

RAFAEL DE LIMA COSTA

**AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE DE
COMPONENTES DE BCS OPERANDO EM MEIO COM ÁGUA
SALGADA, ABRASIVO E GÁS CO₂**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

RAFAEL DE LIMA COSTA

**AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE DE
COMPONENTES DE BCS OPERANDO EM MEIO COM ÁGUA
SALGADA, ABRASIVO E GÁS CO₂**

Projeto de fim de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECATRÔNICA.**

Área de concentração: Materiais e processos de fabricação.

Orientador: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia.

UBERLÂNDIA - MG

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica
 Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 2512-6771 - www.mecanica.ufu.br - mecanica@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecatrônica				
Defesa de:	FEMEC42100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	01/12/2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:46
Matrícula do Discente:	11611EMT011				
Nome do Discente:	Rafael de Lima Costa				
Título do Trabalho:	Avaliação dos mecanismos de desgaste de componentes de BCS operando em meio com água salgada, abrasivo e gás CO2				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	(x) Sim () Não				

Reuniu-se de forma presencial, no Campus Santa Mônica, Sala de reuniões do LTAD, a Banca Examinadora, designada pela docente orientadora, assim composta: Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva - FEMEC/UFU; Eng. M.Sc. Fernando Buiatti Rodrigues - LTAD/FEMEC/UFU; e Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, e concedeu ao estudante a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do estudante e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdés Arencibia**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/12/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/12/2023, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Buiatti Rodrigues, Usuário Externo**, em 07/12/2023, às 14:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4985343** e o código CRC **101A6A94**.

Referência: Processo nº 23117.082457/2023-17

SEI nº 4985343

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional e pela confiança depositada em mim, criando o ambiente propício que me permitiu trilhar o caminho que me conduziu até aqui.

Quero expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores, a professora Rosenda Valdés Arencibia e o engenheiro Fernando Buiatti Rodrigues, pela generosidade em compartilhar seu conhecimento, fundamental para a realização deste trabalho e para o meu crescimento científico, profissional e pessoal. Gostaria de destacar especialmente o professor Sinésio, cujo trabalho foi fundamental na construção e desenvolvimento do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), desempenhando um papel crucial para o êxito deste projeto.

Aos engenheiros Edja Moura e Teófilo Jacob por confiarem no meu potencial e abrirem as portas do LTAD, proporcionando um grande crescimento pessoal e profissional.

Aos técnicos Afrânio, Jefferson e Marcio por todo o auxílio na realização dos experimentos e conhecimento técnico passado durante todos os anos em que estivemos trabalhando juntos.

Ao professor Leonardo por toda a ajuda e esclarecimento de dúvidas durante a realização deste trabalho.

Além disso, para a analista Carolina Xavier, pelo apoio na realização das imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

COSTA, R. L., **AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE DE COMPONENTES DE BCS OPERANDO EM MEIO COM ÁGUA SALGADA, ABRASIVO E GÁS CO₂. 2023.** 64f. Projeto de conclusão de curso de graduação em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Resumo

O bombeio centrífugo submerso é um dos métodos de elevação artificial de petróleo utilizados em poços que não apresentam energia suficiente para elevá-lo naturalmente até à superfície. As bombas centrífugas submersíveis (BCS) utilizadas nessa aplicação trabalham em condições severas, pois nos poços há água, areia e gases, que provocam prejuízos em sua operação, como perda de eficiência e danos críticos nos componentes internos. Em situações reais, o efeito da corrosão causada por CO₂ é uma preocupação adicional na degradação de estruturas e equipamentos de exploração de petróleo, incluindo os componentes de BCSs, como: rotores, difusores e mancais de deslizamento. O presente projeto traz como principal objetivo a realização de ensaio de bomba de BCSs com injeção de gás CO₂ (livre) em meio com água salgada e abrasivo, com o objetivo de minimizar os teores de oxigênio a níveis inferiores a 500 ppb e avaliar o efeito da presença desse gás na degradação dos componentes da bomba. A massa de todos os componentes da bomba foi medida antes e após os ensaios visando a identificação dos componentes com maior desgaste. Em seguida a perda de massa foi calculada e os componentes críticos identificados. Para estes componentes foram identificados os micromecanismos de degradação usando microscopia eletrônica de varredura (MEV), através da qual se pode ainda acessar a composição química dos diversos componentes mecânicos das bombas. Os resultados obtidos mostraram que os componentes do primeiro estágio apresentaram a maior taxa de perda de massa (10,78 g/t – variação de 7,66 %), enquanto no segundo e terceiro estágios apresentaram taxas, respectivamente, de 10,11 g/t (variação de 7,21%) e 8,06 g/t (variação de 5,80 %). Em relação aos mecanismos de desgaste se observou que o desgaste dos componentes da BCS ocorre de maneira diferenciada, que inclui mas não se limita a: presença de corrosão, erosão e abrasão.

Palavras-chave: BCSs, desgaste, CO₂, abrasão, erosão, corrosão, cavitação, sinergismo.

COSTA, R. L., **Evaluation of Wear Mechanisms of BCS Components Operating in Environments with Saline Water, Abrasives, and CO₂ Gas.** 2023. 64p. Undergraduate thesis in Mechatronics Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia-MG.

Abstract

Submersible centrifugal pumping is one of the methods of artificial oil lift used in wells that lack sufficient energy to naturally lift it to the surface. Submersible centrifugal pumps (SCP) used in this application operate under severe conditions due to the presence of water, sand, and gases in the wells, causing operational drawbacks such as loss of efficiency and critical damage to internal components. In real situations, the effect of corrosion caused by CO₂ is an additional concern in the degradation of structures and oil exploration equipment, including SCP components such as rotors, diffusers, and sliding bearings. The main objective of this project is to conduct SCP testing with CO₂ gas injection (free) in a medium of saltwater and abrasives to minimize oxygen levels to below 500 ppb and assess the effect of this gas presence on pump component degradation. The mass of all pump components was measured before and after the tests to identify the most worn components. Subsequently, the mass loss was calculated, and critical components were identified. Microscopic degradation mechanisms were identified for these components using scanning electron microscopy (SEM), which also enabled access to the chemical composition of various mechanical components of the pumps. The obtained results indicated that first-stage components showed the highest mass loss rate (10.78 g/t – variation of 7.66%), while second and third stages presented rates of 10.11 g/t (variation of 7.21%) and 8.06 g/t (variation of 5.80%), respectively. Regarding wear mechanisms, it was observed that wear of SCP components occurs differently, including but not limited to: corrosion, erosion, and abrasion.

Keywords: *ESPs, wear, CO₂, abrasion, erosion, corrosion, cavitation, synergism.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista em corte de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios (BAKER HUGHES, 2008). Adaptado.	4
Figura 2 – Curva característica de uma BCS (Fornecida pelo Fabricante). Adaptado.	5
Figura 3 - Taxa de desgaste erosivo em relação à velocidade de impacto (ZUM GAHR, 1987). Adaptado.	6
Figura 4 – Comparação entre o perfil do difusor do primeiro estágio de uma bomba nova (a) e após o ensaio erosivo (b). As setas indicam o local desgastado no difusor ensaiado e os correspondentes locais no difusor novo (SÁBIA, 2015).	7
Figura 5 – Luvas dos mancais após os ensaios (SÁBIA, 2015).	8
Figura 6 - Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação (COELHO, 2006).	10
Figura 7 – Efeito da solução salina (barra vermelha) no desgaste de diferentes materiais utilizados nos estágios de BCSs em comparação com os ensaios erosivos em solução de água doce (barra azul) (Sun et al, 2020). Adaptado.	11
Figura 8 – Imagem exemplificando marcação com Engraver.	13
Figura 9 – Imagens de dois componentes da BCS antes e após o ensaio onde: (A) Difusor antes do ensaio. (B) Difusor depois do ensaio. (C) Impelidor antes do ensaio. (D) Rotor após o ensaio.	14
Figura 10 – Imagem dos Componentes da bomba BCS.	15
Figura 11 – Imagem dos Componentes da bomba BCS.	15
Figura 12 - Perda de massa dos componentes da bomba.	17
Figura 13 – Imagem do Mancal Combinado onde: (A) Imagem Mancal Combinado antes do ensaio; (B) Imagem do Mancal Combinado depois do ensaio.	18
Figura 14 – Imagem do Difusor 1 onde: (A) Imagem do Difusor 1 antes do ensaio; (B) Imagem do Difusor 1 depois do ensaio.	18
Figura 15 – Imagem do Rotor 1 onde: (A) Imagem do Rotor 1 antes do ensaio; (B) Imagem do Rotor 1 depois do ensaio.	18
Figura 16 – Imagem da Luva do Mancal Combinado onde: (A) Imagem do Mancal Combinado antes do ensaio; (B) Imagem do Mancal Combinado depois do ensaio.	19
Figura 17 – Imagem da Luva do Mancal Radial 2 onde: (A) Imagem da Luva do Mancal Radial 2 antes do ensaio 1; (B) Imagem da Luva do Mancal Radial 2 depois do ensaio.	19
Figura 18 – Cortes realizados para obtenção da Bucha do Mancal Combinado para análise micrográfica.	20
Figura 19 – Áreas seleccionadas para análises micrográficas e EDS na Bucha do Mancal Combinado.	21
Figura 20 – Cortes realizados no Difusor 1: (A) Capa do Difusor 1; (B) Pad (C) Região Superior Interna do Difusor 1; (D) Região Inferior Interna do Difusor 1; (E) Região Interna da Lateral do Difusor 1.	21
Figura 21 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Pad.	22
Figura 22 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Superior Interno do Difusor 1.	22
Figura 23 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Inferior Interno do Difusor 1.	22
Figura 24 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Interno da Lateral do Difusor 1.	23
Figura 25 – Cortes realizados no Impelidor 1: (A) Capa Externa do Impelidor 1; (B) Corte em Pizza da parte Interna do Impelidor 1.	23
Figura 26 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Capa Externa do Impelidor 1.	24

Figura 27 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Corte em Pizza da parte Interna do Impelidor 1.	24
Figura 28 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Luva do Mancal Combinado: (A) Região com maior desgaste; (B) Região com menor desgaste.	25
Figura 29 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Luva do Mancal Radial 2.	25
Figura 30 – Corte realizado na Bucha do Mancal Radial.	26
Figura 31 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Bucha do Mancal Radial.	26
Figura 32 - Resultados de análises de EDS na superfície da Bucha do Macal Combinado e resultados dos espectros de raios-x com quantificação dos elementos.	27
Figura 33 – Imagens MEV da superfície da Bucha do Mancal Combinado, mostrando os locais de análises (A e B).	28
Figura 34 – Imagens MEV da superfície Pad do Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).	29
Figura 35 - Partes analisadas da parte interna do Difusor.	30
Figura 36 – Imagens MEV da superfície Superior Interna Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).	30
Figura 37 - Imagem do difusor do 1º Estágio “D1” antes (“a”) e após (“b”).	31
Figura 38 – Imagens MEV da superfície Inferior Interna Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).	32
Figura 39 – Imagens MEV da superfície Interna da Lateral do Difusor 1, mostrando os locais de análises (A, B e C).	32
Figura 40 – Regiões analisadas no Impelidor do primeiro estágio pela técnica de MEV.	33
Figura 41 – Imagens MEV da superfície do corte em Pizza da parte Interna do Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).	34
Figura 42 – Imagens MEV da superfície do corte em Pizza da parte Interna do Impelidor, mostrando os locais de análises (C e D).	35
Figura 43 – Imagens MEV da superfície com menor desgaste da Luva do Mancal Combinado, mostrando os locais de análises (A e B).	36
Figura 44 – Imagens MEV da superfície com maior desgaste da Luva Mancal Combinado, mostrando os locais de análises (C e D).	37
Figura 45 – Imagens de MEV da superfície desgastada do Mancal Radial 2, mostrando os locais de análise (A e B).	38
Figura 46 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “A” onde (a) contato par metálico; (b) possível desgaste por cavitação; (c) formação de canais preferenciais; (d) aproximação de 500x na região “b”. ...	39
Figura 47 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “B-1”.	40
Figura 48 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “B-2”.	41
Figura 49 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “B-3”.	41
Figura 50 – Distribuição de tamanho de partículas para amostras depositadas por sopro e por gravidade para areia n° 100 (SÁBIA, 2015).	42

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Sistemas de medição utilizados na avaliação dos componentes da bomba. 16
- Tabela 2 – Resultado do desgaste g/ton da BCS..... **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE ABREVIATURAS

MC: Bucha do mancal Combinado;

D1: Difusor 1;

R1: Impelidor 1;

LMC: Luva do Mancal Combinado;

B2: Luva do Mancal Radial 2;

BEP: Ponto de melhor eficiência da bomba.

LISTA DE ABREVIATURAS

UFU: Universidade Federal de Uberlândia

LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

BCS: Bombeio Centrifugo Submerso

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

EDS: *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Sistema de elevação artificial por bombeio centrífugo submerso	3
2.2. Desgaste de BCSs por ação de partículas abrasivas	6
2.3. Interferência da injeção de gás livre no desempenho de BCS	8
2.4. Cavitação	10
2.5. Sinergismo erosão-corrosão	10
METODOLOGIA	13
3.1. Análise Macrográfica	13
3.2. Identificação dos componentes avaliados	15
3.3. Análise morfológica	19
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Bucha do Mancal Combinado	27
4.2. Difusor 1	28
4.2.1. Pad	28
4.2.2. Região Superior Interna do Difusor	29
4.2.3. Região Inferior Interna do Difusor	31
4.2.4. Região Interna da Lateral do Difusor	32
4.3. Impelidor 1	33
4.3.1. Capa Externa do Impelidor	33
4.3.2. Corte em Pizza da parte Interna do Impelidor	34
4.4. Luva do Mancal Combinado	35
4.5. Luva do Mancal Radial 2	37
4.6. Bucha do Mancal Radial	38
CONCLUSÕES	43
TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICE 01 – Resultados da verificação dimensional dos componentes	48
ANEXO 01 – Certificado de calibração da Balança SHIMADZU	49
ANEXO 02 – Certificado de calibração da Balança Bel Engineering	50

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Com relação à produção de petróleo, o sistema de Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um método comumente utilizado. Esse processo de elevação artificial consiste em aumentar a pressão disponível no poço através de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios. Porém, custos diretos substanciais estão restringindo o uso de bombas centrífugas. Segundo Neville (1995), esses custos estão associados à falha de componentes como rotores, difusores, eixos, carcaças e tubulações. Isso se deve em parte à dificuldade e inacessibilidade de manutenção e de substituição desses componentes. Além disso, antes de atingir uma falha completa que demandaria a substituição da bomba, ocorrem perdas de eficiência à medida que os componentes se deterioram, resultando em não conformidade quanto a e em desvio das condições operacionais planejadas.

Essas falhas são devidas em parte à quantidade de areia bombeada juntamente com o petróleo, que pode trazer sérios danos à bomba centrífuga. A produção de areia nos poços dificulta a operação das BCSs, na medida em que a areia produzida pode penetrar na folga dos mancais radiais, levando ao seu desgaste por abrasão, e, finalmente, à quebra e à interrupção da produção de óleo. Não é necessária grande remoção de material para acontecer uma falha, apenas uma pequena alteração em uma dimensão crítica de um componente da bomba pode resultar em uma falha catastrófica. Além disso, as partículas de areia podem erodir os difusores, podendo inclusive perfurá-los e, eventualmente, atingir a carcaça da bomba. A esse processo de degradação se soma a corrosão causada pela presença de água produzida e de gás CO₂.

Com o objetivo de avaliar o desempenho de BCSs em meios contendo água salgada e areia, foi construído e validado um circuito de teste no Laboratório de Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para identificar os efeitos da erosão-corrosão em BCSs com fluxo radial. Nesta bancada foi avaliado o efeito da presença da areia (nº 100)

e de água com 3,5 % de NaCl no desgaste dos mancais, rotores e difusores para a bomba ensaiada.

Outro fator que contribui para a falha prematura nas BCSs é a ação conjunta da erosão e da corrosão, fenômeno também conhecido como erosão-corrosão, devido às características do fluido bombeado. Neville (1995) afirma que a combinação de meios líquidos agressivos e a possibilidade de cargas elevadas de partículas sólidas arrastadas nos sistemas de bombeamento representam algumas das condições operacionais mais severas enfrentadas pelos materiais atuais.

Assim, nas bombas centrífugas tem-se a combinação de diferentes tipos de desgaste (abrasão, erosão e corrosão). Em alguns componentes da bomba centrífuga esses mecanismos ocorrem simultaneamente. A severidade da abrasão e erosão depende de uma série de fatores, a saber: temperatura, pressão, velocidade do fluido e das partículas, dureza e tenacidade à fratura do material dos componentes, bem como da dureza, tamanho, formato, tenacidade à fratura e distribuição de tamanho das partículas abrasivas (ZUM GAHR, 1987).

Com o objetivo de aumentar a produção de petróleo nos poços do pré-sal uma alternativa é a utilização do método de elevação artificial utilizando sistema BCS. Todavia, à presença de gás livre causa a queda de desempenho dessas bombas, reduzindo de forma significativa a curva de *head* e de eficiência, e conseqüentemente a queda da produção. Outra característica é que com a presença de gás livre, dependendo dos níveis de volume de gás, causa a deterioração dos componentes da bomba pelo processo de cavitação. Vale destacar que a presença de CO₂ reduz de forma expressiva a quantidade de oxigênio diluído, além de reagir com a água e alterar o pH do meio. Em consequência disso, a corrosão causada por esse gás passa a apresentar uma preocupação adicional na vida útil dos componentes de BCS e em outros componentes mecânicos utilizados na exploração.

No presente projeto o circuito de teste foi modificado de tal forma que fosse possível realizar purgas com CO₂ e injeção de gás livre, minimizando, dessa forma, os teores de oxigênio a valores menores ou iguais a 500 ppb.

Como parte secundária do estudo, foi realizada uma avaliação macrográfica dos componentes, simultaneamente à análise da perda de massa de todos os elementos da BCS, com o propósito de identificar os componentes mais suscetíveis ao desgaste para posterior análise.

Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é avaliar os mecanismos de desgaste de componentes de BCS operando em meio com água salgada, abrasivo e gás CO₂. Para tanto foi efetuada uma análise morfológica dos mesmos via microscopia eletrônica de varredura e Espectroscopia de raios X por energia dispersiva.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir é apresentada a revisão bibliográfica dos principais temas necessários para o desenvolvimento deste projeto de fim de curso. Esta sessão aborda os principais conceitos e estudos relativos ao desgaste das bombas centrífugas submersíveis, seu desenvolvimento e aplicação no bombeamento de petróleo juntamente com fluido abrasivo, água salgada e gás CO₂.

Com enfoque nos seguintes temas: Sistema de elevação artificial por bombeio centrífugo submerso (BCS), Desgaste de BCSs por ação de partículas abrasivas, Interferência da injeção de gás livre no desempenho de BCS, Cavitação e o efeito do sinergismo erosão-corrosão.

2.1. Sistema de elevação artificial por bombeio centrífugo submerso

É válido ressaltar que várias técnicas de elevação artificial de fluidos têm sido aprimoradas, com o intuito de aumentar a taxa de produção de poços, além de viabilizar a exploração de reservatórios em fim de vida. A instalação de sistemas de bombeamento centrífugo submerso consiste em uma boa alternativa para a produção de óleos médios e pesados e misturas com baixo conteúdo de gás livre em operações *onshore* e *offshore*, inclusive em águas profundas (AMARAL; ESTEVAM; FRANCA, 2009).

As BCSs têm se apresentado como uma boa opção nas aplicações acima mencionadas devido principalmente à considerável capacidade que as bombas centrífugas apresentam para mover grandes volumes de fluido, enquanto os outros métodos de elevação (*gas lift*, bombeamento mecânico, bombeamento por bombas de cavidade progressiva, dentre outros) não se mostram satisfatoriamente capazes de realizar essa tarefa.

Lea e Nickens (1999) mencionam que a seleção do método de elevação artificial mais econômico é essencial para a obtenção do máximo potencial de produção de poços de óleo ou gás. A Figura 1 mostra a vista em corte de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios.

Os principais componentes das bombas são a carcaça, o eixo, o impelidor ou rotor, o difusor e a admissão. As BCSs adicionam pressão ao fluido transformando a energia cinética transmitida pelo eixo na forma de força centrífuga, em energia potencial na forma de pressão. Um estágio da bomba é composto por dois componentes que consistem no impelidor rotativo e no difusor estacionário (LAKE, 2006). O fluido vindo do estágio imediatamente abaixo entra no difusor na direção axial com baixa velocidade e recebe energia cinética do impelidor que está girando com alta velocidade. O difusor, que permanece estacionário, redireciona o fluido do impelidor localizado imediatamente abaixo, para o imediatamente acima, reduzindo sua velocidade e energia cinética em pressão.

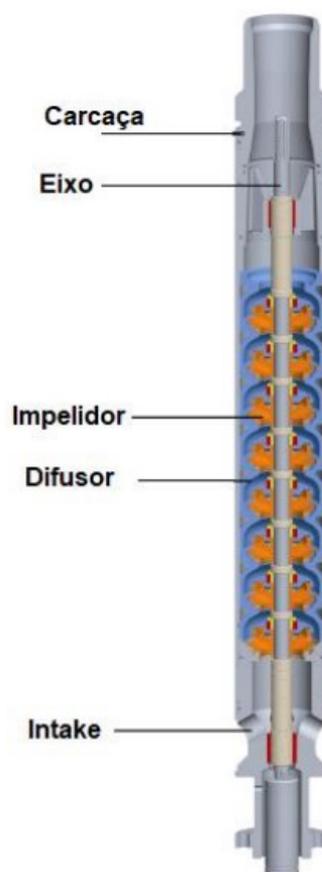


Figura 1 – Vista em corte de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios (BAKER HUGHES, 2008). Adaptado.

A caracterização do desempenho de uma BCS é feita a partir da definição das curvas de *head*, potência fornecida pelo motor elétrico e eficiência da bomba em função da vazão produzida (Figura 2). O *head* de bomba é medido em metros, consistindo no incremento de

pressão fornecido pela bomba durante o bombeamento. Cada estágio produz um acréscimo de *head*, definido pela diferença entre a energia transmitida pelo impelidor e a energia perdida pelo fluido ao passar pelo difusor. Dessa forma, a carga de um estágio pode ser multiplicada pelo número de estágios para determinar o *head* total fornecido pela bomba.

O *head* desenvolvido pelo impelidor sob condições de operação ideais é calculado pelo aumento da força centrífuga atuante no líquido entre dois estágios sucessivos. Porém, o *head* real da bomba é menor que o da curva teórica obtida pela equação de Euler. Isso acontece por causa das perdas que são: perdas hidráulicas (aumentam com a vazão de líquido e ocorrem devido ao atrito do fluido com o impelidor, assim como pela difusão do canal do impelidor); perdas de choque (ocorrem na entrada e saída do impelidor, ocasionadas por mudanças de direção no fluxo) e perdas por vazamento (perda de taxa de líquido através das folgas entre as partes rotativas e estacionárias dos estágios da bomba).

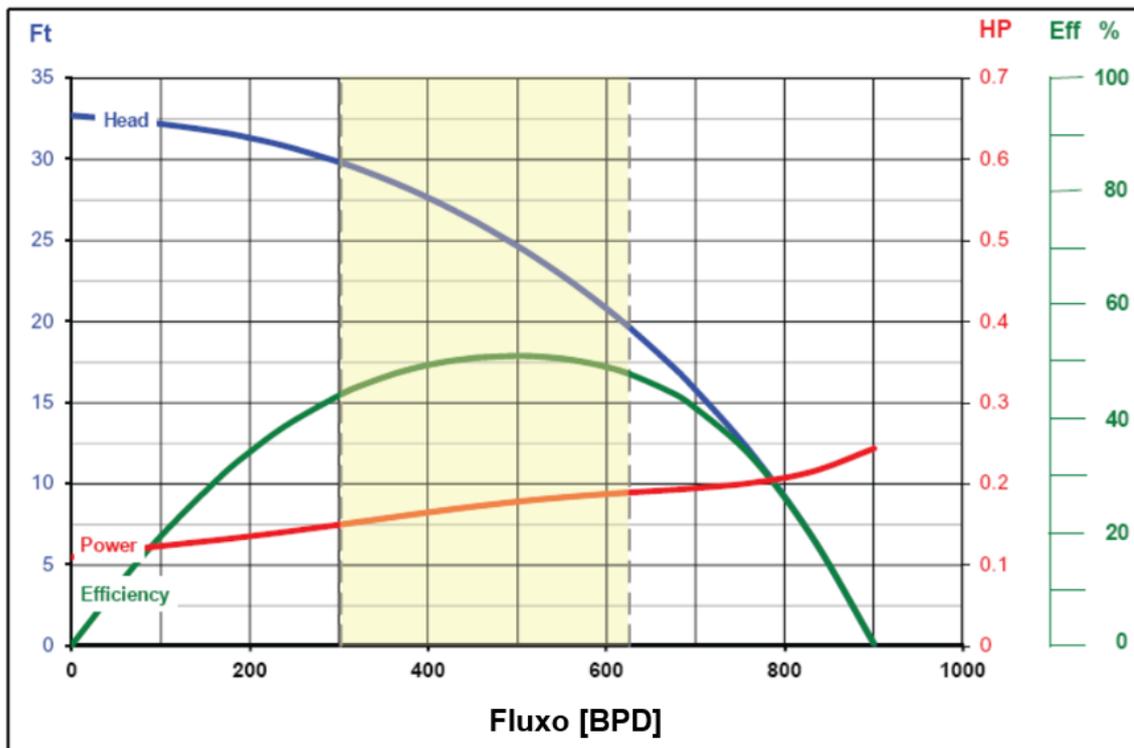


Figura 2 – Curva característica de uma BCS (Fornecida pelo Fabricante). Adaptado.

Takács (2009) afirma que as forças axiais são classificadas em estáticas e dinâmicas. As forças estáticas agem na direção vertical com sentido para baixo, pois ocorrem devido aos pesos dos impelidores e do eixo da bomba. Já as forças dinâmicas resultam da ação de bombeamento e estão relacionadas com a vazão do fluido passando pelos estágios.

2.2. Desgaste de BCSs por ação de partículas abrasivas

Em geral, sobre o desgaste das BCSs por ação de partículas abrasivas, pode-se mencionar os problemas com areia, que fazem com que as bombas percam materiais em pontos críticos, devido à erosão e abrasão. Os principais danos causados pela ação de abrasivos são: erosão no interior da bomba, abrasão em mancais radiais e abrasão em arruelas de desgaste e mancais radiais.

De acordo com Takács (2009) e Wilson (1990), o desgaste erosivo nos estágios das bombas é mais severo para partículas sólidas grandes e ásperas se comparado com aquele promovido por partículas pequenas e lisas. O desgaste erosivo é proporcional ao quadrado da velocidade do fluxo, como apresentado na Figura 3 de Zum Gahr (1987). Elevada energia cinética de turbulência gerada por superfícies rugosas e irregulares também promove e intensifica a erosão (KRUGER et al., 2010). Abrasivos podem ser carregados diretamente contra as superfícies, uma vez que o alto grau de agitação e mistura causado pela turbulência naturalmente induz o transporte de partículas perpendicularmente à direção do fluxo.

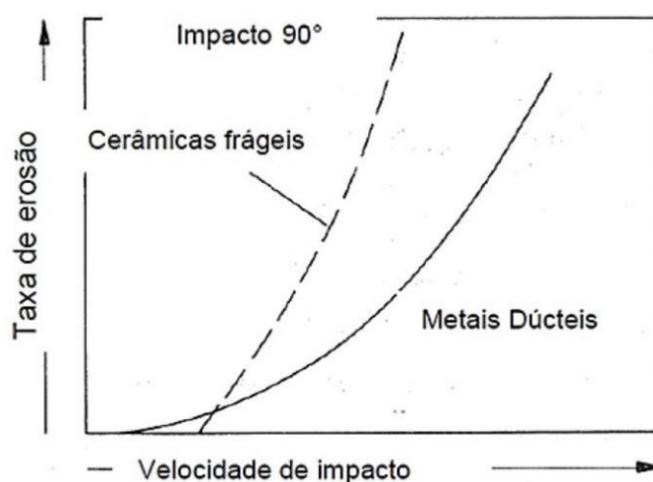


Figura 3 - Taxa de desgaste erosivo em relação à velocidade de impacto (ZUM GAHR, 1987). Adaptado.

De acordo com Wilson (1990) e King, Traylor e Stewart (1983), a abrasão consiste no deslocamento ou remoção de material por partículas de areia deslizando ou rolando na interface entre duas superfícies (desgaste a três corpos) ou em processos de riscamento e corte quando uma superfície macia contendo partículas duras incrustadas trabalha contra outra superfície (desgaste a dois corpos). Takács (2009) e Wilson (1990) afirmam que a severidade está relacionada com tamanhos de partículas abrasivas próximos ou menores que os valores de folgas das bombas.

Com o intuito de analisar o efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de BCSs, Sábia (2015) estudou os mecanismos de desgaste nos estágios de bombas após ensaios de erosão em circuito *flowloop* com areias de diferentes granulometrias, Figura 4.

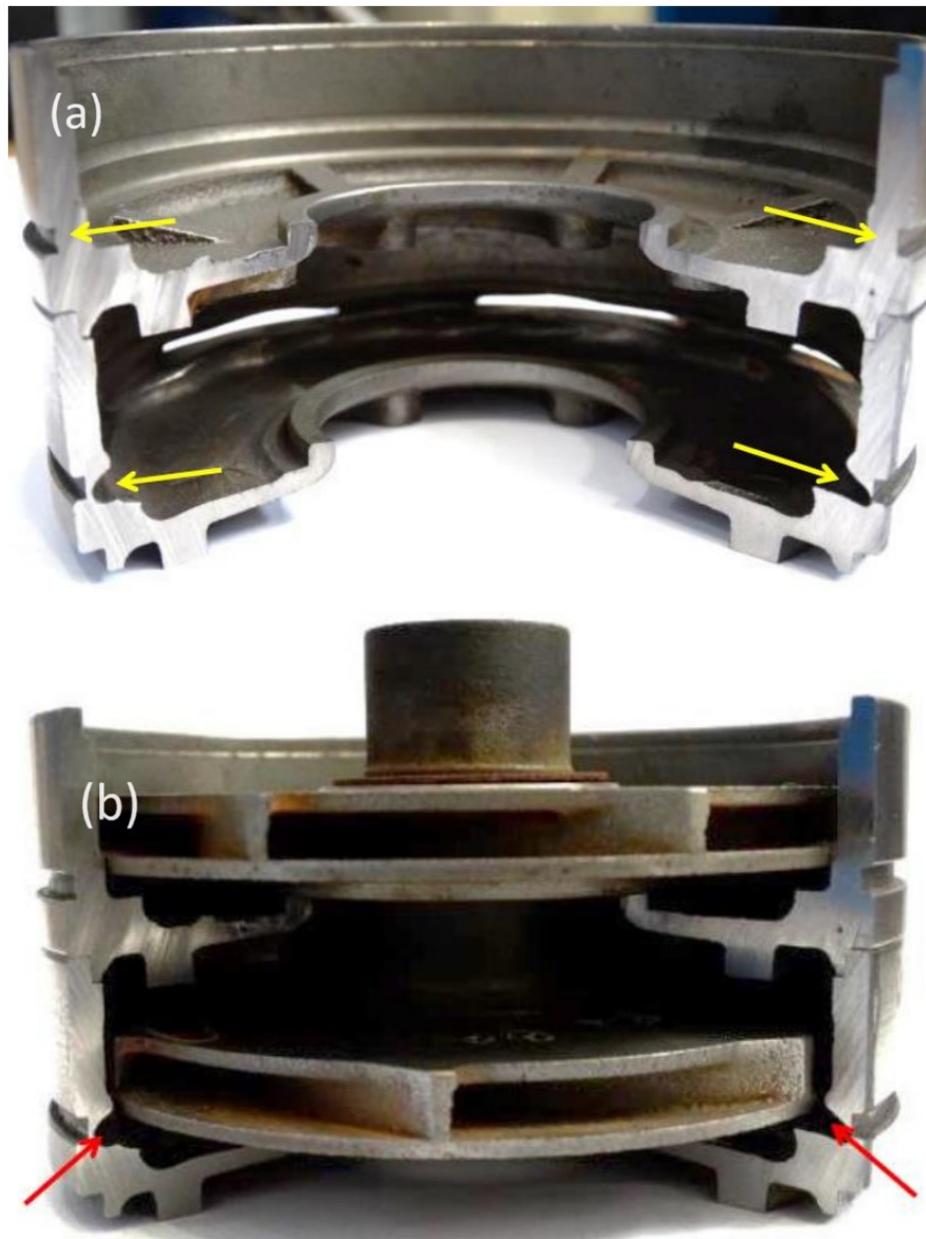


Figura 4 – Comparação entre o perfil do difusor do primeiro estágio de uma bomba nova (a) e após o ensaio erosivo (b). As setas indicam o local desgastado no difusor ensaiado e os correspondentes locais no difusor novo (SÁBIA, 2015).

As Figura 4(a) e Figura 4(b) exibem os perfis de difusores novos e após o ensaio erosivo do primeiro estágio de uma bomba de três estágios ensaiada com areia número 100. A região severamente afetada pelo desgaste erosivo foi a indicada pelas setas, em que há uma redução de espessura de parede do difusor devido à usinagem da sede do anel de vedação.

Pela Figura 4(b), observa-se a montagem dos difusores com seus respectivos rotores. Segundo o autor, essa montagem mostra que a região de maior desgaste erosivo está localizada na altura abaixo da capa inferior do rotor e não na altura em que ocorre a saída do fluxo do rotor. Percebe-se assim que o desgaste erosivo intenso foi promovido pelo fluxo de abrasivos na parede do difusor, em alta velocidade.

O desgaste abrasivo dos mancais das bombas testadas por Sábria (2015) é mostrado na Figura 5. As imagens (a) e (d) foram obtidas via microscópio eletrônico de varredura da morfologia dos tipos de abrasivos de maior granulometria (areia fina) e de menor granulometria (areia extrafina) que promoveu o desgaste sobre os mancais (b) e (e) dos respectivos ensaios. Pelas imagens (b) e (c), que correspondem ao mancal da bomba que trabalhou com areia de maior granulometria, observa-se uma superfície com irregularidades e canais de maiores profundidades, se comparado às imagens (e) e (f) do mancal da segunda bomba.

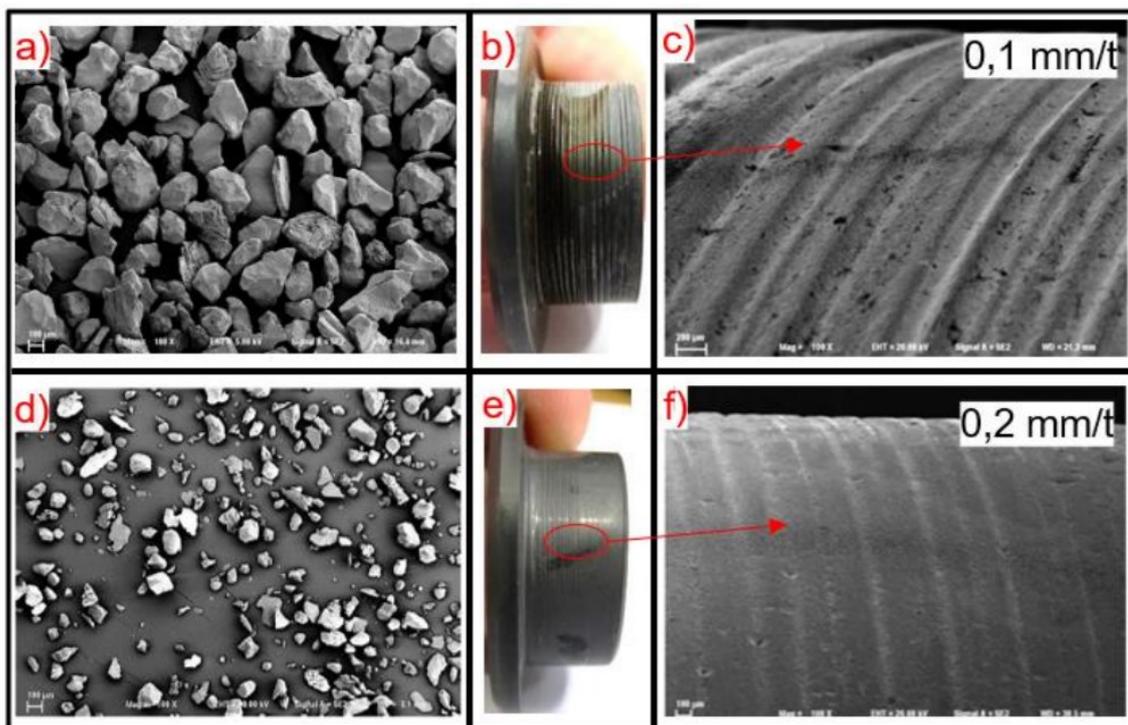


Figura 5 – Luvas dos mancais após os ensaios (SÁBRIA, 2015).

2.3. Interferência da injeção de gás livre no desempenho de BCS

Quantidades consideráveis de gás livre são encontradas durante a produção de petróleo. As consequências da entrada de gás em bombas centrífugas dependem da

quantidade de gás e líquido presentes e variam de uma redução leve na performance até o total bloqueio do fluxo.

Cada bomba é caracterizada por curvas de performance que incluem a curva de carga (*head*), curva de potência consumida pelo eixo e curva de eficiência, sendo que todas são em função da vazão da bomba com determinada rotação.

Durante os estudos sobre a capacidade de BCSs de superar a presença de gás livre durante o bombeamento, Dunbar (1989) e Lea, Turpin e Bearden (1986) afirmaram que a pressão de injeção do fluido no *intake* da bomba desempenha um papel essencial em determinar a quantidade de gás que pode ser acomodada sem deteriorar significativamente a performance da bomba. Uma grande contribuição desses estudos experimentais foi a identificação dos principais parâmetros que alteram o comportamento da bomba centrífuga operando com gás livre. Esses parâmetros são, além da pressão de admissão da bomba, as frações volumétricas de gás livre e fase líquida, a vazão de operação e a velocidade da bomba.

A maior parcela dos problemas de BCSs com gás livre deriva da segregação de fases nos impelidores das bombas (TAKÁCS, 2009). A segregação de fases é afetada por diversos fatores, a saber:

- Geometria do estágio: a capacidade da bomba de operar com a presença de gás livre depende de sua velocidade específica. Quanto maior a velocidade específica da bomba, maior a capacidade de gerenciamento do gás livre;
- Tamanho da bolha: tem um grande impacto na resistência e forças de empuxo atuando nas bolhas imersas na fase líquida. As forças de arrasto tentam manter as bolhas de gás dispersas no líquido, enquanto a força de empuxo tende a separá-las. Bolhas menores e dispersas tendem a fluir com a fase líquida e são mais difíceis de separar.
- Densidade das fases: a proporção das densidades das fases líquidas e gasosas determinam a magnitude das forças de empuxo que causa a separação de fases.
- Viscosidade do líquido: afeta as forças de arrasto que atuam nas bolhas de gás, onde viscosidades maiores atuam contra a segregação de fases;
- Rotação da bomba: a velocidade de rotação da bomba tem o duplo efeito de aumentar as forças centrífugas que tentam segregar as fases e a turbulência do escoamento, que reduz o tamanho das bolhas de gás e as dispersa na fase líquida.

Lea e Bearden (1982), em um estudo de avaliação do efeito da injeção de gás livre na performance de BCSs, realizaram investigações em dois procedimentos diferentes. No primeiro ensaio foi bombeada uma mistura de água com ar comprimido, enquanto na segunda

investigação foi bombeado óleo diesel com gás dióxido de carbono injetado. Os resultados das duas investigações convergiram no sentido de que volumes de gás acima de 10 % do volume total causaram sérias reduções nas curvas de desempenho do modelo de bomba testado.

2.4. Cavitação

Durante o bombeamento de líquidos, a queda de pressão em qualquer estágio da bomba até o ponto de saturação de vapor do líquido leva à ocorrência de desgaste por cavitação nos estágios da bomba. A cavitação envolve a formação e o crescimento de bolhas que, quando levadas pelo líquido a pontos de alta pressão, entram em colapso repentino. O colapso das bolhas causa aumentos na pressão que resultam em choques e danos mecânicos nas paredes dos componentes (TAKÁCS, 2009).

O fenômeno da cavitação também pode ocorrer durante a extração de petróleo devido à presença de altas frações de gás livre na mistura. O choque mecânico das bolhas de gás livre com as paredes dos estágios pode gerar danos por cavitação, mesmo que a pressão não chegue ao ponto de saturação do líquido. A severidade dos danos por cavitação nos estágios das bombas dependerá do tempo que a bomba operou nestas condições. Um exemplo de dano severo devido à cavitação no rotor de uma bomba centrífuga convencional é mostrado na Figura 6.

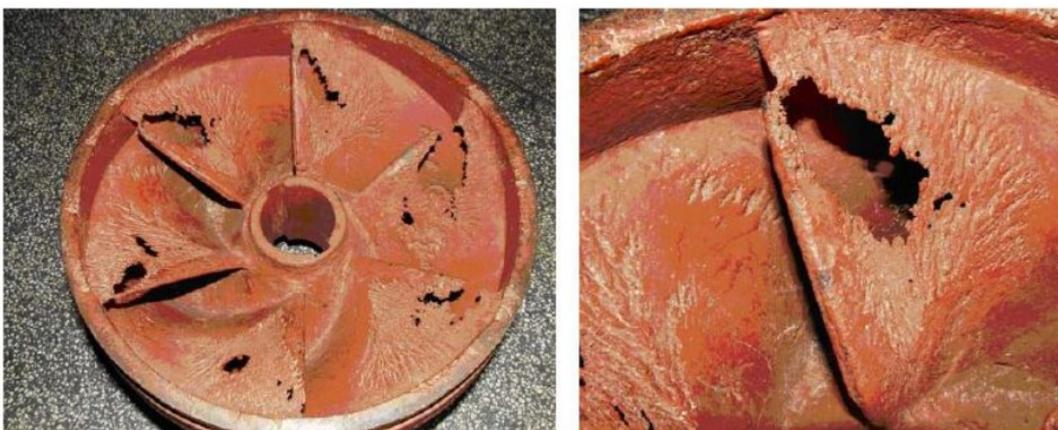


Figura 6 - Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação (COELHO, 2006).

2.5. Sinergismo erosão-corrosão

Segundo Gentil (2007), na água, deve-se considerar a possibilidade de ação combinada da corrosão com solicitações mecânicas. Nesses casos, os materiais metálicos em contato

com líquidos em movimento podem apresentar corrosão acelerada pela ação conjunta de fatores químicos e mecânicos. Neville (1995) afirma que a combinação de meios líquidos agressivos e a possibilidade de cargas elevadas de partículas sólidas arrastadas nos sistemas de bombeamento representam algumas das condições mais severas enfrentadas pelos materiais atuais.

Além da ocorrência isolada de corrosão e erosão dos componentes das BCSs, estes sistemas estão frequentemente submetidos à ocorrência simultânea desses dois fenômenos.

De acordo com Sun, et al. (2020), uma seleção criteriosa dos materiais utilizados nos estágios de BCS é crucial para prolongar o tempo de serviço do sistema. Trabalhando em altas velocidades de rotação com a presença de particulados no fluido, as bombas estão sujeitas a desgaste erosivo devido ao impacto das partículas nas paredes dos componentes. Além disso, em várias circunstâncias, as BCSs trabalham em poços com a presença de soluções corrosivas. Desta forma, além do desgaste erosivo, os estágios ficam expostos a ataques corrosivos.

Desta forma, Sun et al. (2020) efetuaram uma pesquisa para determinar o efeito do sinergismo erosivo-corrosivo no desgaste de três materiais normalmente utilizados em impelidores e difusores de BCSs. Foram realizados ensaios de jato de água com areia para soluções salinas ou de apenas água doce. Os materiais utilizados foram o Ni-Resist tipo 1 e D4 e o aço inoxidável superduplex. A Figura 7 contém os resultados do ensaio erosivo para as diferentes soluções e materiais.

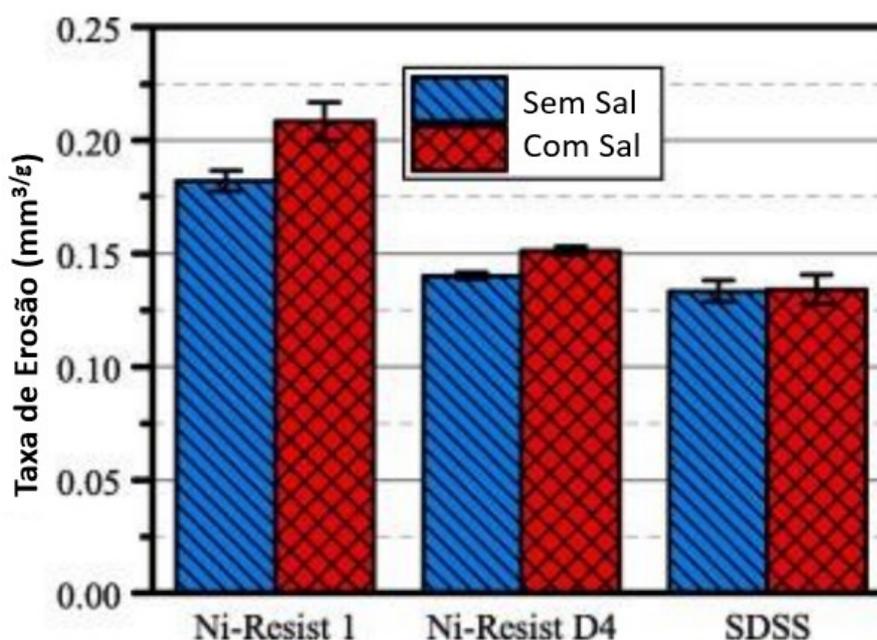


Figura 7 – Efeito da solução salina (barra vermelha) no desgaste de diferentes materiais utilizados nos estágios de BCSs em comparação com os ensaios erosivos em solução de água doce (barra azul) (Sun et al, 2020). Adaptado.

Os autores constataram que as perdas volumétricas dos materiais Ni-Resist aumentam nos ensaios com solução salina, evidenciando o efeito sinérgico da erosão-corrosão. O aumento da perda volumétrica para esses materiais pode ser justificado, segundo Sun et al. (2020), devido:

- Presença de múltiplas fases no Ni-Resist acelera a formação de células galvânicas que atacam as interfaces das fases e fragilizam os apoios mútuos entre as fases;
- Trincas por fadiga são facilmente desenvolvidas nos limites dos grãos do material. O desenvolvimento dessas trincas é acelerado pela corrosão e fadiga em ambiente salino.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para alcançar o objetivo proposto. As etapas de realização foram as seguintes: análise macrográfica dos componentes da bomba BCS utilizada, identificação dos componentes com maior desgaste e análise morfológica dos mesmos via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS).

3.1. Análise Macrográfica

Inicialmente, os componentes foram identificados com uma marcação utilizando um *Engraver*, Figura 8, exceto componentes fabricados de carboneto. Em seguida foi realizado o registro fotográfico e a medição de massa.



Figura 8 – Imagem exemplificando marcação com Engraver.

Foram registradas fotos utilizando o celular e uma cabine de fotos de cada componentes, antes e após o ensaio para fins de comparação. As fotos possibilitam identificar os principais pontos para futuras análises como informações de corrosão e dos mecanismos de desgaste que contribuíram para a degradação da bomba durante o ensaio, influenciando no seu rendimento. Na Figura 9 são mostradas as fotos antes e depois do ensaio de dois componentes.

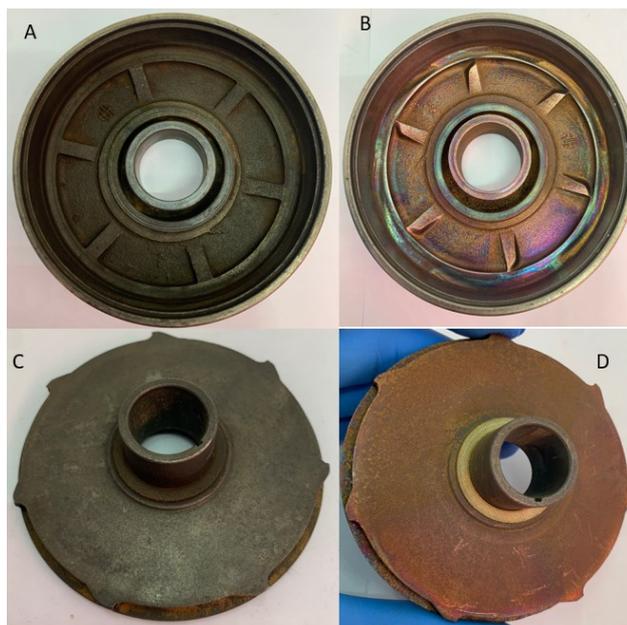


Figura 9 – Imagens de dois componentes da BCS antes e após o ensaio onde: (A) Difusor antes do ensaio. (B) Difusor depois do ensaio. (C) Impelidor antes do ensaio. (D) Rotor após o ensaio.

Feito isso, foi realizada a montagem da BCS e ensaiada. O ensaio foi realizado de forma ininterrupta, 24 horas por dia, totalizando uma duração de aproximadamente 677 horas (\cong 28 dias). Durante aproximadamente 73 % desse tempo (\cong 497 horas) a bomba operou com a presença simultânea de areia e gás CO_2 . Ao todo, foram bombeados cerca de 2000 kg de areia nº 100 (fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)) na concentração mássica média de areia de 0,20 % (2000 ppm), e vazão de gás de $11,9 \text{ l/min} \pm 1,0 \text{ l/min}$ (fração volumétrica de $16,00 \% \pm 1,20 \%$). Nos restantes 27 % (\cong 180 horas) da duração do ensaio, foram realizados procedimentos de levantamento de curvas características e aquisição de dados de vibrações. Nesse período, portanto, a bomba operou sem a presença de abrasivo e injeção de gás CO_2 .

Assim que o ensaio foi finalizado, a bomba foi desmontada e realizado um procedimento de limpeza. Primeiramente foi utilizado água e detergente neutro para retirar o sal e outros resíduos, posteriormente, os componentes foram limpos com álcool e armazenados em um

dessecador a vácuo para análises futuras. A Figura 10 e Figura 11 mostram registros fotográficos no momento da desmontagem da bomba após ensaio.

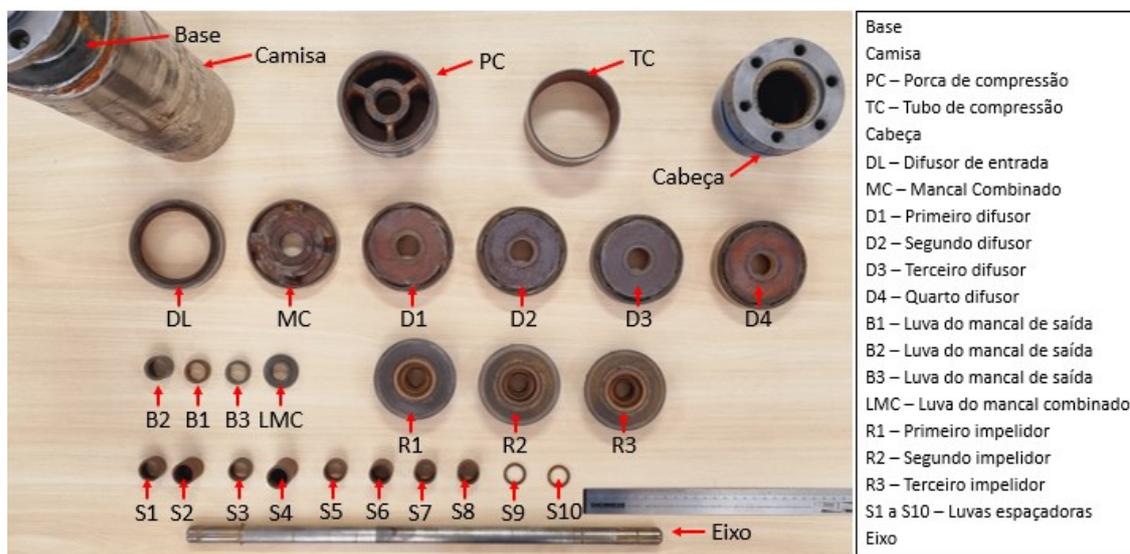


Figura 10 – Imagem dos Componentes da bomba BCS.

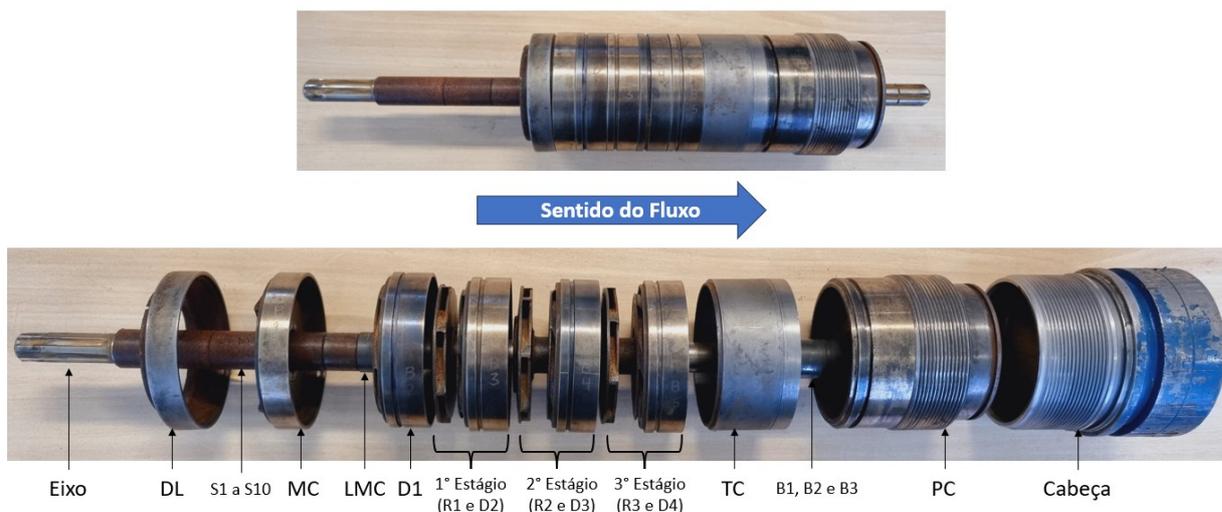


Figura 11 – Imagem dos Componentes da bomba BCS.

3.2. Identificação dos componentes avaliados

Para quantificação do desgaste dos componentes das bombas foram realizadas as medições das massas de todas as peças antes e após o ensaio com abrasivo. Para isso, realizou-se a abertura e desmontagem da bomba centrífuga seguindo o procedimento operacional padrão concedido ao laboratório pela oficina de bombas centrífugas da Petrobras, em Mossoró/RN. A bomba foi desmontada pela equipe técnica do Laboratório. Foram

realizadas as medições dimensionais e da massa dos componentes mecânicos seguindo os procedimentos recomendados pela Petrobras.

Com os componentes devidamente limpos e armazenados, foram realizados dois procedimentos, cálculo da perda de massa e cálculo da perda dimensional. A Tabela 1 indica as características principais dos sistemas de medição utilizados para medição da massa.

Tabela 1 – Sistemas de medição utilizados na avaliação dos componentes da bomba.

Instrumento	Fabricante	Modelo	Faixa de medição	Resolução	Aplicação
Balança Digital	Bel Engeneering	Mark4100	0,20-4100 g	0,01 g	Massas dos difusores
Balança Digital	SHIMADZU	AW220	0,01-220 g	0,0001 g	Massa dos impelidores e mancais

A massa de cada componente foi medida cinco vezes. Para tanto foram utilizadas as balanças especificadas acima. Os certificados de calibração das balanças se encontram no ANEXO 1 e 2, respectivamente.

Foi criada uma tabela para cálculo da taxa de desgaste em gramas/toneladas da BCS, onde foram dosadas duas toneladas de areia, disponível no Apêndice 01, pode-se notar o desgaste de cada componentes com o ensaio realizado. Com o intuito de tonar mais didático foi criado um gráfico, como ilustrado na Figura 12.

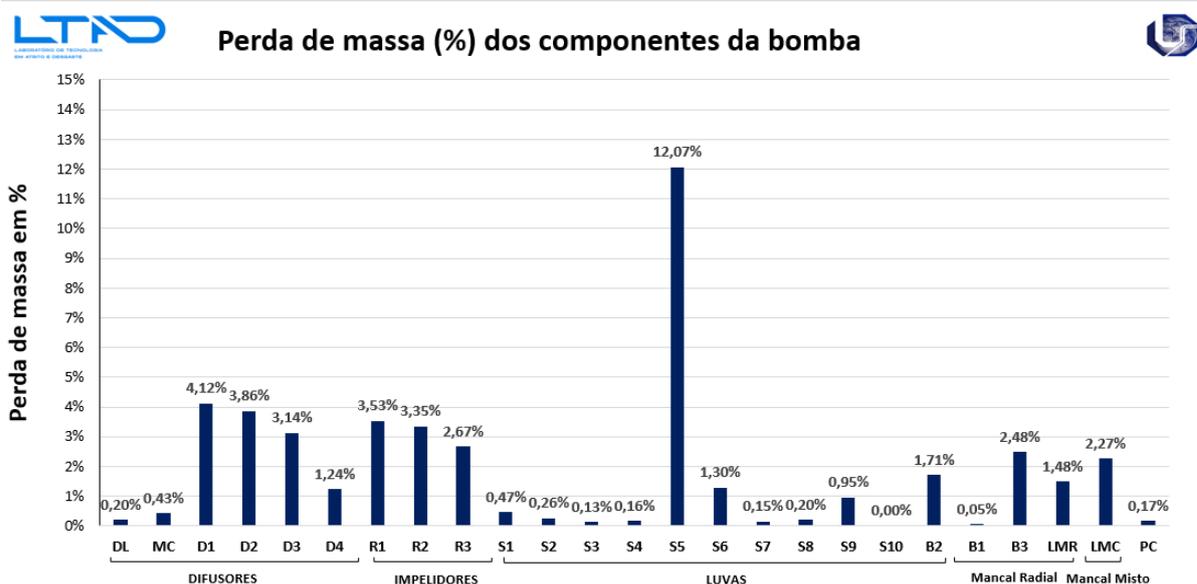


Figura 12 - Perda de massa dos componentes da bomba.

Após a análise da Figura 12, pode-se notar que alguns componentes exibem um desgaste mais significativo que outros. Logo, seleccionaram-se as seguintes peças:

- Bucha do Mancal Combinado (MC);
- Difusor 1 (D1);
- Impelidor 1 (R1);
- Luva do Mancal Combinado (LMC);
- Luva do Mancal Radial 2 (B2);
- Bucha do Mancal Radial.

Com o registro fotográfico, pode-se observar macroscopicamente a degradação de cada componente, como mostrado pelas Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17. Destacando, portanto, a influência do gás CO₂ operando em meio salgado com abrasivo.

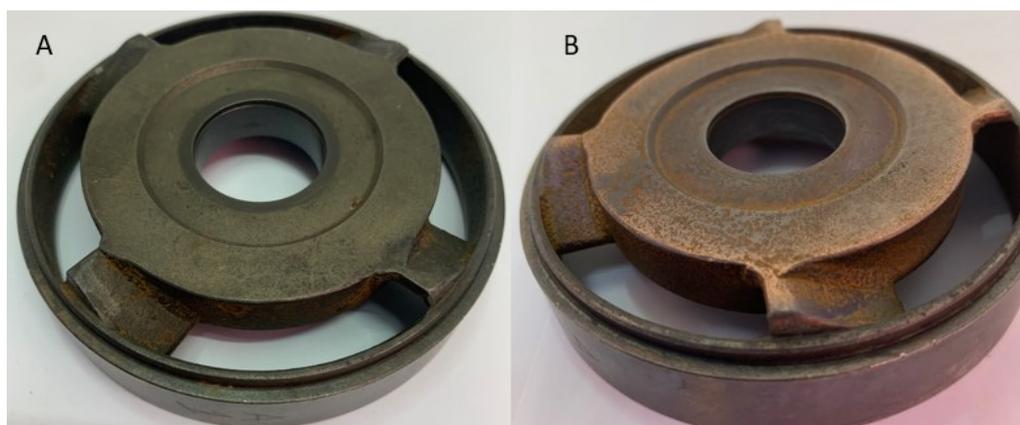


Figura 13 – Imagem do Mancal Combinado onde: (A) Imagem Mancal Combinado antes do ensaio; (B) Imagem do Mancal Combinado depois do ensaio.

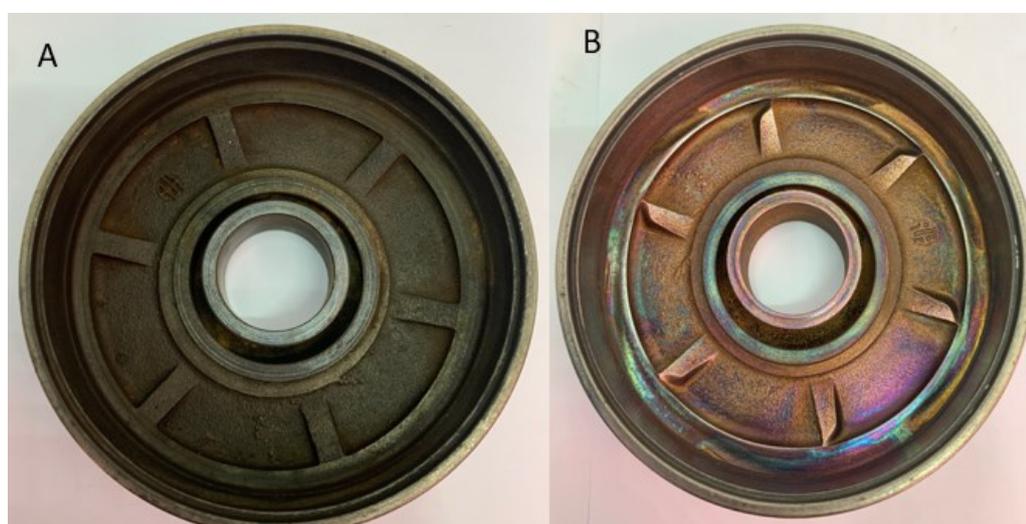


Figura 14 – Imagem do Difusor 1 onde: (A) Imagem do Difusor 1 antes do ensaio; (B) Imagem do Difusor 1 depois do ensaio.

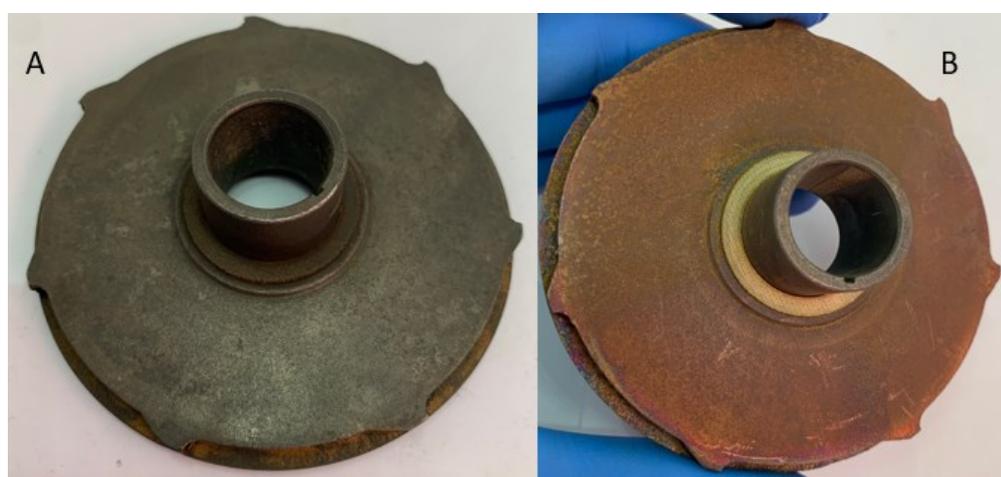


Figura 15 – Imagem do Rotor 1 onde: (A) Imagem do Rotor 1 antes do ensaio; (B) Imagem do Rotor 1 depois do ensaio.

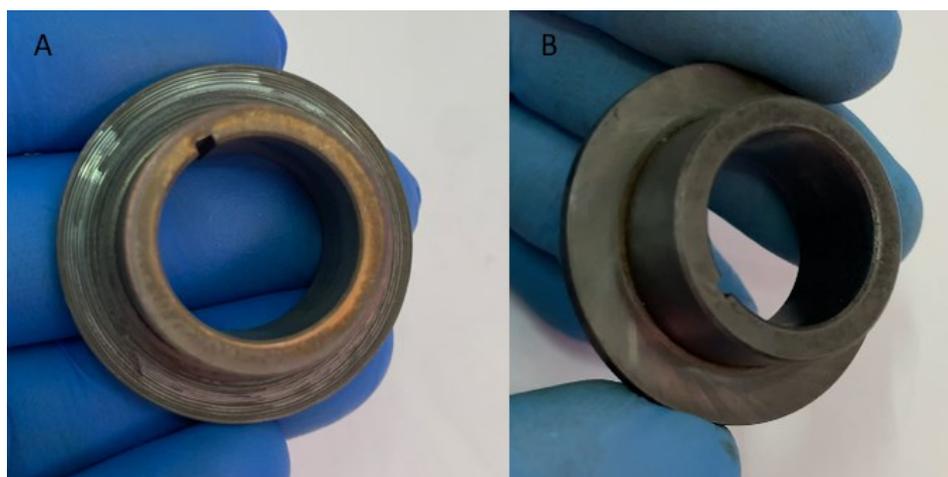


Figura 16 – Imagem da Luva do Mancal Combinado onde: (A) Imagem do Mancal Combinado antes do ensaio; (B) Imagem do Mancal Combinado depois do ensaio.

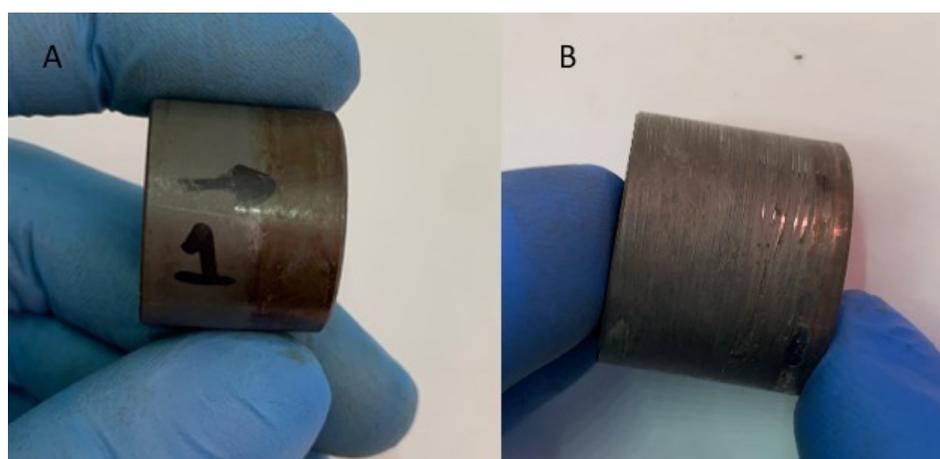


Figura 17 – Imagem da Luva do Mancal Radial 2 onde: (A) Imagem da Luva do Mancal Radial 2 antes do ensaio 1; (B) Imagem da Luva do Mancal Radial 2 depois do ensaio.

¹ O numeral indicado na peça não representa o número indicado na Imagem 3.10 (A).

Após a seleção dos componentes, eles foram levados no Microscópio Eletrônico de Varredura para análise microscópica e morfológica.

3.3. Análise morfológica

Nesta etapa foi realizada a verificação dos principais componentes a serem analisados pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. Esta análise tem o objetivo de identificar os diferentes mecanismos de desgaste que levaram a degradação dos componentes da bomba. Dessa forma, foram selecionadas, amostras de difusores, impelidores e luvas e

buchas dos mancais de entrada e saída. Além disso, também são realizadas análises de composição química pela técnica *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*, com o objetivo de identificar o material de fabricação dos componentes, e a presença de elementos químicos que caracterizam o desgaste por corrosão.

As análises de MEV foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução da marca Zeiss, modelo Supra 40, do tipo FEG, equipado com análise de energia dispersiva de raios-X. Para preparação dessas amostras, foram cortadas seções do rotor e do difusor em tamanhos reduzidos, que juntamente com as luvas dos mancais, foram limpas primeiro com detergente neutro e, na sequência, com álcool etílico em uma cuba com ultrassom, por quatro minutos.

Rara realizar os cortes foi utilizado uma máquina de eletroerosão a fio da marca AgieCharmilles, modelo CUT E 350. A Figura 18 ilustra os cortes realizados para obtenção da luva de entrada a ser analisada no mancal misto. Foram analisadas duas áreas por MEV e realizada uma EDS. Na Figura 19 são mostradas as áreas avaliadas.

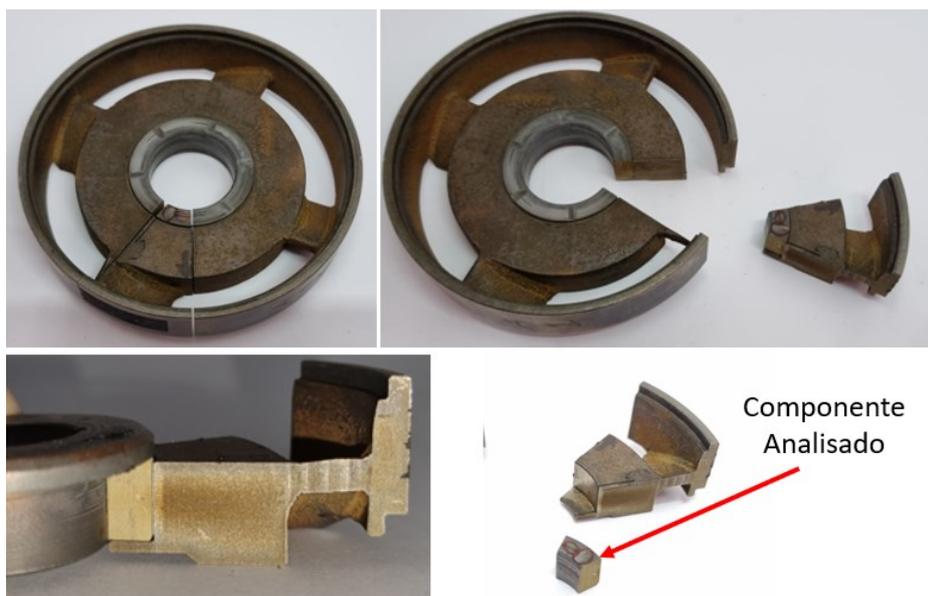


Figura 18 – Cortes realizados para obtenção da Bucha do Mancal Combinado para análise micrográfica.

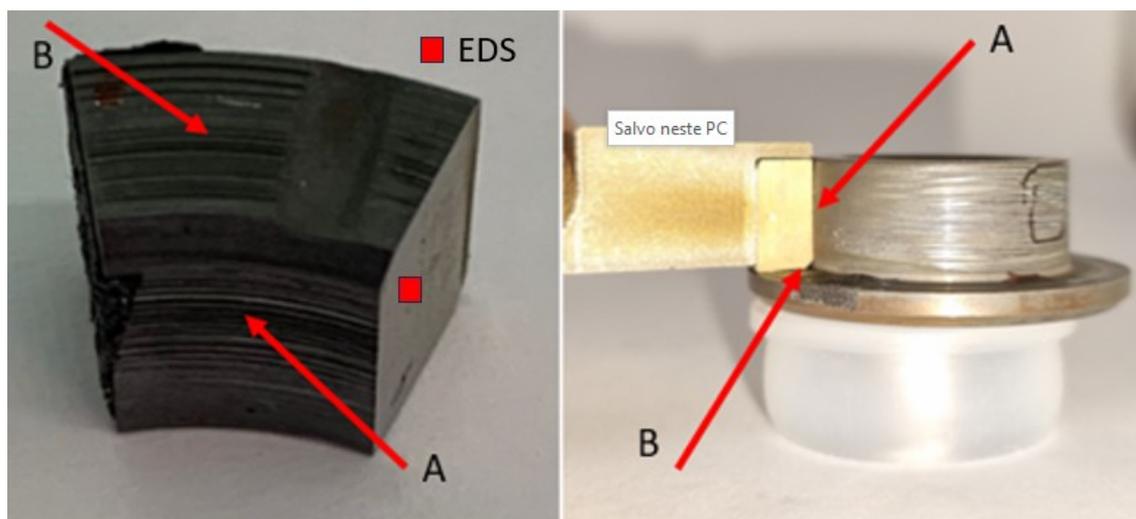


Figura 19 – Áreas selecionadas para análises micrográficas e EDS na Bucha do Mancal Combinado.

Para ter acesso aos canais de escoamento de fluido no difusor e no impelidor, foram realizados cortes para obtenção das capas e na sequência os cortes em pizza. Do Difusor 1, cinco amostras foram separadas para estudo, sendo quatro micrográficas e uma para análise morfológica. A Figura 20, exemplifica a sequência de cortes.



Figura 20 – Cortes realizados no Difusor 1: (A) Capa do Difusor 1; (B) Pad (C) Região Superior Interna do Difusor 1; (D) Região Inferior Interna do Difusor 1; (E) Região Interna da Lateral do Difusor 1.

Com os componentes cortados, definiu-se quais regiões seriam analisadas. Das peças “B”, “C”, “D” e “E” (Figura 20), foram analisadas as áreas apresentadas nas Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24, respectivamente.

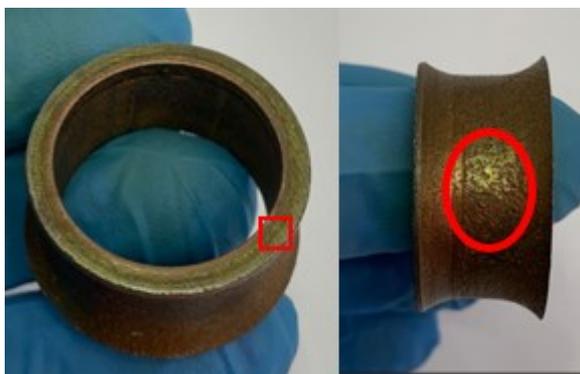


Figura 21 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Pad.



Figura 22 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Superior Interno do Difusor 1.

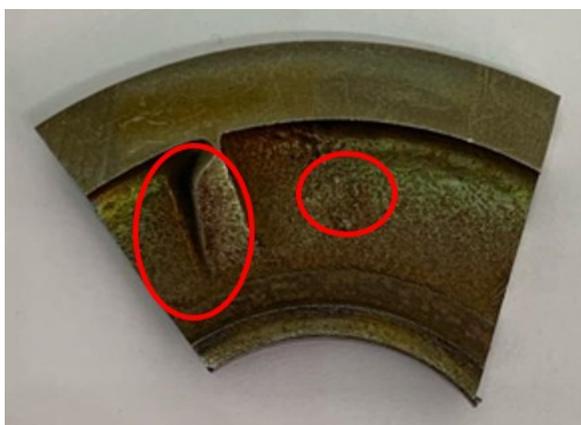


Figura 23 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Inferior Interno do Difusor 1.



Figura 24 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Interno da Lateral do Difusor 1.

Do Impelidor 1, duas amostras foram separadas para estudo micrográfico e morfológico. Na Figura 25 é mostrada a sequência de cortes.

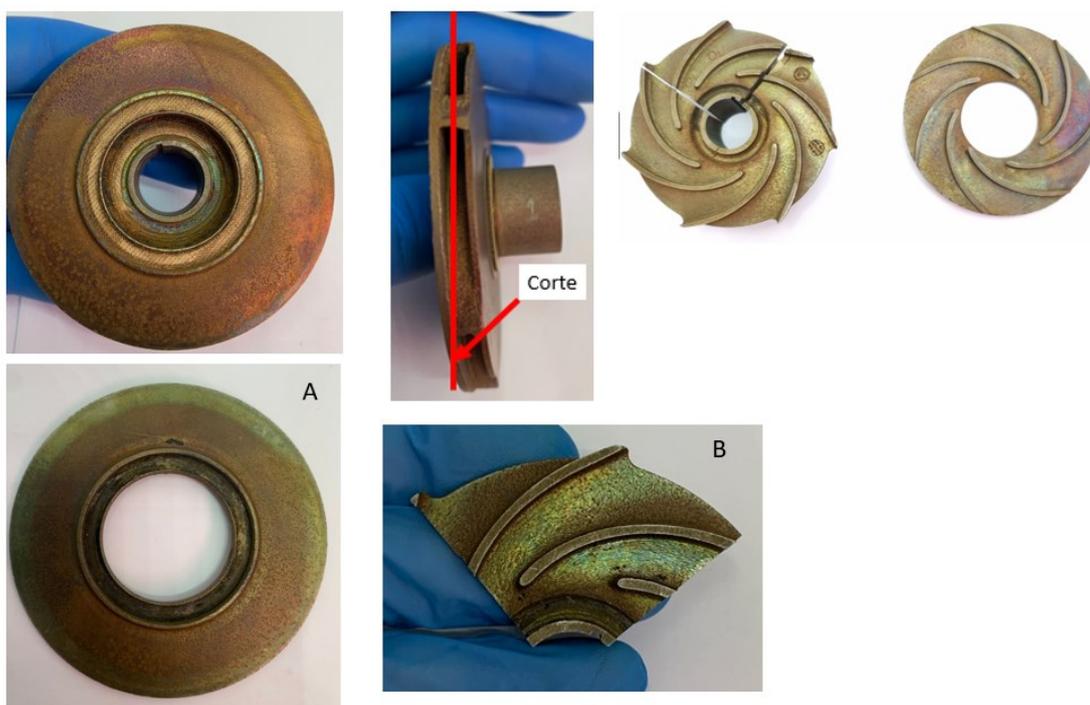


Figura 25 – Cortes realizados no Impelidor 1: (A) Capa Externa do Impelidor 1; (B) Corte em Pizza da parte Interna do Impelidor 1.

Da peça “A” (Figura 25) foram selecionadas as áreas apresentadas na Figura 26 para análise micrográfica e nas peça “B”, (Figura 25), as áreas apresentadas na Figura 27 foram selecionadas, respetivamente.



Figura 26 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Capa Externa do Impelidor 1.



Figura 27 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Corte em Pizza da parte Interna do Impelidor 1.

Para análise da Luva do Mancal Combinado, não foi necessário realizar nenhum corte, pois as regiões para serem analisadas micrograficamente já estão expostas. Desta forma foram selecionadas quatro áreas, destacando duas regiões mais desgastadas e duas com desgaste menor. Na Figura 28 são mostradas as regiões selecionadas.

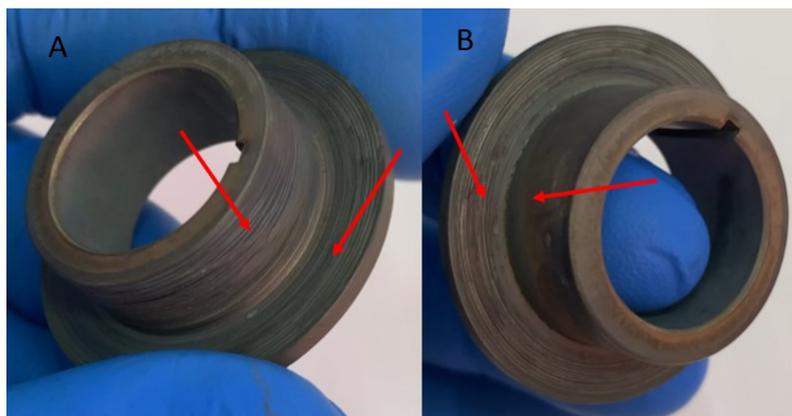


Figura 28 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Luva do Mancal Combinado: (A) Região com maior desgaste; (B) Região com menor desgaste.

Em relação a Luva do Mancal Radial 2 também não foi realizado nenhum corte, pois as regiões para serem analisadas micrograficamente já estão expostas, destacando duas áreas com um desgaste mais significativo. A Figura 29 exemplifica as regiões de análise micrográfica.

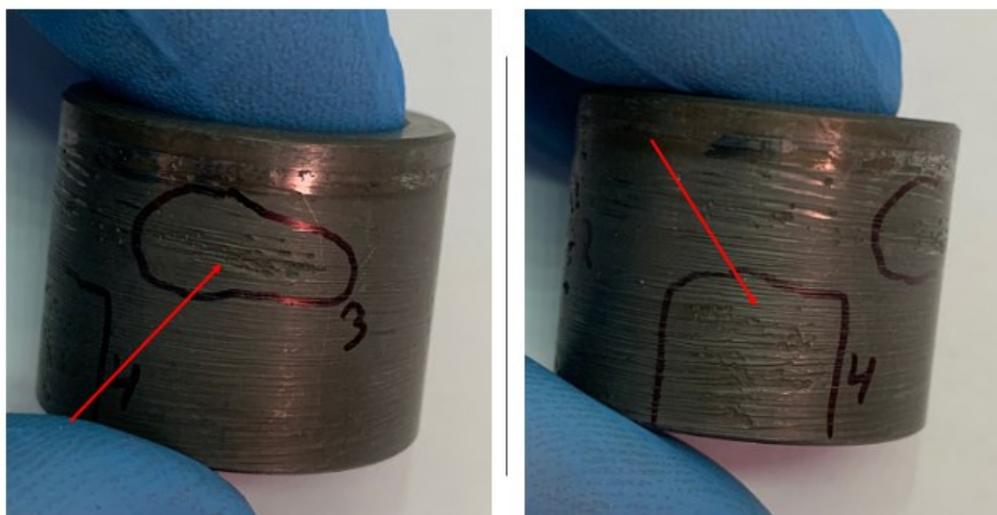


Figura 29 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Luva do Mancal Radial 2.

Por fim, para a Bucha do Mancal Radial foi realizado um corte separando a peça em duas metades para estudo micrográfico e morfológico. A Figura 30 mostra as partes após o corte.

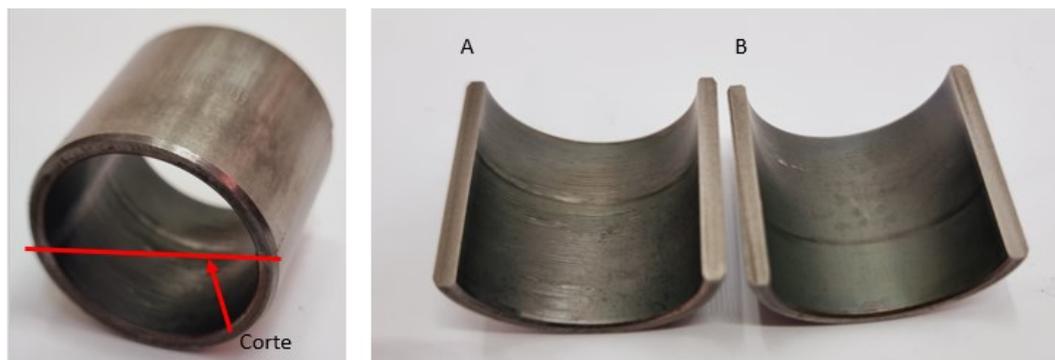


Figura 30 – Corte realizado na Bucha do Mancal Radial.

Com a Bucha cortada, definiu-se quais regiões seriam analisadas. Das peças “A” e “B” (Figura 30), determinou-se as áreas apresentadas na Figura 31 e da parte B ainda foi realizada uma EDS.

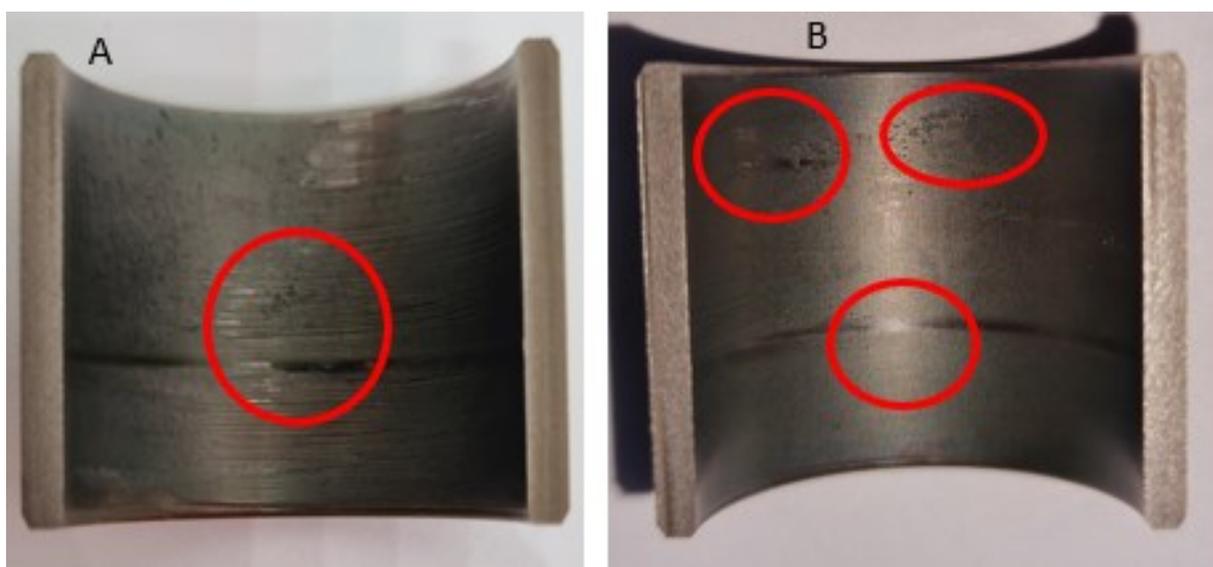


Figura 31 – Regiões escolhidas para análises micrográficas no componente Bucha do Mancal Radial.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises das superfícies dos componentes após o ensaio da BCS. Os resultados são apresentados em seis tópicos. Estes são dedicados aos seis componentes escolhidos para a análise, quais sejam: Bucha do Mancal Combinado (MC); Difusor 1 (D1); Impelidor 1 (R1); Luva do Mancal Combinado (LMC); Luva do Mancal Radial 2 (B2); e Bucha do Mancal Radial.

4.1. Bucha do Mancal Combinado

O resultado das análises de EDS na bucha do mancal combinado é mostrado na Figura 32. Por sua vez a Figura 32 mostra as imagens MEV da superfície da Bucha do Mancal Combinado, mostrando os locais de análises (A e B). A partir da Figura 31 concluiu-se que o material do componente constitui de um compósito de metal duro com carbonetos de tungstênio incorporados à uma matriz metálica de cobalto.

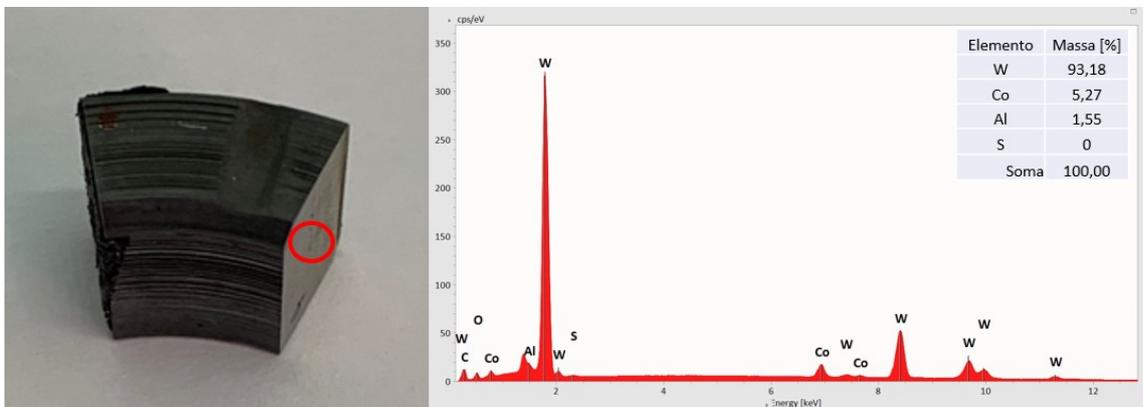


Figura 32 - Resultados de análises de EDS na superfície da Bucha do Macal Combinado e resultados dos espectros de raios-x com quantificação dos elementos.

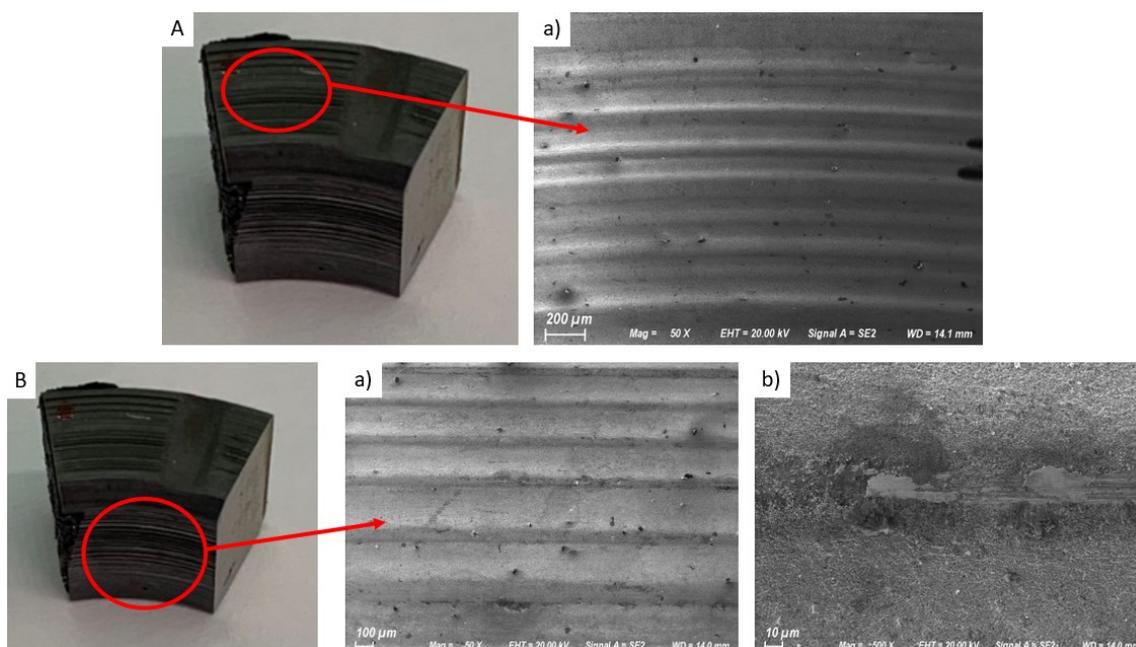


Figura 33 – Imagens MEV da superfície da Bucha do Mancal Combinado, mostrando os locais de análises (A e B).

Na Figura 33 se observa a formação dos canais preferenciais com formação de sulcos que se estendem por toda a superfície. Os abrasivos que atingem esses canais, aí permanecem até que sejam fragmentados. Durante esse período, eles contribuem para o aumento das dimensões dos canais. Em uma ampliação maior, Figura 33 – b, observa-se a região onde houve contato metal-metal dos carbonetos.

4.2. Difusor 1

4.2.1. Pad

Por se tratar de um componente do Difusor, sabe-se que é um componente estacionário. Na Figura 34 - A, notou-se a formação de sulcos e riscos circunferenciais no sentido do fluxo. Este fato pode ser atribuído a ação do fluido que passa pelo impelidor e é direcionado para o Difusor, uma vez que ele passa por essa região. Na área B, há evidência

de deslizamento, visto que, durante o *downthrust*, ocorre o contato direto com o anel de Celeron no impelidor, o que, na presença de partículas, resulta em abrasão.

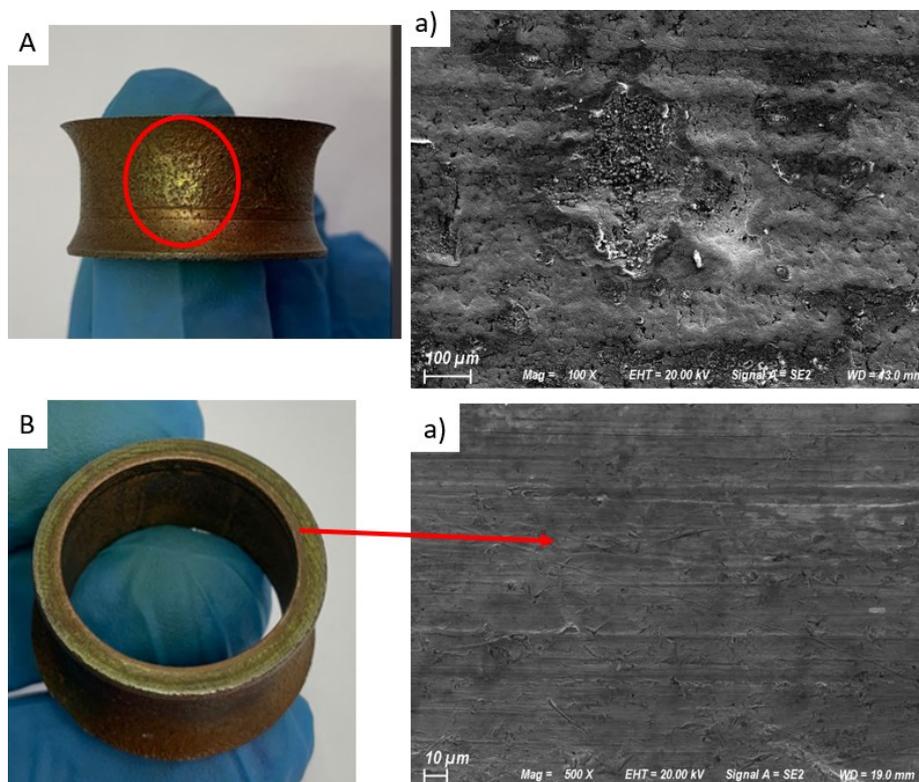


Figura 34 – Imagens MEV da superfície Pad do Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).

4.2.2. Região Superior Interna do Difusor

Conforme descrito por Lake (2006), um estágio da bomba é composto por dois componentes básicos, um impelidor rotativo e um difusor estacionário. O fluido vindo do estágio imediatamente abaixo entra no difusor na direção axial com baixa velocidade, e recebe energia cinética do impelidor que está girando com alta velocidade. O redirecionamento do fluxo de fluido do impelidor imediatamente abaixo para o impelidor acima é realizado pelo difusor, que mantém sua posição fixa. Na representação da Figura 36, há um recorte destinado à análise da região onde ocorre a desaceleração do fluido, convertendo sua energia cinética em pressão, identificadas como áreas "A" e "B".

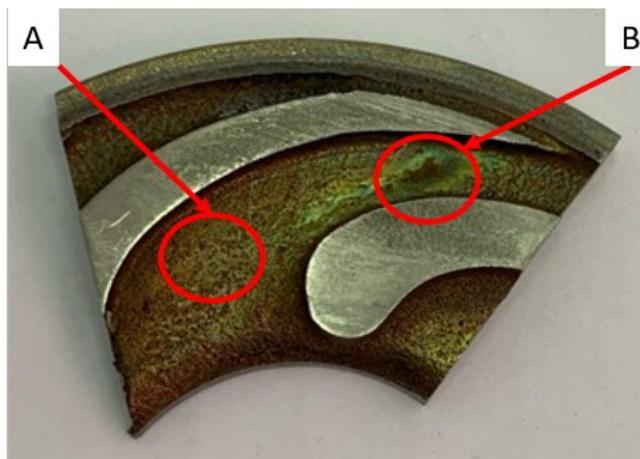


Figura 35 - Partes analisadas da parte interna do Difusor.

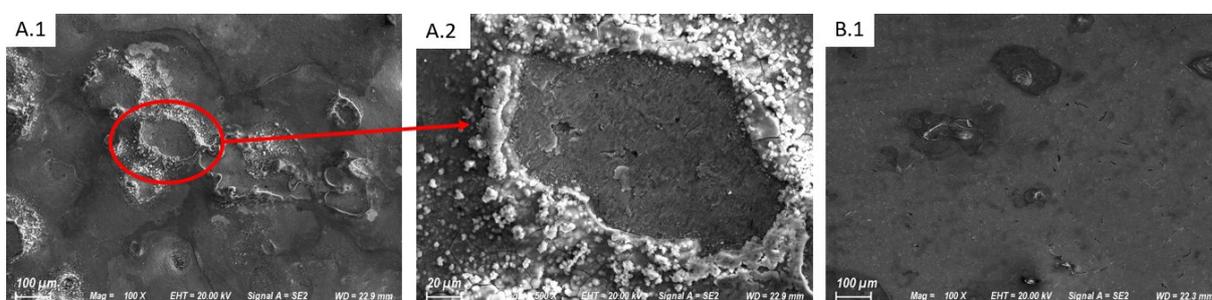


Figura 36 – Imagens MEV da superfície Superior Interna Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).

Nas imagens da região “A” pode-se observar uma corrosão por pite, que é uma forma de corrosão localizada que se processa em pontos ou em pequenas áreas na superfície do metal produzindo pequenos furos. O filme passivo é rompido ocorrendo à exposição de uma pequena área na superfície do metal, cercada por uma extensa área protegida, formando um acoplamento galvânico (GENTIL, 1982). Na Figura 36 (A.2) observa-se uma camada de oxido em volta da corrosão, evidenciando um pite de corrosão. Entretanto, o mesmo não pode ser dito para a região (B), que apresenta uma região mais polida com a formação de um sulco mais profundo devido a passagem do fluido. Contudo, as imagens não possibilitaram analisar o mecanismo que degradou essa região.

4.2.3. Região Inferior Interna do Difusor

Analisando detalhadamente os efeitos da degradação dos impelidores e difusores, observou-se um desgaste mais severo por erosão na região interna dos difusores. A Figura 37 mostra uma imagem comparativa do difusor do 1º estágio, destacando à esquerda o componente em condição nova e à direita após o bombeamento de 2000 kg de abrasivo. A análise revela claramente o desgaste por erosão na parte interna do difusor, causada pelo impingimento de partículas abrasivas na superfície do material, provenientes do impelidor do primeiro estágio. As setas indicadas na Figura 37.b apontam os locais de desgaste por erosão, evidenciando, em alguns locais, a formação de um canal semelhante a um esmerilhamento circunferencial do componente. A evolução desse desgaste poderia eventualmente levar a uma falha mecânica do componente, permitindo que as partículas atingissem a carcaça da BCS.

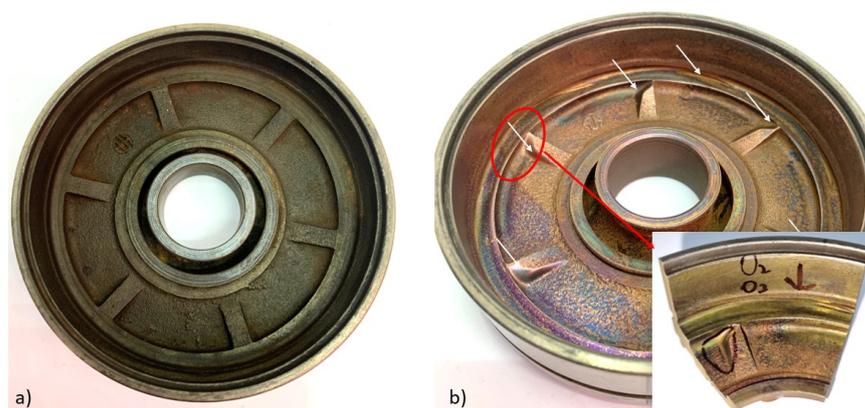


Figura 37 - Imagem do difusor do 1º Estágio “D1” antes (“a”) e após (“b”).

Na região inferior do Difusor (Figura 38), foram analisadas duas regiões que tem possuem características diferentes. O ressalto presente na parte interna do difusor, tem a função de quebrar possíveis bolhas de gás existentes no fluido, objetivando melhorar o escoamento do fluido bombeado. Com o objetivo de compará-las pode-se notar que a região “B” (Figura 38) apresenta uma superfície de desgaste com aspecto polido, devido á grande quantidade de partículas que impingiram nessa região.

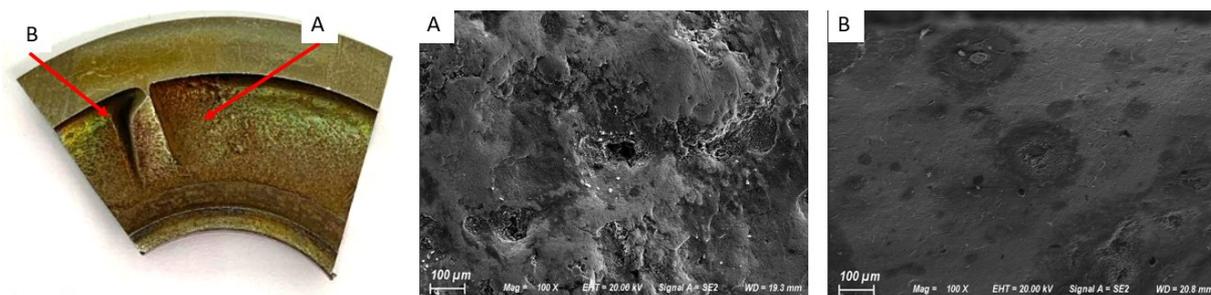


Figura 38 – Imagens MEV da superfície Inferior Interna Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).

4.2.4. Região Interna da Lateral do Difusor

Em relação à parte interna do Difusor, tem-se três regiões impactadas por partículas abrasivas. Por ser um material de comportamento dúctil, impactos de baixos ângulos promovem uma maior degradação do material. A região de maior desgaste erosivo está localizada na altura abaixo da capa inferior do rotor (Figura 39 - A) e não na altura em que ocorre a saída do fluxo do rotor (Figura 39 – B) onde houve destacamento de partículas. Percebe-se assim que o desgaste erosivo intenso foi promovido pelo fluxo de abrasivos na parede do difusor, em alta velocidade (SÁBIA, 2015). Por isso nota-se que quanto mais próximo da capa do Difusor, mais polida é a região.

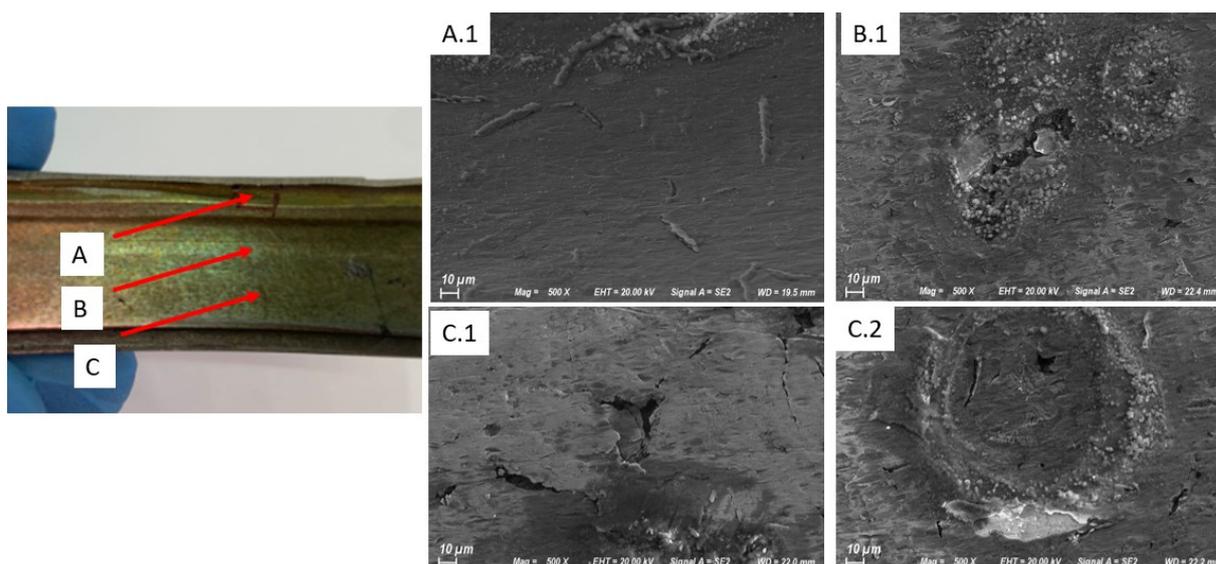


Figura 39 – Imagens MEV da superfície Interna da Lateral do Difusor 1, mostrando os locais de análises (A, B e C).

4.3. Impelidor 1

Depois do ensaio, as análises iniciais indicaram que, durante o funcionamento da BCS, ocorreu desgaste nos impelidores e difusores, na condição de operação *downthrust*. Contudo, foram observadas diferentes regiões de desgaste que promoveram a degradação dos componentes. Para compreender os mecanismos de desgaste nessas partes, foram conduzidas análises de MEV no impelidor do primeiro estágio, que evidenciou a maior taxa de desgaste entre todos os impelidores.

4.3.1. Capa Externa do Impelidor

A Figura 40 mostra a capa de proteção do impelidor do primeiro estágio após os ensaios, mostrando as áreas que foram analisadas por MEV. Foram capturadas imagens de MEV das regiões “A”, “B” e “C” (Figura 40), correspondendo à parte interna com menos desgaste (A), ao centro da capa de proteção (B) e à extremidade externa do impelidor (C).

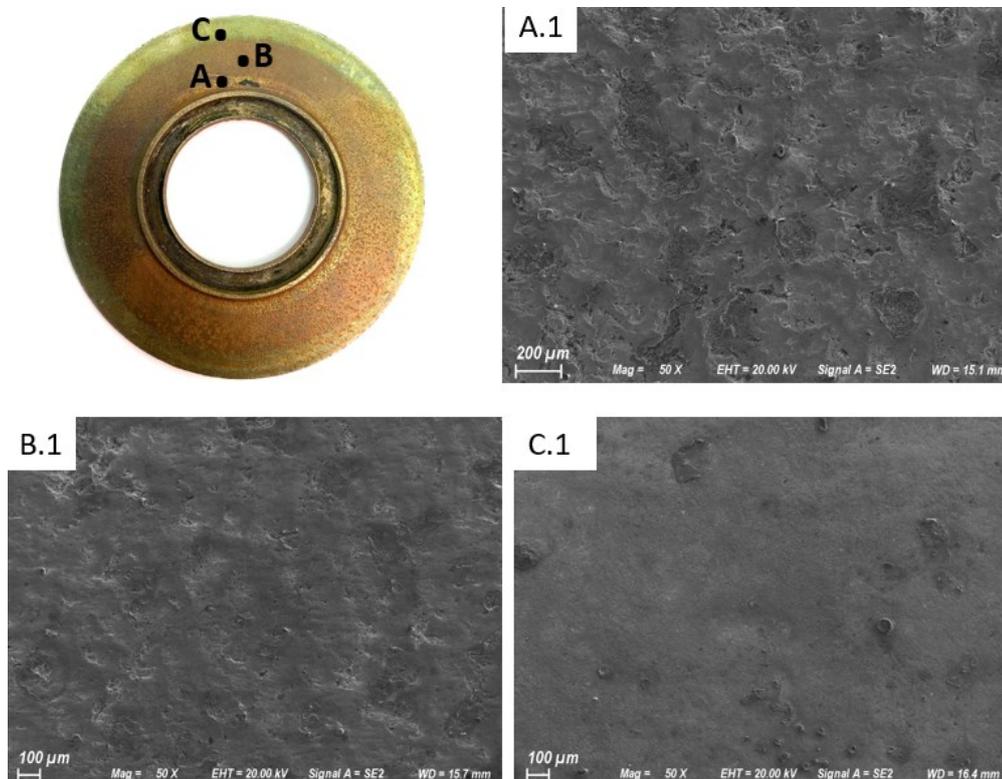


Figura 40 – Regiões analisadas no Impelidor do primeiro estágio pela técnica de MEV.

Nas diferentes regiões do componente, identificadas como "A", "B" e "C", foram realizadas análises por MEV, cujas imagens estão apresentadas na Figura 40. Observando a Figura 40 percebe-se uma coloração diferente nas extremidades, ao realizar a microscopia houve uma mudança na morfologia do componente. A superfície apresentou um aspecto mais polido devido a erosão, pois é nessa região que o fluido é liberado para o Difusor, logo tem um contato maior com ele, ocasionando esse desgaste. Por isso o aspecto gradativo ao analisar as imagens de A até C.

4.3.2. Corte em Pizza da parte Interna do Impelidor

Os canais internos do Impelidor são os responsáveis por impor energia cinética ao fluido e direcioná-lo para o Difusor que por sua vez, transforma essa energia cinética em pressão. Ao analisar a Figura 41 e a Figura 42, pode-se identificar macroscopicamente pela coloração, o caminho preferencial que o fluido realizou sobre a superfície do componente. Pelas imagens micrográficas das regiões "C" e "D", nota-se uma superfície mais polida devido a erosão causada pelas partículas abrasivas. A elevada energia cinética de turbulência gerada por superfícies rugosas e irregulares também promove e intensifica a erosão (KRÜGER et al., 2010), além da formação de possíveis pites de corrosão. Por outro lado, em análise das regiões "A" e "B", observou-se uma superfície mais rugosa. O desgaste dessas regiões foi menos agressiva, devido ao menor número de impingimento de partículas abrasivas. Durante o bombeamento de fluido bifásico, bolhas de gás podem ser agrupadas próximas da região "A", esse efeito reduz a capacidade de bombeamento devido ao efeito de *surging*. Isso ocorre às mudanças cíclicas na densidade da mistura causadas pelo escoamento irregular no impelidor. Este efeito normalmente ocorre a esquerda do ponto de melhor eficiência da bomba (BEP), dependendo da quantidade de gás e da pressão na sucção da bomba, o efeito de *surging* pode ocasionar o *gas locking*, ou seja, quando o impelidor estiver totalmente bloqueado pelo gás, impedindo a ação de bombeamento (TAKÁCS, 2009).

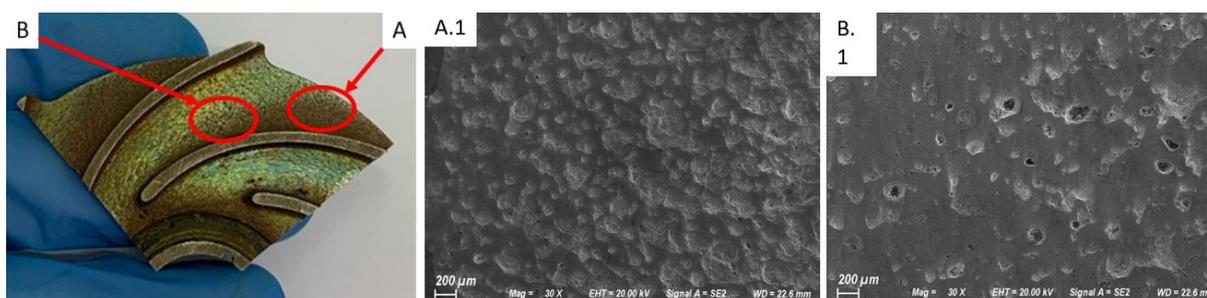


Figura 41 – Imagens MEV da superfície do corte em Pizza da parte Interna do Impelidor, mostrando os locais de análises (A e B).

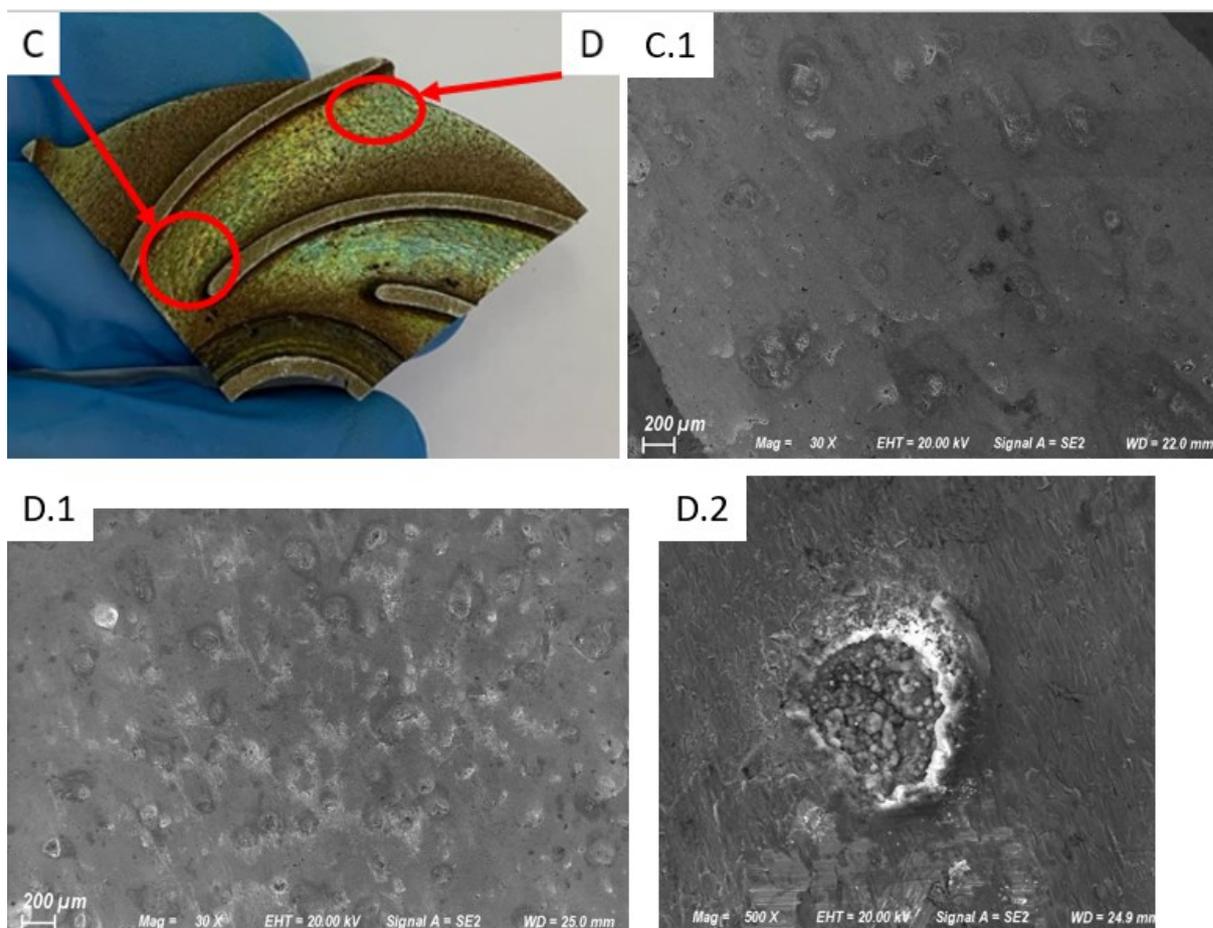


Figura 42 – Imagens MEV da superfície do corte em Pizza da parte Interna do Impelidor, mostrando os locais de análises (C e D).

4.4. Luva do Mancal Combinado

Na Luva do Mancal Combinado, a superfície de desgaste mostrou a predominância do mecanismo de desgaste por abrasão a três corpos, com a formação de canais preferenciais que se estenderam ao longo da circunferência do componente no sentido de rotação da bomba. As Figura 43 e Figura 44 mostram as superfícies de desgaste da luva do mancal combinado, após o ensaio, e imagens de MEV da superfície desgastada. Pelas figuras observou-se uma degradação não uniforme nas superfícies de desgaste e é visível um desgaste não uniforme na superfície da luva. Nota-se que uma região (Figura 44) apresenta um desgaste mais acentuado do que a outra (Figura 43), estando localizadas em áreas opostas defasadas de 180° . Essa disparidade no desgaste deve-se ao aumento gradual das

folgas radiais dos mancais, resultando no desalinhamento e desbalanceamento dos componentes rotativos da bomba.

A região “A” mostra uma região que sofreu desgaste com aspecto praticamente liso, apresentando destacamento de material em determinados pontos da luva. A formação dos canais preferenciais, observados nas regiões “B”, “C” e “D”, são resultados da ação de partículas abrasivas que, ao entrarem na interface (folga), promovem uma degradação severa nas superfícies deslizantes entre a luva e a bucha. Com o desgaste, as partículas formam canais de maior profundidade, com largura próxima ao diâmetro médio dos grãos de areia. Esses canais foram formados pelo processo de abrasão com rolamento de partículas.

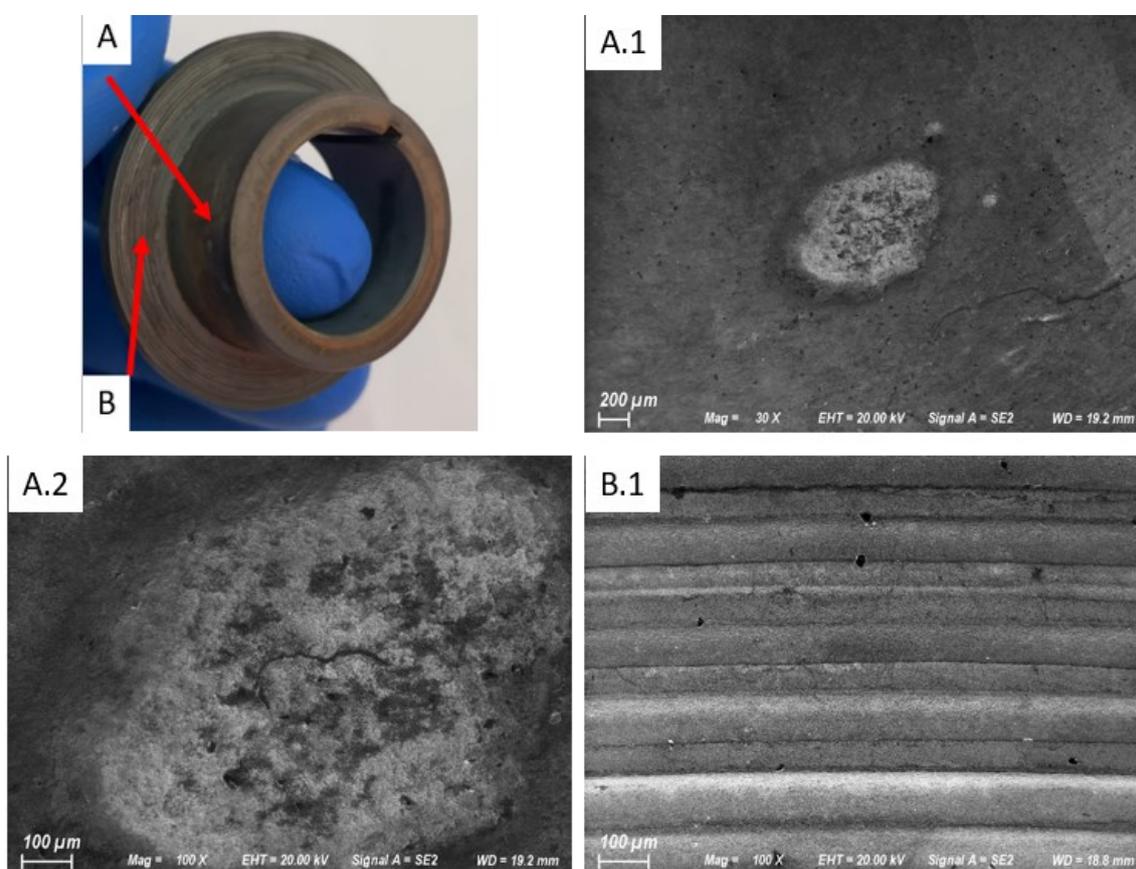


Figura 43 – Imagens MEV da superfície com menor desgaste da Luva do Mancal Combinado, mostrando os locais de análises (A e B).

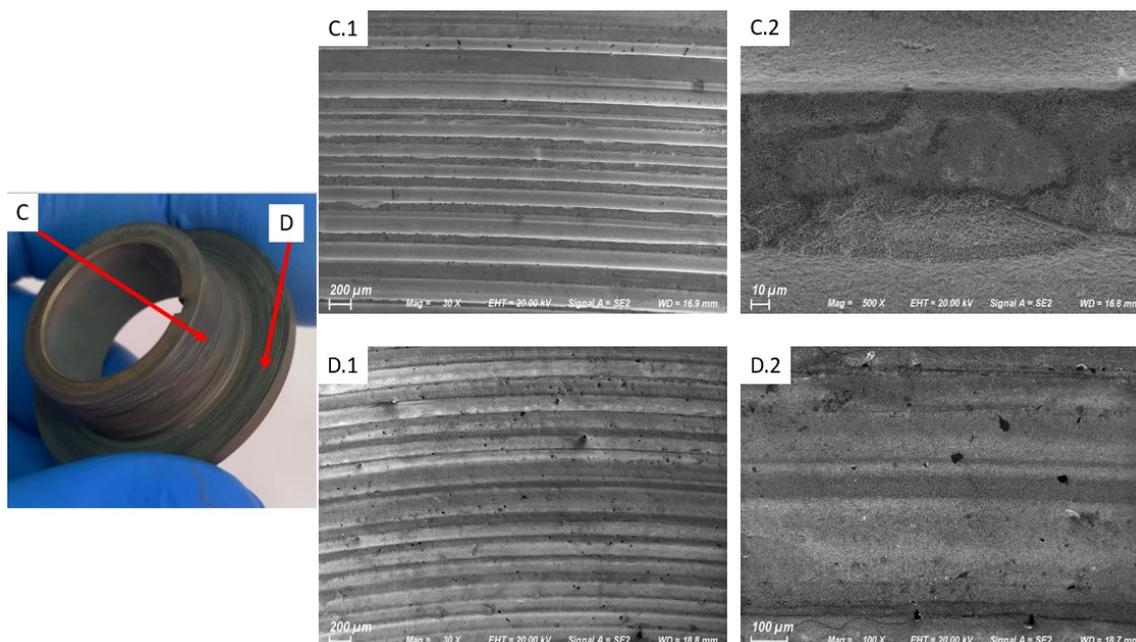


Figura 44 – Imagens MEV da superfície com maior desgaste da Luva Mancal Combinado, mostrando os locais de análises (C e D).

4.5. Luva do Mancal Radial 2

Durante as análises macrográficas da luva do mancal de entrada observaram-se regiões com destacamentos de material na superfície do componente, em formatos de crateras. A Figura 45 mostra imagens de MEV da superfície de desgaste da luva do Mancal Radial 2, mostrando os destacamentos de material e a formação de cavidades.

Os canais (sulcos) próximos às cavidades, ocorreram devido ao deslizamento do material removido na parede da luva, durante a operação da bomba. Observa-se que os canais seguem a orientação de giro da bomba durante operação.

Chen et al. (2007) afirmam que o fenômeno de cavitação tende a se intensificar na presença de micropartículas no fluido, especialmente quando há uma combinação de fases (líquida e sólida). Essa junção de fases cria interações altamente complexas, especialmente quando consideramos a cavitação.

A análise das imagens microscópicas da Luva do Mancal Radial 2 permite concluir que o principal processo de desgaste observado nesse componente foi a erosão por cavitação. Esse fenômeno é desencadeado por implosões de bolhas ou cavidades que contêm vapor e/ou gás na fase líquida. Essas implosões geram abruptos aumentos de pressão, resultando em choques hidráulicos e danos mecânicos nas paredes do componente.

A combinação do desgaste causado por erosão e abrasão levou-se a severa degradação do componente. Vale ressaltar que as partículas de carboneto de tungstênio que se desprendem do componente também interagem como partículas abrasivas na degradação do mancal.

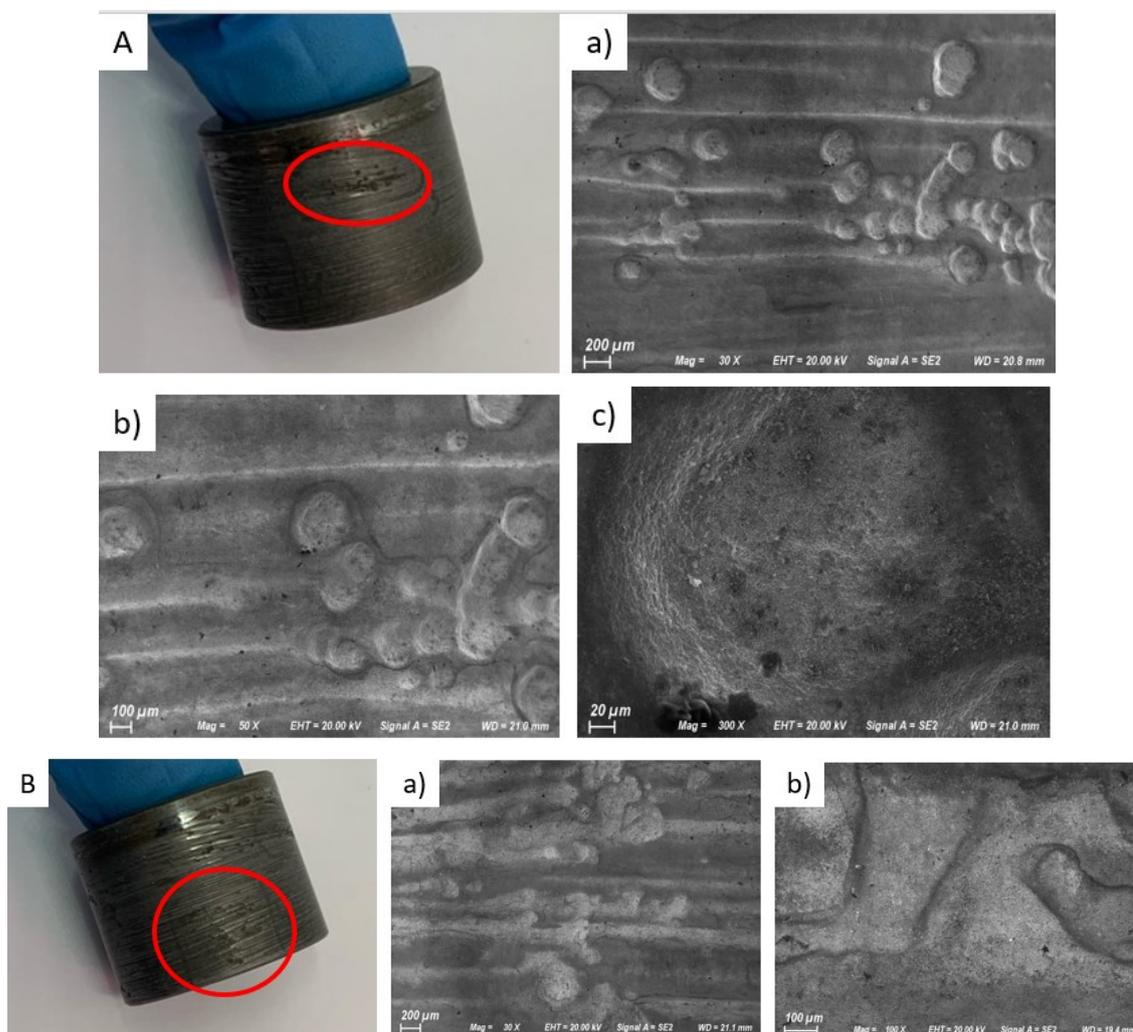


Figura 45 – Imagens de MEV da superfície desgastada do Mancal Radial 2, mostrando os locais de análise (A e B).

4.6. Bucha do Mancal Radial

Conforme dito na metodologia, foi realizado um corte seccionado do componente, dividindo em A e B. Assim como na Luva do Mancal Radial, a Bucha do Mancal Combinado, mostrou um desgaste irregular devido ao desbalanceamento da bomba ao longo do seu funcionamento.

Da seção “A” (Figura 46) é possível identificar vários mecanismos de desgaste, um contato de par metálico (a) e uma superfície irregular com formação de canais preferenciais (c). Esses canais são formados por abrasão com rolamento de partículas, com grãos de areia entre a luva e a bucha, sendo originados pela formação de riscos e sulcos. As imagens (b e d) mostram a protuberância de um possível carboneto na superfície onde houve degradação por contato entre as superfícies deslizantes.

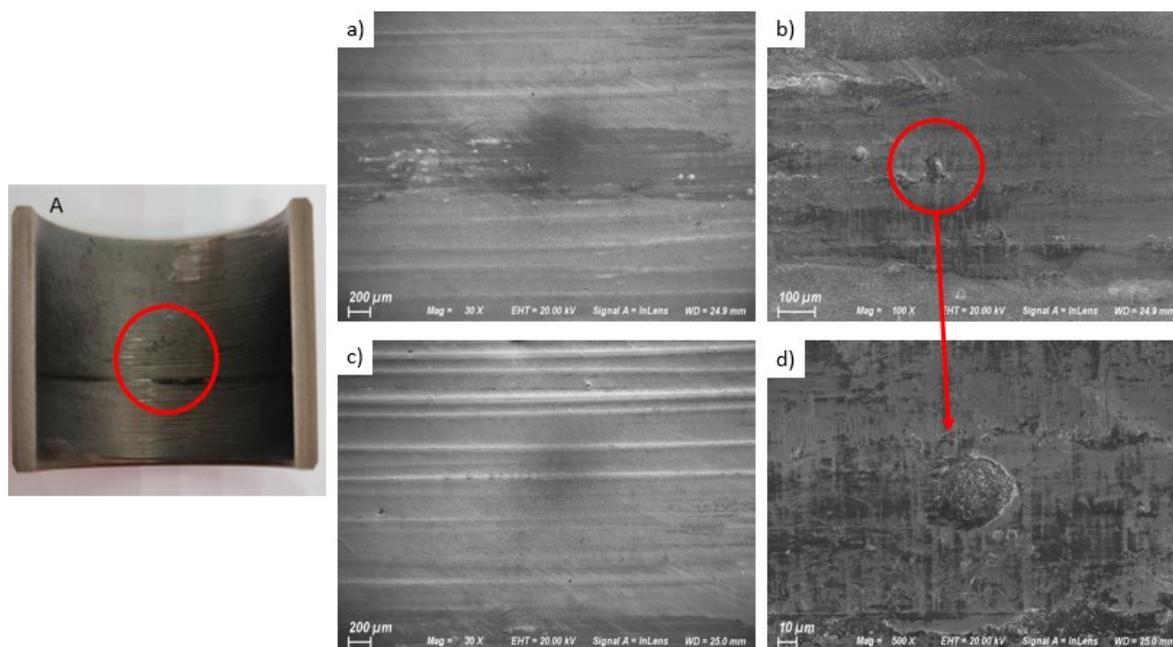


Figura 46 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “A” onde (a) contato par metálico; (b) possível desgaste por cavitação; (c) formação de canais preferenciais; (d) aproximação de 500x na região “b”.

Partindo para a seção “B” (Figura 47, Figura 48, Figura 49), verificou uma mudança morfológica da superfície de desgaste em comparação com a (Figura 46). O aumento da folga radial resulta na elevação das cargas radiais devido a intensificação do desbalanceamento dos componentes rotativos. Durante a operação da bomba, a folga entre as partes deslizantes dos mancais não estabelece uma concentricidade, apresentando diferentes folgas ao longo do perímetro do mancal. Dessa forma, nas regiões onde se tem maior folga, observa-se um desgaste mais severo, devido uma maior quantidade de entrada de partículas que degradam a superfície do material. Além disso, nas regiões de maior folga, possibilita a entrada de partículas de maior diâmetro que promovem a formação de sulcos e canais preferenciais, causados pelo deslizamento e rolamento de partículas abrasivas.

Ainda na região “B” observa-se pontos onde houve destacamento de material devido ao desgaste abrasivo.

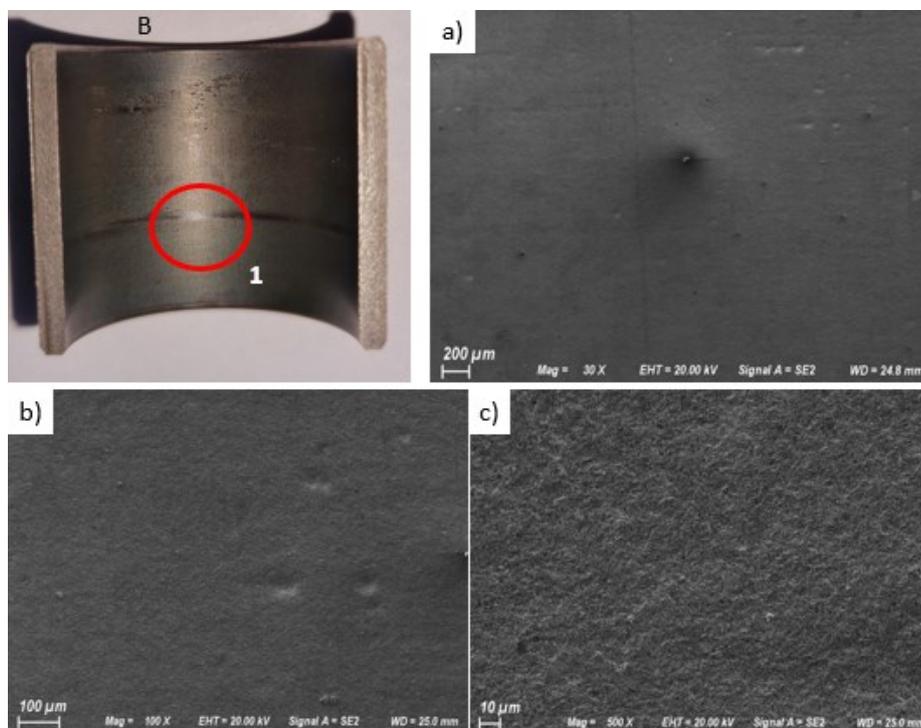


Figura 47 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “B-1”.

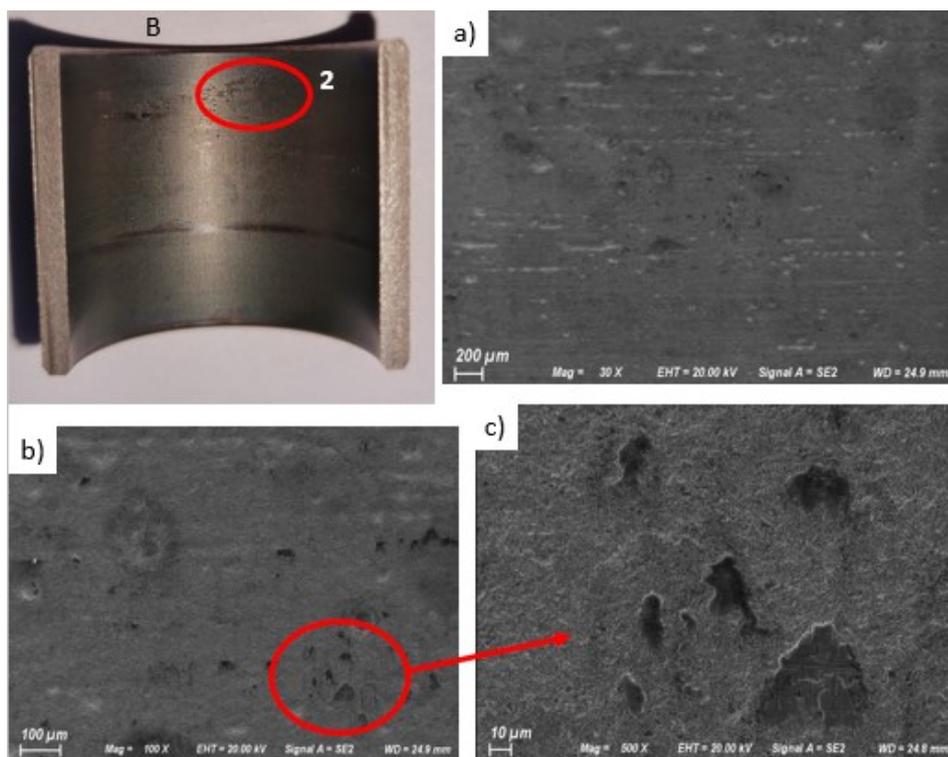


Figura 48 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “B-2”.

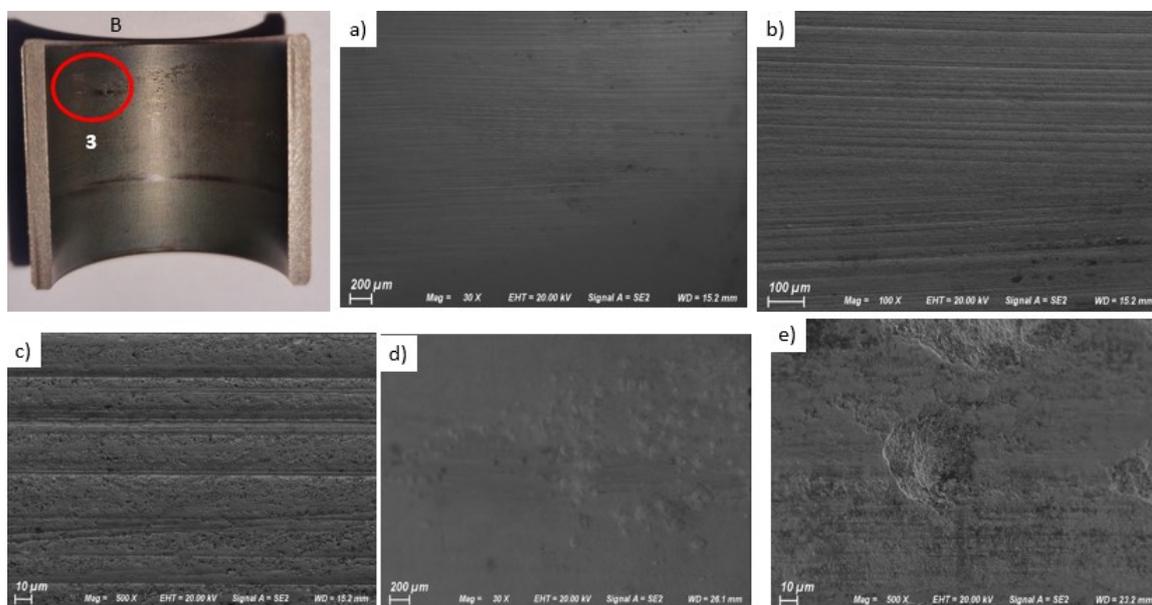


Figura 49 – Imagens de MEV da superfície desgastada da Bucha do Mancal Radial, mostrando os locais de análise “B-3”.

Comparando as regiões A e B (Figura 46 e Figura 49), notou-se que no mesmo mancal teve uma formação de canais preferenciais com diferentes larguras. Esse fato pode ser

justificado uma vez que, a areia utilizada durante o ensaio areia (n° 100) apresenta partículas com diâmetros diferentes. A Figura 50 apresentada por Sábia, 2015 mostra a distribuição do tamanho das partículas com diferentes razões de aspecto presentes na areia 100. Dessa forma, nas regiões de menor folga, tem a entrada de partículas de menor diâmetro, resultando na formação de sulcos circunferenciais de menor largura como mostrado na Figura 49

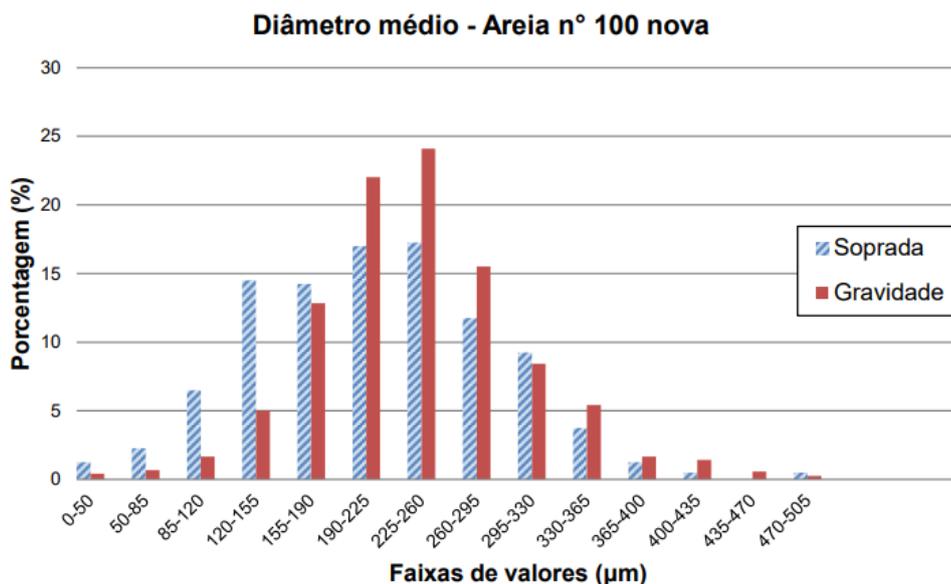


Figura 50 – Distribuição de tamanho de partículas para amostras depositadas por sopro e por gravidade para areia n° 100 (SÁBIA, 2015).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um ensaio de desgaste de uma com BCS de três estágios, usualmente utilizados na indústria de petróleo e gás. Operando com mistura bifásica de água deionizada e de gás CO₂, além da injeção de areia como material abrasivo. O ensaio foi realizado com frações na mistura de 11,9 % em volume de gás e 0,20 % em massa de abrasivo, bombeando um total de 2 toneladas de abrasivo. O objetivo do ensaio foi correlacionar os resultados dos mecanismos de desgaste de componentes de BCS operando em meio com água salgada, abrasivo e gás CO₂. Dos resultados obtidos pôde-se concluir que:

- a) Os componentes do primeiro estágio apresentaram a maior taxa de perda de massa (10,78 g/t – variação de 7,66 %), enquanto no segundo e terceiro estágios apresentaram taxas, respectivamente, de 10,11 g/t (variação de 7,21%) e 8,06 g/t (variação de 5,80 %). A redução gradativa da perda de massa dos estágios pode ser justificada pela diferença da componente de força axial na condição de *downthrust* para cada estágios da bomba, sendo maior para o primeiro estágio e menor para o terceiro estágio. Essa diferença está relacionada ao comportamento da pressão e as condições da mistura gás/líquido para cada estágio da bomba;
- b) Em relação aos mecanismos de desgaste se observou que o desgaste dos componentes da BCS ocorre de maneira diferenciada.
 - ✓ No *pad* do difusor foi observada a formação de sulcos e riscos circunferenciais no sentido do fluxo evidenciando deslizamento. Por sua vez, na região superior interna do difusor foi observada a corrosão por pite. Já nas regiões inferior interna do difusor e interna da lateral do difusor foi observado desgaste erosivo.

- ✓ Na capa externa do impelidor a superfície apresentou um aspecto mais polido devido a erosão. Na parte interna do impelidor foi observada uma região mais polida devido a erosão e uma superfície mais rugosa.
- ✓ Na luva do mancal combinado se observou a predominância do mecanismo de desgaste por abrasão a três corpos e a degradação não uniforme nas superfícies de desgaste.
- ✓ A luva do mancal radial 2 exibiu erosão por cavitação e regiões com destacamento de material e formação de cavidades.
- ✓ Na bucha do mancal radial foi observada abrasão com rolamento de partículas e destacamento de material devido ao desgaste abrasivo.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Com o fim deste estudo, são sugeridas as seguintes observações para pesquisas e trabalhos futuros:

- a) Com intuito de comparação, realizar um novo ensaio com uma mesma BCS entretanto sem a utilização de CO₂;
- b) Para ensaios futuros utilizar o scanner 3D para comparar com mais precisão as perdas dimensionais dos componentes;
- c) Avaliar as BCSs que possuem mancais com ranhuras, que tem por objetivo melhorar o escoamento do fluxo de abrasivo;
- d) Avaliar bombas com variação de revestimentos;
- e) Avaliar BCSs que sejam projetadas para trabalhar com gás (Bomba Mista), neste trabalho foi utilizado uma Bomba Radial;
- f) Analisar a origem do Cobre em alguns componentes.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, G.; ESTEVAM, V.; FRANCA, F. A. **On the Influency of Viscosity on ESP Performance**. SPE Production & Operations, 2009. <https://doi.org/10.2118/110661-PA>

BAKER HUGHES. **Submersible Pump Handbook**. 8ª ed. Claremore – Oklahoma, 234 p. 2008.

CHEN, H.; LIU, S.; WANG, J.; CHEN, D. Study on effect of microparticle's size on cavitation erosion in solid-liquid system. Journal of Applied Physics, v. 101, n. 10, p. 5, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2734547>

DUNBAR, C. E.: **Determination of Proper Type of Gas Separator**. SPE Microcomputer Users Group Meeting, Long Beach, California, October 15–17, 1989.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5.ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2007. II.

KING, D. G.; TRAYLOR, F. T.; STEWART, R. E. **Abrasion Technology for Electric Submergible Pumps**. SPE, 1983. <https://doi.org/10.2118/12199-MS>

LAKE, L. W. **Petroleum Engineering Handbook**. Austin: Society of Petroleum Engineers. Volume IV, 900, p. 2006

LEA, J. F. BEARDEN, J. L: **Effect of Gaseous Fluids on Submersible Pump Performance**, JPT 2922. 1982. <https://doi.org/10.2118/9218-PA>

LEA, J. F.; NICKENS, H. V. **Selection of Artificial Lift**. Society of Petroleum Engineers.1999. doi: 10.2118/52157-MS <https://doi.org/10.2118/52157-MS>

LEA, J. F., TURPIN, J. L. BEARDEN, J. L.: **Correlation of Performance Data for Electric Submersible Pumps with Gas-Liquid Flow**. Proc. 33rd Southwestern Petroleum Short Course, Lubbock, Texas, P. 267–281, 1986.

Nickel Development Institute, Properties and Applications of Ni-Resist and Ductile Ni-Resist Alloys, 1998.

SÁBIA, M. G. **Efeito da Granulometria do Abrasivo no Desgaste de Bombas Centrífugas Submersíveis**. 146 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG. 2015.

SUN Z., WEI Y., WU W., DU H., Erosion of alloys used for the stages of electrical submersible pumps, **Engineering Failure Analysis**, Volume 114, 2020, 104580, ISSN 1350-6307, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104580. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104580>

TAKÁCS, G., Electrical Submersible Pumps Manual, **Gulf Professional Publishing**, P. 417-425, 2009. ISBN 9781856175579, doi: 10.1016/B978-1-85617-557-9.00017-8. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-557-9.00017-8>

WILSON, B. L., The effects of abrasives on Electrical Submersible Pumps. **SPE Drilling Engineering**. V. 5, P. 171-175. 1990. <https://doi.org/10.2118/17583-PA>

ZUM GAHR, K. H. Karl-Heinz. **Microstructure and Wear of Materials**. Institute of Materials Technology, University of Siegen, Germany, 1987.

APÊNDICE 01 – Resultados da verificação dimensional dos componentes

Tabela 2 – Resultado do desgaste g/ton da BCS.

Tabela do cálculo da taxa de desgaste em g/ton da BCS						
Bomba 3 Estágios						
Componentes da bomba		Massa inicial [g]	Massa final [g]	Perda de massa [g]	Perda de massa [%]	Taxa de desgaste [g/ton]
Abreviação	Descrição					
DL	Difusor de entrada	222,79	222,34	0,45	0,20%	0,23
MC	Mancal Combinado	404,52	402,76	1,75	0,43%	0,88
D1	Difusor 1	376,49	360,96	15,53	4,12%	7,76
D2	Difusor 2	372,92	358,53	14,39	3,86%	7,20
D3	Difusor 3	368,51	356,96	11,55	3,14%	5,78
D4	Difusor 4	374,99	370,36	4,63	1,24%	2,32
R1	Rotor 1	170,7564	164,7202	6,0362	3,53%	3,02
R2	Rotor 2	173,7610	167,9353	5,8257	3,35%	2,91
R3	Rotor 3	171,3211	166,7551	4,5660	2,67%	2,28
S1	Spacers	54,9786	54,7205	0,26	0,47%	0,13
S2		36,7584	36,6633	0,10	0,26%	0,05
S3		29,2020	29,1643	0,04	0,13%	0,02
S4		20,5066	20,4738	0,03	0,16%	0,02
S5		16,6860	14,6713	2,01	12,07%	1,01
S6		20,5724	20,3057	0,27	1,30%	0,13
S7		20,5420	20,5112	0,03	0,15%	0,02
S8		17,4769	17,4412	0,04	0,20%	0,02
S9		3,1266	3,0968	0,03	0,95%	0,01
S10		3,1058	3,1058	0,00	0,00%	0,00
B2	Mancal Radial 2	57,3866	56,4078	0,9788	1,71%	0,49
B1	Mancal Radial 1	29,1819	29,1676	0,0143	0,05%	0,01
B3	Mancal Radial 3	29,2740	28,5491	0,7249	2,48%	0,36
LMR	Luva Mancal Radial	115,8426	114,1245	1,7181	1,48%	0,86
LMC	Mancal Misto	59,0528	57,7102	1,3426	2,27%	0,67
PC	Porca de Compressão	1554,75	1552,09	2,65	0,17%	1,33

ANEXO 01 – Certificado de calibração da Balança SHIMADZU



Alfa Mare Laboratório de Calibração
www.alfamare.com.br

Certificado de
Calibração N°
315U-22

Dados do Solicitante

Nome: FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO
Endereço: RUA FRANCISCO VICENTE FERREIRA, 126, SANTA MÔNICA, UBERLÂNDIA - MG
Local da Calibração: MICROSCOPY, SCALES, MICRO AND NANOINDENTATION - BLOCO 5F - SALA 202

Dados do Equipamento

Equipamento: Balança Analítica Marca: Shimadzu Modelo: AW220 Classe: 1
Carga Mínima (g): 0,01 Faixa de Indicação (g): 0 a 220
Carga Máxima (g): 220 Resolução (g): 0,0001
N° de Série: D451700119 Identificação: 309288

Condições de Calibração

Temperatura: 24,0 °C ± 0,2 °C Umidade: 48,9% ur ± 2,0 % ur Pressão Atmosférica: 905,8 hPa ± 0,4 hPa

Informações da Calibração

Data da calibração: 30/11/2022 Técnico executante: LUIS RENATO SILVA Data da Emissão: 01/12/2022

Método de Calibração:

A calibração foi realizada pelo método de comparação direta de massas afim de determinar o valor médio, erro sistemático, incerteza expandida, fator de abrangência e graus de liberdade efetivos. Os dados são medidos pela média de três leituras.

Rastreabilidade dos Padrões

Código	Descrição	Certificado	Validade da Calibração
THG-6U	Termohigrômetro Barômetro	LT - 308 604	setembro-23
		LT - 308 604	setembro-23
CJ 18	Conjunto de Pesos-Padrão	M-69712/22	junho-24

Resultados da Calibração

Valor Nominal (g)	Valor de Referência (g)	Valor Médio Medições (g)	Erro (g)	Incerteza Expandida (g)	Fator de Abrangência k	ν_{eff}
0,5	0,5000	0,5001	0,0001	0,0008	4,53	2
10	10,0001	10,0008	0,0007	0,0013	4,53	2
50	50,0001	50,0007	0,0006	0,0011	4,53	2
100	100,0000	99,9990	-0,0010	0,0016	4,53	2
200	199,9999	199,9991	-0,0008	0,0024	4,53	2

Legenda:

ν_{eff} : Graus de liberdade efetivos

Informações:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência (k), o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (ν_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.

Este certificado é válido exclusivamente para o objeto calibrado, descrito nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros lotes similares.

O certificado de calibração só pode ser reproduzido completamente. Reprodução de partes requer aprovação por escrito do laboratório.

Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica.

Observação: Não houve.

Assinado de forma digital por
HELOISA CÂMARA
Dados: 2022.12.01 16:30:25
-03'00'

Signatário
Heloisa Câmara

ANEXO 02 – Certificado de calibração da Balança Bel Engineering



Balanças Indelt Minas
 Rede Brasileira de Calibração
 Laboratório de Calibração de Balança acreditado pelo Inmetro sob Nº 0460

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0460

Certificado de Calibração

Nº 1724

Solicitante do serviço

<p>Cliente : MARCIO BACCI DA SILVA CAPES / PROEX Endereço: AVENIDA JOAO NAVES DE AVILA 2121 BLOCO 1M Cidade: Uberlândia CNPJ/CNPJ: 53935578687 Telefone: 34-3239-4016 Fax: 34-3239-4206 Contato: ROSENDA VALDES ARENCIBIA</p>	<p>N.Fantasia : MARCIO BACCI DA SILVA CAPES / Ficha 8398 Bairro : CAMPUS SANTA MONICA UF : MG CEP : 38400902 Insc. Estadual : E-mail: Setor : PROFESSORA</p>
---	---

Informações administrativas

Data da Calibração : 16/04/2013	Data da Emissão do Certificado : 23/04/2013
Local da Calibração : Nas dependências do cliente	Nº do Certificado de Calibração : 1724

Objeto de Calibração

Objeto BALANÇA	Tipo Instrumento Digital	Fabricante : BEL
Nº de Série : 00417112	Modelo : MARK 4100	
Carga Máxima (g) : 4.100,00	Resolução (g) : 0,01	
Divisão de verificação (g) : 0,10	Localização : LABORATORIO	
Classe : II	Nº do Ativo : 015545	

Padrões utilizados

TAG/ Cód de Identificação	Identificação dos padrões	Rastreabilidade	Validade da Calibração
CJ - 19 - 1mg a 200g	200mg,100g	CERTI 4143/11	12/08/2013
CJ 22 - 200g a 10kg	1kg,2kg	DRAO BAL.MA 017_07	06/07/2014

Padrões de medição ambiental utilizados

TAG/ Cód de Identificação	Identificação dos padrões	Rastreabilidade	Validade da Calibração
OREGON BAR988HG.T	THG.02	VISOMES LV08296-13-	01/03/2015
OREGON RTG328N	THG.02	VISOMES LV08297-13-	01/03/2015
OREGON BAR988HG.T BARO	THG.02	VISOMES LV08536-13-	04/03/2015

Condições ambientais

Temperatura (°C) :	Umidade Relativa do Ar (%) :	Pressão (h Pa) :	Massa específica do ar (kg/m³) :
22,4 a 22,5	55 a 56	1021	NÃO APLICAVEL

Método de calibração

- A calibração foi realizada através da comparação direta entre o valor de um padrão de referência e a média das leituras indicadas pelo instrumento, conforme procedimento específico PI 5.4 - Calibração de balanças.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição, multiplicada pelo fator de abrangência calculado para cada ponto de medição, o qual para uma distribuição t encontrará, os graus de liberdade, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.
- A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- Esta calibração não isenta o instrumento do controle estabelecido na regulamentação metrológica.
- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares.
- Este documento somente poderá ser reproduzido em sua totalidade. Reprodução parcial deverá ser precedida de autorização formal do laboratório da Balanças Indelt Minas.
- O ajuste de instrumento, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.
- O presente certificado de calibração atende aos requisitos da NBR ISO/IEC 17025:2005 e é válido apenas para o instrumento de medição acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares.
- Uma cópia deste certificado ficará armazenada eletronicamente durante 05 anos.

Interlagos 108 | Contagem - MG - 32141-005
 CNPJ : 22.339.626/0001-60 Insc. Est. : 188.875102.0028 Telefax : (31) 3354-9742
 Homepage : www.balancasindelt.com.br E-mail : laboratorio@balancasindelt.com.br

For 5.4/02 - Certificado de Calibração, Rev. 03 de 20/05/2011

Pág. 1/2



Balanças Indelt Minas

Rede Brasileira de Calibração

Laboratório de Calibração de Balança acreditado pelo Inmetro sob Nº 0460

Certificado de Calibração

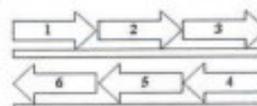
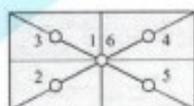
Nº 1724

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0460

Ensaio de excentricidade



Outro / Não aplicável

Posição	1	2	3	4	5	6
Unidade	g					
Antes do Ajuste	1.999,46	1.999,47	1.999,45	1.999,45	1.999,47	1.999,46
Depois do Ajuste	2.000,00	2.000,00	1.999,99	1.999,99	2.000,00	2.000,00

Faixa de medição

0 a 4100g

Pontos de Calibração						
Valor de Referência (g)	Valor antes da calibração (g)	Média das Leituras (g)	Erro da Indicação (g)	Incerteza Expandida (+/- g)	Fator de Abrangência (k)	Graus de Liberdade (veff)
0,20	0,19	0,20	0,00	0,01	2,06	38,03
100,00	99,97	100,00	0,00	0,01	2,09	29,63
1.000,00	999,72	1.000,01	0,01	0,01	2,11	22,80
4.000,00	3.998,83	4.000,00	0,00	0,01	2,11	22,83
4.100,00	4.098,81	4.100,00	0,00	0,01	2,11	22,86

FÁBIO EDUARDO E LISBOA
Técnico executante

ALEXANDRE GOMES CARDOSO
Signatário autorizado

Interlagos 108 - Contagem - MG - 32141-005

CNPJ : 22.339.626/0001-80 Insc. Est. : 186.875102.0028 Telefax : (31) 3354-9742
Homepage : www.balancasindelt.com.br E-mail : laboratorio@balancasindelt.com.br

For 5.4/02 - Certificado de Calibração, Rev. 03 de 20/05/2011

Pág. 2/2