



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM

JOÃO HENRIQUE CAVALCANTI DE FRANÇA

***LAPIDAÇÃO MECANIZADA E MANUAL DAS FACES DE SELOS
MECÂNICOS APLICADOS EM BOMBAS DE TRANSFERÊNCIA DE GÁS
LIQUEFEITO DE PETRÓLEO***

Recife
2017

JOAO HENRIQUE CAVALCANTI DE FRANÇA

***LAPIDAÇÃO MECANIZADA E MANUAL DAS FACES DE SELOS
MECÂNICOS APLICADOS EM BOMBAS DE TRANSFERÊNCIA DE GÁS
LIQUEFEITO DE PETRÓLEO***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Recife
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F8141 França, João Henrique Cavalcanti de.
Lapidação mecanizada e manual das faces de selos mecânicos aplicados em bombas de transferência de gás liquefeito de petróleo / João Henrique Cavalcanti de França. - 2017.
89 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Selos mecânicos. 3. Faces de vedação. 4. Lapidação. 5. Planeza. 6. Rugosidade. I. Rolim, Tiago Leite. (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-324

30 de agosto de 2017

“LAPIDAÇÃO MECANIZADA E MANUAL DAS FACES DE SELOS MECÂNICOS
APLICADOS EM BOMBAS DE TRANSFERÊNCIA DE GÁS LIQUEFEITO DE
PETRÓLEO”

JOÃO HENRIQUE CAVALCANTI DE FRANÇA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ MARIA ANDRADE BARBOSA (UFPE)

Prof. Dr. ADALBERTO NUNES DE SIQUEIRA (FACULDADE ESTÁCIO DO
RECIFE)

*Dedico este trabalho
à minha mãe Juvanita e à minha esposa Sandra,
que sempre me incentivaram a continuar estudando,
sem elas eu não teria chegado até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado, dando-me saúde, força, paciência e determinação, possibilitando o alcance de mais este projeto em minha vida.

Ao professor doutor Tiago Leite Rolim, pela sua brilhante orientação neste trabalho, pelos ensinamentos, pelo seu entusiasmo, companheirismo, dedicação e paciência, principalmente na realização das medições no Laboratório de Medição por Coordenadas.

À minha família, em especial à minha irmã Simone e minha sobrinha Jhéssica, que sempre me incentivaram e torcem por mim.

Ao mecânico especializado Germano, pela ajuda e ensinamentos na lapidação manual, sendo peça fundamental para o alcance dos resultados obtidos.

Ao proprietário Ulisses e aos funcionários Alexandre, Bruno, Felipe e Wagner, da empresa Só Vedações, pela colaboração na lapidação mecanizada, pelas informações e materiais compartilhados e por me receber sempre de portas abertas.

Aos colegas da Transpetro e Petrobras, que de forma direta ou indireta me ajudaram a realizar este trabalho.

À técnica Janaína, do Laboratório de Microscopia e Análise Macro Estrutural do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, pelas análises microscópicas.

Aos professores, colegas e funcionários da secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, pela ajuda, orientação e apoio constantes.

RESUMO

O selo mecânico é o principal elemento de vedação de uma máquina ou equipamento, pois evita que vazamentos indesejados ocorram e possam causar acidentes e prejuízos. As faces de vedação estáticas e dinâmicas são responsáveis por esta função, impedindo que o fluido confinado escape para o meio externo, principalmente quando o equipamento está em operação. Para isso, é imprescindível que as faces possuam valores de planeza e rugosidade superficial satisfatórios. Estes parâmetros são obtidos por meio de lapidação mecanizada ou manual. Na prática, a rugosidade não é avaliada pelas empresas que recuperam selos mecânicos e os valores de planeza são obtidos pela visualização de franjas de interferência, que é um método simples e barato, mas que depende da acuidade visual e experiência do técnico que está realizando a lapidação. Este trabalho propõe comparar os valores de planeza obtidos pela técnica de franjas de interferência e pela medição em uma máquina de medição por coordenadas (MMC), antes e após a lapidação das faces de vedação de selos mecânicos aplicados em bombas de transferência de gás liquefeito de petróleo (GLP), assim como avaliar a qualidade da planeza e da rugosidade superficial obtidas por lapidação manual na oficina de manutenção da Transpetro no Porto de Suape, e por lapidação mecanizada em empresa externa. A rugosidade superficial também foi avaliada através de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados comprovaram a eficácia do método de lapidação manual e a exatidão da medição de planeza por meio da MMC. Para finalizar o trabalho, foram estimados os principais custos gerados com a falha do selo mecânico e sua manutenção, além dos possíveis prejuízos decorrentes da indisponibilidade simultânea das bombas de GLP, reforçando a importância da recuperação de selos em uma oficina própria.

Palavras-chave: Selos mecânicos. Faces de vedação. Lapidação. Planeza. Rugosidade.

ABSTRACT

The mechanical seal is the main sealing element of a machine or equipment because it prevents unwanted leaks from occurring and can cause accidents and damage. Static and dynamic sealing faces are responsible for this function, preventing the confined fluid from escaping into the external environment, especially when the equipment is in operation. For this, it is imperative that the faces have satisfactory flatness and surface roughness values. These parameters are obtained by mechanized or manual lapping. In practice, roughness is not evaluated by companies recovering mechanical seals and flatness values are obtained by viewing fringes of interference, which is a simple and inexpensive method, but which depends on the visual acuity and experience of the technician who is performing the lapping. This work proposes to compare the flatness values obtained by the technique of interference fringes and the measurement in a coordinate measuring machine (CMM), before and after the lapping of the sealing faces of mechanical seals applied in liquefied petroleum gas (LPG) transfer pumps, as well to evaluate the quality of the flatness and of the superficial roughness obtained by manual lapping in the Transpetro maintenance workshop at Suape seaport, and by mechanized lapping in an external company. The surface roughness was also evaluated through optical microscopy and scanning electron microscopy. The results demonstrated the efficacy of the manual lapping method and the accuracy of flatness measurement through CMM. To finalize the work, the main costs generated by the failure of the mechanical seal and its maintenance were estimated, as well as the possible losses due to the simultaneous unavailability of LPG pumps, reinforcing the importance of the recovery of seals in its own workshop.

Keywords: Mechanical seals. Sealing faces. Lapping. Flatness. Roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenho em corte de um selo mecânico instalado numa bomba centrífuga horizontal.....	20
Figura 2 – Seções transversais de sedes (faces estacionárias).....	21
Figura 3 – Seções transversais de anéis de selagem (faces rotativas)	21
Figura 4 – Tipos de molas helicoidais	21
Figura 5 – Tipos de molas chatas	22
Figura 6 – Tipos de foles metálicos.....	22
Figura 7 – Selo mecânico duplo montado em bomba centrífuga	23
Figura 8 – Componentes de um selo mecânico convencional (a) e do tipo cartucho (b), montados num eixo.....	23
Figura 9 – Exemplos de selos mecânicos e seus componentes internos.....	25
Figura 10 – Aplicação dos selos mecânicos em bombas centrífugas	25
Figura 11 – Formação de filme de fluido entra as faces de vedação	28
Figura 12 – Curva de Stribeck exibindo os diferentes regimes de lubrificação	30
Figura 13 – Microfotografias da superfície de uma face de vedação antes (a) e depois (b) de sua utilização.....	31
Figura 14 – Exemplo do aumento da taxa de vazamento em função da altura da ondulação da superfície da face de vedação.....	32
Figura 15 – Exemplo da variação da taxa de vazamento em função da rugosidade e da direção dos arranhões na superfície da face de vedação	33
Figura 16 – Mecanismos de remoção de material na lapidação	34
Figura 17 – Vista superior (a) e lateral parcial em corte (b) de uma lapidadora plana.....	35
Figura 18 – Trajetória descrita por um ponto da face de vedação sobre o disco de lapidação de uma lapidadora com braço fixo	35
Figura 19 – Representação imaginária da tolerância de planeza	37
Figura 20 – Representação em desenho técnico da tolerância de planeza.....	37
Figura 21 – Leitura imaginária do campo de tolerância de planeza	37
Figura 22 – Princípio da geração de franjas de interferência	39
Figura 23 – Avaliação da planeza de uma superfície através de franjas de interferência	39
Figura 24 – Ilustração da avaliação de planeza utilizando-se um plano óptico com incidência de luz monocromática sobre a peça	40
Figura 25 – Guia de referência para avaliação da planeza de peças através da quantidade de franjas de interferência.....	41
Figura 26 – Verificação da planeza de uma face de vedação pela quantidade de franjas observadas através de um plano óptico e uma fonte de luz monocromática.....	41
Figura 27 – Exemplos de franjas de interferência observadas a olho nu.....	42
Figura 28 – Parâmetros de ondulação e rugosidade numa superfície qualquer.....	43
Figura 29 – Perfis de rugosidade, de ondulação e de erro de forma de uma superfície qualquer.....	44
Figura 30 – Comprimentos percorridos pelo apalpador na medição de rugosidade.....	45
Figura 31 – Linha média.....	45
Figura 32 – Determinação da linha média	46

Figura 33 – Desvio médio aritmético Ra	47
Figura 34 – Uma das bombas centrífugas verticais de GLP instalada na Transpetro	49
Figura 35 – Selo mecânico instalado em uma das bombas centrífugas verticais de GLP	50
Figura 36 – Luva e componentes do selo primário (selo interno) de uma das bombas de GLP	51
Figura 37 – Luva montada no selo primário e demais componentes do selo secundário (selo externo) de uma das bombas de GLP	51
Figura 38 – Face rotativa em SiC (esquerda) e face estacionária em carvão com antimônio (direita) do selo primário (selo interno)	51
Figura 39 – Lapidadora plana	54
Figura 40 – Máquina de limpeza por ultrassom	55
Figura 41 – Lapidadora plana durante lapidação de uma das faces de vedação	56
Figura 42 – Fonte de luz monocromática e disco óptico	57
Figura 43 – Disco para lapidação manual com planeza de 30 μm (a) e 6 μm (b)	58
Figura 44 – Lapidação dos discos de lapidação manual	59
Figura 45 – Lapidação manual de faces de vedação na oficina da Transpetro	60
Figura 46 – Polimento manual de faces de vedação na oficina da Transpetro	61
Figura 47 – Polimento manual de faces de vedação na oficina da Transpetro	61
Figura 48 – Máquina de medição por coordenadas	62
Figura 49 – Ilustração dos pontos de medição de planeza na superfície da face de vedação	63
Figura 50 – Medição de planeza das faces de vedação na MMC	63
Figura 51 – Rugosímetro digital e padrão de rugosidade	64
Figura 52 – Rugosímetro digital durante medição de uma das faces de vedação	64
Figura 53 – Microscópio óptico OLYMPUS, modelo BX51M	65
Figura 54 – Microscópio eletrônico de varredura HITACHI, modelo TM 3000	66
Figura 55 – Fotografia das franjas de interferência na face S1F1 (a), antes da lapidação, e ampliação da região destacada para visualização de inúmeras franjas concêntricas e delgadas (b)	68
Figura 56 – Fotografia das franjas concêntricas após lapidação da face S1F1	69
Figura 57 – Fotografia das inúmeras franjas invisíveis a olho nu na face S1F2	69
Figura 58 – Polimento manual de faces de vedação com pasta JP-1/4	70
Figura 59 – Gráfico dos valores médios mínimos da planeza de faces em RbSiC e carbono impregnado com antimônio, após lapidação mecanizada e manual	73
Figura 60 – Gráfico dos valores médios mínimos da rugosidade Ra de faces em RbSiC e carbono impregnado com antimônio, após lapidação mecanizada e manual	73
Figura 61 – Micrografias eletrônicas de varredura em regiões diferentes de uma mesma face de RbSiC, antes (a) e após (b) lapidação manual com pasta JP-1, com aumento de 2000X	74
Figura 62 – Micrografias eletrônicas de varredura em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, após lapidação manual e polimento com pasta JP-1 (a) e JP-1/4 (b), com aumento de 2000X	76

Figura 63 – Micrografias ópticas em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, após lapidação manual e polimento com pasta JP-1 (a) e JP-1/4 (b), com aumentos de 50X e 500X	77
Figura 64 – Micrografias eletrônicas de varredura em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, antes (a) e após (b) lapidação manual com pasta JP-1, com aumento de 500X.....	78
Figura 65 – Micrografias ópticas em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, antes (a) e após (b) lapidação manual com pasta JP-1, com aumento de 50X	78
Quadro 1 – Estimativa de custos para substituição e recuperação de selo mecânico para uma bomba de GLP	81
Quadro 2 – Comparação entre a recuperação mecanizada e manual de selos mecânicos.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimentos de amostragem de rugosidade para medições de Ra e parâmetros relacionados para perfis não periódicos (por exemplo, perfis lapidados).....	48
Tabela 2 – Resultados da medição de planeza por MMC e franjas de interferência de faces de vedação lapidadas mecanicamente	67
Tabela 3 – Resultados da medição de planeza e rugosidade superficial de faces de vedação lapidadas manualmente com pasta JP-1	70
Tabela 4 – Resultados da medição de planeza e rugosidade superficial de faces de vedação lapidadas manualmente com pasta JP-1 e relapidadas com pasta JP-1/4	71
Tabela 5 – Resultados da medição de planeza da superfície do disco de lapidação, antes e após sua utilização	71
Tabela 6 – Valores médios mínimos da planeza e rugosidade superficial obtidos nos processos de lapidação mecanizada e manual	72
Tabela 7 – Resultado de medições de rugosidade Ra e planeza da superfície de uma face de RbSiC, antes e após lapidação manual com pasta JP-1.....	75
Tabela 8 – Resultado de medições de rugosidade Ra e planeza da superfície de uma face em carbono impregnado com antimônio, após lapidação manual e polimento com pasta JP-1 e JP-1/4.....	77
Tabela 9 – Resultado de medições de rugosidade Ra e planeza da superfície de uma face em carbono impregnado com antimônio, antes e após lapidação manual com pasta JP-1	79

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

API – *American Petroleum Institute*

C – Carbono

Cr – Cromo

CFC – Cloro-flúor-carbono

DIN – *Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization)*

EPDM – Borracha de etileno-propileno-dieno

EPM ou EPR – Borracha de etileno-propileno

FEP – Borracha de etileno-propileno-dieno fluorada

FFKM – Borracha perfluorada

FKM – Borracha fluorada

GLP – Gás liquefeito de petróleo

h – Altura entre faces de vedação ou espessura do filme lubrificante

HB – *Hardness Brinell* (Dureza Brinell)

ISO – International Organization for Standardization

L – Comprimento de amostragem de rugosidade

Ln – Comprimento de avaliação de rugosidade

Lp – Comprimento referente ao percurso do apalpador do rugosímetro até a sua parada

Lt – Distância total percorrida pelo apalpador do rugosímetro

Lv – Comprimento referente ao percurso do apalpador até atingir a velocidade de medição de rugosidade

LVDT – *Linear Variable Differential Transformers*

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MMC – Máquina de medição por coordenadas

MO – Microscopia óptica

Mo – Molibdênio

NBR – Borracha de nitril-butadieno, borracha de acrilonitrila-butadieno ou borracha nitrílica

Ni – Níquel

pH – Potencial de hidrogênio

PTFE – Politetrafluoretileno

R – Rugosidade superficial

Ra – Desvio médio aritmético da altura da rugosidade

RbSiC – Carbetto de silício sinterizado por reação

Rmáx – Altura máxima da rugosidade

rpm – Rotação por minuto

Sb – Antimônio

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Si – Silício

SiC – Carbetto de silício

t – Tolerância de planeza

α -SiC – Fase hexagonal do carbetto de silício

β -SiC – Fase cúbica do carbetto de silício

λ – comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral.....	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	JUSTIFICATIVA.....	19
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
4.1	Selos Mecânicos.....	20
4.2	Materiais dos Selos Mecânicos	26
4.2.1	Materiais das faces de vedação.....	26
4.2.3	Materiais das vedações secundárias	27
4.3	Funcionamento dos Selos Mecânicos	28
4.3	Vazamentos em Selos Mecânicos.....	31
4.4	Lapidação de Selos Mecânicos.....	33
4.5	Planeza.....	36
4.5.1	Princípio das franjas de interferência	38
4.6	Rugosidade Superficial.....	42
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
5.1	Apresentação dos Equipamentos	49
5.1.1	Bombas de GLP.....	49
5.1.2	Selos mecânicos.....	50
5.2	Métodos e Instrumentação Utilizada	52
5.2.1	Recuperação de selos mecânicos	53
5.2.2	Lapidação mecanizada.....	53
5.2.3	Lapidação manual.....	57
5.2.3.1	<i>Lapidação manual em oficina da Petrobras.....</i>	<i>57</i>
5.2.3.2	<i>Lapidação manual em oficina da Transpetro.....</i>	<i>58</i>
5.2.4	Medição da planeza em máquina de medição por coordenadas	62
5.2.5	Medição de rugosidade superficial	64
5.2.6	Análise da superfície através de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura	65

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
6.1	Comparação da Avaliação da Planeza através de MMC e Franjas de Interferência	67
6.2	Avaliação dos Métodos de Lapidação Manual.....	70
6.3	Comparação entre a Lapidação Mecanizada e Manual.....	72
6.4	Análise das Superfícies por MO e MEV	74
6.5	Custos com a Manutenção não Planejada para Recuperação de Selos	79
6.6	Proposição de Procedimento para Lapidação Manual	81
7	CONCLUSÕES	85
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXO A – Desenho de montagem do selo mecânico AESSEAL	89

1 INTRODUÇÃO

O sistema de selagem, ou sistema de vedação, é um dos itens mais importantes de uma bomba, seja esta utilizada para a transferência de água ou produtos perigosos e inflamáveis. Existe uma enorme variedade de sistemas e sua aplicação depende principalmente do tipo de fluido e sistema de bombeio.

O selo mecânico é o componente de maior relevância num sistema de selagem de um equipamento, pois é responsável por garantir a estanqueidade do fluido confinado, impedindo sua fuga para o meio exterior, evitando assim vazamentos, contaminações, perda de inventário e, em alguns casos, incêndios e explosões.

Falhas em selos mecânicos podem ser catastróficas, ocasionando acidentes e interrupções operacionais comprometedoras. Dependendo do tipo de bomba, fluido e selo, a correção de pequenas falhas que resultem em vazamentos poderá demorar semanas e até meses, além de ter um custo relativamente elevado. Por isso, empresas mantêm selos sobressalentes em seus estoques.

Os vazamentos em selos geralmente são provocados, em condições normais de operação, pelo desgaste abrasivo de suas faces de vedação. Estas faces podem ser recuperadas por lapidação, permitindo a reutilização dos selos diversas vezes.

Um selo mecânico corretamente dimensionado e especificado pode trabalhar, sem qualquer necessidade de ajuste, por milhares de horas de funcionamento e, em casos excepcionais pode atingir uma vida útil de 50.000 horas.

Neste trabalho foram avaliadas a planeza e rugosidade superficial de faces de vedação lapidadas de forma manual e mecanizada. Para medição da planeza foi utilizada a técnica de interferometria e uma máquina de medição de coordenadas (MMC). Para avaliação da rugosidade da superfície deslizante das faces de vedação foi utilizado um rugosímetro digital, um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura.

As faces de vedação, que trabalham em pares no interior do selo mecânico (uma face rotativa com uma face estacionária), são consideradas vedações dinâmicas, onde um par é refrigerado pelo próprio fluido bombeado e o outro par é refrigerado pela injeção de um fluido barreira, neste caso, o querosene de aviação. Os selos mecânicos são do tipo cartucho duplo, que possuem dois pares de faces de vedação, instalados em 2 bombas centrífugas verticais de múltiplos estágios, sendo uma reserva, empregadas no bombeio de gás liquefeito de petróleo (GLP) das esferas de armazenamento da Transpetro, no Terminal Aquaviário de Suape, para

os vasos de pressão das companhias distribuidoras instaladas no Porto de Suape. Uma bomba opera praticamente 24 horas por dia, 6 dias por semana. A interrupção prolongada na distribuição de GLP para estas companhias pode causar o desabastecimento em diversos estados da região Nordeste.

Cada bomba possui um selo mecânico com 2 pares de faces de vedação, totalizando 2 faces rotativas em carbetto de silício e 2 faces estacionárias em carbono impregnado com antimônio. Há no estoque 2 selos mecânicos sobressalentes caso os selos instalados nas bombas apresentem vazamento. Porém, em caso de falha, a substituição de um único selo pode levar até 40 horas para ser finalizada.

Nas bombas de GLP da Transpetro, são esperados que os selos tenham uma vida útil superior a 5 anos. Para isso, a qualidade na fabricação e na recuperação de seus componentes é imprescindível. Atualmente a vida útil média de um selo não ultrapassa 2 anos, ocasionando a indisponibilidade de uma das bombas para manutenção corretiva de quase uma semana para substituição do selo defeituoso por um selo recuperado por empresa externa, além de resultar num custo total de quase R\$ 10.000,00. Esta recuperação envolve a substituição das vedações em elastômero e a relapidação de todas as faces de vedação do selo, caso ainda possam ser reaproveitadas. Geralmente a lapidação é realizada de forma mecanizada, em uma lapidadora plana que possui um disco de lapidação motorizado, obtendo-se o menor valor possível de planeza da superfície das faces de vedação. Como a quantidade de material removido durante o processo de lapidação é muito pequena, as faces podem ser relapidadas algumas dezenas de vezes sem que haja comprometimento no funcionamento do selo.

Após sua substituição, o selo defeituoso levará cerca de 75 dias para ser recuperado e devolvido ao estoque da manutenção devido ao trâmite licitatório. Outro ponto negativo é que a instalação fica mais vulnerável sem a bomba reserva. A demora na recuperação dos selos mecânicos e o prejuízo gerado por uma possível indisponibilidade das duas bombas pode resultar em valores muito elevados, até que se efetue a recuperação ou até mesmo a compra emergencial de um novo selo que hoje tem um valor médio de R\$ 40.000,00. A qualidade da superfície das faces de vedação do selo mecânico é um dos fatores que garantirá uma operação segura e duradoura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a planeza e rugosidade das faces de vedação de selos mecânicos tipo cartucho, lapidadas de forma manual e mecanizada, empregados nas bombas principais de transferência de GLP do Terminal Aquaviário da Transpetro no Porto de Suape.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Realização de medições de planeza e rugosidade nas faces de vedação de selos mecânicos das bombas de GLP instaladas na Transpetro, no Porto de Suape, antes e após o processo de lapidação, utilizando a técnica de interferometria (franjas de interferência), uma máquina de medição por coordenadas, um rugosímetro digital;
- Avaliação do acabamento superficial das faces de vedação utilizando um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura;
- Comparação dos métodos de avaliação da planeza: franjas de interferência *versus* máquina de medir por coordenadas;
- Comparação da planeza e rugosidade obtidas por lapidação manual, na oficina de manutenção da Transpetro em Suape, e por lapidação mecanizada, em empresa externa;
- Estimar os custos e prejuízos relacionados com a falha dos selos das bombas de GLP;
- Apresentação e discussão dos resultados obtidos;
- Proposição de um procedimento para lapidação manual.

3 JUSTIFICATIVA

Quando há a necessidade em se recuperar um selo mecânico no Terminal da Transpetro em Suape, é realizado um processo licitatório a nível nacional, geralmente demorado e oneroso, como em qualquer outra empresa pública. Não é feita nenhuma avaliação do estado da superfície das faces de vedação do selo, e todas as faces são relapidadas pela empresa vencedora da licitação.

Também não há confiabilidade na recuperação realizada por empresas especialistas nesse tipo de serviço, pois não é permitido verificar os componentes internos do selo mecânico após sua recuperação, sob o risco de perda de garantia caso o selo seja desmontado para inspeção. A fiscalização do serviço de recuperação torna-se difícil quando a empresa contratada está situada fora do estado de Pernambuco.

Não é possível saber, por exemplo, se as vedações em elastômero foram substituídas ou se há trincas nas faces de vedação que foram lapidadas. Isso vem resultando em vazamentos exagerados e paradas não programadas das bombas para substituição dos selos recuperados que falharam após poucas semanas de operação, gerando, desta forma, retrabalho, indisponibilidade do equipamento e mais custos com manutenção. Somando-se ainda os custos indiretos com perda de inventário, o não faturamento de GLP durante a indisponibilidade da bomba, multas contratuais em caso de interrupção de abastecimento das companhias distribuidoras e, além disso, o impacto negativo na imagem da companhia perante seus clientes e a sociedade. Os prejuízos podem alcançar a ordem de milhões de reais caso as bombas fiquem indisponíveis simultaneamente enquanto aguardam a substituição dos selos que falharam.

Verificar a possibilidade de avaliar a planeza e rugosidade das faces de vedação após sua recuperação, realizada em empresas externas ou nas próprias instalações da Transpetro, traria ganhos significativos na manutenção de selos mecânicos para qualquer bomba, visto que a planta industrial em Suape possui mais de 20 bombas que utilizam selos mecânicos como elemento de vedação. Além disso, a instalação de uma oficina própria para recuperação de selos poderia beneficiar todas as unidades da Transpetro na região Nordeste.

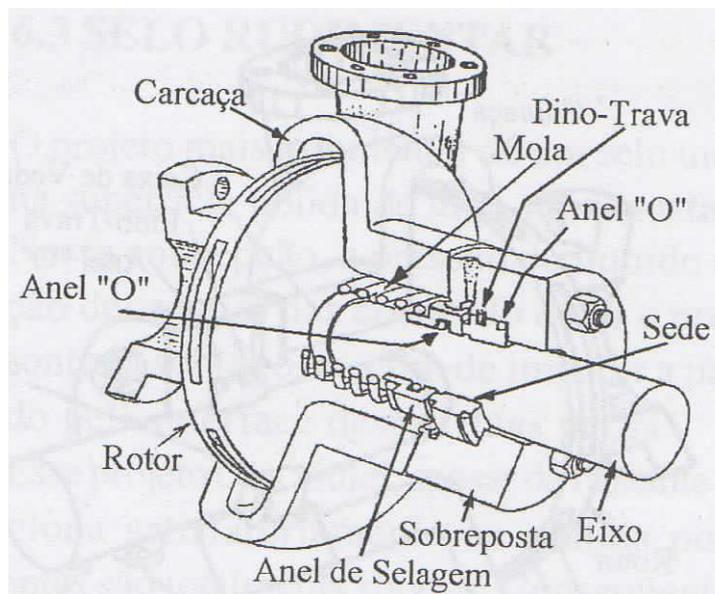
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Selos Mecânicos

“Os selos mecânicos são dispositivos dinâmicos que tem a finalidade de impedir a passagem de um fluido ao longo da interface de duas superfícies anelares animadas de movimento relativo” (LIMA, 2003, p. 89). Essas superfícies anelares são chamadas de faces, anéis ou sedes de vedação. Uma das faces de vedação permanece estacionária, ficando presa ao corpo do selo que está fixado à máquina, e a outra face, montada no eixo da máquina, possui movimento rotativo. O fluido que se deseja conter ocupa o espaço compreendido entre uma câmara no interior do selo e o eixo giratório. Vedações secundárias, geralmente em elastômero, como por exemplo anéis “O” em Viton® ou Kalrez®, também são empregadas para impedir a fuga do fluido nas interfaces entre a face rotativa e o eixo, entre a face estacionária e selo, e entre o selo e a carcaça da máquina.

Na Figura 1 é ilustrado um exemplo de selo mecânico instalado numa bomba centrífuga horizontal, assim como os seus elementos principais. O eixo, rotor e carcaça pertencem à bomba. Demais componentes podem ser incorporados ao selo, de acordo com seu tipo, sua aplicação e o plano de selagem adotado.

Figura 1 – Desenho em corte de um selo mecânico instalado numa bomba centrífuga horizontal

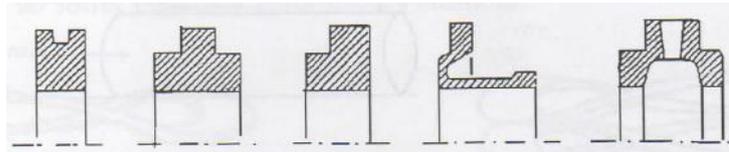


Fonte: Lima (2003).

As sedes, chamadas de faces estacionárias, possuem diversos formatos de seção transversal, em função das forças hidrodinâmicas as quais serão submetidas em operação e da

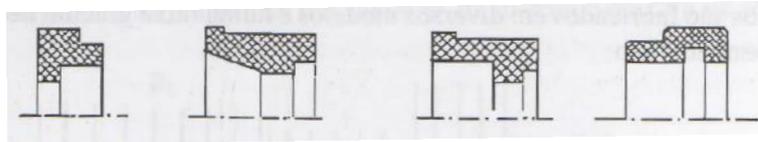
maneira como serão instaladas na sobreposta do selo (de forma prensada ou flutuante). Os anéis de vedação, chamados de faces rotativas ou dinâmicas, também possuem diversos formatos pelos mesmos motivos das sedes e por serem elementos rotativos e deslizantes (sobre o eixo ou a luva), compensando vibrações, pequenos desalinhamentos e dilatações térmicas. Nas Figuras 2 e 3, são ilustradas as seções transversais de alguns tipos de sedes e anéis de selagem, respectivamente.

Figura 2 – Seções transversais de sedes (faces estacionárias)



Fonte: Lima (2003).

Figura 3 – Seções transversais de anéis de selagem (faces rotativas)

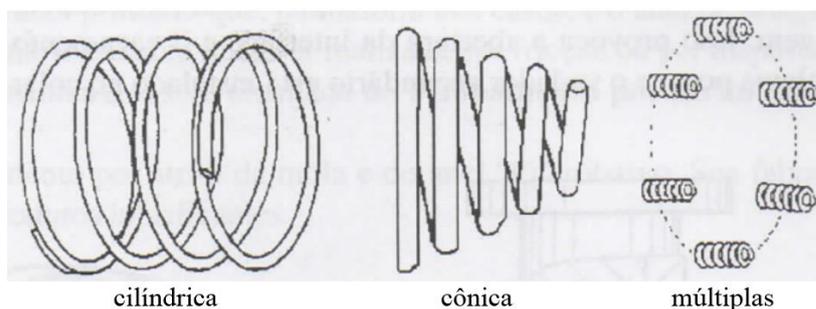


Fonte: Lima (2003).

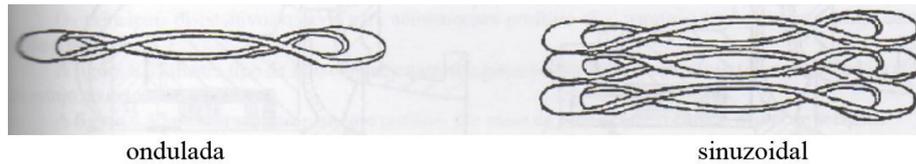
Além dos elementos de vedação, o selo mecânico também possui mais um componente fundamental, que é o mecanismo de compressão axial. Esse mecanismo tem como função manter as faces de vedação pressionadas uma contra a outra, compensando o desgaste das superfícies de contato e auxiliando a vedação promovida pelo par de faces. Ele pode ser composto por um dos elementos elásticos a seguir:

- Uma mola helicoidal cilíndrica ou cônica (Figura 4);
- Molas helicoidais múltiplas (Figura 4);
- Uma mola chata ondulada ou sinuzoidal (Figura 5);
- Um fole de borracha ou fole metálico ondulado ou lamelar (Figura 6).

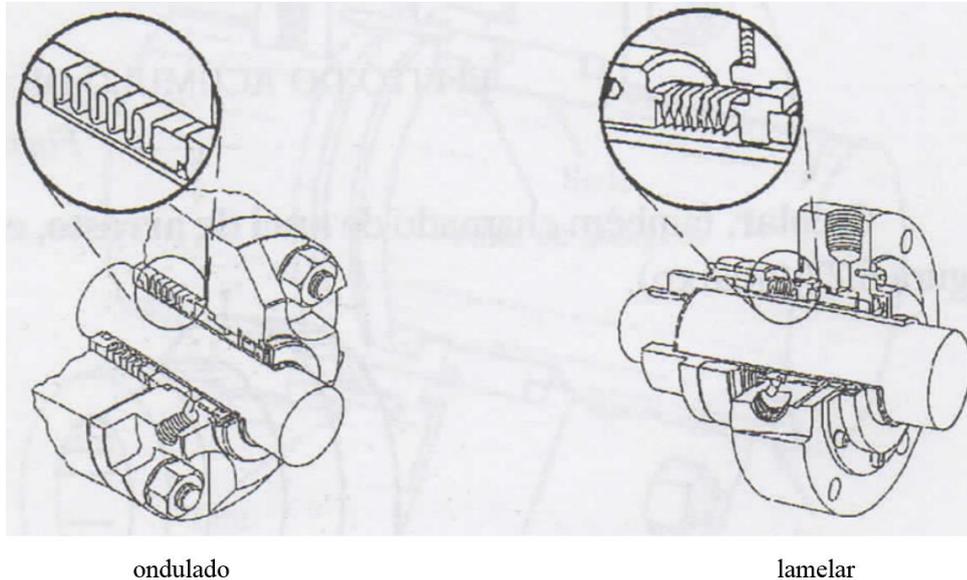
Figura 4 – Tipos de molas helicoidais



Fonte: Lima (2003).

Figura 5 – Tipos de molas chatas

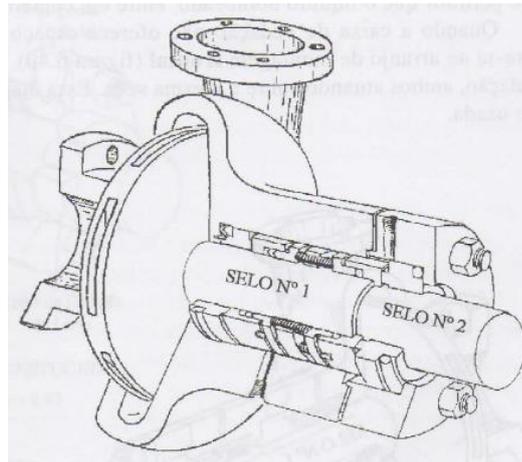
Fonte: Lima (2003, p. 101).

Figura 6 – Tipos de foles metálicos

Fonte: Lima (2003).

Os selos podem ser do tipo simples, quando é empregado apenas um par de faces de vedação, ou do tipo duplo, que possui dois pares de faces (funciona como dois selos montados num só corpo). O segundo par de faces de vedação (selo nº 2, selo secundário ou selo externo) tem a função de conter um outro fluido, chamado de fluido barreira, que é injetado no interior da caixa de selagem, impedindo que este fluido vaze para a atmosfera. O fluido barreira impede que o fluido principal atinja o meio exterior quando o primeiro par de faces de vedação falhar, porém, caso isso ocorra, a operação do equipamento é interrompida para a substituição ou recuperação do primeiro par de faces de vedação. O fluido barreira também auxilia na troca de calor das faces de vedação e na lubrificação das superfícies deslizantes do segundo par de faces, enquanto que o próprio fluido principal realiza estas tarefas no primeiro par de faces de vedação (selo nº 1, selo primário ou selo interno). A Figura 7 ilustra um selo mecânico duplo montado em uma bomba centrífuga.

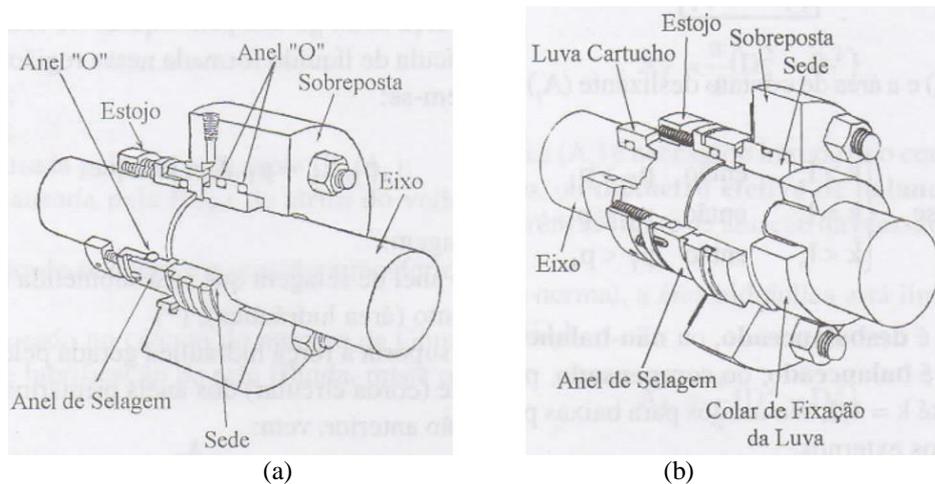
Figura 7 – Selo mecânico duplo montado em bomba centrífuga



Fonte: Lima (2003).

Atualmente, os selos mais usados são do tipo cartucho, que já vem montados numa luva juntamente com a sobreposta e um sistema de fixação por parafusos. Este tipo de selo é instalado diretamente no eixo e na carcaça do equipamento, sem necessidade de ajustes de molas ou foles como ocorre nos selos convencionais, resultando em praticidade e confiabilidade durante a sua montagem. A Figura 8 (a) e (b) ilustra os principais componentes de um selo convencional e do tipo cartucho, respectivamente.

Figura 8 – Componentes de um selo mecânico convencional (a) e do tipo cartucho (b), montados num eixo



Fonte: Lima (2003).

“A existência de fluidos tóxicos e inflamáveis em muitas indústrias leva à necessidade de termos uma vedação de alta confiabilidade nessas máquinas” (AFFONSO, 2006, p. 177). Por este motivo, os selos mecânicos são os mais eficazes quando se trabalha com fluidos perigosos e, conseqüentemente, são os tipos de vedações mais caras atualmente.

A seleção do tipo de selo mecânico e sistema de selagem depende de vários fatores relacionados ao fluido de processo (tipo, densidade, viscosidade, pressão de vapor, temperatura, nível de contaminantes e presença de abrasivos) e às condições operacionais do equipamento (pressão de descarga, pressão de sucção, rotação, regime de trabalho). Os selos mecânicos apresentam inúmeras aplicações na indústria, as principais são em:

- Bombas centrífugas;
- Bombas rotativas de deslocamento positivo;
- Ventiladores;
- Reatores e agitadores para a indústria química;
- Misturadores para indústria de petróleo;
- Compressores;
- *Chillers*;
- Eixos propulsores de embarcações navais;
- Redutores.

Os selos mecânicos podem ser projetados para pressões de até 35 MPa, velocidades da ordem de 45.000 rpm e temperatura máxima do fluido de trabalho em torno de 400°C, permitindo temperaturas mais elevadas mediante projeto especial do selo.

A Figura 9 ilustra alguns tipos de selos mecânicos, dos mais simples aos mais complexos, aplicados em bombas e reatores. É possível observar alguns de seus componentes internos.

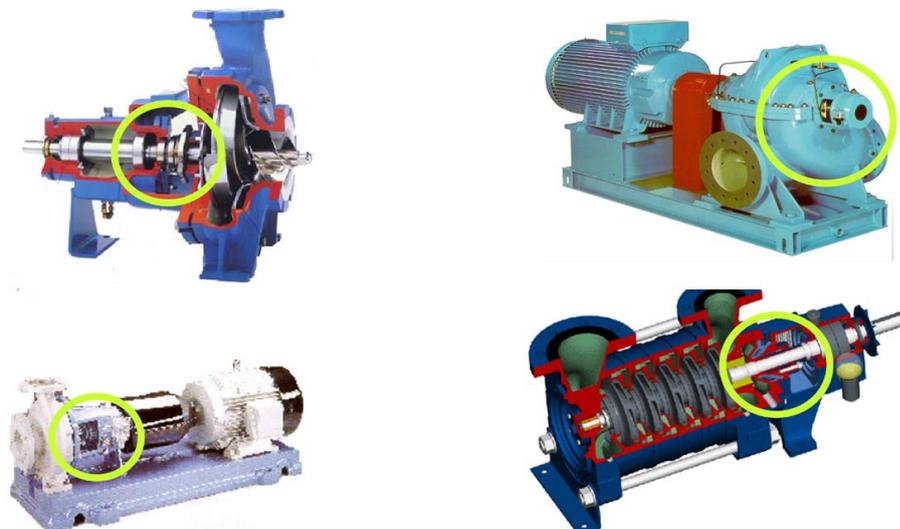
Figura 9 – Exemplos de selos mecânicos e seus componentes internos



Fonte: Aesseal (2002).

Uma grande porcentagem dos selos fabricados mundialmente é destinada à vedação de fluidos em bombas centrífugas dos mais diversos tipos (Figura 10).

Figura 10 – Aplicação dos selos mecânicos em bombas centrífugas



Fonte: Aesseal (2002).

4.2 Materiais dos Selos Mecânicos

Os selos mecânicos são fabricados em diversos modelos e numa faixa gradual de tamanhos padronizados em função das dimensões do eixo e da carcaça da bomba, além do tipo de aplicação. O corpo e demais componentes do selo mecânico podem ser fabricados nos mais diversos tipos de metais. As faces de vedação podem ser fabricadas em aço inoxidável ou aços especiais, através de usinagem convencional, ou em carbono e materiais cerâmicos, através de metalurgia do pó. Os materiais das faces de vedação devem ser capazes de resistir ao atrito em alta velocidade e elevada carga axial. Os melhores materiais de faces para selos apresentam baixa fricção, alta dureza, boa resistência à corrosão e alta condutividade térmica (GRUNDFOS, 2009).

4.2.1 Materiais das faces de vedação

Os materiais das faces de vedação mais utilizados são classificados de acordo com a norma DIN EN 12756 (GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION, 2000) e suas aplicações e métodos de seleção são definidos pela norma API 682 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2014). Os principais materiais são:

- Carbonos sintéticos: carbono grafite com impregnação de resina, carbono grafite com impregnação metálica ou eletrografite;
- Metais: maciços ou revestidos;
- Carbetos: de tungstênio ou de silício;
- Óxidos metálicos: de alumínio ou de cromo;
- Polímero: politetrafluoretileno (PTFE);
- Diamante (como revestimento).

Neste trabalho foram avaliadas faces de vedação estacionárias fabricadas em carbono grafite com impregnação metálica por antimônio, e faces rotativas em carbetos de silício sinterizado por reação.

O carbono grafite com impregnação metálica possui menor resistência química e maior resistência mecânica que os carvões sintéticos impregnados com resina, em função do metal utilizado como impregnante, que pode ser antimônio, estanho, chumbo ou ligas destes metais. O metal mais utilizado é o antimônio (Sb). O limite de temperatura para sua aplicação é de aproximadamente 400°C. Acima desta temperatura aparecerão deposições lamelares na interface de vedação. A resistência química será uma função do metal impregnante.

O carbetto de silício que apresenta Si livre possui resistência química mais baixa, em especial, no campo alcalino, onde ocorre a corrosão seletiva do Si livre. As peças maciças apresentam a fragilidade típica dos materiais cerâmicos. Inserções de grafite melhoram significativamente as prioridades tribológicas. A perda de resistência mecânica resultante pode ser tolerada.

O carbetto de silício sinterizado por reação (RbSiC – *reaction bonded silicon carbide*) é obtido pela mistura de α -SiC, sob a forma de pó, com o grafite e aglutinantes orgânicos. Os corpos pré-compactados são aquecidos a uma temperatura de 1.000°C para a coqueificação do aglutinante. Para que ocorra a siliciação, os corpos são em seguida mergulhados em um banho de silício fundido a uma temperatura de 1.500 °C a 2.200°C, assim o silício penetra nos poros da peça reagindo com o carbono livre desta e formando SiC secundário. O carbetto de silício, assim obtido, pode conter até 10% de silício livre. Por este motivo sua aplicação é restrita a produtos com pH máximo de 10. Em função da matéria prima a granulometria do produto final poderá ser fina ou grossa.

4.2.3 Materiais das vedações secundárias

Os materiais das vedações secundárias são classificados de acordo com a norma DIN EN 12756 em:

- Elastômeros não revestidos;
- Elastômeros revestidos;
- Não elastômeros.

Elastômeros são materiais poliméricos com grandes cadeias moleculares, não perdendo as características elásticas com a variação de temperatura. Em baixas temperaturas aumentam sua rigidez e em altas temperaturas mantém a elasticidade, sem fluir, até atingir sua temperatura de deterioração. Podem ser obtidos a partir de meios orgânicos (borracha natural) ou de hidrocarbonetos (borracha sintética). Atualmente, são produzidos em torno de 30 tipos de elastômeros, sendo os principais:

- Borracha de nitril-butadieno (NBR): Perbunan®;
- Borracha de etileno-propileno (EPM ou EPR) e etileno-propileno-dieno (EPDM): Nordel®;
- Borracha fluorada (FKM): Viton® ou Fluorel®;
- Borracha perfluorada (FFKM): Kalrez® ou Chemraz®.

Os elastômeros revestidos aplicam-se apenas a anéis do tipo “O” aliando a elasticidade do núcleo (elastômero) com a resistência química do revestimento em politetraflouretileno (PTFE), para revestimentos abertos, ou em borracha de etileno-propileno-dieno fluorada (FEP), para revestimentos fechados.

Não elastômeros é a denominação genérica dada a substâncias sintéticas e naturais, que em comparação aos elastômeros, apresentam baixa elasticidade ou fluem quando sujeitos a pequenas cargas, como por exemplo, polímeros ou fibras. Dentre estes se destacam:

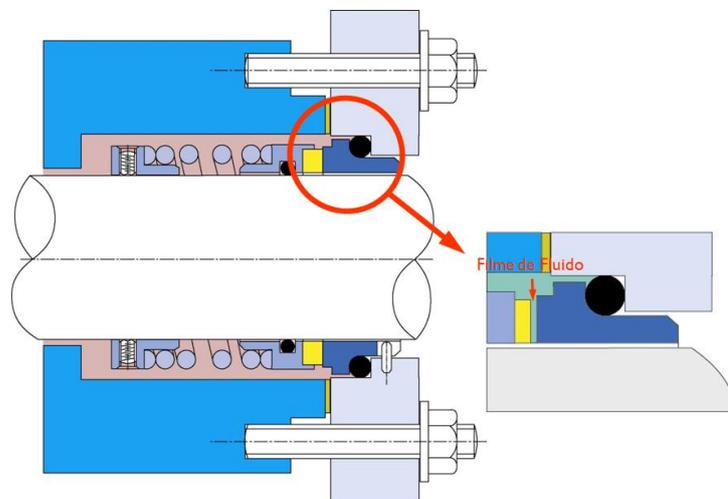
- Grafite expandido;
- Politetraflouretileno.

4.3 Funcionamento dos Selos Mecânicos

Um selo mecânico é projetado para que durante o funcionamento da máquina, uma pequena quantidade do fluido a ser contido penetre na interface das faces de vedação atuando como lubrificante (Figura 11), minimizando o calor gerado e reduzindo o desgaste das superfícies em contato.

O mecanismo de funcionamento de um selo mecânico é uma complexa interação entre o atrito sólido e as forças hidrodinâmicas que se desenvolvem quando o selo está funcionando. O movimento relativo das faces gera movimento do fluido que está entre as faces. A interação do fluido localizado entre as faces com a superfície gera um aumento de pressão hidrodinâmica, uma vez que estas superfícies não são exatamente planas e paralelas (AFFONSO, 2006, p. 178).

Figura 11 – Formação de filme de fluido entra as faces de vedação



Fonte: Aesseal (2002).

Segundo Affonso (2006, p. 178), a formação do filme de líquido é similar à de um mancal axial, com as seguintes diferenças principais:

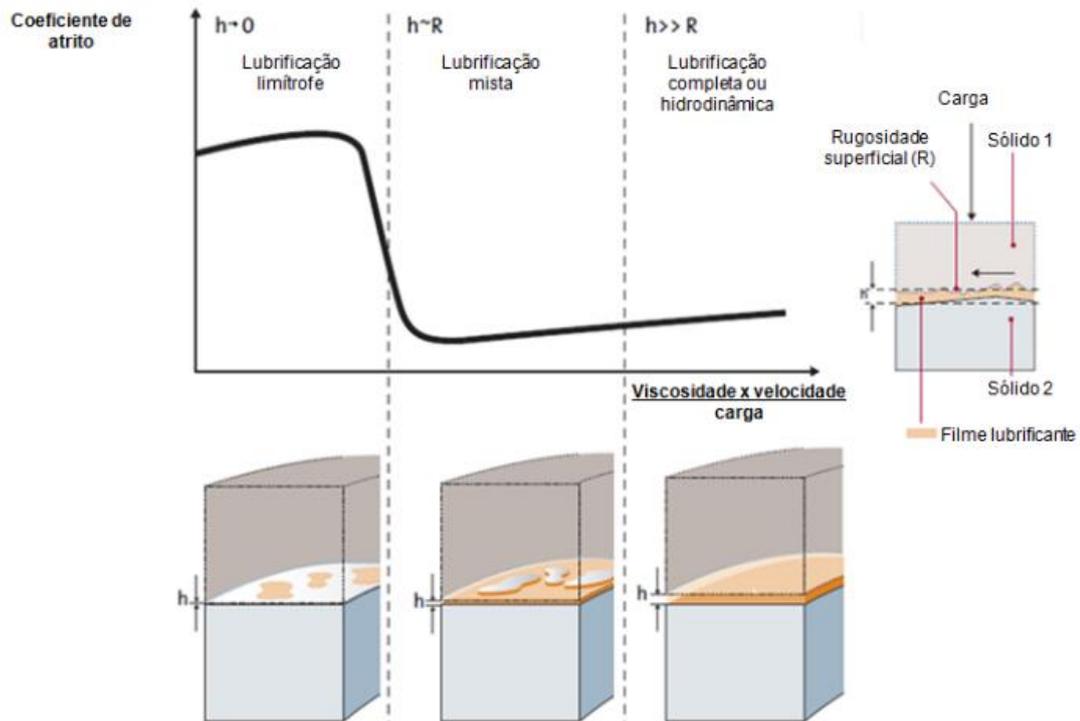
- A carga axial, normalmente, é pequena;
- O fluido lubrificante nem sempre é o mais adequado, ou seja, é comum encontrarmos fluidos com viscosidade muito baixa, com contaminantes ou corrosivos;
- A temperatura do fluido selado pode ser muito alta;
- Nem sempre o filme de líquido é espesso o suficiente para separar as faces totalmente, havendo contato sólido. A separação das faces depende da lubricidade do fluido, rotação, pressão, etc.
- Nem sempre existe um filme de líquido em toda a extensão das faces do selo. Em algumas aplicações, como selagem de bombas de GLP ou água quente, pode haver vaporização do produto entre as faces e o selo trabalha com filme fluido em parte das faces somente.

De acordo com Affonso (2006, p. 178), quando um selo mecânico começa a girar sob pressão, as faces de vedação estão sujeitas à força exercida pelas molas, às forças geradas pela pressão do fluido selado e às forças hidrodinâmicas geradas pelo fluido que está entre as faces. O fator que vai ter maior influência no funcionamento e na vida do selo é a força hidrodinâmica gerada pelo movimento relativo entre as faces rotativa e estacionária. Essas pressões se desenvolvem devido à formação de pequenas cunhas em ondulações nas superfícies e à diferença de pressão entre os lados interno (pressão maior) e externo (pressão menor).

Os regimes de lubrificação encontrados num selo mecânico são os mesmos observados em mancais e em qualquer problema de lubrificação com líquidos. A pressão desenvolvida pelo filme de líquido vai suportar uma parte da carga total. Quanto maior a carga suportada pelo filme de líquido, menores serão o atrito, o desgaste e a geração de calor nas faces de vedação e, conseqüentemente, maior será a vida útil do selo (AFFONSO, 2006, p. 180).

Na Figura 12 é ilustrada a curva de Stribeck com os principais regimes de lubrificação. Podemos observar que em altas velocidades e cargas não muito altas, a pressão hidrodinâmica separa completamente as faces de vedação, permitindo a formação de um filme lubrificante completo (lubrificação hidrodinâmica) entre os sólidos 1 e 2, neste caso, entre as faces de vedação. Onde h é a altura entre as faces ou a espessura do filme lubrificante e R é a rugosidade superficial.

Figura 12 – Curva de Stribeck exibindo os diferentes regimes de lubrificação



Fonte: Adaptado de GRUNDFOS (2009).

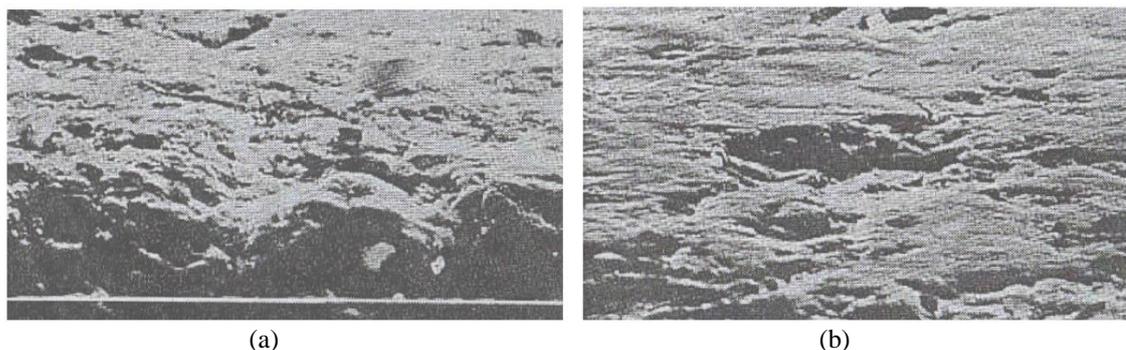
Em velocidades mais baixas ou cargas mais elevadas, a pressão hidrodinâmica não é suficiente para separar completamente as faces de vedação. Nesta situação, um regime misto de lubrificação existe onde parte da carga é diretamente suportada pelos pontos de contato das superfícies. A topografia das superfícies afeta onde o regime misto de lubrificação é atingido.

Em velocidades ainda mais baixas ou cargas mais elevadas, a pressão hidrodinâmica gerada torna-se insignificante. Este regime de lubrificação é chamado de limite ou limítrofe.

A espessura do filme de lubrificação do selo mecânico deve ser muito pequena para evitar fuga excessiva do fluido bombeado para o meio exterior. Consequentemente, o selo estará operando sempre no regime de lubrificação misto ou limítrofe.

As Figuras 13 (a) e (b) mostram microfotografias ampliadas de duas regiões distintas de uma mesma face de vedação de um selo mecânico, fabricada em carvão, antes e depois da sua utilização, respectivamente. Pode-se constatar visualmente que os pontos altos da superfície da face de vedação, observados na Figura 13 (a), foram desgastados conforme mostra a Figura 13 (b), indicando que não houve separação completa durante a operação. O regime de lubrificação para este caso foi misto ou limítrofe.

Figura 13 – Microfotografias da superfície de uma face de vedação antes (a) e depois (b) de sua utilização



Fonte: Affonso (2006).

4.3 Vazamentos em Selos Mecânicos

Vazamentos em selos mecânicos existem, sendo imperceptíveis a olho nu quando o selo está operando satisfatoriamente. A taxa de vazamento de um selo mecânico aplicado em bombas centrífugas depende de um número de fatores, tais como:

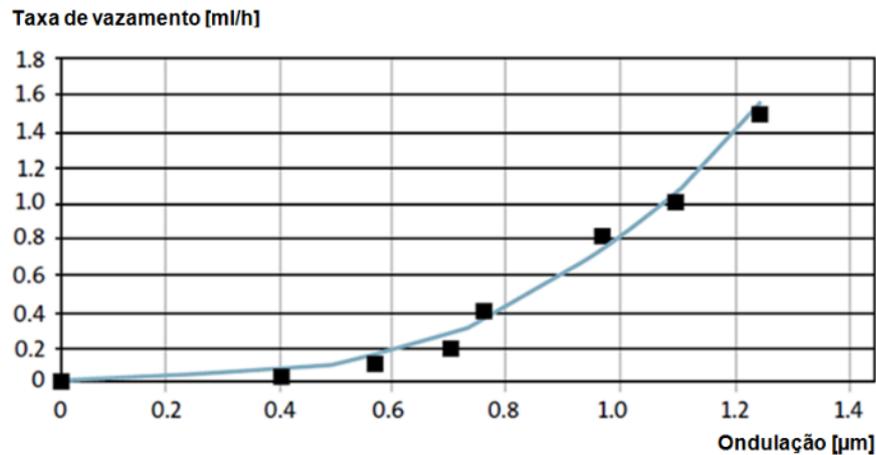
- Rugosidade superficial das faces do selo;
- Planeza das faces do selo;
- Vibração e estabilidade da bomba;
- Velocidade de rotação;
- Diâmetro do eixo da bomba;
- Temperatura, viscosidade e tipo de fluido bombeado;
- Pressão de operação da bomba;
- Vedação e montagem da bomba.

De acordo com GRUNDFOS (2009), quando há uma rotação relativa entre as faces de vedação, a pequena ondulação nas superfícies das faces em contato gera uma pressão hidrodinâmica. Quanto maior a velocidade de rotação, maior será a pressão hidrodinâmica entre as faces. Esta pressão aumenta a espessura da película de lubrificação, resultando numa maior taxa de fuga do fluido selado. Por exemplo, para selos mecânicos utilizados em bombas de água, esta abertura é da ordem de $0,2 \mu\text{m}$.

Ondulações superficiais das faces de vedação também é resultado da distorção mecânica e térmica, mas na maioria dos casos, a pressão hidrodinâmica resultante não é suficiente para separar completamente as superfícies.

No gráfico da Figura 14, há um exemplo da elevação da taxa de vazamento de um selo mecânico qualquer devido ao aumento na altura da ondulação na superfície da face de vedação.

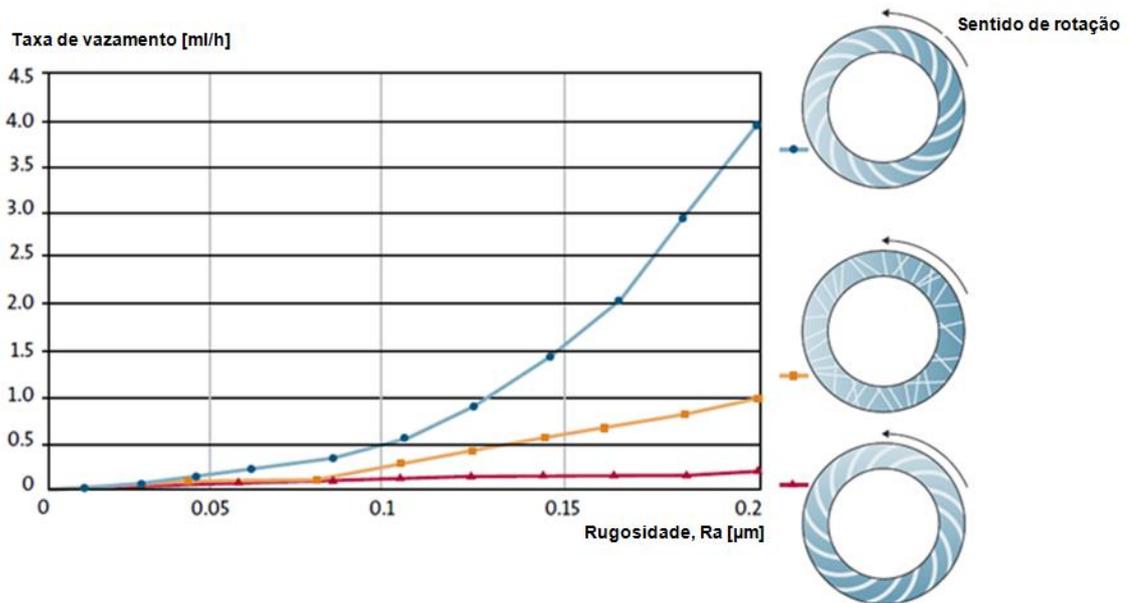
Figura 14 – Exemplo do aumento da taxa de vazamento em função da altura da ondulação da superfície da face de vedação



Fonte: Adaptado de GRUNDFOS (2009).

O acabamento superficial das faces de vedação também influencia na taxa de vazamento, associado à quantidade, extensão e orientação dos arranhões na superfície. A Figura 15 ilustra como a taxa de vazamento varia de acordo com a rugosidade e direção dos arranhões superficiais, para um único sentido de rotação da face de vedação. É possível concluir também que o filme lubrificante pode ser bombeado para o lado interno ou lado externo do selo mecânico, dependendo da direção dos riscos na superfície da face de vedação. A condição que resulta numa maior taxa de vazamento é aquela em que os riscos na superfície possuem a mesma direção do sentido de rotação da face de vedação.

Figura 15 – Exemplo da variação da taxa de vazamento em função da rugosidade e da direção dos arranhões na superfície da face de vedação



Fonte: Adaptado de GRUNDFOS (2009).

Diante de tudo o que foi exposto, pode-se chegar à conclusão de que o compromisso mais seguro entre lubrificação e vazamento é alcançado pela obtenção de uma superfície mais plana possível para as faces de vedação de selos mecânicos.

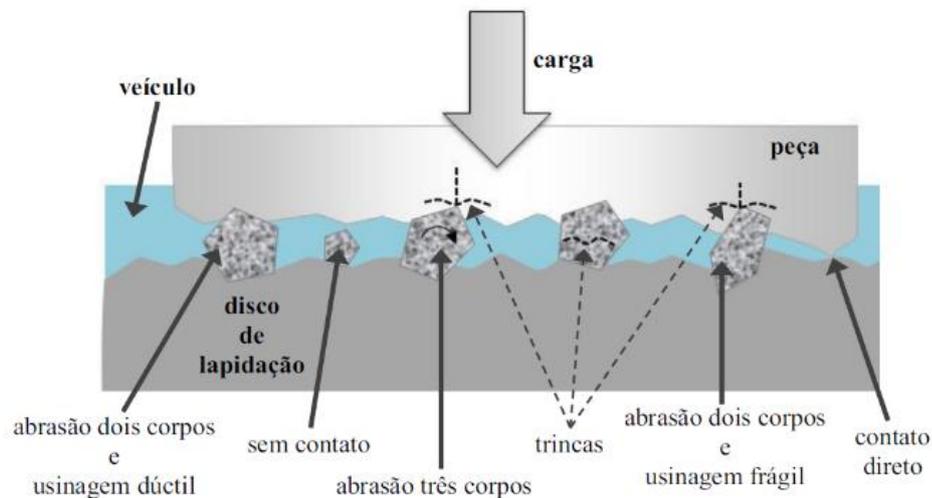
4.4 Lapidação de Selos Mecânicos

A planeza das superfícies das faces de vedação é normalmente obtida por lapidação (manual ou mecanizada). A Norma DIN 8589 (GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION, 2003) define a lapidação como um processo de usinagem envolvendo grãos abrasivos dispersos em um líquido ou pasta (veículo), capaz de transferir para a peça a forma da ferramenta de lapidação, através da remoção promovida pelos grãos que descrevem movimentos aleatórios sobre a superfície da peça.

De acordo com Fiocchi (2010), no mecanismo de remoção de material na lapidação ocorrem dois tipos de interação entre a peça e o disco de lapidação em função da participação do abrasivo. A “abrasão três corpos” se refere à remoção causada por partículas abrasivas soltas entre a peça e disco de lapidação, enquanto que a “abrasão dois corpos” é produzida por partículas abrasivas fixadas na superfície do disco de lapidação. Portanto, as partículas abrasivas no mecanismo de abrasão de dois corpos são capazes de remover mais profundamente o material da peça do que no mecanismo de abrasão de três corpos.

A Figura 16 ilustra o mecanismo básico do processo de lapidação. Nele, os grãos abrasivos são distribuídos ao longo de toda a interface da peça e disco de lapidação. Na abrasão três corpos as partículas rolam e deslizam sobre a superfície da peça e do disco, gerando atrito e trincas. Na abrasão dois corpos os grãos são ancorados na superfície do disco de lapidação, promovendo a formação de trincas e a remoção de material da peça. A pressão exercida pela carga, o tipo e tamanho dos grãos, os materiais do disco e peça, a velocidade de rotação, o tempo de usinagem, o tipo e a concentração do veículo, são fatores determinantes no processo de lapidação.

Figura 16 – Mecanismos de remoção de material na lapidação



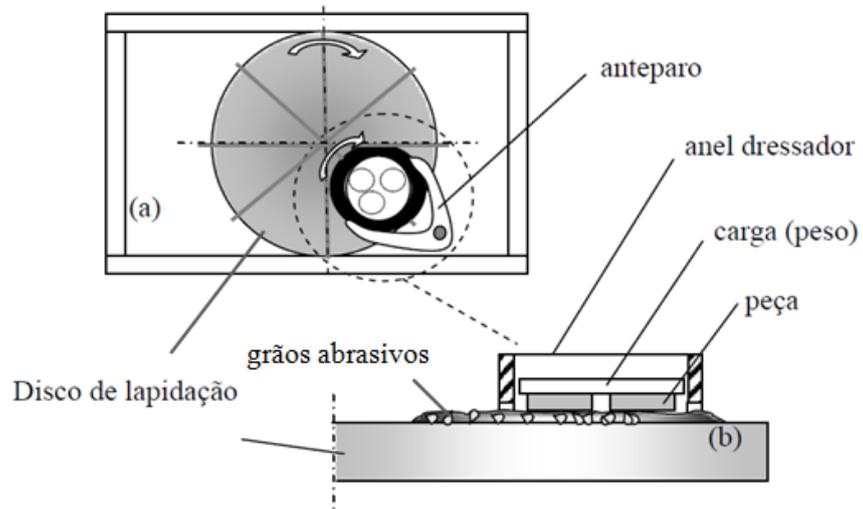
Fonte: Fiocchi (2010).

A lapidação mecanizada é realizada por meio de máquinas de lapidação, motorizadas, chamadas lapidadoras. Para as faces de vedação de selos é empregada a lapidadora plana. A Figura 17 é uma representação típica de uma lapidadora plana e seus componentes.

As peças são colocadas dentro de um anel dressador (anel de armazenamento ou de acondicionamento), ficando confinadas, e ambos repousam sobre o disco de lapidação que apresenta um movimento rotativo constante. Na superfície do disco são depositados grãos abrasivos geralmente em meio pastoso para lapidação de faces em carvão ou SiC, e em meio oleoso com gotejamento constante para faces metálicas como aços inoxidáveis. Sobre as peças são colocados massas na forma de discos metálicos que exercem certa pressão sobre as mesmas a fim aumentar a taxa de remoção de material e melhorar o acabamento superficial. Um anteparo, suportado por um braço fixo ou móvel, permite o movimento de rotação tanto do anel quanto das peças em seu interior, graças à velocidade tangencial relativa imprimida pelo disco de lapidação sobre o anel nos diferentes pontos radiais. O anel dressador se

mantém em contato permanente com o disco de lapidação e, por ser fabricado em material de maior dureza que o disco, promove um desgaste gradativo do disco permitindo que possíveis desvios de planeza sejam corrigidos progressivamente, conseqüentemente as peças também obtém uma superfície mais plana possível.

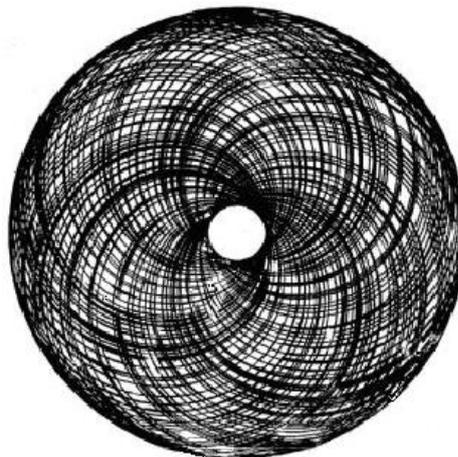
Figura 17 – Vista superior (a) e lateral parcial em corte (b) de uma lapidadora plana



Fonte: Adaptado de Fiocchi; Sanchez (2009).

Uma das características da lapidação é o movimento relativo entre o disco de lapidação e a peça, ambos em rotação, fazendo com que os grãos abrasivos em contato com as faces desenvolvam trajetórias cíclicas complexas e de grande densidade pela superfície lapidada. A Figura 18 exibe a trajetória completa descrita por um único ponto da face de vedação sobre a superfície do disco de lapidação.

Figura 18 – Trajetória descrita por um ponto da face de vedação sobre o disco de lapidação de uma lapidadora com braço fixo



Fonte: Sanchez; Losnak; Perez (1999).

O vazamento pelas faces de vedação de um selo está intimamente relacionado com a rugosidade e planeza das superfícies de contato entre as faces. Para minimizar os vazamentos, a superfície dos anéis de vedação do selo mecânico deve ser a mais plana e lisa possível. De acordo com Kutz (2006), não é incomum encontrar faces de selagem com planeza da ordem de 1 μm , podendo chegar até a 5 μm para selos mecânicos convencionais.

No entanto, segundo GRUNDFOS (2009), mesmo com uma elevada qualidade no processo de lapidação de faces de vedação as superfícies resultantes não são completamente planas, persistindo desvios de planeza da ordem de 0,1 μm . Vale salientar que quanto menor a tolerância de planeza desejada, maiores são o tempo e o custo de lapidação das faces de vedação.

4.5 Planeza

Segundo Magalhães (2006), para definir um plano são necessários três pontos não colineares, ou um ponto e uma reta, ou duas retas. Por esta definição um plano não possui vales nem picos, sendo perfeito para ser utilizado como referência nas medições e nos processos de fabricação. No entanto, não se consegue fabricar tal plano e por isto tolerâncias são especificadas para os pontos que ficam fora do plano ideal, devendo existir um limite que determine o quanto esses pontos podem se afastar do plano ideal.

Planeza é um termo utilizado para definir o quanto uma superfície encontra-se plana. A planeza é um dos tipos de desvio de forma, que representa o grau de variação da superfície real de um plano em relação à sua geometria ideal de superfície (MAGALHÃES, 2006). Não deve ser confundida com o paralelismo, que é a avaliação do desvio entre duas superfícies paralelas que não pertencem ao mesmo plano.

Segundo a norma NBR 6409 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), a tolerância de planeza é limitada por dois planos paralelos afastados de uma distância “t”, conforme ilustrado na Figura 19.

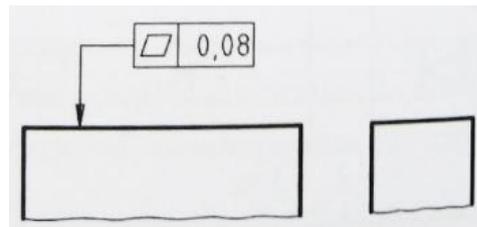
De acordo com SENAI (2015), a tolerância de planeza é o desvio aceitável na forma do elemento tolerado em relação à forma plana ideal. A indicação desse tipo de tolerância significa que a superfície efetiva tolerada deve estar contida entre dois paralelos afastados de uma distância t, que definem o campo de tolerância. A Figura 20 ilustra um exemplo de indicação de tolerância de planeza de uma superfície em desenho técnico e a Figura 21 ilustra a leitura imaginária do campo de tolerância.

Figura 19 – Representação imaginária da tolerância de planeza



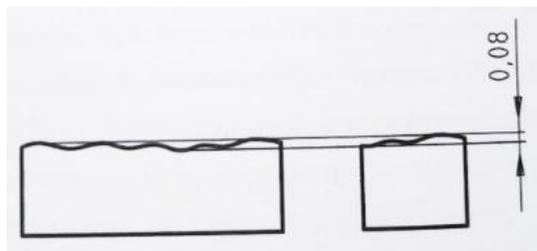
Fonte: SENAI (2015).

Figura 20 – Representação em desenho técnico da tolerância de planeza



Fonte: SENAI (2015).

Figura 21 – Leitura imaginária do campo de tolerância de planeza



Fonte: SENAI (2015).

Existem diversos métodos para avaliação da planeza de uma superfície. A escolha deles dependerá das dimensões da superfície, da sua aplicação e da tolerância desejada, podendo-se utilizar métodos de medição direta e indireta, como régua padrão, relógio comparador, interferometria (franjas de interferência), transdutores de deslocamento linear do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) e Máquina de Medição por Coordenadas (MMC).

Para faces de vedação de selos mecânicos, a medição de planeza geralmente é realizada por interferometria com observação visual de franjas de interferência, devido à sua relativa simplicidade e baixo custo, onde um feixe de luz monocromática, proveniente de uma lâmpada de hélio ou sódio, incide sobre a superfície de vedação da face. Mas também é possível avaliar a planeza da superfície das faces de vedação com uma Máquina de Medição por Coordenadas.

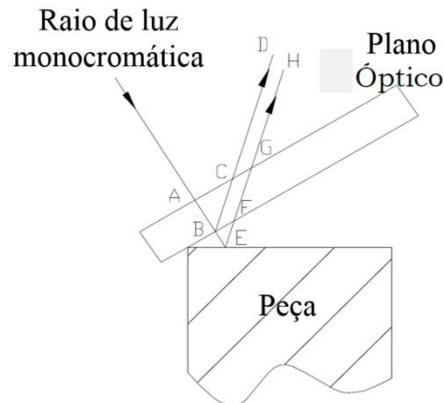
4.5.1 Princípio das franjas de interferência

A técnica de interferometria utiliza uma fonte de luz monocromática cujos raios atravessam uma superfície plana padrão (plano óptico) atingindo a superfície a ser avaliada (peça), que por não ser perfeitamente plana resulta na reflexão parcial dos raios, gerando regiões escuras na superfície entre o plano óptico e a peça, chamadas de franjas de interferência (também chamadas de bandas).

Como fonte de luz são usadas lâmpadas de hélio, com comprimento de onda λ igual a 0,5876 μm , ou sódio, com comprimento de onda λ igual a 0,5896 μm . A superfície plana padrão é a superfície polida de planos ópticos. Os planos ópticos para aplicações metrológicas geralmente são fabricados em quartzo, na forma de discos de diâmetros variados com superfícies próximas do plano perfeito. Estes planos também podem ser fabricados em Zerodur®, que é um vidro cerâmico desenvolvido para ter expansão térmica igual a zero em temperatura ambiente.

A Figura 22 ilustra o caminho percorrido por um feixe de luz monocromática atravessando um plano óptico exageradamente inclinado até a sua reflexão na superfície da peça. O raio atinge a superfície superior do plano óptico no ponto A e é refratado para a superfície inferior atingindo o ponto B. Caso a superfície da peça fosse perfeitamente plana, a superfície inferior do plano óptico seria também a superfície da peça, mas como existem ondulações nesta, haverá uma cunha de ar entre as superfícies da peça e do plano. Na superfície inferior do plano óptico, parte do raio é refletido até o ponto C enquanto a outra parte atinge a superfície da peça em E, ocorrendo a sua reflexão total atravessando novamente o plano óptico em F e G. O ângulo formado entre B, E e F é muito pequeno, fazendo com que os raios refletidos no plano óptico e na peça estejam praticamente na mesma trajetória, e um observador em DH verá uma combinação destes dois raios. O caminho adicionado BEF pode causar uma diferença de fase entre os dois raios refletidos. Caso essa diferença seja igual a um número ímpar de metades do comprimento de onda ($\lambda/2$) da luz monocromática o resultado da combinação de raios será uma região escura (franja escura) devido ao fenômeno da interferência destrutiva. Se for igual a um número par de $\lambda/2$, o resultado será uma região clara (franja brilhante), provocada pela interferência construtiva de raios luminosos.

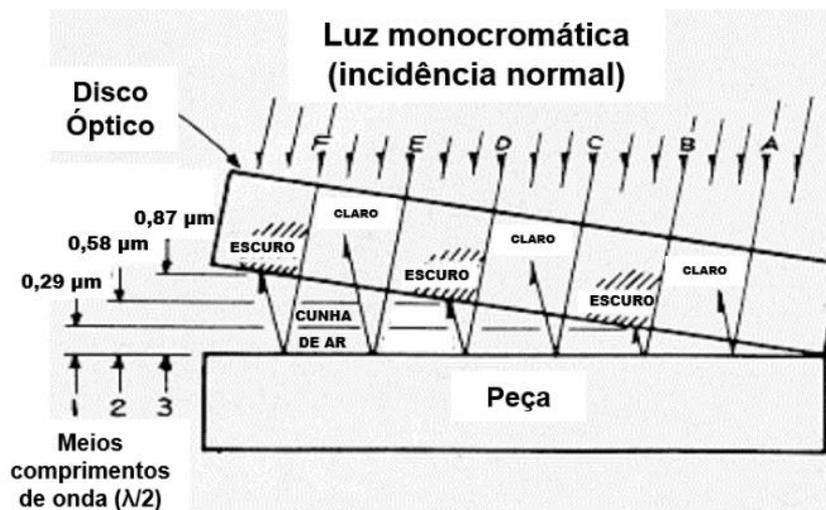
Figura 22 – Princípio da geração de franjas de interferência



Fonte: Adaptado de Magalhães (2006).

A explicação acima ocorre como se a cunha de ar abaixo do plano óptico fosse formada em quantidades iguais e paralelas, alternando alturas de meio comprimento de onda. Assim, em qualquer peça lapidada, colocada sob o plano e iluminada nas mesmas condições, surgirá uma rede de franjas escuras que formam linhas de contorno da superfície da franja, cada uma das quais mostrando um grau de irregularidade de $\lambda/2$. Como cada faixa escura é como uma linha de contorno que define um caminho em toda a cunha onde a sua espessura é exatamente uniforme, as franjas escuras são, portanto, úteis para uma medida precisa da planeza de uma superfície. A Figura 23 ilustra um exemplo desta aplicação onde 3 franjas de interferência (escuras), provenientes dos raios B, D e F de uma fonte de luz monocromática de hélio, são geradas devido à altura da cunha de ar que corresponde à números ímpares de meios comprimentos de onda.

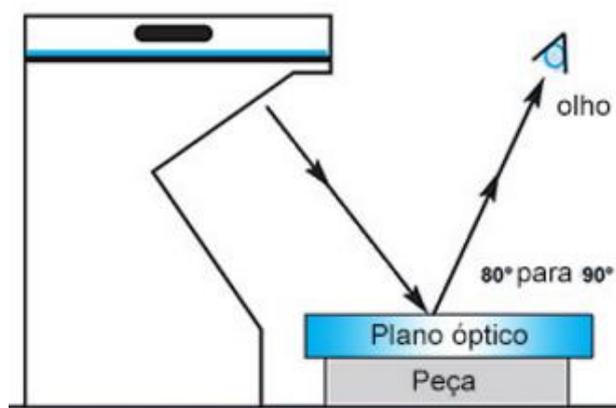
Figura 23 – Avaliação da planeza de uma superfície através de franjas de interferência



Fonte: Adaptado de Abrading Methods [2016].

A Figura 24 ilustra, de modo simplificado, um exemplo de unidade geradora de luz monocromática, cujo feixe de luz incide sobre um plano óptico e a peça, e o observador, que visualiza possíveis franjas de interferência.

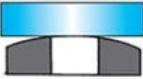
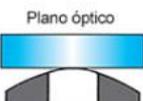
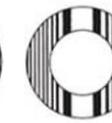
Figura 24 – Ilustração da avaliação de planeza utilizando-se um plano óptico com incidência de luz monocromática sobre a peça



Fonte: Kemet [2016].

De acordo com a quantidade de franjas observadas e o formato destas, é possível estimar o valor da planeza e a geometria da superfície examinada (côncava, convexa, cilíndrica ou formato de sela). A Figura 25 contém exemplos de possíveis padrões observados a olho nu em faces de vedação de selos mecânicos, com 1, 2, 3 ou 9 franjas de interferência provenientes de uma fonte de luz monocromática de sódio, onde uma franja equivale a uma planeza de aproximadamente $0,29 \mu\text{m}$. A quantidade de franjas é definida pela observação do número de franjas interceptadas por uma linha reta imaginária, passando no centro da face de vedação.

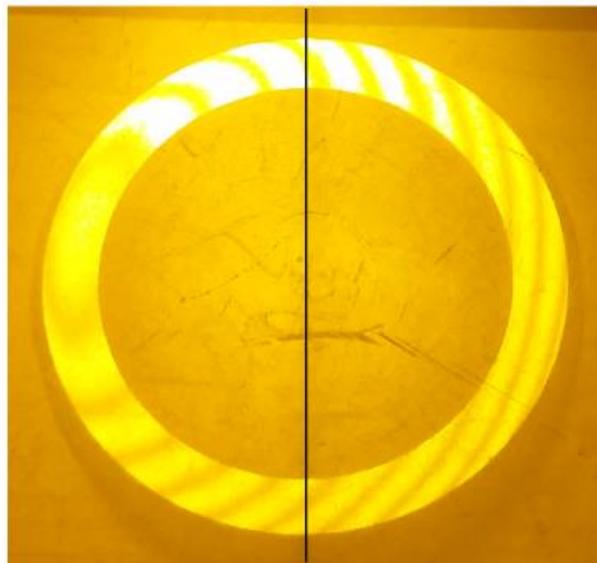
Figura 25 – Guia de referência para avaliação da planeza de peças através da quantidade de franjas de interferência

GEOMETRIA DA SUPERFÍCIE DA PEÇA		1 FRANJA 0,29 μm	2 FRANJAS 0,58 μm	3 FRANJAS 0,87 μm	9 FRANJAS 2,61 μm
Convexo ou Côncavo Superfície paralela ou plana Padrão simétrico	Plano óptico 				
Convexo Com superfície côncava a franja se curvará na direção oposta Padrão não simétrico	Plano óptico 				
Cilíndrico Convexo ou côncavo Padrão simétrico	Plano óptico 				
Formato de sela Padrão simétrico	Plano óptico 				

Fonte: Adaptado de Kemet [2016].

Como exemplo real, na Figura 26 uma face de vedação qualquer foi lapidada e colocada sob um plano óptico com incidência de luz monocromática de sódio. É possível visualizar as franjas de interferência e constatar que a linha central vertical só intercepta uma franja (na parte superior e inferior), indicando que o valor da planeza da face de vedação é de 0,29 μm .

Figura 26 – Verificação da planeza de uma face de vedação pela quantidade de franjas observadas através de um plano óptico e uma fonte de luz monocromática

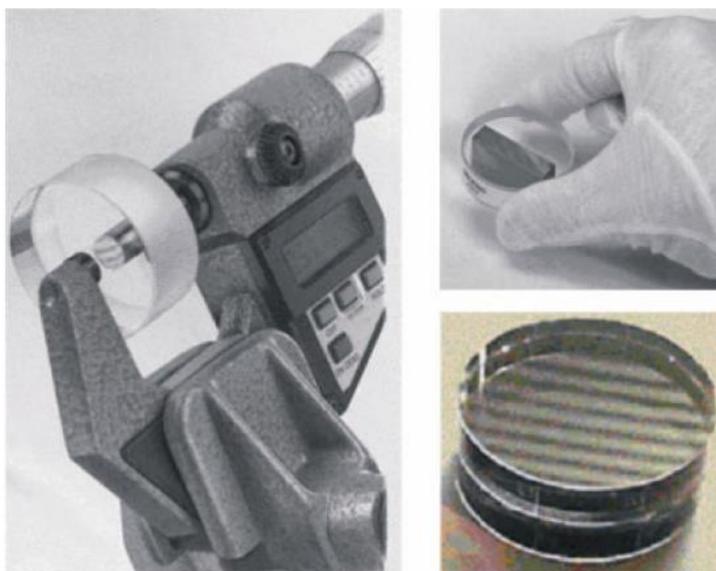


Fonte: O autor.

Caso as franjas não apareçam algo pode estar mantendo o plano ótico muito afastado da superfície da peça, como rebarbas, poeira, umidade, resíduos de fluidos ou cunha de ar muito espessa. Deve-se garantir que as superfícies do plano ótico e da peça estejam limpas e livres de falhas nas bordas. Aplicando-se uma certa pressão com as mãos sobre o plano ótico é possível diminuir a espessura da cunha de ar entre as superfícies.

O princípio de franjas de interferência também é aplicado para avaliar a planeza da superfície de blocos padrão e de instrumentos de medição, como as pontas de micrômetros, ambos exemplificados na Figura 27.

Figura 27 – Exemplos de franjas de interferência observadas a olho nu



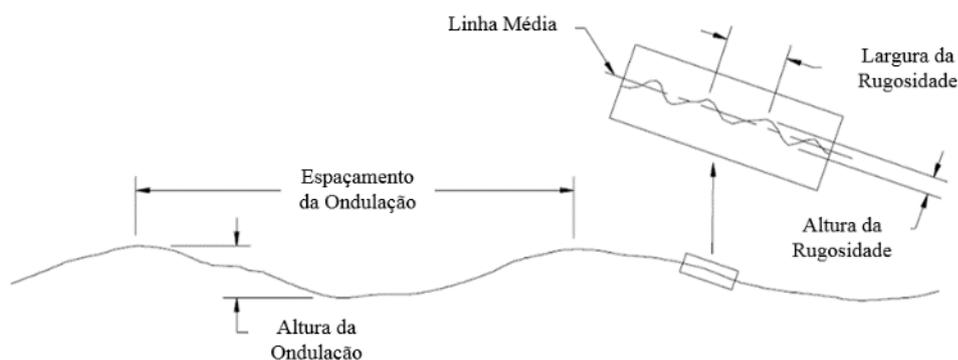
Fonte: Grous (2011).

4.6 Rugosidade Superficial

A textura da superfície de uma peça usinada é determinada por ondulações, rugosidade superficial, direções de usinagem e falhas, como, por exemplo, riscos gerados durante a produção ou manuseio da peça (DRAKE JR., 1999). A Figura 28 ilustra os parâmetros de ondulação e rugosidade numa superfície qualquer.

A rugosidade é um parâmetro que define o estado do acabamento superficial de uma peça ou objeto. Durante o processo de fabricação de uma peça, a ferramenta ou agente de usinagem entra em contato com a superfície da peça provocando irregularidades como sulcos ou marcas que podem ser invisíveis a olho nu (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

Figura 28 – Parâmetros de ondulação e rugosidade numa superfície qualquer



Fonte: Adaptado de Drake Jr. (1999).

Segundo Agostinho, Rodrigues e Lirani (1977), é fundamental a especificação do acabamento das superfícies através da rugosidade superficial onde houver desgaste, atrito, corrosão, aparência, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluidos (paredes de dutos e tubos) e superfícies de medição (blocos-padrão, micrômetros, etc.).

Ainda segundo Agostinho, Rodrigues e Lirani (1977), a rugosidade superficial é função do tipo de acabamento, da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. Na análise dos desvios da superfície real em relação à superfície geométrica (ideal, de projeto), distinguem-se os seguintes erros:

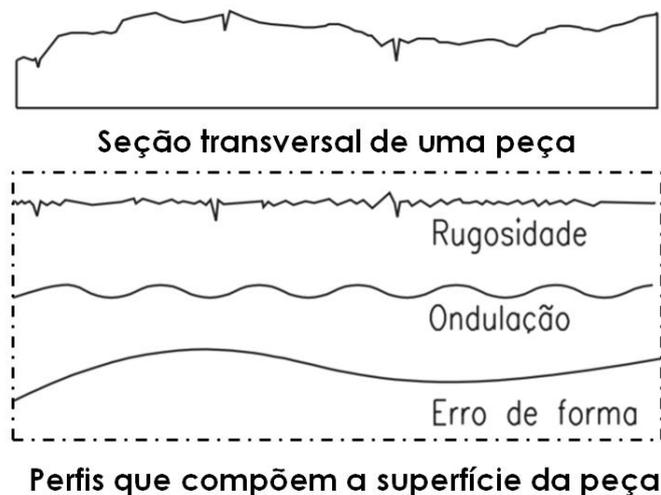
- Erros macrogeométricos ou erros de forma: que podem ser medidos com auxílio de instrumentos de medição convencionais (régua, paquímetro, micrômetro, etc.);
- Erros microgeométricos ou rugosidade: que só podem ser medidos com instrumentos especiais tais como rugosímetros, perfilógrafos, perfiloscópios e etc. Estes instrumentos podem ser óticos, a laser ou eletromecânicos.

Os erros microgeométricos possuem picos e vales que se repetem ao longo da superfície e se distribuem normalmente em forma tridimensional nas superfícies das peças, entretanto, para seu estudo é possível simplificar suas características a duas dimensões. Em outras palavras, é possível estudar o perfil real obtido mediante o processo de usinagem ou acabamento utilizado. Esta simplificação se justificada pelo fato de que experimentalmente tem-se comprovado que para texturas de caráter unidirecionais, o valor da rugosidade dependerá da direção escolhida para sua medição e alcançará seus valores máximos em um plano perpendicular à direção das marcas deixadas pela ferramenta de corte, a exemplo, no torneamento, no fresamento e inclusive na retificação. Para texturas multidirecionais, os

valores da rugosidade são usualmente independentes da direção de medição escolhida, como nos processos de lapidação e superacabamento, por exemplo.

Quando se mede a rugosidade, o instrumento mostrará o perfil composto da rugosidade e das ondulações, como ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Perfis de rugosidade, de ondulação e de erro de forma de uma superfície qualquer



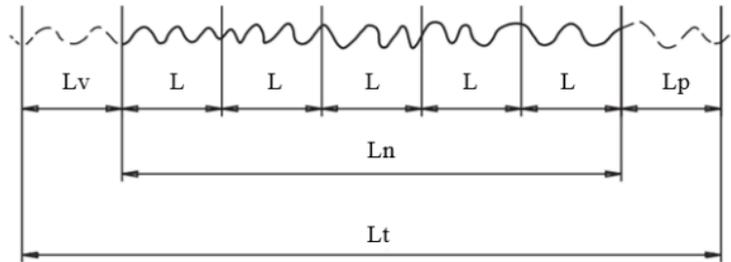
Fonte: Adaptado de Fundação Roberto Marinho (1996).

Para medição da rugosidade, através de instrumentos apalpadores, são utilizados filtros com a finalidade de separar o perfil de rugosidade do perfil da ondulação e dos demais desvios de forma. O comprimento de onda do filtro do instrumento apalpador, chamado de "cut-off", determina as frequências que devem ou não passar durante a medição de um comprimento de amostragem da superfície da peça. O sinal da rugosidade apresenta altas frequências e pequenos comprimentos de onda, enquanto as ondulações e demais erros de forma apresentam sinais com baixas frequências e altos comprimentos de ondas. Os rugosímetros apalpadores utilizam assim, filtros que deixam passar os sinais de altas frequência e eliminam os sinais de baixa frequências. Estes filtros são denominados filtro passa-alta.

A Figura 30 mostra os comprimentos típicos percorridos pela ponta do rugosímetro apalpador na medição de rugosidade de uma superfície. Deve-se escolher o valor do comprimento de onda *cut-off* igual ao comprimento de amostragem de rugosidade (aqui chamado de L). A norma NBR ISO 4288 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) adota como comprimento de avaliação de rugosidade (L_n) o valor referente a cinco comprimentos de amostragem (5L). A distância total (L_t) percorrida pelo

apalpador sobre a superfície da peça é composta pelo comprimento de avaliação de rugosidade (L_n), pelo comprimento referente ao percurso do apalpador até atingir a velocidade de medição (L_v) e pelo comprimento referente ao percurso do apalpador até a sua parada (L_p).

Figura 30 – Comprimentos percorridos pelo apalpador na medição de rugosidade

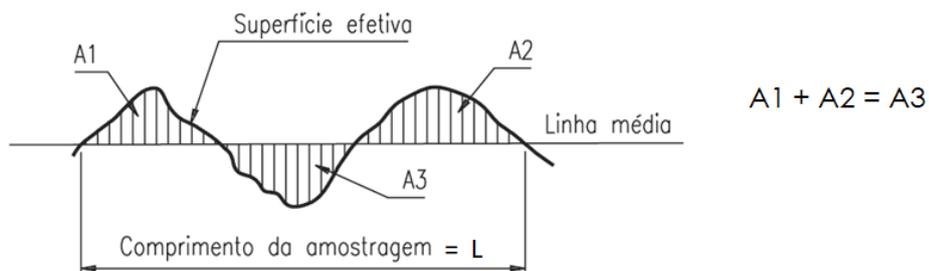


Fonte: Adaptado de Fundação Roberto Marinho (1996).

Para avaliar a rugosidade superficial são usados dois sistemas básicos: o da linha média M e o da envolvente E . O sistema da linha média é o mais utilizado no mundo todo, inclusive no Brasil. Alguns países utilizam os dois sistemas.

Segundo Agostinho, Rodrigues e Lirani (1977), no sistema da linha média (sistema M) todas as grandezas de medição da rugosidade são definidas a partir do conceito de **linha média**: linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem L . A Figura 31 ilustra graficamente a linha média.

Figura 31 – Linha média



Onde:

$A1$ e $A2$ = áreas acima da linha média

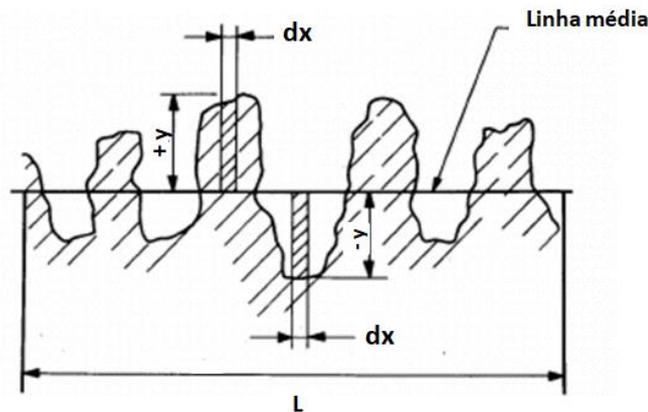
$A3$ = área abaixo da linha média

Fonte: Adaptado de Fundação Roberto Marinho (1996).

Indicando-se por ydx a área de uma faixa elementar, Figura 32, a área total dos picos (área acima da linha média) e vales (área abaixo da linha média), dentro de um comprimento L , será dada por:

$$A = \int_0^L |y| dx \quad (1)$$

Figura 32 – Determinação da linha média



Onde:
 dx é a largura de uma faixa elementar
 y é a altura de uma faixa elementar
 L é o comprimento de amostragem

Fonte: Adaptado de Agostinho; Rodrigues; Lirani (1977).

Os sistemas de medição, baseados na linha média, podem ser agrupados em três classes:

- Sistemas baseados na medida da profundidade da rugosidade;
- Sistemas baseados em medidas horizontais;
- Sistemas baseados em medidas proporcionais.

Neste trabalho, será adotado o desvio médio aritmético, ou rugosidade R_a , baseado na medida da profundidade da rugosidade, que é o parâmetro mais utilizado mundialmente, sendo aplicável à maioria dos processos de fabricação e, para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

O desvio médio aritmético R_a é obtido pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem L (Figura 30). É calculado pela expressão matemática:

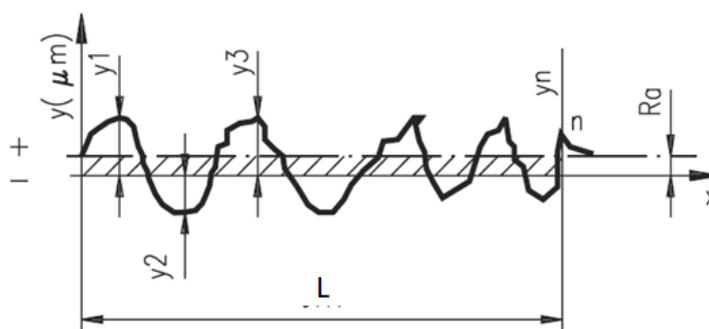
$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \quad (2)$$

Ou, conforme Figura 33, o desvio médio aritmético pode ser calculado aproximadamente por:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (3)$$

Onde n é o número de ordenadas consideradas.

Figura 33 – Desvio médio aritmético Ra



Onde:

y é a altura dos picos e vales

y1, y2, y3 e yn são as alturas dos picos e vales nos pontos 1, 2, 3 e n, respectivamente

L é o comprimento de amostragem

Fonte: Adaptado de Fundação Roberto Marinho (1996).

Segundo a norma NBR ISO 4288 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), quando a direção de medição não é especificada, a peça deve ser posicionada de forma que a direção da seção corresponda aos valores máximos das alturas dos parâmetros de rugosidade (Ra, por exemplo). Esta direção deverá ser normal à direção de usinagem da superfície a ser medida. Para superfícies isotrópicas, a direção da seção pode ser arbitrária.

As medições devem ser efetuadas na parte da superfície onde são esperados valores críticos; isto pode ser avaliado por inspeção visual. As diversas medições devem ser igualmente distribuídas sobre esta parte da superfície para se obterem resultados de medição independentes. Para se determinarem valores de parâmetros de perfil da rugosidade, deve-se primeiramente observar a superfície e decidir se o perfil da rugosidade é periódico (superfície torneada ou fresada, por exemplo) ou não periódico (superfície retificada ou lapidada, por exemplo). No caso específico deste trabalho, como as faces de vedação são lapidadas, estima-se o comprimento de amostragem através da Tabela 1, para perfis não periódicos, em função

do valor esperado da rugosidade Ra. Caso o valor médio das medições de rugosidade efetuadas esteja numa faixa diferente da estimada, repete-se o procedimento para a faixa de valores que contenha a rugosidade Ra obtida.

Tabela 1 – Comprimentos de amostragem de rugosidade para medições de Ra e parâmetros relacionados para perfis não periódicos (por exemplo, perfis lapidados)

Rugosidade Ra (μm)	Comprimento de amostragem L (mm)	Comprimento de avaliação Ln (mm)
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

Fonte: adaptado de ABNT (2008).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

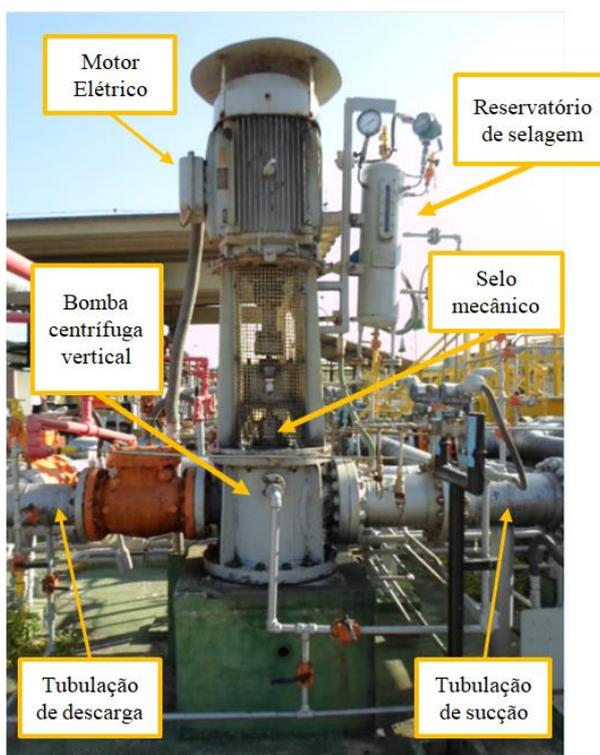
5.1 Apresentação dos Equipamentos

5.1.1 Bombas de GLP

Duas bombas são utilizadas na transferência de GLP das esferas de estocagem do Terminal Aquaviário da Transpetro, no Porto de Suape, para as distribuidoras de gás de cozinha da região (Liquigás, Brasilgás, Ultragaz e Supergasbras), operando em regime de revezamento (ficando uma bomba sempre em reserva), com vazão individual de 350 m³/h, pressão de sucção mínima de 0,36 MPa e máxima de 1,22 MPa, e pressão de descarga máxima de 1,63 MPa. As bombas da marca Whorthington são do tipo centrífugas, verticais, de 3 estágios, com sistema de selagem conforme plano API 61 (com reservatório de selagem não pressurizado, utilizando querosene de aviação como fluido de barreira). As bombas são acionadas por motores elétricos da marca WEG de 75 kW, 440 V, 60 Hz e 1.775 rpm com partida direta.

Uma das bombas é ilustrada na Figura 34. Ela é montada num poço de 4,98 m de profundidade e 480 mm de diâmetro. A tubulação de sucção possui diâmetro nominal de 254,0 mm e a de descarga 203,2 mm, ambas com classe de pressão de 2,07 MPa.

Figura 34 – Uma das bombas centrífugas verticais de GLP instalada na Transpetro



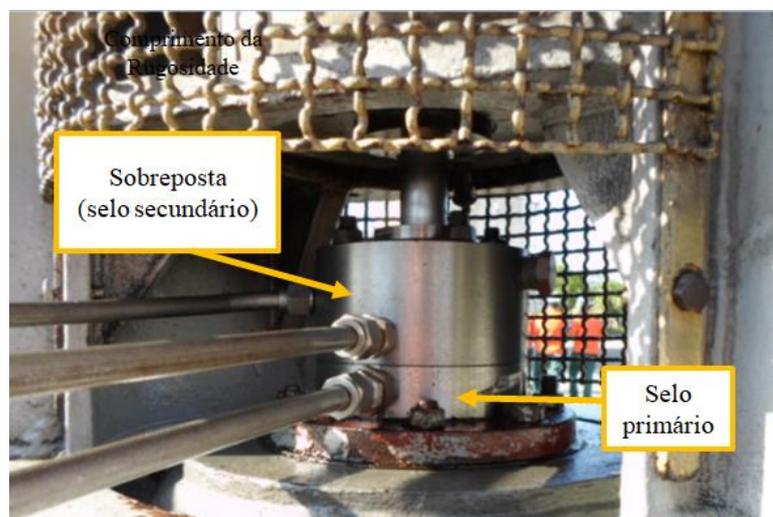
Fonte: O autor.

5.1.2 Selos mecânicos

Os selos mecânicos são de fabricação da AESSEAL, código API 3CW-FB BDTFN, do tipo duplo em cartucho, balanceados, com luva para eixo de 31,75 mm de diâmetro, com molas múltiplas, anéis “O” em Viton® e EPM, faces de vedação rotativas em carbeto de silício sinterizado por reação (RbSiC) e faces estacionárias em carbono impregnado com antimônio. O selo mecânico possui diâmetro externo de 140 mm e comprimento de 118 mm, conforme Anexo A, que apresenta o desenho em corte do selo montado no eixo da bomba.

A Figura 35 mostra o selo mecânico instalado em uma das bombas de GLP da Transpetro, no Porto de Suape. A parte inferior é o selo primário ou interno, que contém o par de faces de vedação que entra em contato com o produto. A parte superior é a sobreposta (selo secundário ou externo), que também possui um segundo par de faces de vedação responsáveis por impedir o vazamento do fluido de barreira.

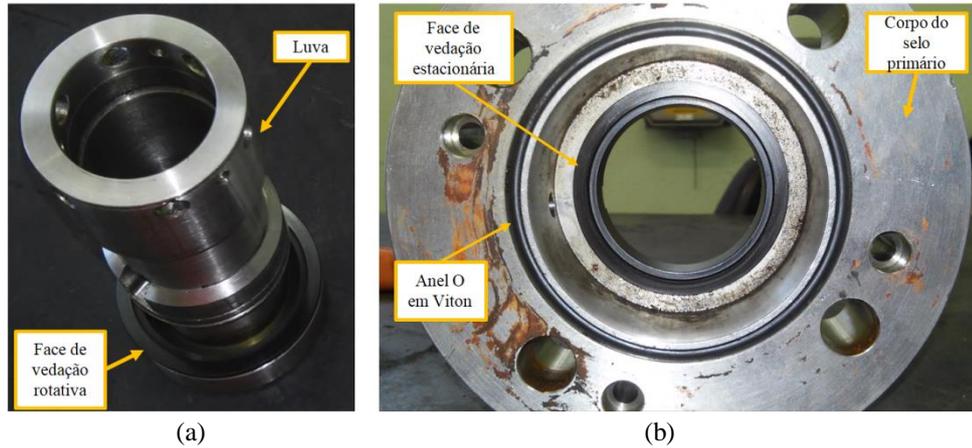
Figura 35 – Selo mecânico instalado em uma das bombas centrífugas verticais de GLP



Fonte: O autor.

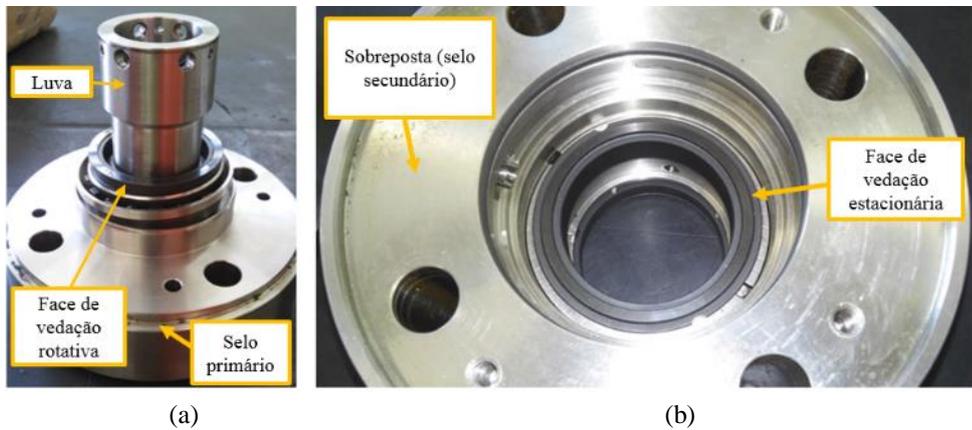
As Figuras 36 e 37 mostram as diversas partes do selo mecânico a ser recuperado, após desmontagem para avaliação dos seus elementos de vedação. As faces de vedação encontram-se em seus alojamentos. A Figura 36 (a) exhibe a face de vedação rotativa do no alojamento inferior da luva e a Figura 36 (b) exhibe a face de vedação estacionária no alojamento do selo primário. A Figura 37 (a) exhibe a luva montada no selo primário e a segunda face de vedação rotativa no alojamento da luva. A Figura 37 (b) exhibe a face de vedação estacionária no alojamento da sobreposta (selo secundário).

Figura 36 – Luva e componentes do selo primário (selo interno) de uma das bombas de GLP



Fonte: O autor.

Figura 37 – Luva montada no selo primário e demais componentes do selo secundário (selo externo) de uma das bombas de GLP



Fonte: O autor.

As faces de vedação rotativa e estacionária do selo primário, exibidas na Figura 38, e a face rotativa do selo secundário possuem diâmetro externo de 57,5 mm, diâmetro interno de 49,5 mm e altura de 14,0 mm. A face estacionária do selo secundário possui uma superfície de contato de vedação mais estreita, com diâmetro externo de 55,2 mm e interno de 49,6 mm, e altura total de 13,5 mm.

Figura 38 – Face rotativa em SiC (esquerda) e face estacionária em carvão com antimônio (direita) do selo primário (selo interno)



Fonte: O autor.

5.2 Métodos e Instrumentação Utilizada

Foram medidas a planeza e a rugosidade Ra de 8 faces de vedação (4 rotativas e 4 estacionárias) de 2 selos mecânicos empregados em bombas centrífugas verticais de GLP, antes e após o processo de recuperação por lapidação mecanizada e manual.

Esses dois selos apresentaram vazamento e foram recuperados para ficarem no estoque de selos sobressalentes. As lapidações mecanizadas foram executadas nas instalações da empresa Só Vedações, no município de Recife, e as lapidações manuais foram realizadas por um único técnico na oficina de manutenção da Transpetro no Porto de Suape, município de Ipojuca.

Na lapidação e polimento das faces de vedação foram aplicadas pastas abrasivas, constituídas de pó de diamante sintético, que agregado a um veículo pastoso mantém o diamante em suspensão. Estas pastas são comercializadas em seringas com capacidade de 5 gramas.

Na lapidação mecanizada foram utilizadas pastas diamantadas da marca Dinser, com granulometria de 20 μm a 40 μm , 10 μm a 15 μm e 8 μm a 12 μm para as etapas de lapidação e 4 μm a 8 μm para polimento.

Na lapidação manual foram utilizadas pastas diamantadas da marca Christensen Roder, sendo as pastas JP-15 (tamanho das partículas de 10 μm a 20 μm), JP-9 (6 μm a 12 μm) e JP-4 (3 μm a 6 μm) para a operação de lapidação, e as pastas JP-1 (0 μm a 2 μm) e JP-1/4 (0 μm a 0,5 μm) para polimento. As pastas JP-15 e JP-9 também foram utilizadas para lapidação das superfícies dos discos de lapidação.

Para superfícies muito irregulares, que necessitem de uma maior remoção de material, podem ser utilizadas pastas com granulometria superior a 40 μm .

Dentre as diversas formas existentes para avaliação da planeza e da rugosidade superficial das faces de vedação, foram utilizadas neste trabalho as disponíveis no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, sendo: uma máquina de medição por coordenadas do Laboratório de Medição por Coordenadas, um rugosímetro digital, um microscópio ótico e um microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Microscopia e Análise Macroestrutural. Além da fonte de luz monocromática de sódio, pertencente à empresa Só Vedações, para avaliação da planeza.

Foi comparada a qualidade da lapidação realizada de forma manual e de forma mecanizada, em lapidadora plana, com o objetivo de aprovar ou rejeitar o procedimento de lapidação manual desenvolvido na Transpetro. Também foram comparados os métodos de

medição de planeza através de franjas de interferência e de máquina de medição por coordenadas.

5.2.1 Recuperação de selos mecânicos

A norma API 682, que trata dos sistemas de selagem de eixos para bombas centrífugas e rotativas, não traz nenhuma recomendação quanto ao procedimento de recuperação de faces de vedação de selos mecânicos, apenas quanto aos valores limite de rugosidade dos alojamentos das vedações secundárias (elastômeros) e de desvios geométricos do selo em relação à carcaça da bomba e eixo (concentricidade e excentricidade). A norma API 682 também preconiza o procedimento de teste de pressão do selo mecânico, a fim de atestar a sua aprovação para uso.

Como foi visto no capítulo de revisão bibliográfica, dois fatores geométricos são determinantes para a garantia de estanqueidade de uma face de vedação: a rugosidade e planeza das superfícies de contato entre o par de faces de vedação. Garantindo os menores valores destas duas grandezas, obter-se-á faces de vedação quase que perfeitamente estanques.

Neste trabalho serão analisadas a recuperação das faces de vedação em SiC e carbono com antimônio, de selos mecânicos descritos no item 5.1, através de lapidação mecanizada e manual.

5.2.2 Lapidação mecanizada

Para a lapidação mecanizada das faces de vedação, foi utilizada uma lapidadora plana (Figura 39), de fabricação desconhecida (plaqueta removida), acionada por motor elétrico, temporizada, pertencente à empresa Só Vedações em Recife, Pernambuco. Esta máquina possui um disco de lapidação metálico com diâmetro externo de 400 mm e superfície plana (planeza geralmente inferior a 4 μm), que gira em torno do próprio eixo a uma velocidade constante de 60 rpm.

A lapidadora plana possui três anteparos para anel dressador (anel de acondicionamento da peça e ajuste da superfície do disco), permitindo a lapidação simultânea de até três faces de vedação, desde que estas sejam do mesmo material. Os pesos (cargas), na forma de discos, para colocação sobre as peças a serem lapidadas possuem massa de aproximadamente 2,0 kg.

Figura 39 – Lapidadora plana



Fonte: O autor.

A recuperação de selos mecânicos realizada nas instalações da empresa Só Vedações passa por diversas etapas, conforme descrito a seguir:

a) Desmontagem do selo mecânico

O selo é desmontado para posterior limpeza. Um exame visual prévio é realizado para identificar danos e desgastes nas faces de vedação e demais componentes do selo. As vedações secundárias (elastômeros) geralmente são descartadas.

b) Limpeza

Os componentes do selo mecânico são colocados na máquina de limpeza por ultrassom da Setecsom (Figura 40), modelo 1027-01 de 1200 W, com controle de temperatura, imersos em banho de desengraxante ou solvente. O bombardeio de ondas ultrassônicas auxilia na remoção da sujeira impregnada nas peças. O tempo de permanência das peças na máquina de limpeza varia de acordo com o nível de sujeira.

Figura 40 – Máquina de limpeza por ultrassom



Fonte: O autor.

c) Exame visual das faces de vedação

As faces que apresentarem trincas e fraturas são descartadas.

d) Lapidação das faces de vedação

As faces de vedação são colocadas sobre o disco de lapidação da lapidadora plana (Figura 41). Anéis de acondicionamento das faces (anéis dressadores) são colocados sobre o disco, que giram em torno do seu próprio eixo devido aos anteparos com roletes que impedem o seu deslocamento radial. As faces de vedação são colocadas dentro dos anéis de acondicionamento e sobre as faces coloca-se um peso (disco metálico) como carga para obtenção de uma boa razão de desgaste do material. Nas faces em SiC é aplicada uma camada de pasta abrasiva com granulometria de 20 μm a 40 μm , para o primeiro estágio de lapidação, seguida de pasta abrasiva de 10 μm a 15 μm para o segundo estágio de lapidação e de 6 μm a 12 μm para o polimento. Para faces em carbono, geralmente não se utiliza pasta abrasiva, apenas gotejamento de álcool para facilitar a remoção de partículas. Caso as faces em carbono apresentem irregularidades profundas, pastas abrasivas são utilizadas para aumentar a taxa de remoção de material durante a lapidação.

Figura 41 – Lapidadora plana durante lapidação de uma das faces de vedação



Fonte: O autor.

O tempo médio para lapidação e polimento de faces varia de acordo com o material de fabricação e a condição da superfície. As faces em carbetto de silício levam em média 30 minutos para se atingir um nível aceitável de planeza correspondente a 3 franjas de interferência. Para faces em carvão, que possuem menor dureza, o tempo é conseqüentemente menor, ficando em torno de 15 minutos.

e) Verificação da planeza

Através da verificação de franjas de interferência geradas por uma fonte de luz monocromática de sódio, onde quanto menor a quantidade de bandas melhor será a planeza da superfície avaliada. Caso a planeza esteja acima de 3 franjas, a face de vedação é relapida. A fonte utilizada é da marca Kemet, com lâmpada de sódio, tensão de 220/240 V e frequência de 50/60 Hz e o disco óptico Kemet, possui diâmetro de 150 mm e altura de 26 mm. Ambos são mostrados na Figura 42.

Figura 42 – Fonte de luz monocromática e disco óptico



Fonte: O autor.

f) Remontagem do selo mecânico

Todos os componentes do selo são limpos e montados cuidadosamente, comprimindo-se as molas contra as faces de vedação. Esta é a etapa mais crítica, pois pode resultar em trincas ou fraturas das faces de vedação.

g) Teste de estanqueidade do selo mecânico

Realizado com auxílio de uma bomba hidráulica manual, do tipo pistão, e um manômetro, onde os componentes internos do selo são pressurizados com água doce a uma pressão igual à de operação do selo, durante 5 minutos. De acordo com a norma API 682, é tolerável uma queda de pressão de até 0,014 MPa.

5.2.3 Lapidação manual

5.2.3.1 Lapidação manual em oficina da Petrobras

Foi realizada uma visita às instalações da oficina de recuperação de selos mecânicos na Refinaria Potiguar Clara Camarão, situada no Polo Industrial Petrobras de Guamaré, no estado do Rio Grande do Norte. O objetivo desta visita foi conhecer o processo e recursos

utilizados na lapidação manual de selos mecânicos para as bombas e compressores da planta industrial.

Nesta unidade industrial, os selos mecânicos e suas faces de vedação são maiores que os selos estudados neste trabalho, mas as informações fornecidas pela equipe técnica local podem ser aplicadas à lapidação de qualquer tipo de selo.

Para a operação de lapidação, é utilizado um disco com superfície ranhurada (ranhuras concêntricas) e planeza de 30 μm (Figura 43 (a)). Na operação de polimento, é utilizado um disco com superfície lisa e planeza de 6 μm (Figura 43 (b)). Para lapidação de faces de vedação fabricadas em materiais dúcteis, como carbono (carvão), é utilizado apenas o disco de 6 μm .

Figura 43 – Disco para lapidação manual com planeza de 30 μm (a) e 6 μm (b)



Fonte: O autor.

As pastas abrasivas empregadas na lapidação das faces são a JP-15, JP-9, JP-4 e JP-1, obtendo-se planezas aceitáveis e equivalentes a 4 ou 5 franjas de interferência.

O tempo médio gasto para lapidação de faces vedação em carbeto de tungstênio ou de silício pode chegar a 16 horas, dependendo das dimensões da peça. Para faces em carbono o tempo médio pode chegar a 8 horas de trabalho.

5.2.3.2 Lapidação manual em oficina da Transpetro

Com o intuito de aproveitar os recursos disponíveis na oficina mecânica da Transpetro em Suape e a experiência do técnico de lapidação de sede de válvulas de segurança, foram realizados testes para a aprovação e desenvolvimento de um procedimento interno para lapidação das faces de vedação dos selos das bombas de GLP.

Foram empregados dois discos de lapidação em ferro fundido nodular com diâmetro de 200 mm e altura de 20 mm, fabricados por torneamento e lapidados um contra o outro com

pasta abrasiva JP-15 e JP-9. Um dos discos foi utilizado para execução da lapidação das faces de vedação na oficina da Transpetro e o segundo disco foi utilizado apenas para promover a relapidação do primeiro após a lapidação das quatro faces de vedação do selo mecânico.

A Figura 44 exhibe os dois discos de lapidação. Um dos discos foi preso numa morsa de bancada enquanto o segundo, móvel, foi utilizado na lapidação manual de ambos. Espalhando-se pasta abrasiva e algumas gotas de água na superfície do disco fixo, para facilitar o deslizando do disco móvel, o operador executa movimentos circulares com o disco móvel em torno do centro do disco fixo.

Figura 44 – Lapidação dos discos de lapidação manual



Fonte: O autor.

Todas as faces de vedação foram lapidadas inicialmente com a pasta abrasiva JP-9, seguidas de polimento com pasta JP-4, JP-1 e/ou JP-1/4, sobre papel alcalino comercial, tamanho A4, de 75 g/m².

Medições de planeza e rugosidade foram realizadas, separadamente, em faces de vedação polidas apenas com pasta abrasiva JP-1, e em faces polidas com pasta JP-1 e JP-1/4.

Abaixo são descritas as etapas para lapidação das faces de vedação em carbono e em carbetto de silício:

a) Limpeza

Lavar bem as mãos e limpar as superfícies do disco de lapidação, das faces e base de apoio com álcool etílico.

b) Lapidação

O disco de lapidação deve ficar apoiado sobre uma mesa com superfície nivelada e rígida ou sobre um bloco de desempenho de granito (Figura 45).

Aplicar pasta abrasiva na superfície da face de vedação a ser lapidada e na superfície do disco de lapidação. A pasta diamantada é espalhada sobre a superfície do disco com auxílio dos dedos da mão.

Inicia-se o desbaste com pasta abrasiva de maior granulometria, JP-15 ou JP-9, de acordo com o nível de irregularidades observadas a olho nu na superfície a ser lapidada. Realizam-se movimentos circulares em torno do próprio eixo da peça, pressionando-se a face de vedação contra o disco de lapidação com a mão, até se obter uma superfície regular, sem riscos e sem áreas não desbastadas. O desbaste final é realizado com pasta JP-9 para garantir uma melhor planeza da superfície da face de vedação.

Figura 45 – Lapidação manual de faces de vedação na oficina da Transpetro



Fonte: O autor.

A cada 3 minutos, verifica-se a qualidade do desbaste, limpando-se a face de vedação com auxílio de papel absorvente embebido em álcool etílico e examinando visualmente a superfície lapidada. Para continuar com o processo de desbaste aplica-se mais pasta abrasiva na superfície da face de vedação.

A cada mudança de pasta, devem-se limpar com álcool etílico as superfícies da face de vedação e do disco de lapidação, para aplicação da pasta com granulometria diferente da anterior.

c) Polimento

A operação de polimento é realizada apoiando-se uma folha de papel A4 sobre o disco de lapidação ou mesa de desempenho de granito (Figura 46).

Aplica-se a pasta JP-4 sobre a superfície da face de vedação e do papel A4, espalhando bem com auxílio dos dedos da mão, e realizam-se movimentos rápidos descrevendo uma trajetória em formato de “8”, exercendo-se menor pressão com a mão, por aproximadamente 3 minutos.

Figura 46 – Polimento manual de faces de vedação na oficina da Transpetro



Fonte: O autor.

Em seguida realiza-se a limpeza da superfície da face e do disco de lapidação. Aplica-se a pasta JP-1 ou JP-1/4 na superfície da face de vedação e no papel A4, espalhando bem com auxílio dos dedos da mão e realizam-se movimentos rápidos descrevendo uma trajetória em formato de “8”, exercendo-se menor pressão com a mão (Figura 47).

Figura 47 – Polimento manual de faces de vedação na oficina da Transpetro



Fonte: O autor.

A cada 3 minutos, verifica-se a qualidade do acabamento, limpando-se a face de vedação com auxílio de papel higiênico embebido em álcool etílico e examinando visualmente a superfície lapidada. Para continuar com o processo de acabamento aplica-se mais pasta abrasiva na face de vedação. Este processo é repetido até que se obtenha uma superfície mais espelhada possível.

O tempo médio final de lapidação e polimento é:

- Faces em carbono impregnado com antimônio: 30 minutos;
- Faces em RbSiC: 60 minutos.

5.2.4 Medição da planeza em máquina de medição por coordenadas

Para medição da planeza das faces de vedação foi utilizada uma Máquina de Medição por Coordenadas com controle numérico computadorizado, Figura 48, modelo CRYSTA C 574, fabricação MITUTOYO, certificado de calibração 03206/13, e ponta de rubi com diâmetro de aproximadamente 1,0 mm.

Antes da medição da planeza de cada face de vedação, o plano de referência era criado na superfície da peça escolhendo-se 6 pontos aleatórios e aproximadamente equidistantes a fim de definir uma origem para as medições seguintes.

Figura 48 – Máquina de medição por coordenadas



Fonte: O autor.

Foram realizadas três medições de planeza na superfície de vedação de cada uma das faces dos selos, tomando-se três circunferências imaginárias, sendo uma interna (próximo à borda interna), uma intermediária e uma externa (próximo à borda externa), escolhendo-se 6 pontos aleatórios e aproximadamente equidistantes em cada uma delas, conforme ilustração da Figura 49. As faces de vedação foram fixadas à mesa da MMC com auxílio de massa de calafetar ou similar. As faces de vedação foram medidas em laboratório climatizado com temperatura em 20°C.

Figura 49 – Ilustração dos pontos de medição de planeza na superfície da face de vedação



Fonte: O autor.

Para os cálculos de incerteza de medição foram consideradas as seguintes fontes de incerteza: repetitividade; resolução da máquina; máquina; variação da temperatura de medição.

A Figura 50 mostra a medição da planeza na MMC e a fixação de uma das faces com massa de calafetar.

Figura 50 – Medição de planeza das faces de vedação na MMC



Fonte: O autor.

5.2.5 Medição de rugosidade superficial

Para medição da rugosidade superficial das faces de vedação foi utilizado um rugosímetro de superfície digital portátil, modelo RP-200, fabricação INSTRUTHERM, e um padrão de rugosidade fabricação MITUTOYO, código 178-602, com Ra de 2,9 μm . A Figura 51 mostra o rugosímetro durante uso do padrão MITUTOYO para sua verificação e ajuste.

Figura 51 – Rugosímetro digital e padrão de rugosidade



Fonte: O autor.

Antes de iniciar a medição da rugosidade superficial das faces de vedação dos selos mecânicos, o rugosímetro digital era calibrado com auxílio do padrão de rugosidade, fazendo-se os ajustes necessários (compensações, nivelamento).

Para medição da rugosidade das faces de vedação foram realizadas 12 medições aleatórias e aproximadamente equidistantes na superfície lapidada, na direção tangencial, conforme pode ser observado na Figura 52.

Figura 52 – Rugosímetro digital durante medição de uma das faces de vedação



Fonte: O autor.

Para os cálculos de incerteza de medição foram consideradas as seguintes fontes de incerteza: repetitividade; resolução do rugosímetro; o próprio instrumento; variação da temperatura de medição.

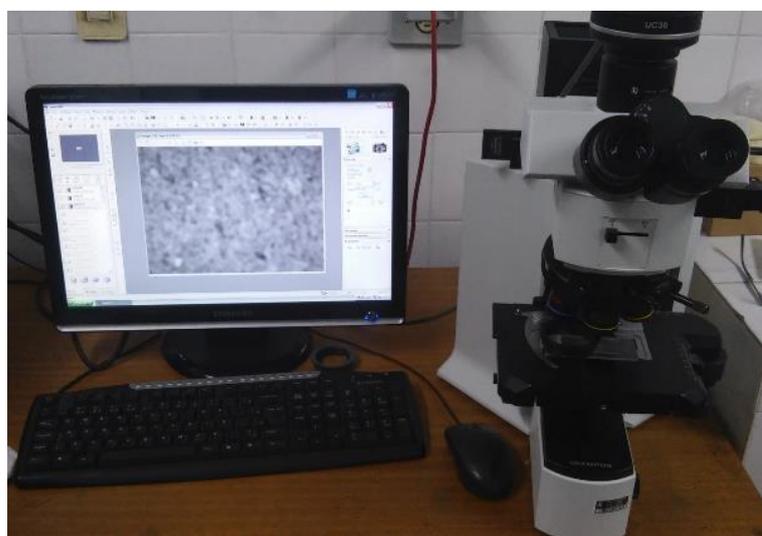
De acordo com a norma NBR ISO 4288, o comprimento *cut-off* adotado foi de 0,25 mm, totalizando um comprimento de avaliação de 1,25 mm para rugosidades esperadas no intervalo de $0,02 \mu\text{m} < Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$. O comprimento *cut-off* foi configurado no rugosímetro em 0,8 mm para os valores obtidos no intervalo de $0,1 < Ra \leq 2 \mu\text{m}$.

5.2.6 Análise da superfície através de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura

Com o objetivo de comparar o estado da superfície das faces de vedação antes e após a lapidação mecanizada e manual, foi avaliada uma única região de cada face de vedação através de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na MO foi utilizado um microscópio óptico com luz polarizada (Figura 53) modelo BX51M, fabricação OLYMPUS, com *software* analySIS versão 5.1. Na MEV foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (Figura 54), modelo TM 3000, fabricação HITACHI, *software* TM 3000 versão 2.01.0001, equipado com detector de energia dispersiva de raio X (EDS) e *software* Bruker QUANTAX 70 para identificação dos elementos químicos das faces de vedação.

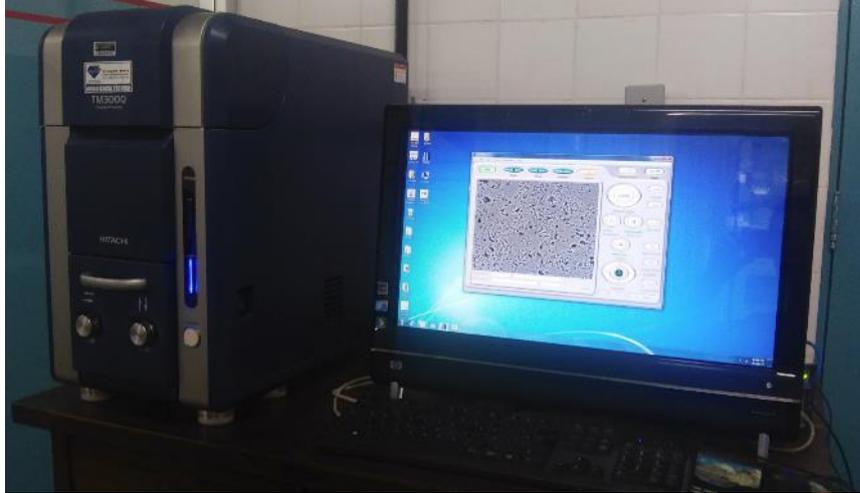
Na microscopia eletrônica, além do modo normal, foi utilizado o recurso de modo topográfico para avaliar o relevo da superfície das faces de vedação, antes e após a lapidação.

Figura 53 – Microscópio óptico OLYMPUS, modelo BX51M



Fonte: O autor.

Figura 54 – Microscópio eletrônico de varredura HITACHI, modelo TM 3000



Fonte: O autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um total de 8 faces de vedação de 2 selos mecânicos foram utilizadas para a realização das lapidações manuais e mecanizadas. Sendo que as 4 faces do selo 1 foram lapidadas apenas de forma mecanizada, uma vez que a recuperação deste selo foi realizada por empresa terceirizada, não sendo permitida a sua desmontagem para lapidação manual das faces, devido à perda de garantia do serviço externo de lapidação.

Essas faces foram codificadas em função do número do selo (S1 e S2) e da ordem de montagem de cada face no selo (F1, F2, F3 e F4), resultando na combinação de algarismos alfanuméricos (S1F1, S1F2, S1F3, S1F4, S2F1, S2F2, S2F3 e S2F4).

6.1 Comparação da Avaliação da Planeza através de MMC e Franjas de Interferência

A Tabela 2 apresenta os resultados das medições de planeza pela observação de franjas de interferência e pela utilização de máquina de medição por coordenadas, nas quatro faces do selo mecânico 1 (S1), antes e após o processo de lapidação mecanizada. Cada franja equivale a uma tolerância de planeza de aproximadamente $0,29 \mu\text{m}$.

Tabela 2 – Resultados da medição de planeza por MMC e franjas de interferência de faces de vedação do selo 1 lapidadas mecanicamente

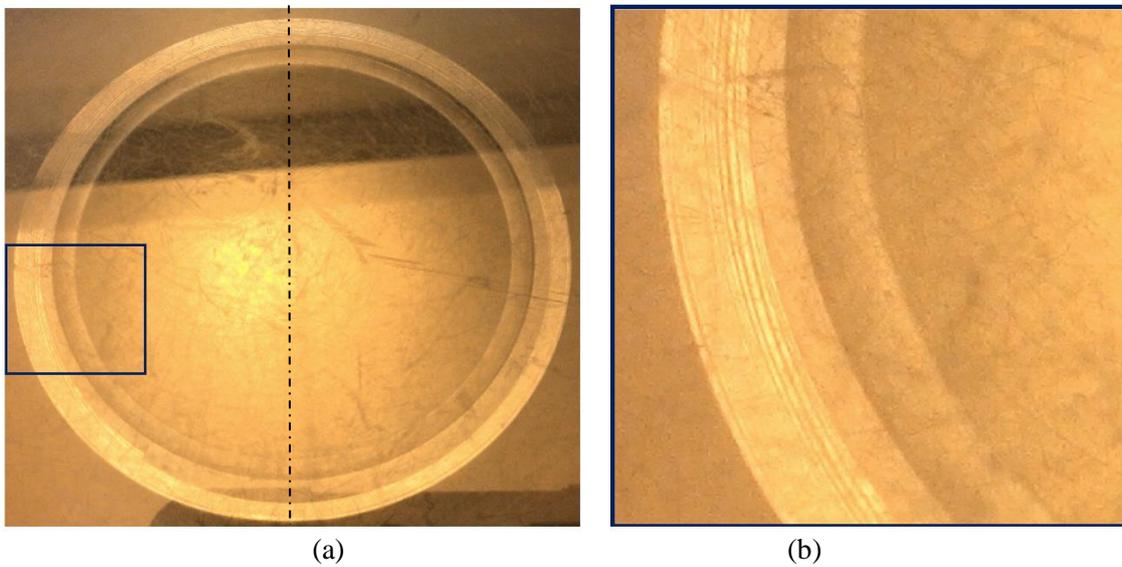
Selo e faces de vedação	Material	Resultado da medição antes da lapidação		Resultado da medição após lapidação mecanizada	
		Planeza na MMC (μm) _{95%}	Franjas de interferência	Planeza na MMC (μm) _{95%}	Franjas de interferência
S1F1	RbSiC	$1,97 \pm 0,96$	incontáveis	$0,30 \pm 0,06$	2
S1F2	Carbono+Sb	$12,80 \pm 1,19$	imperceptíveis	$1,03 \pm 0,09$	3 a 4
S1F3	RbSiC	$0,27 \pm 0,07$	1	$0,33 \pm 0,09$	2
S1F4	Carbono+Sb	$0,33 \pm 0,03$	1 a 2	$0,30 \pm 0,06$	2

Pode-se concluir que os dois métodos de medição de planeza apresentaram resultados coerentes antes e após a lapidação, porém as faces que apresentaram uma planeza igual ou superior a quatro franjas tornam-se difíceis de visualizar devido à pequena área das superfícies de vedação das faces, formando franjas de pequena largura e muito próximas umas das outras. As faces S1F3 e S1F4 não precisariam ter sido relapidadas pois já apresentavam uma pequena tolerância de planeza que não foi superada após a lapidação. Outra observação a ser relatada é a de que se a espessura da cunha de ar existente entre as superfícies do disco

óptico e a face de vedação não corresponder exatamente a um número ímpar de meios comprimentos de onda ($\lambda/2$), podem surgir franjas parciais que estarão entre duas faixas de planeza, como na quantidade de franjas observadas nas faces S1F2 e S1F4. Quando isto ocorrer, para ser mais conservador na avaliação, deve-se considerar a maior quantidade de franjas parciais visualizadas, o que representa um valor maior de planeza.

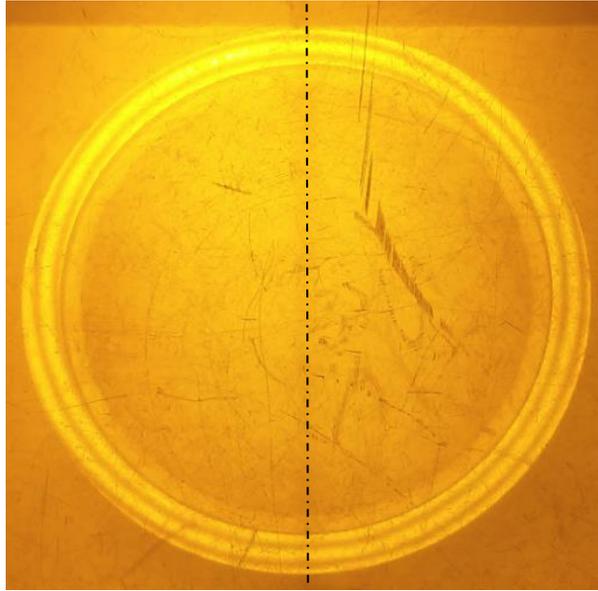
Na fotografia da figura 55 (a) é possível observar a dificuldade na visualização da quantidade de franjas na superfície da face S1F1, antes da lapidação. A ampliação sem escala da região em destaque é exibida na Figura 55 (b), destacando diversas franjas concêntricas e delgadas. Já a Figura 56 exibe claramente duas franjas concêntricas na superfície da face S1F1, após esta ter sido corretamente lapidada.

Figura 55 – Fotografia das franjas de interferência na face S1F1 (a), antes da lapidação, e ampliação da região destacada para visualização de inúmeras franjas concêntricas e delgadas (b).



Fonte: O autor.

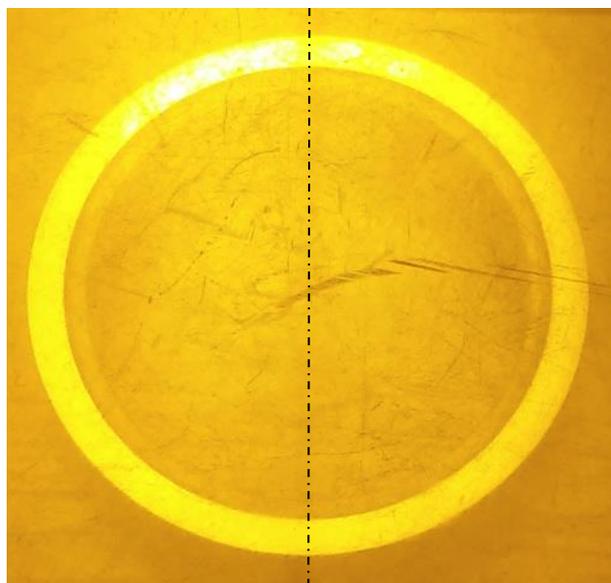
Figura 56 – Fotografia das franjas concêntricas após lapidação da face S1F1



Fonte: O autor.

A fotografia da Figura 57 ilustra a impossibilidade de mensurar a quantidade de franjas de interferência na superfície da face S1F2 antes da lapidação. Pessoas não habituadas com esta técnica podem até julgar equivocadamente que a superfície é perfeitamente plana pois não é possível identificar nenhuma franja, quando na verdade existem diversas franjas vizinhas e de pequena largura. A acuidade visual e experiência são indispensáveis para que não sejam cometidos erros na técnica de medição de planeza por franjas de interferência.

Figura 57 – Fotografia das inúmeras franjas invisíveis a olho nu na face S1F2



Fonte: O autor.

6.2 Avaliação dos Métodos de Lapidagem Manual

A Tabela 3 apresenta os resultados de medição de planeza através da MMC e de rugosidade superficial, para faces de vedação lapidadas manualmente com pasta abrasiva JP-9 e polidas com pasta JP-4 e JP-1 em papel alcalino comercial, tamanho A4, de 75 g/m².

Tabela 3 – Resultados da medição de planeza e rugosidade superficial de faces de vedação do selo 2 lapidadas manualmente com pasta JP-1

Selo e face de vedação	Material	Resultado da medição antes da lapidação		Resultado da medição após lapidação manual	
		Planeza na MMC (μm) _{95%}	Rugosidade Ra (μm) _{95%}	Planeza na MMC (μm) _{95%}	Rugosidade Ra (μm) _{95%}
S2F1	RbSiC	0,47 ± 0,03	0,0396 ± 0,0031	0,33 ± 0,08	0,0854 ± 0,0032
S2F2	Carbono+Sb	9,93 ± 1,78	0,0425 ± 0,0040	2,57 ± 0,59	0,0966 ± 0,0034
S2F3	RbSiC	1,87 ± 0,12	0,0221 ± 0,0012	0,40 ± 0,15	0,0342 ± 0,0029
S2F4	Carbono+Sb	2,43 ± 0,24	0,0255 ± 0,0026	1,83 ± 0,36	0,0468 ± 0,0023

Como os valores de rugosidade superficial das faces de vedação aumentaram após lapidação manual e polimento com pasta JP-1, foram realizados testes de polimento utilizando pasta abrasiva JP-1/4, de menor granulometria, enquanto as faces eram polidas manualmente com um pano macio ao invés de papel, sobre a superfície do disco (Figura 58). Os resultados deste teste estão exibidos na Tabela 4.

Figura 58 – Polimento manual de faces de vedação com pasta JP-1/4



Fonte: O autor.

Tabela 4 – Resultados da medição de planeza e rugosidade superficial de faces de vedação do selo 2 lapidadas manualmente com pasta JP-1 e relapidadas com pasta JP-1/4

Selo e face de vedação	Material	Resultado da medição após lapidação com pasta JP-1		Resultado da medição após relapidação com pasta JP-1/4	
		Planeza na MMC (μm) _{95%}	Rugosidade Ra (μm) _{95%}	Planeza na MMC (μm) _{95%}	Rugosidade Ra (μm) _{95%}
S2F1	RbSiC	0,33 ± 0,08	0,0854 ± 0,0032	0,53 ± 0,18	0,0867 ± 0,0037
S2F2	Carbono+Sb	2,57 ± 0,59	0,0966 ± 0,0034	0,83 ± 0,09	0,1118 ± 0,0055
S2F3	RbSiC	0,40 ± 0,15	0,0342 ± 0,0029	0,33 ± 0,03	0,0688 ± 0,0023
S2F4	Carbono+Sb	1,83 ± 0,36	0,0468 ± 0,0023	1,20 ± 0,15	0,0279 ± 0,0015

De acordo com os dados obtidos acima, é possível observar que após lapidação e polimento com a pasta JP-1/4 a planeza e rugosidade melhoraram, tanto para faces de vedação em carbeto de silício quanto para as faces em carbono impregnado com antimônio. Os valores de planeza e rugosidade das faces S2F1 e S2F3, após relapidação com pasta JP-1/4, mantiveram-se próximos dos valores obtidos inicialmente com a pasta JP-1, ou seja, estas faces não precisariam ter sido relapidadas. A face S2F4 poderia ter sido lapidada novamente com a pasta JP-1 ou JP-1/4 para se obter uma planeza inferior a 1 μm . Pode-se concluir então que ambas as pastas abrasivas são satisfatórias na lapidação de faces de vedação e que a utilização da pasta JP-1/4 não representa uma garantia na melhora do acabamento superficial quando comparada à pasta JP-1.

O disco em ferro fundido nodular utilizado para lapidar 2 faces em carbono impregnado com antimônio e 2 faces em RbSiC apresentou os valores de planeza contidos na Tabela 5. O disco foi inicialmente lapidado com pasta JP-15 e JP-9. O resultado da medição da rugosidade superficial na área utilizada para lapidação das faces foi de $(0,2929 \pm 0,0259)_{95\%}$ μm , após a lapidação das 4 faces.

Tabela 5 – Resultados da medição de planeza da superfície do disco de lapidação, antes e após sua utilização

Resultado da medição de planeza na MMC (μm) _{95%}	
Antes da lapidação de faces	Após lapidação de faces
0,95 ± 0,25	1,05 ± 0,25

Com estes resultados é possível concluir que há desgaste na superfície do disco de lapidação, após a lapidação de dois pares de faces, sendo necessário, portanto, a relapidação do disco antes de se iniciar a lapidação de outras faces, a fim de que possíveis irregularidades na superfície do disco não comprometam a planeza das faces a serem lapidadas.

6.3 Comparação entre a Lapidação Mecanizada e Manual

A Tabela 6 exibe os valores médios mínimos de planeza e rugosidade Ra, obtidos na lapidação manual e mecanizada das faces de vedação do selo 2, durante a realização deste trabalho. Algumas faces de SiC e de carbono impregnado com antimônio foram relapidadas manualmente mais de uma vez, utilizando-se pasta abrasiva JP-9 para lapidação, pasta JP-4 para polimento inicial e pastas JP-1 e JP-1/4 para polimento final, com o objetivo de se atingir os menores valores possíveis de planeza e rugosidade.

Tabela 6 – Valores médios mínimos da planeza e rugosidade superficial obtidos nos processos de lapidação mecanizada e manual

Material da face de vedação	Lapidação mecanizada		Lapidação manual e polimento com pasta JP-1		Lapidação manual e polimento com pasta JP-1/4	
	Planeza na MMC (μm)	Rugosidade Ra (μm)	Planeza na MMC (μm)	Rugosidade Ra (μm)	Planeza na MMC (μm)	Rugosidade Ra (μm)
RbSiC	0,30	0,0320	0,33	0,0342	0,33	0,0688
Carbono+Sb	0,30	0,0593	1,17	0,0264	0,67	0,0279

Para auxiliar a visualização dos dados da Tabela 6, foram gerados os gráficos das Figuras 59 e 60, que exibem os valores médios mínimos de planeza e rugosidade Ra, respectivamente.

Figura 59 – Gráfico dos valores médios mínimos da planeza de faces em RbSiC e carbono impregnado com antimônio, após lapidação mecanizada e manual

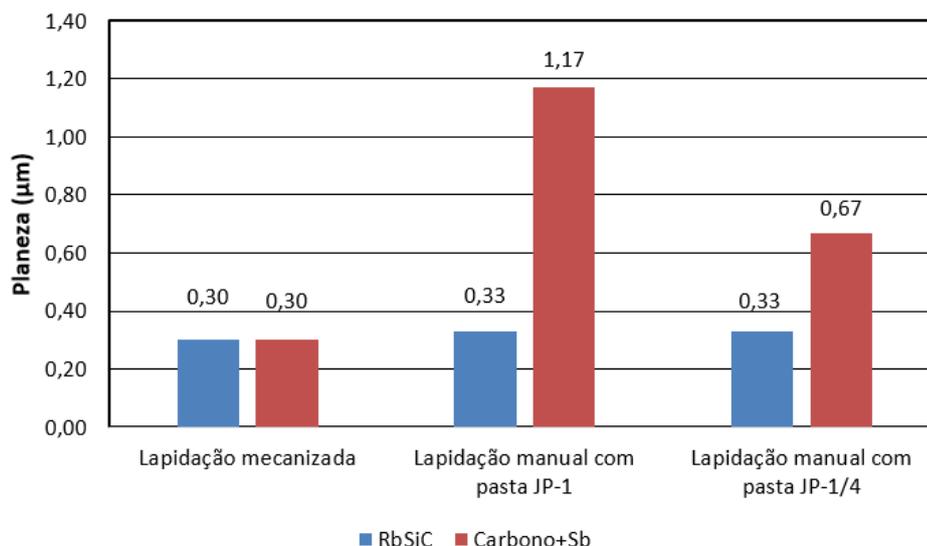
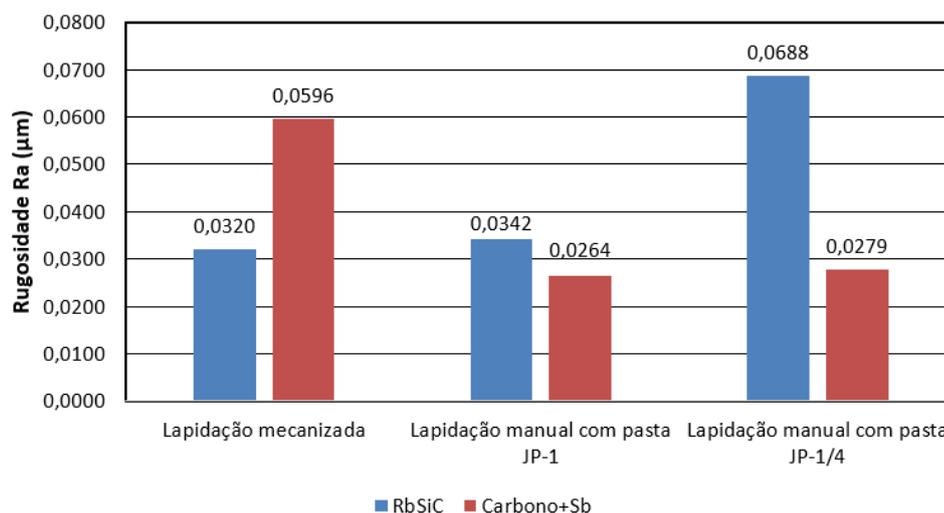


Figura 60 – Gráfico dos valores médios mínimos da rugosidade Ra de faces em RbSiC e carbono impregnado com antimônio, após lapidação mecanizada e manual



Os resultados acima mostram que os valores de planeza ficaram abaixo do limite máximo de 5 franjas de interferência ($1,45 \mu\text{m}$), adotados pela oficina de selos mecânicos da Petrobras em Guamaré-RN. As faces em carbono, lapidadas manualmente, apresentaram uma maior dificuldade para se obter uma superfície com planeza próxima da obtida por lapidação mecanizada. Os valores de rugosidade superficial Ra, alcançados por lapidação manual e mecanizada, foram equivalentes e estão dentro de uma faixa tolerável, ficando abaixo de $0,1 \mu\text{m}$. Finalmente, pode-se concluir que o processo de lapidação manual desenvolvido neste trabalho é satisfatório, obtendo resultados de planeza e rugosidade próximos aos obtidos na lapidação mecanizada.

6.4 Análise das Superfícies por MO e MEV

A Figura 61 exibe a micrografia eletrônica de varredura de uma face de vedação em RbSiC, no modo topográfico (micrografia superior) e no modo normal (micrografia inferior), antes e após passar pelo processo de lapidação manual com pasta abrasiva JP-9 e polimento com pasta JP-4 e JP-1 em papel alcalino comercial, tamanho A4, de 75 g/m². As regiões claras são constituídas por silício e as regiões escuras por carbono.

Uma região da superfície da face de vedação antes da lapidação está representada na micrografia da Figura 61 (a) e apresenta um melhor acabamento superficial que a micrografia da Figura 61 (b), que é a representação da superfície em outra região da face após a lapidação manual. Os valores de planeza e rugosidade superficial para as duas condições estão exibidos na Tabela 7.

Figura 61 – Micrografias eletrônicas de varredura em regiões diferentes de uma mesma face de RbSiC, antes (a) e após (b) lapidação manual com pasta JP-1, com aumento de 2000X

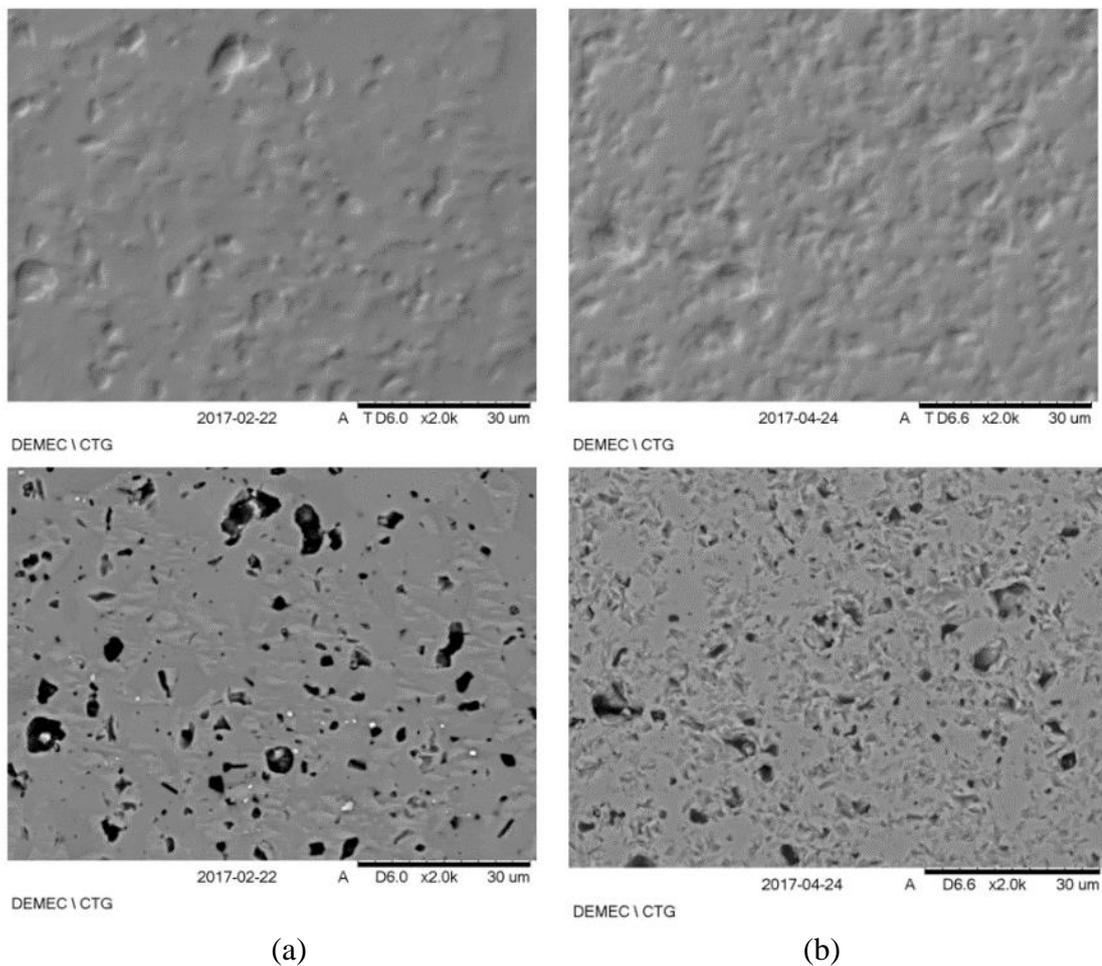


Tabela 7 – Resultado de medições de rugosidade Ra e planeza da superfície de uma face de RbSiC, antes e após lapidação manual com pasta JP-1

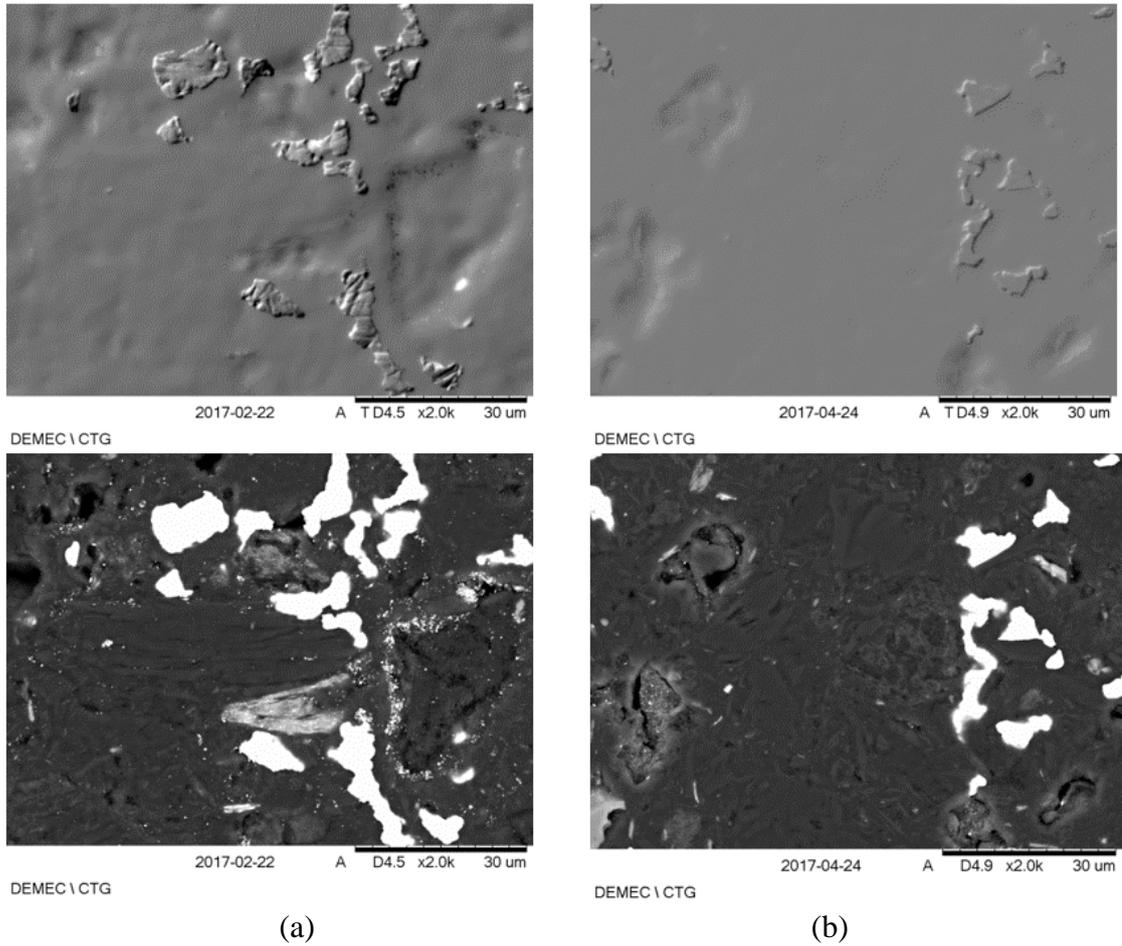
Parâmetro	Resultado da medição antes da lapidação	Resultado da medição após lapidação
Rugosidade Ra (μm) _{95%}	0,0396 \pm 0,0031	0,0854 \pm 0,0032
Planeza na MMC (μm) _{95%}	0,47 \pm 0,03	0,33 \pm 0,08
Franjas de interferência	2	2

Analisando os resultados acima, conclui-se que para valores reduzidos de rugosidade e planeza, a lapidação é desnecessária e, neste caso, piorou o acabamento superficial da face, representando um desperdício de tempo e de recursos humanos e materiais.

A Figura 62 exhibe a micrografia eletrônica de varredura de uma face de vedação em carbono impregnado com antimônio, com borda mais estreita, no modo topográfico (micrografia superior) e no modo normal (micrografia inferior), após passar pelo processo de lapidação manual com pasta abrasiva JP-9 e polimento com pasta JP-4 e JP-1 em papel alcalino comercial, tamanho A4, de 75 g/m², seguido de novo polimento com pasta JP-1/4 em pano macio. As regiões claras são constituídas por antimônio e uma pequena porcentagem de cálcio, e as regiões escuras são carbono.

A superfície da face de vedação após da lapidação e polimento com pasta JP-1 está representada na micrografia da Figura 62 (a) e apresenta um acabamento superficial pior que o observado na micrografia da Figura 62 (b), que é a representação de outra região da mesma superfície após polimento com pasta JP-1/4. As imagens da microscopia óptica são exibidas na Figura 63. Os valores de planeza e rugosidade superficial para as duas condições estão exibidos na Tabela 8.

Figura 62 – Micrografias eletrônicas de varredura em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, após lapidação manual e polimento com pasta JP-1 (a) e JP-1/4 (b), com aumento de 2000X



As imagens com ampliação de 50X da Figura 63 exibem uma região escura em cada lateral pois trata-se de uma face com superfície de vedação mais estreita. Com o aumento de 500X é possível observar uma melhora do acabamento superficial da face após polimento com pasta JP-1/4.

Figura 63 – Micrografias ópticas em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, após lapidação manual e polimento com pasta JP-1 (a) e JP-1/4 (b), com aumentos de 50X e 500X

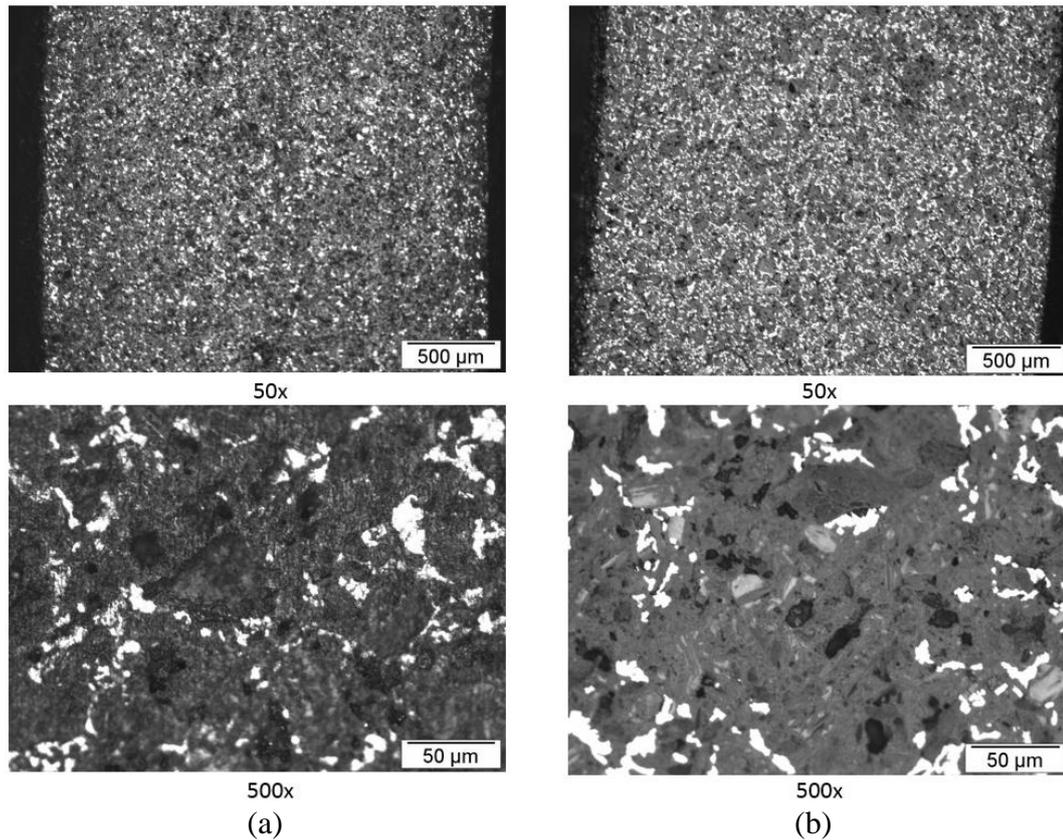


Tabela 8 – Resultado de medições de rugosidade Ra e planeza da superfície de uma face em carbono impregnado com antimônio, após lapidação manual e polimento com pasta JP-1 e JP-1/4

Parâmetro	Resultado da medição após polimento com pasta JP-1	Resultado da medição após polimento com pasta JP-1/4
Rugosidade Ra (μm) _{95%}	$0,2206 \pm 0,0091$	$0,0739 \pm 0,0030$
Planeza na MMC (μm) _{95%}	$1,17 \pm 0,29$	$0,67 \pm 0,07$

No caso analisado acima, houve melhora tanto na rugosidade superficial quanto na planeza, após a lapidação manual da face de vedação com polimento final em pasta abrasiva JP-1/4 e pano macio. As imagens de MEV mostram claramente esta diferença, porém nas imagens de MO a melhora no acabamento superficial não é tão evidente.

A Figura 64 exibe a micrografia eletrônica de varredura e a Figura 65 a microscopia óptica de outra face de vedação em carbono impregnado com antimônio, no modo topográfico (micrografia superior) e no modo normal (micrografia inferior), antes e após passar pelo processo de lapidação manual com pasta abrasiva JP-9 e polimento com pasta JP-4 e JP-1 em

papel alcalino comercial, tamanho A4, de 75 g/m². As regiões claras são constituídas por antimônio e uma pequena porcentagem de cálcio, e as regiões escuras são carbono.

Figura 64 – Micrografias eletrônicas de varredura em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, antes (a) e após (b) lapidação manual com pasta JP-1, com aumento de 500X

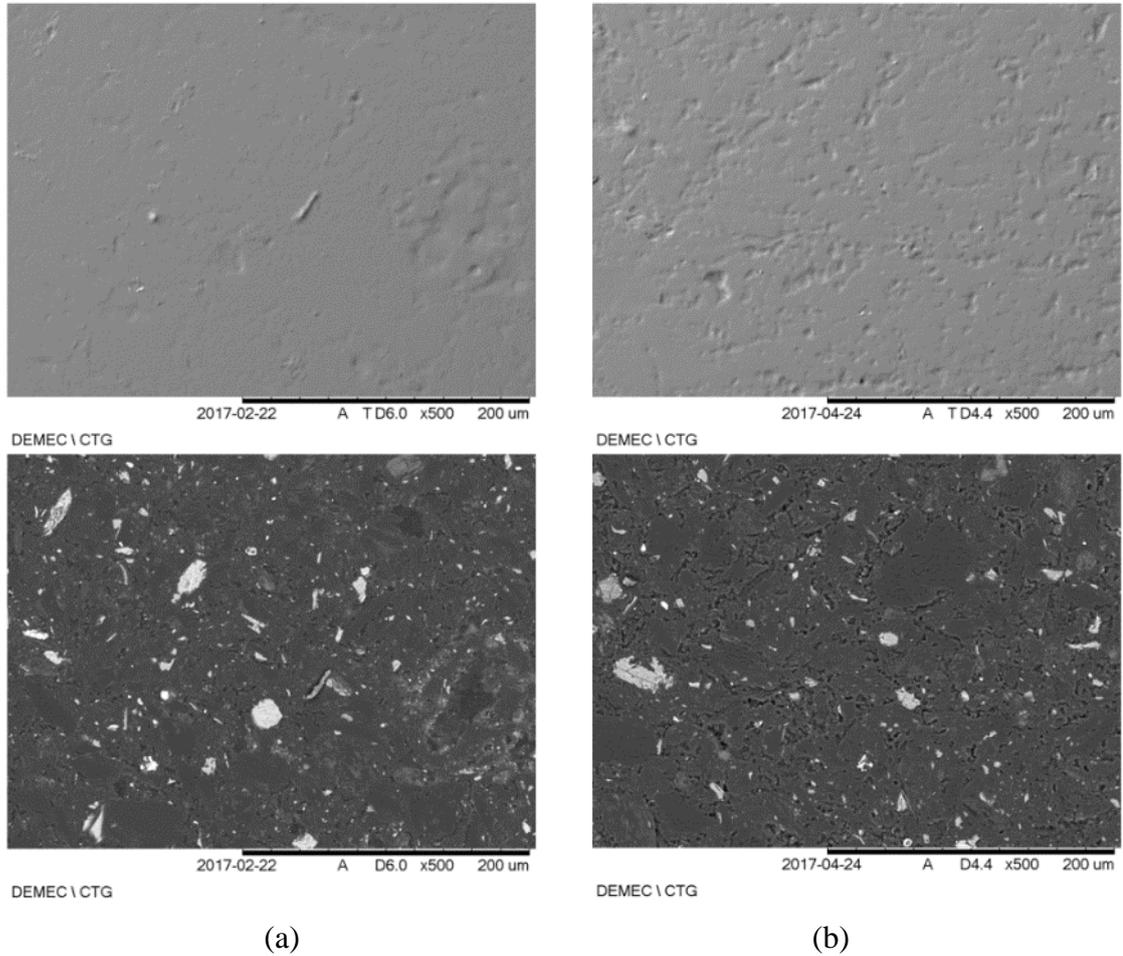
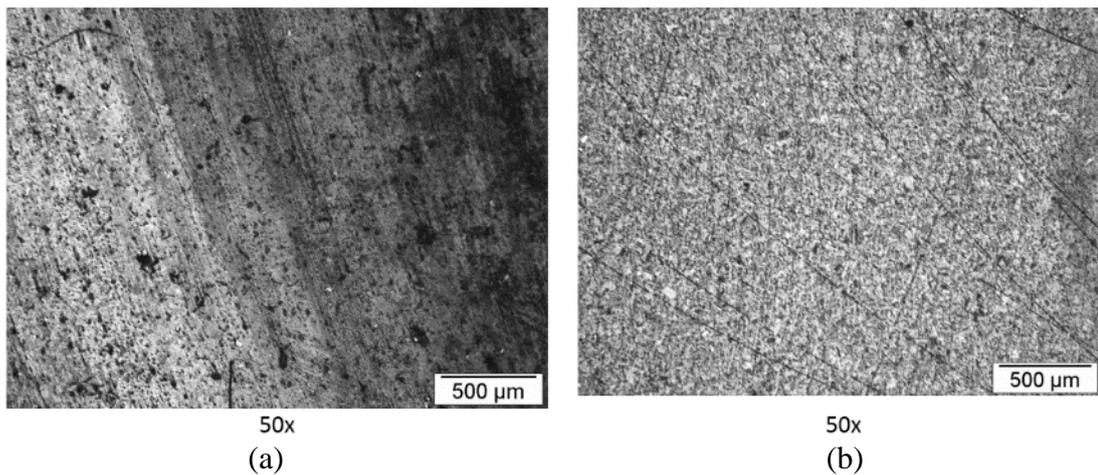


Figura 65 – Micrografias ópticas em regiões diferentes de uma mesma face de carbono impregnado com antimônio, antes (a) e após (b) lapidação manual com pasta JP-1, com aumento de 50X



A superfície da face de vedação antes da lapidação está representada na micrografia da Figura 64 (a) e apresenta um melhor acabamento superficial que a micrografia da Figura 64 (b), que é a representação da superfície após a lapidação manual. Na Figura 65 (b) é possível visualizar os arranhões provocados pela pasta abrasiva após lapidação manual, A Tabela 9 exhibe os resultados de medição de rugosidade superficial e planeza, antes e após lapidação manual.

Tabela 9 – Resultado de medições de rugosidade Ra e planeza da superfície de uma face em carbono impregnado com antimônio, antes e após lapidação manual com pasta JP-1

Parâmetro	Resultado da medição antes da lapidação	Resultado da medição após lapidação
Rugosidade Ra (μm) _{95%}	0,0425 \pm 0,0040	0,0966 \pm 0,0034
Planeza na MMC (μm) _{95%}	9,93 \pm 1,78	2,57 \pm 0,59

Embora o valor da rugosidade superficial da face de vedação analisada acima tenha aumentado após a lapidação manual e polimento com pasta JP-1, houve uma considerável melhora no valor da planeza, porém ficando ainda acima do limite máximo praticado de 3 franjas (0,87 μm), necessitando, portanto, de uma nova lapidação.

6.5 Custos com a Manutenção não Planejada para Recuperação de Selos

Caso o selo mecânico precise ser substituído ou reparado, haverá uma grande mobilização para o planejamento e execução deste serviço. Inicialmente uma equipe de planejamento, composta por colaboradores da manutenção, operação e SMS (Segurança, Meio Ambiente e Saúde) analisam previamente o serviço atentando para o sistema de isolamento e bloqueio de energias (elétrica e pressão do fluido), identificando os componentes que precisam ser desenergizados, bloqueados e/ou instalados (motor elétrico, válvulas e “raquetes” (ou “figuras 8”) na sucção e descarga da bomba), para possibilitar a elaboração da Análise de Risco e Permissão para Trabalho.

Após a elaboração e aprovação deste planejamento o motor elétrico é desenergizado e as válvulas são fechadas e lacradas. Inicia-se então a drenagem (despressurização) do GLP confinado no interior da bomba, do poço e das tubulações entre a válvula de sucção e as válvulas de descarga, através da abertura de uma pequena válvula para a atmosfera. Como o GLP ao passar do estado líquido para o estado gasoso expande aproximadamente 600 vezes o

tempo total para a conclusão da drenagem pode chegar a 8 horas, onde a pressão do GLP é reduzida de 12 para 1 bar (pressão atmosférica). O volume estimado de GLP na fase líquida liberado para a atmosfera é de $1,15 \text{ m}^3$, o que representa aproximadamente 632 kg de GLP perdidos durante a liberação para o meio externo, considerando uma massa específica de 550 kg/m^3 para a mistura propano/butano a 20°C (ANP, 2004). Esta quantidade de GLP deixa de ser vendida para as companhias distribuidoras de GLP da região sempre que houver necessidade de manutenção do selo mecânico.

Finalizada a drenagem do GLP, drena-se o fluido barreira (querosene de aviação) do selo mecânico defeituoso, retira-se o acoplamento e a caixa de mancal de rolamentos da bomba para, finalmente, realizar a substituição do selo mecânico. O processo inverso é executado até o retorno da bomba à operação, totalizando 40 horas (ou uma semana) de trabalho.

Inicia-se então um outro trabalho, tão demorado quanto o de substituição do selo mecânico: licitação pública para recuperação do selo mecânico removido. Este trabalho envolve diversas pessoas do setor de contratação de serviços, além do supervisor e técnico de manutenção, podendo levar até 75 dias corridos para ser finalizado e o selo recuperado ser devolvido. Por segurança, a Transpetro mantém então dois selos mecânicos sobressalentes em estoque, cada um custando aproximadamente R\$ 35.000,00.

Mensurar com exatidão o prejuízo total resultante da falha do selo mecânico é uma tarefa difícil, pois envolve não só o reparo ou substituição do selo, mas também a perda de inventário, o não faturamento durante a indisponibilidade da bomba, os prejuízos ao mercado consumidor e à imagem da empresa devido à interrupção no fornecimento de GLP, pagamento de multas contratuais a seus clientes, além de penalidades impostas pelos agentes reguladores, principalmente se os selos das duas bombas falharem e se os selos sobressalentes não tiverem sido corretamente recuperados. Neste caso extremo, pode-se recorrer à compra emergencial de selos novos por dispensa de licitação, porém não há fornecedor local com o modelo do selo utilizado nas bombas da Transpetro e a aquisição de um selo novo no mercado nacional pode demorar alguns dias.

No Quadro 1 foram estimados os custos mínimos e máximos com mão-de-obra para substituição e recuperação do selo mecânico de uma única bomba, considerando o GLP sendo liberado para o meio ambiente durante a drenagem do sistema, gerando perda de inventário, a recuperação do selo realizada por empresa externa e o tempo médio de trâmite de um processo licitatório desta natureza (com base em outros já realizados).

Além dos custos diretos e indiretos do Quadro 1, é possível estimar o quanto a Transpetro deixaria de faturar com a venda de GLP caso os selos de ambas as bombas falhassem. Considerando o preço do GLP igual R\$ 1,64/kg, uma densidade média de 550 kg/m³ e a vazão média da bomba igual a 200 m³/h, o resultado seria R\$ 180.400,00/h. Ou seja, um dia (24 horas) sem o bombeio de GLP para as companhias distribuidoras representaria uma perda no faturamento de mais de 4 milhões de reais.

Quadro 1 – Estimativa de custos para substituição e recuperação de selo mecânico para uma bomba de GLP

Descrição	Custo (R\$)
Substituição do selo mecânico	
Mão-de-obra (Técnicos de SMS, operação, planejamento, manutenção, mecânico, ajudante, eletricitista, etc.)	1.000,00 a 1.500,00
GLP drenado (perdido)	1.050,00 a 1.150,00
Subtotal	2.050,00 a 2.650,00
Recuperação do selo defeituoso	
Processo licitatório (HH de Supervisor, técnico de administração e manutenção, setor de contratação, etc.)	600,00 a 1.000,00
Recuperação em empresa externa	4.000,00 a 6.000,00
Subtotal	4.600,00 a 7.000,00
Total	6.650,00 a 9.650,00

6.6 Proposição de Procedimento para Lapidação Manual

Um procedimento foi desenvolvido para possibilitar a recuperação de selos mecânicos nas próprias instalações da Transpetro, através da lapidação manual de faces de vedação, visando otimização de tempo e recursos. As etapas são as seguintes:

a) Limpeza

Lavar bem as mãos e limpar as superfícies do bloco de lapidação com álcool etílico.

b) Lapidação

O disco de lapidação deve ficar apoiado sobre uma mesa com superfície nivelada e rígida ou sobre um bloco de desempenho de granito.

Aplicar pasta abrasiva na superfície da face de vedação a ser lapidada e na superfície do disco de lapidação. A pasta diamantada é espalhada sobre a superfície do disco com auxílio dos dedos da mão.

Inicia-se o desbaste com pasta abrasiva de maior granulometria, JP-15 ou JP-9, de acordo com o nível de irregularidades observadas a olho nu na superfície a ser lapidada. Realizam-se movimentos circulares em torno do próprio eixo da peça, pressionando-se a face de vedação contra o disco de lapidação com a mão, até se obter uma superfície regular, sem riscos e sem áreas não desbastadas. O desbaste final é realizado com pasta JP-9 para garantir uma melhor planeza da superfície da face de vedação.

A cada 3 minutos, verifica-se a qualidade do desbaste, limpando-se a face de vedação com auxílio de papel macio embebido em álcool etílico e examinando visualmente a superfície lapidada. Para continuar com o processo de desbaste aplica-se mais pasta abrasiva na superfície da face de vedação.

A cada mudança de pasta, devem-se limpar com álcool etílico as superfícies da face de vedação e do disco de lapidação, para aplicação da pasta com granulometria diferente da anterior.

c) Polimento

A operação de polimento é realizada apoiando-se uma folha de papel alcalino comercial tamanho A4 sobre o disco de lapidação ou mesa de desempenho de granito.

Aplica-se a pasta JP-4 sobre a superfície da face de vedação e do papel A4, espalhando bem com auxílio dos dedos da mão, e realizam-se movimentos rápidos descrevendo uma trajetória em formato de “8” (oito), exercendo-se menor pressão com a mão, por aproximadamente 3 minutos.

Em seguida realiza-se a limpeza da superfície da face e do disco de lapidação. Aplica-se a pasta JP-1 na superfície da face de vedação e do papel A4, espalhando bem com auxílio dos dedos da mão e realizam-se movimentos rápidos descrevendo uma trajetória em formato de “8”, exercendo-se menor pressão com a mão.

A cada 3 minutos, verifica-se a qualidade do acabamento, limpando-se a face de vedação com auxílio de papel higiênico, ou similar, embebido em álcool etílico e examinando visualmente a superfície lapidada. Para continuar com o processo de acabamento aplica-se mais pasta abrasiva na face de vedação.

Este processo é repetido até que se obtenha uma superfície mais espelhada possível, o que representa um melhor acabamento superficial.

d) Verificação da planeza

Avaliar a planeza das faces lapidadas através da contagem de franjas de interferência ou utilizando uma máquina de medição por coordenadas. Caso o valor da planeza esteja acima de 5 franjas (1,45 μm), deve-se repetir a lapidação com pasta JP-9 e o polimento com pasta JP-4 e JP-1.

e) Verificação da rugosidade superficial

Medir a rugosidade superficial das faces lapidadas com auxílio de rugosímetro. Caso o valor da rugosidade R_a esteja acima de 1 μm , deve-se repetir a etapa de polimento com pasta JP-1/4, reavaliando a rugosidade e a planeza da face de vedação.

f) Remontagem do selo mecânico

g) Teste de estanqueidade do selo

Realizar o teste de estanqueidade do selo com auxílio de uma bomba hidráulica manual, do tipo pistão, e um manômetro, bloquear as conexões com tampão, pressurizar lentamente cada câmara do selo com água doce até a pressão de operação do selo, durante 5 minutos. Monitorar a queda de pressão no manômetro (de acordo com a norma API 682, é tolerável uma queda de pressão de até 0,014 Mpa).

O Quadro 2 relaciona os tempos, custos e valores mínimos obtidos na lapidação mecanizada e manual de faces de vedação em RbSiC e carbono impregnado com antimônio.

Quadro 2 – Comparação entre a recuperação mecanizada e manual de selos mecânicos

Parâmetro	Lapidação mecanizada em empresa externa	Lapidação manual na oficina da Transpetro
Tempo médio para lapidação e polimento de face C	15 min	30 min
Tempo médio para lapidação e polimento de face em SiC	30 min	60 min
Valor mínimo de planeza obtido para faces em C	0,30 μm	0,67 μm
Valor mínimo de planeza obtido para faces em SiC	0,30 μm	0,33 μm
Valor mínimo de rugosidade R_a obtido para faces em C	0,0593 μm	0,0264 μm
Valor mínimo de rugosidade R_a obtido para faces em SiC	0,0320 μm	0,0342 μm
Tempo total para recuperação do selo	75 dias	3 dias
Custo total para recuperação do selo	R\$ 7.000,00	R\$ 900,00

Diante dos resultados obtidos de planeza e rugosidade superficial de faces de vedação em RbSiC e carbono impregnado com antimônio, além dos custos e prejuízos estimados com a interrupção da operação da bomba para sanar eventuais vazamentos nos selos mecânicos, observa-se a vantagem de se implementar o procedimento de lapidação manual para recuperação de selos na oficina da Transpetro.

Para possibilitar a medição da planeza, a Transpetro poderia adquirir uma fonte geradora de luz monocromática e um plano óptico em quartzo, por um custo total de R\$ 10.000,00. A lapidação de sedes de válvulas de segurança, atividade de rotina na oficina da Transpetro, também seria beneficiada por esta aquisição.

7 CONCLUSÕES

Os resultados da medição de planeza antes e após a lapidação de faces de vedação de selos mecânicos, através de uma Máquina de Medição por Coordenadas, comprovam a eficácia deste método. No entanto, a utilização da técnica de observação de franjas de interferência ainda se mostra satisfatória, simples e barata. A rugosidade superficial das faces de vedação mesmo não tendo ligação direta com a planeza, deve ser considerada nos processos de lapidação, uma vez que valores baixos de rugosidade garantem uma menor taxa de vazamento, promovem menos aquecimento e aumentam a vida útil do selo mecânico.

Foi constatado, através das medições de planeza realizadas por MMC e franjas de interferência, que algumas faces de vedação ainda estavam em condições de uso e não necessitavam de relapidação. Isto não é levado em consideração no momento da tomada de preços para a contratação de serviço externo, nem por parte da Transpetro, nem por parte das empresas proponentes, resultando em desperdício de tempo e recursos.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, é possível afirmar que é técnica e economicamente viável a lapidação manual de faces de vedação de selos mecânicos, realizada por profissional qualificado, aproveitando-se os recursos disponíveis atualmente na Transpetro para lapidação de sedes de válvulas. Sendo necessário apenas a aquisição de uma fonte geradora de luz monocromática com disco óptico para visualização das franjas de interferência.

A demora e o custo para recuperação de selos em empresa externa compensariam qualquer outro custo para aquisição de equipamentos e materiais necessários à lapidação, manutenção e teste de estanqueidade de selos mecânicos, visto que a indisponibilidade simultânea das duas bombas de GLP traria um prejuízo de no mínimo R\$ 180.000,00/hora, reforçando, portanto, a necessidade de se ter uma oficina própria de recuperação de selos.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar métodos para analisar simultaneamente a rugosidade superficial e a planeza de faces de vedação através do emprego de perfilometria óptica, microscopia de varredura por sonda mecânica, microscopia de varredura por tunelamento ou outra técnica existente.

Estudar o emprego de outras técnicas de interferometria com recursos computacionais para contagem de franjas e gravação de imagens.

Desenvolver dispositivos específicos para facilitar e garantir a qualidade da lapidação manual de faces de vedação, permitindo, inclusive, que a lapidação e polimento sejam executados por outras pessoas menos experientes.

Avaliar a possibilidade de utilização de técnicas preditivas, como, por exemplo, a termografia, para o monitoramento do funcionamento de selos mecânicos e detecção de possíveis desgastes ou deficiência de refrigeração e lubrificação nas faces de vedação.

REFERÊNCIAS

- ABRADING METHODS. **Reading flatness using an optical flat**. Elgin, [2016]. Disponível em: <www.lapping.com/faq/optical_flat_reading.pdf>. Acesso em: 22 fev 2016.
- AESSEAL. Treinamento de Selos Mecânicos. São Paulo, 2002.
- AFFONSO, L. O. A. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 18**. Rio de Janeiro, 2004.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 682: Pumps – Shaft sealing systems for centrifugal and rotary pumps**. Washington, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. Rio de Janeiro, 1997.
- DRAKE JR., P. J. **Dimensioning and Tolerancing Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1999.
- FIOCCHI, A. A. **Avanços no desenvolvimento de um processo de acabamento para peças planas submetidas à cinemática de lapidação sobre um rebolo dressado com grau de recobrimento**. 2010. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.
- FIOCCHI, A. A.; SANCHEZ, L. E. A. **Investigação de um processo abrasivo baseado nos princípios da lapidação e retificação**. III Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009. UNESP Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Disponível em: <<http://www2.feb.unesp.br/pos/seminario/IIISeminario/anais/AC-ArthurAlvesFiocchi.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2016.
- FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO. **Mecânica: elementos de máquinas**. Telecurso 2000 Profissionalizante. São Paulo: Editora Globo, 1996.
- GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN 8589-15: Manufacturing processes chip removal - Part 15: Lapping; Classification, subdivision, terms and definitions**. Berlin, 2003.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN 12756**: Mechanical seals - Principal dimensions, designation and material codes. Berlin, 2000.

GROUS, A. **Applied metrology for manufacturing engineering**. London: ISTE, 2011.

GRUNDFOS Management A/S. **Mechanical shaft seals for pumps**. Bjerringbro: Denmark, 2009.

LIMA, E. P. C. **Mecânica das bombas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

KEMET International Limited. **Como medir superfícies planas**. [2016]. Disponível em: <<https://www.kemet-international.com/br/produtos/lapidacao-em-superficies-planas/como-medir-superficies-planas>>. Acesso em: 22 fev 2016.

KUTZ, M. (Ed.) et al. **Mechanical Engineer's Handbook**: materials and mechanical design. Volume 1, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2006.

MAGALHÃES, R. C. A. **Sistema para medição de erro de planicidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-04102006-151448/publico/SistemaParaMedicaodeErrodePlanicidade.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2016.

SANCHEZ, L.E.A.; LOSNAK, C.; PEREZ, F.R.C. **Comportamento da taxa de remoção e acabamento superficial na lapidação plana sob diferentes parâmetros do processo**. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/1999/pdf/AAAHAC.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Tolerância geométrica**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015.

