

Avaliação do desgaste hidroabrasivo em diferentes ligas de impulsores centrífugos submersíveis utilizados no bombeamento de esgoto em estações elevatórias

Evaluation of hydro abrasive wear in different alloys of submersible centrifugal impellers used in sewage pumping in pumping stations

Orlando Preti¹ , Fabio Elias Dalagnolo¹, Manar N. Krmasha², Kassim S. Al-Rubaie³

¹Sociedade Educacional de Santa Catarina. Rua Gothard Kaesemodel, 833, Anita Garibaldi, 89203-400, Joinville, SC, Brasil.

²McMaster University, Mechanical Engineering Department. 1280 Main Street West, L8S 4L7, Hamilton, Canada.

³Sultan Qaboos University, College of Engineering, Mechanical and Industrial Engineering Department, P.O. Box 33, Al-Khod, Postal Code 123, Muscat, Oman.

e-mail: orlpreti@gmail.com, fdalagnolo1@gmail.com, krmasham@mcmaster.ca, kasrub@gmail.com

RESUMO

Nos impulsores das bombas centrífugas submersíveis instaladas nas estações elevatórias de esgoto, ocorrem perdas prematuras por desgaste hidroabrasivo, reduzindo drasticamente a eficiência hidráulica e aumento das despesas energéticas do equipamento. A finalidade deste estudo é de contribuir na melhor escolha de material, minimizando as perdas, a partir do desgaste hidroabrasivo das ligas de aço inoxidável super duplex, ferro fundido cinzento temperado e ferro fundido branco de alto cromo, comumente utilizadas em bombas. Além disso, analisou-se o aspecto macro superficial das amostras após o ensaio hidroabrasivo. Os testes de desgaste hidroabrasivo foram realizados em uma solução 10:1 de água e areia sílica em duas velocidades de 5,2 m/s e 7,1 m/s. Os testes foram realizados num hidroabrasômetro por 216 horas, com medições de perda de massa feitas em intervalos de 24 horas. Os resultados mostraram que nas velocidades de 5,2 m/s e 7,1 m/s a perda de massa é linear e progressiva, sendo menos acentuada na liga de ferro fundido branco de alto cromo com menor perda de massa ao desgaste hidroabrasivo. Na velocidade de teste de 7,1 m/s resultou em maiores perdas de massa nas ligas estudadas do que a velocidade de teste de 5,2 m/s. As perdas de massa devido ao desgaste hidroabrasivo das ligas investigadas foram relacionadas à dureza, às características microestruturais e à morfologia das superfícies desgastadas. Esses fatores foram utilizados para descrever os resultados e justificar o melhor e o pior desempenho das ligas investigadas. Portanto, o ferro fundido de alto cromo (FBACr) apresentou o melhor desempenho devido a sua alta dureza decorrente de suas características microestruturais (matriz e M_7C_3), e superfície desgastada que apresenta aspecto brilhante e polido com menos crateras e sulcos que as demais ligas estudadas.

Palavras-chave: Desgaste Hidroabrasivo; Bombas; Impulsores; Elevatórias de Esgoto.

ABSTRACT

Premature losses due to hydroabrasive wear occur in the impellers of submersible centrifugal pumps installed in sewage lift stations, reducing hydraulic efficiency and increasing energy consumption. The purpose of this study is to contribute to the best choice of material, minimizing losses from hydroabrasive wear of super duplex stainless steel alloys, tempered gray cast iron and high chromium white cast iron, commonly used in pumps. In addition, the macrosurface aspect of the samples after the hydroabrasive test was analyzed. The hydroabrasive wear tests were performed in a 10:1 solution of water and silica sand at two speeds of 5.2 m/s and 7.1 m/s. The tests were run on a hydroabrasive machine for 216 hours, with mass loss measurements taken at 24-hour intervals. The high chromium white cast iron had the lowest mass loss due to wear. Furthermore, the test speed of 7.1 m/s resulted in greater mass losses in the studied alloys than the test speed of 5.2 m/s. The mass losses due to hydroabrasive wear of the alloys investigated were linked to hardness, microstructural characteristics, and the morphology of the worn surfaces. These factors were used to describe the results and justify the best

and worst performance of the alloys investigated. Therefore, the high chromium cast iron (FBACr) showed the best performance due to its high hardness resulting from its microstructural characteristics (matrix and M_7C_3), and its worn surface morphology that presents a shiny and polished aspect with less craters and grooves than the other studied alloys.

Keywords: Hydroabrasive Wear; Pumps; Impellers; Sewage Elevators.

1. INTRODUÇÃO

As companhias de saneamento públicas e privadas, necessitam de bombas que movimentem de forma contínua, soluções aquosas com materiais líquido, fibrosos e arenosos, exigindo materiais criteriosamente selecionados para os respectivos componentes com vida útil de trabalho livres de manutenção a serem utilizadas nas estações elevatórias de esgoto (EEE), evitando interrupções de trabalho e redução de custos [1].

Segundo a ABNT-NBR 9648 [2] o esgoto sanitário é o despejo líquido representado por esgotos industrial e domésticos, água de processos de infiltração e águas de chuvas.

O esgoto sanitário apresenta, por volta de, 99,9% de água e 0,1% de porção sólida de materiais inorgânicos e orgânicos, suspensos e dissolvidos, assim como os micro-organismos. A fração inorgânica corresponde a 30% da quantidade de matéria sólida existente no esgoto e as principais partículas são os detritos minerais pesados (areia), sais (cloretos) e metais [3].

Segundo SAVIN *et al.* [4], as bombas são geralmente centrífugas de alta potência e trabalham em condições extremas, devido as características do líquido transportado, sendo que, as partículas em suspensão no líquido, geralmente são pressionadas contra a superfície das peças pelas forças centrífugas geradas. Em consequência, as partículas sólidas contribuem para que a abrasão e erosão ocorrem, sendo este comportamento comum no processo de hidroabrasão, com mais intensidade nas bombas e impulsores, gerando ondulações e aumento da rugosidade superficial, promovendo o aumentando das perdas nas bombas [5].

O modo de funcionamento das bombas é afetado pelas condições ruins do fluxo hidráulico. As zonas de redemoinho causam um aumento nas perdas de energia e uma redistribuição das taxas de fluxo, ocasionando maior desgaste das peças em contato diretamente ao fluxo abrasivo. A presença de regiões de vórtice instáveis, especialmente quando o efeito da formação de redemoinhos aumenta, leva a flutuações nas velocidades e pulsações da pressão do fluxo. Sendo, necessário buscar formas de reduzir o impacto negativo da erosão por cavitação e hidroabrasivo na vida útil das bombas [6].

Segundo GLOVATSKY *et al.* [6], o desgaste das bombas, causa custos significativos para o reparo e manutenção de sistemas de elevação de água. Um dos principais fatores é a presença de partículas sólidas na água bombeada. Sendo que até 100 horas de operação da bomba, as partículas abrasivas afetam mais ativamente o desgaste, pois a folga entre o impulsor e a câmara ainda é pequena e durante este período, a concentração de partículas sólidas na água bombeada é geralmente alta. Com a continuação da operação da bomba, há um aumento uniforme no desgaste do impulsor.

Segundo SAVIN *et al.* [4], num sistema de transporte de esgoto em regiões onde a temperatura da água apresenta ciclos grandes (variações térmicas) pode nuclear e crescer trincas. Neste caso, o número de ciclo térmico é um parâmetro importante na seleção de materiais da bomba. Também ocorre danos por abrasão (areia, cascalho) ou forças de percussão em pequenos ângulos nas superfícies de material metálico, causando perfuração. Assim, os materiais para fabricar as bombas devem ser compatíveis com o líquido bombeado, relativamente baratos com resistência ao desgaste e à corrosão.

Os materiais aplicados para fabricar as bombas e os impulsores variam de acordo com as características do líquido a ser bombeado e dos esforços a que são submetidos. Líquidos com sólidos em suspensão demandam materiais resistentes à abrasão. Líquidos corrosivos demandam materiais resistentes à corrosão [7–12]. Segundo XYLEM [1], os materiais mais utilizados para impulsores, são os aços inoxidáveis, ferros fundidos grafiticos e ferro fundido branco de alto cromo.

As características das partículas abrasivas interferem consideravelmente no processo de desgaste, sendo que quanto mais angulares e mais duras forem as partículas, maiores serão as taxas de perda de massa no material [13]. A intensidade de desgaste na superfície dos impulsores promovido pelas múltiplas colisões das partículas abrasivas, depende principalmente da energia cinética (massa e velocidade) e da concentração das partículas abrasivas no líquido [14–15].

REDDY e SUNDARARAJAN [13] realizou experimentos de erosão em dois materiais dúcteis, cobre e liga Cu-6%Al, com impacto de granalha de aço esférica nos ângulos de 30°, 60° e 90° a uma velocidade de impacto de 40 m.s⁻¹. Os resultados indicaram que a taxa de erosão é maior no impacto normal em relação ao impacto oblíquo. A remoção do material foi devido à formação de lábio e subsequente fratura.

No estudo de SAVIN *et al.* [4], o material do impulsor analisado foi uma liga de ferro fundido esferoidal com Ni e W, mostrando a presença de uma mistura de partículas de óxido de substâncias residuais das águas de esgoto em uma área do filme de corrosão.

Estudo feito por FORDYCE *et al.* [16], em liga de Fe-28Cr-2,7C depositada a laser com tratamentos térmicos subsequentes, mostrou desempenho ao desgaste abrasivo inferior à mesma liga fundida, com microestrutura semelhante (eutética M_7C_3 , martensita e carbonetos secundários precipitados) e dureza (719–738 HV). A liga depositada consiste em carbonetos refinados devido a alta taxa de nucleação e solidificação. A perda de volume aumentou com diminuição do tamanho e da distância média dos carbonetos (M_7C_3), facilitando a fratura ou arranque de material durante a deformação plástica causada pelo abrasivo, mostrando a limitação de proteção dos finos carbonetos na deformação da camada subsuperficial. Também, indica que o tamanho da partícula abrasiva em relação ao tamanho do carboneto afeta significativamente a magnitude e o mecanismo de desgaste.

Considerando a importância do assunto, a escolha das ligas estudadas neste artigo, foi baseada nas informações de XYLEM [1], que indica as ligas mais comumente utilizadas na fabricação dos elementos constitutivos de bombas submersíveis. Este estudo tem como objetivo analisar a perda de massa, o aspecto superficial e a dureza das amostras produzidas nas ligas de aço inox super duplex ASTM 2507 (AISD), ferro fundido cinzento temperado ASTM-A 48 – N° 30 B (FCT) e ferro fundido branco de alto teor de cromo ASTM-A 532 IIIA (FBACr), submetidas ao ensaio hidroabrasivo com duas velocidades (5,2 m/s e 7,1 m/s) das amostras imersas numa mistura de água e areia na proporção 10:1.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo de desgaste hidroabrasivo, as ligas utilizadas para produzir as amostras para os experimentos, foram selecionadas com base nas especificações das ligas aplicadas nos impulsores de bombas submersíveis das maiores companhias de saneamento do Brasil, sendo a SABESP, a SANEPAR e a EMBASA, conforme segue a descrição:

- a) Aço inox super duplex – ASTM 2507 (AISD) [17], doado pelo departamento de pesquisa e desenvolvimento da Villares Metals, especializada na fabricação de aços e ligas especiais;
- b) Ferro fundido cinzento temperado – ASTM-A 48 – Classe 30 (FCT) [11], doado pelo departamento de fundição da Unisociesc e tratado termicamente na empresa Tupytec, ambas em Joinville / SC;
- c) Ferro fundido branco com alto teor de cromo – ASTM-A 532 III temperado (FBACr) [18], doado pela empresa Xylem Brasil [1], fabricante mundial de bombas e equipamentos para tratamento de água e efluentes.

As composições químicas das amostras foram obtidas pelo espectrômetro de emissão óptica, marca Spectromax – Spectro. Foram realizadas três análises química (queima) por amostra. Para as ligas AISD e FBACr as amostras foram retiradas das barras como recebidas. Como a liga FCT foi fundida em processo de areia verde, na forma de barras com diâmetro de 20 mm e comprimento de 300 mm, a amostra para a análise química, foi coletada após processo de inoculação na forma de moeda coquilhada.

A Tabela 1 mostra a composição química das ligas AISD, FCT e FBACr, de acordo com as faixas dos valores de cada norma e os valores obtidos por análise química via espectroscopia de emissão ótica.

Os valores da composição química da liga AISD obtidos via análise química por espectroscopia de emissão ótica, se encontram praticamente dentro da faixa dos valores estabelecidos pela norma do aço ASTM 2507 [17], apenas o carbono (C) ficando levemente superior e também foi detectado a presença de nióbio (Nb) e tungstênio (W), não especificados pela norma. Para a liga FCT os valores dos elementos químicos se encontram dentro da faixa especificada pela norma ASTM-A 48 [11]. Para a liga FBACr com exceção do carbono (C), que ficou acima do especificado pela norma ASTM A532-III [18], os demais elementos ficaram dentro da respectiva faixa.

2.1. Fabricação e procedimentos de análises das amostras

A fabricação das amostras para o ensaio hidroabrasivo, das ligas AISD e FCT, foi realizada com processo de corte por serra fita, torneamento e fresamento. Para as amostras da liga FBACr, foi realizada pelo equipamento de eletroerosão a fio, modelo EDM CUT 20P, marca Agie Charmilles. As amostras foram imersas em água de baixa condutividade, em temperatura de 20 °C e pressão de 10 bar, utilizando fio de cobre com diâmetro de 0,25 mm, velocidade de 180 mm/s e força de tração de 17 N, operando com uma corrente de 17A. Após o corte por eletroerosão a fio as barras com dimensões de $10,5 \times 10,5 \times 75,0 \text{ mm}^3$ passaram pelo processo de torneamento e fresamento para ajustar a forma e dimensões finais, conforme mostra a Figura 1.

Tabela 1: Composição química das ligas estudadas.

AMOSTRA	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cu (%)
ASTM 2507 (AISD)	0,03*	1,20*	0,035*	0,02*	0,80*	0,50*
Obtidos	0,055 ± 0,003	0,60 ± 0,05	0,026 ± 0,002	0,0051 ± 0,0003	0,40 ± 0,04	0,42 ± 0,06
ASTM A 48 – Classe 30 (FCT)	3,10 a 3,3	0,4 0,8	0,10 a 0,15	0,08 a 0,12	2,1 a 2,3	0,4 a 0,8
Obtidos	3,05 ± 0,1	0,65 ± 0,08	0,06 ± 0,015	0,075 ± 0,009	2,80 ± 0,13	0,65 ± 0,08
ASTM A532-III A (FBACr)	2,3 a 3,3	2,0*	0,10*	0,60*	1,50*	1,20*
Obtidos	3,71 ± 0,1	0,26 ± 0,11	0,014 ± 0,005	0,008 ± 0,001	0,99 ± 0,08	0,04 ± 0,01
Continuação						
AMOSTRA	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N (%)	Nb (%)	W (%)
ASTM 2507 (AISD)	24 a 26	6 a 8	3 a 5	0,24 a 0,32		
Obtidos	24,95 ± 0,25	7,11 ± 0,05	2,7 ± 0,1	ND	0,024 ± 0,002	0,59 ± 0,05
ASTM A532-III A (FBACr)	23 a 28	2,50*	3,00*			
Obtidos	26,1 ± 0,13	0,135 ± 0,06	0,07 ± 0,004			

*Valores máximos segundo cada norma. ND = Não determinado.

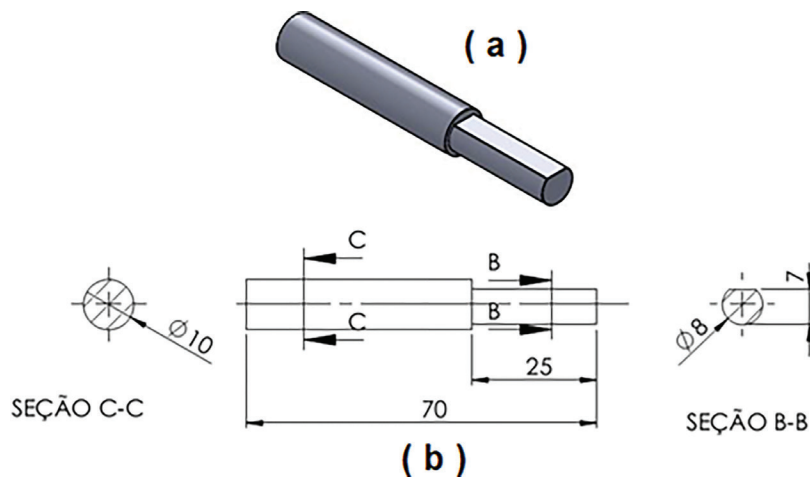


Figura 1: Amostra para o ensaio hidroabrasivo, dimensões baseadas ao suporte por amostra e dimensões do tanque de ensaio do hidroabrasômetro. a) Visão de perspectiva, b) detalhes e dimensões (mm).

As amostras das ligas AISD e FBACr, foram utilizadas neste estudo, na condição fornecida, sem a aplicação de outro tipo de tratamento térmico, termomecânico ou termoquímico. As amostras da liga FCT, após usinadas foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera e revenido, perfazendo as etapas de pré-aquecidas na faixa de temperatura de $470 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, austenitizadas à $870 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por uma hora e dez minutos e resfriadas em banho de sal à $160 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por cinco minutos, seguido de resfriamento ao ar calmo. O revenido foi realizado em forno com banho de sal fundido na temperatura de $160 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por duas horas, seguido de resfriamento ao ar calmo.

A Figura 2, mostra como ficaram as amostras do AISD, FCT e FBACr após serem usinadas e para o caso do ferro fundido cinzento, após temperadas e revenidas.

As amostras foram identificadas com o auxílio de uma caneta de gravação em metal com descarga elétrica sendo a letra “A” indicando o aço inox super duplex (AISD), a letra “C” ao Ferro fundido cinzento temperado (FCT) e a letra “B” a liga ferro fundido branco de alto teor de cromo (FBACr), após as letras foram gravados números, para padronizar o posicionamento das amostras no disco porta amostra do hidroabrasômetro (Figura 2).

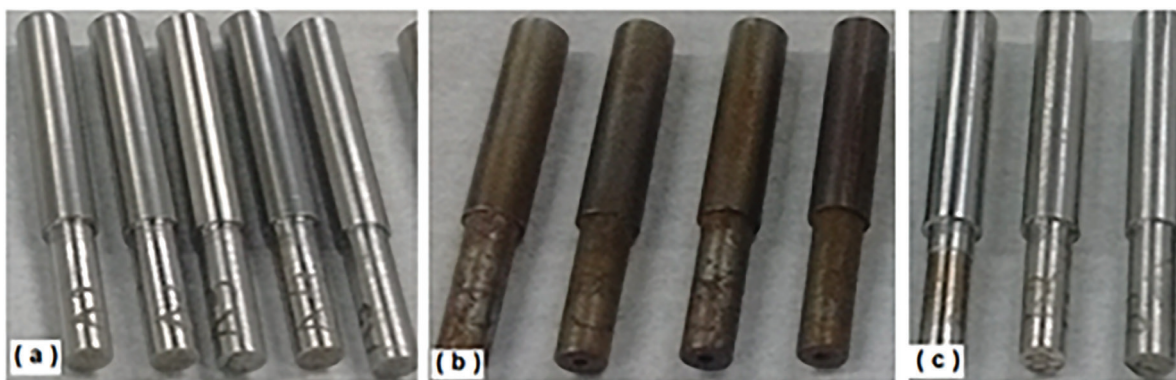


Figura 2: Amostras para o ensaio de desgaste hidroabrasivo. a) Liga AISD, b) FCT, c) FBACr.

A medida de dureza das amostras foi realizada pelo método de dureza Rockwell C [19], com carga de 150 kgf, indentedor cone de diamante com ângulo de 120°, tempo de aplicação de carga de 30 segundos, num durômetro de marca Fixo-Test.

As amostras para a caracterização microestrutural [20, 21], foram retiradas na região cilíndrica das amostras do ensaio hidroabrasivo, seccionadas na forma de disco, no equipamento Cut-off, com disco abrasivo, marca Arotec. Em sequência, as amostras foram embutidas em baquelite, preparadas pelo procedimento normal de ensaio metalográfico, seguindo as diretrizes da norma ASTM A247, passando por lixas d'água de 120 a 1.200 mesh, polimento em pasta de diamantada de 3 e 1 μm . A revelação da microestrutura da liga AISD foi realizada com água régia ($\text{HNO}_3 + 3\text{HCl}$), para a liga FCT a revelação da matriz foi feita com nital 4% e a análise da grafita foi realizada sem ataque químico e a microestrutura da liga FBACr foi revelada com nital 4%. A quantificação das fases foi realizada pela técnica do reticulado de 121 cruzamentos, tendo a média da leitura em cinco regiões distintas da amostra. A análise microestrutural e captura de imagens, foram realizadas no microscópio ótico Olympus BX-51 com sistema de captura e análise de imagem *Software Image Pro Plus*.

2.2. Hidroabrasômetro e parâmetro de ensaio hidroabrasivo

O equipamento para o ensaio hidroabrasivo [22] utilizado na realização deste trabalho, mostrado na Figura 3, foi projetado para que as amostras sejam fixadas num disco porta amostra giratório e imerso numa mistura abrasiva (água + areia) fazendo com que o abrasivo (areia) colida na superfície das amostras em rotação, resultando no desgaste (perda de massa) hidroabrasivo. O equipamento é constituído por um sistema de elevação (movimentação vertical) do conjunto motor e discos porta amostras, para facilitar e ter agilidade na troca, retirada e inspeção das amostras e da mistura abrasiva.

O tanque é constituído internamente por aletas defletoras (Figura 4.b) para homogeneizar a mistura (água + areia) durante o ensaio. O equipamento é provido de dois discos porta amostras feitos de poliacetal (PA 66) com diâmetros de 120 mm e 180 mm, respectivamente, podendo receber até 8 amostras em cada disco. A utilização de dois discos porta amostras, possibilita ensaiar com duas velocidades de movimentação das amostras ao mesmo tempo no ensaio hidroabrasivo.

Neste estudo, foi utilizado a areia sílica (Figura 4a), utilizada em fundições, com granulometria entre 212 μm a 250 μm , que segundo a norma as ASTM E11-1995 77 e ISO 3310-01 1997 [23, 24] equivalem as peneiras com malhas nº 60/70. A concentração da mistura abrasiva utilizada no ensaio hidroabrasivo foi composta na proporção de 10:1, ou seja, 10 litros de água deionizada e 1 kg de areia de sílica (abrasivo). A Figura 4.b mostra a mistura d'água e areia decantada no tanque do hidroabrasômetro.

O tempo total de ensaio utilizado foi de 216 horas, sendo que as medidas das perdas de massas das amostras foram realizadas a cada 12 horas até o tempo de 48 horas e a partir deste tempo, foram medidas a cada 24 horas. A mistura abrasiva era trocada por nova mistura, mantendo-se os mesmos parâmetros da mistura, no intervalo de 24 horas de ensaio, para manter homogêneas as características do abrasivo (areia) durante todo o tempo de ensaio hidroabrasivo.

Foram utilizadas duas velocidades de ensaio hidroabrasivo, calculadas com equação 1, com base nos diâmetros (120 mm e 180 mm) dos discos porta amostras, mais 45 mm do comprimento da amostra, ou seja, diâmetro periférico total de 165 mm e 225 mm, com 600 rpm do eixo do motor, resultando nas velocidades de 5,2 m/s e 7,1 m/s. A Figura 5 mostra as amostras fixadas nos discos porta amostras.

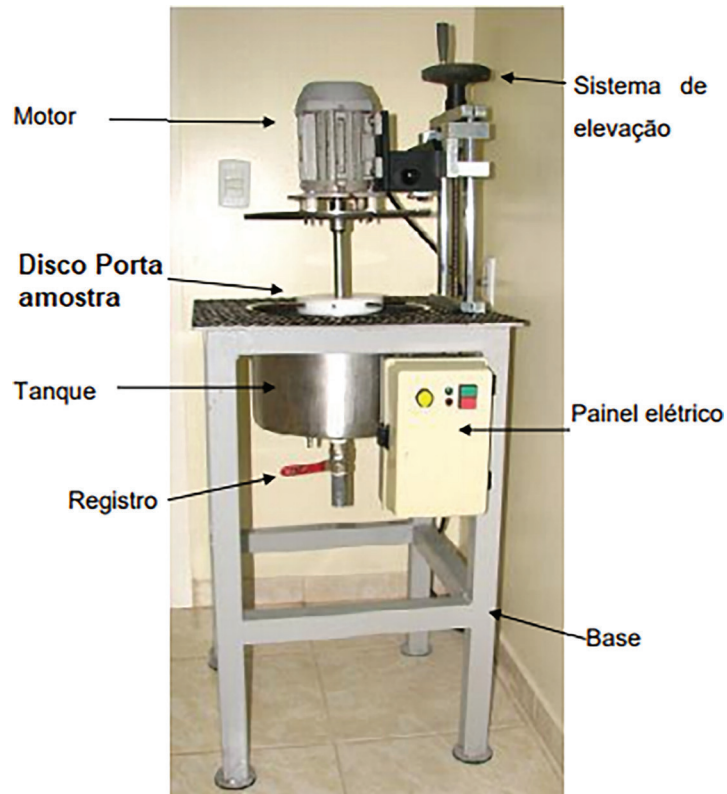


Figura 3: Equipamento de ensaio hidroabrasômetro [22].



Figura 4: a) Areia sílica usada nos testes. b) Vista interna do tanque com mistura abrasiva (água + areia).

$$V = \frac{n \times \pi \times D}{1000} \tag{1}$$

Onde:

V = Velocidade periférica (m/s).

n = rotação do eixo (rpm)

D = Diâmetro do disco mais extensão da amostra (m).

As amostras foram fixadas e distribuídas de forma intercalada por liga nos discos porta amostras, conforme mostra a Figura 6. Foram realizadas duas baterias de ensaio hidroabrasivo, sendo a distribuição das amostras indicada nas Figuras 6a (1ª bateria de ensaio) e 6.b (2ª bateria de ensaio).

As amostras passaram por processo de limpeza ultrassônica com auxílio de uma cuba de limpeza ultrassônica, com as amostras imersas em álcool etílico absoluto (PA 99,8°), num tempo de 5 minutos, com a

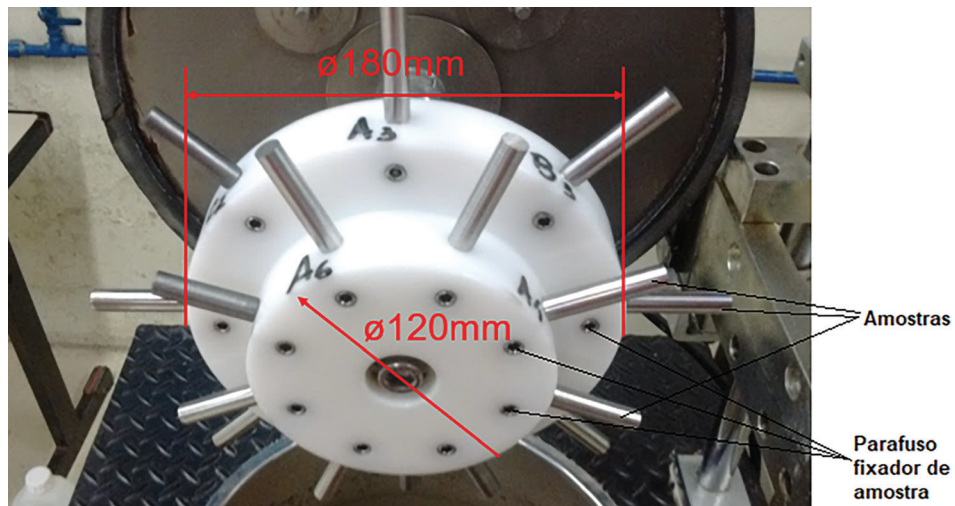


Figura 5: Amostras fixas nos discos porta amostras do hidroabrasômetro.

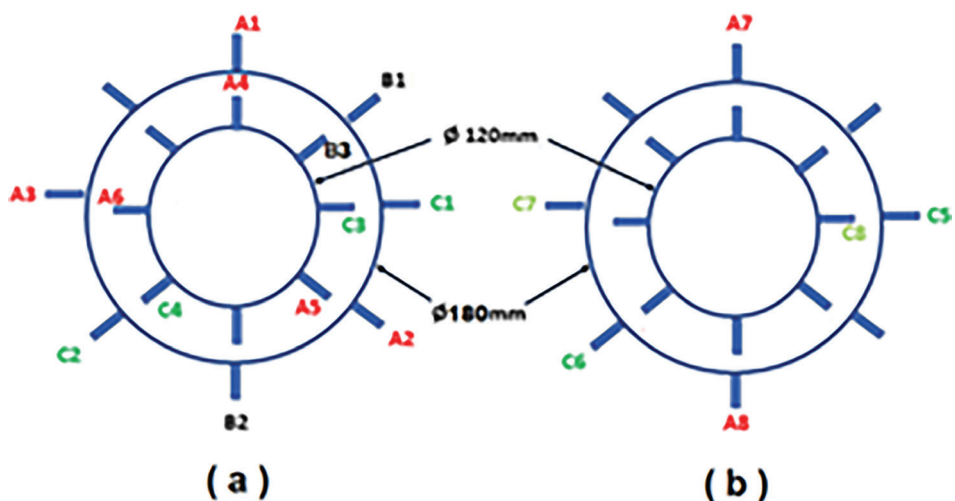


Figura 6: Distribuição das amostras nos discos porta amostras do hidroabrasômetro. a) AISD, c) FCT e b) FBACr.

finalidade de remover óleo, graxa, partículas de poeiras e de oxidação na superfícies das amostras, seguida de secagem ao ar aquecido e posterior realização das medidas das massas em uma balança analítica SHIMADZU, modelo AY220 com precisão de 0,0001g. Este procedimento foi realizado antes, durante e no final do ensaio hidroabrasivo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização microestrutural

A Figura 7(a) mostra a microestrutura da liga AISD na forma como recebido, utilizado neste estudo, constituída de $56 \pm 2,8\%$ ferrita delta (δ – fase escura), $44 \pm 2,8\%$ de austenita (γ – fase clara) e precipitados intermetálicos, possivelmente de carbonetos complexos (setas vermelhas), estando de acordo com FARGAS *et al.* [25]. Pela presença dos precipitados, sugere que durante o processo de fabricação da liga, ocorreu a formação de intermetálicos complexos de alta estabilidade (C, Nb e W) e no tratamento térmico de solubilização que a liga foi submetida, não foi possível dissolvê-los, ou o teor de elementos de ligas (C, Nb e W) extrapolaram os limites de solubilidade da liga.

A Figura 7(b) mostra a microestrutura da liga FCT, constituída de $10,2 \pm 0,8\%$ de grafita lamelar, classificada segundo a norma ASTM A 247-17 do tipo VI [26] com distribuição morfológica A e D, tamanho 5, 4 e 6. A matriz apresenta-se praticamente martensítica com resíduo de austenita retida (não mensurada), característica de ferro fundido cinzento temperado.

A Figura 7(c, d) mostra a microestrutura da liga FBACr, constituída por $36 \pm 1,6\%$ carbonetos M_7C_3 (de acordo com LAIRD *et al.* [27], sendo $4,6 \pm 0,9\%$ primários e $31,4 \pm 1,7\%$ eutético, distribuídos de forma randômica e $64 \pm 1,6\%$ de matriz praticamente martensítica, resíduos de austenita retida (não mesurada) e com precipitados de carbonetos secundários (detalhe Figura 7(d)), indicando que a liga foi temperada e revenida.

3.2. Avaliação dos valores de dureza

A Figura 8 mostra os valores medidos de dureza Rockwell C, nas amostras das ligas AISD, FCT e FBACr. A liga AISD por estar solubilizada e ter microestrutura constituída de ferrita e austenita, apresenta a menor dureza ($29,1 \pm 2,1$ HRC), seguido da liga FCT ($45,6 \pm 2,8$ HRC), com microestrutura de grafita lamelar e matriz martensítica e a liga FBACr ($54,8 \pm 1,3$ HRC) apresenta maior dureza, devido a microestrutura ser constituída de carbonetos M_7C_3 e matriz martensítica.

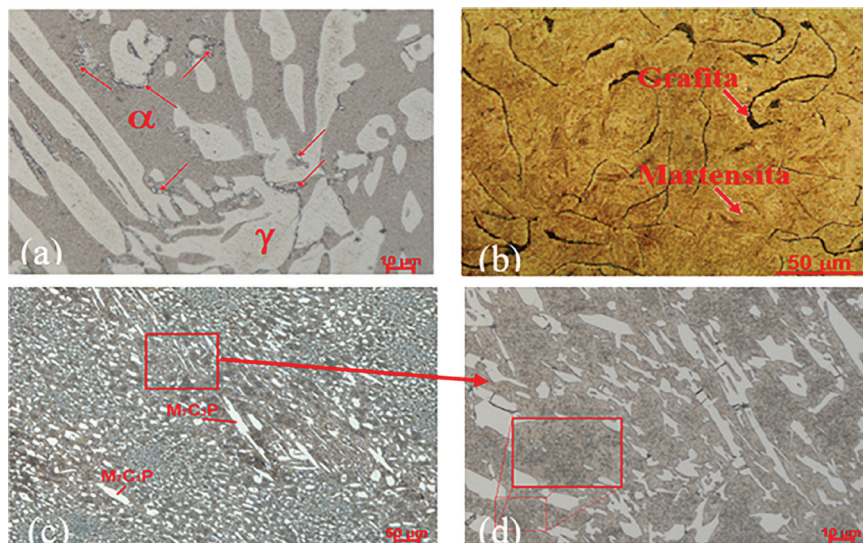


Figura 7: Microestrutura das ligas: a) AISD, ataque com água régia, ampliação: 500x. b) FCT, ataque com Nital 4%, ampliação 500x. c, d) FBACr, ataque nital 4%, ampliação 100x e 500x.

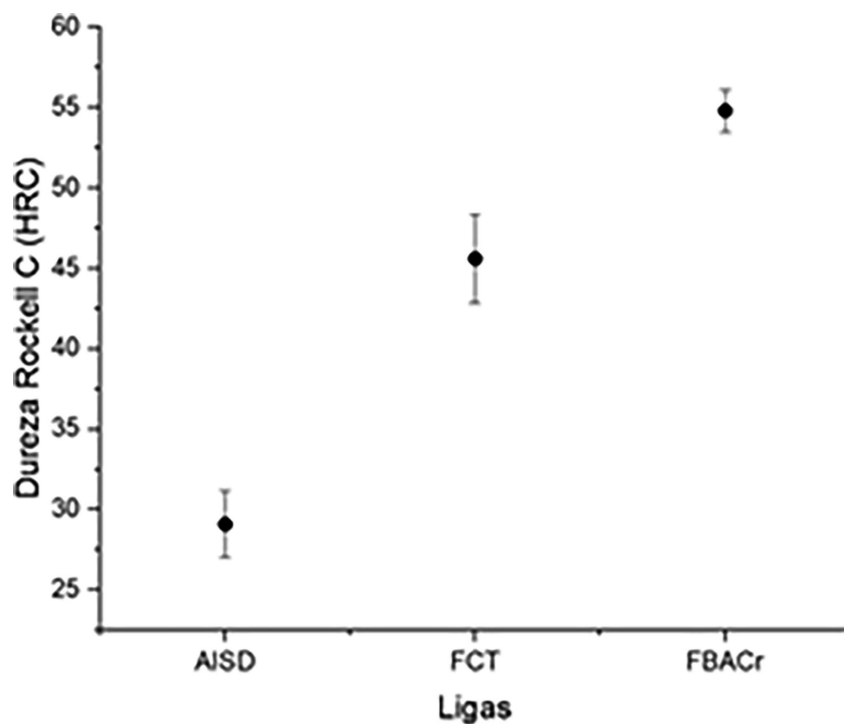


Figura 8: Valores de dureza das amostras de AISD, FCT e FBACr.

Segundo XYLEM [1], o aço AISD por ter baixa dureza não é comumente utilizado em bombeamento de águas residuais, devido ao líquido bombeado ter partículas abrasivas. Neste caso, utiliza-se materiais de maior dureza como o FCT e o FBACr. Segundo GHIBAN *et al.* [28], o aço AISD é mais utilizado onde o líquido bombeado é menos abrasivo e mais corrosivo.

3.3. Análise de desgaste hidroabrasivo

A Figura 9 mostra a perda de massa das ligas AISD, FCT e FBACr de acordo com a progressão do tempo (até 216 horas) e das velocidades tangenciais de 5,2 m/s e 7,1 m/s no ensaio hidroabrasivo.

Observa-se na Figura 9, que nas velocidades de ensaio hidroabrasivo de 5,2 m/s e 7,1 m/s, a perda de massa das ligas de AISD, FCT e FBACr são lineares e progressivas e significativamente menos acentuada na liga FBACr, indicando que é a mais resistente ao desgaste hidroabrasivo. Para as ligas AISD e FCT na velocidade de ensaio de 7,1 m/s, ocorreu inversão na perda de massa no tempo de ensaio de 102 horas, porém progredindo de forma muito similar, considerando dentro do campo de dispersão. Entretanto, na velocidade de ensaio de 5,2 m/s não ocorreu inversão da perda de massa das ligas AISD e FCT. A Tabela 2, mostra os valores das taxas de perda de massa em relação a velocidade de ensaio e entre as ligas.

Em relação as taxas de perda de massa das ligas (Tabela 2) para a razão de velocidade 7,1 / 5,2 m/s, indica que a liga AISD é mais afetada, seguida pelas ligas FBACr e FCT. Para a velocidade de ensaio de 5,2 m/s a razão da taxa de perda de massa entre as ligas FCT/AISD é de 2,9, que é significativamente menor quando comparada a razão entre as ligas FCT/FBACr que é de 9,8. Na velocidade de 7,1 m/s a razão da taxa de perda de massa é similar entre as ligas FCT/AISD que é de 0,9. Porém as ligas AISD e FCT apresentam alta taxa de perda de massa comparada a liga FBACr de 4,2 e 4,7, respectivamente.

Comparando às velocidades de ensaio, observa-se na Figura 9 e na Tabela 2, que a velocidade de 7,1 m/s a perda de massa das ligas neste estudo, foi significativamente maior em relação a velocidade de 5,2 m/s, indicando que a velocidade é um fator importante a ser considerado nos parâmetros para estimar a vida útil de determinado componente, estando de acordo com estudos de GANDHI *et al.* [29].

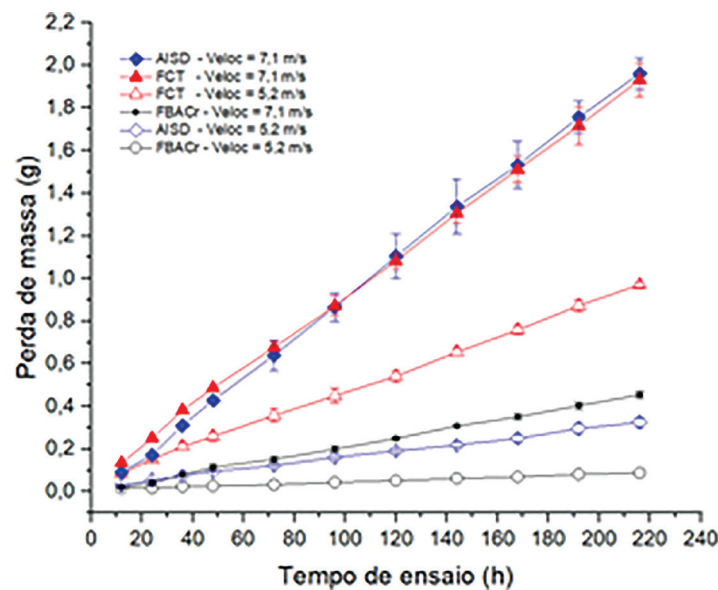


Figura 9: Perda de massa em relação ao tempo de ensaio hidroabrasivo, para as velocidades de 3,8 m/s e 5,8 m/s.

Tabela 2: Taxa de perda de massa (média) em função da velocidade e das ligas AISD, FCT e FBACr.

$V_R = 7,1 / 5,2 \text{ m/s}$			$V = 5,2 \text{ m/s}$			$V = 7,1 \text{ m/s}$		
AISD	FCT	FBACr	FCT/AISD	AISD/FBACr	FCT/FBACr	AISD/FCT	AISD/FBACr	FCT/FBACr
5,0	1,9	4,2	2,9	3,4	9,8	0,9	4,2	4,7

V_R : Razão de velocidade.

Na velocidade de ensaio de 5,2 m/s, a liga AISD (menor dureza) apresenta menor perda de massa em relação a liga FCT (maior dureza), que sugere estar relacionado com a maior resistência a oxidação e corrosão da liga AISD [28, 29], que contém cromo e níquel na composição química e microestrutura austenítica mais ferrítica e precipitados de carbonetos complexos [25]. Entretanto, a microestrutural da liga FCT é composta de matriz martensítica revenida (dura) mais grafita lamelar, que tem baixa resistência a oxidação-corrosão [30].

Para a liga FBACr na velocidade de ensaio de 7,1 m/s em comparação a liga AISD na velocidade de 5,2 m/s (Figura 9) as perdas de massas foram similares até o tempo de ensaio de 32 h, porém, a partir deste tempo, a perda de massa foi maior para a liga FBACr em relação a liga AISD. Neste caso, se destaca o efeito prejudicial da maior velocidade da mistura abrasiva na deterioração do material, mesmo a liga FBACr ser mais dura (por ter carbonetos eutéticos M_7C_3 e matriz martensítica) e conter alto teor de cromo dando resistência a oxidação e corrosão.

A Figura 10, mostra o aspecto superficial das amostras das ligas AISD, FCT e FBACr, após 216 horas de ensaio hidroabrasivo com velocidade de ensaio de 5,2 m/s e 7,1 m/s. Observa-se que as amostras da liga AISD, Figura 10 (a, d), apresentaram aspecto brilhante, polido, com alguns sulcos de pequena profundidade (não mensurados). As amostras da liga FCT, Figura 10 (b, e), apresentaram aspecto escuro, com crateras e sulcos. As amostras da liga FBACr, Figura 10 (c, f), apresentaram aspecto brilhante, polido com menor quantidade de crateras e sulcos do que as ligas AISD e FCT.

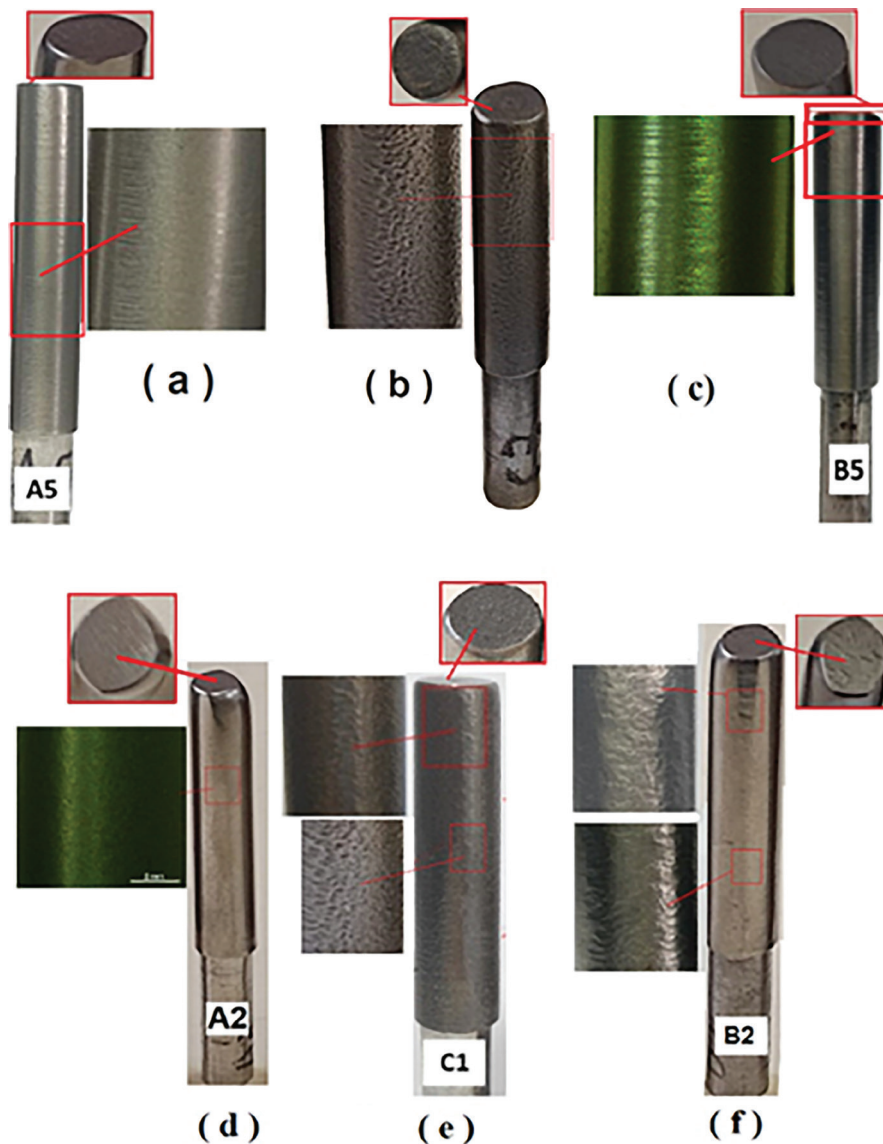


Figura 10: Aspectos superficiais das amostras após ensaio hidroabrasivo para as ligas: a, d) AISD; b, e) FCT; c, f) FBACr. a, b, c) Velocidade de 5,2 m/s; d, e, f) Velocidade de 7,1 m/s.

Nas amostras das ligas AISD, FCT e FBACr, na região da borda do topo, observa-se remoção acentuada de material em relação ao corpo das amostras, sendo maior na liga AISD. Essa perda, segundo GHIBAN *et al.* [28], ocorre devido ao impacto e deslizamento das partículas abrasiva (areia) sobre a superfície da amostra, sendo que: a) A interação, impacto e deslizamento da mistura (água/areia) promove erosão, micro deformação e microcorte, removendo material da superfície das amostras; b) O aumento da velocidade local da mistura acentua a remoção de material; c) A falta de sustentação na borda da amostra com ângulo de 90°, Figura 11(a, c), possibilita a remoção de material no início do ensaio e subsequente arredondamento da borda, formando caminho de fluxo, rolamento e deslizamento da mistura abrasiva.

A Figura 11, mostra os possíveis mecanismos de remoção de material da superfície (corpo e borda) das amostras submetidas ao ensaio hidroabrasivo, com base em STACHOWIAK e BATCHELOR [31].

Na Figura 11, juntamente com o mecanismo de desgaste abrasivo atuam também o desgaste por cavitação [32] e oxidação [25], com maior ou menor intensidade dependendo das características das ligas [28]. É conhecido que a liga AISD tem alta resistência a oxidação e corrosão e baixa resistência ao desgaste abrasivo (baixa dureza) [25]; a liga FCT tem baixa resistência a oxidação e corrosão e moderada resistência ao desgaste abrasivo [30]; a liga FBACr tem alta resistência ao desgaste abrasivo (alta dureza) e a resistência a oxidação e corrosão [33–35].

Na velocidade de ensaio de 7,1 m/s, há maior turbulência da mistura água-areia, maior energia cinética transmitida, maior frequência de impacto das partículas de areia, levando ao maior desgaste hidroabrasivo [30].

A Figura 12(a) mostra a degradação da superfície da amostra de FCT após 216 horas com velocidade de ensaio de 7,1 m/s. A Figura 12(b) ilustra um esquema (baseado em YILDIZLI *et al.* [36] e WANG *et al.* [38]) da remoção de grafita deixando um vazio, fratura e lascamento na matriz. A Figura 12(c, d, e) mostra o mecanismo de erosão de acordo com ABREU [38] e a Figura 12(f) a formação de trincas e deslocamento de material quando a grafita está ligeiramente abaixo da superfície [36].

A similaridade de perda de massa entre as ligas AISD e FCT, na velocidade de ensaio de 7,1 m/s, está relacionada a matriz austenita-ferrita (de menor dureza) da liga AISD, desgastando-se mais, decorrente da maior frequência de impacto das partículas de areia [39]. Por outro lado, a grande perda de massa da liga FCT, sugere-se que ocorre possivelmente pela combinação do efeito corrosivo (não mensurado) e erosivo da mistura (água – areia) e intensificado pelo efeito de trinca da grafita lamelar, aberta ou imediatamente abaixo da superfície (Figura 12.b, f), comportando-se como agente de nucleação e propagação de trinca [36, 37].

A grafita lamelar por ser frágil e de baixa resistência, quando aflora à superfície da amostra e por estar exposta ao meio, são removidas pelo fluxo, impacto e rolamento da mistura abrasiva (água-areia), formando frestas (Figura 12), fratura das bordas do vazio deixado pela grafita (Figura 12.b, c, d, e), crateras e trincas, contribuindo para o mecanismo de erosão frágil [40], degradando facilmente o material. Quando a grafita é paralela e próxima à superfície da amostra (Figura 12.b, f), os micros impactos sucessivos das partículas da mistura abrasiva promovem tensões e fazem surgir microtrincas na ponta da grafita e uma camada de material

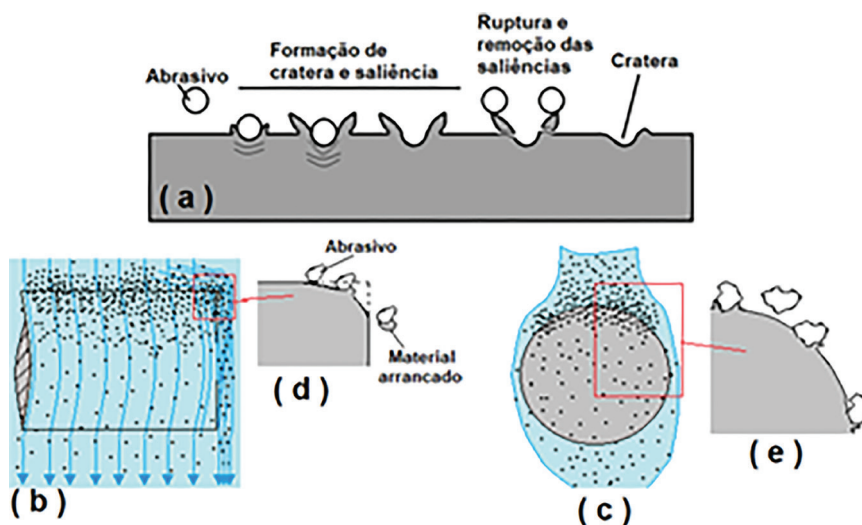


Figura 11: Esquema de interação da lama abrasiva (água/abrasivo) na amostra. a) Impacto 90° da partícula, b) Vista longitudinal. c) Vista de topo. d, e) detalhe do mecanismo de remoção de material pela partícula abrasiva.

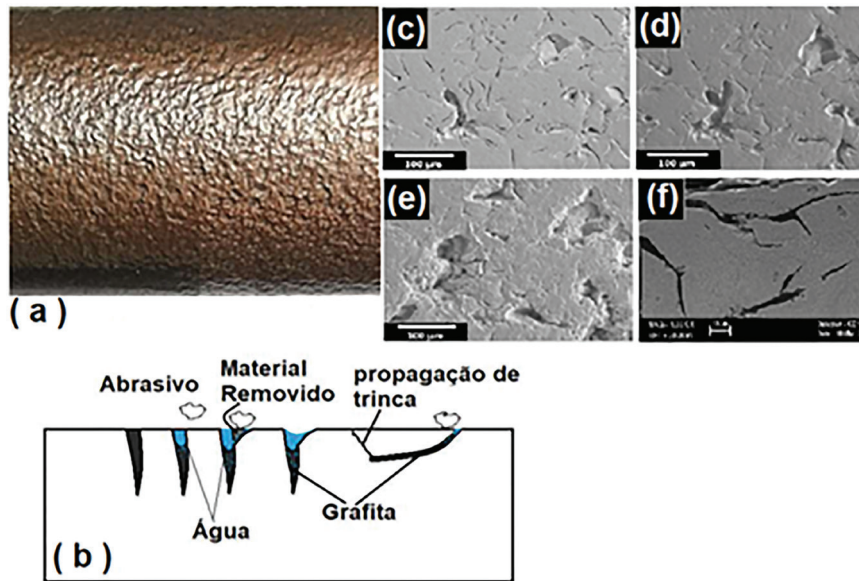


Figura 12: Crateras por impacto de partículas de areia e corrosão na liga FCT. a) Superfície da amostra após teste hidroabrasivo, b) esquema da erosão, arranque da grafita e da matriz, c, d, e) remoção de material por erosão, d) Formação de trinca subsuperficial [36–38].

relativamente grande (aproximadamente do tamanho da grafita) pode se separar da superfície, acelerando o processo de desgaste hidroabrasivo [36, 37, 40].

A liga de FBACr apresentou a menor perda de massa em relação as ligas AISD e FCT, nas velocidades de ensaio de 5,2 m/s e 7,1 m/s. Este comportamento está relacionado com as características químicas (alto teor de cromo e carbono) e microestruturais da liga FBACr, que apresenta partículas de carbonetos cromo (M_7C_3) de elevada dureza e cromo e níquel dissolvidos na matriz martensítica, aumentando a resistência à corrosão. A sinergia da resistência ao desgaste erosivo dos carbonetos M_7C_3 e da matriz martensítica, resultou em maior resistência a perda de massa no ensaio hidroabrasivo [35, 39].

A característica superficial das amostras da liga de FBACr, após ensaio hidroabrasivo, Figura 10(c, f), indica que os mecanismos de desgaste tendem a serem os mesmos do AISD e FCT, com possíveis fraturas e remoções de fragmentos dos carbonetos M_7C_3 (primários e eutéticos), microcorte e remoção da matriz, pelas partículas abrasivas, bem como o efeito corrosivo da água. A Figura 13 mostra de forma esquemática o mecanismo de desgaste erosivo, quando a mistura abrasiva se movimenta paralela à superfície da amostra. A Figura 13 (a, b) corresponde ao mecanismo de fratura dos carbonetos grandes. A Figura 13 (c), são para os carbonetos finos, que formam o composto eutético. O impacto sucessivo do abrasivo promove trincas e lascamento dos carbonetos que são removidos do material [16].

A Figura 14(a) mostra ao longo da extensão da superfície da amostra, o mecanismo de trinca e remoção de carbonetos, ocasionado pelo impacto do abrasivo projetado perpendicularmente, em que, partes do material se deslocam e são removidos. A Figura 14 (b) mostra o deslocamento de material sobre os carbonetos, quando estes estão na posição paralela à superfície erodida [35].

A Figura 15 mostra a relação entre a média da perda de massa total (g), nas velocidades de 5,2 m/s e 7,1 m/s no ensaio de desgaste hidroabrasivo e a dureza Rockwell C (HRC) das ligas AISD, FCT e FBACr.

A Figura 15 mostra que a maior perda de massa ocorreu nas ligas AISD e FCT na velocidade de ensaio hidroabrasivo de 7,1 m/s, sendo que, a liga FCT apresenta maior perda de massa na velocidade de ensaio de 5,2 m/s, mesmo tendo maior dureza comparado a liga AISD. A liga FBACr tem menor perda de massa nas velocidades de ensaio hidroabrasivo de 5,2 m/s e 7,1 m/s, indicando ser mais eficaz no desgaste hidroabrasivo.

Os resultados mostrados na Figura 15 indicam que a maior dureza da liga FCT em relação a liga AISD, sugere que não há uma relação direta no aumento da dureza para se diminuir a perda de massa, mas sim, atuam outros fenômenos como oxidação, corrosão e os fatores microestruturais [41], como a presença de grafita lamelar [36, 37]. Evidencia-se também que a liga FBACr apresenta alta resistência ao desgaste hidroabrasivo decorrente da alta dureza, promovida pelos carbonetos M_7C_3 e matriz martensítica que tem em solução parte de cromo e níquel dissolvido, dando resistência a corrosão e oxidação.

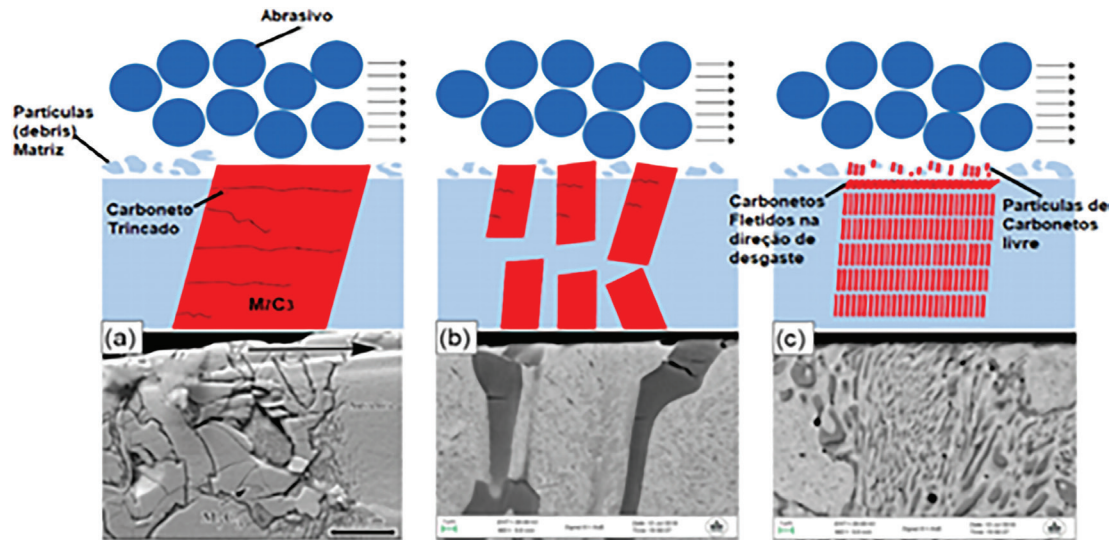


Figura 13: Esquema de remoção dos carbonetos no FBACr, quando a mistura erosiva é paralela à superfície da amostra [16].

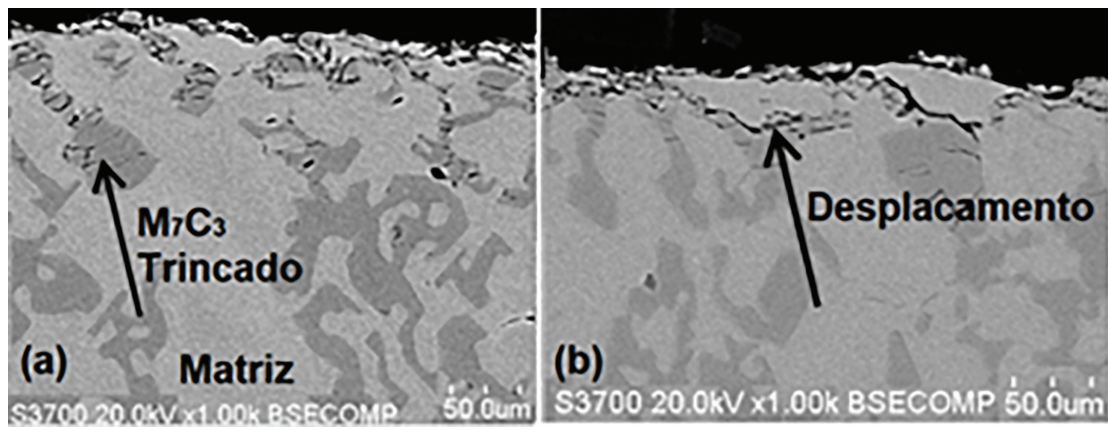


Figura 14: Trincas dos carbonetos M_7C_3 e remoção (deslocamento) de material quando mistura erosiva é perpendicular à superfície da amostra [35].

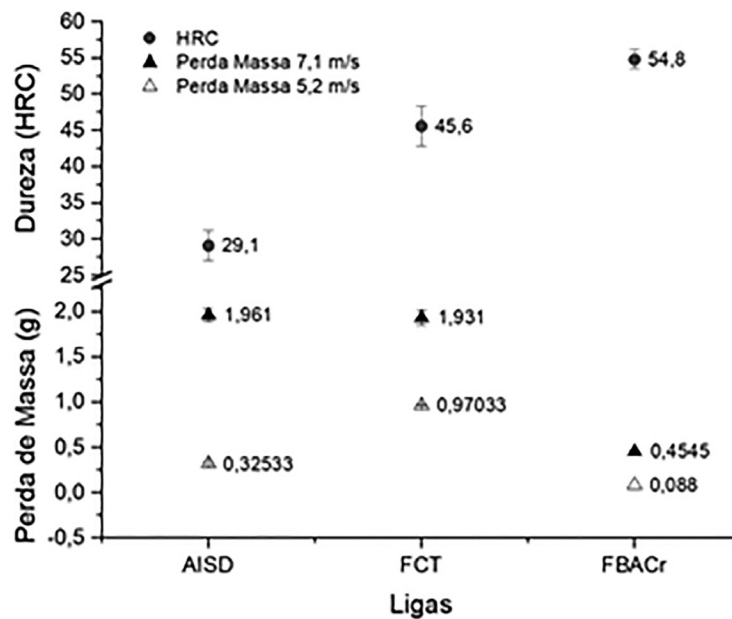


Figura 15: Perda de massa total e dureza HRC das ligas AISD, FCT e FBACr nas velocidades de ensaio hidroabrasivo de 5,2 m/s e 7,1 m/s.

4. CONCLUSÃO

Os resultados do ensaio de desgaste hidroabrasivo, permitiu acompanhar a evolução da perda de massa em função do tempo nas velocidades de ensaio 5,2 m/se e 7,1 m/s, constatando que a perda de massa aumenta progressivamente de forma linear ao aumento do tempo de ensaio e, permitiu mostrar também, o efeito prejudicial de velocidades maiores de ensaio no desgaste hidroabrasivo das ligas.

O aspecto das amostras da liga FCT apresenta forte indicio do efeito da corrosão e abrasão com a maior taxa de desgaste hidroabrasivo. Acredita-se que as grafitas que afloram e as subsuperficiais, com tendências paralelas à superfície, potencializam o desgaste corrosão e abrasão, decorrente aos vazios deixados pela remoção das grafitas e crateras promovidas pelo lascamento de material na região adjacente às grafitas, ocasionadas pelo movimento e impacto da mistura abrasiva.

A liga FBACr apresentou menor perda de massa em relação as ligas AISD e FCT, devido a microestrutura de carbonetos M_7C_3 e matriz martensítica dando a resistência a abrasão e com parte do cromo dissolvido na matriz, possibilita melhor resistência a oxidação e corrosão, características importantes para resistência ao desgaste hidroabrasivo.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos as seguintes instituições que possibilitaram a realização deste estudo: UNISOCIESC – Centro Universitário Sociesc, Shalom Polimentos, ANGRA – Tupytec, Xylem Brasil, Villares Metals e Instituto SENAI – Joinville/SC.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] XYLEM, *Material selection for wastewater pumps: raise performance and extend system lifetime* <https://www.xylem.com/siteassets/support/tekniska-rapporter/white-papers-pdf/material-selection-for-wastewater-pumps-1636.pdf>, acessado em novembro de 2022.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 9.648: estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário*, Rio de Janeiro, ABNT, 1986.
- [3] CHIAVELLI, H.G.R., TORRECILHAS, A.R., SELLA, M.R., *et al.*, Etapas de um sistema de tratamento de efluente e processos convencionais de tratamento: uma revisão de literatura. In: *IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, Ponta Grossa (PR), 04-06 dezembro 2019.
- [4] SAVIN, C., NEJNERU, C., PERJU, M.C., *et al.*, “Corrosion and wear of wastewater pumping systems”, *European Journal of Materials Science and Engineering*, v. 2, n. 4, pp. 119–126, 2017. https://ejmse.ro/articles/EJMSE_02_04_03_Savin.pdf, acessado em novembro de 2022.
- [5] GULICH, J.F., *Centrifugal pumps*, Berlin, Springer, 2008.
- [6] GLOVATSKY, O., ERGASHEV, R., SAPAROV, A., *et al.* Cavitation-abrasive wear working collectors of pumps, In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 869, n. 4, pp. 042006, Bristol, IOP Publishing, 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/4/042006>.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7879: Bombas Hidráulicas de Fluxo – classes segundo os materiais empregados*, Rio de Janeiro, ABNT, 1983.
- [8] AMERICAN NATIONAL STANDARD, *ANSI/API 610: centrifugal pumps for petroleum*, United States, Petrochemical and Natural Gas Industries, 2010.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A890: Standard Specification for Castings, Iron-Chromium Nickel-Molybdenum Corrosion-Resistant, Duplex (Austenitic/Ferritic) for General Application*, United States, ASTM, 2013.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A995: Standard Specification for Castings, Austenitic/Ferritic (Duplex) Stainless Steel, for Pressure-Containing Parts*, United States, ASTM International, 2013.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A48: Standard Specification for Gray Iron Castings*, United States, ASTM International, 2012.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A216/A216M-14: Standard Specification for Steel Castings, Carbon, Suitable for Fusion Welding, for High-Temperature Service*. United States, ASTM International, 2015.
- [13] REDDY, A.V., SUNDARARAJAN, G., “Erosion behaviour of ductile materials with a spherical non-friable erodent. Hydeabad, India”, *Wear*, v. 111, n. 3, pp. 313–323, 1986. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90190-0](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(86)90190-0).

- [14] SERRANO, R.O.P., FERREIRA JUNIOR, A.G., DE CASTRO, A.L.P., *et al.* Desgaste do Rotor por Abrasão: O efeito do bombeamento de água bruta com diferentes cargas de sedimento, In: *XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica*, Lima, Perú, 2016.
- [15] HONG, S., QIN, J., LIN, J., *et al.*, “Influences of sand concentration and flow velocity on hydrobrasive erosion behaviors of HVOF sprayed Cr₃C₂NiCr and WCeCr₃C₂Ni coatings Yuan Zheng”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 21, pp. 1507–1518, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.003>.
- [16] Fordyce, I., Annasamy, M., Sun, S.D., *et al.*, “The effect of heat treatment on the abrasive and erosive wear behaviour of laser metal deposited Fe-28Cr-2.7C alloy”, *Wear*, v. 458–459, pp. 203410, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2020.203410>.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM 2507: specified in ASTM A240 Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*, United States, ASTM International, 2005.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A532 / A532M: Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons*, United States, ASTM International, 1999.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR-ISO 6508-1: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell- Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*, Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- [20] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A247: Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings*, United States, ASTM International, 2010.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A800 / A800m: Standard practice for steel casting, austenitic alloy, estimating ferrite content thereof*, United States, ASTM International, 1995.
- [22] BRUNS, D.F., “Projeto, construção e validação de um equipamento de desgaste tipo hidroabrasômetro”, Tese de M.Sc., Centro Universitário Tupy UNISOCIESC, Joinville (SC), 2013.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM E11-13: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*, United States, ASTM International, 2013.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM-ISO 3310-1: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico*, Rio de Janeiro, ABNT, 2010.
- [25] FARGAS, G., MESTRA, A., MATEO, A., “Effect of sigma phase on the wear behavior of a super duplex stainless steel.”, *Wear*, v. 303, n. 1–2, pp. 584–590, Jun. 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.04.010>.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A247-17 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Casting*, United States, ASTM International, 2017.
- [27] LAIRD, G., GUNDLACH, R., RÖHRING, K., *Abrasion – resistant cast iron handbook*, Des Plaines, American Foundry Society, 2000.
- [28] GHIBAN, B., SAFTA, C.A., ION, M., *et al.*, “Structural aspects of silt erosion resistant materials used in hydraulic machines manufacturing”, *Energy Procedia*, v. 112, pp. 75–82, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1064>.
- [29] GANDHI, B.K., SINGH, S.N., SESHADRI, V., “Study of the parametric dependence of erosion wear for the parallel flow of solid-liquid mixtures”, *Tribology International*, v. 32, n. 5, pp. 275–282, 1999. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00047-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00047-X).
- [30] SADEGHI, A., MOLOODI, A., GOLESTANIPOUR, M., *et al.*, “An investigation of abrasive wear and corrosion behavior of surface repair of gray cast iron by SMAW.”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 6, n. 1, pp. 90–95, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.09.003>.
- [31] STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W., *Engineering tribology*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [32] CHENG, F., JI, W., QIAN, C., *et al.*, “Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet”, *Results in Physics*, v. 9, pp. 1585–1593, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2018.05.002>.
- [33] TABRETT, C.P., SARE, I.R., GHOMASHCHI, M.R., “Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys.”, *International Materials Reviews*, v. 41, n. 2, pp. 59–82, 1996. doi: <http://dx.doi.org/10.1179/imr.1996.41.2.59>.

- [34] ANIJ DAN, S.H.M., BAHRAMI, A., VARAHRAM, N., *et al.*, “Effects of tungsten on erosion-corrosion behavior of high chromium white cast iron.”, *Materials Science and Engineering A*, v. 454–455, pp. 623–628, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.128>.
- [35] KARAFYLLIAS, G., GALLOWAY, A., HUMPHRIES, E., “The effect of low pH in erosion-corrosion resistance of high chromium cast irons and stainless steels”, *Wear*, v. 420–421, pp. 79–86, Feb. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.021>.
- [36] YILDIZLI, K., KARAMIS, M.B., NAIR, F., “Erosion mechanisms of nodular and gray cast irons at different impact angles.”, *Wear*, v. 261, n. 5–6, pp. 622–633, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.042>.
- [37] WANG, B., HAN, X., BARBER, G.C., *et al.*, “Wear behavior of austempered and quenched and tempered gray cast irons under similar hardness.”, *Metals*, v. 9, n. 12, pp. 1329, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/met9121329>.
- [38] ABREU, M.F., “*Cavitation erosion mechanisms in cast irons*”, M.Sc. Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2021. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1603067/FULLTEXT01.pdf>, acessado em março 2023.
- [39] MAEKAI, I.A., HARMAN, G.A., “Effect of sediment concentration and particle size on erosion behavior of forged stainless steel”, *Materials Today: Proceedings*, v. 26, n. 2, pp. 1412–1417, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.293>.
- [40] Singh, J., Singh, S., “Neural network prediction of slurry erosion of heavy-duty pump impeller casing materials 18Cr-8Ni, 16Cr-10Ni-2Mo, superduplex 24Cr-6Ni-3Mo-N, and grey cast iron”, *Wear*, v. 476, pp. 203741, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2021.203741>.
- [41] Costa, S.M.C., Reginaldo, E.I., Costa, I., “Resistência à corrosão de ligas de ferros fundidos perlítico e bainítico em uma solução sintética de condensado a partir dos gases de combustão.”, *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 12, n. 1, pp. 20–28, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.0740>.