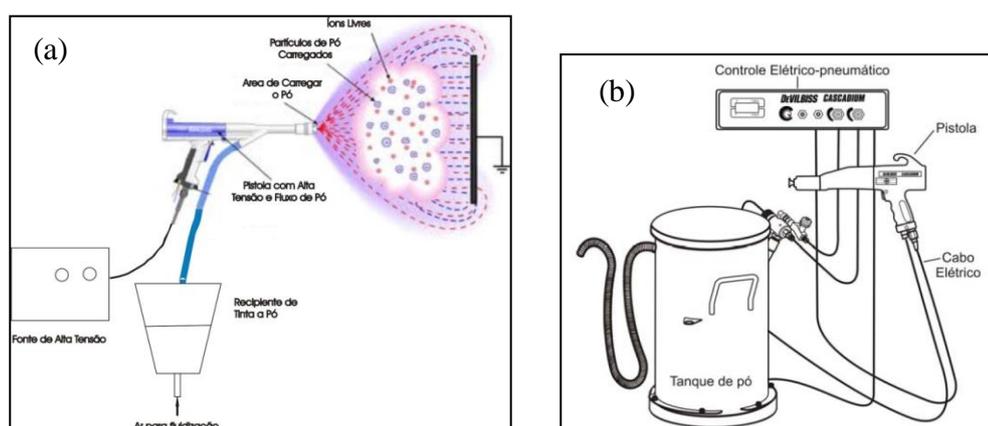


Figura 14: Processo de revestimento a pó por pistola eletrostática: a) Aplicação do revestimento, b) Equipamento de aplicação.

Fonte: (KMW, 2013), (DEVILBISS, 2013)

A Figura 15 apresenta imagens de teste realizadas por (KOEBSCH, et al., 2012) em revestimento de componentes de válvulas por pistola eletrostática.



Figura 15: Componentes de válvulas sendo revestidos com utilização de pistola eletrostática.

Fonte: (KOEBSCH, et al., 2012)

Outro fator de importância no processo de revestimento se refere às condições ambientais, inclusive na fase preparação de superfície (jateamento abrasivo), que podem ser responsáveis por introduzir vários tipos de defeitos na película de revestimento. Em termos gerais, as condições meteorológicas que influenciam as propriedades do revestimento são a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente e o ponto de orvalho (NUNES, 2007).

Segundo a especificação técnica (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), mesmo em condições climáticas adversas o revestimento pode ser aplicado desde que o ambiente local seja controlado para evitar condições inaceitáveis, o que pode ser alcançado com o uso de aquecedores e desumidificadores. As condições aplicáveis ao processo de revestimento interno de válvulas, segundo (N13, Rev. K - 2012), são: (a) Umidade relativa do ar (UR) máxima de 85% e (b) Temperatura mínima da superfície de 3 °C acima do ponto de orvalho.

3.6.3. Controle de Qualidade/Processo

O controle de qualidade deve ser executado em todas as etapas do processo de revestimento, afim de garantir o bom desempenho do revestimento e a vida útil do mesmo, sendo necessário para verificação do cumprimento das etapas pré-estabelecidas para o processo. Segundo (FURTADO, 2010), deve-se fazer uma série de medidas preventivas e controles, abrangendo todas as etapas do processo, desde a especificação do sistema, compra e aplicação, até os testes finais para aceitação e/ou recebimento dos serviços de revestimento a fim de liberar a peça e/ou equipamento para seu uso previsto.

Este controle de qualidade pode ser dividido em duas grandes etapas (NUNES, 2007):

a) Ação de prevenção de defeitos durante a aplicação: Antes e durante a aplicação do revestimento, uma série de ações de prevenção de defeitos devem ser conduzidas de forma a evitar o aparecimento de defeitos, sendo verificados os seguintes pontos: Inspeção visual da superfície a ser revestida, avaliação das condições atmosféricas, inspeção de recebimento de abrasivos e água, inspeção de recebimento dos revestimentos, avaliação do grau de limpeza da superfície, medição do perfil de rugosidade, acompanhamento da preparação do revestimento, e avaliação do método de aplicação.

b) Ação de detecção de defeitos: Por mais abrangente e cuidadosa que sejam as ações de prevenção de defeitos, não devem ser dispensadas as ações de detecção de defeitos, que são: Avaliação de eventuais falhas das películas de revestimento, medição de espessura da película de revestimento, teste de adesão das películas de revestimento, e determinação de discontinuidades na película de revestimento.

É importante ressaltar que o uso de revestimentos internos poliméricos em válvulas é uma tecnologia ainda em fase de desenvolvimento e estudo no país. Alguns trabalhos referentes a revestimento de válvulas já foram publicados como os de (MEDEIROS, et al., 2011), (KOEBSCH, et al., 2012) e (MEDEIROS, et al., 2012) retratando o cenário atual, enfatizando o processo de aplicação do revestimento polimérico e o polímero adotado como revestimento (ECTFE). Porém, não foi dada ênfase com relação à vida útil do revestimento quando aplicado nos componentes internos de válvulas e a estudos dinâmicos de desempenho considerando os ciclos esperados para a vida útil desejada para a válvula.

Há muitos casos de sucesso em outras aplicações diferente de válvulas, mas ainda dentro do setor de Petróleo & Gás e indústria química em geral, principalmente em dutos de transporte de petróleo e derivados, como os testes realizados por (KOEBSCH, et al., 2011) referentes à aplicação de poliamida 11 em interno e externo de tubos, sendo os benefícios do revestimento comprovados através de referências de uso relevante na indústria, além do revestimento com a poliamida 11 ser uma alternativa ao uso do aço inoxidável para diminuir as despesas de operação e de capital em instalações industriais. Também, (SAMIMI, et al., 2011) analisaram as principais causas de falhas de revestimentos de dutos com polietileno (3 camadas) afim de investigar o não atendimento da vida útil de 20 anos projetada para os mesmos, concluindo que muitos dos problemas encontrados eram oriundos de falhas na aplicação e manutenção dos dutos. Ainda, (POLONIO, 2003) realizou revestimento em um vaso de pressão aplicado na indústria açucareira, obtendo resultados satisfatórios e justificando a aplicação baseado na vida útil do equipamento.

Pesquisas relacionadas à aplicação e qualificação de revestimento também foram realizadas, como os de (POLONI, et al., 2012) e (PORTILHO, et al., 2012), que demonstraram suas vantagens técnicas, mostrando todo o procedimento de processo para aplicação do revestimento e os ensaios realizados para qualificação dos revestimentos aplicados em interno e externo de tubulações e seus acessórios. Já (BARCIA, et al., 2012) realizaram testes adicionando cerâmicas especiais nos revestimentos epóxi Novolaca (N-2912 da Petrobras), demonstrando que é possível desenvolver revestimentos com tecnologia 100% nacional e utilizar materiais alternativos aos tradicionalmente utilizados. Os testes iniciais realizados em campo e em laboratório demonstraram que os revestimentos avaliados possuíam alta resistência química, resistência à abrasão sem necessariamente modificar drasticamente as características físicas finais.

Testes de revestimentos poliméricos também foram realizados em tubos de cobre utilizados em geladeiras (FEDRIZZI, et al., 1999), devido aos mesmos trabalharem em condições agressivas de alta umidade que podem gerar corrosão nos tubos. Além de o projeto do circuito de refrigeração poder introduzir outros problemas de corrosão já que os tubos de cobre estão frequentemente em contato elétrico com tubos de alumínio gerando ataque galvânico sobre o metal menos nobre. Utilizaram-se os polímeros PE e PVF, sendo que todos os revestimentos apresentaram boas características de proteção para o meio em questão.

Quando se trata de revestimentos poliméricos há grande preocupação no que diz respeito ao desgaste que o polímero pode sofrer na aplicação, como estudos realizados por (NETO, et al., 2003), onde se analisou a influência do meio no desgaste abrasivo de materiais poliméricos utilizados na proteção de linhas flexíveis de condução de petróleo comparando vários tipos de polímeros e o desempenho dos mesmos.

Por último, voltado ainda à indústria do Petróleo & Gás, pode-se mencionar os estudos e ensaios realizados por (COSTA, 2009), que aplicou uma gama de testes em seis tipos de revestimentos orgânicos em aço carbono em equipamentos utilizados no processamento primário do petróleo, analisando as características e aplicação de cada revestimento.

Neste contexto, torna-se necessário cada vez mais o desenvolvimento de estudos para fomentar o segmento de revestimentos orgânicos, conferindo novas características funcionais aos produtos tradicionais; como o revestimento de válvulas aplicadas a indústria de petróleo e gás, química e petroquímica, sendo um marco no desenvolvimento de projetos de válvulas industriais.

4. METODOLOGIA

4.1. Caracterização do Polímero Halar – ECTFE comercial

O material utilizado para o revestimento anticorrosivo interno dos protótipos foi o ECTFE (etileno-cloro-trifluoretileno). Para sua caracterização, foram realizados os seguintes ensaios nas matérias primas e no revestimento após a sua aplicação: Propriedades mecânicas em tração, análise termogravimétrica (TGA) e análise dinâmico-mecânica (DMA).

Para o ensaio de tração do polímero, foi utilizada como referência a norma (ASTM D638, 2010), corpo de prova tipo IV, velocidade de ensaio de 50mm/min em uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 3382 (Figura 16) do LAPOL. Os ensaios foram realizados em corpos de provas provenientes de filmes de 200mm × 200mm.



Figura 16: Máquina universal de ensaios utilizada para realização do ensaio de tração.

Os filmes foram fabricados com o mesmo sistema de aplicação do polímero sobre uma superfície metálica, porém aplicou-se sobre vidro para facilitar sua remoção da superfície (Figura 17). A Figura 17(a) mostra a inserção das placas de vidro no forno para aquecimento e a Figura 17(b) a aplicação por pistola eletrostática do polímero em pó sobre as placas aquecidas. O ensaio de tração foi realizado em três amostras distintas do polímero, sendo elas: o material do fundo (*Primer* – Halar 6614), o material do acabamento (*Top Coat* – Halar 6014) e a combinação das duas resinas (*Primer + Top Coat*) que é o material aplicado sobre as peças metálicas.

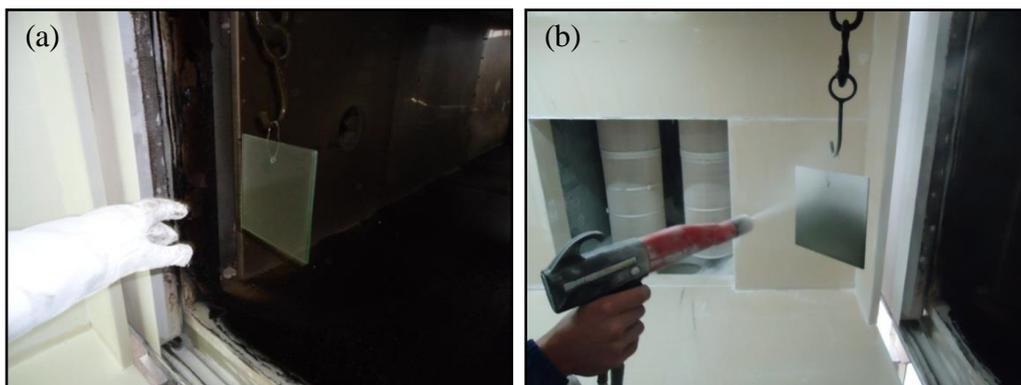


Figura 17: Ilustração de obtenção dos filmes para ensaios de tração: a) Placa de vidro de 200mm × 200mm sem revestimento, b) Placa de vidro sendo revestida.

A análise de TGA foi realizada em um analisador termogravimétrico (Figura 18), marca Shimadzu, modelo TGA-50, sendo adotada uma rampa de aquecimento de 20°C/min até a temperatura de 900°C, em atmosfera de N₂, com uma amostra de 20 mg. A análise de TGA foi realizada na resina de fundo (*Primer* – Halar 6614) e na resina de acabamento (*Top Coat* – Halar 6014) para verificar a temperatura máxima de degradação do polímero e sua utilização como revestimento interno de válvulas considerando o range de temperaturas de utilização destas.



Figura 18: Equipamento para análise de TGA.

A análise de DMA foi realizada em um analisador Dinâmico Mecânico (Figura 19), marca TA instruments, modelo 5980, capacidade até 600°C, sendo adotado uma amplitude de 15µm, frequência de 1 Hz e rampa de aquecimento de 5°C/min, da temperatura ambiente até 200°C. Esta análise foi realizada no filme de revestimento aplicado como revestimento nas

peças, ou seja, a combinação das duas resinas (Halar 6614 + Halar 6014). O objetivo do ensaio foi determinar a T_g - Temperatura de transição vítrea do polímero, utilizando como referência a norma (ASTM E1640, 2013).



Figura 19: Equipamento para análise de DMA.

4.2. Preparação dos Protótipos

Foram fabricados 2 protótipos para os testes, de acordo com as seguintes etapas:

- a) Pré-usinagem das peças conforme projeto.
- b) Revestimento das peças / aplicação do polímero.
- c) Controle de qualidade do processo: Ensaio de contaminação salina, determinação de perfil de rugosidade, verificação visual do preparo da superfície, ensaio de contaminação por pó, verificação visual do revestimento, medição de aderência, medição de espessura total do revestimento, ensaio de descontinuidade, ensaios de dureza do revestimento.
- d) Usinagem após revestimento conforme dimensões de projeto.
- e) Montagem dos protótipos e testes iniciais.
- f) Ensaios de desempenho e validação dos protótipos.

4.2.1. Pré-usinagem das Peças Conforme Projeto

A pré-usinagem foi realizada em todos os componentes dos protótipos conforme esquema apresentado na Figura 10. Após esta etapa, todas as peças passaram por inspeção

dimensional de modo a garantir que as medidas originais de projeto fossem alcançadas após a usinagem do revestimento e que a espessura do revestimento atingisse o mínimo requerido. A Figura 20 apresenta um corpo de protótipos sendo pré-usinado.



Corpo Válvula 4" CL300

Figura 20: Pré-usinagem do corpo dos protótipos no centro de usinagem.

4.2.2. Revestimento das Peças / Processo de Aplicação do Polímero

A aplicação do polímero como revestimento foi desenvolvida respeitando as seguintes etapas: Preparação de superfície (descontaminação térmica e jateamento abrasivo), e aplicação do polímero/revestimento (aplicação do fundo - Primer – Halar 6614 e aplicação do acabamento - Top-Coat – Halar 6014). Estas etapas serão detalhadas a seguir.

4.2.2.1. Preparação de Superfície

A preparação de superfície foi realizada a fim de garantir que esta estivesse livre de graxa, óleo, rebarba e demais materiais estranhos à natureza do substrato. O método empregado foi a descontaminação térmica, pelo aquecimento das peças a uma temperatura entre 350-400°C durante 2 h para eliminar quaisquer tipos de gorduras presentes na superfície. O processo de descontaminação térmica seguiu as recomendações da (NACE 6G, 1994), utilizando-se um forno de resistência térmica marca Grefortec com capacidade de aquecimento de até 700°C. A Figura 21 demonstra o processo de descontaminação térmica aplicado aos protótipos. Caso necessário, para diminuir o teor de sais presentes nas peças,

pode-se aplicar antes da descontaminação térmica o processo de lavagem das peças com água limpa.

Cantos vivos, arestas e irregularidades foram removidos em atendimento à norma (NACE SP0178, 2007) por meio de esmerilhamento, lixamento manual ou através do próprio processo de usinagem. Isto é necessário para tornar mais efetivo o revestimento destas partes, garantindo sua proteção.



Figura 21: Processo de descontaminação térmica aplicada aos protótipos em forno (temperatura entre 350 - 400°C por 2 h).

Em seguida, as peças foram submetidas ao processo de jateamento abrasivo em um jato automático com a utilização de granalha de aço angular e esférica a fim de gerar o perfil de ancoragem desejado para o revestimento e eliminar impurezas de superfície. A Figura 22 ilustra o equipamento onde é realizado o processo de jateamento abrasivo. Para eliminação de poeiras provenientes do processo de jateamento abrasivo as peças podem ser escovadas. O equipamento era provido de filtros e separadores adequados para retirada de água e de óleo, e o ar comprimido utilizado na aplicação do jato estava isento de água e óleo, garantindo a não contaminação posterior do substrato.



Figura 22: Equipamento de realização do processo de jateamento abrasivo das peças com a utilização de granalha de aço.

4.2.2.2. Aplicação do Revestimento

Para a aplicação do revestimento nos protótipos foi utilizado o polímero no formato de pó, com uma pistola eletrostática. A fusão do polímero e sua adesão ao substrato e em suas demãos posteriores se dão através do aquecimento do aço. O aquecimento das peças foi realizado em uma estufa linear, com capacidade de aquecimento até 400°C, que assegurou a não-contaminação do substrato. A estufa e o sistema de cabines e pistolas podem ser visualizados na Figura 23.

O aquecimento a 260-290°C foi mantido por tempo suficiente (em torno de 20 a 30 minutos) para homogeneização da temperatura de todas as superfícies, que foi monitorada com um termômetro infravermelho. Após o aquecimento, as peças são retiradas da estufa e recebem uma camada base de ECTFE (Halar 6614 – *Primer*) por pintura eletrostática (EPC – *Electrostatic Powder Coating*). Essa primeira demão, de aproximadamente 150µm proporciona melhor adesão polímero-metal (conforme recomendações do fabricante do polímero). Após, foram aplicadas mais cinco demãos de aproximadamente 150µm do ECTFE (Halar 6014 – *Top-Coat*), totalizando uma espessura final de $\approx 1000\mu\text{m}$. Porém essa espessura pode variar dependendo da geometria da peça.

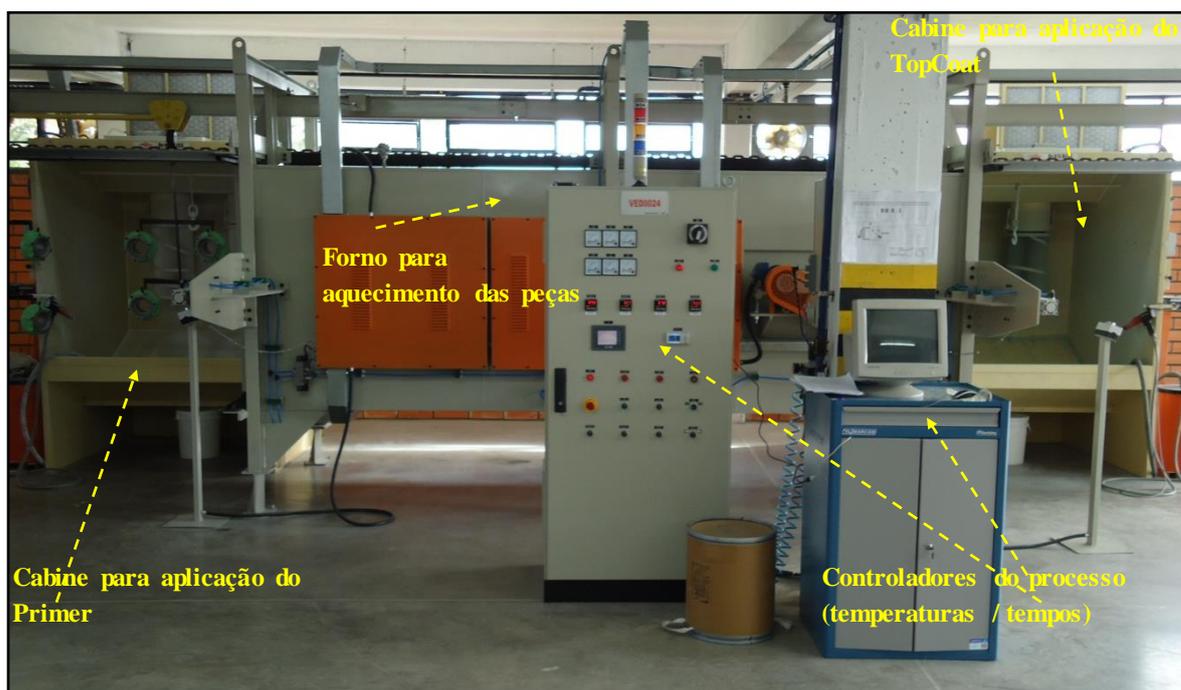


Figura 23: Forno / cabines para aplicação do revestimento.

O processo de aplicação do polímero pode ser visualizado na Figura 24. O aspecto brilhante e liso das peças é um indício que a aplicação foi realizada adequadamente, diferentemente de um aspecto fosco. As peças foram manuseadas somente após a secagem completa do revestimento, a fim de evitar contaminações sobre o polímero ou defeitos causados pelo manuseio.



Figura 24: Aplicação do polímero nas peças aquecidas através de pistola eletrostática.

4.2.3. Controle de Qualidade Realizado no Processo de Revestimento

Os ensaios de controle de qualidade durante o processo de revestimento são de vital importância para o bom desempenho e proteção do revestimento. As falhas prematuras em revestimentos, além de comprometer as funções do revestimento, acarretam em sérios prejuízos tanto de natureza técnica como economia. Para minimizar o risco de ocorrência de falhas prematuras é necessário um rigoroso controle de qualidade, durante e após sua aplicação (GENTIL, 2008). Os ensaios realizados estão descritos a seguir.

4.2.3.1. Contaminação Salina

O teor de sais presentes na superfície das peças foi determinado através do ensaio de contaminação salina (Figura 25) realizado com aparelho SCM400 Elcometer 130 (*Salt Contamination Meter*), conforme procedimento baseado na norma (NACE 5, 2002). O valor máximo de contaminantes admitidos é de 2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012).

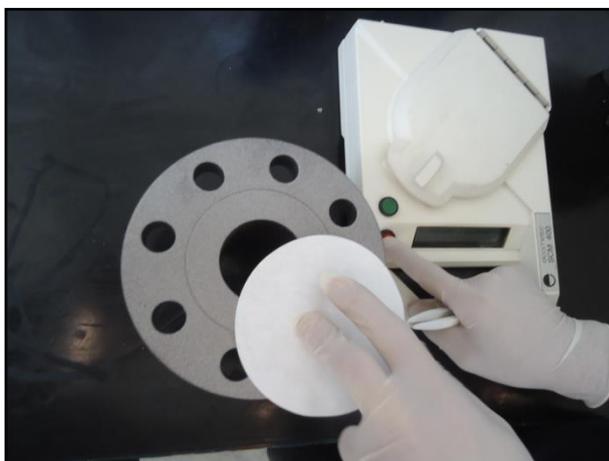


Figura 25: Realização de ensaio de contaminação salina.

4.2.3.2. Determinação de Perfil de Rugosidade

Várias técnicas para medição do perfil de rugosidade podem ser aplicadas, cada uma com sua particularidade. Como exemplo, cita-se o trabalho de (MEDEIROS, et al., 2011), que realizou ensaios de medição de perfil de rugosidade em revestimentos de válvulas utilizando o método denominado *Replica Tape (Press-o-Film)* (Figura 26), baseado nas normas (ASTM

D4417, 2011) e (ISO 8503-5, 2003). A vantagem deste método é que pode ser mantido registro do perfil de rugosidade através da fita utilizada no teste.

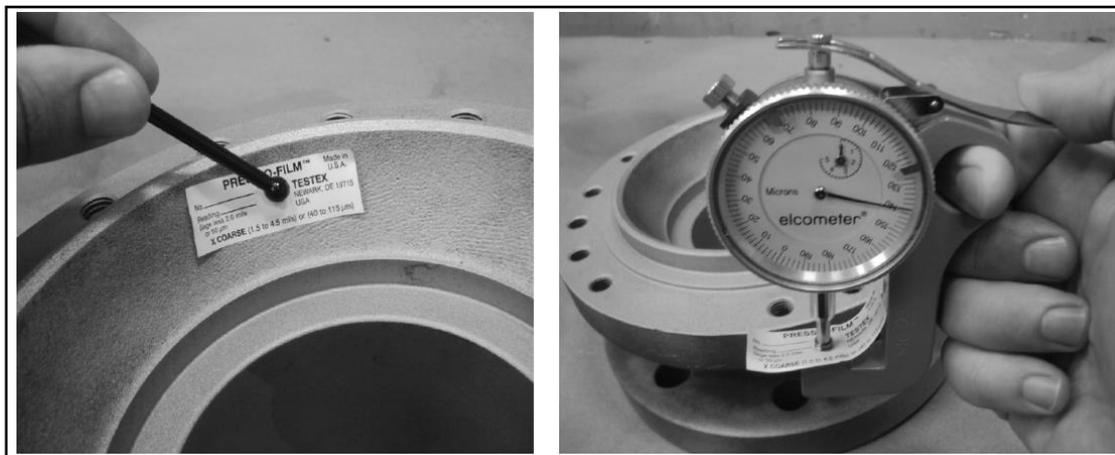


Figura 26: Medição do perfil de rugosidade utilizando método *Replica Tape*.

Fonte: MEDEIROS, et al. (2011)

Para este estudo, o perfil de rugosidade foi determinado com a utilização de um medidor de rugosidade analógico tipo agulha, marca Elcometer, modelo E123, escala de medição de 0 a 1000 μm , resolução de 2 μm (Figura 27), conforme procedimento baseado na norma (NBR 15488, 2007). Este método é recomendado para diversas aplicações de revestimentos atualmente aplicados em superfícies planas, além de ser um método de medição rápido e muito confiável. A limitação deste método é que não podem ser realizadas leituras em superfícies curvas e quando este for o caso, é necessário preparar corpos de provas para possibilitar as medidas.

O valor de rugosidade deve estar compreendido entre 50-100 μm (N13, Rev. K - 2012). Este perfil de rugosidade é utilizado na maioria dos revestimentos anticorrosivos e recomendados pelos principais fabricantes de revestimentos para este tipo de processo. Para atendimento do perfil de rugosidade, devem ser observados os parâmetros estabelecidos na Tabela 12, que correlaciona o tamanho do abrasivo e o perfil máximo alcançado.

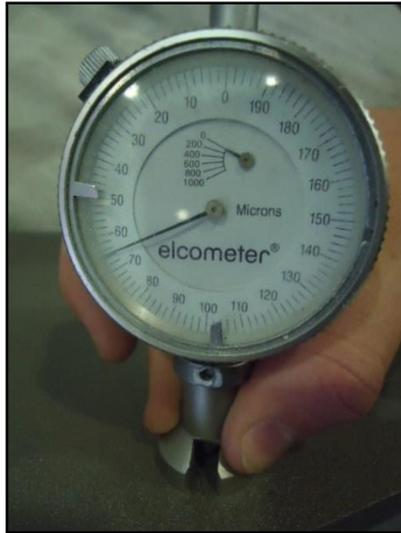


Figura 27: Medição do perfil de rugosidade.

4.2.3.3. Verificação Visual do Preparo da Superfície

A verificação visual do preparo da superfície após jateamento abrasivo foi realizada pela comparação da aparência do substrato com as imagens de classificação descritas na norma (ISO 8501-1, 2007). É indicado pelo fabricante da matéria prima e exigido pela PETROBRAS que a superfície seja submetida ao jateamento abrasivo ao “metal quase branco”, comparando-se a umas das figuras designadas como Sa 2½ da ISO 8501-1. (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), (SOLVAY SOLEXIS, 2009). O padrão Sa 2½, é o mais utilizado em revestimentos de grande responsabilidade, porém (POLONIO, 2003) especificou para testes de revestimento em vasos de pressão o padrão Sa 3, que é de difícil obtenção em processos industriais devido ao alto grau de limpeza por jateamento necessário.

Tabela 12: Alturas de perfil de rugosidade obtidas em função do abrasivo.

Abrasivo	Tamanho máximo da partícula que atravessa peneira		Altura máxima do perfil (μm)
	Abertura, mm	Nota 1	
Areia:			
fina	0,4	40	50
média	1,0	18	65
grossa	1,7	12	70
Granalha de aço [partículas angulosas (ver Nota 2)]:			
N ^o 40 - G 80	0,4	40	60
N ^o 25 - G 50	0,7	25	85
N ^o 18 - G 40	1,0	18	90
N ^o 16 - G 25	1,2	16	100
Granalha de aço [esférulas (ver Nota 2)]			
N ^o S-110	0,6	30	50
N ^o S-230	1,0	18	80
N ^o S-280	1,2	16	90
N ^o S-330	1,4	14	95
NOTA 1 Refere-se a peneiras conforme especificação da ASTM E 11.			
NOTA2 De acordo com a SAE RP J-444a.			

Fonte: N9 (2010)

4.2.3.4. Ensaio de Contaminação por Pó

A presença de poeira sobre a superfície metálica, antes do início do processo de aplicação do revestimento foi determinada conforme procedimento baseado na norma (ISO 8502-3, 1992). O ensaio consiste em pressionar sobre a superfície de aço preparada para o revestimento uma fita adesiva. A fita com poeira aderida é colocada sobre uma folha de papel de cor branca para melhor visualização. A quantidade de poeira que adere à fita e o tamanho das partículas podem então ser avaliados conforme apresentado na Figura 28, que mostra os padrões para comparação visual. A contaminação máxima por pó não deve exceder ao indicado no grau 2.

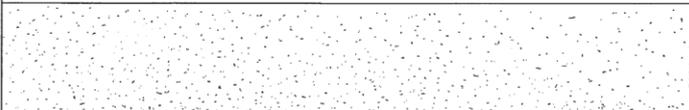
	1
	2
	3
	4
	5

Figura 28: Graus de comparação – Contaminação por pó.

Fonte: ISO 8502-3 (1992)

4.2.3.5. Verificação Visual do Revestimento

A inspeção visual deve ser feita em toda a superfície de todos os componentes revestidos. Não são aceitáveis: Cor e aparência não uniformes, bolhas, escorrimento, entalhes, rasgos, aspereza, formação de espuma ou qualquer outro defeito que possa afetar a performance do revestimento (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), (SOLVAY SOLEXIS, 2009).

4.2.3.6. Ensaio de Aderência do Revestimento

O ensaio de aderência do revestimento é fundamental para verificação se todas as etapas do processo foram executadas corretamente. Este ensaio demonstra se o revestimento de fundo está fortemente aderido à superfície e se a demão acabamento está aderida ao fundo.

Dependendo do tipo de revestimento e espessura final da película, podem ser aplicadas diversas técnicas de análise de aderência. O ensaio de aderência poderia ser realizado pelo método corte em X, baseado na norma (NBR 11003, 2009), conforme os estudos de (BARBOSA, et al., 2012) em revestimentos orgânicos. Porém, para este trabalho, este método mostrou-se inadequado pela dificuldade na realização do corte devido à espessura e à dureza do revestimento produzido.

Assim, neste trabalho, o ensaio foi realizado conforme a norma (ASTM D4541, 2009), método C, aparelho tipo III, equipamento de determinação de aderência (*pull-off*) hidráulico, marca Elcometer, modelo 108, escala de medição até 25 MPa, resolução de 0,1 MPa (Figura 29). A análise dos resultados de aderência pelo método *pull-off* foi executada conforme descrito na norma (ASTM D4541, 2009) e com auxílio de imagens da norma (NBR 15877, 2010) (Figura 30). O resultado mínimo aceito para aderência é de 15 MPa e nenhum tipo de falha pode ser observada (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012).



Figura 29: Ensaio de determinação de aderência (*Pull-off*) hidráulico.

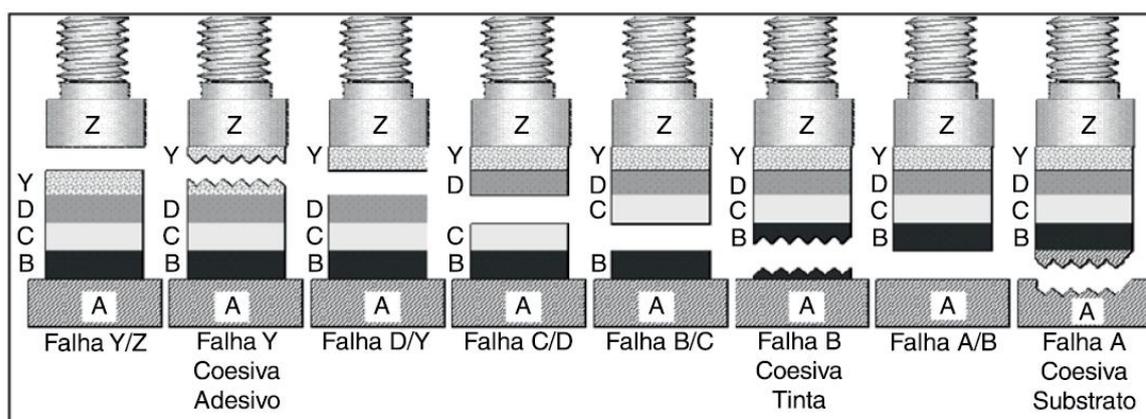


Figura 30: Critério de análise de falhas de aderência pelo método *Pull-off*, onde: A) Corpo de prova ou peça, B-C-D) Revestimento, Y) Adesivo, Z) Dispositivo de ensaio.

Fonte: NBR 15877 (2010)

Segundo (SOLVAY SOLEXIS, 2009), fabricante do polímero utilizado nos testes, a aderência máxima do revestimento é atingida quando este é ensaiado conforme ilustrado na Figura 31, devendo ocorrer rompimento da película de revestimento, sem que haja arrancamento do mesmo do substrato metálico, ou seja, a aderência do polímero ao substrato deve ser maior que a resistência mecânica do mesmo. Para comparação, sabe-se que a tensão de ruptura máxima do polímero à temperatura ambiente é de ≈ 48 MPa (conforme Figura 12), assim, a aderência estimada deve ser superior ao valor informado (SOLVAY SOLEXIS, 2006).

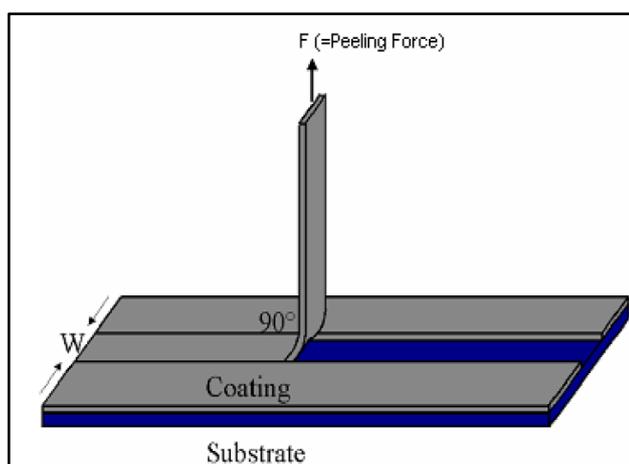


Figura 31: Configuração de teste sugerida pelo fabricante para máxima aderência.

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2009)

4.2.3.7. Medição de Espessura Total do Revestimento

A espessura total do revestimento foi determinada com a utilização de um medidor de espessura de película seca marca Elcometer, modelo 456, escala de medição de até 30mm, resolução de $1\mu\text{m}$ e um jogo de películas padrão para ajuste do equipamento (Figura 32). As medições foram executadas, conforme procedimento baseado na norma (NBR 10443, 2008), método B.

A espessura de película seca final do revestimento segundo (KOEBSCH, et al., 2010), deve ser de $400\text{-}500\mu\text{m}$, porém o fabricante da resina recomenda que para as condições mais agressivas pode ser aplicado entre $800\text{-}1000\mu\text{m}$. Para testes realizados pela Petrobras, recomenda-se a utilização de uma película seca final de $600\mu\text{m}$ (SOLVAY SOLEXIS, 2009), (DR-ENGP-1, 2010), que foi o parâmetro adotado neste trabalho mesmo nas regiões após a usinagem final.



Figura 32: Demonstração de ponto de medição de espessura de película seca.

4.2.3.8. Ensaio de Descontinuidade

A proteção que a película de revestimento deve oferecer ao substrato está diretamente ligada à integridade da película, dessa forma nenhuma falha ou orifício é tolerada. Para garantir que nenhum micro-poro possa ter se formado durante a aplicação do revestimento, ou que este possa ter sido danificado por algum meio mecânico, é realizado o ensaio de descontinuidade de acordo com a norma (NACE SP0188, 2006). Pode-se também realizar o ensaio de descontinuidade seguindo a norma da Petrobras (N-2137, 2007).

O ensaio foi realizado utilizando um aparelho detector de descontinuidades via úmida (*Holiday Detector*), marca Elcometer, modelo 270 (Figura 33). Não é aceitável nenhuma indicação de defeito na película e, caso sejam notados defeitos, estes devem ser mapeados, corrigidos e após novamente testados.

4.2.3.9. Medição de Dureza do Revestimento

A dureza do revestimento foi determinada utilizando um durômetro Shore D, marca Pantec, capacidade de medição 0–100 Shore D, resolução 1 Shore D (Figura 34), conforme procedimento da norma (ASTM D2240, 2010). O valor de dureza mínimo que deve ser alcançado é de 75 ShoreD.

A importância deste ensaio se deve ao atrito existente entre as sedes da válvula que são fabricadas em PTFE e o revestimento ECTFE. O revestimento deve possuir dureza superior as das sedes, pois no caso de substituição de componentes é sempre preferível substituí-las.



Figura 33: Ensaio de descontinuidade no revestimento (método *Holiday Detector* via úmida).



Figura 34: Medição de dureza do revestimento.

4.2.4. Usinagem Após Revestimento Conforme Dimensões de Projeto

Após o revestimento das peças e sua aprovação nos testes de controle de qualidade, as peças foram novamente usinadas de modo à retirar o material do revestimento excedente para atendimento da dimensão final de projeto conforme Figura 7. A Figura 35 apresenta a etapa de usinagem final das peças e o controle dimensional rigoroso executado na fase de fabricação (com a utilização de micrômetro, paquímetro e máquina de medição por coordenadas). Após aprovação de todos os componentes, as peças foram liberadas para montagem das válvulas.

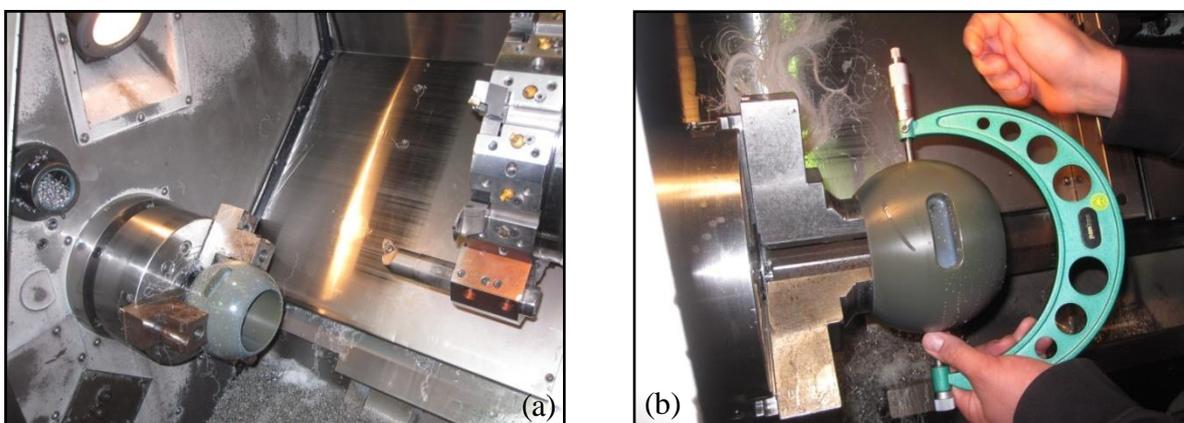


Figura 35: Usinagem final do revestimento para adequação das peças às dimensões de projeto (componente esfera): a) processo de usinagem, b) controle dimensional.

4.2.5. Montagem e Testes Iniciais dos Protótipos

A montagem da válvula revestida segue a mesma sequência de montagem de uma válvula convencional, porém deve-se dedicar uma atenção especial na movimentação dos componentes, pois batidas podem danificar o revestimento, comprometendo a proteção das peças. A sequência de montagem dos protótipos é ilustrada na Figura 36 e descrita a seguir: Coloca-se na haste (4) uma arruela de bronze (6) e a haste (4) no interior do corpo (1). Coloca-se as gaxetas (6) na parte superior da haste (4), insere-se a preme-gaxeta (9) e a porca (10) na haste (4). Insere-se sede (5) e junta (7) no corpo (1), a esfera (3) no corpo (1) e aperta-se a porca (10). Insere-se também a junta (7) na tampa (2), rosquea-se nas tampas (2) os prisioneiros (11), une-se a tampa e o corpo (1) e aperta-se as porcas (12). Ao final, coloca-se o suporte (13) na haste (4) e fixa-se os prisioneiros (14).

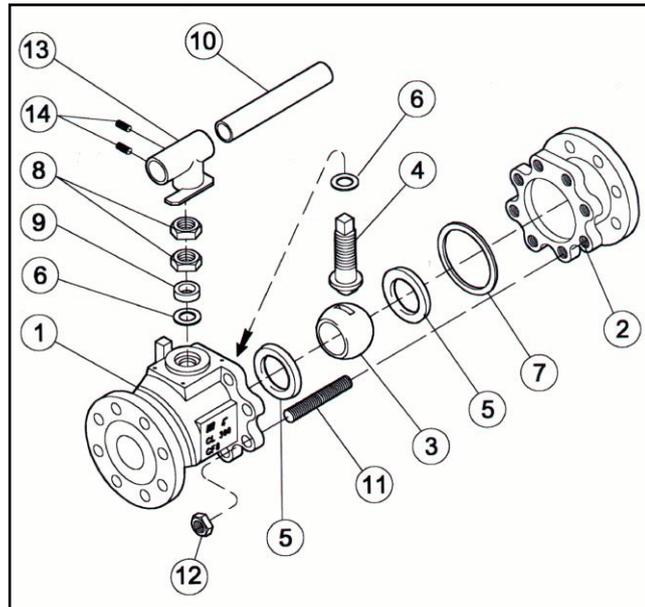


Figura 36: Sequência de montagem sugerida para uma válvula esfera flutuante.

A etapa parcial de montagem dos protótipos pode ser visualizada na Figura 37, onde pode-se notar que todos seus componentes estão revestidos. Para comprovação inicial de que a válvula atende os requisitos de vedação, foram executados testes de pressão conforme os critérios estabelecidos nas normas (API 6D, 2008) e (ASME B16.34, 2009), além de testes funcionais para análise do funcionamento da válvula. Os testes seguiram as condições descritas na Tabela 13.

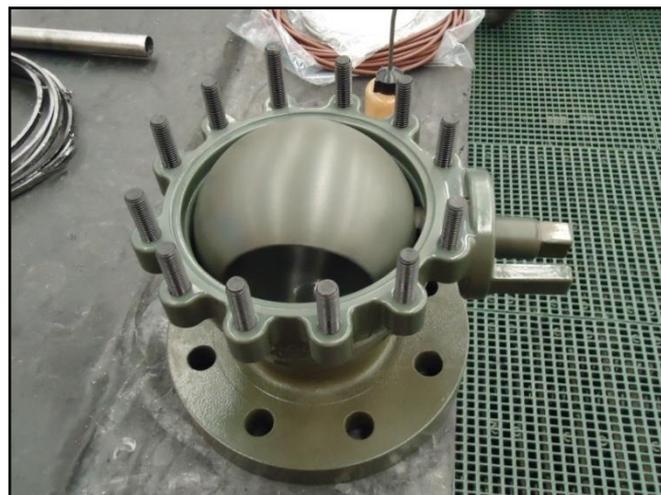


Figura 37: Demonstração da montagem dos protótipos.

Tabela 13: Critérios de testes de vedação para válvula esfera Ø4” CL300.

Teste	Pressão (bar)	Duração (min)
Hidrostático do Corpo	77	2
Hidrostático da Sede	56,5	
Pneumático da Sede	6	
Alívio de Cavidade	Aliviar com no máximo 1,33 vezes a PMT	
Torque de acionamento	Levantamento de curva de torque de acionamento	

O teste hidrostático do corpo tem por objetivo a detecção de possíveis defeitos de fabricação nos componentes da válvula, verificação da vedação de união corpo e tampa e engaxetamento da válvula. O teste hidrostático e pneumático da sede tem por objetivo verificar a vedação entre a sede e a esfera. Para a aprovação das válvulas, nenhum vazamento visível deve ser observado durante o período dos testes.

Após a montagem dos protótipos os mesmos foram submetidos aos testes iniciais de vedação, conforme Tabela 13. A Figura 38 apresenta um protótipo fixado em uma bancada específica para testes de pressão em válvulas sendo executados os testes hidrostáticos e pneumáticos. Foi também realizado um levantamento do torque de acionamento da válvula utilizando-se um torquímetro, marca Gedore, capacidade de 300N.m.



Figura 38: Bancada de testes de pressão: a) Fixação da válvula na bancada, b) Monitoramento da pressão hidrostática e pneumática.

4.2.6. Ensaios de Desempenho e Validação dos Protótipos

Os ensaios de desempenho e validação dos protótipos foram baseados na norma (NBR 15827, 2013) – Válvulas industriais para instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo – Requisitos de projeto e ensaios de protótipo (número de ciclos). Esta norma prevê vários testes que um projeto de válvula convencional deve ser submetido para garantia de seu desempenho e confiabilidade. Para a análise do projeto de válvula revestida, foram utilizados os requisitos de ciclagem e ensaios de vedações apresentados na Tabela 14.

Analisando a Tabela 14, pode-se observar que para uma válvula de Ø4” o número mínimo de protótipos a serem ensaiados é de 2 sendo que o somatório de ciclos deve ser de no mínimo 2000, não podendo um protótipo ser submetido a menos de 500 ciclos. A expectativa de número de acionamentos em 20 anos é de no mínimo 100 e no máximo 200. Os protótipos de válvulas revestidas atendendo a esses requisitos caracterizam uma confiabilidade de 98% em 10 anos de vida útil, sendo estimada uma vida útil de 20 anos.

Tabela 14: Requisitos de ciclagem para ensaios de válvulas conforme NBR 15827.

Diâmetro nominal DN (NPS)	Estimativa de uso para 20 anos		Ciclagem nos ensaios de protótipo			
	Número de ciclos		Quantidade de protótipos e número de ciclos			Confiabilidade (em 10 anos de vida útil)
	Mínimo	Máximo	Mínimo de protótipos	Ciclo mínimo por protótipo	Total de ciclos	
15 a 40 (½ a 1 ½)	500	5 000	5	1 000	10 000	98 %
50 a 150 (2 a 6)	100	200	2	500	2 000	98 %
200 a 300 (8 a 12)	50	100	1	250	1 000	98 %
350 a 600 (14 a 24)	50	100	1	250	500	95 %
> 600 (>24)	50	100	1	250	500	95 %

Fonte: Adaptado de NBR 15827 (2011)

Os ensaios de desempenho do produto final, após as etapas pré-determinadas foram executadas em uma bancada de teste específica, construída exclusivamente para ensaio de válvulas e validação de projetos. A Figura 39 apresenta o esquema de teste adotado para realização dos ensaios nos protótipos. A câmara para ensaios de desempenho tem capacidade para monitoramento de torque na frequência de 10 Hz com capacidade até 10000 N.m, pressurização até o limite de 153 bar e simulação de temperatura na faixa -30°C a +150°C.

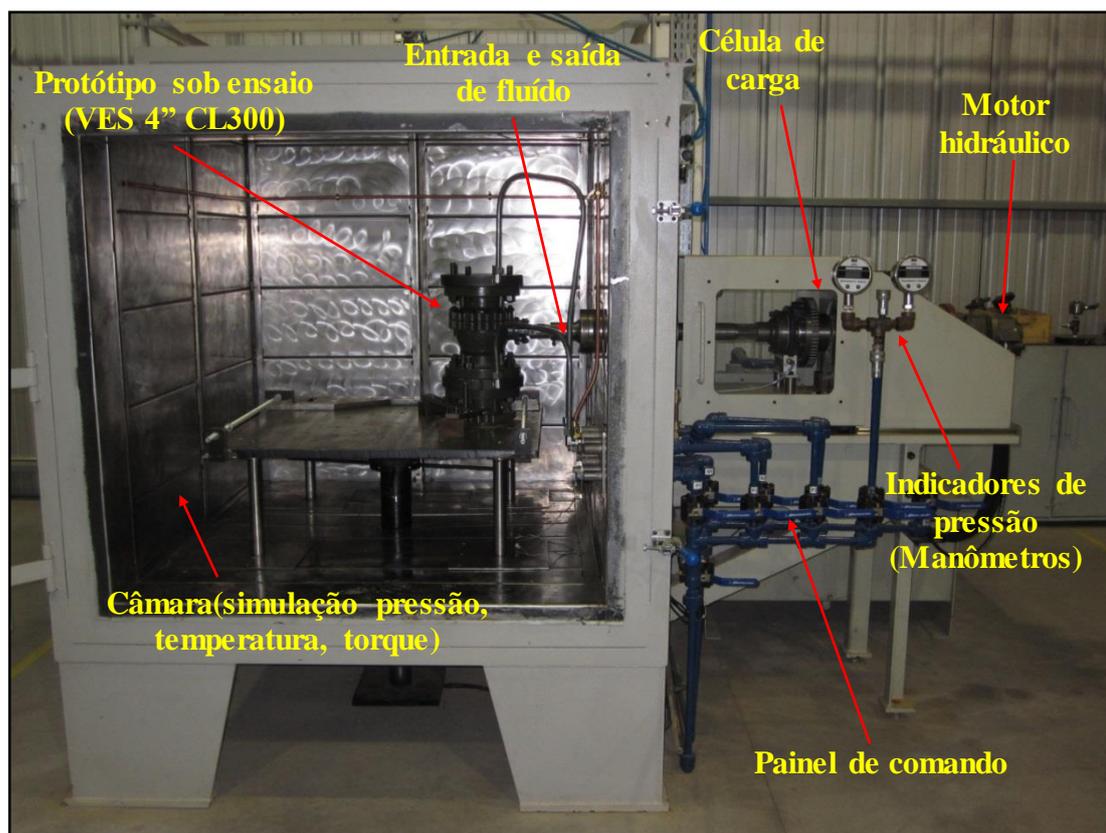


Figura 39: Bancada de ensaios de desempenhos de válvulas.

Todo o sistema é monitorado por um software específico, cuja vista está apresentada na Figura 40, e este aplicativo registra: número de ciclos da válvula, pressão de teste, posição da esfera, torque máximo de abertura e de fechamento, curva de torque da válvula durante o percurso de abertura e fechamento, temperatura na câmara de ensaios, temperatura do fluido, temperatura externa da válvula e velocidade de acionamento.

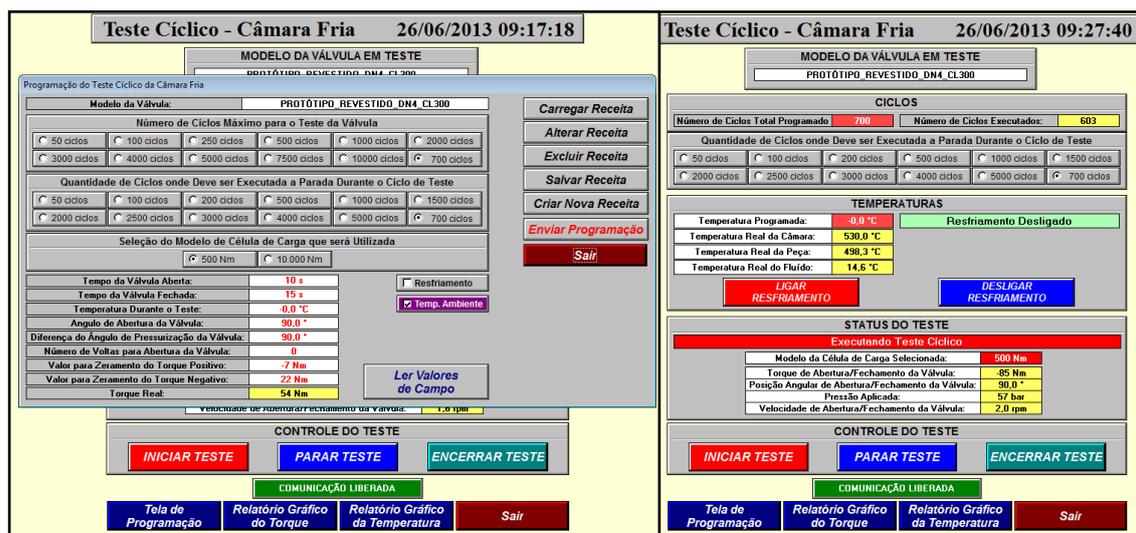


Figura 40: Software utilizado para monitoramento e regulagem dos parâmetros de ensaio.

A Tabela 15 apresenta os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios de desempenhos dos dois protótipos. Cada protótipo foi submetido a 1000 ciclos, com avaliações realizadas nos ciclos de número 200, 350, 500, 650, 800 e 1000.

Tabela 15: Parâmetros para execução dos ensaios de desempenho dos protótipos.

Parâmetro	Valor
Nº de protótipos ensaiados	2 protótipos
Fluido utilizado (teste pneumático)	Ar
Fluido utilizado (teste hidrostático)	Água
Temperatura de ensaio da câmara	Ambiente (25°C)
Temperatura de ensaio do fluido	Ambiente (25°C)
Velocidade de acionamento	Entre 1 e 1,5 RPM
Pressão de teste durante ciclagem (PMT)	51,1 bar
Tempo válvula aberta	10 segundos
Tempo válvula fechada	15 segundos

As análises de propriedades mecânicas, termogravimetria e dinâmico-mecânica apresentadas neste trabalho foram executadas no LAPOL – Laboratório de Polímeros da UFRGS. O desenvolvimento experimental, o preparo de corpos de provas, amostras e demais ensaios foram realizadas nas dependências da empresa Micromazza-PMP Indústria de Válvulas Ltda.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados relativos ao polímero adotado para o revestimento, ao processo de revestimento dos protótipos de válvulas, e aos resultados dos ensaios de desempenho e validação do projeto.

5.1. Caracterização do Polímero ECTFE

5.1.1. Propriedades Mecânicas

Os resultados dos ensaios de propriedades mecânicas em tração das combinações do polímero podem ser visualizados na Tabela 16 de forma numérica e na Figura 41 que apresenta os gráficos de tensão *vs* deformação.

Os ensaios foram executados de forma separada e na combinação da aplicação real afim de verificar o comportamento das resinas no esquema de revestimento.

Através da análise da Tabela 16 e Figura 41, pode ser verificado que as propriedades mecânicas do polímero de acabamento (Halar 6014) são superiores ao do polímero de fundo (Halar 6614), a combinação de ambos faz os resultados ficarem próximos aos valores do polímero de fundo, em contra partida a tensão de escoamento das três combinações ficaram com valores muito próximo (≈ 32 MPa) e desvio padrão baixo (não maior que 2 MPa), comprovando o atendimento as as características de resistência ao escoamento demonstradas na Figura 12.a (32 MPa). O resultado da média dos módulos em tração dos três ensaios foi de 1616 MPa, podendo ser comparado ao informado na Figura 12.b (entre 1500 MPa e 2000 MPa).

Os resultados de resistência a ruptura dos ensaios são de grande importância para poder estimar os valores de resistência a adesão ao aço que a combinação dos polímeros oferece, podendo verificar que a resistência a ruptura nos três casos é superior a 31 MPa.

Tabela 16: Propriedades mecânicas dos grades de ECTFE avaliados.

ECTFE 6014	Carga no escoamento (N)	Tensão no escoamento (MPa)	Deformação no escoamento (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão máxima (MPa)
1	108,99	30,53	3,76	1491	37,95
2	92,36	33,94	3,89	1644	48,61
3	97,07	32,59	3,81	1641	49,50
4	98,57	33,31	3,86	1603	48,93
5	117,69	30,96	3,63	1394	46,03
6	97,68	34,15	4,3	1610	52,81
7	94,39	33,47	4,01	1590	45,83
8	105,98	28,24	2,24	1573	29,41
9	119,91	33,81	3,94	1609	43,12
Média	103,63	32,33	3,72	1573	44,69
Desvio Padrão	10,08	2,01	0,58	81	7,13
C.V.	10%	6%	16%	5%	16%

ECTFE 6614	Carga no escoamento (N)	Tensão no escoamento (MPa)	Deformação no escoamento (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão máxima (MPa)
1	80,11	31,74	3,40	1709	31,74
2	95,31	31,42	3,63	1655	31,42
3	80,67	31,62	3,27	1715	31,62
4	69,14	31,78	3,54	1633	31,78
5	68,57	33,29	3,40	1765	33,29
6	75,38	30,42	2,86	1687	30,42
7	85,36	29,64	2,87	1681	29,64
8	89,33	28,5	2,94	1620	28,5
9	88,57	31,52	3,38	1694	31,52
Média	81,38	31,10	3,25	1684	31,10
Desvio Padrão	9,20	1,40	0,29	44	1,40
C.V.	11%	4%	9%	3%	4%

ECTFE 6614+6014	Carga no escoamento (N)	Tensão no escoamento (MPa)	Deformação no escoamento (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão máxima (MPa)
1	117,15	32,16	3,97	1587	32,16
2	136,65	33,36	4,09	1602	33,36
3	161,38	32,48	3,79	1568	32,48
4	151,62	33,09	4,01	1583	33,09
5	127,65	33,03	3,90	1605	33,03
6	124	33,07	3,77	1597	33,07
7	120,99	33,63	3,90	1686	33,63
8	123,97	31,71	3,57	1559	31,71
9	120,37	32,52	3,94	1537	32,52
10	120,2	32,92	3,59	1593	32,92
Média	131,87	32,87	3,84	1592	32,87
Desvio Padrão	15,05	0,57	0,18	42	0,57
C.V.	11%	2%	5%	3%	2%

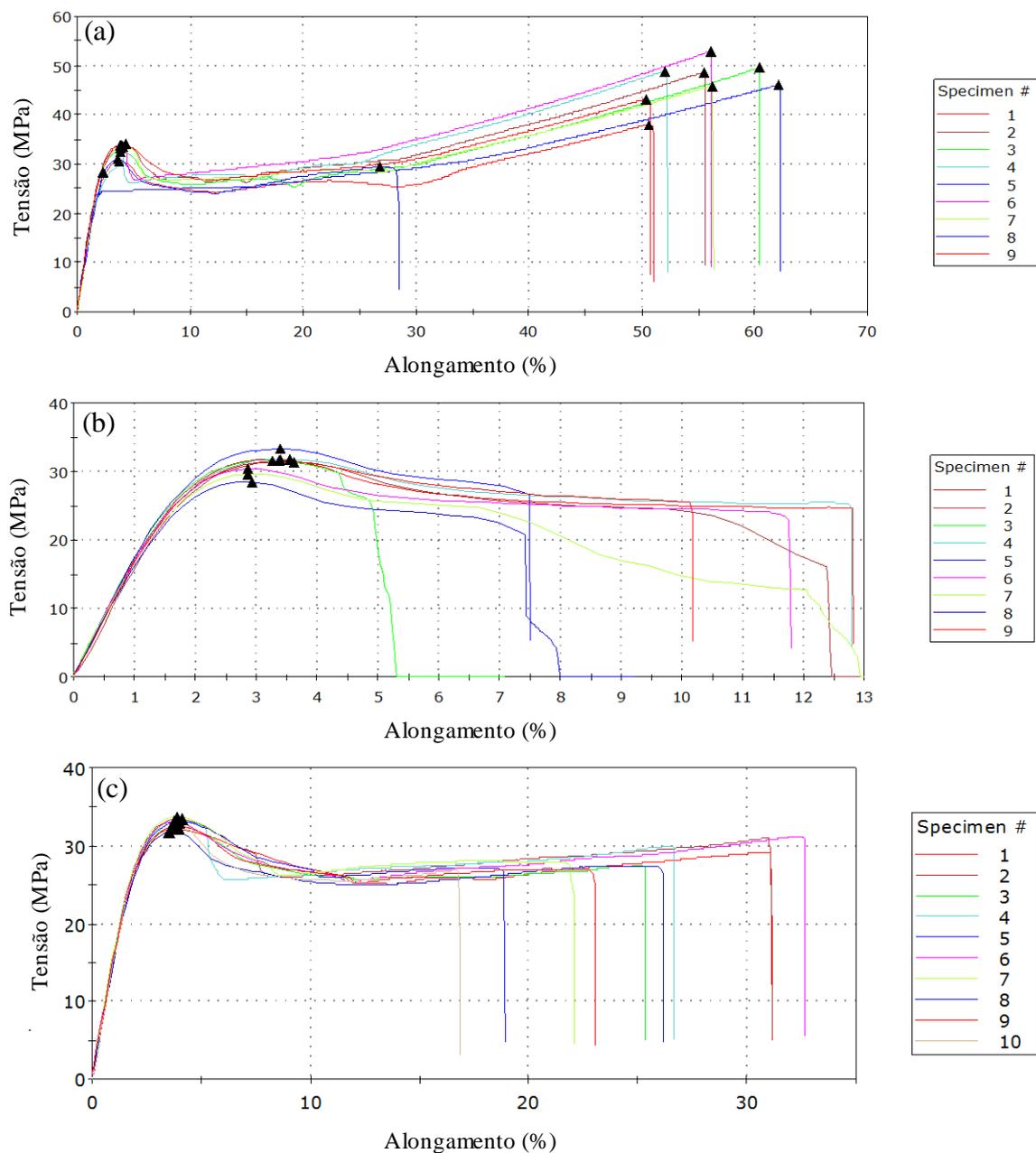


Figura 41: Gráficos de Tensão × Deformação: a) *Top Coat* - Halar 6014 – Acabamento, b) *Primer* - Halar 6614 – Fundo, c) Halar 6614+Halar 6014.

5.1.2. TGA - Análise Termogravimétrica

Os resultados da análise de TGA estão apresentados na Figura 42(a) para a resina de Fundo (Primer – Halar 6614) e na Figura 42(b) para a resina de acabamento (Top Coat – Halar 6014). Ao se analisar os gráficos, pode-se verificar que os polímeros apresentam um pico de degradação único e significativo nas temperaturas de 449 e 464 °C, respectivamente.

Também, vê-se que embora a Halar 6614 seja menos termicamente estável, apresenta um resíduo em torno de 32% a 850 °C, maior que o obtido com a 6014 ($\approx 17\%$).

Observa-se também que as resinas são termicamente estáveis até a temperatura aproximada de 340 °C e 370 °C para a Halar 6614 e Halar 6014, respectivamente, podendo ser perfeitamente aplicáveis em válvulas onde a temperatura máxima de trabalho é de 150 °C. Mesmo assim, limitações devido à PMT restringem a temperatura de uso até 120 °C.

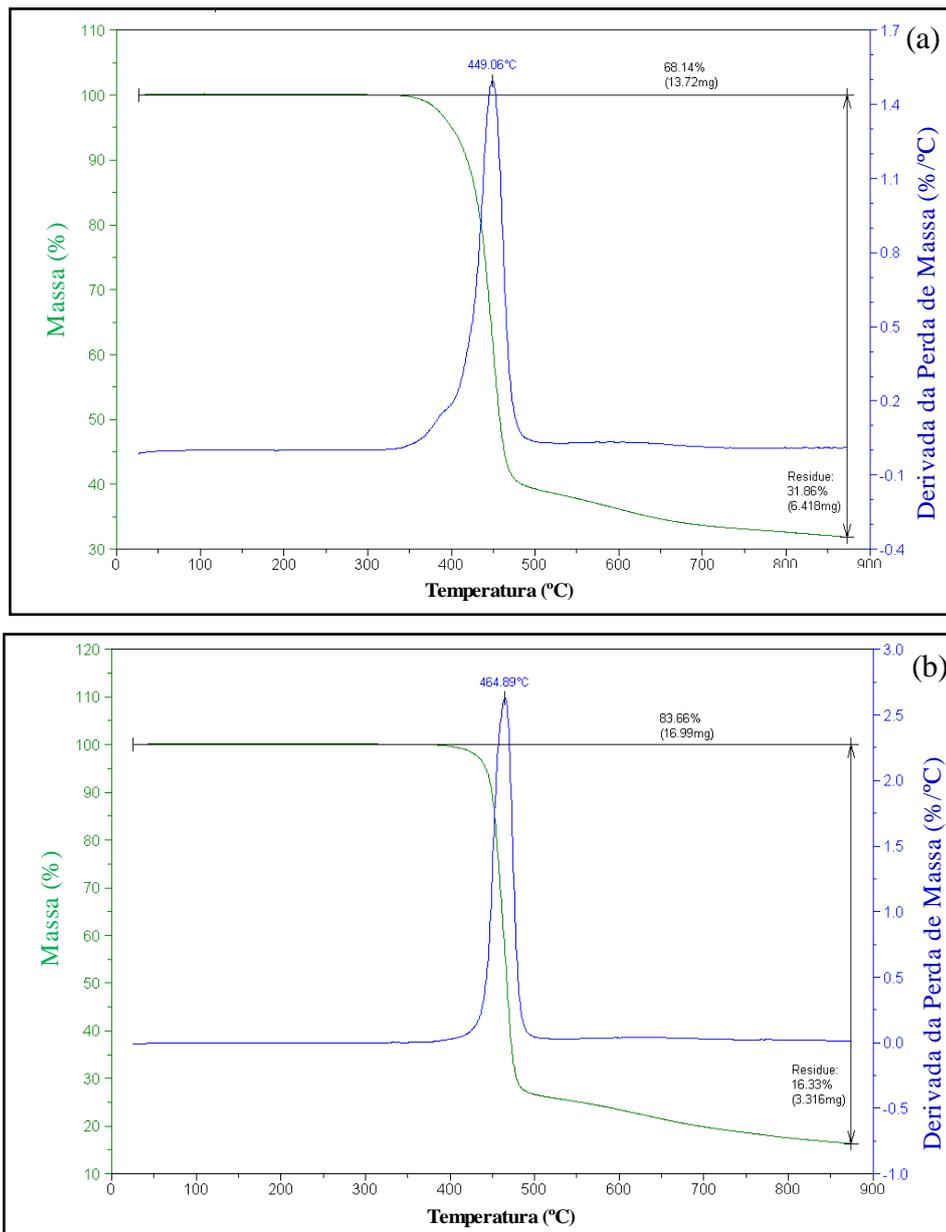


Figura 42: Análise de TGA a) *Primer* – Halar 6614 – Fundo, b) *Top Coat* – Halar 6014 – Acabamento.

5.1.3. DMA - Análise Dinâmico-Mecânica

Os resultados do ensaio de DMA do Halar 6014 + Halar 6614 são apresentados na Figura 43. Devido ao ECTFE ser um termoplástico, o ponto de maior interesse nesta curva é a T_g – Temperatura de transição vítrea do(s) polímero(s). A T_g para o ECTFE foi em torno de 79 °C (pela curva de módulo de perda) e 92 °C (pela curva de tan delta) o que pode ser comparado com os parâmetros informados na Tabela 10 ($T_g=85^\circ\text{C}$). Porém, vê-se claramente na curva de tan delta (e menos claramente na curva de módulo de perda) outro pico, na temperatura de 127 °C, o que indica que este material é um laminado, devido à combinação das camadas dos produtos.

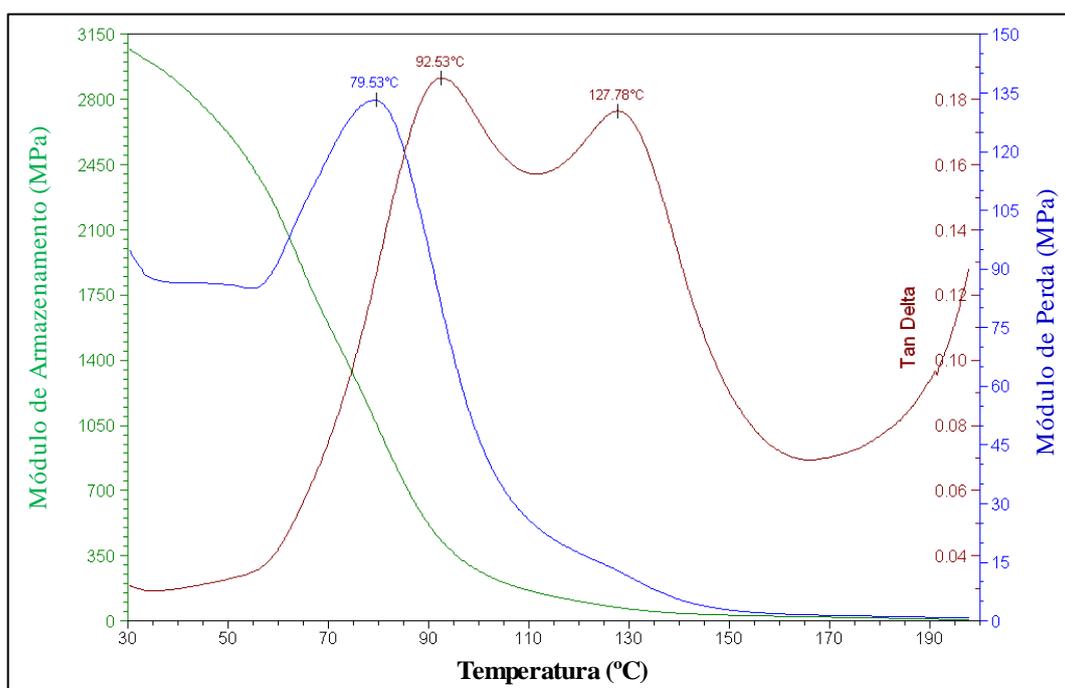


Figura 43: Gráfico da análise de DMA (Halar 6014 + Halar 6614).

Devido à aplicação do polímero como revestimento em interno de válvulas, a conservação do mesmo em estado rígido é muito importante, pois o movimento de atrito entre a esfera e a vedação pode acarretar em uma deformação no mesmo, comprometendo o sistema de vedação da válvula. Dessa forma, o projeto de uma válvula totalmente revestida, incluindo seus componentes internos, deve possuir restrições de temperatura de uso, podendo ser utilizado a T_g como parâmetro. O módulo de armazenamento (*Storage Modulus*), que é uma medida da rigidez do material, varia de $\approx 3,1\text{GPa}$ (à temperatura ambiente) até $\approx 1,0\text{GPa}$ (próximo à T_g), mostrando a influência da temperatura nas propriedades do polímero. Na

região de transição vítrea, o comportamento mecânico de polímeros amorfos varia de um comportamento típico de material rígido para o de um material elastomérico (CASSU, et al., 2005).

5.2. Controle de Qualidade do Processo de Revestimento

5.2.1. Contaminação Salina

O tipo (normalmente sais) e a quantidade de compostos solúveis em uma superfície a ser revestida podem interferir no desempenho do revestimento. Os ambientes mais críticos são os industriais, onde existe grande número de fábricas poluidoras que lançam na atmosfera gases como o SO_2 , e os próximos ao litoral onde há nevoa salina intensa. Certas especificações limitam o teor máximo de compostos solúveis que permanecem na superfície após o revestimento porque sua presença sob a película do revestimento compromete a proteção anticorrosiva. Materiais solúveis sob a película podem formar bolhas no revestimento por osmose em um ambiente úmido. Além disso, o material solúvel (eletrólito) acelera a corrosão eletroquímica (GNECCO, 2012).

Os resultados obtidos nos testes de contaminação salina da superfície são apresentados na Tabela 17. Os resultados foram satisfatórios considerando que nenhum deles ultrapassou o limite de $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, citado em 4.2.3.1 atendendo inclusive o Nível 2 da (NACE 5, 2002), sendo que para NV-2 a superfície deve ter menos de $7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ de cloretos.

Tabela 17: Resultado ensaio de contaminação salina.

Protótipo	Peça	Encontrado ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
1	Corpo	0,5
	Tampa	0,7
	Esfera	1,1
	Haste	0,7
2	Corpo	0,3
	Tampa	0,9
	Esfera	1,2
	Haste	1,0

O fato de nenhuma peça apresentar teor de sais acima do permissível se deve à boa limpeza executada na etapa de preparação de superfície, porém cabe observar que apenas o jateamento abrasivo e a descontaminação térmica não eliminam por completo todos os contaminantes solúveis da superfície. Segundo (GNECCO, 2012), a redução de cloretos depois do jateamento é de aproximadamente 1/3 da quantidade inicial. Por este motivo todas as peças foram banhadas com água limpa livre de cloretos como parte integrante do processo de preparação de superfície, garantindo assim que não fossem ultrapassados os limites de contaminação por cloretos da superfície.

5.2.2. Determinação de Perfil de Rugosidade

O perfil de rugosidade obtido nas peças dos protótipos ficou em média de 70 μ m, como mostra a Tabela 18. Os limites estabelecidos em 4.2.3.2, foram atendidos de forma satisfatória em função do método de medição adotado.

O perfil de rugosidade obtido está diretamente relacionado à escolha do tipo de granalha utilizada no processo de jateamento abrasivo, e ao programa de substituição da mesma de acordo com a quantidade de material jateado. Para este processo foi utilizada a granalha de aço angular classificada e conhecida comercialmente como G25. Esta granalha garante o perfil de rugosidade requerido, como demonstra a Tabela 18.

Tabela 18: Resultado ensaio de determinação do perfil de rugosidade

Protótipo	Peça	Encontrado (μ m)
1	Corpo	70
	Tampa	75
	Esfera	*
	Haste	68
2	Corpo	63
	Tampa	70
	Esfera	*
	Haste	72

*Avaliação impossibilitada, pois superfície curva da esfera não permite a realização do ensaio pelo método selecionado.

5.2.3. Verificação Visual do Preparo da Superfície

A Figura 44 apresenta o resultado da verificação visual do preparo da superfície das peças. O padrão de jateamento foi superior ao mínimo especificado em 4.2.3.3 em todos os componentes das válvulas, podendo ser comparado ao padrão Sa 3 da norma ISO 8501-1. Esta norma classifica os graus de preparação de superfície de acordo com o estado inicial de corrosão, baseado na presença ou não de carepa de laminação e corrosão. Porém neste caso as peças são obtidas pelo processo de microfusão, ou seja, não há carepa de laminação.

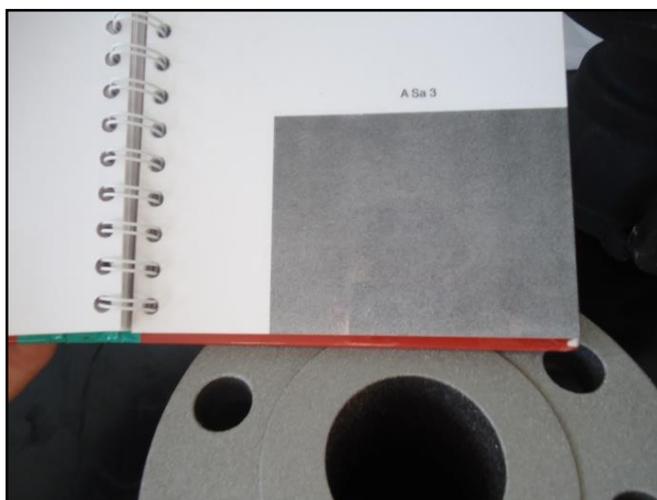


Figura 44: Verificação visual do preparo da superfície.

A aplicação do revestimento deve ser feita no menor prazo de tempo possível e enquanto a superfície jateada estiver atendendo ao padrão especificado. Com o passar do tempo, a superfície tende a oxidar, podendo haver a necessidade de novo jateamento, dependendo do padrão especificado. (N9, 2010). Por isso não é possível estabelecer um tempo máximo em que as peças podem ficar em espera até iniciar o processo de revestimento, pois as condições ambientais influenciam muito no processo de oxidação.

5.2.4. Ensaio de Contaminação por Pó

O ensaio de contaminação por pó é de fundamental importância pois o processo de jateamento abrasivo pode introduzir partículas de pó sobre a superfície que se não retiradas podem prejudicar a eficiência do revestimento, mesmo porque alguns ambientes industriais possuem elevado teor de partículas suspensas. A Figura 45, apresenta a fita para análise do

ensaio de contaminação por pó. É possível verificar que o resultado foi satisfatório podendo o ensaio ser classificado como grau 1, de acordo com a Figura 28.

Para o atendimento desse requisito foi necessário realizar um escovamento das peças após jateamento, sendo esta etapa também incorporada ao processo de preparação de superfície, garantindo assim que as peças estivessem livres de poeira. Segundo (N9, 2010) e (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), após o jateamento, a superfície deve ser limpa por meio de escova, aspirador de pó ou jato de ar seco, de forma a remover grãos de abrasivos e poeira. Após análise dos resultados as peças foram imediatamente revestidas.



Figura 45: Resultado ensaio contaminação por pó.

5.2.5. Verificação Visual do Revestimento

A Figura 46 demonstra um exemplo de revestimento das peças dos protótipos. Nenhum defeito foi verificado nas peças dos protótipos para testes, o que se deve ao cumprimento de todas as etapas do processo, ou seja, a preparação de superfície e a técnica de aplicação apropriada.

5.2.6. Ensaio de Aderência do Revestimento

Os resultados dos ensaios de aderência para o polímero ECTFE utilizado no revestimento são apresentados na Tabela 19. O ensaio de aderência pelo método *pull-off*, adotado conseguiu demonstrar o atendimento da aderência mínima especificada em 4.2.3.6 (15 MPa), porém devido à limitação do ensaio, não foi possível estabelecer um valor máximo para a aderência, pois o adesivo não conseguiu se fixar ao dispositivo de ensaio no revestimento até o arrancamento da película, apresentando falha D/Y antes de atingir o valor de aderência máxima do mesmo. Isto ocorreu porque o revestimento aplicado é antiaderente

com baixo coeficiente de atrito (Leivo, et al., 2003) e (METALCOATING, 2013), sendo esta característica um agravante para realização do ensaio de aderência pelo método *pull-off*.



Figura 46: Visual do corpo e tampa da válvula.

Tabela 19: Resultado ensaio de aderência.

Protótipo	Peça	Encontrado (MPa)	Falha
1	Corpo	18	Y
	Tampa	17	Y/Z
2	Corpo	16	D/Y
	Tampa	18	D/Y

5.2.7. Medição de Espessura Total do Revestimento e de Descontinuidade

A Tabela 20 apresenta as médias de espessura de película seca encontradas em cada componente. Para cada medição foram executados 12 pontos onde o menor e o maior são excluídos, assim o valor relatado corresponde à média dos 10 pontos restantes. Vê-se que a espessura final do revestimento atendeu ao mínimo especificado em 4.2.3.7 (600 μm) e que nenhum ponto ou região ficaram com espessura abaixo deste mínimo.

Após o processo de usinagem, as partes usinadas foram novamente ensaiadas, sendo que os resultados também estão apresentados na Tabela 20. Vê-se que estes valores são inferiores aos respectivos valores anteriores à usinagem, como esperado, mas ainda acima do mínimo especificado.

Tabela 20: Resultado medição de espessura do revestimento antes e após usinagem final.

Situação	Protótipo	Peça	Média (μm)
Antes da usinagem final	1	Corpo	950 ± 156
		Tampa	890 ± 198
		Esfera	1260 ± 201
		Haste	985 ± 214
	2	Corpo	1100 ± 174
		Tampa	1164 ± 163
		Esfera	1320 ± 155
		Haste	996 ± 185
Após a usinagem final	1	Corpo	785 ± 162
		Tampa	693 ± 143
		Esfera	850 ± 133
		Haste	786 ± 199
	2	Corpo	963 ± 205
		Tampa	951 ± 213
		Esfera	1052 ± 186
		Haste	856 ± 177

O ensaio de descontinuidade foi realizado em todas as peças dos dois protótipos produzidos, sendo que nenhuma delas apresentou defeitos.

5.2.8. Medição de Dureza do Revestimento

A medição de dureza do revestimento foi realizada em corpo de prova afim de não danificar a película de revestimento. O corpo de prova foi revestido juntamente com as peças dos protótipos e passou pelas mesmas etapas de preparação de superfície e aplicação do revestimento. Os resultados de dureza encontrados são apresentados na Tabela 21. Nota-se o atendimento aos requisitos citados em 4.2.3.9.

Após os ensaios de ciclagem foi realizado novamente o ensaio de dureza, porém nas próprias peças dos protótipos para verificar se a dureza havia sido alterada, não sendo observadas alterações significativas.

Tabela 21: Resultados de medição de dureza do revestimento antes e após ciclagem

Situação	Local	Peça	Dureza (ShoreD)
Antes da Ciclagem	Corpo de Prova	--	76
Após a Ciclagem	Componente (Partes Planas)	Esfera	75
		Haste	77

5.3. Testes Iniciais dos Protótipos

A aprovação dos protótipos nos testes iniciais (ver Tabela 13) foi realizada através de exame visual, sendo que nenhum vazamento visível pode ser detectado, como mostra a Figura 47. Estes testes iniciais de vedação são importantes para verificação do requisito de vedação da válvula. Caso a mesma não atendesse os testes, deveria-se proceder à desmontagem da válvula e análise do defeito que estava gerando o vazamento. Os testes de pressão hidrostática e pneumática são realizados em 100% das válvulas convencionais fabricadas, e as válvulas revestidas devem atender esses mesmos requisitos (PETROBRAS, 2012 - Rev.7).



Figura 47: Demonstração de ausência de vazamentos visíveis em ensaios de válvulas.

Além dos testes de vedação foram realizados testes funcionais dos protótipos para verificação das condições de acionamento. A Figura 48 apresenta um gráfico de torque de acionamento correlacionando à pressão aplicada nos protótipos. Esta curva foi levantada utilizando 5 pontos de testes, a saber, 0% da PMT (0 kgf/cm²), 25% da PMT (13 kgf/cm²),

50% da PMT (26kgf/cm²), 75 da PMT (39kgf/cm²) e 100% da PMT (52 kgf/cm²), sendo que em cada ponto foram realizadas 3 medições, e no gráfico são apresentadas as médias das medições em cada ponto.

Analisando a Figura 48 e a fornecida pelo fabricante de válvulas (VALMICRO, 2012) - Figura 49, pode ser verificado que os torques máximos das válvulas são praticamente equivalentes, 190 N.m para os protótipos revestido e 193 N.m para a válvula convencional, demonstrando que o revestimento não influenciou o torque de acionamento da válvula.

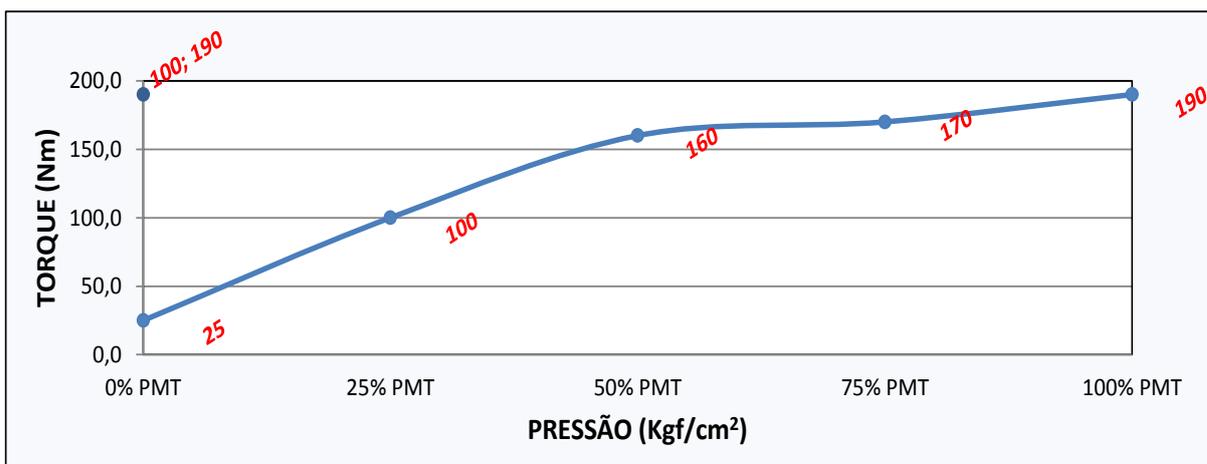


Figura 48: Gráfico da curva de torque de acionamento da Válvula Esfera 4'' CL300 revestida.

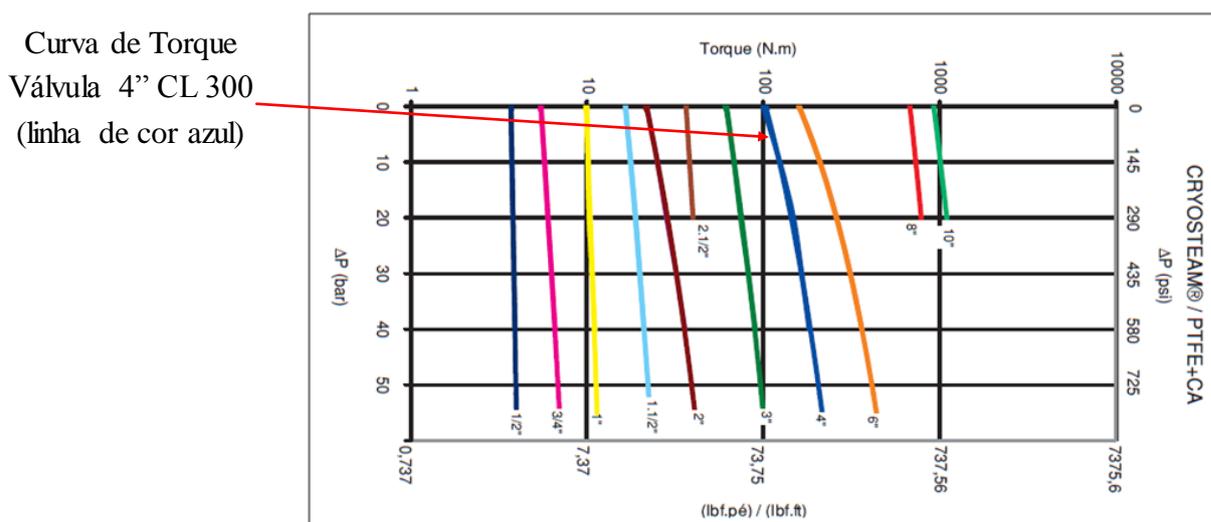


Figura 49: Gráfico torque de acionamento de válvulas diversas.

Fonte: VALMICRO (2012)

5.4. Ensaios de Desempenho e Validação dos Protótipos

A Figura 50 e a Figura 51 descrevem parcialmente os ciclos realizados nos protótipos. Os 1000 ciclos são comprovados pelo número de picos encontrados nos gráficos, porém o gráfico da Figura 50 representa os ciclos iniciais de 0 a 200, já o gráfico da Figura 51 representa os ciclos finais de 800 a 1000 ciclos. As linhas pretas representam a curva de torque da válvula e a linha verde a posição (aberta ou fechada). Nota-se que o torque real de operação ocorre com o diferencial máximo de pressão, ou seja, quando a válvula encontra-se pressurizada em um lado e sem pressão do outro. Esse fato pode ser observado nos picos de torque de cada ciclo. Cada pico positivo dos gráficos representa o início da abertura e cada pico negativo representa o início do fechamento da válvula.

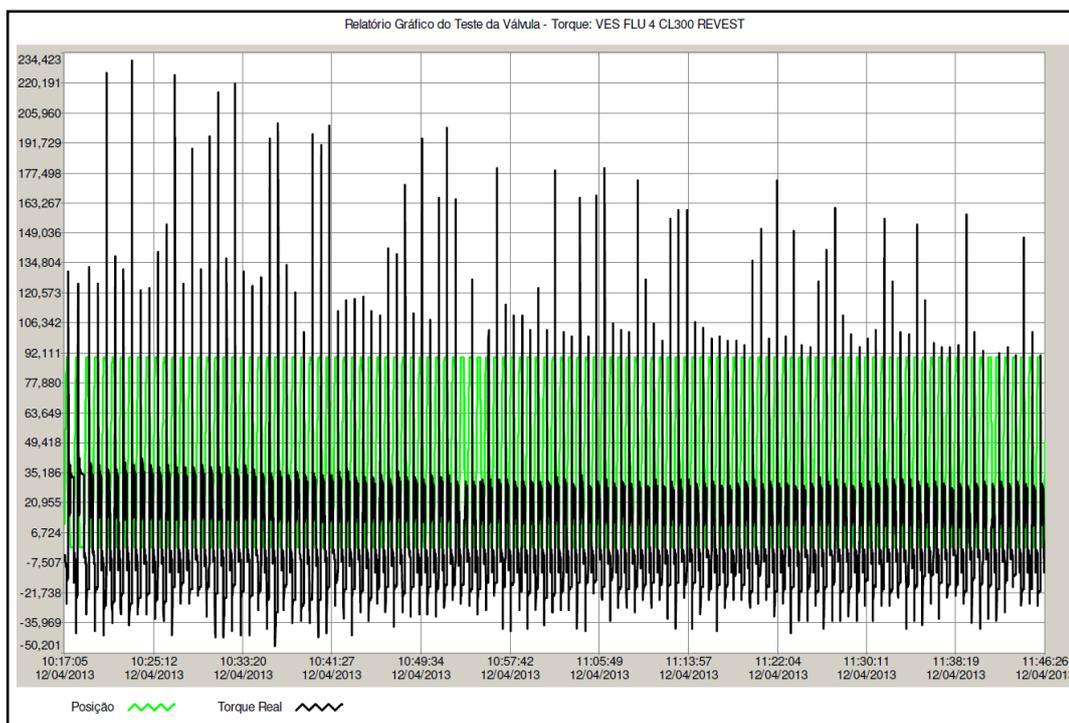


Figura 50: Ciclagem protótipo – 0 a 200 ciclos.

A Figura 52 e a Figura 53 apresentam os dados de pressão durante a realização dos testes. A tomada de pressão é feita na montante da válvula (extremidade pela qual o fluido entra na válvula). A PMT sempre ocorre quando que a válvula encontra-se na posição fechada.

Os gráficos de pressão apresentados representam os ciclos iniciais (0 a 200) e finais (800 a 1000). Para cada ciclo do ensaio a pressão oscila de 0% da PMT a 100% da PMT. A

variação de pressão é devido à abertura e fechamento da válvula no ciclo de acionamento. A PMT é atingida em função da estabilização da pressão devido aos parâmetros adotados conforme Tabela 15, ou seja, ao tempo em que a válvula permanece fechada. Durante a abertura e fechamento da válvula o fluido de teste circula de forma contínua através da mesma e das tubulações do sistema. O fluxo é gerado por um sistema de bombeamento hidráulico incorporado na bancada de ensaios de desempenho mostrada na Figura 39.

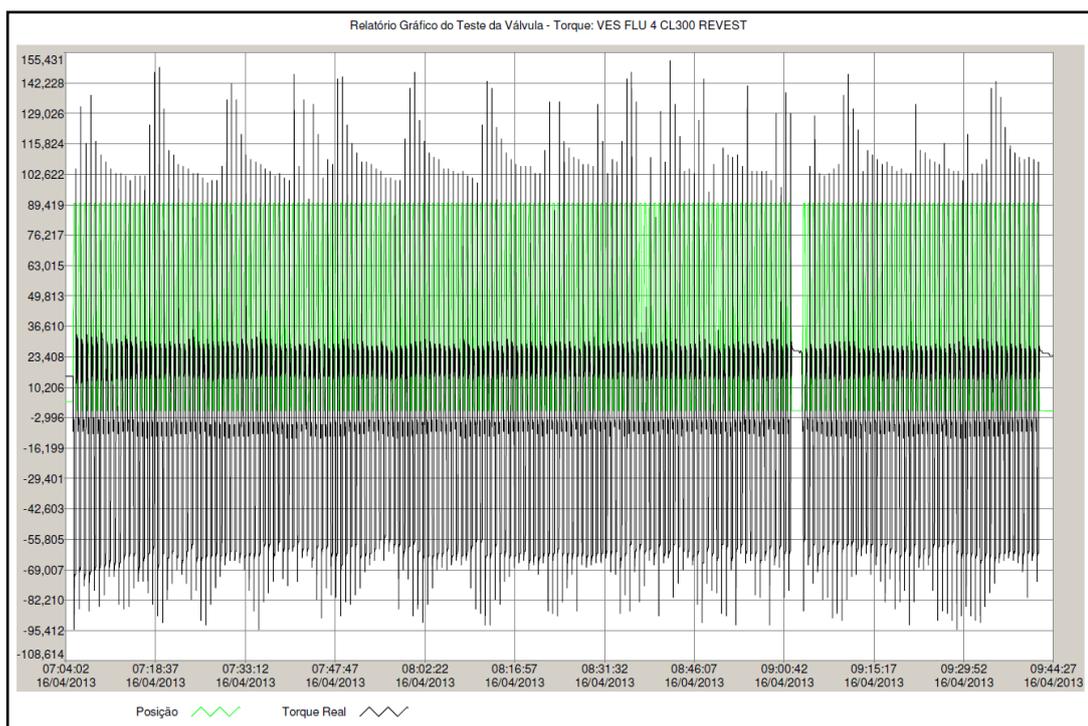


Figura 51: Ciclagem protótipo – 800 a 1000 ciclos.

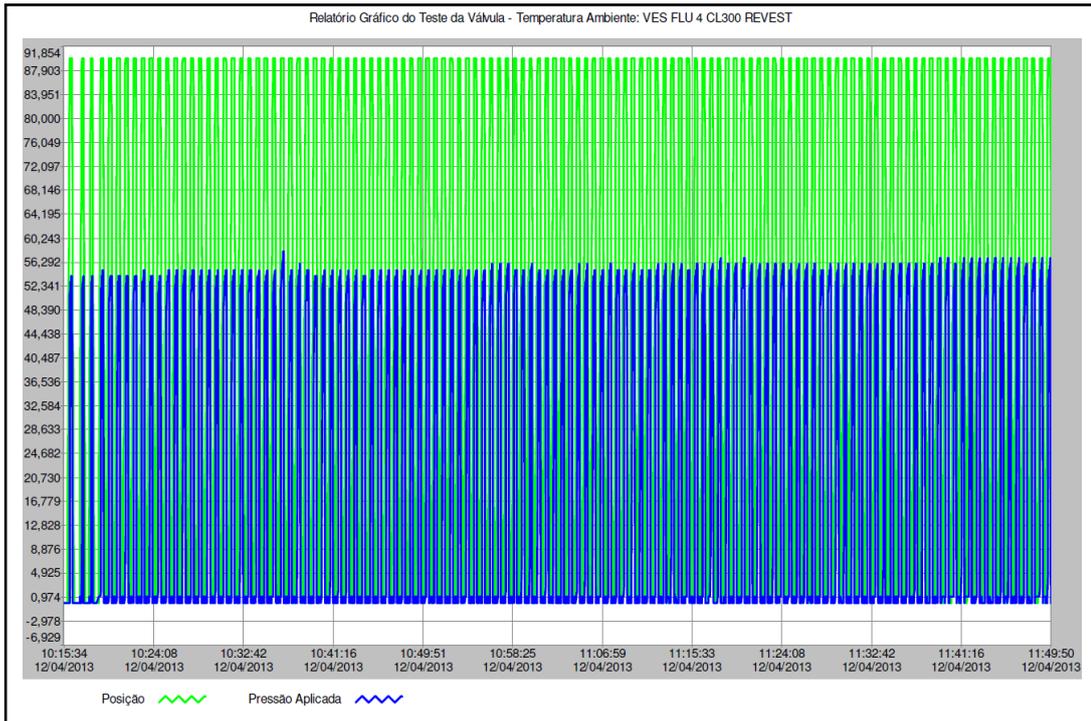


Figura 52: Pressão de teste durante ciclagem – 0 a 200 ciclos.

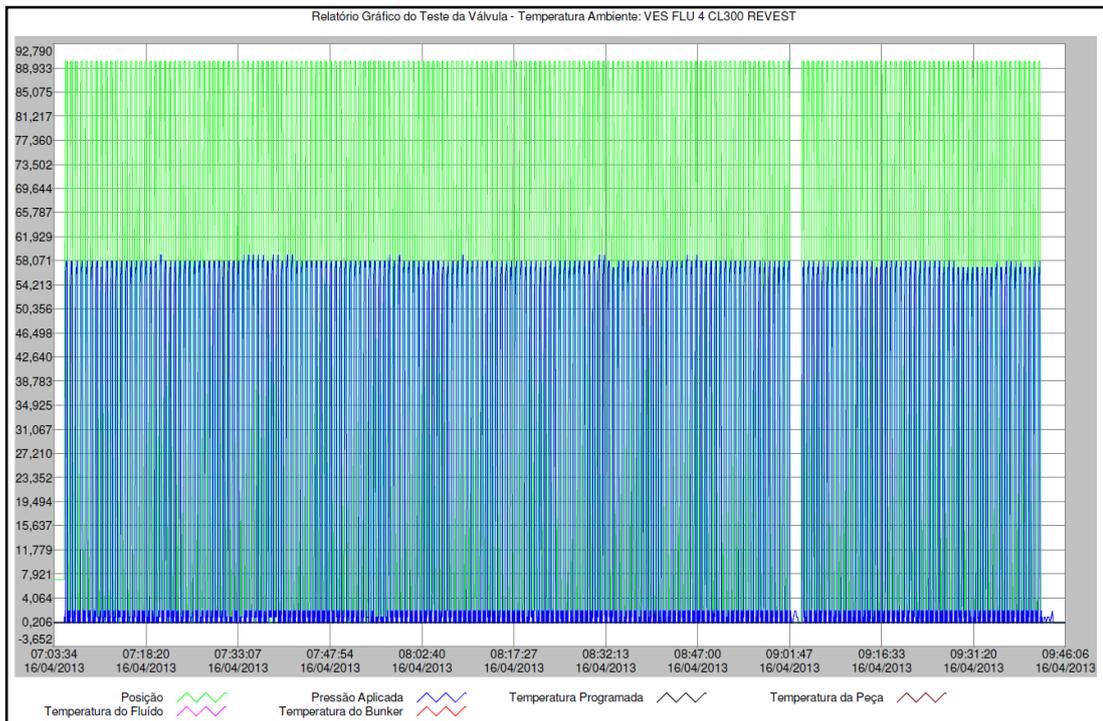


Figura 53: Pressão de teste durante ciclagem – 800 a 1000 ciclos.

As avaliações durante a ciclagem foram realizadas através de ensaios de vedação, para garantir que o revestimento não houvesse sido danificado, garantindo que a válvula ainda estivesse vedando nos ensaios hidrostáticos e pneumáticos. A Figura 54 apresenta os

resultados dos ensaios de vedação após 1000 ciclos. Para todos os protótipos e paradas para avaliação, os mesmos foram aprovados não sendo observados vazamentos visíveis.

A Figura 54 demonstra os tempos e as pressões aplicadas nas avaliações de vedação dos protótipos. Segundo (NBR 15827, 2013), a pressão média corresponde a 50% da PMT, a pressão alta a 110% da PMT e a pressão pneumática a 60-100 psi. Os parâmetros adotados para estas avaliações foram os mesmos dos ensaios iniciais, conforme a Tabela 13. Após 1000 ciclos e 7 avaliações de vedações em cada protótipo, foi realizada a sua desmontagem e todos os componentes foram submetidos a um criterioso ensaio visual.

A Figura 55 mostra os componentes revestidos após a realização dos 1000 ciclos sob PMT. Não foi verificado nenhum desgaste excessivo que comprometesse a qualidade e a segurança do produto. As regiões mais críticas como contato entre esfera e vedação, contato entre haste e gaxetas e encaixe esfera-haste permaneceram com a película de revestimento intacta, como pode ser observado na Figura 56. Foi observado apenas desgaste uniforme nas vedações e superfície de vedação da esfera e haste pelo atrito gerado durante a abertura e fechamento da válvula, porém não comprometendo sua vedação. Já nos componentes corpos e tampas não foi verificada nenhuma alteração, pois nessas regiões não há movimento e atrito entre componentes.

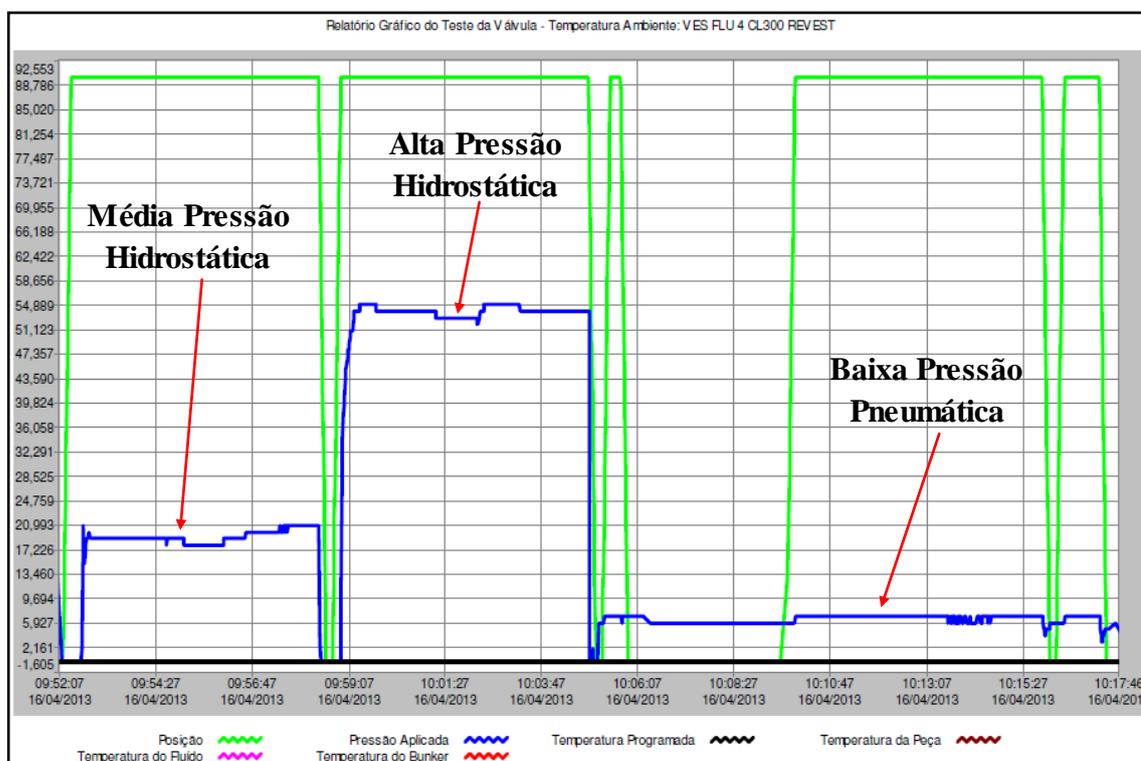


Figura 54: Gráfico de ensaio de vedação após 1000 ciclos.



Figura 55: Componentes revestidos após os 1000 ciclos.

Os resultados podem ser comparados com uma aplicação relatada por (MEDEIROS, et al., 2012), onde um vaso de reação (tanque cilíndrico com 2m de diâmetro e 3,5m de altura) foi recoberto com chapas de 2mm de Halar ECTFE. O tanque foi desenhado para passagem constante de fluxo alcalino (hidróxido de sódio e cloro) para produção de hipoclorito de sódio – com presença de cloro ativo – sob temperatura média de 50°C, e a instalação foi realizada em 1983, sendo que após 23 anos em serviço o polímero apresentava-se ainda em boas condições. O vaso foi substituído em 2007 por outro tanque também revestido com ECTFE.

Em cada avaliação, além dos ensaios de vedação, também foram realizadas avaliações do torque de acionamento da válvula. Estas avaliações são importantes, pois segundo (COSTA M. R., 2009), a variação na assinatura da corrente elétrica do motor de acionamento ou torque da haste também podem ser indicativo de degradação da válvula.

O torque de acionamento foi acompanhado separadamente dos ensaios de ciclagem, a cada parada para avaliação das vedações. A avaliação do torque não pode ser executada com os dados de ciclagem, pois a ciclagem é conduzida de forma acelerada, sendo que a abertura e fechamento da válvula para avaliação do torque devem ser conduzidos de forma lenta, já que vários fatores podem interferir nos dados de torque de acionamento tais como, folgas na bancada de teste e desgastes nos componentes da válvula e revestimento, pico de torque inicial gerado pela força inicial de acionamento, taxa de aquisição de dados do sistema.



Figura 56: Detalhe dos componentes das válvulas: Protótipo 1: a) Corpo, b) Tampa, c) Haste, d) Esfera; Protótipo 2: e) Haste, b) Esfera.

A Figura 57 e a Figura 58 apresentam as curvas de torque obtidas por célula de carga com os parâmetros de velocidade de acionamento reduzido. Comparando os torques máximos de abertura apresentado nestas figuras, foi observada uma pequena queda no torque de acionamento com o avanço dos ciclos da válvula. Essa queda é explicada pelo desgaste das

vedações e no próprio revestimento da esfera decorrente do número de acionamento das mesmas. A queda no torque de acionamento é considerada normal, não comprometendo o funcionamento da válvula, e sim demonstrando que o desgaste ocorre de maneira uniforme.

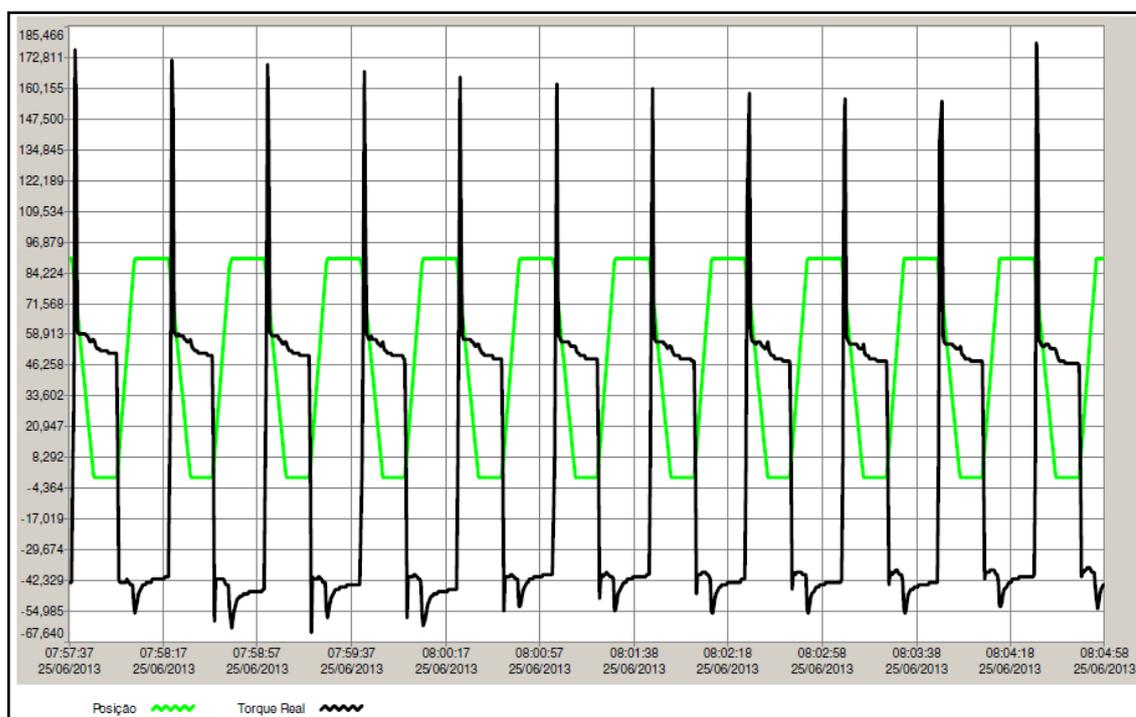


Figura 57: Gráfico de torque após a realização de 200 ciclos.

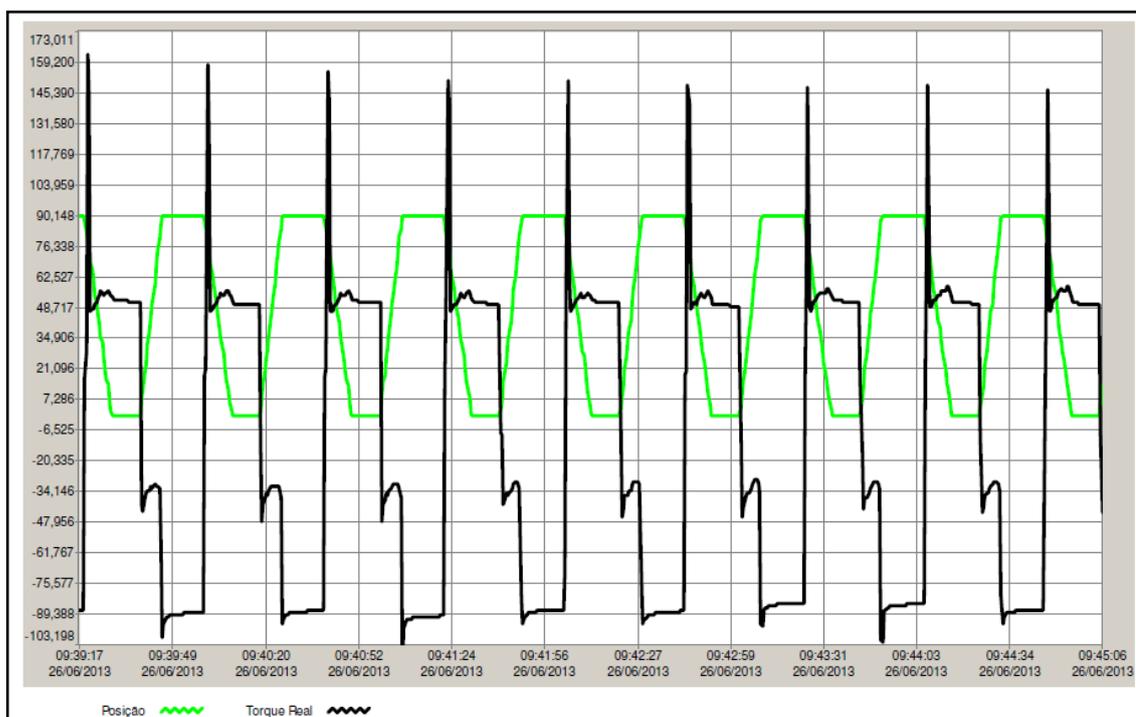


Figura 58: Gráfico de torque após a realização de 1000 ciclos.

6. CONCLUSÕES

Através dos ensaios de desempenho (ciclagem) das válvulas, o projeto da válvula esfera com todos os seus componentes internos revestidos foi validado conforme exigências normativas de execução do projeto, validação do projeto e aplicação do revestimento. Os 1000 ciclos estabelecidos para cada protótipo representam uma expectativa de vida da válvula em uso de 20 anos, e confiabilidade de 98% em 10 anos, utilizando os critérios mais rigorosos estabelecidos pela ABNT NBR 15827. Assim demonstrou-se também que o projeto desenvolvido, a seleção do polímero adotado (ECTFE) e o processo de aplicação do mesmo foram adequados.

O critério mais rigoroso foi adotado, representando características extremas de trabalho da válvula, ou seja, 1000 ciclos cada protótipo sendo que para uma estimativa de uso para 20 anos esta válvula será acionada no máximo 200 vezes. A análise de integridade do revestimento, realizada ao final dos ensaios nos componentes das válvulas, demonstrou que o funcionamento típico da mesma (ciclos de abertura e fechamento com a PMT) não afetou o polímero (ECTFE) adotado como revestimento, sendo o mesmo e o processo de aplicação validado para utilização em válvulas. Os ensaios de controle de qualidade executados no processo e a caracterização do material foram de fundamental importância para esclarecer os resultados obtidos, pois o projeto bem executado, o polímero adequadamente selecionado e o processo de aplicação e controles estabelecidos estão intimamente ligados.

A fim de garantir a integridade do revestimento de todos os componentes da válvula do tipo esfera, torna-se necessário restringir a temperatura de serviço devido ao atrito e ao movimento dos componentes internos, principalmente do componente esfera. Essa restrição se deve à performance do polímero, porém se houver apenas contato com o fluido, sem atritos e forças atuantes sobre o mesmo, este pode ser aplicado em temperaturas superiores, até 150 °C dependendo do fluido utilizado.

A utilização de válvulas esferas revestidas demonstrou-se uma alternativa viável e confiável em substituição a ligas metálicas nobres, sendo possível utilizar as mesmas em aplicações onde geralmente são especificados aços inoxidáveis duplex e super-duplex CDUMCUN, CD3MN ou até mesmo aços inoxidáveis austeníticos CF8, CF8M.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como base nos resultados obtidos, pode-se propor os seguintes estudos na linha de revestimento de válvulas e demais acessórios de tubulação:

- Realizar ensaios de ciclagem de válvulas esferas em diferentes temperaturas dentro da faixa de operação de sua classe específica.
- Realizar testes de revestimento de interno de uma válvula esfera montagem *trunnion* afim de verificar suas particularidades.
- Realizar testes de revestimento em outros tipos construtivos de válvulas (borboleta, globo etc.).
- Realizar testes modificando a espessura de película seca do revestimento afim de utilizar a menor camada possível sem comprometer o desempenho do produto e avaliar polímeros alternativos como revestimento.
- Realizar um estudo mais aprofundado da influência do revestimento no torque de acionamento e em sua curva em válvulas esferas com todos os internos revestidos.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 6D**. Specification for Pipeline Valves. Washington : API, 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 5L2**. Recommended Practice for Internal Coating of Line Pipe For Non-Corrosive Gas Transmission Service. Washington : API, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Corrosion. Metals Handbook. s.l. ;, 1992. Vol. 13.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B16.34**. Valves Flanged, Threaded, and Welding End. New York : ASME, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A216**. Standard Specification for Steel Castings, Carbon, Suitable for Fusion Welding, for High-Temperature Service. West Conshohocken : ASTM, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A217**. Standard Specification for Steel Castings, Martensitic Stainless and Alloy, for Pressure-Containing Parts, Suitable for High-Temperature Service. West Conshohocken : ASTM, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A351**. Standard Specification for Castings, Austenitic, for Pressure-Containing Parts. West Conshohocken : ASTM, 2013a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A995**. Standard Specification for Castings, Austenitic-Ferritic (Duplex) Stainless Steel, for Pressure-Containing. West Conshohocken : ASTM, 2012a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2240**. Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. Pennsylvania : astm, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4060**. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser. West Conshohocken : ASTM, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4417**. Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel. ASTM : West Conshohocken, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4541**. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. New York : ASTM, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638**. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. s.l. : ASTM, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1640**. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis. West Conshohocken : ASTM, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G8. 96 (2010)**. Standard Test Methods for Cathodic Disbonding of Pipeline Coatings. West Conshohocken : ASTM, 96 (2010).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10443**. Determinação da espessura de película seca sobre superfícies rugosas - Método de ensaio. Rio de Janeiro : ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11003**. Determinação de aderência. Rio de Janeiro : ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14847**. Inspeção de Serviços de Pintura em Superfícies Metálicas - Procedimento. Rio de Janeiro : ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15158**. Limpeza de superfícies de aço por compostos químicos. Rio de Janeiro : ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15239**. Tratamento de superfícies de aço com ferramentas manuais e mecânicas. Rio de Janeiro : ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15488**. Pintura Industrial - Superfície Metálica para aplicação de tinta - Determinação do perfil de rugosidade. Rio de Janeiro : ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15827**. Válvulas industriais para instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo - Requisitos de projeto e ensaio de protótipo. Rio de Janeiro : ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15877**. Ensaio de aderência por tração. Rio de Janeiro : ABNT, 2010.

APERAM. 2013. Duplex UNS 32304 - Aço Inoxidável Duplex. Belo Horizonte : APERAM, 2013. Catálogo Técnico.

BARBOSA, Luma Regina Rodrigues, et al. **INTERCORR**. Avaliação de revestimentos orgânicos anticorrosivos através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica. Salvador : ABRACO, 2012. INTERCORR 2012.

BARCIA, Fabio L., et al. **INTERCORR**. Revestimento com Polímero Cerâmico de alto desempenho na proteção interna de tanques e vasos para hidrocarbonetos. Salvador : INTERCORR, 2012.

- CASSU, Silvana Navarro e FELISBERTI, Maria Isabel. **Química Nova**. Comportamento Dinâmico-Mecânico e Relaxações em polímeros e Blendas Poliméricas. São Paulo ;, 2005. Artigo.
- CHARLES, Jacques e FARIA, Ricardo Augusto. **ABINOX**. Aços inoxidáveis duplex e aplicações em óleo e gás: uma revisão incluindo a nova oferta da arcelormittal. s.l. ;, 2008. Artigo.
- COATING, **Powder Institute**. Powder Coating Institute. www.powdercoating.org. [Online] The Powder Coating Institute, 2013. [Citado em: 29 de Outubro de 2013.] <http://www.powdercoating.org/11/Our-Industry/What-is-Powder-Coating>.
- COOLEY, David Charles. 1986. **Válvulas Industriais: teoria e prática**. Rio de Janeiro : Interciência, 1986.
- COSTA M. R., de Oliveira. 2009. **Estudo de Torque de acionamento e vida útil em um projeto de de válvulas industriais**. Porto Alegre : UFRGS, 2009. Dissertação de Mestrado.
- COSTA, EDUARDO. 2009. **Estudo da aplicação de materiais orgânicos em meios corrosivos do processamento primário do petróleo**. Porto Alegre : UFRGS, 2009. Dissertação de Mestrado.
- DEVILBISS. Equipamento Eletrostático para pintura a pó. São Paulo : DeVILBISS, 2013. Manual de Instruções.
- DR-ENGP-1. Piping material - Standardization (ET-200-3 Appendix 18). Rio de Janeiro : PETROBRAS, 2010. Especificação Técnica.
- EBNESAJJAD, S. 2003. **Fluoroplastics – Melt Processible Fluoropolymers**. Norwich : Plastics Design Library, 2003. Vol. 2.
- ET-940-PEN-006. Revestimento interno anticorrosivo para válvulas. s.l. : PETROBRAS, Rev. D - 2012. Especificação Técnica.
- FEDRIZZI, Lorenzo, DEFLORIAN, Flavio e BONORA, Pier Luigi. 1999. **Evaluation of the protective properties of organic coatings on copper pipes for refrigerator cooling circuit**. Trento : PERGAMON, 1999. Artigo.
- FURTADO, Paulo. 2010. **Pintura anticorrosiva dos metais**. Rio de Janeiro : LTC, 2010.
- GENTIL, Vicente. 2008. **Corrosão**. Rio de Janeiro : LTC, 2008.
- GNECCO, Celso. **Compostos solúveis em superfícies a serem pintadas**. Rio de Janeiro : ABRACO, 2012. Revista. Artigo.
- H.I. Rowan. 1988. **Thermoplastic fluoropolymers of engineering plastics**: Engineered Materials Handbook. s.l. : ASM International, 1988.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4624**. Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion. s.l : ISO, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8501-1**. Preparatio of steel substrates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness. Switzerland : ISO, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8502-3**. Preparation of steel substrates before application of paint and related products - Test for the assessment of surface cleanliness - Part3 - Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (pressure-sensitive tape method). s.l : ISO, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8503-5**. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates – Part 5: Replica tape method for the determination of the surface profile. Switzerland : ISO, 2003.

KERMANI, M.B e HARROP, Don. **Society of Petroleum Engineers**. The Impact of Corrosion on the Oil and Gas Industry. Bahrain ;, 1996.

KMW. **KMW Equipamentos de Pintura Ltda**. www.kmwrs.com.br. [Online] 2013. [Citado em: 29 de Outubro de 2013.] <http://www.kmwrs.com.br>.

KOEBSCH, André, et al. 2012. Revestimento anticorrosivo de válvulas: A sua importância e a dinâmica da análise do seu desempenho. **INTERCORR**. Salvador : ABRACO, 2012. INTERCORR2012_377.

KOEBSCH, André, NUNES, Erik Barbosa e ALMEIDA, Fabrizio Cruz de. 2010. Revestimento orgânico interno de válvula esfera: Caso prático. **INTERCORR**. ABRACO. Fortaleza-CE : 2010.

KOEBSCH, André, NUNES, Erik Barbosa e CAVAL, Gilson. 2011. Polyamide 11 as a external and internal anticorrosive coating. **IBP - Rio Pipeline**. Rio de Janeiro : 2011.

Leivo, E., et al. 2003. Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF,ECTFE, PFA and FEP coatings. **ELSEVIER**. Finland : 2003. Artigo.

MAGGI, G. e MARRERO, L. 2009. **Managing Corrosion With ECTFE Coatings**. Bollate : Solvay Solexis, 2009. Relatório Técnico.

MATHIAS, Artur Cardozo. 2008. **Válvulas: Industriais, segurança, controle: tipos, seleção, dimensionamento**. São Paulo : Artliber, 2008.

MEDEIROS, Felipe A. e GAMA, Gilson C. 2011. Revestimento Interno de válvulas utilizando o fluoropolímero ECTFE. **Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**. s.l : **11ª COTEQ**, 2011.

MEDEIROS, Felipe A., et al. 2012. Seleção de Liners de Fluorpolímeros em Aplicações de Proteção à Corrosão para a Indústria Química e Petroquímica. **ABRACO**. Salvador : INTERCORR, 2012.

METALCOATING. Revestimentos Anticorrosivos. São Paulo : METALCOATING Revestimentos, 2013. Catálogo Técnico.

MNA. Válvulas Esfera - Catálogo Técnico. São Paulo : Lupatech, 2012. Catálogo Técnico.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N13**. Requisitos Técnicos para Serviços de Pintura. Rio de Janeiro : PETROBRAS, Rev. K - 2012.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N-2137**. Determinação de Descontinuidade em Películas secas de tintas. Rio de Janeiro : PETROBRAS, 2007.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N9**. Tratamento de Superfície de aço com Jato Abrasivo e Hidrojateamento. Rio de Janeiro : PETROBRAS, 2010.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE 5**. Surface Preparation and Cleaning of Metals by Waterjetting Prior to Recoating. SSPC-SP 12. Pittsburgh : NACE, 2002.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE 6G**. Thermal Pre-heating. SSPC-SP-TR1. Thermal Pre-heating : NACE, 1994.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE SP0178**. Design, Fabrication, and Surface Finish Practices for Tanks and Vessels to Be Lined for Immersion Service. Texas : NACE, 2007.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE SP0188**. Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates. Texas : NACE INTERNATIONAL, 2006.

NETO, Francisco Francelino Ramos, et al. 2003. Desgaste Abrasivo de materiais poliméricos utilizados na proteção de linhas flexíveis de condução de petróleo. **13º POSMEC - FEMEC**. Uberlândia : 2003.

NUNES, Laerce de Paula. 2007. **Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva**. 3ª Edição. Rio de Janeiro : Interciência: Petrobras, 2007.

Pardal, J. M, et al. 2013. Uma Revisão da Resistência à Corrosão em Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex. Niterói: **RVQ - Revista de Química Virtual**, 2013. Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica.

PETROBRAS / ABIMAQ. Encontro com fabricante de válvulas. São Paulo : Petrobras, 2013. Apresentação.

PETROBRAS. Requisito de Inspeção N°0009 - Padrão de Válvulas de Bloqueio. Rio de Janeiro : PETROBRAS, 2012 - Rev.7. Requisito Técnico.

POLONI, Cristiano, NUNES, Erik Barbosa e GONÇALVES, Fernanda Mota. Revestimento Interno de Tubos. Salvador : **INTERCORR**, 2012.

POLONIO, W.L. Aplicação de Revestimento anticorrosivo em vasos de pressão em sistemas de vácuo no processo de fabricação de açúcar e álcool. Bauru : **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, 2003.

PORTILHO, Bruna, et al. Qualificação de Revestimento Externo de Dutos em FBE High Temp. **INTERCORR**: Salvador, 2012.

QUINTELA, J.P. 2006. Reabilitação de Dutos Corroídos com Revestimento Interno - Solução ou Problema. **COTEQ165**. 2006.

QUINTELA, Joaquim P. e SOLYMOSSY, Victor. Materiais para revestimento de tubulações para instalação de produção e processo. Rio de Janeiro : PETROBRAS - CENPS, 2010. Relatório Técnico.

SAMIMI, Amir e ZARINABADI, Soroush. 2011. An Analysis of Polyethylene Coating Corrosion in Oil and Gas Pipelines. s.l. **American Science**, 2011.

SENATORE, Marcelo, FINZETTO, Leandro e PEREA, Eduardo. 2007. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **SciELO - Revista Escola de Minas**. Ouro Preto MG - Brazil, 2007.

SILVA, Osmar José Leite da. 2008. **Válvulas Industriais**. Rio de Janeiro : Qualitymark:Petrobras, 2008.

Simone, S., et al. Preparation and characterization of ECTFE solvent resistant membranes and their application in pervaporation of toluene/water mixtures. **ELSEVIER**. Saudi Arabia : 2012. Artigo.

SKOUSEN, Philip L. 2004. **Valve Handbook**. New York : McGraw-Hill, 2004.

SOLVAY SOLEXIS. Ethylene-Chlorotrifluoroethylene - Design and Processing Guide. Milano : SOLVAY SOLEXIS, 2006. Especificação Técnica.

—. Halar® ECTFE - Processing Guide - Electrostatic Powder Coating. Milano : SOLVAY SOLEXIS, 2009. Manual.

—. Halar® ECTFE chemical resistance chart. Bollate : SOLVAY SOLEXIS, 2010. Technical Information.

—. Revestimento por pintura Eletrostática Halar®ECTFE. Milano : SOLVAY SOLEXIS, 2011. Apresentação.

VALMICRO. Válvulas Esferas Flangeadas CL 150/300. Veranópolis : VALMICRO, 2012. Catálogo técnico.